

---

# EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DEL INTERCAMBIO CATIONICO EN DOS SUELOS ALUVIALES CONTAMINADOS CON AGUAS CONGÉNITAS

---

Carlos Mario Morales-Bautista, Carlos Ernesto Lobato García, Candelario Méndez-Olán y Maricela de Jesús Alor Chávez

## RESUMEN

Por estar situada en la zona continental productora de hidrocarburos más importante de México, la región de Llanuras y Pantanos Tabasqueños es vulnerable a derrames de productos derivados del petróleo, entre ellos aceites usados en la producción y agua congénita. Esta última posee componentes considerados como tóxicos. En el Estado de Tabasco se han presentado emergencias ambientales por esa causa en la zona denominada región Chontalpa. Para remediar estas áreas se han realizado distintos tratamientos que han demostrado ser efectivos; sin embargo, no se han evaluado las diferencias de los índices de remoción de contaminantes entre un suelo y otro. La metodología propuesta se basó en determinar los parámetros de los suelos limpios, contaminados y

tratados en diferentes tiempos. Se recolectaron muestras de dos suelos cercanos a la batería de separación Samaria II de Cunduacán, Tabasco; posteriormente fueron contaminados con agua congénita y tratados con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Se evaluó la sodicidad (PSI), la conductividad eléctrica (CE) y el pH. Los resultados muestran diferencias en los días de tratamientos entre un suelo y otro. Mientras el suelo franco-arenoso necesita dos días para abatir PSI por debajo del 15%, el franco-arcilloso requiere diez días. En términos de CE, el primero no rebasó el día de tratamiento, en cambio el segundo requirió seis días para establecerse en condiciones no salinas. La intemperización mostró que el pH alcalino se estabilizó a niveles normales.

## Introducción

En las últimas décadas la industria petrolera ha tenido gran importancia en el sureste mexicano. El estado de Tabasco proporciona altos porcentajes de petróleo crudo y de gas natural al sistema energético (459900 barriles y  $1023 \times 10^6 \text{m}^3$  diarios, respectivamente), contribuyendo al fortalecimiento de la economía nacional (Huerta-Moreno, 2014). En esta zona se ha favorecido el resto de los sectores económicos, tales como infraestructura y de servicios. Sin embargo, la actividad también ha traído consigo el deterioro significativo del medio ambiente debido a los

constantes derrames de hidrocarburos y residuos asociados a su extracción (Adams *et al.*, 2014). En este contexto, el agua congénita generada en la producción de petróleo crudo posee cantidades considerables de sales solubles y al ser vertida en suelos ocasiona problemas de salinidad (Morales-Bautista *et al.*, 2011). En el país, la salinización afecta a 3,1% de los suelos, un porcentaje que equivale a  $6,1 \times 10^6 \text{ha}$ , de los cuales 0,9% es debido a factores naturales y 2,2% a las actividades humanas (Bonfil-Sanders *et al.*, 2015).

Algunas zonas son más tolerantes a la salinidad que otras; por ejemplo, en el norte

país, donde la erosión y entrada de marea alta es común, se han realizado enmiendas con estiércol de ganado vacuno, mejorando significativamente las condiciones de suelo para la siembra de hortalizas para el autoconsumo (Sánchez *et al.*, 2002). En el caso del estado de Tabasco, por las condiciones naturales, solo se reportan suelos salinos en los municipios cercanos a las costas, por lo que los problemas de salinidad no son muy comunes. (Moreno-Cáliz *et al.*, 2002; Arreguín-Cortés *et al.*, 2014). Sin embargo, se han registrado eventos en algunas zonas como el Complejo Procesador de Gas La Venta (CPGLV) situado en el muni-

cipio de Huimanguillo, en donde el agua salina extraída de los procesos de deshidratación de crudo era descargada en el área del pantano provocando la contaminación por exceso de sales en los suelos. Las áreas aledañas al CPGLV presentaron  $\text{CE} > 5,25 \text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$  y  $\text{PSI} > 15\%$  (García-Cuellar *et al.*, 2004).

Gámez-Treviño *et al.* (2015) reportan que los yacimientos petroleros de la región tabasqueña se encuentran situados en la zona conocida como la Chontalpa. De los pozos en producción, el petróleo crudo se transporta hacia baterías de separación; una de las más importantes se sitúa en el Campo

---

## PALABRAS CLAVE / Aguas Congénitas / Cinética / Intercambio Cationico / Suelos Aluviales /

Recibido: 28/08/2015. Modificado: 09/09/2016. Aceptado: 12/09/2016.

**Carlos Mario Morales Bautista.** Doctor en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), México. Profesor Investigador, UJAT, México. Dirección: División Académica de Cien-

cias Básicas, UJAT. Carretera Cunduacán - Jalpa Kilómetro 1. Colonia La Esmeralda CP. 86690. Cunduacán, Tabasco, México e-mail: carlos.morales@ujat.mx

**Carlos Ernesto Lobato García.** Doctor en Ciencias Químicas.

Profesor Investigador, UJAT, México.

**Candelario Méndez Olán.** Químicas. Maestro en Ciencias en Estadística, CINVESTAV, México. Profesor Investigador, UJAT, México.

**Maricela de Jesús Alor Chávez.** Doctora en Ciencias Ambientales, Colegio de la Frontera Sur Campus Tabasco, México. Profesora Investigadora, UJAT, México.

## EVALUATION OF CATION EXCHANGE TREATMENT IN ALLUVIAL SOILS CONTAMINATED WITH CONGENITAL WATER

Carlos Mario Morales-Bautista, Carlos Ernesto Lobato García, Candelario Méndez-Olán and Maricela de Jesús Alor Chávez

### SUMMARY

*Being located in the largest mainland oil production zone of Mexico, the region of the Plains and Swamps of Tabasco is vulnerable to petroleum products spills, including oils used in production and residual water. The latter contain components considered as toxic. In the state of Tabasco there have been environmental emergencies due to spills in the area called Chontalpa region. In order to remedy these areas there have been various treatments that have proven effective; however, differences in the rates of contaminant removal between different soils have not been evaluated. The proposed methodology is based on determining the parameters of clean soil,*

*contaminated and treated at different times. Two soils were collected near the separation battery Samaria II of Cunduacán, Tabasco; they were subsequently contaminated with congenital water and treated with  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Sodicity (PSI), electrical conductivity (EC) and pH were evaluated. Results show differences in days of treatment between the two soils. While the sandy loam need two days to abate PSI below 15%, clay loam requires 10 days. In terms of the EC, the first did not exceed one day of treatment, while the second required six days to settle in non-saline conditions. Weathering showed that alkaline pH stabilized at normal levels.*

## AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO DO INTERCÂMBIO CATIONICO EM DOIS SOLOS ALUVIAIS CONTAMINADOS COM ÁGUAS CONATAS

Carlos Mario Morales-Bautista, Carlos Ernesto Lobato García, Candelario Méndez-Olán e Maricela de Jesús Alor Chávez

### RESUMO

*Por estar localizada na área continental produtora de hidrocarbonetos mais importante do México, a região de Planícies y Pântanos Tabasquenos é vulnerável a vazamentos de produtos derivados do petróleo, entre eles óleos usados na produção e água conata. Esta última possui componentes considerados como tóxicos. O Estado de Tabasco tem apresentado emergências ambientais por essa causa na área denominada região Chontalpa. Para remediar estas áreas tem sido realizado distintos tratamentos que demonstraram ser efetivos; no entanto, não foram avaliadas as diferenças dos índices de remoção de contaminantes entre um solo e outro. A metodologia proposta se baseou em determinar os parâmetros dos solos limpos, contami-*

*nados e tratados em diferentes tempos. Se recolheram amostras de dois solos próximos à bateria de separação Samaria II de Cunduacán, Tabasco; posteriormente foram contaminados com água conata e tratados com  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Foi avaliada a sodicidade (PSI), a condutividade elétrica (CE) e o pH. Os resultados mostram diferenças nos dias de tratamentos entre um solo e outro. Enquanto o solo franco-arenoso necessita dois dias para abater PSI por baixo de 15%, o franco-argiloso requer dez dias. Em termos de CE, o primeiro não ultrapassou um dia de tratamento, em cambio o segundo requereu seis dias para estabelecer-se em condições não salinas. O intemperismo mostrou que o pH alcalino se estabilizou em níveis normais.*

Samaria y pertenece al Activo Samaria-Luna (Trujillo-Narcía *et al.*, 2002). En estas instalaciones el producto se divide en tres fases: petróleo, gas y agua congénita (residuo). Para su disposición final, el agua congénita es enviada por tuberías (saloductos) para ser tratada mediante dos sistemas conforme a las especificaciones de la norma NOM-143-SEMARNAT-2003. El primer sistema consiste en inyectar el residuo en pozos agotados; sin embargo, por la gran cantidad de residuos generados y los altos costos su uso se ha venido restringiendo. El segundo proceso se basa en verter el efluente en trenes de tratamiento localizados en la ter-

minal marítima Dos Bocas; posteriormente el fluido tratado es descargado al mar empleando difusores. Generalmente los derrames se registran en el transporte del residuo, afectando directamente cuerpos de agua y suelos con vocación de uso agrícola-ganadero (Vázquez-Luna *et al.*, 2011). Arreguín-Cortés *et al.* (2014) y Méndez-Villegas *et al.* (2014) atribuyen que estas emergencias ambientales tienen origen en los desastres naturales (lluvias intensas) y/o por ruptura de ductos. Benítez-Ramírez *et al.* (2010) describen que la importancia de atender correctamente los sitios contaminados con vocación de uso agrícola-ganadero

radica en que son productoras de alimentos y los clasifican en dos tipos de impactos específicos; por un lado se presentan efectos significativos sobre la agricultura y, por otro, se reduce el rendimiento de pastizales asociados a la ganadería extensiva.

Para restaurar suelos salinos se han propuesto diferentes metodologías (Velázquez *et al.*, 2002). Adams *et al.* (2008) trataron suelos de humedales contaminados con sales e hidrocarburos empleando la técnica de intercambio catiónico con  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ; en sus resultados reportan la reducción del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) por debajo del 15% (suelos no salinos

según la norma NOM-021-SEMARNAT-2000). No obstante, después del tratamiento observaron que el exceso de nitrógeno produce acidez. En este sentido, Sánchez *et al.* (2002) mencionan que si este fenómeno no es atendido, puede afectar directamente el crecimiento de las plantas, la disponibilidad de nutrientes y la solubilización de elementos tóxicos. Por otro lado, Morales-Bautista *et al.* (2011) emplearon  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en la remediación de suelo aluvial con textura arcillosa y, para evitar alcalinidad, dosificaron las enmiendas en el lavado; sus observaciones coinciden con Núñez *et al.* (2004) y ambos trabajos mencionan que las

condiciones ambientales (lluvias) contribuyen a drenar el exceso de iones y logran llevar el pH en condiciones aceptables, de tal modo que pudieron establecerse pastos forrajeros en los suelos tratados.

En cuanto al comportamiento del contaminante en distintos suelos, Gutiérrez y Zavala (2001) estudiaron suelos de barrial (Gleysol) y arenillas (Fluvisol) del Campo Samaria, los cuales habían sido afectados por derrames de derivados del petróleo y sometidos a intemperización (pasivos ambientales). Estos suelos presentaron propiedades diferentes, principalmente en el contenido de arcillas, propiedad a la cual le atribuían que en algunos sitios (barriales) se presentara retención de contaminante y en otros no (arenillas). Adams *et al.* (2014) trabajaron en restauraciones de suelos similares y establecieron que los efectos de los derivados del petróleo dependen del tipo de suelo, la concentración del contaminante y las condiciones medio-ambientales. En este contexto, el estado de Tabasco presenta altas precipitaciones por ser una zona tropical, lo que favorece la saturación de humedad en el medio y la actividad microbiana (Ruiz-Álvarez *et al.*, 2012)

El  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  es regularmente empleado como tratamiento en suelos ácidos (Molina, 1998) y en enmiendas para mejorar algunos cultivos (Apolo, 2014; Aguilar-Baquerizo, 2015). Estas técnicas han sido adoptadas por agricultores en algunos sitios en el estado de Tabasco (Maroto-Arroyo *et al.*, 2002; Morales Bautista *et al.*, 2011). En este sentido, Palma *et al.* (2007) estudiaron distintos perfiles de suelos de la zona según su vocación de uso; Adams *et al.* (2008) tomaron estos resultados y evaluaron

los efectos de los derivados del petróleo sobre ellos. Concluyeron que si cada suelo presenta propiedades diferentes, los efectos de los contaminantes y los tratamientos de remediación en cada uno de ellos serán diferentes. Por lo tanto, es importante contar con herramientas que optimicen los tiempos de tratamiento, reduciendo los costos de operación. A lo anterior hay que sumarle que muchos ecosistemas han sido afectados por los derrames de petróleo y sus residuos, por lo que es necesario buscar alternativas que eviten la degradación del medio ambiente y establecer sistemas de tratamiento para mejorar la calidad aquellos (Trujillo-Narcía *et al.*, 2012).

Para evaluar la remoción de los contaminantes en los suelos aluviales, se tomaron muestras de dos estratos geológicos (50cm de profundidad) en áreas propensas a derrames de aguas congénitas en el municipio de Cunduacán, Tabasco. El estudio se realizó en dos etapas: se evaluó la remoción del contaminante respecto al tiempo de tratamiento y posteriormente se evaluó la reducción del pH alcalino por intemperización. El objetivo principal fue establecer las diferencias en las cinéticas de tratamiento entre un suelo y otro mediante la medición de la reducción del PSI y de la conductividad eléctrica (CE).

### Materiales y Métodos

Se seleccionó un área aledaña a la batería de separación Samaria II ubicada entre las comunidades rurales de Felipe Galván y Cumuapa 2da. Sección, pertenecientes al municipio de Cunduacán, Tabasco. Esta área se sitúa entre la vega del río Samaria, al norte, y el bordo de protección contra inundaciones, al sur. Esta obra

sirve como vía de comunicación y como barrera de contención de derrames de hidrocarburos, y cuenta con canales de baja profundidad en ambos lados del bordo que se encuentran invadidos por vegetación hidrofita. Gutiérrez y Zavala (2001) mencionan que en periodos de lluvias fuertes la pendiente de dichos efluentes permite el arrastre de sedimentos hacia el área de estudio. La zona es una llanura aluvial inundable con predominio de suelos aluviales de los grupos Gleysol y Fluvisol (Palma *et al.*, 2007; Adams *et al.*, 2008; Morales-Bautista *et al.*, 2011; Trujillo-Narcía *et al.*, 2012).

Se seleccionaron dos zonas de muestreo, una con características texturales arenosa y otra arcillosa. El suelo 1, se colectó en el punto 15Q UTM 487647E, 1989781N, y el suelo 2 se tomó en el punto 15Q UTM 487746E, 1989985N. Se extrajo  $1\text{m}^3$  de cada suelo y se almacenó en costales. En los laboratorios de la División Académica de Ciencias Básicas, UJAT, las muestras fueron secadas al aire libre durante tres días y se les retiró piedras y raíces. A continuación, se homogenizaron manualmente empleando palas y rastrillos, luego se depositaron en contenedores de plástico de 50 litros (50cm de diámetro y capacidad para 16kg de cada suelo), quedando un total de seis celdas experimentales, tres por cada suelo. Cada contenedor fue provisto de orificios (0,5cm

de diámetro) en la parte inferior para permitir el libre drenaje. De cada celda, se tomó una muestra homogénea de 1kg de suelo para determinar los parámetros especificados en la norma NOM-021-SEMARNAT-2000: conductividad eléctrica (CE), pH, texturas (arenas (%A), arcillas (%Ar) y limo (%L)), porcentaje de materia orgánica (%MO), densidad aparente (DA), densidad real (DR), porcentaje de porosidad (%P) y cationes intercambiables ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Na}^+$ ). Los resultados se tomaron como pruebas de control o testigo (Tabla I).

El contaminante (agua congénita) se obtuvo de las instalaciones de la batería Samaria II. Se tomó una muestra de ~1 litro y se caracterizó conforme a la norma NOM-143-SEMARNAT-2003 (Tabla II). Para simular un derrame, se contaminó cada unidad experimental con 11 litros de agua congénita y para evitar interferencias se cubrieron con una membrana de plástico. Con el objetivo de permitir la saturación y lixiviación, se dejó reposar durante un tiempo (dos días). El drenado se recogió en recipientes colocados en la

TABLA II  
CARACTERÍSTICAS DEL AGUA  
CONGÉNITA DE LA BATERÍA SAMARIA II

Parámetro	Valor	Unidad
Turbiedad	220	FTU
Sólidos disueltos	95,687	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$
Sólidos sedimentables	0,2	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$
Sólidos suspendidos	4	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$
$\text{CaCO}_3$	420	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$
Fe	14	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$
Sulfatos	1,13	NMP
Coliformes fecales	420	NMP
Coliformes totales	970	NMP
Cloruros	40	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$
DQO <sub>5</sub>	8	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$
Temperatura	25	°C
pH	5,01	
Conductividad eléctrica	144,01	$\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$
Color	520	Pt Co <sup>-1</sup>
Alcalinidad total ( $\text{CaCO}_3$ )	15	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$
Hidrocarburos totales	2,7	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$

TABLA I  
PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LOS SUELOS TESTIGO

Suelo	CE ( $\text{dS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	pH	Texturas			% MO	DA	DR	%P	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{+2}$	$\text{Mg}^{+2}$	$\text{Na}^+$
			%A	%Ar	%L								
Franco-arenoso	0,06	8,01	65	8	27	2	1,50	1,78	12,9	0,22	18,3	1,38	0,28
Franco-arcilloso	0,13	7,51	64	21	14	5	1,07	1,67	35,9	0,53	25,5	2,06	1,34

parte inferior de cada celda y enviado a disposición final. Transcurridos siete días, las membranas fueron retiradas y se tomó 1kg de suelo de cada celda para determinar las variables PSI, CE y pH; estos resultados se consideraron como las referencias de suelos contaminados o día cero.

Para la remediación se aplicó una solución de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en dos dosis de 3,5 litros cada una (175g de  $\text{CaO}$  grado comercial en 7 litros  $\text{H}_2\text{O}$  potable). Se extrajeron muestras en los días 1, 2, 3, 4 y 6 de tratamiento, a fin de establecer la variabilidad de parámetros de salinidad. La variables PSI y CE fueron determinadas según los procedimientos descritos por Morales-Bautista *et al.* (2011) y la caracterización se basó en la clasificación de suelos salinos y sódicos propuesta en NOM-021-SEMARNAT-2000. Para evaluar el pH post-tratamiento, las unidades experimentales se expusieron a la intemperie durante los meses de abril a noviembre de 2013. Cada fin de mes se extrajo 15g de suelo (método de cuarteo) y posteriormente se determinó el pH conforme a NOM-021-SEMARNAT-2000. Los datos obtenidos se analizaron mediante ANOVA y comparación de media por el método Tukey para establecer las diferencias significativas, y para evaluar las eficiencias en la remoción de PSI y CE se utilizó el paquete SAS estadísticas versión 9.2 (Montgomery *et al.*, 2005; Weisberg, 2005; Tierney, 2012)

## Resultados y Discusión

En la Tabla I se muestran los resultados de los parámetros fisicoquímicos de los suelos testigos.

Barba-Macías *et al.* (2014) y Palma *et al.* (2007) clasificaron los suelos del estado de Tabasco según la vocación de usos y lo expuesto por IUSS (2006). Se realizó una comparación entre estos resultados y los parámetros de suelos testigo y se observó correlaciones, principalmente en la textura, capacidad de campo y pH; el suelo 1 presentó textura franco-arenosa y

el suelo 2 franco-arcilloso (Bockheim *et al.*, 2000; Gutiérrez y Zavala, 2001).

En los resultados de los análisis realizados al agua congénita (Tabla II), se observaron altas concentraciones de sólidos disueltos (SDT) y salinidad (CE). Adams *et al.* (2008) y Quiñones *et al.* (2003) reportan que existe una estrecha relación entre estos parámetros y el contenido en sales precursoras de sodio, y observaron que al someter plantas a este tipo ambientes sufren estrés osmótico. En este contexto, Da Silva *et al.* (2000) mencionan que algunas especies pueden sobrevivir bajo estas condiciones, ya que si el suelo tiene buen drenaje el contaminante puede emigrar a horizontes más bajos, y posiblemente este fenómeno está asociado a toxicidad en lombrices y fijación de metales en raíces. Por otro lado, si el suelo muestra drenaje deficiente puede retener sales en los primeros horizontes y contribuir a disminuir la producción de frutos en hortalizas y productividad primaria en pastos (Robledo *et al.*, 2007). Adams *et al.* (2008) y Wakida-Kusunoki *et al.* (2009) asocian derrames de aguas congénitas a altas concentraciones de hidrocarburos del petróleo; no obstante, estos autores reportan derrames entre los pozos petroleros y la batería de separación. En estos casos el porcentaje de crudo regularmente es mayor que el agua. En contraste con estas investigaciones, en el presente trabajo la fuente del contaminante son los sistemas de pretratamiento en la batería de separación; es por ello que los hidrocarburos total de petróleo (HTP) se encuentran en bajas concentraciones ( $2,7\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ). Muchos autores coinciden en que, en caso de derrames, a estas concentraciones probablemente el incidente no presente impactos significativos a corto plazo. Sin embargo, existe la probabilidad de impactos de hidrocarburos residuales por intemperización y transformación química (Adams *et al.*, 2014).

En México, los efectos de la salinidad y sodicidad son estimados tomando como referencia los límites del PSI y de la CE según la norma NOM-021-SEMARNAT-2000 (Tabla III). Con base en estos términos, los valores de CE en los suelos testigos no presentan problemas de salinidad. Sin embargo, al comparar estos parámetros en los suelos contaminados (Tabla IV) se observa que ambas muestras sufren cambios significativos—en el PSI y la CE, las cuales se encuentran muy por encima del límite marcado para suelos sódicos-salinos establecidos en NOM-021-SEMARNAT-2000. Aunque los suelos fueron contaminados en las mismas condiciones, se observó que los de textura arcillosa presentaron mayor PSI y CE en comparación con el suelo de textura más arenosa; al respecto, Gutiérrez y Zavala (2001) reportan que este efecto probablemente se deba a que los suelos Gleysols (barriales o arcillosos) al ubicarse en un relieve cóncavo e inundable poseen mal drenaje y por consiguiente mayor acumulación de contaminantes. Algunos de estos compuestos pueden ser adsorbidos en las arcillas (Martínez *et al.*, 2001; Zavala *et al.*, 2005). Estos efectos también se observaron en los suelos tratados: el suelo

franco-arcilloso presentó menor remoción de sodio con respecto al franco-arenoso, en concordancia con los resultados reportados por Ehlers *et al.* (2003).

Martínez *et al.* (2001) plantearon algunas hipótesis sobre los mecanismos de retención de contaminantes en suelos y sugieren que suelos con arcillas y sugieren que suelos con arcillas de alta porosidad necesitan mayor tiempo para la desorción de los contaminantes de la fase activa, específicamente los compuestos que presentan alta polaridad. Estas aportaciones quizá permitan explicar que el ion sodio presente en el agua congénita tiene mayor afinidad en suelos con altos porcentajes de fracción arcillosa con respecto a otros que no presentan esta propiedad y, por ello; el suelo más arcilloso presenta menor remoción de sales. Para tener una mayor certidumbre se evaluó la eficiencia de remoción normalizando los resultados de PSI y CE de los suelos tratados con respecto al contaminado y se contrastaron contra el tiempo.

Conforme a las Figuras 1 y 2 se deduce que tanto las cinéticas de la CE y PSI en ambos suelos se ajustan a un modelo cinético de primer orden con  $R>0,996$  (Whitten *et al.*, 1992). De estos resultados se pueden obtener las ecuaciones cinéticas de tratamiento para suelo

TABLA III  
CLASIFICACIÓN DE SUELOS SALINOS Y SÓDICOS (NOM-021-SEMARNAT-2000)

Tipos de suelos			
Normales	Salinos	Sódicos	Sódicos-Salinos
CE $<4\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ PSI $<15\%$	CE $>4\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$	PSI $>15\%$	EC $>4\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ PSI $>15\%$

TABLA IV  
PARÁMETROS DE SALINIDAD DE SUELOS CONTAMINADOS Y TRATADOS

Días de tratamiento	Franco-arenoso			Franco-arcilloso		
	pH	CE	PSI	pH	CE	PSI
0	5,33	3,99	21,67	5,51	17,13	61,01
1	7,85	2,68	18,28	6,63	13,78	52,24
2	8,30	1,68	14,75	7,09	11,09	45,78
3	8,71	0,99	12,69	7,83	8,66	40,93
4	9,13	0,69	10,78	8,73	6,66	34,87
6	9,45	0,35	8,32	9,63	3,69	25,75

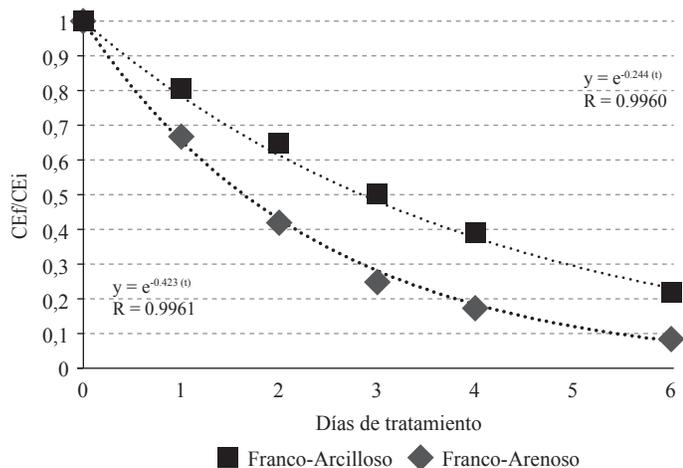


Figura 1. Cinética de CE en el tratamiento por intercambio catiónico con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en dos suelos salinos. CEF= conductividad eléctrica de suelo tratado con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , CEi= conductividad eléctrica de suelo contaminado con aguas congénitas, t= días de tratamiento.

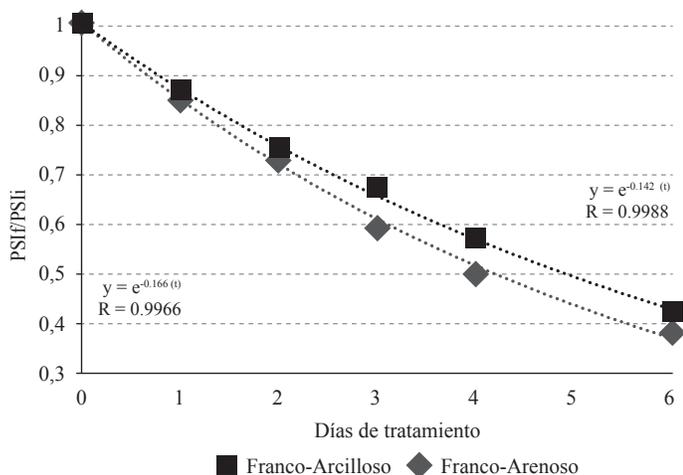


Figura 2. Cinética de PSI en el tratamiento por intercambio catiónico con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en dos suelos salinos. PSIf= porcentaje de sodio intercambiable de suelo tratado con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , PSIi= porcentaje de sodio intercambiable de suelo contaminado con aguas congénitas, t= días de tratamiento.

franco-arenoso (Ec. 1 y 2), las Ec. 3 y 4 para las cinéticas de intercambio catiónico en suelos con características franco-arcilloso, y las Ec. 5 y 6 para las ecuaciones cinéticas de un suelo arcilloso encontradas por Morales-Bautista *et al.* (2011):

$$\frac{\text{CEf}}{\text{CEi}} = e^{-0.423(t)} \quad (1)$$

$$\frac{\text{PSIf}}{\text{PSIi}} = e^{-0.166(t)} \quad (2)$$

$$\frac{\text{CEf}}{\text{CEi}} = e^{-0.244(t)} \quad (3)$$

$$\frac{\text{PSIf}}{\text{PSIi}} = e^{-0.142(t)} \quad (4)$$

$$\frac{\text{PSIf}}{\text{PSIi}} = 10^{-0.317t - 0.1476} \quad (5)$$

$$\frac{\text{CEf}}{\text{CEi}} = 10^{-0.0034t^2 - 0.14t - 0.15} \quad (6)$$

En las Ec. 2 y 4 se observa que las constantes cinéticas (Kc) de los PSI en ambos suelos presentan muy poca diferencia. En contraste, en las Kc de CE de las Ec. 1 y 3 son diferentes. Morales-Bautista *et al.* (2011) remediaron con la misma técnica un suelo arcilloso y encontraron cinéticas distintas. Por lo anterior, prevalece la importancia de considerar el tipo de suelo en una

remediación por intercambio catiónico.

Para evaluar los efectos de la matriz de suelo sobre la efectividad del tratamiento, se determinó el tiempo de vida media ( $t_{1/2}$ ) bajo la hipótesis de que el cociente entre la concentración inicial y la final es de  $1/2$  (Izquierdo *et al.*, 2004). Se substituyó este valor en las Ec. 1 a 4 y se despejó tiempo (t) de cada uno de ellas (Tabla V). Los resultados pueden explicar que existe un efecto en el tratamiento asociado al tipo de suelo, ya que observan diferencias en los tiempos de tratamientos, específicamente en CE, donde el suelo franco-arcilloso tiene un mayor  $t_{1/2}$ . Sin embargo, para este suelo se estima que la reacción se ve limitada por el PSI, ya que este parámetro presenta un mayor plazo en relación a los días de tratamiento (>4 días) con respecto a la CE (~3 días).

En términos reales, para encontrar los días mínimos de tratamiento se consideraron las concentraciones especificadas para suelos salinos y sódicos de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2000), donde PSIf= 15% y CEF=  $4\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ . Posteriormente se tomaron los valores de los suelos contaminados de la Tabla IV, considerando que PSIi= 21,67% y CEi=  $3,99\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  para suelo franco-arenoso, y PSIi= 61,01% y CEi=  $17,13\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  para suelo franco-arcilloso, así como los reportados por Morales-Bautista *et al.* (2011), PSIi= 47,2% y CEi=  $14,0\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  considerados para suelo arcilloso. Estos valores se substituyeron en las Ec. 1 a 6 y los resultados se expresan en la Tabla VI.

El tratamiento por intercambio catiónico con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aplicado a dos suelos de una misma zona puede verse afectado por muchas condiciones, como se deduce en los resultados expresados en la Tabla VI. El suelo franco-arenoso solo necesita tres días para establecer los parámetros de salinidad, en contraste, el suelo con textura franco-arcilloso asociado a drenaje deficiente necesitaría diez días, lo que confirma los

resultados por Morales-Bautista *et al.* (2011) para un suelo de textura arcillosa que fue llevado a condiciones despreciables de salinidad en seis días. Del mismo modo, Gutiérrez y Zavala (2001) evaluaron muestras de suelos contaminados y que estuvieron intemperizados, encontraron mayor cantidad de hidrocarburos en suelos con textura arcillosa que en suelos con textura arenosa. Comparando estas observaciones se puede inferir que la remoción del contaminante depende del tipo de suelo, en específico de las texturas.

El pH inicial de los suelos fue ~8 para suelo con textura franco-arenosa y ~7,5 para suelo con textura franco-arcillosa; al ser contaminados, este parámetro descendió a 5,3 y 5,5 respectivamente. Al tratar el suelo y agregar exceso de  $\text{Ca}^{+2}$ , los suelos registraron un pH final de 9,4 y 9,63 correspondientemente. Esta problemática fue observada por Morales-Bau-

TABLA V  
TIEMPOS DE VIDA MEDIA DE CE Y PSI EN SUELOS TRATADOS POR INTERCAMBIO CATIÓNICO CON  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Suelo franco-arenoso	
CE	$t_{1/2} = 1,64$
PSI	$t_{1/2} = 4,18$
Suelo franco-arcilloso	
CE	$t_{1/2} = 2,84$
PSI	$t_{1/2} = 4,88$

TABLA VI  
TIEMPO DE TRATAMIENTO ESTIMADO PARA CUMPLIR CON LA NORMATIVA EN TÉRMINOS DE SALINIDAD

Parámetro	Días
Suelo franco-arenoso	
CE	0
PSI	2,21
Suelo franco-arcilloso	
CE	5,96
PSI	9,88
Suelo arcilloso (Morales-Bautista <i>et al.</i> , 2011)	
CE	6,00
PSI	1,11

tista *et al.* (2011), quienes propusieron la atenuación natural asistida por las condiciones medio-ambientales del estado de Tabasco, manteniendo esta metodología durante seis meses. Siguiendo estos antecedentes los suelos tratados se intemperizaron y se midió el pH durante 7 meses. Los resultados del monitoreo del pH de los suelos tratados durante un lapso de tiempo se muestran en la Figura 3.

Después de que se intemperizó, el pH del suelo franco-arenoso se estabilizó en 7,5 y el franco-arcilloso en 8,5 cuando sus testigos eran 8,01 y de 7,51 respectivamente. Maroto-Arroyo *et al.* (2004) mencionan que estas circunstancias están definidas por el tipo de tratamiento, y Adams *et al.* (2008) establecen que los procedimientos con métodos químicos son más efectivos pero suelen cambiar las condiciones finales del suelo con respecto al testigo. Lo anterior es de vital importancia ya que muchos investigadores concuerdan en que la base para establecer hortalizas o pastos en un suelo remediado son las condiciones finales del suelo tratado.

En cuanto a las condiciones de intemperización, el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) señala que alrededor del 95% de la superficie del estado de Tabasco presenta clima cálido

húmedo, la temperatura media anual en la entidad es de 27°C, la máxima promedio es de 36°C en mayo, y la mínima promedio es de 18,5°C en enero. La precipitación media en el estado es de 2550mm anuales; las lluvias se presentan todo el año, siendo más abundantes de junio a octubre. Para 2013, las condiciones fueron de 2800 a 3200mm en promedio de lluvias anuales y de 17 a 37°C (CONAGUA, 2014). Estas condiciones posiblemente favorecieron el descenso de pH de los suelos tratados (Figura 3) debido al lavado de iones en exceso. Esta tendencia es más marcada en el suelo con textura franco-arenosa e incluso llega a condiciones equitativas comparadas con el testigo, lo cual podría suceder en campo si no se presenta saturación por inundaciones (Bonfil-Sanders *et al.*, 2015). En el caso específico del suelo franco-arcilloso, el pH de las muestras tratadas disminuye a condiciones similares con respecto a su testigo; sin embargo, este suelo corresponde a un Gleysol que permanece inundado la mayor parte del año debido a que se ubica en zonas bajas, lo que favorece la saturación de las arcillas (Gutiérrez y Zavala, 2001; Palma *et al.*, 2007; Arreguín-Cortés *et al.*, 2014). Por ello, en este suelo es recomendable aplicar sistemas de extracción por bombeo que permitan el drenado del agua

de lavado o establecer otras técnicas de remediación.

## Conclusiones

Los resultados del presente trabajo permitieron demostrar la importancia de los efectos que tiene la matriz del suelo sobre los tratamientos con intercambio catiónico aplicando  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . El tiempo mínimo necesario para la remediación de suelos aluviales afectados por derrames de aguas congénitas en un campo petrolero en Tabasco, México, aplicando  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  fue de dos días para los de textura franco-arenoso y diez días para los de textura franco arcilloso. Después de intemperizar durante siete meses el pH bajó a 8 y 7,5 respectivamente, aunque no se estabilizan a condiciones iniciales, siendo un indicativo para el uso del área pos-tratamiento. Los resultados contribuyen a evitar desperdicios y a favorecer la reducción de subproductos que pueden degradar los suelos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por el financiamiento del presente proyecto a través del fondo PFI-2013.

## REFERENCIAS

- Adams RH, Cruz JZ, García FM (2008) Concentración residual de hidrocarburos en suelos del trópico II: afectación a la fertilidad y su recuperación. *Interciencia* 33: 483-489.
- Adams RH, Guzmán-Osorio FJ, Domínguez-Rodríguez VI (2014) Field-scale evaluation of the chemical-biological stabilization process for the remediation of hydrocarbon-contaminated soil. *Int. J. Env. Sci. Tech.* 11: 1343-1352.
- Aguilar-Baquerizo IC (2015) *Respuesta Agronómica del Cultivo de Arroz (Oryza sativa L.) a la Aplicación de un Corrector de Suelos Salinos y Tres Fuentes de Fertilizantes Nitrogenados*. Tesis. Universidad de Cartagena. Colombia. 70 pp.
- Apolo-Pesantes JP (2014) *Efecto de la Aplicación de una Enmienda en Suelo Salino y Dosis de Silicio para Mejorar la Productividad en el Cultivo del Arroz*
- Oryza sativa L. Tesis. Universidad de Guayaquil. Ecuador. 76 pp.
- Arreguín-Cortés FI, Rubio-Gutiérrez H, Domínguez-Mora R, Luna-Cruz FD (2014) Análisis de las inundaciones en la planicie tabasqueña en el periodo 1995-2010. *Tecnol. Cs. Agua* 5: 5-32.
- Barba-Macias E, Rangel-Mendoza J, Ramos-Reyes R (2014) Clasificación de los humedales de Tabasco mediante sistemas de información geográfica. *Ecosist. Rec. Agropec.* 22(2): 56-59.
- Benítez-Ramírez JG, García-Mata R, Mora-Flores JS, García-Salazar JA (2010) Determinación de los factores que afectan el mercado de carne bovina en México. *Agrociencia* 44: 109-119.
- Bockheim JG, Gennadiyev AN (2000) The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base. *Geoderma* 95: 53-72.
- Bonfil-Sanders MC, Fernández y Fernández D, González-Espinosa M (2015) *Un Primer Análisis del Estado Actual de los Estudios de Restauración Ecológica en México*. Universidad Nacional Autónoma de México. 18 pp.
- CONAGUA (2014) *Reporte del Clima en México 2013*. Servicio Meteorológico Nacional. Ciudad de México, México. 23 pp. <http://smn1.conagua.gob.mx/climatologia/analisis/reportes/Anual2013.pdf>
- Da Silva Souza-Filho AP (2000) Influência da temperatura, luz e estresses osmótico e salino na germinação de sementes de *Leucaena leucocephala*. *Past. Trop.* 22: 47-53.
- Ehlers LJ, Luthy RG (2003) Contaminant bioavailability in soil and sediment. *Environ. Sci. Technol.* 37: 295A-302A.
- Gámez-Treviño NJ, Piña-Monarez MR (2007) Estrategia de PEMEX para la extracción de hidrocarburos. *CULCYT* 22: 32-40.
- García-Cuellar JA, Arreguín-Sánchez F, Hernández-Vázquez S, Lluch-Cota DB (2004) Impacto ecológico de la industria petrolera en la Sonda de Campeche, México, tras tres décadas de actividad: una revisión. *Interciencia* 29: 311-319.
- Gutiérrez MC, Zavala J (2001) Rasgos hidromórficos de suelos tropicales contaminados con hidrocarburos. *Terra* 20: 101-112.
- Huerta-Moreno MG (2014) PEMEX y PETROBRAS: Historias de gestión petrolera con rumbos diferentes. *Gest. Estrateg.* 45: 21-37.
- IUSS Working Group WRB (2006) *World Reference Base for Soil*

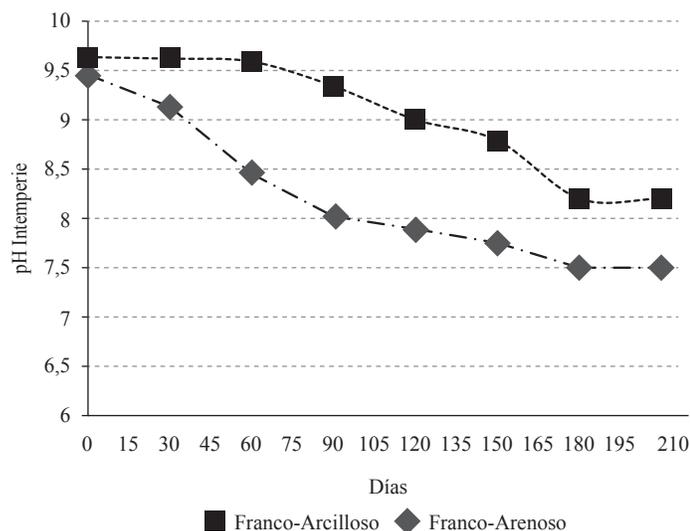


Figura 3. pH de suelos tratados con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sometidos a intemperización.

- Resources 2006*. World Soil Resources Reports N° 103. UN Food and Agriculture Organization. Roma, Italia. 145 pp.
- Izquierdo JF, Izquierdo-Torres, JF (2004) *Cinética de las Reacciones Químicas (Vol. 16)*. Edicions Universitat. Barcelona, España. 304 pp.
- Maroto-Arroyo M, Rogel-Quesada JM (2002) *Aplicación de Sistemas de Biorremediación de Suelos y Aguas Contaminadas por Hidrocarburos*. Geocisa. División Protección Ambiental de Suelo. <http://aguas.igme.es/igme/publica/pdflib15/028.pdf>
- Martínez VE, López E. (2001) Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. *Terra Latinoam.* 19: 9-17.
- Méndez-Villegas R, Gómez-Rivera P, Ledesma-Herrera JI, Cenicerros-González CMC (2014) Manejo integral de los recortes de perforación de la industria petrolera en Tabasco. *Rev. Iberoam. Cs. Biol. Agropec.* 2(4): 45-56
- Molina E (1998) *Encalado para la Corrección de la Acidez del Suelo*. ACCS, San José, Costa Rica. 45 pp.
- Montgomery DC, Peck EA, Vining G. (2005) *Introducción al Análisis de Regresión Lineal*. 3ª ed. CECSA. Ciudad de México, México. 590 pp.
- Morales-Bautista C, Domínguez-Rodríguez VI, Adams-Schroeder RH (2011) Estudio cinético del intercambio catiónico con Ca (OH)<sub>2</sub> y evaluación de la fertilidad en un suelo arcilloso contaminado con aguas congénitas. *Bioagro* 23: 129-134.
- Moreno-Cáliz E, Guerrero-Peña A, Gutiérrez-Castorena MC, Ortiz-Solorio CA, Palma-López DJ (2002) Los manglares de Tabasco, una reserva natural de carbono. *Mad. Bosq.* 8: 115-128
- NOM-021-SEMARNAT-2000 (2000) *Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis*. Diario Oficial de Federación. México.
- NOM-143-SEMARNAT-2003 (2003) *Especificaciones Ambientales para el Manejo de Agua Congénita Asociada a Hidrocarburos*. Diario Oficial de Federación. México.
- Núñez-L MG, Tóth T, Bermejo DG (2004) Manejo integrado para el uso sostenible de los suelos afectados por salinidad en Cuba. *Univ. Cienc.* 20(40): 85-102.
- Palma-López DJ, Cisneros DJ, Moreno CE, Rincón-Ramírez, JA (2007) *Suelos de Tabasco: Su Uso y Manejo Sustentable*. Colegio de Postgraduados- I S P R O T A B - F U P R O T A B, Villahermosa, México. 195 pp.
- Quiñones EE, Ferrera R, Gavi F, Fernández L, Rodríguez R, Alarcón A (2003) Emergencia y crecimiento de maíz en un suelo contaminado con petróleo crudo. *Agrociencia* 37: 585-594.
- Robledo HS, Lizana MO, Hinojosa EA (2007) Relaciones hídricas y ajuste osmótico en trigo. *Agrociencia* 41: 23-34.
- Ruiz-Álvarez O, Arteaga-Ramírez R, Vázquez-Peña MA, Ontiveros-Capurata RE, López-López R (2012) Balance hídrico y clasificación climática del Estado de Tabasco, México. *Univ. Cienc.* 28: 1-14.
- Sánchez RS, Arellano AO, López JD, Padilla SB (2002) Aplicación de lavado y estiércol para recuperar suelos salinos en la Comarca Lagunera, México. *Terra* 20: 329-336.
- Tierney L (2012) The R statistical computing environment. En Feigelson ED, Babu GJ (Eds.) *Statistical Challenges in Modern Astronomy*. Springer. Nueva York, EEUU. pp. 435-447.
- Trujillo-Narcía A, Rivera-Cruz MC, Lagunes-Espinoza, LC, Palma-López DJ, Soto-Sánchez S, Ramírez-Valverde G (2012) Efecto de la restauración de un fluvisol contaminado con petróleo crudo. *Rev. Int. Cont. Amb.* 28: 360-374.
- Vázquez-Luna M, Montiel-Flores A, Vázquez-Luna D, Herrera-Tenorio MF (2011) Impacto del petróleo crudo en suelo sobre la microbiota de vida libre fijadora de nitrógeno. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* 13: 511-523.
- Velázquez MA, Ortega M, Martínez A, Kohashi J, García N (2002) Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Terra Latinoam.* 20: 459-464.
- Wakida-Kusunoki AT, Caballero-Chávez V (2009) Efectos del derrame de hidrocarburos del pozo Kab sobre la pesca ribereña en el litoral de Campeche y Tabasco, México. *Cienc. Pesq.* 17: 65-73.
- Weisberg S (2005) *Applied Linear Regression*. Wiley. Hoboken, NJ, EEUU. 310 pp.
- Whitten KW, Gailey KD, Davis RE (1992) *Química General*. 3ª ed. McGraw-Hill. Ciudad de México, México. 902 pp.
- Zavala-Cruz J, Gavi-Reyes F, Adams-Schroeder RH, Ferrara-Cerrato R, Palma-López DJ, Vaquera-Huerta H, Domínguez-Esquivel JM (2005) Derrames de petróleo en suelos y adaptación de pastos tropicales en el activo Cinco Presidentes, Tabasco, México. *Terra Latinoam.* 23: 293-302.