

## Métodos aplicados en líneas base ambientales del sector energético mexicano Methods applied in environmental baselines of the Mexican energy sector

L. L. Vázquez-Vázquez <sup>a</sup>, I. M. de la Garza-Rodríguez <sup>b</sup>, A. R. Rodríguez-Luna <sup>a</sup>, D. S. García-Zaleta <sup>a</sup>  
C. Méndez-Olán <sup>a</sup>, C. M. Morales-Bautista <sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> División Académica de Ciencias Básicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, 86690, Cunduacán, Tabasco, México.

<sup>b</sup> Facultad de Química, Universidad Autónoma de Coahuila, 25280, Saltillo, Coahuila, México.

### Resumen

En México, para reactivar las instalaciones petroleras se implementan Líneas Bases Ambientales o LBA, pero cuando se aplican en sitios con presencia de derrames añejos, estas presentan grandes restos en el muestreo, determinación de hidrocarburos y la comparativa con el uso de suelo. En este trabajo, se presenta un modelo para implementar LBA considerando dos aspectos importantes: modificaciones en el método de determinación de hidrocarburos, los cambios en las propiedades de los suelos debido a la presencia de hidrocarburos. En los resultados, se observó que el solvente halogenado mostró mejores resultados que el hexano, ya que el primero encontró más sitios por encima del límite permisible o LMP (4400 mg/Kg). Además, se encontró una relación entre los Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP) y los cambios en las propiedades de los suelos, tales como un aumento en densidad aparente y real (DA y DR, respectivamente), así como de conductividad eléctrica (CE) y el porcentaje de arenas (% A), y la disminución de capacidad de campo y el contenido de arcillas (CC y % R, respectivamente). Es importante señalar que, CC, pH y CE, aumentan cuando los hidrocarburos superan el límite permisible para uso agrícola.

**Palabras Clave:** suelo, hidrocarburos, diagnóstico, contaminación.

### Abstract

In Mexico, to reactivate oil facilities, Environmental Base Lines or LBAs are implemented, but when they are applied in sites with the presence of old spills, these present large remains in the sampling, determination of hydrocarbons, and comparison with land use. This paper presents a model to implement LBA considering two important aspects: modifications in the hydrocarbon determination method, changes in soil properties due to the presence of hydrocarbons. In the results, it was observed that the halogenated solvent showed better results than hexane, since the former found more sites above the permissible limit or LMP (4400 mg/Kg). In addition, a relationship was found between Total Petroleum Hydrocarbons (HTP) and changes in soil properties, such as an increase in apparent and real density (DA and DR, respectively), as well as electrical conductivity (EC) and the percentage of sands (% A), and the decrease in field capacity and clay content (CC and % R, respectively). It is important to note that CC, pH, and EC increase when hydrocarbons exceed the permissible limit for agricultural use.

**Keywords:** soil, hydrocarbons, diagnostic, pollution.

### 1. Introducción

El diagnóstico del impacto ambiental por contaminación por hidrocarburos es un tema muy estudiado, pero algunas revisiones han contribuido en encontrar diferencias entre un sitio y otro; por ejemplo, se ha observado que los factores de descomposición de estos contaminantes son mayores en lugares con gran actividad biológica, como ambientes

tropicales en comparación con aquellos con clima templado. Además, los productos de estas degradaciones generalmente varían de un sitio a otro (Ite y Semple, 2012; Tanez y Albert 2015). Debido a esto, algunos suelos pueden presentar efectos negativos por debajo del Límite Máximo Permisible (LMP) y otros no; por ejemplo, algunos pastos forrajeros se han desarrollado en suelos arcillosos con concentraciones de hidrocarburos mayores a los LMP, en cambio, en suelos

\*Autor para la correspondencia: carlos.morales@ujat.mx

**Correo electrónico:** leydivazquez4@gmail.com (Leydi Lorena Vázquez-Vázquez), iligarza4@hotmail.com (Iliana Margarita de la Garza-Rodríguez), ana.rodriguez@ujat.mx (Ana Rosa Rodríguez-Luna), david.garcia@ujat.mx (David Salvador García-Zaleta), candelario.mendez@ujat.mx (Candelario Méndez-Olán), carlos.morales@ujat.mx (Carlos Mario Morales Bautista).

arenosos el desarrollo de estas mismas especies ha sido limitado (Morales-Bautista *et al.*, 2016; Ite y Bok, 2019).

Asimismo, hay algunos trabajos que han encontrado que los compuestos polares resultantes de la degradación del petróleo crudo tienden a tener diferente hidrofobicidad entre un sitio y otro, algunos informes mencionan que, este comportamiento, no solo está asociado a factores biológicos o ecológicos, también al tipo de superficie donde se deposita el contaminante, ya que se ha observado que en áreas aluviales, los suelos arcillosos tienden a retener más hidrocarburos que los arenosos (Al-Dhabaan, 2019; Gómez-Mellado *et al.*, 2020).

Algunos estudios mencionan que esto podría tener efecto en la capacidad de campo, propiedad importante de los suelos relacionados con la supervivencia de las plantas, por lo que coinciden que la polaridad de los petróleos y las diversas texturas de los suelos deberían ser considerados en las regulaciones ambientales (Rodríguez-Wallenius, 2015; Haro, 2019).

Un caso especial es México, donde recientemente se han implementado diversos programas agrarios e inversión en infraestructura petrolera con fondos gubernamentales, estos necesitan ser evaluados debido al riesgo asociado, ya que algunos especialistas señalan que, aunque las regulaciones en este país suelen ser muy rigurosas, en algunas zonas no se conoce el nivel de contaminación, ya que algunas han sido restauradas o han sido sometidas a constantes derrames de contaminantes, a lo que habría que agregarle que algunos representan pasivos ambientales que no se han evaluado en décadas (Cunningham, 2019; Beck *et al.*, 2020).

Actualmente, los impactos preexistentes del sector energético sobre los ecosistemas se declaran en la Línea Base Ambiental o LBA (Morales-Bautista *et al.*, 2019). Sin embargo, en estos diagnósticos se utilizan estándares normativos, entre ellos, la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012 (Pons-Jiménez *et al.*, 2011; Martínez-Chávez *et al.*, 2017). Varios estudios han enfatizado que los diagnósticos en los que se utiliza esta norma presentan diversos errores debido a que no considera el tipo de suelo ni el tipo de hidrocarburo derramado, cuyas propiedades pueden variar entre ecosistemas y áreas petroleras (Adams *et al.*, 2016). Otros reportes mencionan que estas incertidumbres pueden aumentar ya que se ha observado que las condiciones ecológicas participan en la transformación y degradación de los hidrocarburos y, por lo tanto, en su composición y efectos (Maki *et al.*, 2001; González-Mille *et al.*, 2019).

En este tema, algunos informes de otros países han declarado que la evaluación implica la identificación de muestreo de control, válvulas de redirección, incineradores de control y residuos, baterías de separación, pozos petroleros y pozos de desechos (comúnmente conocido como contrapozo); además, en muchos casos, la infraestructura está cubierta por flora, deslizamientos de tierra o sedimentos, sin dejar de lado que existen sitios remediados adyacentes a estas instalaciones o suelos contaminados que fueron homogeneizados con suelos limpios (Lázaro, 2017; Andrade-Orozco *et al.*, 2018).

Con el fin de contribuir al tiempo y la calidad de los diagnósticos ambientales muchos países han permitido modificaciones a los métodos de normas; además, permiten agregar datos históricos para hacer comparaciones. Esto se debe a que muchos de los reglamentos poseen rezagos, ya que no se actualizan con la frecuencia adecuada. Especialmente, existe una brecha de información en el comportamiento de los

contaminantes según el tipo de suelo (Antonio y Georgina, 2014; Sánchez y Domínguez, 2017). Por estas razones, esta investigación tuvo como objetivo determinar la cantidad de hidrocarburos en suelos aledaños a 13 infraestructuras de un Campo Petrolero, todas ubicadas en Veracruz, México, con el fin de proponer una herramienta básica y comparativa, así como establecer antecedentes que permitan complementar los diagnósticos ambientales en este país (Castro *et al.*, 2013; Rodríguez, 2019).

## 2. Materiales y métodos

Se analizaron trece instalaciones petroleras; para esto, primero se realizaron perforaciones e inspecciones visuales alrededor de estos sitios para determinar la presencia de hidrocarburo y delimitar los polígonos de muestreo. Posteriormente, en cada sitio se tomaron muestras por triplicado ( $n = 3$ ), así mismo se tomó una muestra fuera del campo petrolero y sin aparente contaminación, la cual fue considerada como testigo (Tabla 1) (Mayer *et al.*, 2014; Palma-López *et al.*, 2015; Hernández-Valencia *et al.*, 2019).

A cada muestra se le aplicó un pretratamiento. Este consistió en la extracción de raíces y rocas; después estas se secaron (en un horno eléctrico a  $60^{\circ}\text{C}$ ), se molieron (molino manual para granos marca Sanbar) y se tamizaron (tamiz de acero inoxidable de malla # 5). Finalmente se determinaron los parámetros físicos y químicos de fertilidad especificados en la NOM-021-SEMARNAT-2000 ( $n = 3$ ) (pH, conductividad eléctrica (CE en dS/m), capacidad de campo (%CC), textura (arenas (%A), arcillas (%R) y limo (%L), densidad aparente y densidad real (DA y DR, respectivamente, ambas en  $\text{g/cm}^3$ ), porcentaje de porosidad (%Po, calculado por la relación de DR y DA) (SEMARNAT, 2002).

Tabla 1: Ubicación de las muestras en estudio.

ID	UTM 15 Q					
	m E	m N	m E	m N	m E	m N
P445*	357239	1992288	357238	1992281	357239	1992289
P630	359065	1993031	359063	1993041	359065	1993041
P631	359012	1992477	359011	1992473	359013	1992473
P632	359065	1992334	359065	1992330	359065	1992330
P655	359227	1993072	359223	1993071	359225	1993071
P659	359037	1991982	359034	1991980	359037	1991980
P660	359230	1992880	359231	1992884	359230	1992884
P668	359258	1992447	359266	1992443	359258	1992443
P678	359400	1993381	359411	1993381	359400	1993381
P685	359409	1992979	359412	1992981	359409	1992981
P688	359431	1992547	359433	1992547	359433	1992547
P693	359379	1993170	359383	1993179	359379	1993179
P696	359387	1992776	359390	1992780	359387	1992780
P702	359591	1993478	359593	1993482	359591	1993489

\* es la muestra testigo.

Así mismo, se determinó el contenido de hidrocarburos totales del petróleo o HTP, con el fin de comparar las diferencias entre los solventes, este método se realizó por dos vías, una con hexano (HTPH) y otra con diclorometano (HTPD) según la metodología especificada en la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012 (SEMARNAT, 2013; Morales-Bautista *et al.*, 2020).

### 3. Resultados y discusión

La muestra testigo (P445 en la Tabla 1 y en la Tabla 2) presentó textura arcilla-arenosa en todo el perfil, buena permeabilidad. Con color marrón (0-35 cm, 10YR5/4) y baja reactividad con peróxido (bajo contenido de MO). El nivel freático fue elevado de agua con propiedades gléyicas, sin material antropogénico en todos los perfiles.

En el caso particular de la presente investigación, algunos estudios establecen que el área cuenta con tres pisos: Cambisol, Gleysol y Luvisol (Zavala *et al.*, 2014; Vásquez-Montiel *et al.*, 2019). No obstante, una característica que destaca a los Cambisoles es que, por lo general, tienen una textura más arenosa al tacto en comparación con el resto de los suelos mencionados (De la Cruz *et al.*, 2018).

Con base en estas características y los valores de pH, texturas y la CE de la muestra testigo P445 con los estudios de Zavala *et al.* (2014) y Palma-López *et al.* (2015), se deduce que el suelo control es similar a un Cambisol.

Por otra parte, se ha discutido ampliamente la variabilidad de la solubilidad de diferentes fracciones del petróleo crudo, algunos estudios han observado que los crudos más pesados tienden a tener un mayor porcentaje de fracciones polares y

asfaltenos que son menos solubles con solventes no polares y, en gran medida, solubles en disolventes polares (Pons-Jiménez *et al.*, 2011; Morales-Bautista *et al.*, 2020).

Además, otros estudios mencionan que el contenido de fracciones polares es más abundante en petróleos intemperizados (Schwartz *et al.*, 2012, Rakhmatullin *et al.*, 2018). Lo anterior, podría explicar las diferencias entre los valores de HTPH y HTPD para una misma muestra (Tabla 2).

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, se observa que, para ambos solventes, las muestras P655, P659, P668 y P85 no superan el límite máximo permisible o LMP para hidrocarburos en suelo en México, establecido para uso agrícola (4400 mg/kg). Es importante destacar que las muestras P631, P688 y P702 por el método HTPH no superarían el LMP, pero considerando el método HTPD, sí están por encima de este indicador. Debido a las actividades agrícolas que se realizan en la zona, se debe considerar el porcentaje de hidrocarburos polares, cuyos impactos pueden observarse, principalmente, en el potencial hídrico (Marín-García *et al.*, 2016).

Por otro lado, está reportado que los hidrocarburos causan compactación del suelo, la cual puede medirse a través de cambios en densidades y porosidad. No obstante, algunos suelos con altos contenidos de arcillas expandibles 1:2 poseen la propiedad de retener algunos contaminantes en la fase porosa y hacen lenta su biodisponibilidad y, por lo tanto, están menos disponibles para el medio ambiente, por lo que la degradación es lenta en comparación con suelos mejor drenados como los fluvisoles (Gutiérrez y Zavala 2002; Mao *et al.*, 2019).

Tabla 2: Hidrocarburos y características de los suelos.

ID	HTPH	HTPD	Textura			pH	CE	DA	DR	Po	CC
			L	R	A						
		mg/kg	%			dS/m		g/cm <sup>3</sup>		%	
<b>P445*</b>	0	0	13.39 ± 0.61	28.85 ± 0.19	55.30 ± 0.30	4.38 ± 0.08	0.56 ± 0.09	1.06 ± 0.02	2.06 ± 0.05	48.64 ± 1.41	26.32 ± 0.58
<b>P630</b>	23899.16 ± 935.86	50806.09 ± 1989.49	17.22 ± 0.79	0.00 ± 0.00	8.98 ± 0.44	7.12 ± 0.15	2.57 ± 0.05	1.17 ± 0.03	2.25 ± 0.05	47.87 ± 1.69	29.29 ± 0.65
<b>P631</b>	2144.37 ± 83.97	4558.61 ± 178.51	16.27 ± 0.74	24.32 ± 0.61	57.27 ± 0.31	4.70 ± 0.12	5.04 ± 0.11	1.14 ± 0.05	2.20 ± 0.05	47.95 ± 2.22	34.22 ± 0.76
<b>P632</b>	12544.01 ± 491.21	26666.68 ± 1044.23	16.27 ± 0.75	8.76 ± 0.22	73.08 ± 0.4	6.10 ± 0.14	2.37 ± 0.05	1.33 ± 0.05	2.16 ± 0.05	38.52 ± 2.52	26.72 ± 0.59
<b>P655</b>	466.65 ± 18.27	992.03 ± 38.85	16.28 ± 0.74	32.11 ± 0.80	49.38 ± 0.27	5.50 ± 0.13	6.43 ± 0.13	1.16 ± 0.02	2.16 ± 0.05	46.08 ± 1.33	39.59 ± 0.88
<b>P659</b>	122.22 ± 4.79	259.82 ± 10.17	13.40 ± 0.61	35.03 ± 0.87	49.38 ± 0.27	4.50 ± 0.12	2.37 ± 0.05	1.30 ± 0.04	2.21 ± 0.05	41.04 ± 2.05	37.79 ± 0.87
<b>P660</b>	10488.52 ± 410.72	22297.03 ± 873.12	17.22 ± 0.79	3.89 ± 0.09	77.03 ± 0.42	4.53 ± 0.09	31.28 ± 0.63	1.10 ± 0.08	2.19 ± 0.05	49.98 ± 3.65	26.32 ± 0.58
<b>P668</b>	633.31 ± 24.80	1346.32 ± 52.72	16.27 ± 0.74	28.21 ± 0.70	53.33 ± 0.29	4.80 ± 0.12	2.87 ± 0.06	1.16 ± 0.03	2.13 ± 0.05	45.35 ± 1.74	37.99 ± 0.84
<b>P678</b>	15966.11 ± 625.21	33941.56 ± 1329.1	17.22 ± 0.78	0.97 ± 0.02	79.99 ± 0.44	5.8 ± 0.14	0.99 ± 0.02	1.2 ± 0.02	1.88 ± 0.04	36.07 ± 1.63	38.73 ± 0.86
<b>P685</b>	1866.60 ± 73.09	3968.12 ± 155.39	19.14 ± 0.87	22.38 ± 0.56	56.29 ± 0.31	6.20 ± 0.15	5.54 ± 0.11	1.25 ± 0.03	2.08 ± 0.05	40.05 ± 1.72	22.59 ± 0.50
<b>P688</b>	3144.33 ± 123.13	6684.39 ± 261.75	19.14 ± 0.87	16.54 ± 0.41	62.21 ± 0.34	5.91 ± 0.14	1.08 ± 0.02	1.07 ± 0.02	2.07 ± 0.05	48.48 ± 1.25	26.04 ± 0.59
<b>P693</b>	5177.60 ± 202.75	11006.80 ± 431.01	19.14 ± 0.87	11.68 ± 0.29	67.15 ± 0.37	5.91 ± 0.14	0.50 ± 0.01	1.17 ± 0.04	2.22 ± 0.05	47.41 ± 2.03	36.55 ± 0.81
<b>P696</b>	15866.11 ± 621.29	33728.98 ± 1320.78	19.14 ± 0.87	0.00 ± 0.00	79.00 ± 0.44	5.81 ± 0.14	0.79 ± 0.02	1.37 ± 0.03	2.35 ± 0.05	41.67 ± 1.62	33.61 ± 0.74
<b>P702</b>	3188.78 ± 124.87	6778.86 ± 265.45	19.14 ± 0.87	14.59 ± 0.36	64.19 ± 0.36	5.60 ± 0.13	1.00 ± 0.02	1.20 ± 0.02	2.22 ± 0.05	45.85 ± 1.55	34.22 ± 0.76

\* es la muestra testigo

Sin embargo, los vertisoles se agrietan durante las estaciones secas y se saturan durante las estaciones lluviosas, en cambio, los Gleysols se inundan constantemente, por lo que sus factores determinantes son, en su mayor parte, con alta humedad, porque la densidad depende de la variación del volumen según la masa del suelo, los cambios en sus densidades varían entre sí, siendo mayores en los vertisoles según la época del año (Trujillo-Narcía *et al.*, 2012).

Comparando estos reportes con los suelos en estudio, se ha identificado que algunos Cambisoles y Acrisoles poseen cantidades significativas de arcillas, pero el tipo predominante es 1:1 y aunque suelen tener buena porosidad y alta superficie superficial, no son tan expandibles, por lo que tienden a saturarse y fracturarse rápidamente (Mayer *et al.*, 2014; Hernández-Valencia *et al.*, 2019).

Además, en algunos sitios contaminados y restaurados se ha observado que los aluminosilicatos presentes y la acidez en estos suelos, provocan la adición de óxidos inorgánicos como la cal viva, para formar agregados que permiten disminuir la capacidad de difusión de los hidrocarburos y con ello disminuir su lixiviación y disponibilidad en el medio ambiente, pero al mismo tiempo, se ha observado que la capacidad de uso agrícola disminuye debido a la repelencia al agua (Pérez-Hernández *et al.*, 2017, Gómez-Mellado *et al.*, 2020).

En este sentido, se realizó un contraste de los hidrocarburos (HTPD) con variaciones de %R, %A, %CC y %Po según la concentración de hidrocarburos en el suelo (Figura 1) y se observó que con el aumento de HTPD, también aumenta el %A y, en contraste, disminuye el %R. Este fenómeno ha sido explicado en algunos trabajos, los cuales, han planteado la teoría de que, durante un derrame de hidrocarburos, estos tienden a depositarse, preferentemente, en la fase porosa de la matriz y, posteriormente, realiza un recubrimiento formando así partículas o aglomerados conocidos como micelas anfipáticas de alto o bajo peso molecular, se ha demostrado que este comportamiento depende de la densidad del hidrocarburo y de las propiedades de los suelos (Roy y McGill, 2000; Doerr *et al.*, 2002).

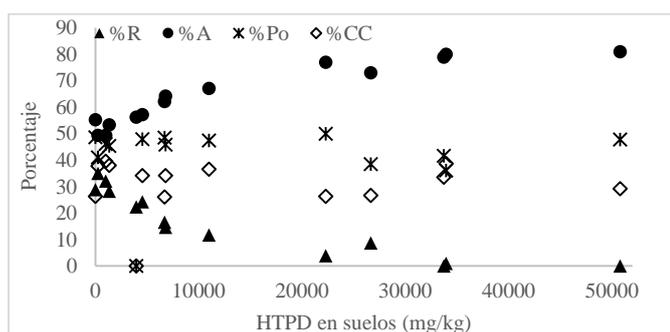


Figura 1: Variaciones de %R, %A, %CC y %Po según los HTP en suelo.

Sin embargo, cuando los hidrocarburos son sometidos a la intemperie, no siempre cumplen con esta tendencia, incluso, se sigue discutiendo los mecanismos de absorción y adsorción de estos en diferentes tipos de suelo (Lichner *et al.*, 2007; Ite *et al.*, 2012). También, las tendencias de la Figura 1 permiten valorar algunos efectos, tales como que el aumento de las arenas no provoca efectos sobre la clasificación textural a concentraciones inferiores a ~5000 mg/kg son franco arcilloso, pero a partir de este valor y en aquellas inferiores a ~25000

mg/kg, la mayoría de las arcillas se han perdido y la clasificación es franco arenoso y, para las muestras con concentraciones superiores a este último valor, las arcillas son inferiores a ~5 % y las arenas son superiores a ~90 %, por lo que la clasificación textural es arenofrancosa.

En este sentido la %Po y la Capacidad de Campo (CC), no presentan relación con la concentración del hidrocarburo, pero al comparar con el valor del testigo, se observa que la primera aumenta y la segunda disminuye. Algunos autores en la literatura mencionan que, con el aumento en la concentración de hidrocarburos, la repelencia al agua también aumenta, lo cual puede relacionarse con la reducción de %CC, así mismo, la formación de agregados hace suponer que las partículas aumentan su diámetro, lo cual podría también aumentar el espacio entre ellos y aumentar el %Po (Morales-Bautista *et al.*, 2016; Marín-García *et al.*, 2016).

Por otra parte, aunque se ha demostrado que los suelos tienen una gran capacidad amortiguadora de sales, el exceso de estas puede reducir el potencial osmótico y, en consecuencia, reducir el crecimiento de algunas plantas. El nivel de impacto de la salinidad se puede medir a través de la CE o del Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI). Se ha encontrado efectos despreciables de la salinidad en niveles de CE < 4 dS/m, PSI < 15 % y pH < 8.5 (SEMARNAT, 2002).

En cuanto al pH, algunos estudios consideran que este parámetro define la disposición de metales y nutrientes, ya que estos pueden formar complejos a valores de pH mayores de 8.5 y precipitar, por lo que están menos disponibles (Vereecken *et al.*, 2016).

En este contexto, aunque las muestras P659, P668, P631 y P660, presentan clasificación fuertemente ácida (pH < 5) y similar al control (P445) (según la norma mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, SEMARNAT, 2002), se observa una tendencia de aumento de pH conforme aumenta el contenido de hidrocarburo, ya que estas muestras poseen baja concentración de HTPD y en la clasificación tienden a ser moderadamente ácidas (pH entre 5.1 y 6.5) neutro (pH entre 6.6 y 7.3) conforme aumentan los HTPD (Figura 2).

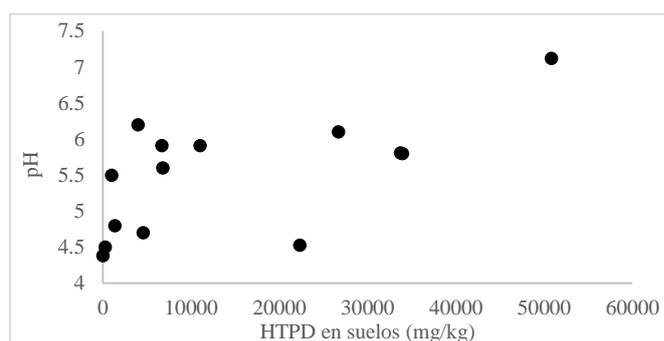


Figura 2: Relación pH y HTP en muestras de suelo.

Este evento ya ha sido reportado en otros trabajos en los que se menciona la capacidad amortiguadora y los cambios en las estaciones en áreas tropicales. Existe la teoría de que los efectos que los hidrocarburos tienen sobre las arcillas y la disminución del intercambio de cationes podría repercutir en el pleno desarrollo de las plantas (Zamora *et al.*, 2012; Guarino *et al.*, 2017).

En cuanto a la salinidad, en los valores de CE mostrados en la Tabla 1, se observa que los sitios P631, P655, P660 y P685

presentarían problemas de salinidad; sin embargo, aunque las zonas P630, P632, P659, P668, P678, P688 y P702 están por debajo de este indicador, son diferentes del control.

Por un lado, la muestra P660 mostró una CE alta (~ 31.28 dS/m), lo que puede estar relacionado con el hecho de que es muestra proveniente de un pozo de desecho, lugar donde se disponían residuos como recortes de perforación y aguas de producción. Algunos estudios, explican que las fracciones residuales de estos compuestos interactúan con cationes, materia orgánica y arcillas, en consecuencia, se ha observado la reducción de arcillas y la permeabilidad del suelo (Pérez-Hernández et al., 2017; Kuppusamy et al., 2020).

## Referencias

- Adams, R.H., Cerecedo-López, R.A., Alejandro-Álvarez, L.A., Domínguez-Rodríguez, VI, Nieber JL., (2016). Tratamiento de suelos contaminados con petróleo repelentes al agua de Bemidji, Minnesota, por desorción alcalina. *Revista internacional de ciencia y tecnología ambientales* 13(9), 2249-2260. doi:10.1007/s13762-016-1058-4
- Al-Dhabaan, F.A., (2019). Identificación morfológica, bioquímica y molecular de bacterias de biodegradación de hidrocarburos de petróleo aisladas de suelos contaminados con petróleo en Dhahran, Arabia Saudita. *Revista saudita de ciencias biológicas* 26(6), 1247-1252. doi:10.1016/j.sjbs.2018.05.029
- Andrade-Orozco, P., Ibáñez-Sánchez, M., Lema-Espinoza M., (2018). Levantamiento de la línea base ambiental del bosque de Jacarón, Colta, Chimborazo, Ecuador Polo del Conocimiento 3(8), 670-684. Available at: <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/741>
- Antonio, G.V.L., Georgina, F.V., (2014). Evaluación de riesgos para la salud de la zona 7 contaminada con benceno en el pasivo ambiental generado por la "Ex-Refinería 18 de marzo" en la Ciudad de México. *Ingeniería, Investigación y Tecnología* 15(3), 419-428. doi:10.1016/S1405-7743(14)70351-8
- Beck, H., Regidor C.B., Iber, P., (2020). Año Uno de AMLO México. *Disentimiento* 67(1), 109-118. doi:10.1353/dss.2020.0016
- Castro, A., Acevedo-Bermeos, D., Urbietta, J., Iturbe, R., Delgado-Rodríguez, O., (2013). Caracterización geoquímica y geoelectrónica de un sitio contaminado por hidrocarburos en el estado de Puebla, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 65(2), 405-418. Available at: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S140533222013000200021&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140533222013000200021&lng=es&nrm=iso)
- Cunningham, N., (2019). Disputas de combustible en México: Revivir la industria petrolera de México requerirá una ofensiva contra el robo de combustible en México. ¿Cuáles son las implicaciones para el mandato progresista de López Obrador? Informe NACLA sobre las Américas 51(2), 119-122. doi:10.1080/10714839.2019.1617466
- De la Cruz, SF., León, L.M.P., Díaz, D.Q., (2018). Coatzacoalcos: espacio social y desarrollo histórico del capitalismo en una región del sur veracruzano. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable* 2(1-2), 54-74. Available at: <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/26/28>
- Gutiérrez, C., Zavala, J., (2002). Rasgos hidromórficos de suelos tropicales contaminados con hidrocarburos. *Terra Latinoamericana* 20 (2), 101-111. Available at: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=573/57320202>.
- Doerr, S.H., Dekker, L.W., Ritsema, C.J., Shakesby, R.A., Bryant, R., (2002). Repelencia al agua de los suelos. *Revista de la Sociedad de Ciencias del Suelo de América* 66(2), 401-405. doi:10.2136/sssaj2002.4010
- Gómez-Mellado, A.Y., Morales-Bautista, C.M., De la Garza-Rodríguez, I.M., Torres-Sánchez, S.A., Sánchez-Lombardo, I., (2020). Evaluación de dos técnicas de remediación aplicadas a un sitio impactado por aguas de producción de petróleo. *Revista Terra latinoamericana* 38(1), 77-89. doi:10.28940/terra.v38i1.564
- González-Mille, D.J., Ilizaliturri-Hernández, C.A., Espinosa-Reyes, G., Cruz-Santiago, O., Cuevas-Díaz, M.D., Del Campo, C.C.M., Flores-Ramírez, R., (2019). Daño del ADN en diferentes especies de vida silvestre expuestas a contaminantes orgánicos persistentes (COP) del delta del río Coatzacoalcos, México. *Ecotoxicología y seguridad ambiental* 180, 403-411. doi:10.1016/j.ecoenv.2019.05.030
- Guarino, C., Spada, V., Sciarrillo, R., (2017). Evaluación de tres enfoques de biorremediación (atenuación natural, agricultura terrestre y bioaugmentación-agricultura asistida) para un suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo. *Chemosphere* 170, 10-16. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.11.165
- Haro, E.P., (2019). Prospectiva de la agricultura en México 2018-2024. *El Cotidiano* 34(213), 37-55. Available at: <https://search.proquest.com/openview/605100bf1c1e2cb77863a92f5d3f8981/1?pq-origsite=gscholar&cbl=28292>
- Hernández-Valencia, D.F., Santoyo-Pizano, G., Saucedo-Martínez, B.C., De La Cruz, I., Luis, J., Sánchez-Yáñez, J.M., (2019). Análisis de la dinámica de bioestimulación de un suelo contaminado por 75000 ppm de aceite residual automotriz. *Journal of the Selva Andina Research Society* 10(1), 25-36. Available at: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2072-92942019000100004&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2072-92942019000100004&script=sci_arttext)
- Ite, A.E., Semple, K.T., (2012). Biodegradación de hidrocarburos de petróleo en suelos contaminados. En *'Biotecnología microbiana: energía y medio ambiente'*. (Eds Rajesh Arora), 250-278. (CABI Publishing: Grupo CPI).
- Ite, A.E., Ibok, U.J., (2019). Papel de las plantas y los microbios en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo. *Revista Internacional de Biorremediación Ambiental y Biodegradación* 7(1), 1-19. doi:10.12691/ijebb-7-1-1
- Kuppusamy, S., Maddela, N.R., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., (2020). Enfoques para la remediación de sitios contaminados con hidrocarburos totales de petróleo. In (Eds S Kuppusamy, NR Maddela, M Megharaj, K Venkateswarlu), *Total Petroleum Hydrocarbons*. Vol I. Springer Publishing: Cham. UK. Pp. 167-205. doi:10.1007/978-3-030-24035-6\_7
- Lázaro Sánchez, I., (2017). La implementación de la reforma energética en México: Análisis jurídico de la ronda uno de licitaciones para la exploración y extracción de hidrocarburos. *Revista Jurídica Derecho* 6(7), 115-136. Available at: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2413-28102017000200008&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2413-28102017000200008&lng=es&nrm=iso).
- Lichner, L.U., Hallett, P.D., Feeney, D.S., Đugová, O., Šír, M., Tesaf, M., (2007). Medición de campo de la repelencia al agua del suelo y su impacto en el flujo de agua bajo vegetación diferente. *Biología* 62(5) 537-541. doi:10.2478/s11756-007-0106-4
- Maki, H., Sasaki, T., Harayama, S., (2001). Fotooxidación del petróleo crudo biodegradado y toxicidad de los productos fotooxidados. *Chemosphere* 44(5), 1145-1151. doi:10.1016/S0045-6535(00)00292-7
- Mao, J., Nierop, K.G., Dekker, S.C., Dekker, L.W., Chen, B., (2019). Comprender los mecanismos de repelencia al agua del suelo desde la nanoescala hasta la escala del ecosistema: una revisión. *Revista de suelos y sedimentos* 19(1), 171-185. doi:10.1007/s11368-018-2195-9
- Marín-García, D.C., Adams, R.H., Hernández-Barajas, R., (2016). Efecto del petróleo crudo en la repelencia al agua en un suelo aluvial arcilloso. *Revista internacional de ciencia y tecnología ambientales* 13(1), 55-64. doi:10.1007/s13762-015-0838-6
- Martínez-Chávez, C.G., Morales-Bautista, C.M., Alor-Chávez, M.D.J., (2017). Extracción de hidrocarburo pesado en suelo arenoso. *Avances en Ciencias e Ingeniería* 8(1), 9-16. Available at: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6294530>
- Mayer, P., Parkerton, T.F., Adams, R.G., Cargill, J.G., Gan, J., Gouin, T., You, J., (2014). Métodos de muestreo pasivo para sedimentos contaminados: justificación científica que respalda el uso de concentraciones libremente disueltas. *Evaluación y gestión ambientales integradas* 10(2), 197-209. doi:10.1002/ieam.1508
- Morales-Bautista, C.M., Adams, R.H., Hernández-Barajas, J.R., Lobato-García, C.E., Torres-Torres, J.G., (2016). Caracterización de petróleo fresco y meteorizado para posibles impactos a la fertilidad del suelo. *Revista internacional de ciencia y tecnología ambientales* 13(11), 2689-2696. doi:10.1007/s13762-016-1097-x
- Morales-Bautista, C.M., Lobato-García, C.E., Flores-Jiménez, J., Méndez-Olán, C., (2019). Cambios en las propiedades físicas y químicas de un suelo debido a un proceso de restauración aplicado a un derrame de hidrocarburos. *Cambios* 29, 1-14. doi:10.15174/au.2019.2154
- Morales-Bautista, C.M., Méndez-Olán, C., López-Martínez, S., Ojeda-Morales, M.E., (2020). Diseño de experimentos para optimizar el método Soxhlet-HTP para establecer diagnósticos ambientales de suelos contaminados: optimización del método Soxhlet-HTP por DOE. In (Eds E Carrillo-Cedillo, J Rodríguez-Ávila, K Arredondo-Soto, JM Cornejo-Bravo) *Diseño de experimentos para aplicaciones químicas, farmacéuticas, alimentarias e industriales*. pp. 33-52 (Editorial: IGI Global, California, México). doi:10.4018/978-1-7998-1518-1.ch002
- Palma-López, D.J., Salgado-García, S., Martínez, S.G., Zavala-Cruz, J., Lagunes-Espinoza, L.D.C., (2015). Cambios en las propiedades del suelo en plantaciones de Eucalipto de Tabasco, México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios* 2(5), 163-172. Available at: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-90282015000200004&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282015000200004&lng=es&nrm=iso)

- Pérez-Hernández, I., Ochoa-Gaona, S., Adams, R.H., Rivera-Cruz, M.C., Pérez-Hernández, V., Jarquín-Sánchez, A., Martínez-Zurimendi, P., (2017). Crecimiento de cuatro especies de árboles tropicales en suelos contaminados con petróleo y efectos de la contaminación por petróleo crudo. *Environmental Science and Pollution Research* 24(2), 1769-1783. doi:10.1007/s11356-016-7877-5
- Pons-Jiménez, M., Guerrero-Peña, A., Zavala-Cruz, J., Alarcón, A., (2011). Extracción de hidrocarburos y compuestos derivados del petróleo en suelos con características físicas y químicas diferentes. *Universidad y Ciencia* 27(1), 1-15. Available at: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-29792011000100001&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792011000100001&lng=es&nrm=iso)
- Rakhmatullin, I.Z., Efimov, S.V., Tyurin, V.A., Al-Muntaser, A.A., Klimovitskii, A.E., Varfolomeev, M.A., Klochkov, V.V., (2018). Aplicación de RMN de alta resolución (1H y 13C) y espectroscopia FTIR para la caracterización de crudos ligeros y pesados. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 168, 256-262. doi:10.1016/j.petrol.2018.05.011
- Rodríguez Padilla, V., (2019). Evaluando los contratos de exploración y extracción de hidrocarburos en México, 2015-2017. *Problemas del desarrollo* 50(197), 111-129. doi:10.22201/iiec.20078951e.2019.197.64669.
- Rodríguez-Wallenius, C., (2015). Acciones comunitarias contra megaproyectos en México (community actions against mega-projects in Mexico). *Revista GeoNordeste* 1, 173-196. Available at: <https://seer.ufs.br/index.php/geonordeste/article/view/4463>
- Roy, J.L., McGill, W.B., (2000). Conformación flexible en recubrimientos de materia orgánica: una hipótesis sobre la repelencia al agua del suelo. *Canadian Journal of Soil Science* 80(1), 143-152. doi:10.4141/S98-093
- Sánchez, I.L., Domínguez, E.E.H., (2017). Ronda uno. La implementación de la reforma energética de México. *Summa Iuris* 5(2), 231-257. doi:10.21501/23394536.2588
- SEMARNAT (2002). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación* 1, 80-85. Disponible en: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/rn/rm021-02.pdf>
- SEMARNAT (2013). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y directrices para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación. *Diario Oficial de la Federación* 1, 1-20. Disponible en: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5313544&fecha=10/09/2013](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5313544&fecha=10/09/2013)
- Tanee, F.B.G., Albert, E., (2015). Evaluación de reconocimiento de los efectos a largo plazo del derrame de petróleo crudo en las propiedades químicas del suelo y la composición de las plantas en Kwawa, Ogoni, Nigeria. *Revista de Ciencia y Tecnología Ambiental* 8(6), 320. doi:10.3923/jest.2015
- Trujillo-Narcía, A., Rivera-Cruz, M.D.C., Lagunes-Espinoza, L.D.C., Palma-López, D.J., Soto-Sánchez, S., Ramírez-Valverde, G., (2012). Efecto de la restauración de un Fluvisol contaminado con petróleo crudo. *Revista internacional de Contaminación Ambiental* 28(4), 360-374. Available at: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992012000400011&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000400011&lng=es&nrm=iso)
- Vásquez-Montiel, L., Sánchez-Hernández, R., Valdés-Velarde, E., Mendoza-Palacios, J.D.D., López-Noverola, U., Escamilla-Prado, E., (2019). Cambios edáficos provocados por el uso de abonos de origen natural en una región cafetalera de Veracruz, México. *Terra Latinoamericana* 37(4), 351-359. doi:10.28940/terra.v37i4.515
- Vereecken, H., Schnepf, A., Hopmans, J.W., Javaux, M., Or, D., Roose, T., Allison, S.D., (2016). Modelado de procesos del suelo: revisión, desafíos clave y nuevas perspectivas. *Vadose zone journal* 15(5), 1-57. doi:10.2136/vzj2015.09.0131
- Zamora, A., Ramos, J., Arias, M., (2012). Efecto de la contaminación por petróleo en las propiedades químicas y microbiológicas de un suelo de sabana. *Bioagro*, 24(1), 5-12. Disponible en: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20123208323>
- Zavala Cruz, J., Salgado García, S., Marín Aguilar, Á., Palma López, D.J., Castelán Estrada M, Ramos Reyes R (2014) Transecto de suelos en terrazas con plantaciones de cítricos en Tabasco. *Ecosistemas y recursos agropecuarios* 1(2), 123-137. Available at: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-90282014000200004&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282014000200004&lng=es&nrm=iso)