

**PLANTAS ASOCIADAS A SUELOS CONTAMINADOS
ADYACENTES A FOSAS PETROLERAS UBICADAS EN LOS
LLANOS ORIENTALES DE VENEZUELA**

**Plants associated to contaminated soils adjacent to oil pits
located in the Venezuelan eastern plains**

**Ismael HERNÁNDEZ-VALENCIA, Nora MALAVER,
Alejandra ZAMORA y Valois GONZÁLEZ**

*Centro de Ecología Aplicada, Instituto de Zoología y Ecología Tropical, Facultad de Ciencias,
Universidad Central de Venezuela, Caracas, Apartado Postal 47058, 1041-A, Venezuela.
ismael.hernandez@ciens.ucv.ve*

RESUMEN

Se recolectaron las especies y se estimó el contenido de aceites y grasas en suelos contaminados adyacentes a cinco fosas petroleras ubicadas en sabanas bien drenadas del oriente de Venezuela. Un total de 40 especies, distribuidas en 19 familias y 33 géneros, fueron identificadas. Las familias con mayor representación fueron Poaceae y Asteraceae. En general, la composición florística fue muy diferente entre las fosas, con un bajo porcentaje de especies compartidas, y con predominio de especies nativas típicas de hábitats intervenidos y de sabanas bien drenadas. Considerando el gran número de fosas que existen en el país, las condiciones ecológicas en donde se ubican, las particularidades técnicas de su manejo, así como las pocas especies comunes que se han encontrado en este estudio y otros previos, es necesario realizar más investigaciones de este tipo para tener un mejor conocimiento de la flora asociada a las fosas petroleras y a otros sitios que han sido afectados por la contaminación por petróleo. Esta información puede ser útil para la revegetación y/o fitorremediación de suelos afectados por este tipo de contaminación.

Palabras clave: contaminación, petróleo, plantas tolerantes, sabanas

ABSTRACT

Species were collected and oil and grease content were estimated in contaminated soils adjacent to five oil pits located in well-drained savannas in eastern Venezuela. A total of 40 species, distributed in 19 families and 33 genera

were identified. The most represented families were Poaceae and Asteraceae. Overall, the floristic composition was very different in each pit, with a low percentage of shared species, and predominance of native species typical of disturbed habitats and well drained savannas. Considering the large number of oil pits in the country, ecological conditions, types of management of the oil pits and the few common species found in this and previous studies, more research is needed for a better understanding of the flora associated to oil pits and other sites that have suffered pollution by oil. This information could be useful for revegetation and phytoremediation of soils affected by this type of contamination.

Key words: petroleum, pollution, savannas, tolerant plants

INTRODUCCIÓN

La producción petrolera en Venezuela ha generado variados impactos ambientales dentro de las que destacan la contaminación de ecosistemas y de tierras bajo uso agrícolas (Merkl *et al.* 2004). Además de la degradación ambiental producida por la rotura de oleoductos y derrames de hidrocarburos, en la actualidad se contabilizan aproximadamente 7000 fosas con residuos petroleros que no han recibido un tratamiento adecuado (PDVSA 2015) y que constituyen pasivos ambientales que deben sanearse. Las labores de saneamiento de las fosas y suelos contaminados implican la remoción del petróleo por variados procesos físicos, químicos y biológicos (Yavari *et al.* 2015), aunque en el país es más popular el uso de métodos biológicos por ser más económicos y con menor impacto sobre el suelo (Infante *et al.* 2010). Luego que el suelo ha sido saneado, se debe procurar la revegetación de las áreas afectadas, con preferencia en la selección de especies nativas o naturalizadas adaptadas a las condiciones ecológicas de los sitios a rehabilitar y, en particular, de las características físicas y químicas de los suelos.

El estudio de plantas capaces de colonizar los suelos contaminados con petróleo es importante para identificar aquellas especies tolerantes a este tipo de degradación, y que además pueden tener algún potencial en las labores de revegetación de suelos contaminados con petróleo. Adicionalmente, algunas plantas han mostrado capacidad para descontaminar

suelos con hidrocarburos, hecho que se asocia principalmente a la microbiota que se desarrolla en la rizósfera, la cual puede aprovechar a los hidrocarburos de petróleo como fuente de carbono y energía (Merkl 2005; Mager & Hernández-Valencia 2013).

Actualmente, los Llanos Orientales de Venezuela son uno de los centros más importantes de la producción petrolera del país, en especial los ecosistemas de sabanas, en donde se ubica la mayoría de la infraestructura y los procesos asociados a la exploración, producción y transporte de hidrocarburos, y por ello son vulnerables a la contaminación por petróleo. La tolerancia a concentraciones inusualmente altas de petróleo es uno de los requisitos para identificar especies que pueden ser útiles en la revegetación y/o fitorremediación de suelos contaminados. Por esta razón, en el presente estudio se evaluaron las especies vegetales que crecen en los suelos contaminados adyacentes a cinco fosas petroleras. Los resultados de este trabajo junto con otros que permitan dilucidar los intervalos de tolerancia de las plantas a los contaminantes, formas de propagación, fenología, cuidados culturales y cobertura, entre otros, pueden ser útiles en la selección de especies para revegetar y/o fitorremediar suelos que han sufrido el impacto por la contaminación con petróleo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en cinco fosas petroleras de fluidos cercanas a la población de El Tigre, estado Anzoátegui, Venezuela. La Tabla 1 resume las características de las mismas. Todas las fosas se ubicaban en áreas de sabanas bien drenadas (sabanas no inundables), donde la especie dominante en el componente herbáceo no intervenido es la gramínea *Trachypogon spicatus* (L.f.) Kuntze, mientras que el componente leñoso tiene una tendencia a mantener un patrón de disposición espacial aleatorio y está representado por los individuos de las especies *Curatella americana* L., *Bowdichia virgilioides* Kunth y *Byrsonima crassifolia* (L.) Kunth. El clima se caracteriza por ser estacional, con un período de lluvia entre los meses de mayo a octubre que concentra el 84% de estas, que presentan un total anual promedio de 1018 mm (INAMEH 2016). Los suelos

Tabla 1. Ubicación geográfica y características de las fosas de fluidos evaluadas.

	Fosa				
	LG 276	DAFO 2	BARED 9	DED 3	PAO 1
Ubicación	8°56' N, 63°48' O	8°56' N, 63°53' O	8°34' N, 64°50' O	8°55' N, 63°49' O	8°46' N, 64°35' O
Tiempo en funcionamiento (años)	30	10	10	50	No determinado
Largo (m)	70	85	54	90	15
Ancho (m)	40	75	35	75	15
Perímetro (m)	226	320	178	330	60
Área (m ²)	3010	6375	1890	6750	225
Actividad	Inactiva	Activa	Activa	Activa	Activa
Tipo de crudo depositado	Mediano y liviano	Mediano y liviano	Extra pesado	Liviano	Liviano

suelos adyacentes a estas fosas se encuentran contaminados con petróleo debido a la disposición de los excedentes de perforación y producción de los pozos y por el rebose de su contenido durante las lluvias.

En cada una de las cinco fosas se recolectaron todas las especies de plantas que crecían en los suelos contaminados adyacentes, hasta un ancho de 1 m, perpendicular al borde de la fosa. El criterio para identificar un suelo contaminado se basó principalmente en la presencia de manchas de hidrocarburos. Dentro de las fosas no se encontraron plantas vasculares, aunque si algunas algas que no fueron consideradas en este estudio. El material botánico fue procesado e identificado en el Herbario del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC).

Análisis de suelos

De cada uno de los cuatro lados que poseen las fosas se tomaron tres muestras al azar de los suelos contaminados adyacentes, de los primeros 10 cm del suelo. La selección de esta profundidad se basó en que la contaminación por el crudo suele ser superficial y la mayoría de las plantas

recolectadas presentan mayor biomasa de raíces en la superficie. Posteriormente, estas muestras se mezclaron para obtener una muestra compuesta por cada lado de la fosa. Adicionalmente, aproximadamente entre 10 m alejados de cada lado de la fosa se repitió el mismo procedimiento para evaluar las características físicas y químicas en suelos que no habían experimentado el impacto de la contaminación. Los parámetros evaluados en el suelo fueron textura, conductividad, pH, P disponible, N total, Ca, Mg, Na, K y Al intercambiable (Anderson & Ingram 1982). Como indicador del contenido de hidrocarburos en el suelo se estimó el contenido de aceites y grasas siguiendo el método EPA 3540 (USEPA 1996) empleando como solvente diclorometano.

Análisis estadísticos

Las medias de este análisis fueron comparadas con una prueba no paramétrica Kruskal-Wallis ya que no se cumplieron los supuestos establecidos para el ANOVA y luego se calculó la prueba *a posteriori* Fisher LSD (Least Significant Difference), con un nivel de significancia del 0,05 empleando el software Statistica 10.0 (Statsoft 2010): A partir de los datos de presencia o ausencia de especies de plantas en cada una de las fosas de estudio se realizó un análisis de agrupamiento utilizando el algoritmo de agrupamiento por pares (UPGMA) e índice de similitud de Jaccard, usando el software libre PAST 3.04 (Hammer & Harper 2001), donde el intervalo de valores para este índice varía entre 0, cuando no hay especies compartidas entre ambos sitios, hasta 1, cuando los sitios comparten todas las especies.

RESULTADOS

Análisis de suelos

En general, tanto los suelos contaminados (C) adyacentes a las fosas, como los no contaminados (NC) se caracterizaron por su baja disponibilidad de P, N total, Ca, Mg, Na y Al intercambiable (Tabla 2). Las comparaciones para los parámetros antes mencionados dentro de una misma fosa no mostraron diferencias entre los suelos contaminados y no contaminados. Con relación a las comparaciones entre fosas, se encontraron pocas diferencias, como es el caso de pH más ácido para los

Tabla 2. Características físicas y químicas de los suelos contaminados (C) y no contaminados (NC) adyacentes a las fosas.

Característica	Fosa									
	BARED 9		DED 3		DAFO 2		LG 276		PAO 1	
	NC	C	NC	C	NC	C	NC	C	NC	C
pH	5,5a	5,4a	5,7a	5,7a	5,6a	5,2a	5,3a	5,3a	4,4b	4,4b
N total (%)	0,03a	0,04a	0,04a	0,02a	0,03a	0,03a	0,02a	0,04a	0,04a	0,07a
P disponible (mg kg ⁻¹)	2,6a	2,3a	3,5a	2,7a	3,8a	3,1a	4,2a	3,9a	4,9a	4,7a
Calcio (cmol kg ⁻¹)*	0,58a	0,61a	2,00b	1,97b	1,93b	2,01b	1,41b	1,43b	0,38a	0,57a
Magnesio (cmol kg ⁻¹)*	0,88a	0,91a	1,26a	1,29a	0,80a	1,15a	1,43a	1,39a	0,18b	0,09b
Potasio (cmol kg ⁻¹)*	0,08a	0,10a	0,09a	0,11a	0,06a	0,09a	0,09a	0,11a	0,08a	0,09a
Sodio (cmol kg ⁻¹)*	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,06	0,08	0,10
Aluminio (cmol kg ⁻¹)*	0,06a	0,06a	0,05a	0,03a	0,08a	0,02a	0,06a	0,04a	0,05a	0,04a
Conductividad(dS m ⁻¹)	0,10a	0,09a	0,11a	0,13a	0,15a	0,16a	0,17a	0,15a	0,16a	0,10a
Arena (%)	83,9a	85,4a	80,2b	78,9b	80,1b	81,6b	79,3b	78,0b	86,6a	90,1c
Limo (%)	2,5a	2,4a	3,1a	3,0a	2,5a	2,0a	2,1a	1,8a	9,0b	5,5c
Arcilla (%)	13,6a	12,2a	16,7b	18,1b	17,4b	16,4b	18,6b	20,2b	4,4c	4,4c

suelos contaminados y no contaminados de la fosa Pao 1, menores concentraciones de calcio intercambiable para las fosas BARED 9 y Pao 1, y la misma tendencia para el magnesio intercambiable de la fosa Pao 1. En síntesis, desde el punto de vista nutricional, la fosa Pao 1 presentó menor fertilidad química por valores más bajos de calcio y magnesio intercambiable, lo que pudo influir en un pH más ácido. Desde el punto de vista textural, no se encontraron diferencias significativas entre los suelos contaminados y no contaminados dentro de una misma fosa, aunque sí entre fosas, en donde la fosa Pao 1 predomina la clase textural arenosa, mientras que en las restantes la textural franco arenosa. La fracción arenosa fue la más abundante en todas las localidades estudiadas.

Las concentraciones de aceites y grasas fueron menores para los suelos contaminados adyacentes a las fosas BARED 9 (1,19%) y Pao 1 (1,53%), y mayores para los suelos adyacentes contaminados de las fosas DAFO 2 (6,06%), LG 276 (6,63%) y DED 3 (8,62%). En contraste, los valores en los suelos no contaminados estuvieron por debajo de 0,20% (Tabla 3).

Inventario de plantas

Un total de 40 especies distribuidas en 19 familias y 33 géneros fueron identificadas en las cinco fosas evaluadas (Tabla 4). La riqueza de especies fue muy similar entre las fosas DAFO 2 (15 especies) y PAO 1 (14 especies), LG 276 (13 especies), y DED 3 (12 especies), mientras que en BARED 9 fue significativamente menor (3 especies). No se observó una relación entre el perímetro de las fosas y la riqueza de especies.

Las familias con mayor representación fueron Poaceae (8 especies) y Asteraceae (6), seguidas por Cyperaceae (4), Euphorbiaceae y Rubiaceae (3 cada una), Apocynaceae, y Lamiaceae (2 cada una); el resto de la familias solo estuvo representado por una especie (Tabla 4). Las especies más frecuentes entre las fosas fueron *Calotropis procera*, *Hyptis suaveolens* y *Aristida setifolia*, las cuales estuvieron presentes en cuatro de las cinco fosas estudiadas, *Cyperus aggregatus* y *Passiflora foetida* en tres fosas, y *Chromolaena odorata*, *Pavonia cancellata*, *Borreria repens* y *Waltheria indica* en dos fosas. Las restantes 31 especies están presentes en solo una de las fosas evaluadas, lo cual es un claro indicio que la composición florística en cada una de las fosas es muy diferente.

Tabla 3. Concentración de aceites y grasas en suelos adyacentes contaminados y no contaminados.

Característica	Fosa									
	MARED 9		DED 3		DAFO 2		LG 276		PAO 1	
	NC	C	NC	C	NC	C	NC	C	NC	C
Aceites y grasas (%)	0,20	1,19	0,04	8,62	0,14	6,06	0,15	6,63	0,03	1,53
Desviación estándar	0,11	0,93	0,02	5,92	0,11	10,2	0,12	4,77	0,01	1,83

Tabla 4. Lista de especies identificadas adyacentes a las fosas.

Familia/Especie	Fosa				
	BARED	DED	DAFO	LG	PAO
	9	3	2	276	1
Apocynaceae					
<i>Calotropis gigantea</i> (L.) Dryand					█
<i>C. procera</i> (Aiton) W.T. Aiton	█				█
Asteraceae					
<i>Chromolaena laevigata</i> (Lam.) R.M. King & H. Rob.		█			
<i>C. odorata</i> (L.) R.M. King & H. Rob.			█		
<i>Cordia curassavica</i> (Jacq.) Roem. & Schult.		█			
<i>Orthopappus angustifolius</i> (Sw.) Gleason				█	
<i>Tilesia baccata</i> (L.) Pruski var. <i>baccata</i>			█		
<i>Tridax procumbens</i> L.			█		
Caesalpiaceae					
<i>Chamaecrista viscosa</i> (Kunth) H.S. Irwin & Barneby			█		█
Commelinaceae					
<i>Commelina diffusa</i> Burm. f.		█			
Convolvulaceae					
<i>Evolvulus villosissimus</i> Ooststr.			█		
Cyperaceae					
<i>Cyperus aggregatus</i> (Willd.) Endl.			█		
<i>C. ligularis</i> L.			█		
<i>Fimbristylis cymosa</i> R. Br.			█		
<i>Rhynchospora exaltata</i> Kunth			█		
Dilleniaceae					
<i>Curatella americana</i> L.				█	
Euphorbiaceae					
<i>Chamaesyce thymifolia</i> (L.) Millsp.			█		
<i>Mycrostachys corniculata</i> (Vahl) Griseb.				█	
<i>Ricinus comunis</i> L.					█
Fabaceae					
<i>Lonchocarpus</i> sp.				█	
Flacourtiaceae					
<i>Casearia sylvestris</i> Sw.					█
Lamiaceae					
<i>Hyptis suaveolens</i> (L.) Poit.			█		
<i>Marsypianthes chamaedrys</i> (Vahl) Kuntze			█		█
Malvaceae					
<i>Pavonia cancellata</i> (L.) Cav.			█		█
Mimosaceae					
<i>Mimosa pudica</i> L.					█

Familia/Especie	Fosa				
	BARED	DED	DAFO	LG	PAO
	9	3	2	276	1
Onagraceae					
<i>Ludwigia octovalvis</i> (Jacq.) P.H. Raven		■			
Passifloraceae					
<i>Passiflora foetida</i> L.	■				
Poaceae					
<i>Andropogon fastigiatus</i> Sw.		■			
<i>A. gyanus</i> Kunth					■
<i>Antheophora hermaphrodita</i> (L.) Kuntze					■
<i>Aristida setifolia</i> Kunth	■		■	■	■
<i>Eragrostis maypurensis</i> (Kunth) Steud.					■
<i>E. viscosa</i> (Retz.) Trin.					■
<i>Pappophorum mucronulatum</i> Nees			■		
<i>Trachypogon spicatus</i> (L.f.) Kuntze			■		
Polygalaceae					
<i>Polygala glochidiata</i> Kunth				■	
Rubiaceae					
<i>Borreria ocymoides</i> (Burm. f.) DC.		■			
<i>B. repens</i> DC.				■	■
<i>B. verticillata</i> (L.) G. Mey.				■	■
Sterculiaceae					
<i>Waltheria indica</i> L.			■	■	
Total	3	12	15	13	14

A partir de los datos de presencia o ausencia de especies de plantas en cada una de las fosas, se realizó un análisis de agrupamiento (Fig. 1), cuyos resultados indican que las cinco fosas evaluadas difieren en la composición de especies de plantas asociadas. Se puede observar que las fosas más parecidas entre sí son LG 276 y DAFO 2 con un valor de 0,28 de similitud, mientras que la más disímil es la fosa PAO 1, cuya composición de especies de plantas fue notablemente diferente a las demás fosas (similitud < 0,12).

En cuanto al hábito dominante, las hierbas tuvieron mayor representación con 31 especies, seguido de los sufrútices con tres, los arbustos con cuatro y los árboles con dos especies. Cabe destacar que la fisionomía de la vegetación circundante a las fosas es principalmente de tipo herbáceo graminoide, siendo muy variable la cobertura entre estas, desde suelos con muy baja cobertura y riqueza de especies como BARED 9

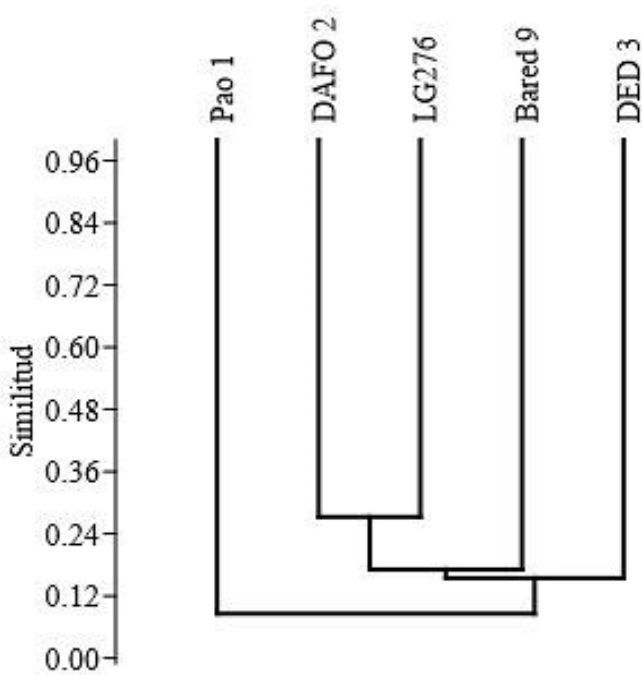


Fig. 1. Dendrograma de similitud (Jaccard) de las fosas evaluadas.

hasta aquellos donde esta variable era más densa, como Pao 1, DED 3 y DAFO 2, en donde la presencia de claros fue muy baja.

En cuanto a su procedencia, abundan las especies nativas con 36 especies, mientras que cuatro son introducidas, como lo son *Calotropis procera*, *C. gigantea*, *Ricinus comunis* y *Andropogon gayanus*, las tres primeras se encuentran ampliamente distribuidas en el país (Duno de Stefano *et al.* 2007). En contraste, las especies características de las sabanas bien drenadas poco o no intervenidas presentaron baja frecuencia de aparición, como *Trachypogon spicatus* (DAFO 2), *Curatella americana* (LG276) y *Casearia sylvestris* (Pao 1), las cuales solo se encontraban en los bordes de una de las fosas. Aunque no se realizaron mediciones sobre la cobertura de las diferentes especies identificadas, *Aristida setifolia*, *Pappophorum mucronulatum*, *Pavonia cancellata*, *Hyptis suaveolens*, *Cordia curassavica*, *Fimbristylis cymosa*, *Cyperus*

ligularis y *Andropogon fastigiatus* presentaron la mayor cobertura en las fosas en donde fueron ubicadas. Por su parte, *Cyperus aggregatus*, *Hyptis suaveolens*, *Calotropis procera*, *Chromolaena odorata*, *Passiflora foetida*, *Aristida setifolia* y *Waltheria indica* fueron las especies más frecuentes en aquellos suelos que presentaron las mayores concentraciones de aceites y grasas (fosas DED 3, LG276 y DAFO 2), lo que sugiere mayor tolerancia a la contaminación por petróleo.

De acuerdo al tipo de vegetación en donde se pueden encontrar, abundan las especies características de áreas intervenidas (27 especies) y de sabanas bien drenadas (27 especies), seguidas por aquellas propias de hábitats húmedos, como palmares de pantano de *Mauritia flexuosa* (morichales, 16 especies), sabanas inundables (15 especies) y menor cantidad de bosques caducifolios y bosques ribereños (4 especies), matorrales y bosques semicaducifolios (3 especies cada uno), y bosques siempreverdes (2 especies) (Fig. 2).

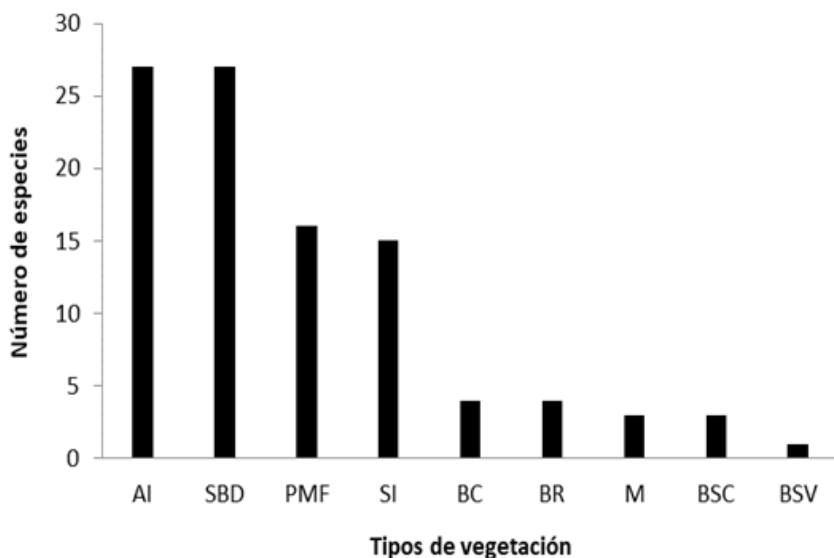


Fig. 2. Distribución de las especies de acuerdo a los tipos de vegetación en donde han sido reportadas (modificado de Duno de Stefano *et al.* 2007). AI = áreas intervenidas; SBD = sabanas bien drenadas; SI = sabanas inundables; PMF = palmares de *Mauritia flexuosa* (morichales); BSV = bosque siempreverde; BC = bosques caducifolios; M = matorrales; BSC = bosques semicaducifolios; BR = bosques ribereños.

DISCUSIÓN

Los suelos contaminados con petróleo afectan el desarrollo de las plantas, y a medida que la contaminación es mayor, la tolerancia de las plantas disminuye (Hernández-Valencia *et al.* 2017). Los compuestos tóxicos presentes en el petróleo pueden afectar la división celular, producir la lisis de la membrana celular, el bloqueo de los espacios intercelulares y la reducción del transporte de nutrientes y metabolitos, así como de las tasas de respiración y fotosíntesis (Pezeshki *et al.* 2000; Figueruelo & Marino Dávila 2004). Físicamente el petróleo puede adherirse a la superficie de las raíces y las semillas, y así reducir la capacidad para absorber agua y oxígeno (Mathew *et al.* 2006). Los crudos livianos contienen mayor proporción de componentes volátiles capaces de entrar fácilmente a través de las paredes celulares de las plantas. En contraste, los crudos pesados contienen en mayor proporción compuestos de alto peso molecular como las resinas y asfaltenos que resultan menos tóxicos, pero que reducen la capacidad de almacenar agua en el suelo (Adam & Duncan 2002). La homogeneidad de la contaminación fue el aspecto más difícil de evaluar en el presente estudio. Por lo general, alrededor de las fosas la contaminación es muy variable ya que los depósitos con petróleo muestran diferentes espesores, viscosidad y extensión. Los hidrocarburos livianos se volatilizan y se biodegradan más rápido que los más pesados (Infante *et al.* 2010), mientras que los hidrocarburos pesados pueden producir costras o capas endurecidas que actúan como barreras para el desarrollo de las plantas.

Las características físicas y químicas de los suelos como textura, conductividad, pH, P disponible, N total, Ca, Mg, Na, K y Al intercambiable no evidenciaron cambios significativos por la contaminación con petróleo, y los valores obtenidos se encuentran dentro de los intervalos reportados para suelos de sabanas bien drenados (López-Hernández & Hernández-Valencia 2008) que, por lo general, son ácidos y con bajo contenido en nutrientes. En el caso del contenido de aceites y grasas, se observaron diferencias claras entre los suelos contaminados y no contaminados adyacentes a las fosas, siendo mucho mayores en el primer caso. Es notoria la variabilidad de los datos en los suelos contaminados (lo

que se refleja en la desviación estándar), hecho esperado si se toma en consideración que los derrames o disposición de hidrocarburos de petróleo no ocurren en forma homogénea y por lo general hay sectores que reciben más aportes de contaminantes que otros, especialmente en donde se ubican los equipos que hacen los trasvases del material que se dispone. Por otra parte, las lluvias incrementan el volumen de agua y desechos dentro de la fosa y se puede producir el anegamiento de los suelos adyacentes y la consecuente contaminación.

La baja concentración de aceites y grasas en los suelos no contaminados puede estar asociada a fuentes de origen vegetal y/o animal, ya que el método utilizado en este estudio no discrimina entre las fuentes minerales y las biológicas. Usualmente, en suelos con bajos contenidos de materia orgánica como los que se encuentran en estas sabanas, el contenido de aceites y grasas de los suelos contaminados proviene principalmente de los hidrocarburos del petróleo (Infante & Morales 2012). Un aspecto que debe considerarse es que el Decreto 2.635 (República de Venezuela 1998) señala que los límites de limpieza o contenido máximo de aceites y grasas que puede tener un suelo es de 3% para desechos confinados y de 1% para desechos esparcidos en el suelo. Para todos los suelos contaminados evaluados en este estudio se puede observar que se sobrepasa el límite establecido por la normativa para el caso de desechos esparcidos, mientras que para las fosas DED 3, DAFO 2, LG 276 y BARED 9 se supera el límite permitido tanto para desechos confinados como esparcidos.

Los resultados mostraron que el número de especies compartidas entre las distintas fosas es muy bajo, y en consecuencia la composición florística es muy diferente entre ellas, aunque las fosas LG276, DED 3 y DAFO 2 se encontraban relativamente cerca entre estas. Varios factores pudieron influir en este resultado, como son la antigüedad de la fosa, tiempo y frecuencia en la cual se han conformado los depósitos de los residuos petroleros, características de los desechos depositados, intensidad y homogeneidad de la contaminación alrededor de la fosa y características de los suelos. Por ejemplo, la fosa Bared 9 presentó la menor riqueza de especies, lo cual pudo estar asociado a movimientos de tierra recientes alrededor de la fosa que eliminaron parte de la cobertura

vegetal, mientras que la fosa Pao 1 presentó en el suelo valores de magnesio intercambiable, pH más ácido y mayor contenido de arenas respecto a las otras fosas, y valores de calcio intercambiable menores respecto a las fosas DAFO 2, DED 3 y LG276. Con esto se quiere destacar que pueden existir otros factores diferentes a la contaminación que pueden explicar las diferencias observadas en la composición florística de las fosas evaluadas.

En principio se esperaría que en fosas más grandes y con mayor perímetro, y en consecuencia mayor área de muestreo, pudieran albergar mayor número de especies (Jiménez-Valverde & Hortal 2003) de la misma forma que suelos con mayor heterogeneidad en la concentración de hidrocarburos pudieran tener mayor riqueza de especies, en virtud de los diferentes microhábitats que pueden albergar especies tolerantes a diferentes concentraciones de petróleo.

Los efectos de la contaminación y, en general, las actividades asociadas a la creación y funcionamiento de las fosas se evidencian en el predominio de especies típicas de hábitats intervenidos, que suman un total de 27 especies en donde destacan algunas introducidas de amplia distribución en el país como *Calotropis procera*, *C. gigantea* y *Ricinus comunis* (Duno de Stefano *et al.* 2007). De ellas, *Calotropis procera* produce gran cantidad de semillas, de 350 a 500 por fruto (Hassan *et al.* 2015), hecho que facilita su propagación. De las especies nativas propias de ambientes intervenidos destaca *Hyptis suaveolens* que también suele tener alta producción de semillas y que es característica de sabanas sobrepastoreadas o pastizales degradados en donde la cubierta herbácea se ha reducido y la alta irradianza favorece su germinación (González-Boscán 1967). Por su parte, *Cyperus aggregatus* es una especie muy frecuente en suelos saturados de humedad y contaminados con petróleo. Gallegos Martínez *et al.* (2000), en un pantano contaminado con petróleo en México, encontró que las Cyperaceae eran las especies más abundantes y capaces de tolerar las concentraciones más altas de petróleo, pero ninguna de las especies reportadas por estos autores se encontró en este estudio. En contraste, *Trachypogon spicatus*, la especie dominante en las sabanas aledañas a las fosas, solo se encontró un individuo en la fosa DAFO 2 y estaba entre las grietas de petróleo meteorizado, por lo que

posiblemente el suelo en contacto a las raíces de esta planta no tenía o tenía bajas concentraciones de hidrocarburos de petróleo.

De las especies identificadas, 26 se han reportado en sabanas bien drenadas y 26 en áreas intervenidas, lo que indica que estos tipos de vegetación fueron las principales fuentes de propágulos para la colonización de los suelos contaminados estudiados. Este resultado es congruente si se toma en cuenta que todas las fosas estudiadas se ubican en áreas en donde predominan sabanas bien drenadas. Otro dato de interés es que 14 especies pueden encontrarse en sabanas inundables, 15 en palmares de pantano de *Mauritia flexuosa* (morichales) y tres en bosques ribereños, lo que estaría en concordancia con el ambiente de humedal que crean las fosas, ya que también almacenan agua de lluvias, de escorrentía y fluidos de los desechos petroleros que ahí se depositan.

Merkl *et al.* (2004) presentaron un inventario de especies que crecían en cuatro suelos contaminados con petróleo, donde solo se consideraban los suelos adyacentes a una fosa petrolera y los restantes eran áreas donde se habían producido derrames accidentales o deliberados, en este último caso con fines de evaluar cómo fue la colonización de la vegetación luego de los derrames y en algunos casos, después de ejecutar el saneamiento del suelo a través de técnicas de biorremediación. El trabajo es pionero sobre el conocimiento de especies que se desarrollan en estos hábitats contaminados con petróleo en Venezuela y en variadas condiciones de contaminación y manejo del suelo; sin embargo, no ofrece información sobre la concentración de hidrocarburos en el suelo, lo cual es importante para establecer la tolerancia de las plantas identificadas a diferentes tipos de contaminación y cómo estas diferencias se reflejan en la composición florística de los sitios estudiados.

En el mencionado estudio, los autores solo consideraron las especies herbáceas e identificaron un total de 57 especies, representadas por 18 leguminosas (Fabaceae con 11 especies, Mimosaceae 4y Caesalpiniaceae 3), 22 gramínoideas (19 Poaceae y 3 Cyperaceae) y otras 17 herbáceas (5 Rubiaceae, 3 Malvaceae, 2 Lamiaceae, 2 Sterculiaceae, Euphorbiaceae, Passifloraceae, Turneraceae, Convolvulaceae y Asteraceae con una especie cada una). La mayor riqueza encontrada en el estudio de Merkl *et al.* (2004) estuvo relacionada con el número más elevado de especies en

sitios en donde se realizó el saneamiento de los suelos y, en consecuencia, las concentraciones de hidrocarburos pudieron ser menores a las encontradas en este estudio, hecho que facilitaría la colonización por mayor número de especies al reducirse el estrés por contaminación.

De las 57 especies identificadas por Merkl *et al.* (2004), solo 11 fueron identificadas en este estudio, hecho que incrementa la lista de especies que pueden desarrollarse en estos hábitats. Las especies comunes fueron *Tridax procumbens*, *Cyperus aggregatus*, *Fimbristylis cymosa*, *Hyptis suaveolens*, *Passiflora foetida*, *Andropogon fastigiatus*, *Antheophora hermaphrodita*, *Eragrostis maypurensis*, *E. viscosa*, *Borreria verticillata* y *Waltheria indica*. Considerando el gran número de fosas petroleras que existe en el país y las condiciones ecológicas y de manejo que presentan cada una de ellas, así como las pocas especies comunes que se encontraron en este estudio y en el de Merkl *et al.* (2004), se deduce que es necesario seguir haciendo este tipo de investigaciones para tener mayor conocimiento de la flora asociada a las fosas petroleras y a otros sitios que han experimentado la contaminación por petróleo. Los trabajos propuestos se deben acompañar con otros estudios donde se evalúen las formas de propagación, tolerancia a la contaminación, requerimientos para su mantenimiento en el tiempo, cobertura y profundidad de desarrollo de las raíces, los cuales pueden ser útiles en la selección de especies para revegetar y/o fitorremediar suelos que han sido sometidos al impacto de la contaminación con petróleo.

CONCLUSIONES

Un total de 40 especies, distribuidas en 18 familias y 33 géneros fueron identificadas en las cinco fosas evaluadas. Las familias con mayor representación fueron Poaceae (8 especies) y Asteraceae (6 especies). Las especies más frecuentes fueron *Calotropis procera*, *Hyptis suaveolens*, *Aristida setifolia*, *Cyperus aggregatus*, *Passiflora foetida*, *Chromolaena odorata*, *Pavonia varians*, *Borreria repens* y *Waltheria indica*. En general, la composición florística fue muy diferente entre las fosas, con un bajo porcentaje de especies compartidas, y con predominio de especies nativas típicas de hábitats intervenidos y de sabanas bien drenadas.

Tomando en cuenta la cantidad de fosas que existen en el país, así como las pocas especies comunes que se encontraron en este estudio y otros previos, es necesario seguir investigando sobre este tópico para tener mayor conocimiento de la flora asociada a las fosas petroleras y su potencial para ser utilizadas en labores de revegetación y fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Investigación de Venezuela, Proyecto Misión Ciencias No 2007001401 y Proyecto PEI-2011001218.

BIBLIOGRAFÍA

- Adam, G. & H. Duncan. 2002. Influence of diesel fuel on seed germination. *Environ. Pollut.* 120: 363-370.
- Anderson, J. & J. Ingram. 1982. *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods*. C.A.B. International. Oxford, England.
- Duno de Stefano, R., G. Aymard, & O. Huber. 2007. *Catálogo anotado e ilustrado de la flora vascular de los llanos de Venezuela*. FUDENA. Fundación Empresas Polar. FIBV. Caracas. Venezuela.
- Figueruelo, J.E. & M. Marino Dávila. 2004. *Química física del medio ambiente y de los procesos ambientales*. Editorial Reverté. Ciudad de México, México.
- Gallegos Martínez, M., A. Gómez Santos, L. González Cruz, M.A. Montes de Oca García, L. Yáñez Trujillo, J.A. Zermeño Eguía Lis & M. Gutiérrez Rojas. 2000. Diagnostic and resulting approaches to restore petroleum contaminated soil in a mexican tropical swamp. *Water Sci. Technol.* 42: 377-384.
- González-Boscán, V. 1967. Efectos del fuego sobre la reproducción de algunas plantas de los llanos de Venezuela. *Bol. Soc. Venez. Ci. Nat.* 27: 70-103.

- Hammer, Ø. & D.A. Harper. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for education and data analysis. *Palaeontol. Electron.* 4(1): 9.
- Hassan, L. M., T.M. Galal, E.A. Farahat & M.M. El-Midany. 2015. The biology of *Calotropis procera* (Aiton) W.T. *Trees* 29: 311-320. DOI 10.1007/s00468-015-1158-7
- Hernández-Valencia, I., L.M. Lárez & J.V. García. 2017. Evaluación de la toxicidad de un suelo contaminado con diferentes tipos de crudos sobre la germinación de dos pastos tropicales. *Bioagro* 29(2): 73-82.
- INAMEH. 2016. Datos hidrometeorológicos. Agosto 2016. <http://www.inameh.gob.ve/web/>
- Infante, C. & F. Morales. 2012. Evaluación de la toxicidad en desechos y suelos petrolizados empleando semillas de *Lactuca sativa* L. *Interciencia* 37: 1-7.
- Infante, C., F. Morales, E.U. Ehrmann, I. Hernández-Valencia & N. León. 2010. Hydrocarbons bioremediation and phytoremediation in tropical soils: Venezuelan study case. In: G. Plaza (ed.). *Trends in bioremediation and phytoremediation*, pp. 429-451. Research Signpost. Kerala, India.
- Jiménez-Valverde, J. & A. Hortal. 2003. Las curvas de acumulación de especies y la necesidad de evaluar la calidad de los inventarios biológicos. *Revista Iber. Aracnol.* 8: 151-161.
- López-Hernández, D. & I. Hernández-Valencia. 2008. Nutritional aspects in *Trachypogon* savannas as related to nitrogen and phosphorus cycling. In: Del Claro, K., P.S Oliveira & V. Rico Gray (eds.). *Tropical Biology and Conservation Management - Volume X: Savanna Ecosystems*, pp. 1-27. Unesco. Eolss Publishers Co. Ltd. Oxford, United Kingdom.
- Mager, D. & I. Hernández-Valencia. 2013. Actividad microbiana durante la fitorremediación de un suelo contaminado con un crudo liviano. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia* 30: 52-71.

- Mathew, M., X. Yang, M. Baxter & E. Senior. 2006. Bioremediation of 6% (w/w) diesel contaminated mainland soil in Singapore: Comparison of different biostimulation and bioaugmentation treatments. *Eng. Life. Sci.* 6 (1): 63-67.
- Merkl, N. 2005. *Phytoremediation of petroleum-contaminated soils in the tropics*. Margraf Publishers. Weikersheim, Germany.
- Merkl, N., R. Schultze-Kraft & C. Infante. 2004. Phytoremediation of petroleum-contaminated soils in the tropics: Pre selection of plant species for eastern Venezuela. *J. Appl. Bot. Food Qual.* 78: 185-192.
- Pezeshki, S., M. Hester, Q. Lin & J. Nyman. 2000. The effects of oil spill and clean-up on dominant US Gulf coast marsh macrophytes: a review. *Environm. Pollut.* 108: 129-139.
- PDVSA. 2015. Balance de la gestión ambiental 2015. Agosto 2016. www.pdvsa.com
- República de Venezuela. 1998. Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos. Gaceta Oficial Extraordinaria No 5245 del 3 de agosto de 1998.
- Statsoft. 2010. *Statistica*. Version 10.0. for Window. Tulsa, USA.
- USEPA. 1996. *Soxhlet extraction, v. I-B. Method 3540C*. United States Environmental Protection Agency, Washington DC. USA.
- Yavari, S., A. Malakahmad & N.B. Sapari. 2015. A review on phytoremediation of crude oil spills. *Water Air Soil Pollut.* 226: 279. doi 10.1007/s11270-015-2550-z