Rev. Int. Contam. Ambie. 28 (4) 361-374, 2012

EFECTO DE LA RESTAURACIÓN DE UN FLUVISOL CONTAMINADO CON PETRÓLEO CRUDO

Antonio TRUJILLO-NARCÍA[1], María del Carmen RIVERA-CRUZ[1], Luz del Carmen LAGUNES-ESPINOZA[1], David Jesús PALMA-LÓPEZ[1], Saúl SOTO-SÁNCHEZ[1] y Gustavo RAMÍREZ-VALVERDE[2]

[1] Colegio de Postgraduados Campus Tabasco, km 2 Periférico Carlos A. Molina., H. Cárdenas, Tabasco, Méx. CP 86570.
[2] Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Edo. México, México, CP 36230
*Autor responsable; atrujillonarcia@hotmail.com

(Recibido mayo 2011, aceptado julio 2012)

Palabras clave: compactación, densidad aparente, humedad, infiltración básica, retención de agua, textura

RESUMEN

Los suelos aledaños a instalaciones petroleras en México tienen riesgos de ser afectados por fugas o derrames de petróleo crudo o sus derivados. No obstante que el marco legal ambiental establece, a través de las normas oficiales mexicanas, los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y los lineamientos para la remediación, los parámetros geoquímicos utilizados no garantizan la recuperación de las condiciones originales del suelo. El funcionamiento y la resiliencia de las propiedades alteradas del suelo contaminado con petróleo y restaurado, requieren la medición de la eficiencia de la restauración comercial a través de parámetros que no están incluidos en la NOM-138-SEMARNAT/SA1-2008. Por ello, el objetivo de este estudio fue identificar las propiedades físicas y químicas del suelo restaurado para demostrar la recuperación de la calidad del suelo comparado con los valores correspondientes al suelo aledaño taxonómicamente similar. Se determinaron la cantidad de hidrocarburos totales del petróleo (HTP), ocho propiedades físicas y 10 químicas de un suelo restaurado en una extensión de 0.85 ha y se comparó con los valores de muestras colectadas en 0.377 ha de un Fluvisol testigo aledaño. Se colectaron muestras a dos profundidades (0-15 y 15-30 cm). Se identificaron diferencias estadísticas ($p<0.01$) entre ambos suelos para HTP, resistencia a la penetración (RP), densidad aparente (Dap), humedad a capacidad de campo (HCC), retención de agua (RA), infiltración básica (Ib), arcilla y limo; igualmente en las propiedades químicas potencial hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), nitrógeno total (N), fósforo aprovechable (P), potasio intercambiable (K), calcio intercambiable (Ca), magnesio intercambiable (Mg), sodio intercambiable (Na) y capacidad de intercambio catiónico (CIC). Se identificó correlación negativa ($p<0.01$) entre HTP con 10 variables físicas y químicas destacando Ib (–0.926) y HCC (–0.914), lo que evidencia que el suelo restaurado permanece afectado. La correlación fue positiva y significativa ($p<0.01$) entre HTP con seis variables físicas y químicas sobresaliendo Dap (0.935) y RP (0.928), lo cual muestra el origen de la degradación del suelo. Los datos indican que la calidad del suelo continúa modificada, de modo que la restauración física y química no fue eficaz y se requiere de nuevos procesos de restauración, de preferencia de naturaleza biológica. Este estudio aporta información para la selección de indicadores físicos y químicos del suelo que permitan un mejor seguimiento de su proceso de restauración, hasta considerarlo restaurado.

Key words: compaction, bulk density, moisture, basic infiltration, water retention, texture

ABSTRACT

Soils adjacent to oil facilities in Mexico could potentially be affected by crude-oil or oil-derivative spills or leaks. While the environmental legal framework sets forth, through Mexican official standards, the maximum allowable limits of hydrocarbons in soil and the remediation guidelines, the geochemical parameters used are no guarantee that the original conditions of soil are recovered. The functioning and resilience of the altered properties of remediated oil-polluted soil require measuring the efficiency of commercial remediation through parameters not included in NOM-138-SEMARNAT/SA1-2008. For this reason, the aim of this investigation was to identify the physical and chemical properties of remediated soil to prove the recovery of soil quality relative to the parameters of an adjacent and taxonomically similar soil. Parameters determined include total petroleum hydrocarbons (TPH), eight physical and 10 chemical properties of a remediated soil in an area of 0.85 ha and these were compared with figures obtained from samples collected in 0.377 ha of an adjacent control Fluvisol. Samples were collected at two depths (0-15 and 15-30 cm). Statistical differences ($p < 0.01$) were observed between both soil types for TPH, resistance to penetration (RP), bulk density (Bd), moisture at field capacity (MFC), water retention (WR), basic infiltration (Bi), clay and silt; also, on the following chemical properties: hydrogen potential (pH), electrical conductivity (EC), organic matter (OM), total nitrogen (N), usable phosphorus (P), exchangeable potassium (K), exchangeable calcium (Ca), exchangeable magnesium (Mg), exchangeable sodium (Na) and cation-exchange capacity (CEC). A negative correlation ($p < 0.01$) was identified beween TPH and 10 physical and chemical variables, among them Bi (–0.926) and MFC (–0.914), evidencing that remediated soil remains affected. A significant ($p < 0.01$) positive correlation was found between TPH and six physical and chemical variables, such as Bd (0.935) and RP (0.928), which reveals the origin of soil degradation. The data show that soil quality remains affected, and hence the physical and chemical remediation was ineffective, so that new remediation processes are required, preferably biological ones. This study provides information for selecting physical and chemical indicators of soil to enable a better follow-up of the remediation process until soil is deemed remediated.

INTRODUCCIÓN

La importancia del suelo reside en los servicios ambientales de soporte, regulación, provisión y culturales que proporciona al ser humano (SEMARNAT 2009). Este recurso natural es el soporte de los organismos, actúa como reserva de sustancias orgánicas y minerales, regula los intercambios y flujos en el ecosistema, es el sitio de la transformación de la materia orgánica, además es un sistema de purificación y amortiguamiento de las sustancias tóxicas (Gobat *et al*. 2004). Las actividades productivas realizadas por el hombre alteran el estatus del suelo, ejemplos son los vertidos industriales y los hidrocarburos procedentes de refinerías o de los derrames de petróleo durante el transporte (Seoánez *et al*. 1999), derrames desde las presas de decantación de los pozos petroleros (Beltrán 1985) ó por depositación atmosférica (Siebe *et al*. 1997, Jiménez 2002) de residuos de la quema de combustibles fósiles de fuentes fijas y móviles.

En la zona continental del sureste de México la exploración y la perforación petrolera se iniciaron de manera comercial durante la década de 1940. A finales de los años cincuenta se inició la perforación en la región noroeste del estado de Tabasco y a partir de 1973 aumentó la superficie por el descubrimiento de importantes yacimientos petroleros en el área Comalcalco-Terciario. La industria petrolera en Tabasco se consolidó como área productiva por los volúmenes de petróleo crudo y gas (West *et al*. 1976, Tudela 1989, Ortiz 2009) pero originó la degradación del suelo debido a frecuentes derrames de petróleo crudo (Beltrán 1985, CODEZPET 1985, González 1995, CIMADES 1997) o por depositación atmosférica (Siebe *et al*. 1997) de partículas transportadas por el aire. Las estadísticas oficiales de las emergencias ambientales por derrames de petróleo empezaron a registrarse en Tabasco en 1992 (González 1995). Según la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) durante el periodo de 1993 a 2009 ocurrieron en México 7998

emergencias ambientales, de las cuales 1315 (16.44 %) sucedieron en Tabasco. El 92.6 % de los derrames o fugas de petróleo se acumularon en el suelo debido principalmente a fugas de ductos (PROFEPA 2011).

El marco legal ambiental en México, en particular la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, establece que los suelos contaminados con materiales peligrosos deben ser restaurados para que recuperen sus condiciones originales. La norma oficial mexicana NOM-138-SEMARNAT/SA1-2008 (DOF 2010) se refiere a los procedimientos para el muestreo y las especificaciones para la caracterización y remediación del suelo contaminado por derrames de petróleo. Esta norma es de naturaleza geoquímica porque sólo considera el cumplimiento de concentraciones máximas permisibles de las fracciones ligera, mediana, pesada; la fracción soluble benceno-tolueno-etilbenceno-xileno (BTEX) y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Otro rasgo de esta NOM se refiere a especificaciones ambientales para la remediación del suelo. Una indica que no deben generarse mayores alteraciones ambientales que las producidas por el petróleo derramado, otra condiciona que el uso de formulaciones químicas no debe alterar las características y las propiedades del ecosistema. No obstante que estas especificaciones son de observancia obligatoria, persisten concentraciones altas de HTP en suelos restaurados en Tabasco (López 2010), e incluso las propiedades físicas y químicas de Fluvisoles, Vertisoles y Gleysoles restaurados permanecen alteradas en detrimento de los procesos ambientales, de la biodiversidad y de la fertilidad del suelo (Rivera 2001, Trujillo-Narcía y Rivera-Cruz 2006, Trujillo-Narcía *et al*. 2006, Dorantes *et al*. 2010, Jiménez *et al*. 2010, López 2010, López *et al*. 2010, Orozco *et al*. 2010, Ramírez *et al*. 2010, Salvador 2010, Rivera-Cruz *et al*. 2011, Trujillo-Narcía *et al*. 2011). El objetivo de este estudio fue seleccionar propiedades físicas y químicas del suelo que permitan evaluar la eficacia de la restauración de un Fluvisol contaminado por el derrame de petróleo crudo y la recuperación de su calidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación general y características ambientales del sitio

El sitio de estudio se localiza en la ranchería Los Cedros, municipio de Cunduacán, Tabasco (**Fig. 1**). El sitio forma parte de la planicie aluvial tabasqueña frente al Golfo de México. El clima según Köppen es Amf, con promedio de 2200 mm de precipitación durante el año y temperatura media anual mayor de 22 ºC. El material geológico es del Cuaternario, el suelo es de origen palustre y tiene textura fina (INEGI 2001). El terreno estudiado consta de 1.227 ha, 0.85 corresponden al suelo restaurado y 0.377 ha al testigo, aledaño al este del suelo restaurado.

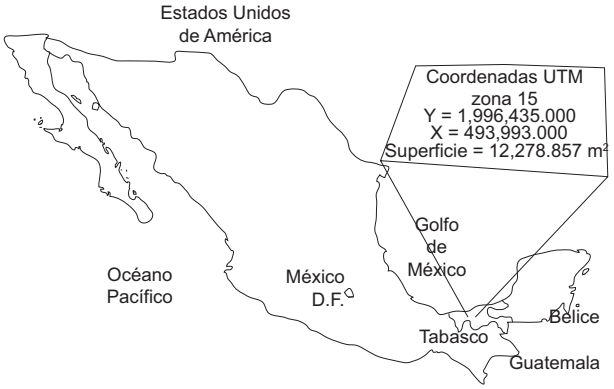


Fig. 1. Localización geográfica y política del sitio evaluado

Emergencia ambiental (derrame de petróleo crudo)

De acuerdo con el boletín de prensa no. 125 de PEMEX Región Villahermosa, del 26 de junio de 2006, el derrame de 50 barriles de petróleo del oleogasoducto de 24 pulgadas de diámetro ocurrió en el derecho de vía localizado en el km 1+992 de la batería Oxiacaque a la batería Íride. Esta emergencia ambiental fue restaurada mediante el contrato 425027810 asignado a una empresa privada y con fecha de terminación el 23 de diciembre de 2006 (PEMEX 2011).

Suelo testigo

El suelo testigo es un Fluvisol éutrico (**Fig. 2a**) con seis horizontes localizado en las coordenadas 18º 03' 19.5" latitud norte y 93º 03' 23.4" longitud oeste. La textura es migajón en el horizonte superficial, cambia a arenosa en la parte intermedia y es limosa o limo-arcillosa a partir de 71 cm de profundidad. La estructura es columnar muy fina, fina y mediana en el primer horizonte, granular fina y muy fina en horizontes arenosos y columnar mediana en el horizonte seis (93/97-105 cm de profundidad). No se encontró agua freática.

Suelo restaurado

El suelo restaurado se localiza en las coordenadas 18º 03' 20.9" latitud norte y 93º 03' 20.8" longitud oeste, tiene rasgos morfológicos diferentes

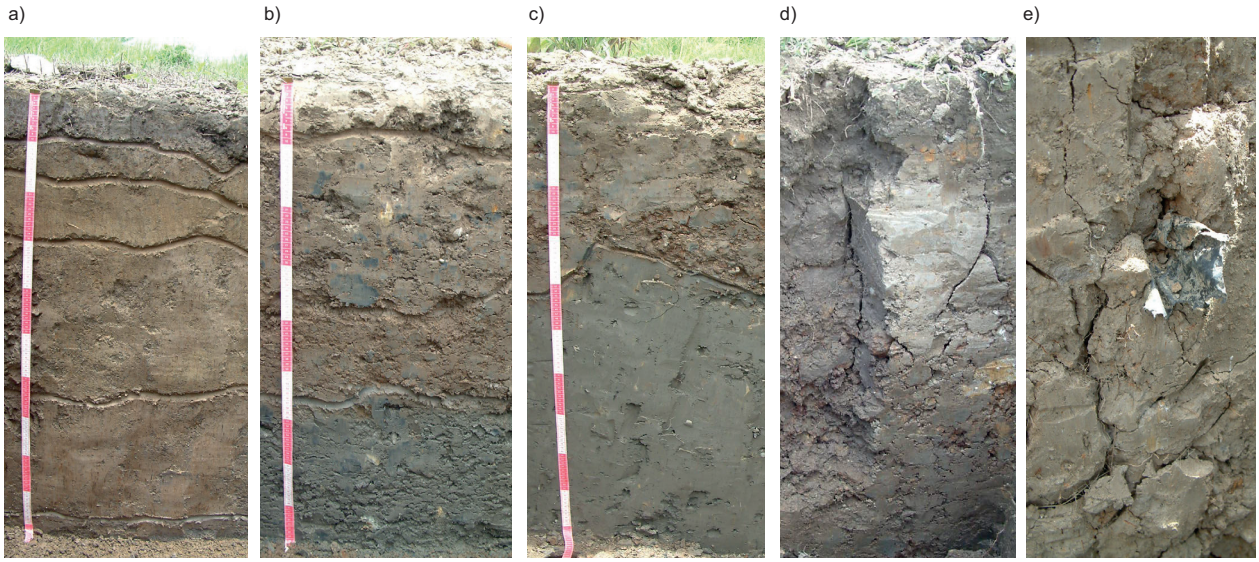


Fig. 2. Características morfológicas del suelo a) testigo, b) restaurado 1, c) restaurado 2, d) macroagregado en suelo restaurado y e) pedazos de plástico negro enterrados en suelo restaurado (Fotografías: A. Trujillo-Narcía)

(**Figs. 2b, c**) comparado con el suelo testigo, por efecto del petróleo crudo derramado y también por la remoción del suelo, por el mezclado mecánico con maquinaria, por el paso continuo de la maquinaria y posiblemente por las sustancias químicas de la tecnología aplicada. La morfología del suelo restaurado es heterogénea, la cantidad y el espesor de las capas es variable; el color de la matriz, la abundancia y el tamaño de las motas oscuras con fuerte olor de petróleo. Existen numerosas grietas y macroagregados en el suelo, se acentúa durante el periodo de sequía, marzo a junio (**Figs. 2d, 2e**). Se encontraron enterrados pedazos de plástico negro (**Fig. 2e**) utilizado como membrana para evitar la entrada de lixiviados en el suelo durante el tratamiento del suelo en las presas, grava hasta de cinco cm de longitud y numerosos pedazos de escombro de cemento hasta de 30 cm de largo, transportados junto con el suelo desde el área de tratamiento. Este material alóctono causa retrasos durante la mecanización del terreno. La delimitación de las capas se realizó por el color de la matriz. El agua freática con abundante iridiscencia y fuerte olor de petróleo se localizó a partir de 68 cm de profundidad.

Tecnología de restauración aplicada al suelo contaminado

La restauración consistió en la aplicación de un tratamiento físico y químico *ex situ*. Se excavó con retroexcavadora hasta de 3 m de profundidad, el suelo se trasladó a presas de tratamiento construidas sobre la pera del pozo petrolero Oxiacaque 41, localizado a 1 km al noreste del sitio restaurado. Aunque la compañía que restauró el sitio no proporcionó las especificaciones técnicas de la tecnología aplicada sí fue dada a conocer por personal que realizó el trabajo y también por el propietario del terreno. La tecnología de restauración consistió de seis etapas secuenciales. Primero, la recuperación por gravedad del petróleo liberado por el suelo y captado en una presa de lixiviación. Segundo la adición de surfactantes en el suelo, el surfactante diluido en agua en proporción de 1:10. Tercero la remoción continua, con retroexcavadora mecánica, de los montículos del suelo más surfactante. Cuarto la recuperación de los lixiviados en una presa. La quinta etapa fue la recuperación del aceite sobrenadante a través de separación por densidades, por último la sexta etapa fue la adición de peróxido de hidrógeno. El suelo tratado fue transportado de regreso al sitio en camiones de volteo y en góndolas.

Excavación de pozos agrológicos para el estudio de la morfología del suelo

Se excavaron seis pozos agrológicos, dos en el suelo testigo, dos en el restaurado 1 y dos en el restaurado 2. La excavación del suelo se realizó hasta 1.2 m de profundidad porque a partir de 1.4 m se encuentran siete ductos que transportan gas, petróleo o nitrógeno. La superficie de 0.85 ha del suelo restaurado se dividió en dos partes, el restaurado 1 (**Fig. 2b**) es un suelo que limita severamente la diversidad y el crecimiento vegetal, sólo crece una especie no cultivada de pasto (*Cynodon* sp), la biomasa vegetal seca varió de 0.0 a 17.9 g/m^2. La primera capa tiene 10 cm o menor espesor y la segunda hasta 120 cm. El suelo restaura-

do 2 tiene la primera capa hasta de 47 cm de espesor (**Fig. 2c**), el crecimiento vegetal es menos afectado y existe mayor diversidad de especímenes vegetales de ciperáceas (*Cyperus* spp), poáceas (*Cynodon* spp, *Echinochloa* sp, *Paspalum* spp y *Setaria* sp), convolvuláceas (*Ipomoea* sp y *Jacquemontania* sp), leguminosas (*Alysicarpus* sp, *Cassia* sp, *Crotalaria* sp, *Desmodium* sp y *Mimosa* spp) y malváceas (*Malachra* sp) (Jiménez *et al*. 2011, Trujillo-Narcía *et al*. 2011). La biomasa vegetal seca del suelo testigo fluctuó de 778 a 1293.13 g/m^2. En ninguno de los dos suelos restaurados se encontró fauna del suelo, sólo pocas conchas de caracoles muertos; en cambio en el suelo testigo la abundancia y diversidad incluyó anélidos, nemátodos, arácnidos, ácaros, moluscos, diplópodos, quilópodos, isópodos, colémbolos, dipluros, coleópteros, himenópteros, dictiópteros, hemípteras, larvas y huevos de insectos y cocones de anélidos. Los grupos más abundantes fueron himenópteros, dictiópteros e isópodos. La microflora del suelo restaurado tiene densidad máxima de 10^3 UFC de bacterias totales por gramo de suelo y el testigo hasta 10^7 UFC.

Colecta, preparación de muestras y análisis físico y químico del suelo

El estudio de las propiedades físicas y químicas del suelo se realizó en muestras de los suelos testigo, restaurado 1 y restaurado 2. Se colectaron de cada suelo cuatro muestras simples de la profundidad 0-15 cm e igual cantidad de la profundidad 15-30 cm. El total de muestras analizadas fue 12 de la primera profundidad y 12 de la segunda, siendo un total de 24. Las muestras se secaron bajo sombra a temperatura ambiente, se molieron con mazo de madera y se tamizaron en mallas de 0.5 y 2 mm de abertura. Los análisis físicos y químicos se realizaron de acuerdo con las rutinas especificadas en el NOM-021-RECNAT-2000 (DOF 2002) y otras rutinas especificadas en la **cuadro I**. Se realizaron 18 análisis físicos y químicos de cada muestra de suelo y cuatro repeticiones de cada variable indicada en el **cuadro I**. El estudio morfológico del suelo se hizo de cada horizonte y de cada capa (Cuanalo 1990). Estas variables no están incluidas en la NOM-138-SEMARNAT/SA1-2008.

Colecta, identificación y análisis de muestras para petróleo

Las muestras para el análisis de HTP se colectaron de acuerdo con las indicaciones establecidas en la NOM-138-SEMARNAT/SA1-2008 (DOF 2010). La muestra se introdujo en frasco nuevo de vidrio, lavado con hexano grado analítico, con tapa hermética de teflón, se mantuvo a 4 ºC tanto en campo como en laboratorio. Se tomaron muestras duplicadas y se identificaron con etiquetas, en cada una se anotaron el nombre, fecha de muestreo, sitio y profundidad de muestreo. La extracción de los HTP se efectuó durante ocho horas de reflujo con CH_2Cl_2 (Merck para análisis)

CUADRO I. RELACIÓN DE VARIABLES EVALUADAS, DEFINICIÓN Y TÉCNICAS APLICADAS

Propiedades	Definición	Técnica
• Textura (%)	• Proporción limo, arcilla y arena	• Sedimentación Bouyoucus (DOF 2002)
• Estructura del suelo	• Forma y tamaño de agregados	• Forma y tamaño (Cuanalo 1990)
• Resistencia a penetración (Mpa)	• Dureza o resistencia a la penetración del suelo	• Penetrómetro (Bradford 1986)
• Tasa de infiltración (cm/h)	• Velocidad constante de entrada del agua en el suelo	• Cilindros infiltrómetros (Bower 1986)
• Densidad aparente (g/mL)	• Relación masa/volumen	• Parafina (DOF 2002)
• Retención de agua (%)	• Capacidad de retención de agua en el suelo	• Recipiente con salida regulada de agua
• Humedad cap. campo (%)	• Contenido de humedad del suelo	• Gravimetría (DOF 2002)
	• Color del suelo	
• Color del suelo	• Cantidad de iones H^+ y OH^- en la solución del suelo	• Tabla colores Munsell
• pH		• Potenciometría (DOF 2002)
• Materia orgánica (%)	• Residuos vegetales y animales, vivos o muertos	• Dicromato de potasio (DOF 2002)
• Nitrógeno (%)	• Nitrógeno total	• Micro-Kjeldhal (DOF 2002)
	• Fósforo aprovechable	
• Fósforo (mg/kg)	• Potasio intercambiable	• Olsen (DOF 2002)
• Potasio (Cmol (+)/kg)	• Calcio intercambiable	• Acetato de amonio (DOF 2002)
• Calcio (Cmol(+)/kg)	• Magnesio intercambiable	• Acetato de amonio (DOF 2002)
• Magnesio (Cmol(+)/kg)	• Sodio intercambiable	• Acetato de amonio (DOF 2002)
• Sodio (Cmol(+)/kg)	• Capacidad de intercambio catiónico	• Acetato de amonio (DOF 2002)
• CIC (Cmol(+)/kg)	• Petróleo total presente en el suelo	• Acetato de amonio (DOF 2002)
• Hidrocarburos totales del petróleo (mg/kg base seca)		• Gravimetría (EPA 418.1 modificado; EPA 1986)

en equipo soxhlet (EPA 1986). La cuantificación se realizó por gravimetría, se utilizó una balanza analítica con precisión de 0.001 g. Cada 10 muestras se utilizó un patrón interno con 150 000 mg/kg de HTP, la recuperación varió de 89 a 97 %. Igualmente se utilizó una muestra blanco (arena lavada).

Interpretación de contenidos de petróleo y de las propiedades del suelo

La interpretación de los resultados de los análisis físicos y químicos del suelo fue mediante comparación con los valores especificados en la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF 2002). Las variables físicas no incluidas en esta norma mexicana, enlistadas en el **cuadro I**, se interpretaron tomando como referencia los valores del suelo testigo. La interpretación de los contenidos de petróleo del suelo restaurado se realizó mediante comparación con los resultados del suelo testigo. Se aplicó análisis de correlación y la prueba de comparación de medias (Tukey, $p<0.01$) con el procedimiento PROC GLM, SAS versión 9.1.3 (SAS 2005).

RESULTADOS

Concentración de hidrocarburos totales del petróleo en el suelo

La capa superficial (0-15 cm) del suelo restaurado tiene olor de petróleo, las cantidades de HTP variaron de 21 699 a 22 800 mg/kg base seca y en la capa subyacente (15-30 cm) fueron 26 596 a 29 874 mg (**Cuadro II**). En los suelos restaurados 1 y 2 existen gradientes de cantidades de petróleo que aumentan con la profundidad. La menor intensidad de olor de petróleo y la menor cantidad en la capa superficial puede estar relacionado con la atenuación natural por procesos físicos, químicos o biológicos, aunque no se descarta que sea una capa menos contaminada de origen. Otro factor que puede estar repercutiendo en la disminución del petróleo es la remoción del suelo, aireación y oxigenación producida por la mecanización del terreno con barbecho y rastreo con tractor para la siembra de cultivos como maíz, melón y pepino. La presencia de manchas oscuras en las capas subyacentes (**Figs. 2b, 2c**) contienen mayores cantidades de HTP hasta 60 000 mg/kg de HTP.

Características físicas del suelo

El color de la matriz del suelo testigo (**Fig. 2a**) es pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) en el horizonte superficial (0-10/13 cm) originado por la acumulación de MO, en los horizontes subyacentes aumenta la intensidad del color a 3/8 respecto al superficial, debido a la mayor cantidad de arena y al proceso de lavado vertical por el paso del agua, aunque nuevamente disminuye cuatro unidades la intensidad al pasar de 3/8 a 3/4, aparentemente por los procesos de reducción existentes en el horizonte más profundo (93/97-105 cm). En el suelo restaurado la matriz dominante es menos oscura (10YR3/3, pardo oscuro) (**Figs. 2b, c**) que la matriz del suelo testigo, posiblemente por la remoción y mezclado del suelo extraído desde tres metros de profundidad, aunque puede ser oscuro por la presencia de hasta 60 000 mg/kg de petróleo. En cuanto a las motas y vetas del suelo testigo variaron de gris muy oscuro (10YR3/1) por la presencia de materia orgánica en los horizontes 1 (0-10/13 cm) y 2 (10/13-15/23 cm) a pardo amarillento (10YR5/4) en el horizonte 1. El color de las motas del suelo restaurado es contrastante con las del suelo testigo ya que aumentaron tanto el brillo como la intensidad en el intervalo de pardo amarillento (10YR5/8), amarillo (10YR7/8) a rojo claro (2.5Y6/6), lo cual parece ser que se relaciona con el material alóctono sólido de hasta 4 cm de ancho con óxidos de Fe. Según comunicación verbal del propietario del terreno restaurado, este material alóctono procede de un suelo localizado a 600 m al noreste del sitio restaurado, donde maquinaria de la

CUADRO II. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS TESTIGO Y RESTAURADOS

Suelo	Prof. (cm)	HTP (mg/kg bs)	Resistencia (Mpa)	Dap (g/cm^3)	Humedad cap. campo (%)	Retención agua (%)	Ib (cm/h)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)
Rest. 1	0-15	22 800a±2 704*	7.7a±1.32	1.94ba±0.09	12.7b±2.0	76.97b±3.71	0.1b±0.0	41.7a±5.1	32.8b±6.3	25.5a±6.6
Rest. 1	15-30	26 591a±4 940	8.2a±1.02	1.93ba±0.04	12.8b±2.2	77.68b±4.14		39ba±6.7	34.7b±4.3	26.3a±8.5
Rest. 2	0-15	21 691a±3 9037	7.2a±1.21	1.86b±0.06	12.5b±2.4	77.28b±2.82	0.1b±0.0	41.7a±7.4	35b±4.4	23.8a±4.9
Rest. 2	15-30	29 871a±7 716	8.0a±1.14	2.1a±0.09	13.5b±2.3	78.04b±5.23		42.5a±8.2	36.5b±5.9	24.8a±3.5
Testigo 1	0-15	1 091b±392	1.3b±0.2	1.15c±0.07	29.7a±2.5	98.76a±1.26	8.33a±0.79	27b±4.2	49.6a±2.4	23.5a±2.1
Testigo 1	15-30	947b±306	1.2b±0.11	1.15c±0.09	29.7a±2.5	97.1a±1.33		27.5b±3.1	49.3a±0.5	23.3a±3.2

Rest.= Restaurado
* n=4

compañía restauradora excavó el suelo para formar un jagüey para uso en ganadería bovina (estanque para agua). La razón de la excavación es disponer de suelo limpio para mezclarlo con el suelo contaminado o restaurado, de modo que la mezcla suelo-suelo reduce la cantidad de petróleo en el suelo en un tiempo corto. El suelo restaurado tiene motas oscuras hasta de 17 cm de ancho, de colores gris (5YR4/1) y negro (7.5YR3/0), ocupan del 10 al 25 % del área de la capa (**Figs. 2b, 2c**), al fragmentar el terrón libera fuerte olor de petróleo.

La resistencia a la penetración del suelo tiene diferencias entre los dos suelos restaurados con relación al suelo testigo (**Cuadro II**). El suelo testigo tiene un máximo de 1.3 Mpa de resistencia pero los suelos restaurados registraron hasta 7.2 en la capa superficial de 0-15 cm y aumentó a 8.2 Mpa en la capa subyacente del suelo restaurado 1, donde el crecimiento vegetal y la diversidad fueron menores comparado con el suelo testigo (información no incluida en el presente documento).

En el suelo restaurado la densidad aparente (Dap) aumentó 81 % y la infiltración básica (Ib) disminuyó 83.3 veces (**Cuadro II**), posiblemente por la compactación causada por el paso continuo de camiones cargados hasta con 30 t de suelo restaurado por viaje más 20 t de peso de la unidad; por el paso continuo de motoconformadoras y retroexcavadoras durante la distribución del suelo restaurado en el sitio afectado. La mayor Dap fue 2.1 g/mL en la profundidad 15-30 cm del suelo restaurado 2 y la Ib cambió de 8.33 a 0.1 cm/h. La correlación fue inversamente proporcional (**Fig. 3**) entre la Ib y la Dap ($r^2 = 0.965$) y también entre los contenidos de petróleo respecto a la Ib ($r^2 = 0.937$). La humedad a capacidad de campo mostró diferencias estadísticas significativas, se caracterizó porque disminuyó hasta 138 % la retención de humedad del suelo restaurado con respecto al suelo testigo (**Cuadro II**). En pruebas de retención de agua realizadas en laboratorio con muestras de suelo molido y tamizado (suelo alterado) se identificó que el suelo restaurado retiene 28 % menos agua que el suelo testigo. La correlación entre ambas variables fue igualmente negativa ($r^2 = 0.84$) (**Fig. 3**).

La textura del suelo también registró cambios sustanciales en las proporciones de arcilla y limo pero no en la fracción arena (**Cuadro II**). La textura del suelo testigo es franco y franco-arcillosa y la del suelo restaurado cambió a arcillosa debido al incremento de la arcilla de 27 a 42 %, y en consecuencia la disminución de la proporción de limo de 49 a 32 %. El aumento de la cantidad de arcilla puede estar asociado con la inversión de las partes profundas del suelo restaurado, hasta tres metros de profundidad y la revoltura mecánica de posibles horizontes arcillosos subyacentes con el limo de los horizontes superficiales del suelo. Sin embargo, la presencia de minerales secundarios de óxidos de Fe evidencia que no corresponde al suelo de origen aluvial típico de un Fluvisol de la región. Este suelo alóctono se asocia con los rasgos morfo-

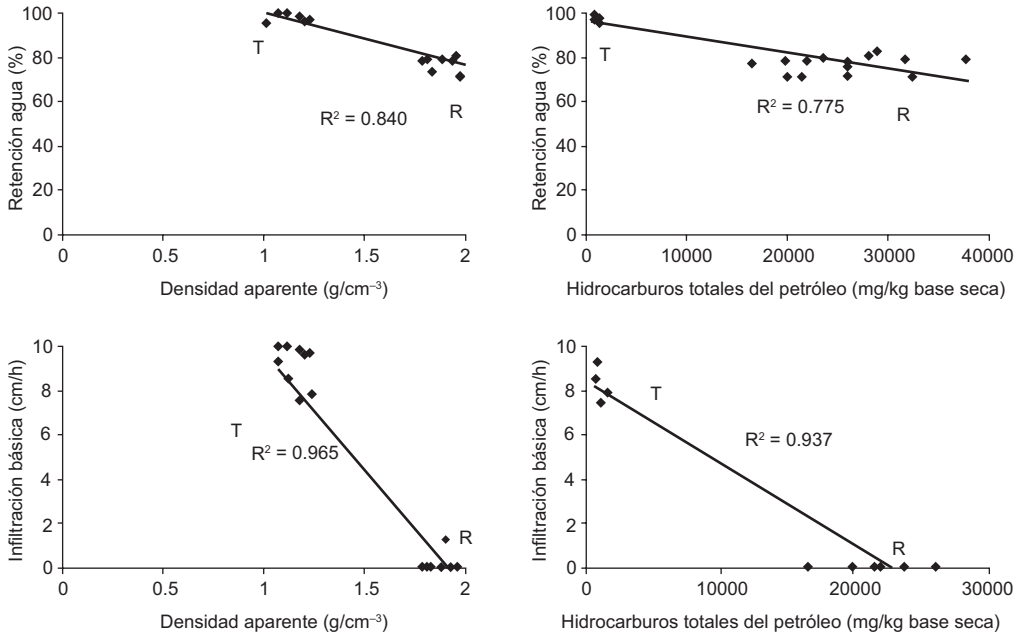


Fig. 3. Correlaciones entre retención de agua, densidad aparente, infiltración básica y concentración de hidrocarburos totales del petróleo en los suelos testigo (T) y restaurado (R) (n=4)

lógicos y de color típicos de Acrisoles o Luvisoles localizados a 600 m al noreste del sitio restaurado. La estructura del Fluvisol testigo es columnar muy fina, fina y mediana en el primer horizonte, granular fina y muy fina en horizontes arenosos y columnas medianas en el horizonte seis (93/97-105 cm de profundidad). La estructura del suelo restaurado fue modificada, la más frecuente es columnar muy grande, asimismo se encuentran macroagregados fácilmente separables de hasta 70 cm de altura (**Figs. 2d, 2e**). La presencia de numerosas grietas, originadas por el efecto de la textura arcillosa (39 a 42.5 %) y magnificadas posiblemente por el efecto aglutinante e hidrófobo del petróleo, puede ser la causa de la formación de macroagregados que se separan fácilmente como si fuesen corteza seca de árboles muertos. Entre las grietas de los agregados grandes es donde ocurren daños por rompimiento de las raíces, y el flujo del agua pasa a las capas subyacentes del suelo, de modo que la retención del agua en el espacio poroso es alterada. Se encontró también estructura laminar grande y muy grande.

Características químicas del suelo

El pH del suelo registró cambios (**Cuadro III**) por efecto de la presencia de petróleo o por la aplicación de los procesos de restauración del suelo mediante tecnología física y química. En el suelo testigo el pH es neutro y en el restaurado es medianamente alcalino. La CE en el suelo restaurado se incrementó hasta tres veces posiblemente por la influencia del petróleo y de las sustancias aplicadas en la restauración pero no origina efectos dañinos en la planta. La cantidad de MO en el suelo restaurado disminuyó en la capa superficial hasta cuatro veces al cambiar de 4.1 a 1.05 %, (**Cuadro III**), este cambio se relaciona con el efecto de fragmentación mecánica durante la remoción del suelo y por la aplicación de sustancias químicas oxidantes propias de la tecnología aplicada, clasificándose la MO de clase alta a baja (DOF 2002). Los contenidos de las bases intercambiables disminuyeron en el suelo restaurado, el K se redujo 4.5 veces respecto al suelo testigo, fue muy baja en el suelo restaurado y en el testigo fue media en el horizonte subyacente y alta en el superficial. Con respecto al Ca intercambiable, aunque fue 0.6 veces menor en el suelo restaurado, los dos suelos quedan clasificados con contenidos altos (DOF 2002). El Mg tiene contenido alto en el primer horizonte del suelo testigo y cantidades medias en los demás suelos. La CIC tiene clase alta en la primer capa del suelo testigo y clase baja en el suelo restaurado. El N total en el suelo testigo muestra cantidades altas en la capa superficial, medias en la subyacente y disminuye a muy bajo y bajo en el restaurado.

DISCUSIÓN

Concentración de hidrocarburos totales del petróleo en el suelo

En muestras de los suelo restaurados 1 y 2 los resultados de 21699 a 29871 mg kg^{-1} de HTP en base seca coinciden con el color oscuro y el olor de petróleo al momento del muestreo y en particular al fraccionar los terrones. No obstante que es un suelo

CUADRO III. PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS SUELOS TESTIGO Y RESTAURADOS

Suelo	Prof. (cm)	HTP (mg/kg bs)	pH (1:2, H_2O)	CE (dS/m)	MO (%)	Ca (cmol (+)/kg)	Mg (cmol (+)/kg)
Rest.*1	0-15	22.800a±2.704**	8.28a±0.12	0.36a±0.06	1.05b±0.16	19.25b±2.77	2.76b±0.29
Rest.1	15-30	26.591a±4.940	8.23ba±0.22	0.35a±0.07	1.09b±0.15	19.5b±3.27	2.36b±0.36
Rest. 2	0-15	21.691a±3.9037	8.25a±0.12	0.37a±0.05	1.16b±0.2	20.65b±2.80	2.57b±0.43
Rest. 2	15-30	29.871a±7.716	8.33a±0.15	0.38a±0.05	1.06b±0.14	19.73b±2.22	2.69b±0.3
Testigo 1	0-15	1091b±392	7.04bc±0.14	0.12b±0.01	4.10a±0.24	31.48a±4.82	3.63a±0.44
Testigo 1	15-30	947b±306	7.03c±0.3	0.12b±0.01	1.07b±0.15	31.25a±3.33	2.77b±0.38
Suelo	Prof. (cm)	HTP (mg/kg bs)	Na (cmol (+)/kg)	CIC (cmol (+)/kg)	N Total (%)	P-Olsen (mg/kg)	K (cmol (+)/kg)
Rest. 1	0-15	22 800a±2 704**	0.89a±0.14	10.73b±1.35	0.045c±0.013	9.6cb±1.19	0.18c±0.025
Rest.1	15-30	26 591a±4 940	1.02a±0.21	11.15b±0.78	0.058c±0.012	8.93cb±1.5	0.16c±0.022
Rest. 2	0-15	21 691a±3 903	1.06a±0.18	11.18b±1.32	0.067c±0.009	7.28c±1.57	0.17c±0.014
Rest. 2	15-30	29 871a±7 716	1.02a±0.17	10.85b±1.19	0.067c±0.012	8.33cb±0.87	0.15c±0.022
Testigo 1	0-15	1091b±392	0.21b±0.04	26.8a±2.52	0.202a±0.022	31.22a±2.99	0.68a±0.098
Testigo 1	15-30	947b±306	0.20b±0.03	13.33b±2.22	0.125b±0.021	11.98b±1.56	0.43b±0.08

*Restaurado
**n = 4

restaurado para la autoridad ambiental mexicana porque cumple los límites máximos permisibles de las cinco fracciones del petróleo indicadas en la NOM-138-SEMARNAT/SA1-2008 (DOF 2010), existen niveles altos de petróleo. Otros resultados recientes también muestran que Gleysoles restaurados aledaños a instalaciones petroleras aún conservan de 25 000 a 96 000 mg/kg de HTP en el suelo (Rivera-Cruz *et al*. 2011), que es influenciado por las inundaciones y que redistribuyen el petróleo removido por el agua. La restauración debería eliminar el petróleo en el suelo pero aún existen concentraciones altas que originan daños en plantas y en la fauna del suelo.

Características físicas del suelo

El matiz del color en húmedo de las matrices del suelo testigo y del restaurado es el mismo, son diferentes el brillo y la intensidad. La matriz del suelo restaurado varía de pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) en la capa superficial a pardo amarillento oscuro (10YR3/6) en la segunda capa. El color en húmedo de la matriz del suelo restaurado es pardo oscuro (10YR3/3). Este suelo libera fuerte olor a petróleo por lo que se considera que existe asociación entre cantidad de petróleo con el color ya que se extrajo hasta 60 000 mg/kg de HTP. En otros trabajos ya se han reportado cambios en el color de diversos grupos de suelos (Rivera-Cruz 2004, Dorantes 2008).

La mayor resistencia mecánica a la penetración se midió en ambas capas de los dos suelos restaurados, que variaron de 7.2 a 8.2 Mpa, originados por el tráfico frecuente de camiones con góndolas de 50 t de peso aplicados al suelo a través de un área máxima de las llantas de 2250 cm^2, dando una presión/resistencia de 22.2 kg/cm^2 (**Cuadro II**). El paso continuo de retroexcavadoras de 22 t y motoconformadoras de 15 t, para la distribución de los montículos de suelo restaurado, también contribuyó al incremento de la resistencia mecánica. Estos resultados coinciden con reportes de mecanización que originan la compactación del suelo agrícola (Sustaita-Rivera *et al*. 2000, Aruani y Behmer 2004) y que aumenta la Dap (Gerster y Bacigaluppo 2006). Otro factor que origina mayor resistencia mecánica es la textura arcillosa, que en este caso varió de 27 % del suelo testigo a 42.5 % en el suelo restaurado. Aunque se mecanizó el suelo restaurado con maquinaria agrícola, al final del ciclo se encontró nuevamente la dureza, posiblemente por la propiedad de agregación por petróleo, que une partículas pequeñas como las arcillas (Martínez y López 2001) y disminuye el espacio poroso y las grietas entre macroagregados. En particular ocurren cambios en la forma y continuidad de los poros, disminuye el tamaño y la cantidad de los macroporos (Blanco-Sepúlveda 2009), posiblemente se destruyen los poros de origen biológico (raíces) y los poros redondeados cambian a poros irregulares (Sustaita-Rivera *et al*. 2000, González-Barrios *et al*. 2011). Este incremento de la resistencia mecánica puede también estar asociado con el proceso de la recompactación atribuido al efecto de la precipitación pluvial y a la inestabilidad de la estructura (Wiereman *et al*. 2000). Valores de 3 Mpa constituyen un impedimento mecánico para la elongación de la raíz de la planta (Materechera *et al*. 1992, Vogel 1992, de León *et al*. 1998).

El análisis de las medias de tratamientos de la Dap mostró diferencias estadísticas ($p<0.01$), fue mayor en el suelo restaurado que en el suelo testigo (**Cuadro II**). No obstante que el suelo restaurado fue mecanizado con tractor para la siembra de cultivo de maíz seis meses antes del muestreo, se encontraron valores altos de Dap, que fue mayor en la capa subyacente donde no penetró el disco del implemento agrícola. Se ha reportado que el aumento de mecanización de las áreas agrícolas provoca compactación del suelo (Soane *et al*. 1981, Aruani y Behmer 2004, Gerster y Bacigaluppo 2006), igualmente los suelos con textura fina son más propensos a la compactación frente a los de textura gruesa.

La humedad a capacidad de campo mostró diferencias estadísticas significativas (**Cuadro II**), se caracterizó porque disminuyó hasta 138 % en el suelo restaurado con respecto al suelo testigo. El suelo restaurado retuvo 28 % menos agua que el suelo testigo. El suelo compactado tiene menor espacio poroso y en consecuencia se reduce el flujo del agua dentro de él (Wolkowski 1990, Yoshikawa *et al*. 2006). Además del efecto directo de la compactación en la acumulación de la humedad en el suelo, puede ser reducida también por el efecto hidrófobo del petróleo (Dorantes *et al*. 2010) y la repelencia al agua puede ser severa cuando el suelo tiene poca humedad (Li *et al*. 1997).

La Ib mostró diferencias estadísticas significativas (**Cuadro II**) y correlación negativa altamente significativa con la resistencia mecánica (Dap), con la proporción de arcilla, con Na y con HTP (**Cuadro IV**). Esto posiblemente por la ausencia de espacio poroso ya que la Dap tiene valores hasta de 2.1 g/cm^3 en suelo restaurado y resistencia a la penetración de 8.2 Mpa (**Cuadro II**), también por el menor espacio poroso y por la hidrofobicidad del petróleo. La Ib se relacionó positivamente con la MO y con la proporción de limo. La Ib es alterada por la mecanización con maquinaria agrícola debido a la com-

CUADRO IV. VALORES DE CORRELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO CON PETRÓLEO CRUDO

	N	P	K	Ca	Mg	Na	MO	CIC	CE	pH	Dap	Reten	HCC	Ib	Resist	Arci	Limo	Aren
HTP	–0.791**	–0.667**	–0.848**	–0.832**	–0.425*	0.898**	–0.588**	–0.676**	0.874**	0.750**	0.935**	–0.881**	–0.914**	–0.926**	0.928**	0.730**	–0.815**	0.187
N		0.884**	0.929**	0.748**	0.663**	–0.785**	0.847**	0.878**	–0.783**	–0.678**	–0.855**	0.876**	0.827**	0.876**	–0.817**	–0.632**	0.750**	–0.202
P			0.881**	0.658**	0.710**	–0.702**	0.953**	0.955**	–0.679**	–0.542**	–0.698**	0.717**	0.715**	0.728**	–0.672**	–0.556**	0.646**	–0.182
K				0.783**	0.716**	–0.846**	0.847**	0.917**	–0.846**	–0.732**	–0.879**	0.876**	0.873**	0.892**	–0.854**	–0.747**	0.772**	–0.064
Ca					0.443*	–0.786**	0.565**	0.622**	–0.859**	–0.744**	–0.848**	0.904**	0.911**	0.869**	–0.899**	–0.693**	0.750**	–0.080
Mg						–0.500*	0.692**	0.687**	–0.558**	–0.401	–0.528**	0.524**	0.516**	0.522**	–0.525**	–0.442*	0.458*	–0.085
Na							–0.566**	–0.662**	0.921**	0.806**	0.911**	–0.861**	–0.914**	–0.933**	0.892**	0.728**	–0.841**	0.201
MO								0.961**	–0.568**	–0.433*	–0.599**	0.625**	0.601**	0.612**	–0.581**	–0.521**	0.546**	–0.058
CIC									–0.646**	–0.520**	–0.697**	0.703**	0.694**	0.715**	–0.675**	–0.594**	0.612**	–0.073
CE										0.864**	0.930**	–0.870**	–0.948**	–0.936**	0.884**	0.822**	–0.815**	0.050
pH											0.832**	–0.775**	–0.804**	–0.829**	0.734**	0.701**	–0.727**	0.160
Dap												–0.917**	–0.923**	–0.968**	0.948**	0.751**	–0.815**	0.185
Reten													0.921**	0.951**	–0.944**	–0.660**	0.787**	–0.181
HCC														0.970**	–0.924**	–0.807**	0.842**	–0.088
Ib															–0.948**	–0.762**	0.848**	–0.177
Resist																0.734**	–0.842**	0.181
Arci																	–0.769**	–0.297
Limo																		–0.319

* La correlación es significativa al nivel de p = 0.05
** La correlación es significativa al nivel de p = 0.01

pactación del suelo que disminuye la porosidad (Martínez-Trinidad *et al*. 2008). La mecanización frecuente puede originar compactación a mayor profundidad del suelo y afecta su sustentabilidad (Gerster 2008).

El aumento de la resistencia a la penetración y la Dap, posiblemente inhibieron la entrada del agua en el espacio poroso del suelo y el consiguiente transporte de los nutrimentos. La compactación es algo más que la reducción de la porosidad, puede provocar la alteración de la circulación del agua dentro del suelo (Cerana *et al*. 2006), disminución del almacenamiento y retención del agua (Radford *et al*. 2001, Yoshikawa *et al*. 2006), aumento del arrastre de suelo superficial porque la infiltración es baja, limitación del crecimiento de la raíz y en consecuencia disminuye la absorción de nutrimentos (Yoshikawa *et al*. 2006).

La granulometría del suelo fue modificada y se identificaron diferencias significativas entre las proporciones de arcilla y limo pero no de arena (**Cuadro II**) entre los suelos testigo y restaurado. Estas diferencias sugieren la incorporación en el suelo restaurado de material alóctono, identificado por colores rojizos y amarillentos típicos de Acrisoles y Luvisoles (López 2010), o de capas subyacentes extraídas a más de 1.2 m de profundidad del mismo suelo restaurado. Igualmente estudios en el mismo suelo encontraron variaciones que representan indicios de modificación de la textura original (Salvador 2010). Resultados de incrementos de cantidades de arcilla y de arena fueron encontrados en suelos tropicales contaminados con petróleo respecto al suelo testigo (Gutiérrez y Zavala 2001) y también en suelos restaurados se encontró incremento de la proporción de arcilla (Salvador 2010).

La arcilla mostró correlación positiva muy significativa con la Dap y la resistencia mecánica a la penetración pero fue negativa con la retención de humedad, humedad a capacidad de campo y con la Ib (**Cuadro IV**). En cuanto a la correlación de la cantidad de limo fue muy significativa con retención de humedad, humedad a capacidad de campo y con Ib pero fue negativa la correlación del limo con Dap, con la arcilla y con la resistencia a la penetración.

Propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas del suelo fueron modificadas por efecto de la restauración, las

medias tuvieron diferencias estadísticas significativas (**Cuadro III**) y se identificaron correlaciones positivas y negativas entre medias de las propiedades estudiadas (**Fig. 3**, **Cuadro IV**). Se identificó que las 10 propiedades químicas evaluadas fueron modificadas por el efecto de las sustancias aplicadas para el tratamiento físico y químico de la descontaminación del suelo o por la remoción continua del suelo con maquinaria. La fertilidad del suelo restaurado disminuyó por el efecto directo del petróleo.

La correlación entre la cantidad de HTP fue negativa con los contenidos de N, P, K, Ca, Mg, MO y CIC pero fue positiva con los valores de Na, CE y con el pH (**Cuadro IV**). La disminución de los elementos mayores y menores y de la MO puede estar asociada con la destrucción de los residuos vegetales y animales durante la remoción constante del suelo en la presa de tratamiento durante la descontaminación o incluso la materia orgánica que se forma no se acumula en el suelo porque el agua no penetra en el espacio poroso del suelo, por ello las cantidades disminuyeron hasta cuatro veces en el suelo restaurado. Esto se afirma porque se identificaron correlaciones positivas muy significativas entre N, P, K, Ca, Mg, MO y CIC, variables que se encuentran estrechamente relacionadas porque proceden del mismo sustrato orgánico acumulado en el suelo. Aumentaron también hasta cuatro veces en el suelo restaurado los valores del pH, la CE y el Na, posiblemente por el efecto de las sustancias químicas desengrasantes aplicadas o por el agua congénita rica en sales asociada con el petróleo crudo desde el yacimiento.

En los suelos restaurados los niveles de MO, de P y K disminuyeron cerca de tres veces, por el contrario, se incrementó dos veces la CE y cuatro el Na, originando el cambio de pH neutro a medianamente alcalino (DOF 2002). Resultados de investigaciones muestran que la fertilidad del suelo disminuye cuando se aplican tecnologías físicas y químicas para la restauración de suelos contaminados con petróleo crudo (Trujillo-Narcía *et al*. 2006, Salvador 2010).

CONCLUSIONES

Los resultados del presente trabajo indican que la fuga de petróleo crudo del oleoducto originó la contaminación del suelo y la tecnología de restauración modificó las propiedades físicas y químicas del suelo, posiblemente por el efecto de las sustancias químicas adicionadas, por el paso continuo de la maquinaria pesada utilizada para el transporte del suelo y por la resistencia del petróleo crudo. Las propiedades físicas y químicas del suelo restaurado son de menor calidad. De acuerdo con los valores de la norma mexicana NOM-021-RECNAT-2000, la fertilidad del suelo restaurado disminuyó, igualmente los servicios ambientales de hábitat, refugio para la fauna y para la recarga y acumulación de agua. El conocimiento actual de la baja calidad del suelo restaurado debe ser considerado para futuras obras de restauración de suelos contaminados con petróleo crudo.

RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados de este estudio se recomienda: a) evitar la descontaminación del suelo a través de la adición de suelo limpio porque se incrementa la proporción de arcilla. Esto favorece el aumento de la densidad aparente y la resistencia a la penetración debido al paso de maquinaria pesada; b) aplicar un programa de mecanización agrícola para evitar la compactación del suelo por el tráfico de los vehículos pesados que trasportan y que distribuyen el suelo restaurado; c) incluir en la NOM-138-SEMARNAT/SA1-2008 o en una nueva NOM, las propiedades del suelo utilizadas en este estudio.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece el financiamiento de Fondos Mixtos CONACyT-Gobierno del Estado de Tabasco a través del proyecto TAB-2009-C18-122174. Igualmente agradece el financiamiento del Fideicomiso Revocable de Administración e Inversión No.167304 para el establecimiento y operación de los fondos para la investigación y desarrollo tecnológico del Colegio de Postgraduados, Convocatorias 2009 y 2010. Al Sr. Rubén Sánchez Torres y a su esposa Leticia García Tiquet, por todas las facilidades para la realización del estudio en sus terrenos. Al M. en C. Rodrigo Dorantes Avelino y al M.I.P.A. Juan Carlos Salvador Chablé por su ayuda durante el trabajo de campo. Se reconocen y agradecen los valiosos comentarios de los dos revisores anónimos.

REFERENCIAS

Aruani M.C. y Behmer S. (2004). Efecto de la granulometría y la compactación del suelo sobre la distribución de raíces del manzano. RIA 33, 43-54.

Beltrán J.E. (1985). *Petróleo y desarrollo*. 1a. ed. Centro de Estudios e Investigación del Sureste. Villahermosa, Tab. 346 p.

Blanco-Sepúlveda R. (2009). La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. Agrociencia 43, 231-239.

Bouwer H. (1986). Intake Rate: Cylinder Infiltrometer. En: *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. (A. Klute, Ed.). 2a ed. Agronomy Monograph no. 9 pp. ASA, SSSA, Madison, Wisconsin, pp.

Bradford J.M. 1986. Penetrability. En: *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. (A. Klute, Ed.). 2a ed. Agronomy Monograph no. 9 ASA, SSSA, Madison, Wisconsin. Pp.

Cerana J., Rivarola S., Arias N., Banchero A.C., Sione S., Wilson M., Pozzolo O. y de Battista J.J. (2006). Determinación de las condiciones físicas de Vertisoles, orientadas al manejo sustentable con la siembra directa. En: *Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono sur.* (R. Díaz R. y C. Rava, Eds.). IICA. PROCISUR. Montevideo, Uruguay. pp. 109-121.

CIMADES (1997). *Análisis de la calidad del agua y niveles de hidrocarburos del sistema Laguna El Yucateco–Río Chicozapote, municipio de Cárdenas, Tabasco*. Dirección de Protección Ambiental. CIMADES. Gobierno del Estado de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. 61 p. + Anexos

CODEZPET (1985). *Diagnóstico sobre la influencia de la actividad petrolera en el desarrollo de Tabasco*. Gobierno del Estado de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. 51 p.

Cuanalo de la C.H. (1990). *Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo*. 3a. ed. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 40 p.

de León G.F., Payán Z.F. y Sánchez R.S. (1998). Localización de capas compactadas en el perfil del suelo mediante penetrometría. Terra 16, 303-307.

DOF (2002). NOM-021-RECNAT-2000. *Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*. Diario Oficial de la Federación. México, D. F. 31 marzo 2002. pp. 1-85.

DOF (2010). NOM-138-SEMARNAT/SA1-2008. *Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo y la remediación*. Diario Oficial de la Federación. México, D.F. 23 agosto 2010. pp. 4-19.

Dorantes A.R. 2008. *Fitorremediación de suelos contaminados con diferentes tipos de petróleos crudos mediante el pasto azul* (*Echinochloa* sp). Ingeniería Química Petrolera. Universidad Popular de la Chontalpa. H. Cárdenas, Tab. 77 p.

Dorantes-Avelino R., Rivera-Cruz M.C., Aceves-Navarro L.A., Ferrera-Cerrato R. y Sánchez-Soto S. (2010). Efectos de los hidrocarburos del petróleo en la vegetación, las propiedades fisicoquímicas y microorganismos del suelo en una pradera al noroeste del estado de Tabasco. En: *Memoria XXII Reunión Científica-Tecnológica, Forestal y Agropecuaria Tabasco 2010*. Villahermosa, Tabasco. pp. 153-162.

EPA (1986). Method 418.1 modif. Petroleum Hydrocarbons Total Recoverable Spectrophotometric Infrared. Environmental Protection Agency. Wahsington, DC, USA. 8 p.

Gerster G. y Bacigaluppo S. (2006). Consecuencias del tránsito en húmedo sobre el suelo y los cultivos de trigo, soja y maíz en sistemas de siembra directa. En: *Aportes de la Ciencia y la Tecnología al Manejo Productivo y Sustentable de los Suelos del Cono Sur*. (R. Díaz R. y C. Rava, Eds.).IICA. PROCISUR. Montevideo, Uruguay. pp. 132-139.

Gerster G. (2008). Compactación por tránsito de maquinarias en un Argiudol típico. Tesis Magíster en Manejo y Conservación de Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Rosario. Zavalla, Arg. 109 p.

Gobat J.-M., Arango M. y Matthey W. (2004). *The Living Soil. Fundamentals of Soil Science and Soil Biology*. Science Publishers. Enfield, NH, USA. 602 p.

González R.G.A. (1995). Impacto ambiental de la industria petrolera en el estado de Tabasco. Tesis Ingeniero Agrónomo Fitotecnista. Escuela de Ciencias Agronómicas Campus V. Universidad Autónoma de Chiapas. Villaflores, Chiapas. 101 p.

González-Barrios J.L., González-Cervantes G., Sánchez-Cohen I., López-Santos A. y Valenzuela-Núñez L.M. (2011). Caracterización de la porosidad edáfica como indicador de la calidad física del suelo. Terra Latinoamericana 29, 369-377.

Gutiérrez C.M.C. y Zavala C.J. (2001). Rasgos hidromórficos de suelos tropicales contaminados con hidrocarburos. Terra Latinoamericana 20, 101-110.

INEGI (2001). *Síntesis de Información Geográfica del Estado de Tabasco*. 1a. ed. INEGI. Aguascalientes, Aguascalientes, México. 100 p. + Anexo cartográfico escala 1:500,000

Jiménez C.B.E. (2002). *La contaminación ambiental en México. Causas, efectos y tecnología apropiada*. 2a reimp. LMUSA. Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C. Instituto de Ingeniería de la UNAM. FEMISCA. México, D.F. 925 p.

Jiménez L.G., Rivera-Cruz M.C., Trujillo-Narcía A. y Magaña A.M.A. (2010). Estudio de la flora en suelo restaurado por fuga de petróleo en Cunduacán, Tabasco. En: Memoria XXII Reunión Científica-

Tecnológica, Forestal y Agropecuaria Tabasco 2010. Villahermosa, Tabasco. pp. 232-242.

Li X., Feng Y. y Sawatsky N. (1997). Importance of soil-water relations in assessing the endpoint of bioremediated soils. I. Plant growth. Plant Soil, 192, 219-226.

López C.M.E., Rivera-Cruz M.C., Trujillo-Narcía A. y Muñoz V.P.J. (2010). Densidad y diversidad de la microflora de suelo restaurado por fuga de petróleo crudo en Cunduacán, Tabasco. En: Memoria XXII Reunión Científica-Tecnológica, Forestal y Agropecuaria Tabasco 2010. Villahermosa, Tabasco. pp. 222-232.

López de la F.J.C. (2010). Evaluación de los contenidos de petróleo crudo en suelo restaurado en Cunduacán, Tabasco. Tesis Químico Fármaco Biólogo. Universidad Popular de la Chontalpa. H. Cárdenas, Tabasco, México. 43 p.

Martínez-Trinidad S., Cotler H., Etchevers-Barra J.D., Ordaz-Chaparro V.M. y León-González F. de (2008). Efecto del manejo en la agregación del suelo en un ecosistema tropical seco. Terra Latinoamericana 26, 299-307.

Martínez M.V.E. y López S.F. (2001). Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de un suelo arcilloso. Terra Latinoamericana 19, 9-17.

Materechera S.A., Alstom A.M., Kirby J.M. y Dexter A.R. (1992). Influenced of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. Plant Soil 144, 297-303.

Orozco H.J.A., Rivera-Cruz M.C. y Trujillo-Narcía A. (2010). Estudio de bacterias solubilizadoras de fósforo en suelo restaurado por fuga de petróleo crudo en Cunduacán, Tabasco. En: Memoria XXII Reunión Científica-Tecnológica, Forestal y Agropecuaria Tabasco 2010. Villahermosa, Tabasco. pp. 253-260.

Ortiz O.M. (2009). *Historia de la explotación petrolera en Tabasco 1900-1960*. 1a. ed. PEMEX. UJAT. México, D.F. 457 p.

PEMEX (2011). Contratos adjudicados en materia de obra pública celebrados del 12 de junio de 2003 al 30 de Septiembre de 2006 [en línea]. http://pemex.gob.mx/files/content/pep_cont_op_sep06. pdf. 01/02/2011

PROFEPA (2011). Análisis Nacional de Emergencias Ambientales [en línea]. http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/211/1/mx/ analisis_nacional_de_emergencias_ambientales.html. 01/02/2011.

Radford B.J., Yule D.F., Garry D.M.C. y Playford C. (2001). Crop responses to applied soil compaction and to compaction repair treatments. Soil Till. Res. 61, 157-166.

Ramírez M.A.G., Rivera-Cruz M.C. y Trujillo-Narcía A. (2010). Estudio de bacterias fijadoras de nitrógeno en suelo restaurado por fuga de petróleo crudo en Cunduacán, Tabasco. En: Memoria XXII Reunión Científica-Tecnológica, Forestal y Agropecuaria Tabasco 2010. Villahermosa, Tabasco. pp. 260-269.

Rivera-Cruz M.C. (2004). Clasificación de suelos tropicales influenciados por derrames de petróleo en Tabasco. Tecnociencia Universitaria III, 6-25.

Rivera C.M.C. (2001). Microorganismos rizosféricos de los pastos alemán [*Echinochloa polystachya* (H.B.K.) Hitchc.] *y cabezón* (*Paspalum virgatum* L.) en la degradación del petróleo crudo y el benzo(a)pireno. Tesis Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Texcoco, edo. de México. 348 p.

Rivera-Cruz M.C., Dorantes-Avelino R., Trujillo-Narcía A. y Castillo-Pascual A.J. (2011). Indicadores vegetales y microorganismos rizosféricos de efectos de la precipitación pluvial y del petróleo en un humedal mexicano. En: Memoria VI Congreso Iberoamericano de Física y Química Ambiental. Cancún, México. pp. 174-180.

Salvador C.J.C. (2010). Evaluación de restauración comercial en suelo contaminado por fuga y derrame de hidrocarburos en oleogasoducto de 24″ Ø batería Oxiacaque – Íride, mediante bioensayo con planta de rábano (*Raphanus sativus* L.) en Cunduacán, Tabasco, México. Tesis Maestría en Ingeniería y Protección Ambiental. División Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. 100 p.

SAS (Statistical Analysis System). (2005). *User's Guide, Version 9.1.3*. SAS Institute, Inc. Cary, NC. 664 p.

Seoánez C.M., Chacón A.A.J., Gutiérrez de O.A. y Angulo A.I. (1999). *Contaminación del suelo: estudios, tratamiento y gestión.* Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, 352 p.

SEMARNAT (2009). Informe de la situación del medio ambiente en México. Edición 2008. Compendio de estadísticas ambientales. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. 358 p.

Siebe C., Cram S. y Ainsworth C. (1997). Monitoreo edafo-ecológico de áreas influenciadas por actividades de PEMEX en el estado de Tabasco. IMP, UNAM, Batelle, PEMEX PEP-PGPB. 112 p. Anexos

Soane B.D., Blackwell P.S., Dicson J.W. y Painter D.J. (1981). Compactation by agricultural vehicles. A review. Soil Till. Res. 1, 207-237.

Sustaita-Rivera F., Ordaz-Chaparro V., Ortiz-Solorio C.A. y de León-González F. (2000). Cambios en las propiedades físicas de dos suelos de una región semiárida debido al uso agrícola. Agrociencia 34, 379-386.

Trujillo-Narcía A. y Rivera-Cruz M.C. (2006). Planta de girasol (*Helianthus annus*) bioindicadora de la descontaminación de suelos contaminados con petróleo crudo en el estado de Tabasco. En: Memoria XIX Reunión Científica-Tecnológica Forestal y

Agropecuaria Tabasco 2006. Villahermosa, Tabasco, México. p. 242-244.

Trujillo-Narcía A., Rivera-Cruz M.C. y Maldonado C.E. (2006). Efecto de la restauración de suelos contaminados con petróleo en el suelo y en la vegetación en Tabasco, México. En: *Medio Ambiente en Iberoamérica. Visión desde la Física y la Química en los albores del Siglo XXI*. Tomo III (L.J.F. Gallardo Ed. y Coord.). Badajoz, España. pp. 353-361.

Trujillo-Narcía A., Jiménez-López G., Rivera-Cruz M.C. y Dorantes-Avelino R. (2011). Inventario florístico y tolerancia vegetal a petróleo crudo derramado en suelos en Tabasco, México. En: Memoria VI Congreso Iberoamericano de Física y Química Ambiental. Cancún, México. pp. 59-65.

Tudela F. (1989). *La modernización forzada del trópico: el caso Tabasco. Proyecto integrado del Golfo*. 1a. ed. El Colegio de México. UNRISD-IFIAS-CINVESTAV. México, D.F. 475 p.

Vogel H. (1992). Morphological and hydrological characteristics of gleyic granitic soils and their potential for crop production. A case study from Zimbabwe. Soil Technol. 5, 303-317.

West R.C., Psuty N.P. y Thom B.G. (1976). *Las tierras bajas de Tabasco en el sureste de México*. Gobierno del estado de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. 199 p.

Wieremann C., Werner D., Horn R., Rostek J. y Werner B. (2000). Stress/ strain processes in a structured unsaturated silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. Soil Till. Res. 53, 117-128.

Wolkowski R.P. (1990). Relationship between wheel-traffic-induced soil compactation, nutrient availability, and crop growth: a review. J. Prod. Agric. 3, 460-469.

Yoshikawa S., Riquelme S.J. y Rodríguez S.N. (2006). Compactación de los suelos. En: R. Díaz R. y C. Rava (eds.). *Aportes de la Ciencia y la Tecnología al Manejo Productivo y Sustentable de los Suelos del*