



Colémbolos (Hexapoda) como bioindicadores de la calidad de suelos contaminados con hidrocarburos en el sureste de México

Collembola (Hexapoda) as quality bioindicators of the hydrocarburans polluted soils in Southeastern Mexico

Raúl Uribe-Hernández¹, Carlos H. Juárez-Méndez², Marco A. Montes de Oca^{1*}, José G. Palacios-Vargas², Leopoldo Cutz-Pool² y Blanca E. Mejía-Recarmier²

¹Protección Ambiental, Instituto Mexicano del Petróleo. Lázaro Cárdenas 152 B, Atepehuacan, 07730 México D.F., México.

²Laboratorio de Ecología y Sistemática de Microartrópodos, Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, 04510 México D.F., México.

*Correspondencia: troglolaphysa@hotmail.com

Resumen. Se evaluaron invertebrados del suelo, en particular los colémbolos, como bioindicadores de la calidad de suelos contaminados con hidrocarburos en el sureste de México. Se realizaron 2 muestreos en verano-otoño del 2004, en 4 parcelas de 2 hectáreas, denominadas zona 1, 2, 3 y control. De cada unidad se tomaron 8 muestras que fueron procesadas por medio del embudo de Berlese-Tullgren y 4 por el método de flotación. Para colémbolos se determinaron los siguientes índices ecológicos: abundancia, riqueza, índice de Shannon (H'), dominancia (λ), equidad (J') e índice de similitud (S). Se realizaron análisis fisicoquímicos del suelo: hidrocarburos totales del petróleo (HTP) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), porosidad, pH, CE, MO, N, P, K, CIC y textura. Los HTP, en las zonas contaminadas, sobrepasan los límites de las normas mexicanas ambientales. En todas las zonas de estudio se observaron colémbolos, ácaros y larvas de dípteros, por lo que su abundancia y diversidad pueden ser utilizadas como bioindicadores del grado de contaminación y calidad del suelo. En las zonas contaminadas se registraron abundancias muy bajas de Crustacea, Formicidae, Araneae, Diptera, Pseudoscorpionida, y Diplopoda. Las familias de los colémbolos más ampliamente distribuidas fueron Sminthurididae e Isotomidae. De acuerdo con el análisis de correlación, su diversidad de colémbolos es afectada por la presencia de HAP (flouranteno, naftaleno, pireno, criseno y fenantreno)

Palabras clave: Collembola, suelos contaminados, hidrocarburos, mesofauna.

Abstract. We evaluated invertebrates, with an emphasis on Collembola, as bioindicators of soil quality in hydrocarbon-contaminated soils in southeastern Mexico. We carried out 2 sampling periods in summer-fall of 2004 in 4 parcels of 2 hectares each. From each parcel we processed 8 samples using the Berlese-Tullgren funnel technique and 4 using the flotation method. For Collembola we calculated the following ecological indices: abundance, richness, the Shannon index (H'), dominance (λ), equitativity (J') and the similarity index (S). We also performed the following soil analyses: total petroleum hydrocarbon content (HTP), polycyclic aromatic hydrocarbon content (HAP), porosity, pH, CE, MO, N, P, K, CIC, and texture. In contaminated areas, HTP exceeded the safe limits sets by Mexican environmental legislation. In all studied areas we observed Collembola, mites, and dipteran larvae. The variation in abundance and diversity of these insects can be used as biondicators of the level of contamination and quality of the soil. We found very low abundances of Crustacea, Formicidae, Araneae, Diptera, Pseudoscorpionida, and Diplopoda. The Collembola families that were most widely distributed were Sminthurididae and Isotomidae. Our correlation analysis showed that their diversity is affected by HAP level (flouranthene, naphthalene, pyrene, chrysene and phenanthrene).

Key words: Collembola, polluted soils, hydrocarbons, mesofauna.

Introducción

Dentro de los grupos faunísticos que viven en el suelo, los más importantes son los ácaros oribátidos y colémbolos por su número, diversidad, abundancia de especies

y actividad. Estos grupos se consideran indicadores biogeográficos y ecológicos a causa de su gran aptitud para la especiación, estenotopía, ciclo corto de vida y el poco poder de dispersión de las especies adaptadas a la vida edáfica y a diferentes tipos de suelo, y por sus hábitos alimenticios, como degradadores de la materia orgánica (Johnston, 2000; Palacios-Vargas, 2003). En el caso

Recibido: 11 septiembre 2007; aceptado: 12 octubre 2009

de los cultivos agrícolas, después de una perturbación, puede ocurrir una reducción selectiva de la diversidad de la fauna del suelo sobreviviendo principalmente ácaros y colémbolos (Paoletti et al., 1992; Palacios-Vargas, 2003).

Un valioso indicador ecotoxicológico de la modificación o daño en los ecosistemas terrestres es el incremento en la abundancia de poblaciones de isópodos, debido a su importancia en las cadenas tróficas y por sus hábitos alimenticios, lo cual ha sido evaluado en sitios contaminados con residuos petroquímicos. Dichos organismos fueron utilizados como bioindicadores en una área ocupada por una refinería, encontrándose diferencias significativas en su abundancia (Faulkner y Lochmiller, 2000).

La mayoría de los colémbolos se alimenta de hifas de hongos o de materia vegetal en descomposición (Castaño-Meneses et al., 2004). También existen algunas especies depredadoras que se alimentan de nematodos, rotíferos y de otros colémbolos (Rusek, 1998; Palacios-Vargas et al., 2000). Por su tipo de alimentación desempeñan un papel relevante en la descomposición de la materia orgánica y controlan las poblaciones de bacterias y hongos (Palacios-Vargas et al., 2000).

Los colémbolos son muy valiosos para la estructura edáfica, ya que la mayoría de los suelos contiene millones de sus "pelets" que al retardar la liberación de nutrientes esenciales benefician las raíces de las plantas, además de servir de sustrato para numerosos microorganismos.

Los colémbolos son presa de muchos insectos, en particular de hormigas y escarabajos, así como de numerosos ácaros depredadores, por lo que son un elemento fundamental en las cadenas tróficas (Palacios-Vargas et al., 2000). Su abundancia, la diversidad de especies y características provee información sobre el impacto ambiental de los ecosistemas. Los colémbolos están genéticamente adaptados para tolerar metales pesados; sin embargo, su resistencia a compuestos orgánicos, como los hidrocarburos, no ha sido bien estudiada (Hopkin et al. 1989; Battigelli y Marshall, 1993; Pankhurst y Gupta, 1997).

Se sabe que en sitios contaminados, las cochinillas tienen la capacidad de acumular metales pesados; su hepatopáncreas puede tener concentraciones de zinc, cadmio, plomo y cobre en 1.2%, 0.4%, 2.5% y 3.4% de peso seco, respectivamente, sin efectos aparentemente dañinos. *Dysdera crocata* (Arachnida) ha sido mantenida en laboratorio alimentándose de cochinillas contaminadas. Las cochinillas y arañas poseen sofisticados procesos de desintoxicación que los capacita para sobrevivir con altas concentraciones de metales en los tejidos de su cuerpo, que podrían matar a otros animales (Hopkin et al., 1989). Se ha observado que los géneros *Friesea*, *Schoettella*,

Xenyllodes, *Brachystomella*, *Sinella*, *Ceratophysella*, *Lepidocyrtus*, *Xenylla* y *Entomobrya*, pueden tolerar concentraciones de hasta 669 de Cr, 194 de Cu y 841 mg/kg de Zn, respectivamente. Por otro lado, *Cryptopygus* tolera concentraciones totales de Ni y Br de 142 y 510 mg/kg respectivamente. *Proisotoma* y *Pseudosinella* de hasta 1,721 de Co y 4,302 mg/kg de Mn, correspondientemente y finalmente, *Entomobrya* y *Tullbergia*, soportan concentraciones de 536 mg/kg de Pb (Contreras, 2001).

El uso de colémbolos como indicadores de la calidad y salud del suelo ha sido señalado por varios autores (Frampton, 1997; Kopeszki, 1997; Cutz-Pool, et al., 2007). El método de bioindicación activa para comparar la dinámica poblacional de 2 especies de colémbolos fue utilizado por Kopeszki (1997) durante un periodo de 6 meses, en Viena, Austria. Este autor encontró una disminución en el crecimiento y abundancia de las poblaciones debida a la presencia de ácidos (SO_4), metales pesados y exceso de fertilizantes nitrogenados en los suelos. Frampton (1997) encontró que las aplicaciones de plaguicidas, especialmente organofosforados, afectan negativamente la abundancia de los colémbolos. Así también, Cutz-Pool et al. (2007) encontraron una disminución en la abundancia y en la riqueza de especies de colémbolos al efectuar un estudio sobre los colémbolos edáficos en 2 agroecosistemas con riego contrastante, en Hidalgo, México.

El objetivo del presente estudio fue evaluar la calidad de suelos de una zona de pantano contaminada con hidrocarburos, cercana a la población de Minatitlán, Veracruz, por medio del estudio de los invertebrados del suelo, en particular de los colémbolos, como organismos bioindicadores.

Materiales y métodos

Área de estudio. El área de estudio se localiza en el municipio de Minatitlán, Veracruz, al margen del río Coatzacoalcos y en la ciudad de Minatitlán (17°59'N y 94°33'O). Esta zona de pantano funciona como vaso regulador de la hidrodinámica del río Coatzacoalcos, ubicado aproximadamente a 30 kilómetros de su desembocadura en el golfo de México. Se considera una superficie aproximada de 443 hectáreas. Dicha zona se localiza dentro de la planicie costera del golfo de México, subprovincias ecológicas de la llanura costera veracruzana y de las llanuras y pantanos tabasqueños, donde predominan los terrenos bajos y pantanosos con algunos lomeríos (INEGI, 1993).

La vegetación está compuesta por plantas acuáticas y subacuáticas. Las especies más abundantes son: *Echinochloa cruz-pavonis*, *Paspalum virgatum*, *Salvinia*

minima, *Thalia cf. geniculata*, *Typha latifolia*, *Mimosa pigra*, *Cyperus articulatus*, *C. thyrsoiflorus*, *C. elegans* y *C. odoratus* (Gallegos-Martínez et al., 2000).

La actividad industrial en general, incluyendo la petrolera, inició sus operaciones en 1909, donde el delta del río Coatzacoalcos sufrió sus impactos debido a procesos de descargas y transporte de diversos productos de origen petrolero. Amplias zonas pantanosas aledañas a los márgenes del río Coatzacoalcos se utilizaron como zonas de desechos. Tal es el caso de la zona inundable o de pantano cercana a Minatitlán (Toledo, 1983).

De acuerdo con la clasificación de Köppen, en la región predomina el clima de tipo Am (i'') cálido húmedo, con abundantes lluvias en verano. La temperatura promedio anual es de 25.7°C, siendo de 34°C la máxima y de 19°C la mínima. No existe una amplitud térmica (i'') importante, ya que la oscilación varía de 6 a 9°C. El mes más lluvioso es diciembre y el más seco abril (INEGI, 1993). En la zona de estudio, dominan los suelos de tipo gleysol (eútrico y mólico) (INEGI, 1993).

Muestreo. Se realizaron 2 muestreos, uno en julio y otro en octubre de 2004, en 4 parcelas (Fig.1) de 2 ha, denominadas zonas 1, 2, 3 y control; la zona control es una zona poco perturbada por actividades antropogénicas y sin influencia de actividad industrial petrolera. De cada parcela se recolectaron 12 muestras al azar, 4 se procesaron por flotación y 8 por el embudo de Berlese-Tullgren. Las muestras consistieron en núcleos de suelo en cajas de plástico de 15×15 cm de lado y 5 cm de profundidad, que fueron colocadas en bolsas de plástico. Para las muestras por flotación se tomó en el campo la misma cantidad de suelo y se disolvió en una cubeta con 10 litros de agua, recolectándose el sobrenadante y conservándose en frascos con una solución de alcohol al 70%. Las muestras de suelo

para los análisis de hidrocarburos se colocaron en frascos de vidrio de 250 g de suelo conservados a 4°C.

Análisis de laboratorio En el laboratorio, las muestras de suelo de las cajas de plástico se colocaron en la malla del embudo de Berlese-Tullgren, donde permanecieron 3 días sin luz y 3 con luz. Los organismos se recolectaron en frascos con una solución de alcohol al 70%.

Con ayuda del microscopio estereoscópico los invertebrados se separaron por grupos taxonómicos, en viales con alcohol al 70%. Para los colémbolos se hicieron preparaciones permanentes en líquido de Hoyer, y con un microscopio de contraste de fases se determinaron las especies, de acuerdo con las claves de Christiansen y Bellinger (1981). Las muestras de suelo se analizaron por triplicado para determinar los siguientes parámetros: hidrocarburos totales del petróleo (HTP), por espectroscopia de infrarrojo, con base en el método EPA 418.1 (IMP, 1994). Se determinaron los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP): naftaleno y pireno, por cromatografía de gases acoplada a espectrofotometría de masas (NOM-EM-138-ECOL-2005); densidad aparente, por el método de la probeta; densidad real, por el del picnómetro; porosidad, por medio de la diferencia entre la densidad aparente y real, pH en agua destilada en relación 1:2, conductividad eléctrica (CE) (1:5 H₂O), materia orgánica (M.O.) por el método de Walkley-Black, nitrógeno total (Kjendall), fósforo (Olsen), potasio (NH₄Oac 1 N pH 7), capacidad de intercambio catiónico (CIC), % arena, % limo y % de arcilla. Para los colémbolos se analizaron los siguientes parámetros ecológicos: abundancia, riqueza, índice de diversidad de Shannon (H), dominancia de Simpson (λ), equitatividad de Pielou (J), índice de Similitud de Sørensen (S). Se realizó la prueba estadística ANOVA (de una vía) y el análisis de correlación para ver relaciones entre variables físicas y químicas del suelo, utilizando SPSS v. 11 (SPSS, 2003).

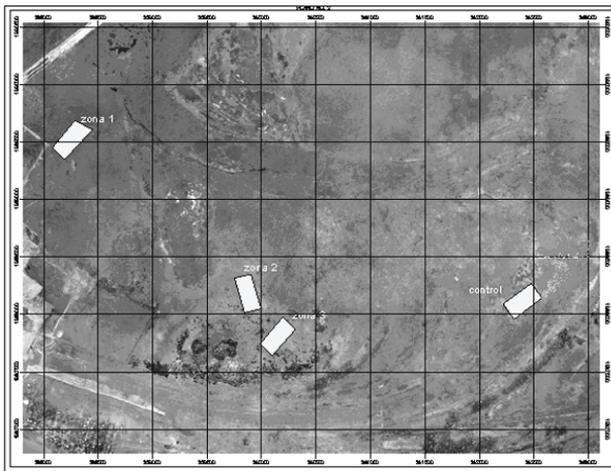


Figura 1. Vista aérea de las zonas de estudio.

Resultados

Invertebrados del suelo. Se recolectó un total de 812 ejemplares de mesofauna y macrofauna del suelo que se contabilizaron por separado en grupos taxonómicos; de ellos, 274 fueron colémbolos (Cuadro 1). La zona control obtuvo la mayor abundancia, con 569 individuos, seguida de las zonas 1 y 3, con 126 y 78 individuos respectivamente. En la misma zona control se obtuvieron 16 diferentes taxones de invertebrados, mientras que en las zonas contaminadas sólo 7. La menor cantidad, 39 individuos, se obtuvo en la zona 2. Estadísticamente, las zonas 1, 2 y 3 comparadas con el control son distintas de acuerdo con la prueba *post hoc* de Tukey ($p < 0.05$).

Cuadro 1. Total de organismos por grupos de mesofauna y macrofauna del suelo en la zona de pantano en Minatitlán Veracruz

	Control	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Collembola	121	95	13	45
Acarida	254	24	5	26
Larvas de Diptera	40	2	17	3
Crustacea	111	1	0	0
Hymenoptera (Formicidae)	5	0	1	1
Araneae	1	0	1	1
Psocoptera	2	2	1	0
Blatoidea	1	0	0	1
Diptera	2	0	1	1
Pseudoescorpionida	1	1	0	0
Larvas Coleoptera	19	0	0	0
Coleoptera	4	0	0	0
Dermaptera	1	0	0	0
Isopoda	3	0	0	0
Nematoda	3	0	0	0
Chilopoda	1	0	0	0
Diplopoda	0	1	0	0
Abundancia	569	126	39	78
Núm. de taxa	16	7	7	7

En las 3 zonas, la mesofauna disminuyó y se ausentaron los grupos de nematodos, coleópteros, larvas de coleópteros, dermápteros, isópodos y quilópodos.

Análisis de los índices ecológicos de los colémbolos. Los colémbolos se presentaron en las 4 zonas de estudio, por lo que se decidió identificar las especies (Cuadro 2), para lo cual se realizaron 225 preparaciones (83% del total obtenido). Se determinaron 9 familias, 20 géneros y 24 especies. *Ballistura* sp. fue la más abundante, en la zona 1 con 50 individuos; *Sminthurides* sp. fue la de mayor distribución, encontrándose en todas las zonas. Asimismo, las familias Isotomidae y Sminthuridae se encontraron en todas las zonas.

En las zonas contaminadas se encontraron las siguientes especies de colémbolos, que pudieran ser tolerantes a las altas concentraciones de los hidrocarburos estudiados (Cuadro 6): *Americabrya* sp., *Lepidocyrtus* sp., *Pseudosinella* sp., *Seira* sp., *Willowsia* sp., *Ballistura* sp., *Ballistura* ca. *excavata*, *Cryptopygus* ca. *thermophilus*, *Isotoma* sp., *Isotomurus* sp., *Paronella* sp., *Sminthurides* sp., *Acherontides* ca. *juxtlahuacaensis*, *Xenylla welchi*, *X. ca. welchi*, *Cyphoderus* sp., *Deuteriosminthurus* sp. y *Brachystomella* sp. De las especies que únicamente

Cuadro 2. Lista faunística de Collembola del pantano de la zona de estudio

	Control	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Hypogastruridae				
<i>Xenylla welchi</i>	2	0	0	1
<i>X. ca. welchi</i>	5	0	0	1
<i>Acherontides</i> ca. <i>juxtlahuacaensis</i>	0	0	0	10
Brachystomellidae				
<i>Brachystomella</i> sp.	0	1	0	0
Isotomidae				
<i>Folsomides</i> sp.	30	0	0	0
<i>Folsomides parvulus</i>	8	0	0	0
<i>Ballistura</i> sp.	0	50	0	2
<i>B. ca. excavata</i>	3	3	2	0
<i>Cryptopygus</i> ca. <i>thermophilus</i>	3	1	0	0
<i>Isotomurus</i> sp.	8	9	0	0
<i>Isotoma</i> sp.	2	1	0	0
<i>Isotomiella</i> sp.	2	0	0	0
<i>Isotomiella minor</i>	4	0	0	0
Entomobryidae				
<i>Americabrya</i> sp.	0	1	0	0
<i>Willowsia</i> sp.	0	0	0	1
<i>Seira</i> sp.	0	0	0	1
<i>Lepidocyrtus</i> sp.	8	0	0	0
<i>Pseudosinella</i> sp.	12	8	0	0
Paronellidae				
<i>Paronella</i> sp.	0	0	1	0
<i>Trogolaphysa</i> sp.	3	0	0	0
Cyphoderidae				
<i>Cyphoderus</i> sp.	1	2	0	1
Sminthuridae				
<i>Sminthurides</i> sp.	18	6	4	6
Sminthuridae				
<i>Sminthurus</i> sp.	1	0	0	0
Bourletiellidae				
<i>Deuteriosminthurus</i> sp.	1	0	0	1

se encontraron en el control están: *Trogolaphysa* sp., *Sminthurus* sp., *Folsomides* sp. y *F. parvulus*, estas últimas de la familia Isotomidae (Cuadro 2).

El sitio control presentó la mayor cantidad de familias de colémbolos, con 8; lo siguió la zona 3 con 6 familias y finalmente la zona 1 con 5. En la zona control, la dominancia (Cuadro 3) está bien distribuida, presentando un equilibrio, con una abundancia de 111 individuos y 17 especies, teniendo un valor de equidad de $J' = 0.83$ sólo

superada por la zona 2 ($J' = 0.87$) de entre las otras zonas estudiadas.

La zona 1 tiene una abundancia de 82 individuos, con un valor de índice de Shannon de $H' = 2$, una especie dominante (*Ballistura* sp.), con 50 individuos. Su equidad muestra que se encuentra bien distribuida. Esta zona junto con el control son las que presentaron menor similitud (0.12%) con respecto a las zonas restantes (Cuadro 4).

En la zona 2 sólo se encontraron 7 individuos de *Ballistura* ca. *excavata*, *Paronella* sp. y *Sminthurides* sp. (que representan 3 familias). Esta zona tuvo la menor abundancia de colémbolos (Cuadro 3), lo que se refleja en un índice de diversidad menor que el del control y la zona 1; asimismo, tiene menor dominancia, lo que afecta la equidad a pesar de que en la zona 2 están mucho más distribuidas las especies.

La zona 3 (Cuadro 3) tuvo el menor índice de diversidad de Shannon ($H' = 0.98$) y predominó *Acherontides* ca. *juxtalahucaensis* y, a su vez, menor equidad. El mayor índice de similitud (S) se establece entre la zona 3 y 2 donde se comparte la mayor cantidad de especies. La diversidad presentó una diferencia significativa con el control y la zona 2 ($p < 0.05$), el control y la zona 3.

Análisis fisicoquímico de suelos de las zonas estudiadas. Los resultados de los análisis fisicoquímicos de los suelos se presentan en el Cuadro 5. La porosidad es alta para las zonas 1, 3 y control, mientras que para la zona 2 fue media. El pH es moderadamente ácido en la zona 1 y control y fuertemente ácido en las zonas 2 y 3 (NOM-021-RECNAT-2000). De acuerdo con los resultados de la conductividad eléctrica (CE) (Cuadro 5), los suelos se clasifican como no salinos (Rodríguez y Rodríguez, 2002), la materia orgánica es media en las zonas 2, 3 y en la de control y muy baja en la zona 1. De acuerdo con el criterio de Aguilera (1989) se encontró que el nitrógeno total es pobre en la zona 3 y en la de control y extremadamente pobre para la zona 1 y 2. Se observó que el fósforo es alto en todas las zonas (NOM-021-RECNAT-2000), el potasio es bajo en la zona 2, medio para 1, 3 y la de control. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es alta en el

Cuadro 3. Índices ecológicos del total de colémbolos

	Control	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Abundancia	111	82	7	23
Riqueza de especies	17	10	3	9
Índice de Shannon (H')	4	2	1.3	0.98
Dominancia (λ)	0.16	0.3	0.13	0.69
Equidad (J')	0.83	0.63	0.87	0.42

Cuadro 4. Índice de Similitud de las zonas de estudio

	Control	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Control		0.12	0.44	0.27
Zona 1			0.14	0.23
Zona 2				0.51

control y media para las zona 1, 2 y 3.

La textura de los suelos son arcillo limoso (zona 1), arcilloso (zona 2), franco arcilloso (zona 3 y control) (Aguilera, 1989).

Los hidrocarburos totales del petróleo (HTP) (Cuadro 6) de las zonas 1, 2 y 3 sobrepasan los límites máximos de 2 000 mg/kg permitidos en la NOM-EM-138-ECOL-2002 para uso de suelo industrial, Con respecto a los hidrocarburos aromáticos policíclicos HAP (Cuadro 6), el control presentó pequeñas trazas de hidrocarburos aromáticos que no representan riesgo ecológico alguno a diferencia de las zonas 1, 2 y 3 que presentaron la mayoría de los HAP analizados y donde una muestra de la zona 3 rebasa el límite de benzo(a)antraceno permitido en la NOM-EM-138-ECOL-2002, para suelos de uso agrícola, forestal, recreativo y de conservación y para uso de suelo residencial, pero no rebasa el límite para uso de suelo industrial, de 8 mg/kg.

De acuerdo con la prueba de varianza (ANOVA) no hubo diferencia significativa al relacionar la riqueza con los hidrocarburos totales del petróleo (HTP; $p = 0.082$).

El índice de diversidad mostró una correlación negativa y significativa con las concentraciones de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) como flouranteno, naftaleno, pireno, criseno y fenantreno (Fig. 2 a-e), lo que indica que dicho índice está afectado por la concentración de esos hidrocarburos en las zonas 1, 2 y 3 (Fig. 2a-e).

Discusión

En ambos muestreos se observa la presencia de ácaros, colémbolos y larvas de dípteros en la mayoría de las muestras; por lo que su abundancia y diversidad podrán utilizarse en el futuro como indicadores biológicos de la calidad del suelo, debida a la alta capacidad reproductiva y su tolerancia a vivir en condiciones adversas (Coulson y Birkemoe, 2000). Los ácaros son más abundantes en el control porque se encuentran en ambientes más estables y protegidos (Ruess et al., 2001), pero los colémbolos son mucho más abundantes en las zonas contaminadas, ya que pueden resistir mejor algunos contaminantes y degradarlos

Cuadro 5. Análisis fisicoquímico de suelos de las zonas estudiadas

	Porosidad (%)	pH (1:2 H ₂ O)	CE (1:5 H ₂ O mmhos/cm dS m ⁻¹)	M.O. (%) (Walkley - Black)	N* (%) (Kjendall)	P (Olsen ppm)	K (NH ₄ Oac 1 N pH 7) meq/100g (cmoles+Kg ⁻¹)
Zona 1	52	6.4	0.31	0.5	0.02	35	0.5
Zona 2	37	4.7	0.17	2.4	0.02	13	0.2
Zona 3	55	4.7	0.18	2.7	0.05	72	0.3
Control	54	5.2	0.23	3.3	0.05	64	0.6

	CIC (meq/100g)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)
Zona 1	22.6	9	44	47
Zona 2	20.0	29	26	45
Zona 3	24.6	39	30	31
Control	32.0	41	29	30

Cuadro 6. Análisis de la concentración de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) y de algunos hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), de los suelos de las zonas de estudio. Las unidades son mg/kg

	HTP	Criseno	Fenantreno	Fluoranteno	Naftaleno	Pireno	Benzo(a)antraceno
Zona 1	28 311	0.0139	0.0124	0.0508	0.0110	0.0213	0.3340
Zona 2	214 515	2.1403	2.3450	0.2404	0.5451	1.0835	0.0903
Zona 3	14 858	0.2138	0.4651	0.0264	0.0713	0.5238	1.3250*
Control	270	0.0002	0.0005	0.0002	0.0003	0.0002	0.0003

*Rebasa el límite de NOM-EM-138-ECOL-2002

(HAP): benzo(a)antraceno, criseno, fenantreno, fluoranteno, naftaleno y pireno.

(Butcher et al., 1971). La ausencia de nematodos en las zonas contaminadas y su presencia en 2 muestras en el control pueden ser útiles como indicadores, ya que Blakely et al., (2002) encontraron que los HAP (creosota) afectan más a los nematodos que a los ácaros y colémbolos, debido al íntimo contacto con las partículas del suelo y a su cutícula permeable. Faulkner y Lochmiller (2000) notaron más densidades y variedad de macroartrópodos, principalmente isópodos, en zonas contaminadas con metales pesados y residuos orgánicos (tolueno, xileno y pireno) que el control, debido a que algún tóxico incrementa su capacidad reproductiva. La presencia de 5 ejemplares de Formicidae (Cuadro 1) en la zona control y un sólo individuo en las zonas contaminadas 2 y 3, sustenta el daño producido por la presencia de los hidrocarburos en las zonas contaminadas, así como el uso que se le puede dar a los Formicidae en futuras investigaciones en esta área de estudio, como indicadores biológicos (Arcila y Lozano-Zambrano, 2003). La presencia de crustáceos

en el control se debe a que cerca de ahí se encuentra un cuerpo de agua propio de las zonas pantanosas. Los demás artrópodos encontrados en menor cantidad, como Dermaptera, Blatoidea, Psocoptera, Diptera y Diplopoda son característicos de suelos de sistemas tropicales (Barajas-Guzmán y Álvarez-Sánchez 2003).

En el Cuadro 2 se muestra una lista de las especies de colémbolos que se hallaron en las zonas contaminadas. En ensayos de toxicidad en suelos contaminados con metales, Natal da Luz et al. (2004) utilizaron *Folsomia candida* (Collembola: Isotomidae) la cual, por ser sensible a los cambios químicos, es capaz de evitar condiciones no favorables. Blakely et al. (2002) notaron que Isotomidae es abundante en suelos contaminados con creosota. La mayoría de las especies de esta familia viven en el suelo y algunas especies pueden estar asociadas a cuerpos de agua de manera secundaria (Palacios-Vargas et al., 2000).

Aunque se encontraron valores bajos en el pH, éstos son comunes en regiones donde las precipitaciones son altas,

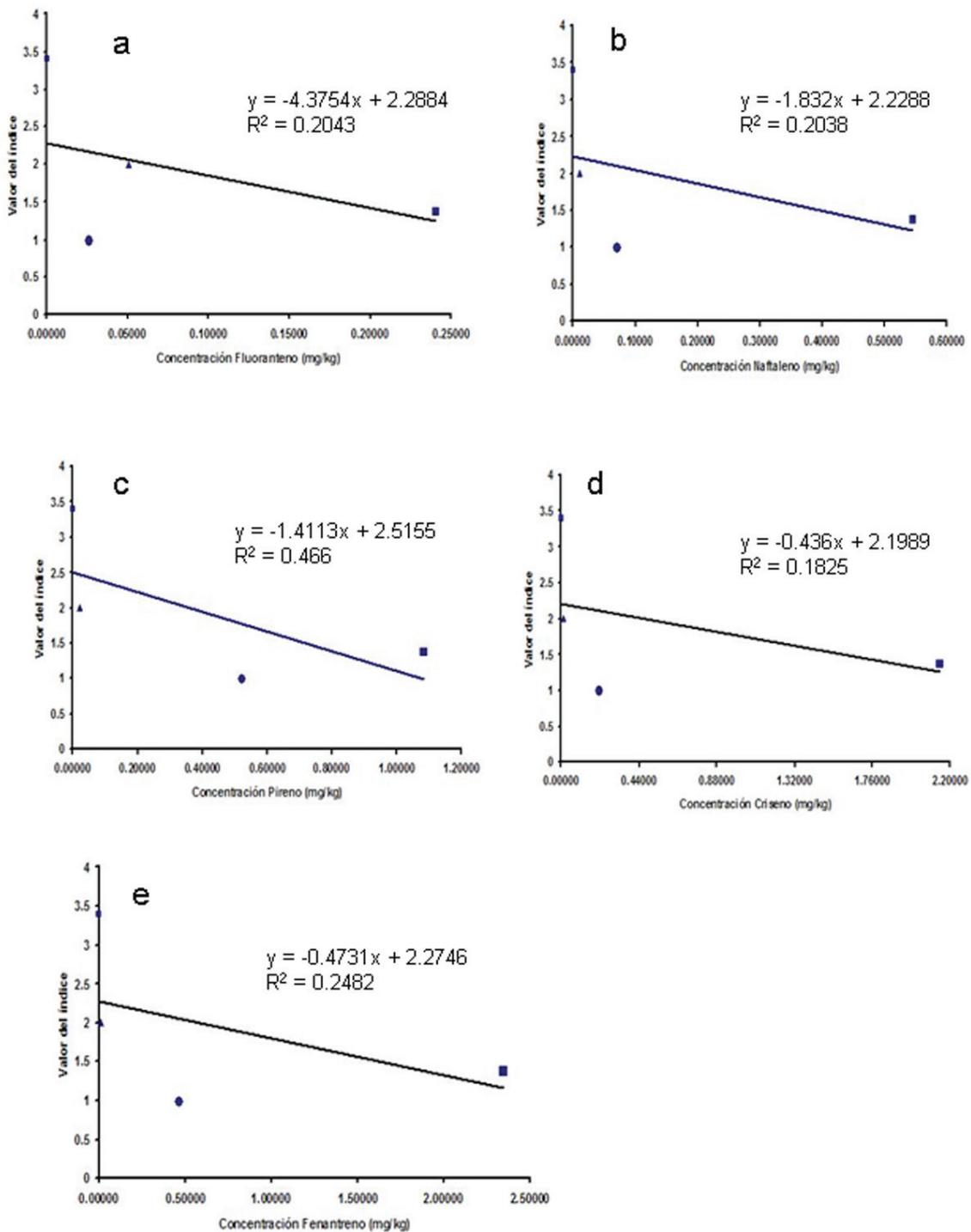


Figura 2. Tendencia entre el índice de diversidad y la concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) a, flouranteno; b, naftaleno; c, pireno; d, criseno y f, fenantreno.

como es el caso en el sur de Veracruz (Aguilera, 1989). A pesar de que en el sitio de estudio el suelo es ácido no hay escasez de nutrimentos; sin embargo, existen grandes cantidades de hidrocarburos en las zonas contaminadas, que afectan la calidad del suelo.

La actividad industrial petrolera no ha influido en la zona control y está poco perturbada por otras actividades antropogénicas, lo que se refleja en todos los índices ecológicos anteriormente utilizados. En el control, la presencia de hidrocarburos son de origen biogénico, originados por la humificación de la materia orgánica o los incendios forestales (Henner et al., 1997). Tomando en cuenta los colémbolos hallados en el suelo de las zonas 3 y 2 (Cuadro 3) y los datos obtenidos del índice de diversidad de Shannon (H'), dominancia (λ), abundancia y equitatividad (J') (también asociados a la actividad industrial petrolera que se realiza en estas zonas), se puede considerar que su calidad ambiental es baja. Por tal motivo, los cambios causados a la estructura de la comunidad de la biota del suelo puede causar a largo plazo efectos negativos en todo el ecosistema (Rusek y Marshall, 2000).

Según los resultados, la zona 2 fue la más afectada por la contaminación al presentar solamente 3 especies de colémbolos; *Ballistura ca. excavata*, *Paronella* sp. y *Sminthurides* sp., además de que en esta zona se encontró la mayor cantidad de hidrocarburos en promedio (HTP y HAP), seguida de la zona 1 y 3, afectando a la mesofauna y macrofauna del suelo. La contaminación de suelos con hidrocarburos afecta algunas de sus propiedades: al aglutinarse las partículas se generan estructuras más gruesas que cubren sus superficies y el espacio poroso afecta su aireación, la película que cubre las partículas es hidrófoba y disminuye la retención de agua (Pérez et al., 2002). Los HAP afectan los organismos a través de los mecanismos de toxicidad que interfieren con las funciones del sistema enzimático de la membrana celular, los epóxidos y dihidrodioles al unirse a proteínas de los diferentes organelos celulares o al DNA conducen a mutaciones, malformaciones, tumores y cáncer (Hoffman et al., 2003). *Ballistura* sp. fue la especie más abundante en la zona 2, lo que probablemente se deba al aumento de su capacidad reproductiva por algún contaminante (Faulkner y Lochmiller, 2000).

Es de importancia mencionar que la NOM-SEMARNAT/SS-138-2005 establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. Esta norma no contempla los HTP; sin embargo, no sobrepasa el límite de benzo(a)antraceno, que es de 2 mg/kg para suelo de uso agrícola. La norma sólo contempla 5 HAP, que fueron analizados en este trabajo, y no sobrepasan los límites máximos permisibles.

Jensen y Sverdrup (2002) en ensayos de toxicidad con pireno, en *Folsomia fimetaria* (Isotomidae), a varias concentraciones, encontraron la EC (concentración que produce efectos observables en porcentajes de las muestras) EC_{50} y EC_{10} de 23 y 15 mg/kg respectivamente. El valor más alto para pireno se encontró en la zona 2 con 1.08 mg/kg; sin embargo, la mezcla de varios HAP puede ser sinérgico para la mesofauna y macrofauna, lo que puede evaluarse a través de pruebas en laboratorio y así verificar el impacto de los contaminantes en condiciones controladas (Jensen y Sverdrup, 2002).

Es posible que los ácaros y colémbolos en las zonas contaminadas se alimenten de bacterias y hongos, los cuales toleran y biodegradan altas concentraciones de hidrocarburos (Atlas, 1991; Rivera et al., 2002). Domene et al., (2007) utilizaron a *Folsomia candida* y *F. fimetaria* en ensayos de toxicidad con lodos de aguas residuales, estas especies ingieren el lodo solamente, cuando no existe alimento sin contaminar, también se sabe que *F. candida* deja de alimentarse al aumentar la concentración de lodos residuales.

En conclusión, durante el estudio se recolectaron 274 colémbolos representados por 24 especies, de las cuales, 6 son nuevos registros para el estado de Veracruz. La familia Isotomidae es la más abundante.

Una variación en la estructura de la comunidad de Collembola se encontró en el tiempo y en el espacio; puede ser explicada por la influencia de los factores abióticos (HTP, HAP) como parámetros relacionados con el suelo alterado.

La disminución de la similaridad (de 51-12 %) en las interacciones de las zonas muestreadas proporciona evidencias de que existen alteraciones en la composición de las comunidades de Collembola en las distintas zonas estudiadas debidas a la contaminación (Cuadro 4).

Las propiedades, tales como pH, EC, MO, Cationes intercambiables (Mg^{2+} , Na^{+}) y los hidrocarburos afectan la composición y abundancia de las comunidades de Collembola, por lo que se concluye que especies como *Acherontides ca. juxtlahuacaensis* y *Sminthurides* sp. son indicadoras de ambientes ácidos con concentraciones altas de hidrocarburos, tales como las zonas 2 y 3, mientras que especies como *Folsomides* sp., *Ballistura* sp. y *Pseudosinella* sp. tienen afinidad con suelos neutros que contienen una menor cantidad de hidrocarburos como es el caso de la zona 1 y el control.

Agradecimientos

A PEMEX Refinación, por el auspicio para la realización de este trabajo; A las siguientes personas del

Instituto Mexicano del Petroleo: M. en C. Marco Tenorio, M. en C. Juan Zermeño, Biól. Mauricio Cortez, Dra. Myriam Amezcua, M. en C. Gloria Avelino, M. en C. Víctor Martínez, Biól. Iván Almazán. El M. en C. Ricardo Iglesias Mendoza (Laboratorio de Ecología y Sistemática de Microartrópodos, Facultad de Ciencias, UNAM) revisó la versión final de este trabajo.

Literatura citada

- Aguilera, H. N. 1989. Tratado de edafología de México, t. I. Facultad de Ciencias, UNAM. México, D.F. 222 p.
- Arcila, C. M. y F. H. Lozano-Zambrano. 2003. Hormigas como herramienta para la bioindicación y el monitoreo. *In* Introducción de las hormigas de la región neotropical, F. Fernández (ed.), Instituto Alexander von Humboldt, Bogotá. p. 159-166.
- Atlas, R. M. 1991. Microbial hydrocarbon degradation Biorremediation of oil spill. *Chemistry, Technology and Biotechnology* 52:149-156
- Barajas-Guzmán, G. y J. Álvarez-Sánchez. 2003. La comunidad de desintegradores en una selva húmeda tropical. *In* Ecología del suelo en la selva tropical húmeda de México. J. Álvarez-Sánchez y E. Naranjo-García (eds.). Instituto de Ecología, Xalapa, Veracruz/ Instituto de Biología, UNAM/ Facultad de Ciencias, UNAM, México, D.F. p. 162-184.
- Battigelli, J. P. y V. G. Marshall. 1993. Relationships between soil fauna and soil pollutants. *In* Proceedings of the forest ecosystem dynamics workshop, Victoria, B.C. p. 31-34.
- Blakely, J. K., D. A. Neher y A. L. Spangberg. 2002. Soil invertebrate and microbial communities and decomposition as indicators of polycyclic aromatic hydrocarbon contamination. *Applied Soil Ecology* 21:71-88.
- Butcher, J. W., R. Zinder y R. Snider. 1971. Bioecology of edaphic Collembola and Acarina. Department of Entomology, Michigan State University, East Lansing. p. 249-288.
- Castaño-Meneses, G., J. G. Palacios-Vargas y L. Q. Cutz-Pool. 2004. Feeding habits of Collembola and their ecological niche. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Zoología* 75:135-142.
- Christiansen, K. A. y P. F. Bellinger. 1981. The Collembola of North America, a taxonomic analysis. Grinnell College, Iowa. 1322 p.
- Contreras, R. V. 2001. Impacto en la ecología de algunos géneros del orden Collembola por la incorporación de contaminantes en suelos de San Salvador, Hidalgo, México. Tesis, Maestría Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F. 121 p.
- Coulson, S. y T. Birkemoe. 2000. Long-term cold tolerance in arctic invertebrates: recovery after 4 years at below -20 degree C. *Canadian Journal of Zoology* 78: 2055-2058.
- Cutz-Pool, L. Q., J. G. Palacios-Vargas, G. Castaño-Meneses y N. E. García-Calderón. 2007. Edaphic Collembola from two agroecosystems with contrasting irrigation type in Hidalgo State, Mexico. *Applied Soil & Ecology* 36:46-52.
- Domene, X., T. Natal da Luz, J. M. Alcañiz, P. Andrés y J. P. Sousa. 2007. Feeding inhibition in the soil collembolan *Folsomia candida* as an endpoint for the estimation of organic waste ecotoxicity. *Environmental Toxicology and Chemistry* 26:1538-1544.
- Faulkner, B. C. y R. L. Lochmiller. 2000. Increased abundance of terrestrial isopod populations in terrestrial ecosystems contaminated with petrochemical wastes. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 39: 86-90.
- Frampton, G. K. 1997. The potencial of Collembola as indicators of pesticide usage: evidence and methods from the UK arable ecosystem. *Pedobiologia* 41:179-184.
- Gallegos-Martínez, M., Gómez Santos L., González Cruz L., Montes de Oca García A., Zermeño Eguía Lis J. y Gutiérrez Rojas M. 2000. Diagnostic and resulting approaches to restore petroleum contaminated soil in Mexican tropical swamp. *Water Science and Technology* 42:377-384.
- Henner, P., M. Schiavon, J. Morel, y É. Lichtfouse. 1997. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) occurrence and remediation methods. *Analisis Magazine* 25:56-59
- Hoffman D. J., B. Rather y J. Cairns 2003. Handbook of ecotoxicology, 2nd edition.. Lewis, Boca Raton, Florida. 1290 p.
- Hopkin, S.P., C. A. Hames, y A. Dray. 1989. X-ray microanalytical mapping of the intracellular distribution of pollutant metals. *Microscopy and Analysis* 14:23-27.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática).1993. Anuario estadístico del estado de Veracruz. Gobierno del estado de Veracruz. Aguascalientes, Aguascalientes. 338 p.
- IMP (Instituto Mexicano del Petróleo). 1994. Determinación de hidrocarburos totales del petróleo y sedimento por FT-IR. Método IMP-QA-620. División de Química Analítica, México, D.F. 12 p.
- Jensen, N. y L. Sverdrup. 2002. Joint toxicity of linear alkylbenzene sulfonates and pyrene on *Folsomia fimetaria*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 52:75-81.
- Johnston, J. M. 2000. The contributions of microarthropods to aboveground food webs: A review and model of belowground transfer in a coniferous forest. *The American Midland Naturalist* 143: 226-238.
- Kopeszki, H. 1997. An active bioindication method for the diagnosis of soil properties using Collembola. *Podobiologia*, 41:159-166.
- Natal da Luz, T., R. Ribeiro y J. P. Sousa. 2004. Avoidance test with Collembola and earthworms as early screening tools for site specific assessment of polluted soils. *Environmental Toxicology and Chemistry* 9: 2188-2193.
- NOM-021-RECNAT-2000. Norma Oficial Mexicana de Emergencia que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelo. Estudios, muestreos y análisis. Diario Oficial de la Federación, martes 31 de diciembre de 2002. p. 1-42.
- NOM-EM-138-ECOL-2002. Norma Oficial Mexicana de Emergencia que establece los límites máximos permisibles de contaminación en suelos afectados por hidrocarburos, la caracterización del sitio y procedimientos para la restauración. Diario Oficial de la Federación, martes 20 de agosto de 2002. p. 43-53.

- NOM-SEMARNAT/SS-138-2005. Norma Oficial Mexicana de Emergencia. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. Diario Oficial de la Federación, 30 de marzo de 2005. p. 1-21.
- Palacios-Vargas, J. G., G. Castaño-Meneses y B. E. Mejía-Recamier. 2000. Collembola. *In* Biodiversidad, taxonomía y biogeografía de artrópodos de México: hacia una síntesis de su conocimiento, J. Llorente Bousquets, A. N. García Aldrete y E. González-Serrano (eds.). Instituto de Biología, UNAM, México, D.F. p. 249-273.
- Palacios-Vargas, J. G. 2003. Los microartrópodos (Collembola) de la selva tropical húmeda. *In* Ecología del suelo en la selva tropical húmeda de México, J. Álvarez-Sánchez y E. Naranjo-García (eds.). Instituto de Ecología, Xalapa, Veracruz. Instituto de Biología, UNAM/Facultad de Ciencias, UNAM, México, D.F. p. 217-225.
- Pankhurst, B. M y V. V. Gupta. 1997. Biological indicator of soil health. CABI, Wallingford, Oxon. 451 p.
- Paoletti, M. G., D. Pimentel, B. R. Stinner y D. Stinner. 1992. Agroecosystem biodiversity: matching production and conservation biology. *Agriculture, ecosystems and environment* 40:3-23.
- Pérez, V. J., G. García y F. Esparza. 2002. Papel ecológico de la flora rizosférica en fitorremediación. *CINVESTAV Avances y Perspectivas* 21: 297-300.
- Rivera-Cruz, M. del C., R. Ferrera-Cerrato, H. V. Volke, V.R. Rodríguez, y L. L. Fernández. 2002. Adaptación y selección microbiana autóctona en medios de cultivos enriquecidos con benzo(a)pireno. *Agrociencias* 36: 503-514.
- Rodríguez, H. F. y J. Rodríguez. 2002. Métodos de análisis de suelos y plantas, criterios e interpretación. Trillas, México, D.F. 196 p.
- Rusek, J. 1998. Biodiversity of Collembola and their functional role in the ecosystem. *Biodiversity and Conservation* 7:1207-1219.
- Rusek, J. y V. G. Marshall. 2000. Impacts of airborne pollutants on soil fauna. *Annual Reviews Ecology Systems* 31: 395-423.
- Ruess, L., I. Schmidt, A. Michelsen y S. Jonasson. 2001. Manipulations of a microbial based soil food web at two arctic sites: evidence of species redundancy among the nematode fauna. *Applied Soil Ecology* 17:19-30.
- SPSS. 2003. Guía del usuario del sistema base de SPSS v. 11 para Windows. SPSS, Dublin. 463 p.
- Toledo, A. 1983. *Cómo destruir el paraíso*. Océano, México, D.F. 151 p.