



Nematodos como bioindicadores para evaluar el estado edáfico de un área de Selva Baja Caducifolia en el estado de Guerrero, México

Nematodes as bioindicators to evaluate the edaphic state of a Low Deciduous Forest area in the state of Guerrero, México

Joselin Garibay-Arciniega¹; María Guzmán-Martínez³; José Luis Rosas-Acevedo^{1, *}; Juan Violante-González⁴; María Laura Sampedro-Rosas¹; Manuel Mundo-Ocampo²

¹ Centro de Ciencias de Desarrollo Regional, Universidad Autónoma de Guerrero. Cerrada de Laurel s/n, Col. El Roble. CP. 39640 Acapulco Guerrero, México.

² University of California at Riverside, Department of Nematology. 3401 Watkins Drive 1415A Boyce Hall Riverside, CA 92521.

³ Facultad de Matemáticas, Universidad Autónoma de Guerrero. Chilpancingo, Gro. México.

⁴ Facultad de Ecología Marina. Gran Vía Tropical. Universidad Autónoma de Guerrero, Acapulco, Gro. México.

ORCID de los autores:

J. Garibay-Arciniega: <http://orcid.org/0000-0001-5251-946X>

M. Mundo-Ocampo: <http://orcid.org/0000-0002-8741-5887>

J. L. Rosas-Acevedo: <http://orcid.org/0000-0003-2744-7454>

M. Guzmán-Martínez: <http://orcid.org/0000-0001-9035-2699>

M. L. Sampedro-Rosas: <http://orcid.org/0000-0001-7966-8190>

J. Violante-González: <http://orcid.org/0000-0001-6291-8763>

RESUMEN

La Selva Baja Caducifolia (SBC), brinda diversos servicios ecosistémicos; no obstante, es el tipo de vegetación con mayor impacto antropogénico. Se realizaron muestreos en 7 sitios de un área de SBC en recuperación, localizada en la región de la Costa Chica, en el Estado de Guerrero, México. El objetivo principal, fue evaluar el grado de perturbación del suelo a partir del análisis de la composición y la estructura de comunidades de nematodos presentes en cada uno de los sitios. Los nematodos bacterívoros considerados como organismos oportunistas, fueron los más abundantes en todos los sitios, indicando suelos en distinto grado de perturbación. Los valores promedio de los índices ecológicos (Índice de Madurez - IM, Índice de Enriquecimiento - IE, e Índice de Estructura - SI) fueron bajos en la mayoría de los sitios, por lo que confirmaron los resultados obtenidos a partir del análisis de los grupos tróficos.

Palabras clave: Índice de enriquecimiento; índice de madurez; índice de estructura; nematodos del suelo.

ABSTRACT

The Low Deciduous Forest (LDF) provides several ecosystem services; however, it is the type of vegetation with the greatest anthropogenic impact. Sampling was carried out at 7 sites in an LDF area in recovery, located in the Costa Chica region, in the Guerrero State, Mexico. The main objective was to evaluate the degree of soil disturbance from the analysis of the composition and structure of communities of nematodes present in each of the sites. Bacterivorous nematodes considered as opportunistic organisms were the most abundant in all sites, indicating disturbed soils. The average values of the ecological indices (Maturity Index - IM, Enrichment Index - IE, and Structure Index - SI) were low in most of the sites, confirming the results obtained with the trophic groups.

Index words: Enrichment index; maturity index; structure index; soil nematodes.

1. Introducción

La Selva Baja Caducifolia (SBC) es el ecosistema tropical de mayor extensión a nivel mundial, en México representa aproximadamente el 60% de la cubierta vegetal. Este ecosistema tropical es el más extenso, y se distribuye desde el Neotrópico de Cáncer al Sur de Sonora, hasta Centroamérica (Rzedowski, 2006).

Las actividades antrópicas que se desarrollan en la SBC como la actividad agrícola, modifican el ambiente físico, los recursos bióticos y las cadenas tróficas del suelo. Las prácticas agrícolas que incluyen la deforestación de grandes extensiones de tierra, la quema controlada y el uso de agroquímicos, ocasionan un gran impacto en las características del suelo, así como la pérdida de la cobertura vegetal (Torres-Acosta et al., 2016; Aguirre-Forero et al., 2018; Beltrán-Rodríguez et al., 2018; Sohrabi et al., 2022).

Sin embargo, a pesar de que la SBC ha sufrido drásticas reducciones en su cobertura vegetal, aún constituye un ecosistema con una gran diversidad de flora y fauna (García Romero et al., 2005).

En el suelo, los insectos y los nematodos desarrollan un papel muy importante en los procesos de fragmentación de la cobertura vegetal, así como en los ciclos de nutrientes (Bongers & Ferris, 1999; Sánchez-Moreno & Talavera, 2013; Chamorro-Martínez et al., 2022; Sohrabi et al., 2022); además de servir como alimento para otros organismos (Morel et al., 2022). En las cadenas tróficas terrestres los nematodos se ubican en los niveles de consumidores primarios, secundarios y terciarios (Jiang et al., 2018; Du Preez et al., 2018; Du Preez et al., 2022). La diversidad y la abundancia de este grupo de invertebrados son altamente influenciadas por las condiciones ambientales, lo que les confiere la capacidad de ser indicadores de la calidad del suelo (Mundo-Ocampo et al., 2017; Guzman Tito & Zumarán Martínez, 2021; Ankrom et al., 2022; Du Preez et al., 2022). Por ejemplo, una alta humedad y textura del suelo facilitan su movilidad, en tanto que suelos con poca humedad reducen de manera significativa su ciclo de vida (Leguizamo & Parada, 2008). La composición química del suelo, la cantidad de materia orgánica, entre otros factores, afectan el ciclo de vida de los nematodos; por lo que su desarrollo y reproducción depende de ciertas condiciones edáficas y ambientales (Azpilicueta et al., 2011; Godefroid et al., 2017; Chamorro-Martínez et al., 2022; Sohrabi et al., 2022).

De acuerdo con sus hábitos alimenticios, los nematodos se clasifican en cinco grupos tróficos: bacterívoros, fungívoros, fitoparásitos, omnívoros y depredadores (Bongers & Ferris, 1999; Leguizamo & Parada, 2008; Ferris & Bongers, 2009; Romero et al., 2016; Ankrom et al., 2022; Martin et al., 2022). En los sistemas agrícolas los grupos tróficos mejor representados son generalmente los bacterívoros y fitoparásitos, cuyas poblaciones se incrementan cuando se mantiene un mismo tipo de cultivo a lo largo del tiempo (Azpilicueta et al., 2011; Xiao et al., 2021). A pesar de la importancia de los nematodos como posibles bioindicadores de alteraciones en los ecosistemas terrestres, su utilización en México es muy escasa.

Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el grado de perturbación de un área de Selva Baja Caducifolia afectada por actividades antropogénicas, a partir del análisis de la estructura de las comunidades de nematodos.

2. Material y métodos

Área de estudio

El área de estudio tiene una extensión de 75,43 hectáreas (Fig. 1) y se ubica en la localidad La Ceiba, en el municipio de Copala, región de la Costa Chica, en el Estado de Guerrero, México (16°32' 00" y 16° 41' 57" N; 98° 49' 02" y 99° 04' 58" O). La zona de estudio presenta vegetación de tipo Selva Baja Caducifolia (SBC) y se dividió en siete sub-áreas, seis de las cuales presentan diferentes tipos de uso (Huerta de coco = HC, Huerta de mango = HM, Asentamiento humano = AH, Agricultura = A, Pastoreo = P y Tala = T), en tanto que una no ha sido afectada por las actividades antropogénicas (NI).

Cada uno de estos sitios presenta diferencias en sus características edáficas y de extensión.

Por ejemplo, HM presenta un alto contenido de materia orgánica y suelos muy húmedos; T es un área con árboles grandes y gran presencia de materia orgánica; P presenta suelos secos y de tipo arcillosos; HC tiene suelos secos y se encuentra desprovista de árboles y arbustos, con ausencia de materia orgánica; A es un sitio con presencia de árboles de diferentes alturas y una cantidad media de materia orgánica; HM presenta suelos húmedos con alto grado de compactación edáfica y cantidad media de materia orgánica. En tanto que el sitio NI tiene suelos arenosos, árboles altos, frondosos y alto contenido de materia orgánica.

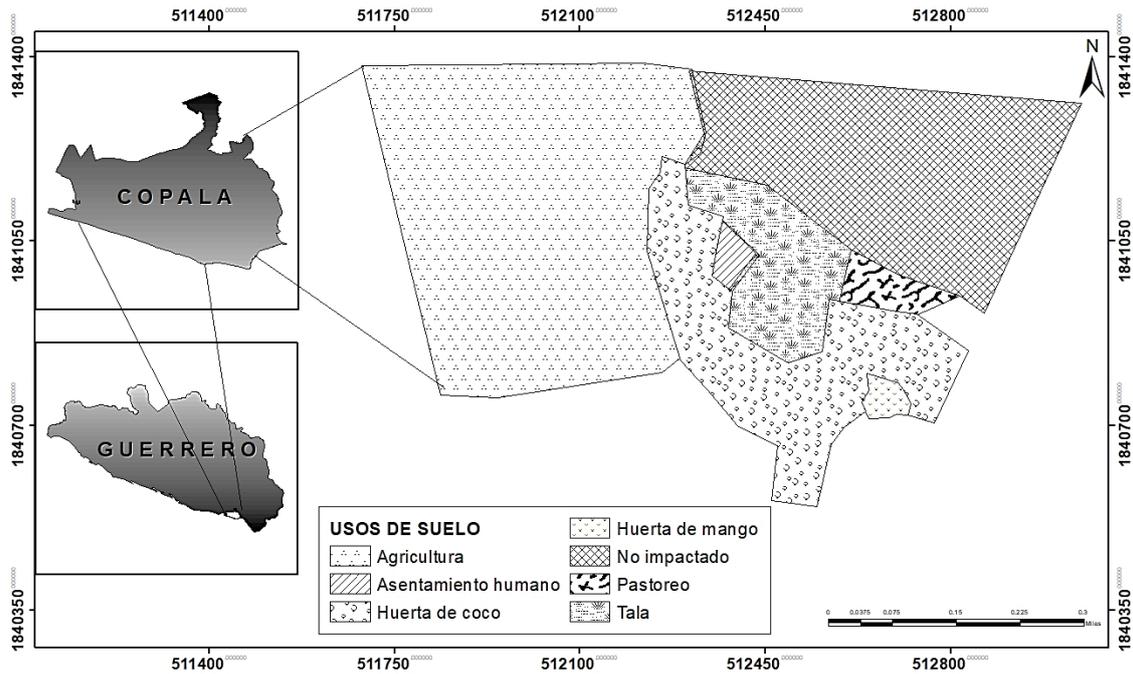


Figura 1. Clasificación del área de estudio por usos de suelo, en la Ceiba, Municipio de Copala, Guerrero, México.

Recolección de las muestras

Se utilizó el método del transecto lineal (Thompson, 2012), estableciéndose 10 puntos de muestreo en cada uno de los sitios. En cada uno de ellos, se seleccionó un árbol alrededor del cual se excavaron tres orificios a una distancia de un metro y una profundidad de 25 - 30 cm. De cada orificio se extrajo una sub-muestra de suelo para constituir una muestra final de un peso total de 1,5 kg. El número total de muestras de suelo, en el área de estudio fue de 70. Las muestras fueron colocadas en bolsas de plástico, con una etiqueta rotulada y se trasladaron en hieleras para mantenerlas a temperatura estable, hasta el laboratorio donde se mantuvieron en refrigeración hasta su procesado (Leguizamo & Parada 2008, Cardoso et al., 2016, Romero et al., 2016). En cada uno de los sitios se registró la temperatura ambiente (media = 29 °C) y la edáfica (media = 28 °C).

Procesamiento de las muestras en laboratorio

La colecta de los nematodos se realizó mediante el método de tamizaje con embudo de Baermann, una vez extraídos los helmintos, se realizó un conteo de cada una de las muestras con la ayuda de un estereoscopio. Para su identificación los nematodos fueron embebidos en glicerina para examinar su morfología externa (Parmelee et al., 1995; Leguizamo & Parada 2008). Se identificaron un total de 700 nematodos, 100 por cada tipo de uso de suelo. La caracterización de los grupos

tróficos se realizó en base a su preferencia alimenticia, la cual es caracterizada por las estructuras del aparato bucal; es decir por presencia de mandíbulas, dientes, estoma, o la presencia o ausencia de un estilete (Parmelee et al., 1995).

Análisis de las comunidades de nematodos

Para caracterizar las comunidades de nematodos en cada uno de los sitios de muestreo se utilizaron los siguientes índices. El índice de madurez (IM), el cual se basa en la clasificación colonizador-persistente (c-p) y considera características como el ciclo de vida, abundancia, capacidad de supervivencia y el tamaño de los nematodos. La escala de este índice va de c-p 1 (colonizadores) a c-p 5 (persistentes); valores altos del IM, indican que se llegó a una sucesión ecológica en el área de estudio o bien a que la sustitución de algunas especies de nematodos se ha llevado a cabo de manera satisfactoria (Bongers et al., 1995, Bongers et al., 1999, Ferris & Bongers, 2009, Sánchez et al., 2013; Ankrom et al., 2022; Du Preez et al., 2022; Martin et al., 2022).

$$IM = \sum v_i n_i / \sum n_i \quad (1)$$

v_i = Valor en la escala cp-1-2 asignado al taxón i
 $i = 1, f_i = 1, f_{ni}$ = Numero de nematodos en cada uno de los taxones f .

El índice de estructura (SI), es un indicador del estado de afectación de la red alimenticia. De acuerdo con este índice, los nematodos de todos

los hábitos alimenticios son considerados como responsables de la estructura de la comunidad y su rango va de 0 a 100.

$$SI = 100 \times \frac{s}{s+b} \quad (2)$$

$$B = \sum k_b n_b$$

k_b son las ponderaciones asignadas a los gremios que indican las características basales de la red alimentaria (Ba2, Fu2) y n_b son las abundancias de nematodos en esos gremios.

$$s = \sum k_s n_s$$

k_s son las ponderaciones asignadas a los gremios que indican las características estructurales de la red alimentaria (Ba3 – Ba5, Fu3 – Fu5, Om3 – Om5, Ca2 – Ca5) y n_s son las abundancias de nematodos en esos gremios.

El índice de enriquecimiento (IE) evalúa la contribución a la estructuración de la comunidad, de los grupos bacterívoros (oportunistas) y fungívoros, los cuales son indicadores de riqueza de la comunidad. El rango del IE se encuentra entre 0 y 100.

$$IE = 100 \times \frac{e}{e+b} \quad (3)$$

e = Nematodos del tipo basal Ba1, Fu2

$$b = \sum k_b n_b$$

k_b son las ponderaciones asignadas a los gremios que indican las características basales de la red alimentaria (Ba2, Fu2) y n_b son las abundancias de nematodos en esos gremios.

Los valores promedio de los índices comunitarios se expresan \pm desviación estándar.

Se aplicaron pruebas de *t*-Student, para determina diferencias estadísticas, entre los valores de los índices obtenidos para cada tipo de uso de suelo. Para determinar algún tipo de asociación entre los valores de los índices calculados, se aplicaron pruebas de correlación de Pearson.

La calidad de los diferentes tipos de uso de suelo fue estimada, mediante la aplicación de la prueba no paramétrica de asociación del cuadrante de Olmstead y Tukey, la cual permitió clasificar a los diferentes usos de suelo como: perturbados, maduros, estructurados y degradados. El cálculo de los índices (IM, SI, IE), así como el análisis de la red trófica se realizó con el programa NINJA (Nematode Indicator Joint Analysis) (Sieriebriennikov et al., 2014; Du Preez et al., 2018)

3. Resultados y discusión

Se identificaron un total de 19 familias de nematodos distribuidos en 27 géneros, los cuales fueron agrupados en 5 grupos tróficos: fungívoros ($n = 84$), bacterívoros ($n = 373$), fitoparásitos ($n =$

147), depredadores ($n = 8$) y omnívoros ($n = 88$) (Tabla 1).

Algunos estudios señalan que la abundancia de los nematodos omnívoros y predadores puede ser relacionada con la textura del suelo, siendo generalmente baja en suelos con un contenido de arcilla más limo de aproximadamente el 80% (Azpilicueta et al., 2011). En sitios como AH y P, no se registraron nematodos predadores (Tabla 1); en estos sitios los suelos fueron secos y de tipo arcilloso, confirmando esta relación existente entre la textura del suelo y este grupo de nematodos.

Los nematodos bacterívoros son considerados como oportunistas o estrategias r, debido a que presentan ciclos de vida corto y se asocian con un rápido recambio de nutrientes. La incorporación de materia orgánica al suelo estimula la actividad microbiana y por consiguiente el incremento de este grupo de nematodos (Azpilicueta et al., 2011, 2015), los cuales son considerados como indicadores de perturbación del suelo. Sin embargo, algunos estudios señalan que, en condiciones de sequía y barbecho, las poblaciones de nematodos bacteriófagos y fungívoros pueden disminuir debido a la falta de humedad y de materia orgánica (Ferris et al., 2001; Azpilicueta et al., 2011).

El grupo de los bacterívoros representado por la familia Cephalobidae, fue el más abundante en todos los tipos de usos de suelo, representado el 53.28% del total de nematodos, seguido por el de los fitoparásitos (21%); en tanto que el de los depredadores fue el más escaso (1,14%) (Tabla 2).

De acuerdo con los cambios en la composición y la estructura, que pueden sufrir las comunidades de nematodos debido a las alteraciones del suelo, los grupos tróficos pueden ser sub-clasificados como colonizadores (c) y persistentes (p) (Bongers y Ferris 1999). La clasificación c-p (estructural) se basa en características como el ciclo de vida, abundancia relativa, capacidad de supervivencia y tamaño de los géneros de nematodos. La distribución de los grupos estructurales (c-p) varió entre los diferentes tipos de usos de suelo; por ejemplo, no obstante que el cp-2 que integró a nematodos fungívoros y bacterívoros fue el grupo más abundante en todos los casos, su dominancia sobre los otros grupos fue mayor en los sitios HC y T (Figura 2).

El grupo cp-1 constituido solo por nematodos bacterívoros, se ubicó en segundo lugar y fue más abundante en los sitios AH y NI.

Tabla 1

Grupos funcionales y estructurales de nematodos registrados por tipo de uso de suelo, en la Ceiba, Municipio de Copala, Guerrero, México. HC = Huerta de coco, HM = Huerta de mango, AH = Asentamiento humano, A = zona Agrícola, P = área de pastoreo, T = sitio talado, NI = sitio no impactado. F = Fungívoros, B = Bacterívoros

Grupo trófico	Familia	Género	c-p	Usos de suelo							Total	
				HC	HM	AH	A	P	T	NI		
Fungívoros	Aphelenchidae	<i>Aphelenchus</i>	2	18	5		17	10	11	8	69	
	Aphelenchoideidae	<i>Aphelenchooides</i>	2	2	6	6		5	3	6	28	
Bacterívoros	Cephalobidae	<i>Acrobeles</i>	2			2	3	2			7	
		<i>Acrobolooides</i>	2							2	2	
		<i>Cephalobus</i>	2	28	21	17	12	14	22	27	141	
		<i>Cuticularia</i>	2		5		5	3	25	10	48	
	Dolichodorinae	<i>Pseudoacrobeles</i>	2	7	2	3		4	8	4	28	
	Monhysteridae	<i>Dolichodorus</i>	3								2	2
		<i>Monhysterids</i>	2	3		2		4		4	13	
		<i>Eucephalobus</i>	2		7	2		2			11	
	Plectidae	<i>Plectus</i>	2		5			2			7	
		<i>Mesorhabditis</i>	1								2	2
	Rhabditidae	<i>Rhabditis</i>	1		10	16		4			30	
	Rhabditonematidae	<i>Rhabditonema</i>	1	9	6	14	23	16		2	70	
	Omnívoros	Dorylaimidae	<i>Dorylaimus</i>	4	7	5	4	8	9	3	5	41
		Qudsianematidae	<i>Eudorylaimus</i>	4	7	5	5	8	9	4	5	43
Predador Fitoparásitos	Mononchidae	<i>Mononchus</i>	4	2				4		2	8	
	Criconematidae	<i>Criconemoides</i>	3		2	2		2			6	
	Heteroderidae	<i>Pratylenchus</i>	3	2			3		3	6	14	
	Hoplolaimidae	<i>Helicotylenchus</i>	3	10	3	7	10	6	10	4	50	
	Longidoridae	<i>Xiphinema</i>	5	2		4		2			8	
	Pratylenchidae	<i>Meloidogyne</i>	3			8	3	2	5	6	24	
	Telotylenchidae	<i>Trophurus</i>	4		3		3				6	
	Trichodoridae	<i>Paratrichodorus</i>	4				3				3	
	Tylenchidae	<i>Tylenchinae</i>	3	3	13	8	2		4	3	33	
	Tylenchulidae	<i>Paratylenchus</i>	3		2					2	4	
Cromodoridae	<i>Chromodorids</i>	3						2		2		

Tabla 2

Distribución de grupos tróficos de nematodos registrados por tipo de uso de suelo, en la Ceiba, Municipio de Copala, Guerrero, México. HC = Huerta de coco, HM = Huerta de mango, AH = Asentamiento humano, A = zona agrícola, P = área de pastoreo, T = sitio talado, NI = sitio no impactado. F = Fungívoros, B = Bacterívoros.

	Uso de suelo		Grupos tróficos					Relación: F/B
	Extensión (ha)	%	Fungívoros	Bacterívoros	Fitoparásitos	Depredadores	Omnívoros	
HC	31,34	41,55	18	47	19	2	14	0,38
HM	0,61	0,81	10	60	16	0	14	0,17
AH	13,47	17,85	9	52	24	0	15	0,17
A	0,54	0,72	14	50	12	5	19	0,28
P	1,05	1,39	13	51	28	0	8	0,25
T	5,73	7,6	16	55	20	1	8	0,29
NI	22,69	30,08	4	58	28	0	10	0,07
Total	75,43	100	84	373	147	8	88	

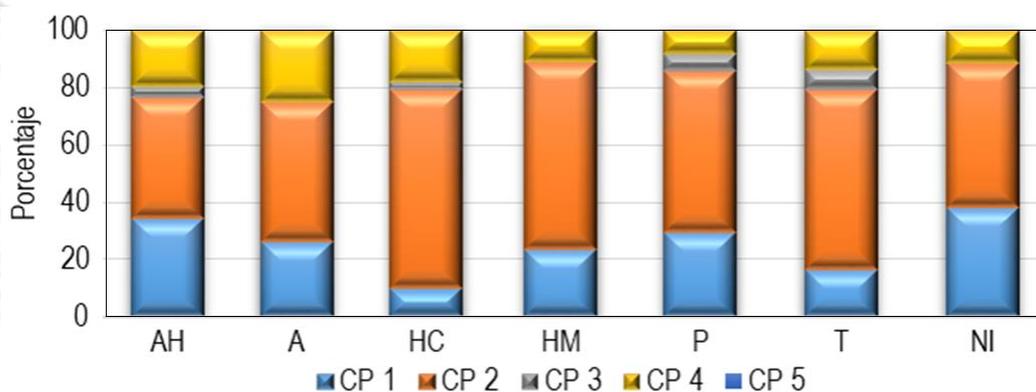


Figura 2. Distribución de grupos estructurales (colonizador-persistente) de nematodos por tipo de uso de suelo. AH = Asentamiento humano, A = zona agrícola, HC = Huerta de coco, HM = Huerta de mango, P = área de pastoreo, T = sitio talado, NI = sitio no impactado.

La dominancia de nematodos de los grupos cp-1 o cp-2, es considerada como indicadora de suelos que se encuentran bajo condiciones de estrés, debido a que integra a familias de nematodos resistentes a las perturbaciones ambientales (Bongers & Ferris, 1999, Bongers et al., 1995, Ferris & Bongers, 2009).

Se han desarrollado diversos índices ecológicos para la valoración de la calidad del suelo, así como de la estructura trófica de las comunidades de nematodos, con el objetivo de determinar el potencial de sus funciones y servicios al ecosistema. Estos índices se basan en la abundancia relativa de los grupos funcionales y estructurales (Bongers, 1990; Bongers et al., 1995; Bongers et al., 1999; Ferris & Bongers 2009; Sánchez et al., 2013).

Los valores promedio del índice de madurez (IM) calculados considerando la agrupación de los grupos tróficos en base a esta escala (Tabla 3), variaron significativamente entre $1,66 \pm 0,68$ (P) y $2,24 \pm 0,39$ (HC) ($t = 3,99$, $p < 0,01$, $n = 6$). Este índice se relaciona con el grado de perturbación del suelo (Bongers & Ferris 1999; Azpilicueta et al., 2011), por lo que es posible establecer que el área de pastoreo (Tabla 1), fue la más impactada en el presente estudio. El sobrepastoreo, originado por la ganadería extensiva, es un factor de presión que acelera la degradación del suelo, debido a que el ganado compacta el suelo al pisar y reduce significativamente la cubierta vegetal (Lozano et al., 2010).

El índice de enriquecimiento (IE) es relacionado con el enriquecimiento o grado de fertilidad del suelo y se basa en la respuesta de los nematodos bacterívoros oportunistas, a la cantidad de materia orgánica disponible. Los valores de IE variaron de $40,49 \pm 26,89$ a $78,37 \pm 21,43$ (Tabla 3) y fueron significativamente más altos en los sitios AH y NI ($t = 3,55$, $p < 0,05$, $n = 6$). Estos resultados indican por lo tanto que la cantidad de materia orgánica disponible en estos sitios fue casi dos veces más alta (1,9) que en otros como HC y T. La incorporación de materia orgánica al suelo estimula la actividad microbiana, por lo que las poblaciones de nematodos oportunistas como los bacterívoros se ven beneficiadas (Bongers & Ferris, 1999; Azpilicueta et al., 2011).

Otro índice emplea comunidades de nematodos para evaluar el nivel de impacto del suelo (proporción fungívoros / bacterívoros - F/B). Estos grupos de nematodos regulan la ruta de descomposición de la materia orgánica del suelo (MOS) y liberan nutrientes a través de su interacción con bacterias y hongos (Ferris et al., 2001,

Azpilicueta et al., 2011). Los valores F fueron menores a la unidad en todos los tipos de uso de suelo (Tabla 3). Esto sugiere que la ruta de descomposición de la MOS fue de tipo bacteriano en todos los casos, debido a la dominancia numérica del grupo de los bacteriófagos, con respecto al de los fungívoros. Los nematodos bacteriófagos y los protozoarios pueden ser responsables del reciclamiento de una alta fracción de nitrógeno a través de la microfauna del suelo, en sistemas en donde la red de detritos está más dominada por bacterias, que por hongos (Azpilicueta et al., 2011). Por otra parte, la red trófica en el sitio HC fue más balanceada, es decir, menos dominada por bacterívoros ($F/B = 0,38$); por lo que es una red más estable.

El índice de estructura SI representa un nivel de agregación de grupos tróficos de nematodos sensibles a las perturbaciones. Valores altos del SI indican suelos con redes tróficas altamente estructuradas (suelos fértiles), en tanto que valores bajos denotan suelos impactados o degradados (Ferris et al., 2001; Azpilicueta et al., 2011). Los valores obtenidos para este índice variaron significativamente entre 26,87 (P) y 55,42 (A) ($t = -5,27$, $p < 0,05$, $n = 6$), indicando la existencia de redes tróficas poco estructuradas. Esto puede ser atribuido a la baja abundancia de nematodos predadores, en todos los tipos uso de suelos examinados (Tabla 1). Los valores de los índices IM y SI correlacionaron positivamente ($r_s = 0,893$, $p < 0,01$, $n = 7$), mientras que los de índices IM-IE y IE-F/B presentaron correlaciones negativas ($r_s = -0,429$, $-0,757$, $p < 0,05$, $n = 7$, respectivamente). El índice de estructura (SI) es generalmente correlacionado con la presencia de microorganismos predadores, por lo que se relaciona con comunidades maduras que presentan redes tróficas estables o equilibradas (Sánchez-Moreno & Talavera 2013). Solo en el sitio de uso agrícola (A), se registró una mayor abundancia de nematodos predadores del género *Mononchus*; por lo que, de manera general, solo este sitio puede ser considerado con un suelo maduro o de mejor calidad. Este sitio presentó también un mejor equilibrio de los grupos estructurales cp-1, 2 y 3 (Figura 2).

Por otra parte, las correlaciones negativas registradas entre los índices IM-IE y IE-F/B, sugieren que en la mayoría de los tipos de uso de suelo se presenta un proceso de enriquecimiento; es decir, son suelos perturbados debido a la mayor dominancia de nematodos bacterívoros oportunistas, lo cual confirma los resultados anteriores.

Tabla 3

Valores promedio (\pm desviación estándar) del índice de madurez (IM), enriquecimiento (IE) y estructura (SI) registrados por tipo de uso de suelo. HC = Huerta de coco, HM = Huerta de mango, AH = Asentamiento humano, A = zona agrícola, P = área de pastoreo, T = sitio talado, NI = sitio no impactado

Índices	Tipos de usos de suelo						
	HC	HM	AH	A	P	T	NI
IM	2,24 \pm 0,39	2,03 \pm 0,33	1,86 \pm 0,70	2,25 \pm 0,57	1,66 \pm 0,68	2,18 \pm 0,70	1,83 \pm 0,41
IE	40,49 \pm 26,89	54,78 \pm 31,91	78,37 \pm 21,43	69,14 \pm 28,08	62,76 \pm 30,41	43,50 \pm 33,08	75,79 \pm 9,52
SI	41,39 \pm 29,50	33,43 \pm 37,48	30,86 \pm 41,16	55,42 \pm 40,93	26,87 \pm 36,76	28,86 \pm 39,54	27,88 \pm 36,46

El análisis de la estructura de la red trófica de la comunidad de nematodos considera los valores del IE, el cual es un indicador de fertilidad del suelo y del incremento de las poblaciones de bacterias, generadas a partir de un proceso de enriquecimiento orgánico. Así como de los valores del SI, los cuales se relacionan con la estabilidad del ecosistema; es decir, la capacidad de resiliencia y resistencia ante las perturbaciones (Bongers & Ferris, 1999; Azpilicueta et al., 2011). Los resultados de este análisis sugieren, que en el cuadrante A se encuentran los sitios HM, P, T y NI (Figura 3), presentaron suelos perturbados, no sobrepasando valores de 50 para el SI; así mismo, se tienen valores bajos y/o nulos de depredadores y omnívoros en los sitios de T y P, representativos de suelos deteriorados (Landi et al. 2018); en el cuadrante B está AH caracterizados por presentar suelos maduros con redes tróficas enriquecidas y con una buena estructura. Finalmente, en cuadrante C el sitio HC presentó una red trófica altamente estructurada, pero con un nivel bajo de enriquecimiento. Aunque este uso de suelo presentó un bajo nivel de enriquecimiento, presentan buena estabilidad edáfica para una correcta distribución de nutrientes, (Bongers & Ferris 1999; Azpilicueta et al., 2011).

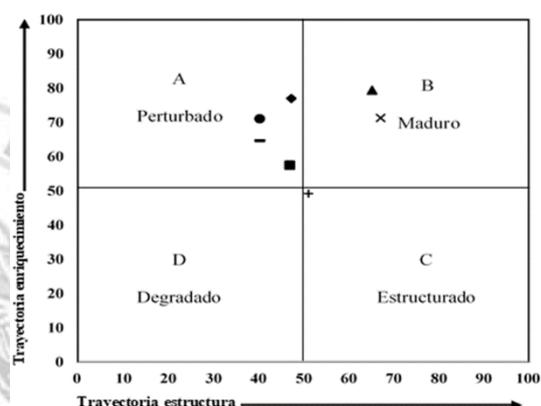


Figura 3. Clasificación de los tipos de uso de suelo en base a la estructura de las redes tróficas de nematodos: Cuadrante A: Suelo no impactado (♦) Pastoreo (●), Huerta de mango (—), Tala (■); Cuadrante B: Asentamiento humano (▲) Agricultura (x); Cuadrante C: Huerta de coco (+).

Conclusiones

La composición y la estructura de las comunidades de nematodos variaron significativamente entre los diferentes tipos de usos de suelo examinados, reflejando las condiciones existentes en cuanto al grado de perturbación o de madurez de cada uno de los sitios. De manera general, los nematodos bacterívoros considerados como organismos oportunistas, fueron los más abundantes en todos los sitios, lo que indica suelos perturbados, incluido el considerado como no impactado. Los valores promedio de los índices ecológicos utilizados, fueron bajos en la mayoría de los sitios, confirmando los resultados obtenidos a partir del análisis de los grupos funcionales (tróficos). No existen actualmente estudios suficientes sobre el empleo de nematodos para evaluar la calidad del suelo en áreas de Selva Baja Caducifolia en México; por lo que los presentes resultados pueden servir de base para futuros estudios, enfocados en el empleo de este importante grupo de invertebrados como indicadores del grado de perturbación del suelo.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada al primer autor para estudios de posgrado; al comité tutorial por las su apoyo en las mejoras del manuscrito; al Laboratorio de Biomonitorio y Control Biológico de la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro) por el apoyo en el trabajo de campo y de gabinete; a la Universidad de California en Riverside (UCR), por colaborar para la identificación taxonómica, a la fundación Idea Wild por el material proporcionado para la realización del trabajo de campo; a Vladimir Morales Ruano, a mi familia, a los alumnos de la Facultad de Psicología de la Universidad de Autónoma de Morelos y al Dr. Francisco Sandoval, gracias por su apoyo para realizar el trabajo de campo.

Referencias bibliográficas

- Aguirre-Forero, S. E., Piraneque-Gambasica, N. V., & Vásquez-Polo, J. R. (2018). Características edáficas y su relación con usos del suelo en Santa Marta, Colombia. *Entramado*, 14(1), 242-250.
- Ankrom, K. E., Franco, A. L., Fonte, S. J., Gherardi, L. A., de Tomasel, C. M., Wepking, C., & Wall, D. H. (2022). Ecological

- maturity and stability of nematode communities in response to precipitation manipulations in grasslands. *Applied Soil Ecology*, 170, 104263.
- Azpilicueta C., Aruani M. C., & Chaves E. (2011). Relación entre la nematofauna y la historia de manejo del suelo en huertos frutícolas. *Agro Sur*, 39, 13–23.
- Beltrán-Rodríguez, L., Valdez-Hernández, J. I., Luna-Cavazos, M., Romero-Manzanas, A., Pineda-Herrera, E., Maldonado-Almanza, B., & Blancas-Vázquez, J. (2018). Estructura y diversidad arbórea de bosques tropicales caducifolios secundarios en la Reserva de la Biósfera Sierra de Huautla, Morelos. *Rev. Mex. Biodivers.*, 89, 108–122.
- Bongers, T., de Goede, R. G. M., Korthals, G. W., & Yeates, G. W. (1995). Proposed changes of c-p classification for nematodes. *Russ. J. Nematol.*, 3, 61–62.
- Bongers, T., & Ferris, H. (1999). Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring. *Trends Ecol. Evol.*, 14, 224–228.
- Cardoso, M. S., Pedrosa, E. M., Ferris, H., Rolim, M. M., & Oliveira, L. S. (2016). Nematode Fauna of Tropical Rainforest in Brazil: A Descriptive and Seasonal Approach. *J. Nematol.*, 48, 116–125.
- Chamorro-Martínez, Y., Torregroza-Espinosa, A. C., Pallares, M. I. M., Osorio, D. P., Paternina, A. C., & Echeverría-González, A. (2022). Soil macrofauna, mesofauna and microfauna and their relationship with soil quality in agricultural areas in northern Colombia: ecological implications. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 46.
- Du Preez, G., Daneel, M., De Goede, R., Du Toit, M. J., Ferris, H., Fourie, H., & Schmidt, J. H. (2022). Nematode-based indices in soil ecology: Application, utility, and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*, 169, 108640.
- Du Preez, G. C., Daneel, M. S., Wepener, V., & Fourie, H. (2018). Beneficial nematodes as bioindicators of ecosystem health in irrigated soils. *Applied Soil Ecology*, 132, 155-168.
- Ferris H., & Bongers T. (2009). Indices developed specifically for analysis of nematode assemblages. En: *Nematodes as environmental indicators*. p. 124–145.
- Ferris, H., Bongers, T., & de Goede, R. G. (2001). A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. *App. Soil Ecol.*, 18, 13–29.
- García-Romero A., Mendoza-Robles K. I. y Galicia-Sarmiento L. (2005). Valoración del paisaje de la selva baja caducifolia en la cuenca baja del río Papagayo (Guerrero), México (parte A). *Invest. Geogr.*, 56, 77–100.
- Godefroid, M., Tixier, P., Chabrier, C., Djigal, D., & Quénehervé, P. (2017). Associations of soil type and previous crop with plant-feeding nematode communities in plantain agrosystems. *Applied Soil Ecology*, 113, 63-70.
- Guzman Tito, M. N., & Martínez, G. Z. (2021). Nematodes as bioindicators of the state of disturbance of edaphic ecosystems irrigated with natural and polluted water. *Agroindustrial Science*, 11(3), 275-279.
- Jiang, Y., Qian, H., Wang, X., Chen, L., Liu, M., Li, H., & Sun, B. (2018). Nematodes and microbial community affect the sizes and turnover rates of organic carbon pools in soil aggregates. *Soil Biology and Biochemistry*, 119, 22-31
- Landi, S., Papini, R., d'Errico, G., Brandi, G., Rocchini, A., Roversi, P.F., Bazzoffi, P., & Mocali, S. (2018). Effect of different set-aside management systems on soil nematode community and soil fertility in North, Central and South Italy. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 261, 251-260.
- Leguizamo M. C. y Parada J. C. (2008). Nematodos del suelo en el sistema maíz-soya y en hábitats naturales adyacentes de la Altillanura colombiana (Meta). *Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecu.*, 9, 61–65.
- Lozano, Z., Romero, H., Bravo, C. (2010). Influencia de los cultivos de cobertura y el pastoreo sobre las propiedades físicas de un suelo de sabana. *Agrociencia*, 44, 135–146.
- Martin, T., Wade, J., Singh, P., & Sprunger, C. D. (2022). The integration of nematode communities into the soil biological health framework by factor analysis. *Ecological Indicators*, 136, 108676.
- Morel, A., & Acosta, O. O. (2022). Calidad del suelo en diferentes usos y manejo por medio de la macrofauna como indicador biológico. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 5(1), 996-1006.
- Mundo-Ocampo, M., Baldwin, J. G., Pereira, T. J., Camacho-Baez, J. R., Armenta-Bojorquez, A. D., Camacho-Haro, M., & Becker, J. O. (2017). Occurrence of *Belonolaimus* in Sinaloa, Northwestern Mexico: A New Report on Distribution and Host Range. *Journal of Nematology*, 49(1), 103–113.
- Parmelee R. W., Bohlen P. J., & Edwards C. A. (1995). Analysis of nematode trophic structure in agroecosystems: Functional groups versus high resolution taxonomy. In: Collins H.P., Romero, E. M., Díaz, E. E. C., & Páramo, C. M. (2016). Comunidades de nematodos de vida libre del suelo y su correspondencia con la calidad. *Ingen. Reg.*, 16, 16–28.
- Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. p. 200–214.
- Sánchez-Moreno, S., & Talavera, M. (2013). Los nematodos como indicadores ambientales en agroecosistemas. *Rev. Ecosist.* 22: 50–55.
- Sieriebriennikov, B., Ferris, H., & de Goede, R. G. M. (2014). NINJA: An automated calculation system for nematode-based biological monitoring. *Eur. J. Soil Biol.*, 61, 90–93.
- Sohrabi, H., Jourgholami, M., Lo Monaco, A., & Picchio, R. (2022). Effects of Forest Harvesting Operations on the Recovery of Earthworms and Nematodes in the Hyrcanian Old-Growth Forest: Assessment, Mitigation, and Best Management Practice. *Land*, 11(5), 746.
- Thompson, S. K. (2012). Line and Point Transects. Sampling, Third Edition, 229–261.
- Torres-Acosta, J. F. J., González-Pech, P. G., Ortiz-Ocampo, G. I., Rodríguez-Vivas, I., Tun-Garrido, J., Ventura-Cordero, J., Castañeda-Ramírez, G. S., Hernández-Bolio, G. I., et al. (2016). Revalorizando el uso de la selva baja caducifolia para la producción de la selva baja caducifolia para la producción de rumiantes. *Trop. Subtrop. Agroecosystems*, 19(1), 73–80.
- Xiao, H., Wang, W., Xia, S., Li, Z., Gan, J., & Yang, X. (2021). Distributional patterns of soil nematodes in relation to environmental variables in forest ecosystems. *Soil Ecology Letters*, 3(2), 115-124.

