



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**NEMÁTODOS COMO BIOINDICADORES DE LA
CONDICIÓN DEL SUELO EN LA ZONA OESTE DEL
PARQUE RECREATIVO LA JOYA-BARRETA,
QUERÉTARO, MÉXICO**

T E S I S

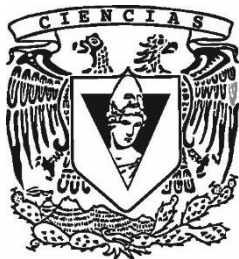
**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
BIÓLOGA**

P R E S E N T A:

VERÓNICA REBOLLO OSORIO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. HUGO HARLAN MEJÍA MADRID



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DATOS DEL JURADO

Datos del alumno:

Rebollo Osorio Verónica
5577881231
vero.rbo@ciencias.unam.mx
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología

Datos del tutor:

Dr. Hugo H. Mejía Madrid

Datos del presidente:

Dr. Ricardo Paredes León

Datos del vocal:

Dra. Iliá Mariana Escobar Ávila

Datos del secretario:

Dr. Hugo H. Mejía Madrid

Datos del sinodal 1:

Dr. Edmundo González Santillán

Datos del sinodal 2:

Dr. Fernando Álvarez Padilla

Datos del trabajo escrito

Nemátodos como bioindicadores de la condición
del suelo en la zona oeste del Parque Recreativo
La Joya-Barreta, Querétaro, México.
92 p.
2022

AGRADECIMIENTOS ACADÉMICOS

A la *Universidad Nacional Autónoma de México* por brindarme la oportunidad de formarme como profesionista dentro de sus aulas y a cada uno de mis maestros que fueron parte de este proceso que con sus enseñanzas, esfuerzo y consejo me permitieron convertirme en una profesionista.

A la *Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM*, por el apoyo para realizar el proyecto DGAPA-PAPIIT-IN212117 “Distribución espacial y estacional de las comunidades de nemátodos edafícolas en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán y en el Parque recreativo Joya-La Barreta” a cargo del *Dr. Hugo H. Mejía Madrid*.

A la *MGIC Liliana González Erives del Centro Regional de Capacitación en Cuencas de la Universidad Autónoma de Querétaro*, por sus gestiones iniciales para el ingreso al parque recreativo.

Al *c. Dr. Abel Ibáñez, Técnico Académico Titular A de T. C., del Grupo de Trabajo de Ecología de Artrópodos en Ambientes Extremos, UNAM Campus Juriquilla*, por su apoyo incondicional en el trabajo de campo.

A la *Dra. María Guadalupe Barajas Guzmán del Departamento de Ecología y Recursos Naturales de la Facultad de Ciencias* por su apoyo en el análisis de suelos.

A la *Dra. Silke Cram Heydrich del Instituto de Geografía* por compartir sus conocimientos sobre la interpretación de los resultados del análisis de suelos.

A mi asesor el *Dr. Hugo H. Mejía Madrid* por su apoyo y asesoramiento en la realización de esta tesis.

A la *p. de Biól. Fernanda Arreola* por su apoyo en el análisis de las muestras de suelo en el laboratorio.

Al *Biól. Isaac R. Acevedo Rojas* por su apoyo en la recolección de muestras en campo y su consecuente procesamiento.

Al *p. de Psic. Abraham Dávalos Almonaci* por el procesamiento de las muestras.

Al *C. Alejandro García Barrera* por su disposición para manejar grandes distancias y su amena compañía.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A mis abuelos *María del Socorro Flores Núñez †* y *José Luis Rebollo Romero* por su amor, cuidado y apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida. Agradezco la oportunidad de haberlos conocido y de tener su amor incondicional.

A mis padres *Jazmín del Rocío Osorio Rivera* y *Mario Rebollo Flores* por su apoyo, amor, esfuerzo y guía incondicional que me permitieron llegar a este momento de mi vida. Las palabras no son suficientes para agradecer todo lo que han hecho por mí. Agradezco que sean mis padres y me hayan enseñado a nunca abandonar mis metas, a perseguirlas sin importar la dificultad y superarme día a día como persona.

A mi abuela *María Concepción Rivera Torres* por su amor, compañía y apoyo incondicional. Gracias por enseñarme a defender mis ideales y a ser valiente para enfrentar cualquier desafío.

A mi tío *José Luis Rebollo Flores* por enseñarme a que la constancia y la perseverancia son grandes virtudes para alcanzar cualquier meta.

A mis hermanos *Rebeca Rebollo Osorio* y *Mario Gustavo Rebollo Osorio* por su compañía y su apoyo incondicional. Gracias por enseñarme a que la unión y el amor son las fuerzas más poderosas para superar cualquier obstáculo.

A mi prometido *Carlos Antonio Rosas Medel* por su compañía, amor, paciencia y apoyo incondicional. Gracias por acompañarme en todo este proceso de formación profesional, por impulsarme a seguir adelante en los peores momentos, por enseñarme el valor de la amistad, la confianza y la perseverancia.

A mi amiga *Diana Ordaz García* por su apoyo y constancia que me permitieron superarme en un nuevo idioma y por su compañía en nuestra pasión por el océano.

A mis amigos *Erick Hernández Hipólito*, *Carla Sofía Chávez Sánchez*, *Rubén Nahúm Delgado Reyes*, *Lucero Denisse Badillo Villamares*, *Thelma Magnolia García*, *Luis Gerardo Carmona Rubio*, *Manuel Salvador Rangel Nava* y *Liliana Martínez Sedas* por su amistad, su compañía incondicional y por dar su mejor esfuerzo todos los días.

A todos mis compañeros de la carrera por su compañía, empatía, amabilidad y amistad.

Finalmente, agradezco a quien lee esta tesis por permitirle a mi trabajo ser parte de su conocimiento y formación.

DEDICATORIA

A mis padres *Jazmín del Rocío Osorio Rivera* y *Mario Rebollo Flores* por nunca perder la confianza en mí y por su apoyo para alcanzar mis objetivos.

A mis abuelos *María del Socorro Flores Núñez †* y *José Luis Rebollo Romero* por su amor y cuidado incondicional.

A mis hermanos *Rebeca Rebollo Osorio* y *Mario Gustavo Rebollo Osorio* por animarme y motivarme a alcanzar mis metas.

A mi abuela *María Concepción Rivera Torres* por su apoyo y compañía en mis desvelos.

A mi tío *José Luis Rebollo Flores* por sus consejos y compañía.

A mi prometido *Carlos Antonio Rosas Medel* por su amor, amistad y su apoyo incondicional.

A mis suegros *Jacqueline Medel Amaya †* y *Carlos Rosas Flores †* por sus muestras de cariño y permitirme ser parte de su familia.

A mi cuñado *Sebastián Eduardo Rosas Medel* por brindarme su confianza y apoyo al permitirme ser parte de su familia.

A mi asesor el *Dr. Hugo H. Mejía Madrid* por su paciencia y apoyo en este trabajo de tesis.

A mis amigos *Erick Hernández Hipólito*, *Carla Sofía Chávez Sánchez*, *Rubén Nahúm Delgado Reyes*, *Diana Ordaz García*, *Thelma Magnolia García López* y *Lucero Denisse Badillo Villamares* por su amistad, compañía y apoyo incondicional.

A las futuras generaciones de biólogos que se interesen en mejorar el mundo y conservar la gran riqueza biológica de nuestro planeta.

A Dios por darme la fortaleza para alcanzar mis sueños y la bendición de tener a mi familia, que son lo más valioso para mí.

A

Mis padres Jazmín y Mario.

A mis abuelos María y José Luis.

Y a mi abuela María Concepción.

Por ser los pilares más importantes de mi vida,

este triunfo que he alcanzado,

también es de ustedes.

RESUMEN

Se realizó un estudio transversal en el parque La Joya-Barreta en el estado de Querétaro, México, con el objetivo de evaluar la condición del suelo en la zona oeste del parque, por medio del muestreo de nemátodos del suelo en seis árboles de la especie *Vachelia schaffneri*. Se extrajeron seis muestras de 100 gramos de suelo, tres cercanas a la base de los árboles y tres fuera de la cobertura de las copas de forma manual. Posteriormente, las muestras fueron llevadas al laboratorio y se procesaron con el fin de obtener las variables fisicoquímicas del suelo y la abundancia de nemátodos identificados a nivel de género. Los datos obtenidos se capturaron en una tabla de Excel, que posteriormente se analizó con el software libre NINJA (Sieriebriennikov *et al.*, 2014), del que se recopilaron los valores de los índices de perturbación, ecológicos, huellas metabólicas y análisis de la red trófica del suelo. Los datos carecieron de normalidad al someterlos a la prueba estadística Shapiro-Wilk, por lo que se recurrió a evaluar la distribución de las abundancias de nemátodos entre sitios internos y externos por medio de la prueba no paramétrica U Mann-Whitney con un $\alpha < 0.05$ e intervalo de confianza del 95%. También se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis con $\alpha < 0.05$ e intervalo de confianza del 95% para determinar si había diferencias entre las distribuciones de las abundancias de grupos tróficos, los factores fisicoquímicos, las huellas metabólicas, los índices ecológicos y de perturbación, los índices de Simpson y Shannon-Wiener entre los árboles. Los resultados de la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis no demostró diferencias significativas en la distribución de nemátodos con respecto a los árboles. Mientras que, la prueba no paramétrica U Mann-Whitney evidenció que las distribuciones de las abundancias de nemátodos fueron diferentes entre los sitios internos y externos ($p = 0.009$). El análisis de la condición del suelo demostró que en la zona oeste del parque La Joya-Barreta, Qro. existe una mayor abundancia de nemátodos bacterívoros del género *Eucephalobus* que tuvieron una mayor actividad metabólica, a diferencia de los nemátodos depredadores que se encontraron en menor abundancia y contribuyeron menos en la actividad metabólica de la comunidad del suelo. Por lo anterior, se concluyó que la comunidad de nemátodos del suelo en el sitio de estudio se encuentra perturbada, puesto que los nemátodos depredadores que son sensibles al disturbio se encontraron en menor abundancia que aquellos oportunistas del enriquecimiento de recursos.

PALABRAS CLAVE: Nemátodos, bioindicadores, suelo, disturbio, perturbación, grupos tróficos, huella metabólica, comunidades, *Vachelia schaffneri*, Querétaro, La Joya-Barreta.

ÍNDICE

	página
• RESUMEN	VI
• INTRODUCCIÓN	
▪ Capítulo 1. El suelo	1
▪ <i>1.1. El suelo y su formación</i>	2
▪ <i>1.2. El perfil del suelo</i>	3
▪ <i>1.3. Las comunidades biológicas del suelo</i>	4
▪ <i>1.4. Importancia del suelo y sus amenazas</i>	7
▪ <i>1.5. Indicadores de la condición del suelo</i>	9
▪ <i>1.6. Características de los bioindicadores</i>	9
▪ <i>1.7. Indicadores de presión del suelo en México</i>	12
▪ Capítulo 2. Ecología de los nemátodos del suelo	13
▪ <i>2.1. Funciones de los nemátodos en los ecosistemas</i>	14
▪ <i>2.2. Los nemátodos son especies clave en los ecosistemas terrestres</i>	14
○ Capítulo 3. Los nemátodos como indicadores de la condición del suelo	17
▪ <i>3.1. Los nemátodos como bioindicadores</i>	16
▪ <i>3.2. Grupos funcionales en los nemátodos y su uso como réplicas ecológicas del ecosistema del suelo</i>	18
• ANTECEDENTES	24
○ <i>El estudio de los nemátodos en el mundo y en México</i>	23
• JUSTIFICACIÓN	25
• OBJETIVOS	25
○ <i>Generales</i>	25
○ <i>Particulares</i>	25
• HIPÓTESIS	25
• MÉTODOS	26
○ <i>Sitio de estudio</i>	26

○ <i>Clima</i>	26
○ <i>Edafología</i>	27
○ <i>Vegetación</i>	28
○ <i>Fauna</i>	29
○ <i>Recolecta de muestras</i>	30
○ <i>Procesamiento de las muestras en laboratorio</i>	31
○ <i>Obtención de nemátodos</i>	30
○ <i>Conteo de nemátodos</i>	31
○ <i>Análisis fisicoquímicos</i>	32
○ <i>Índice de dominancia de Simpson (D_{si}) e índice de diversidad de Shannon-Wiener (H')</i>	33
○ <i>Riqueza de géneros de la comunidad de nemátodos</i>	33
○ <i>Análisis en el software NINJA</i>	33
○ <i>Análisis de métodos no paramétricos</i>	34
○ <i>Análisis de componentes principales (PCA)</i>	34
○ <i>Análisis de la red trófica de la comunidad de nemátodos del suelo y triángulo colonizador-persistente (cp)</i>	35
● RESULTADOS	35
○ <i>Riqueza de géneros de la comunidad de nemátodos</i>	36
○ <i>Índices de perturbación</i>	37
○ <i>Índices ecológicos</i>	41
○ <i>Análisis de la red trófica de la comunidad de nemátodos del suelo y triángulo colonizador-persistente (cp)</i>	42
○ <i>Huellas metabólicas</i>	44
○ <i>Índices de Simpson (D_{si}) y Shannon-Wiener (H')</i>	45
○ <i>Análisis de métodos no paramétricos</i>	47
○ <i>Análisis de componentes principales (PCA)</i>	48
● DISCUSIÓN	51
● CONCLUSIONES	60
● REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
● ANEXO	75

LISTA DE FIGURAS

- **Figura 1.** Proceso de la formación del suelo
- **Figura 2.** Comunidades biológicas del suelo
- **Figura 3.** Categorización de la fauna edáfica de acuerdo con el tamaño corporal de los organismos
- **Figura 4.** Servicios ecosistémicos que provee el suelo a la sociedad
- **Figura 5.** Sitio de estudio
- **Figura 6.** Mapa de tipos de clima y de vegetación que predominan en la región de Querétaro
- **Figura 7.** Composición de la abundancia de nemátodos por grupos tróficos de cada árbol del muestreo
- **Figura 8.** Composición de la comunidad de nemátodos del suelo por grupos tróficos entre los sitios internos y externos a las coberturas de los árboles
- **Figura 9.** Índice de Madurez de las muestras del suelo del parque La Joya-Barreta
- **Figura 10.** Índice de Parásitos de Plantas (PPI) de las muestras del suelo del parque La Joya-Barreta
- **Figura 11.** Índice de Madurez 2-5 (MI 2-5) de la comunidad de nemátodos de la zona oeste del parque La Joya-Barreta
- **Figura 12.** Índice de Madurez Sigma (Σ MI) de la comunidad de nemátodos de la zona oeste del parque La Joya-Barreta
- **Figura 13.** Huella metabólica de la comunidad de nemátodos de la zona oeste del parque La Joya-Barreta
- **Figura 14.** Gráfica del análisis de la red trófica de nemátodos del suelo
- **Figura 15.** Gráfica del triángulo de estrategia de vida colonizador-persistente de nemátodos
- **Figura 16.** Huellas metabólicas por grupo trófico de la comunidad de nemátodos del suelo
- **Figura 17.** Valores del índice de Simpson de la comunidad de nemátodos del suelo muestreado en la zona oeste del parque La Joya-Barreta
- **Figura 18.** Valores del índice de Shannon-Wiener de la comunidad de nemátodos del suelo muestreado en la zona oeste del parque La Joya-Barreta
- **Figura 19.** Gráfica de componentes principales (PCA) de abundancias de los grupos tróficos (PC2) y las variables fisicoquímicas (PC1) entre los seis árboles muestreados
- **Figura 20.** Gráfica de componentes principales (PCA) de abundancias de los grupos tróficos (PC2) y las variables fisicoquímicas (PC1) en los sitios internos de los árboles (1) y externos (2)

ANEXOS

- **Figura 1A.** Abundancias de géneros identificados en 100 gramos de suelo en la zona oeste del Parque La Joya-Barreta
- **Figura 2A.** Abundancias de géneros identificados en 100 gramos de suelo en la zona oeste del Parque La Joya-Barreta
- **Tabla 1A.** Abundancias de nemátodos por grupo trófico y las variables fisicoquímicas

LISTA DE TABLAS

- **Tabla 1.** Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos para monitorear los cambios que ocurren en el suelo
- **Tabla 2.** Grupos funcionales de nemátodos cp (colonizador-persistente)
- **Tabla 3.** Coordenadas individuales para cada árbol de la especie *Vachellia schaffneri*
- **Tabla 4.** Resultados de los índices ecológicos de Canal (CI), Estructura (SI), Basal (BI) y Enriquecimiento (EI)
- **Tabla 5.** Interpretación de los valores del índice de Shannon-Wiener
- **Tabla 6.** Resultados de las pruebas no paramétricas Kruskal-Wallis y la Prueba de U de Mann-Whitney

CAPÍTULO 1

EL SUELO



INTRODUCCIÓN

1.1. EL SUELO Y SU FORMACIÓN

El suelo es la parte más superficial de la litosfera, está constituido por una mezcla variable de partículas minerales, materia orgánica, aire y una disolución acuosa. El suelo se forma a través de un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos sobre el medio rocoso original (meteorización), de manera que su composición y estructura constituyen el soporte material para el desarrollo de organismos vivos (Doménech, 1995).

Paul (2007) explica el proceso de formación del suelo a partir de la meteorización que es un proceso físico provocado por condiciones físicas ambientales (*e.g.* calentamiento, enfriamiento, congelación, descongelación, abrasión del viento, agua y masas de hielo) que, bajo estas condiciones y en conjunto con el paso del tiempo, la presencia de agua, oxígeno y compuestos orgánicos (resultantes de la actividad biológica) inician la formación del suelo (Figura 1). Estos factores fueron plasmados por Jenny (1994) en una ecuación para describir la génesis del suelo:

$$\text{Suelo } f[\text{material parental, clima, organismos vivos, topografía, tiempo}].$$

El tiempo es un factor importante durante la formación del suelo, ya que dependiendo del tiempo al que se encuentre expuesta la roca madre (o material parental) a las condiciones bióticas y abióticas, será la etapa de desarrollo en la que se encontrará el suelo. El estado o etapa inicial se denomina suelo primitivo y se reconoce por la presencia de líquenes habitando sobre la roca madre que, en conjunto con los factores climáticos, contribuirán a la fragmentación de la roca madre afectando su composición. Años más tarde se convertirá en un suelo joven sobre el que habrá vegetación herbácea y matorrales. Miles de años después el suelo será maduro, el cual estará caracterizado por el enriquecimiento de materia orgánica (en las capas superficiales) y con presencia de vegetación arbustiva y leñosa (Figura 1) (Silva y García, 2018). La importancia de la conservación del suelo se debe a que tarda miles de años en formarse.

1.2. EL PERFIL DEL SUELO

Durante el proceso de la formación del suelo se constituyen diferentes capas que se distinguen unas de otras por su composición y color; la formación de estas capas determina el perfil del suelo. Sin embargo, no siempre es sencillo diferenciar una capa de otra, ya que su color, textura y grosor varían de acuerdo con la intensidad de los factores formadores (Paul, 2007). El perfil del suelo contiene varias capas, también llamadas horizontes, establecidos por primera vez por Dokuchaev (1883), el cual determinó el nombre y composición de los horizontes. La composición de éstos varía según el tipo de suelo y del ecosistema en donde se encuentren, por lo que existen diferentes clasificaciones y simbologías que categorizan las capas del perfil del suelo (Paul, 2007; Hernández *et al.*, 2008). De forma general los horizontes son clasificados como (Figura 1):

A: Horizontes más cercanos a la superficie del suelo que se componen de la acumulación de materia orgánica (*e.g.* hojas caídas, raíces, otros residuos vegetales) lo cual ocasiona que se observe de color oscuro por la formación de humus.

B: Es un horizonte intermedio entre el horizonte de humus y la roca madre. En éste se produce el movimiento de constituyentes orgánicos e inorgánicos coloidales y solubles de las capas superficiales. Se caracteriza por la acumulación de cantidades variables de precipitados orgánicos e inorgánicos.

C: Este horizonte es una roca madre (o material parental) menos degradado y es parte del producto del proceso formador del suelo.

R: Es la roca originaria de consistencia dura que no ha estado bajo la acción de los factores formadores del suelo.

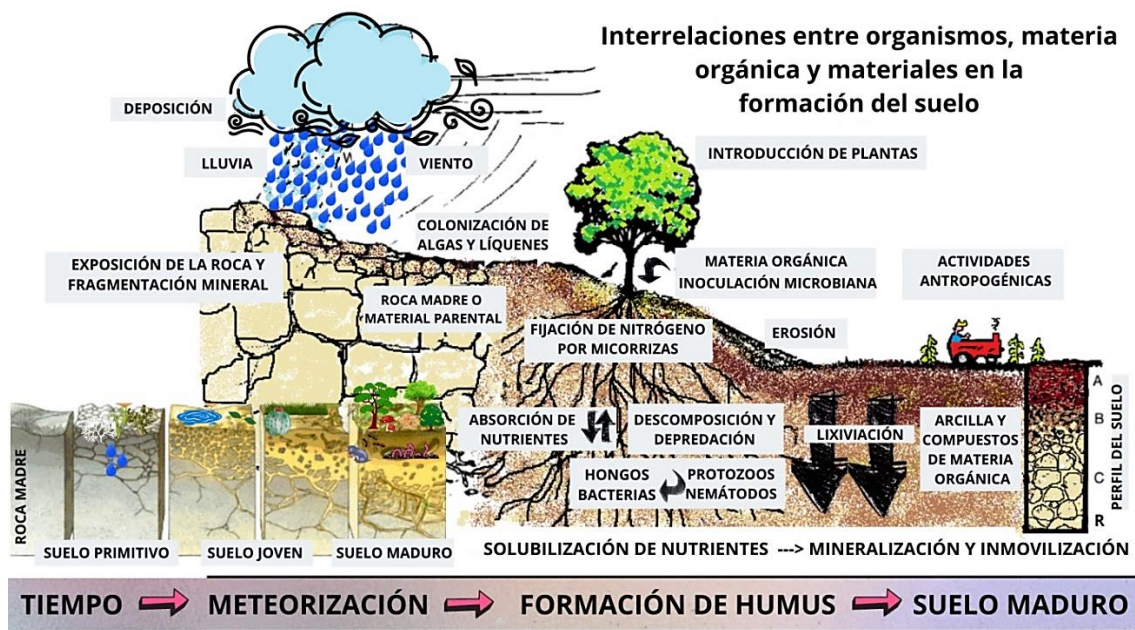


Figura 1. *Proceso de la formación del suelo.* Las interrelaciones de la actividad biológica, los eventos climáticos y elementos químicos contribuyen a la formación del suelo a partir de la fragmentación de la roca madre en partículas más finas (Imagen modificada de Paul, 2007).

1.3. LAS COMUNIDADES BIOLÓGICAS DEL SUELO

Las comunidades biológicas de los suelos comprenden especies pertenecientes a prácticamente todos los grupos taxonómicos que se encuentran en los ecosistemas terrestres (Swift *et al.*, 1979). Los organismos del suelo representan alrededor del 25% de las aproximadamente 1.5 millones de especies descritas en el mundo (Decaëns *et al.*, 2006; Decaëns, 2010), tanto como cinco veces la biodiversidad del dosel de los bosques (Stork, 1988; May, 1990). A escala local, la riqueza de especies debajo del suelo es mucho más alta que la de la vegetación o que la fauna que vive por encima del mismo (Orgiazzi *et al.*, 2016).

La biota edáfica cumple un papel importante en el mantenimiento de la fertilidad del suelo (Castro, 2017). Los diferentes grupos de organismos del suelo pueden categorizarse según la función ecológica que desempeñan, de la Peña (2009) explica que existen tres grupos

principales: el primer grupo corresponde a la microbiota edáfica que se conforma por la microfauna y microflora descomponedora, estos organismos son capaces de movilizar y transformar la materia orgánica que entra al sistema del suelo. El segundo grupo es la rizobiota que se compone de organismos que viven parcial o completamente en el sistema radicular de las plantas (*e.g.* micorrizas, rizobios, nemátodos fitoparásitos, hongos y bacterias patogénicas). Su alimentación es a base de los exudados de carbono de las raíces, de esta forma son responsables de la distribución vegetal fuera del suelo. Finalmente, en el tercer grupo se encuentran los organismos conocidos como ingenieros edáficos (*e.g.* lombrices de tierra o gusanos oligoquetos) responsables del movimiento de la materia orgánica dentro del suelo y por lo tanto de los cambios en la estructura edáfica (Figura 2).

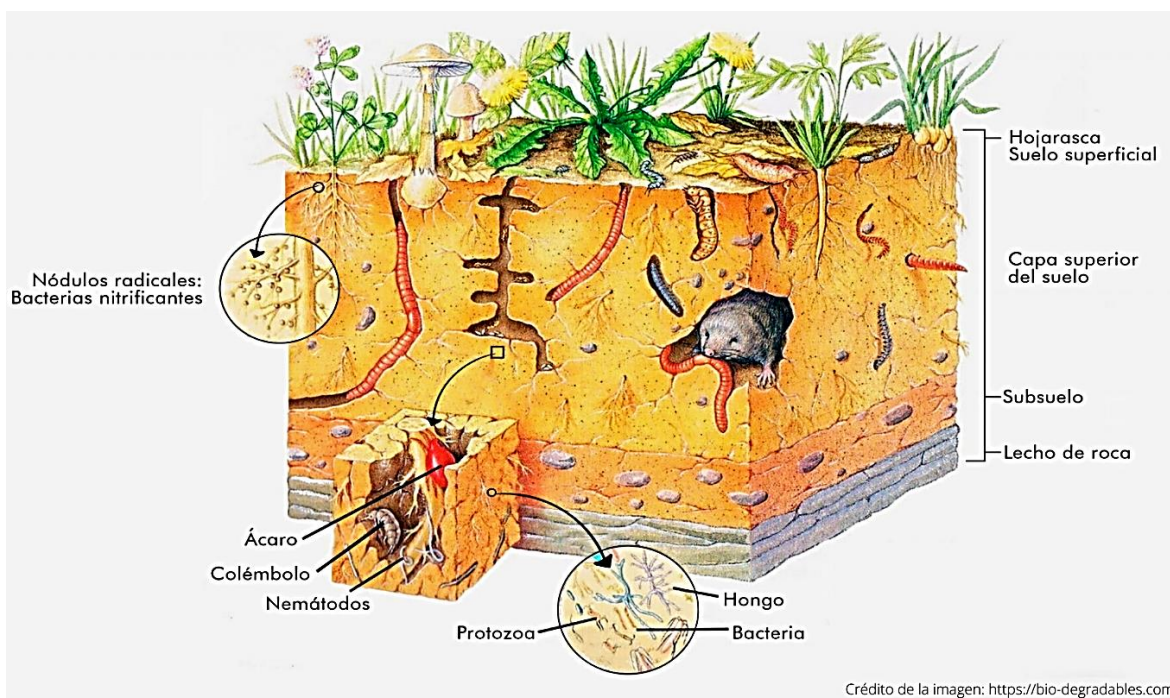


Figura 2. *Comunidades biológicas del suelo.* En la imagen se representa la diversidad biológica que se puede encontrar en el suelo (Créditos en la imagen).

La distribución del tamaño de los animales del suelo permite categorizarlos como organismos pertenecientes a la microfauna, mesofauna, macrofauna o megafauna del suelo (Figura 3). Las características anatómicas de estos organismos (como la presencia o ausencia de patas) y sus respuestas de comportamiento a factores ambientales (reacciones a

la luz y la temperatura), determinan el mejor método de recolección para un grupo taxonómico en particular (Orgiazzi *et al.*, 2016).

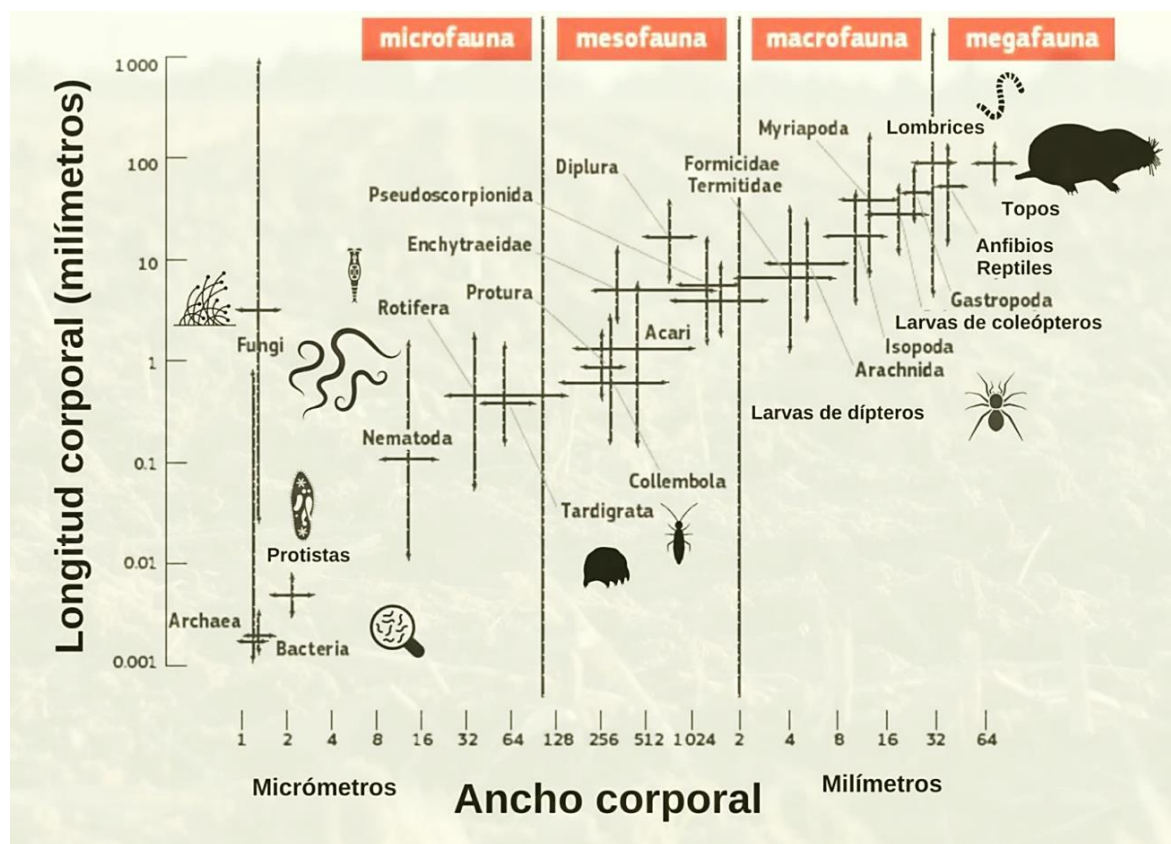


Figura 3. Categorización de la fauna edáfica de acuerdo con el tamaño corporal de los organismos (Modificado de Orgiazzi *et al.*, 2016). La microfauna está conformada por organismos con un diámetro comprendido entre los 20 y las 200 μm (e.g. nemátodos y protozoos). La mesofauna comprende organismos con un diámetro entre 200 μm y 2 mm (e.g., ácaros, colémbolos, enquitreidos, proturos, sínfilos, pseudoescorpiones, entre otros). La macrofauna se compone de organismos con un diámetro mayor a 2 mm (e.g. gasterópodos, lombrices de tierra, miriápodos, entre otros) (Swift *et al.*, 1979).

1.4. IMPORTANCIA DEL SUELO Y SUS AMENAZAS

El suelo es parte importante del sustento de la vida en la Tierra porque provee servicios ecosistémicos esenciales, como mantener la productividad de las plantas y los animales, proporcionan un reservorio para la diversidad genética y son responsables de la remediación de la calidad del agua y el aire (Avalos *et al.*, 2007). Estas funciones están ligadas directamente a la actividad de la fauna edáfica, que se encarga de realizar procesos esenciales tales como, la descomposición de la materia orgánica, la mineralización de moléculas orgánicas, secuestrar y redistribuir minerales, así como regular la abundancia de especies de plagas. Asimismo, el sistema edáfico sustenta la producción de alimentos, fibras, combustibles y materiales de construcción fundamentales para la vida humana (Figura 4) (Sánchez-Moreno y Ferris, 2018).

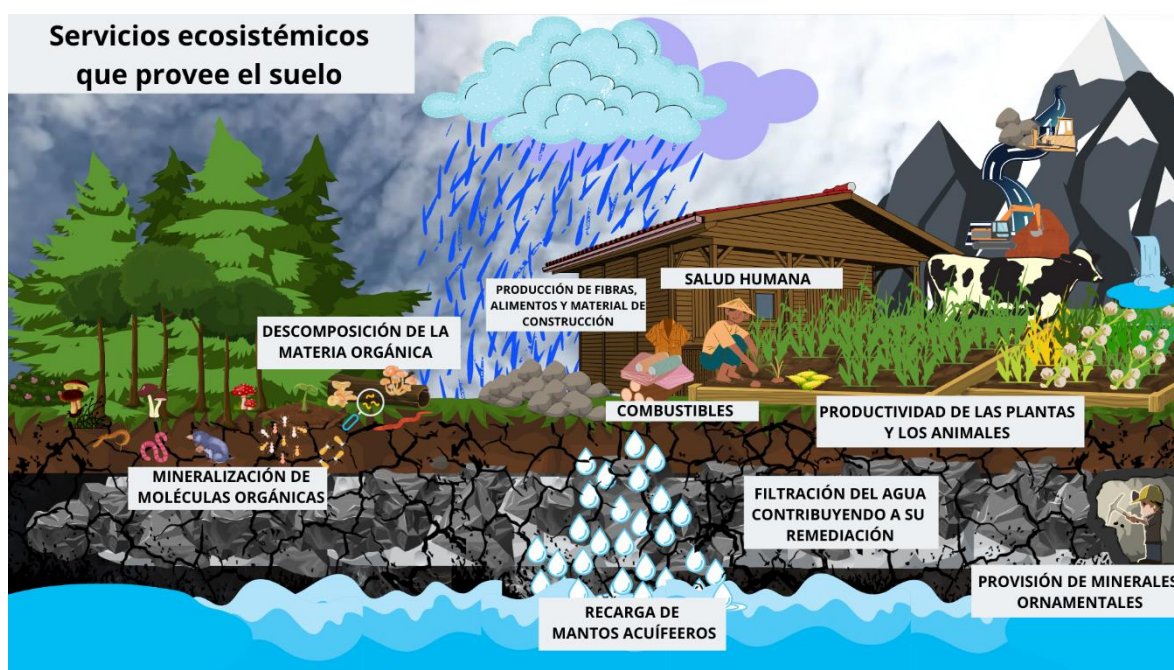


Figura 4. Servicios ecosistémicos que provee el suelo a la sociedad (Ávalos *et al.*, 2007; Sánchez-Moreno y Ferris, 2018).

Por lo anterior, es importante mantener saludables los suelos, es decir, proteger a los suelos de las actividades antropogénicas que afectan su calidad. Las definiciones más recientes de calidad del suelo se basan en la multifuncionalidad del suelo y estas definiciones fueron

sintetizadas por el Comité para la Salud del Suelo de la Soil Science Society of America como “*la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat*” (Cruz *et al.*, 2004; Karlen *et al.*, 1997).

A pesar de los servicios que los suelos ofrecen a la sociedad y al medio ambiente, las actividades antropogénicas amenazan con destruir y contaminar el estado natural del suelo ocasionando su pérdida. La FAO (2015) estima que la demanda de alimentos, materiales y fibras de una población creciente aumentará un 60% para el año 2050 y que las presiones que aceleran y producen la degradación del suelo son la deforestación, el rápido crecimiento de la población humana y a su vez de las ciudades, la contaminación y mal manejo de residuos químicos, el cambio climático (lluvia ácida), prácticas de manejo del suelo insostenibles e introducción de especies invasoras.

Las actividades humanas ejercen presiones sobre los suelos produciendo diferentes tipos de degradación, entre las que se encuentran la salinización y sodización del suelo, desequilibrio de nutrientes, compactación, sellado (*e. g.* pavimentación de carreteras y caminos), acidificación, pérdida de carbono orgánico, entre otras. Las consecuencias de la degradación de los suelos son la escasez de agua, inseguridad alimentaria y nutricional, pobreza e inseguridad social, migración, reducción de los servicios ecosistémicos y aceleración del cambio climático (FAO, 2015; Ávalos *et al.*, 2007).

Debido a las consecuencias originadas por la degradación del suelo se han desarrollado diferentes estrategias de conservación y manejo de los suelos, entre ellas se ha propuesto tener una gobernanza inclusiva del suelo, aumentar la inversión en la gestión sostenible de los suelos, analizar y evaluar la condición del suelo, de manera que se pueda detener su degradación por medio de su restauración también se propone implementar en las prácticas agrícolas la rotación de cultivos y la labranza mínima (FAO, 2015).

1.5. INDICADORES DE LA CONDICIÓN DEL SUELO

Existen diferentes indicadores de la calidad del suelo que pueden ser físicos, químicos o biológicos (Tabla 1), éstos últimos se han denominado como “bioindicadores”, los cuales se han establecido como métodos confiables para detectar disturbios ambientales, debido a que los organismos edáficos están estrechamente relacionados con las propiedades biológicas y bioquímicas del suelo (*e.g.* respiración del suelo, biomasa microbiana, microorganismos, mineralización de nitrógeno, entre otros) (Segueda *et al.*, 2011). Sin embargo, no todas las especies edáficas pueden ser consideradas como bioindicadores.

Las especies bioindicadoras se definen como aquellas que por sus características (sensibilidad a los disturbios ambientales, distribución, abundancia, dispersión, éxito reproductivo, entre otras) pueden ser usadas como estimadoras de condiciones ambientales de interés, que resultan difíciles, inconvenientes o costosas de medir directamente (Heink y Kowarik, 2010; González y Vallarino, 2014). Algunos grupos de organismos considerados como indicadores de la condición del suelo son artrópodos (*e.g.* hormigas) (Herrera y Cuevas, 2003), microartrópodos (*e.g.* colémbolos y ácaros) (Uribe-Hernández *et al.*, 2010; Socarrás, 2013; Aguilar, 2016; Martínez, 2016), lombrices (Momo *et al.*, 2003), la microflora del suelo (*e.g.* hongos, bacterias y micorrizas) (Pérez-Brandán *et al.*, 2011) y nemátodos (Ferris *et al.*, 2001; Sánchez-Moreno y Talavera, 2013).

1.6. CARACTERÍSTICAS DE LOS BIOINDICADORES

Según González y Vallarino (2014) las características biológicas que debe cumplir un taxón para ser considerado como un bioindicador son:

- Ser suficientemente sensible para advertir alteraciones del ambiente, pero no tanto como para indicarnos variaciones triviales o poco importantes biológicamente.
- Capacidad de advertir no solamente el peligro que corre el taxón mismo sino al que está expuesto el ecosistema.
- La intensidad del cambio en el taxón bioindicador está correlacionado con la intensidad del disturbio ambiental. Por lo cual, debe indicar directamente la causa

en vez de simplemente la existencia del cambio (*e.g.* alteraciones de fecundidad y sobrevivencia y no únicamente en la abundancia).

- Los cambios que ocurren se producen poco tiempo después de originarse la alteración, lo que permite evitar daños dramáticos en el ecosistema.
- Metodológicamente plausibles.
- Su abundancia permite tomar muestras periódicamente sin comprometer la estabilidad de la población.
- Su baja movilidad facilita conocer el origen del disturbio.
- Son lo suficientemente resistentes como para poder manipularlos, transportarlos al laboratorio, hacer experimentos y análisis con ellos.
- Presentan una amplia distribución que permite hacer comparaciones entre distintas poblaciones.
- Fáciles de identificar por personas sin experiencia en el taxón.
- Los datos obtenidos a partir de ellos son fácilmente interpretables.
- No se requiere de un equipo caro o complejo para su monitoreo.

Tabla 1. Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos para monitorear los cambios que ocurren en el suelo (Modificado de Cruz *et al.*, 2004; González y Vallarino, 2014).

Propiedad	Relación con la condición y función del suelo	Valores o unidades relevantes ecológicamente; comparaciones para evaluación
<i>Físicas</i>		
<i>Textura</i>	Retención y transporte de agua y compuestos químicos; erosión del suelo	% de arena, limo y arcilla; pérdida del sitio o posición del paisaje
<i>Profundidad del suelo, suelo superficial y raíces</i>	Estima la productividad potencial y la erosión	cm o m
<i>Infiltración y densidad aparente</i>	Potencial de lavado; productividad y erosividad	minutos/2.5 cm de agua y g/cm ³
<i>Capacidad de retención de agua</i>	Relación con la retención de agua, transporte, y erosividad; humedad aprovechable, textura y materia orgánica	% (cm ³ /cm ³), cm de humedad aprovechable/30 cm; intensidad de precipitación
<i>Químicas</i>		
<i>Materia orgánica (N y C total)</i>	Define la fertilidad del suelo; estabilidad; erosión	Kg de C o N ha ⁻¹
<i>pH</i>	Define la actividad química y biológica	comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana
<i>Conductividad eléctrica</i>	Define la actividad vegetal y microbiana	dSm ⁻¹ ; comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana
<i>P, N, y K extractables</i>	Nutrientes disponibles para la planta, pérdida potencial de N; productividad e indicadores de la calidad ambiental	Kg ha ⁻¹ ; niveles suficientes para el desarrollo de los cultivos
<i>Biológicas</i>		
<i>C y N de la biomasa microbiana</i>	Potencial microbiano catalítico y depósito para el C y N, cambios tempranos de los efectos del manejo sobre la materia orgánica	Kg de N o C ha ⁻¹ relativo al C y N total o CO ₂ producidos
<i>Respiración, contenido de humedad y temperatura</i>	Mide la actividad microbiana; estima la actividad de la biomasa	Kg de C ha ⁻¹ d ⁻¹ relativo a la actividad de la biomasa microbiana; pérdida de C contra entrada al reservorio total de C
<i>N potencialmente mineralizable</i>	Productividad del suelo y suministro potencial de N	Kg de N ha ⁻¹ d ⁻¹ relativo al contenido de C y N total

1.7. INDICADORES DE PRESIÓN DEL SUELO EN MÉXICO

En México, la Norma Oficial Mexicana (NOM -147-SEMARNAT/SSA1-2004) establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio, sin embargo, no hay un estándar de la determinación de indicadores de calidad del suelo, puesto que hay disparidades en el concepto de calidad del suelo y su análisis se basa en el perfil del evaluador (PROFEPA, 2016; Segueda *et al.*, 2011). Lo más cercano es el conjunto de “*Indicadores básicos del desempeño ambiental de México*” que forma parte del Sistema Nacional de Indicadores Ambientales (SNIA) y tiene como principal objetivo brindar información que describa las tendencias de cambio, la situación actual del medio ambiente, los recursos naturales del país, así como las presiones que los amenazan y las respuestas institucionales que atienden su problemática (SEMARNAT, 2008a) que considera como indicadores de presión del suelo a (SEMARNAT, 2008b):

- El **cambio de uso del suelo**: muestra la magnitud y las tendencias en el uso del suelo, así como las presiones potenciales de las actividades que propician su cambio.
- El indicador **superficie agrícola** muestra la magnitud de la presión que la actividad agrícola genera sobre este recurso.
- Los indicadores **consumo aparente de plaguicidas** y **consumo aparente de fertilizantes** muestran la presión potencial de afectación en el suelo que tiene el empleo de estas sustancias.
- El indicador **superficie afectada por sobrepastoreo** muestra la magnitud de la presión que la ganadería puede ejercer sobre el suelo.

CAPÍTULO 2

ECOLOGÍA DE LOS NEMÁTODOS DEL SUELO



Créditos de la imagen: <http://www.scivit.de/blog/?p=146>

2.1. FUNCIONES DE LOS NEMÁTODOS EN LOS ECOSISTEMAS

Los nemátodos desempeñan papeles clave en los ecosistemas terrestres y marinos, como el suministro de alimentos, la regulación de plagas, y en particular la nematofauna del suelo, participa en la transformación de materia orgánica en componentes minerales que las plantas pueden absorber y utilizar para su crecimiento, por lo cual estos organismos contribuyen a la diversidad espacial y temporal de las comunidades vegetales (Kardol *et al.*, 2005; Sánchez-Moreno *et al.*, 2008; Yeates *et al.*, 2009).

Por otro lado, la actividad alimenticia de los nemátodos del suelo contribuye a la estabilidad de la red trófica edáfica, debido a que ocupan diversos niveles tróficos (Yeates *et al.*, 2009), se localizan en los suelos de la mayoría de los ecosistemas (por su tamaño se clasifican dentro de la microfauna) y constituyen una parte sustancial de las más de 25,000 especies descritas del suelo (Orgiazzi *et al.*, 2016). La diversidad de especies de nemátodos en la ecología ha sido pobremente estudiada, siendo una de las razones es la intratabilidad taxonómica porque carecen de disparidad morfológica en comparación con otros animales (Chung y Boeri, 2012).

2.2. LOS NEMÁTODOS SON ESPECIES CLAVE EN LOS ECOSISTEMAS TERRESTRES

Las funciones clave de los nemátodos en los ecosistemas agrícolas y naturales, así como su utilidad para estudios como indicadores, los convierten en un blanco importante para la investigación taxonómica, ecológica, fisiológica y molecular (Yeates *et al.*, 2009). El conocimiento sobre la alimentación y las funciones ecológicas que llevan a cabo los nemátodos que habitan en el suelo, se ha convertido en un tema sustancial para el entendimiento de la importancia de estos organismos dentro de los ciclos de nutrientes, en las pérdidas de cultivos de importancia económica o en el control biológico.

En las redes tróficas del suelo, los nemátodos participan en la transformación de materia orgánica (en nutrientes minerales y orgánicos) que pueden ser absorbidos por las plantas, también influyen en el crecimiento de éstas y en la productividad de los cultivos. En los ecosistemas naturales, estos organismos contribuyen a la diversidad espacial y temporal de las comunidades vegetales, tanto por encima como por debajo del suelo. Sin embargo, el

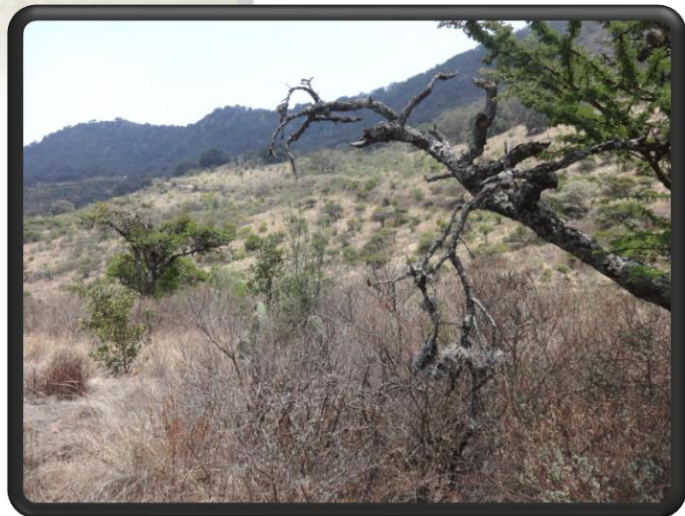
desarrollo de la comunidad vegetal no es un indicador del desarrollo de las comunidades de nemátodos del suelo, por lo que su restauración y conservación no se puede inferir de las composiciones de las comunidades vegetales en un ecosistema (Yeates *et al.*, 2009). En términos de los efectos benéficos de la actividad de los nemátodos, cuando los nutrientes de las plantas no son limitantes en el suelo, la mineralización de los nutrientes por los nemátodos bacterívoros no se refleja en el rendimiento de las plantas (Ferris *et al.*, 2004).

Otro servicio ecosistémico importante surge de la naturaleza del sustrato ingerido y posteriormente asimilado a través de la pared intestinal de los nemátodos bacterívoros, debido a que pueden excretar materiales digeridos en formas que estén disponibles para otros organismos. Al liberar energía de los materiales ingeridos, se ha calculado que los nemátodos liberan, a través de la cutícula, aproximadamente el 40% del carbono ingerido en forma de dióxido de carbono (CO₂) (Klekowski *et al.*, 1972). El CO₂ regresa a la atmósfera y las plantas lo fijan nuevamente en moléculas complejas mediante el proceso de fotosíntesis; pero, las moléculas ingeridas de las que se deriva el carbono respirado, también pueden contener otros elementos que superen las necesidades de mantenimiento, crecimiento y reproducción del nemátodo. Estos minerales en exceso se excretan en forma mineral, en lugar de ser defecados según Yeates *et al.* (2009).

Por la variedad de servicios ecosistémicos que ofrecen, los nemátodos constituyen un grupo de invertebrados de elevada importancia ecológica y económica que además presentan diversos atributos que los convierten en valiosas herramientas como indicadores biológicos y ecológicos (Sánchez-Moreno y Talavera, 2013), lo cual forma parte del camino al entendimiento de las funciones ecológicas y la importancia que tienen los nemátodos en los cambios de la composición del suelo en los ecosistemas terrestres.

CAPÍTULO 3

LOS NEMÁTODOS COMO INDICADORES DE LA CONDICIÓN DEL SUELO



3.1. LOS NEMÁTODOS COMO BIOINDICADORES

La estructura de la comunidad de nemátodos ofrece un instrumento para evaluar cambios en las condiciones de los suelos, es decir sirven como excelentes bioindicadores de disturbio ambiental, debido a que responden rápidamente a nuevos recursos, son sensibles a los factores ambientales, a los cambios en su actividad, su fauna puede analizarse de manera eficiente, se encuentran en el suelo en gran abundancia y están omnipresentes en los ecosistemas (Bongers y Bongers, 1998; Yeates *et al.*, 2009).

El desarrollo de los nemátodos como bioindicadores, requirió la determinación de formas apropiadas de evaluar y cuantificar sus contribuciones a los procesos ecológicos, y la validación de su utilidad como indicadores de la condición ambiental. Varias características únicas de los nemátodos facilitaron esos desarrollos, algunas de éstas según Sánchez-Moreno y Talavera (2013) son:

1. Presentan especies que pueden ser incluidas en al menos cuatro grandes grupos tróficos, que, aunado a la variabilidad de tipos de ciclos de vida dan lugar a numerosos grupos funcionales.
2. Al contrario que en otros taxones de la fauna del suelo, los grupos tróficos de nemátodos son fácilmente identificables por sus estructuras morfológicas asociadas a sus hábitos alimenticios.
3. Son relativamente pequeños y presentan ciclos vitales relativamente cortos lo que les permite responder rápidamente a cambios en el ambiente, a la vez que las fluctuaciones en sus poblaciones no son tan rápidas como las de otros microorganismos del suelo.
4. Son ubicuos, aparecen incluso en áreas contaminadas y se encuentran distribuidos a lo largo de todo el perfil del suelo. Estas características no son frecuentes en el resto de los organismos edáficos, que suelen estar especializados (desde el punto de vista trófico) y localizados en los horizontes edáficos antrópicos.
5. Debido a su abundancia y tamaño es posible extraerlos del suelo y estimar sus densidades con relativa facilidad en comparación con otros organismos edáficos.

6. Poseen una cutícula permeable que les hace estar en contacto directo con los contaminantes, los cuales pueden penetrar al blastoceloma fácilmente, por lo que son sensibles a la contaminación ambiental.
7. Algunos nemátodos presentan estados de resistencia (criptobiosis o quistes) o quiescencia que les permiten sobrevivir inactivos cuando las condiciones de crecimiento o desarrollo no son favorables, mientras que otros son extremadamente sensibles a los cambios ambientales. Sin embargo, algunos taxones de nemátodos como Dorylaimidae no tienen etapas resistentes, lo que puede hacerlos más sensibles al cambio ambiental.

Gitanjali (2020) suma a la lista otras características que hacen de los nemátodos excelentes bioindicadores de la condición del suelo, argumentando que:

1. No migran rápidamente de condiciones estresantes y muchas especies sobreviven a la deshidratación, la congelación o el estrés por oxígeno.
2. Los nemátodos tienen proteínas de choque térmico que están muy conservadas. La expresión de estas proteínas aumenta cuando se exponen a tensiones como calor, iones metálicos o toxinas orgánicas. Quizás estas proteínas podrían servir como biomarcadores para la evaluación ecotoxicológica de los suelos.

Los atributos de la nematofauna en los procesos de descomposición, así como su papel potencial en el control de los brotes de plagas de insectos y su uso como bioindicadores ambientales, conlleva a un cambio de pensamiento, en el que estos organismos no sólo se consideren como plagas indeseables, sino que ahora se reconozcan por sus efectos y sus contribuciones en los servicios de los ecosistemas (Sánchez-Moreno y Talavera, 2013).

3.2 GRUPOS FUNCIONALES EN LOS NEMÁTODOS Y SU USO COMO RÉPLICAS ECOLÓGICAS DEL ECOSISTEMA DEL SUELO

Una agrupación funcional de nemátodos es generalmente sinónimo de asignación en grupos de alimentación. Sin embargo, los índices de evaluación de la calidad del suelo basados en la presencia de todos los grupos de alimentación no proporcionan información suficiente sobre el funcionamiento de los ecosistemas del suelo y sus amenazas. Un concepto

alternativo de grupos funcionales se basa en la historia de vida de los nemátodos (Bongers y Bongers, 1998).

Es posible que la contribución de los nemátodos a las interacciones de la cadena trófica y a los procesos del ecosistema, como el ciclo del nitrógeno y el carbono, no requiera la identificación de los nemátodos a nivel de especie, si se consideran las actividades complementarias de especies con adaptaciones ecológicas similares y que se alimentan al mismo nivel trófico (Yeates *et al.*, 2009). En términos de estructura y función del ecosistema, Laakso y Setälä (1999) consideraron que la diversidad entre los grupos funcionales es más importante, que la diversidad dentro de ellos y que las consecuencias de la pérdida de especies para el funcionamiento del sistema, son críticas sólo para aquellos grupos funcionales que tienen una baja diversidad de especies y que ocupan posiciones tróficas cercanas a la base de la red trófica detrítica. El primer paso para establecer grupos funcionales fue la asignación de grupos de nemátodos basados en su dieta sugeridos por Yeates *et al.* (1993) y que se presentan a continuación:

1. **Fitófagos:** En este grupo se encuentran los nemátodos que se alimentan de plantas vasculares que pueden ser polípagos o mostrar especificidad por un hospedero. Entre éstos siempre se puede encontrar un estomatostilo tilencoide (modificación del epitelio de la cavidad bucal en un estilete protráctil) o un odontostilo doriláimido (modificación del epitelio del estoma anterior en un estilete hueco protráctil). Los estados de vida post-eclosión son migratorios. Los nemátodos de especies migratorias y sedentarias se pueden clasificar como ectoparásitas o endoparásitas. En este grupo están incluidos los nemátodos que se alimentan de algas, pero no ingieren los cloroplastos, porque su estilete es estrecho.
2. **Fungívoros:** Este grupo abarca a aquellos nemátodos que se alimentan de las hifas de los hongos y levaduras por un odontostilo o estomatostilo. En este grupo se incluyen algunas fases del ciclo de vida del parásito de vertebrados *Deladenus*.
3. **Bacterívoros:** Se incluyen en este grupo a todos aquellos nemátodos que se alimentan de células procariontes, ya sea por medio de una cavidad oral estrecha (*Rhabditis*, *Alaimus*) o por una cavidad oral extendida (*Diplogaster*).

4. **Ingestión de sustrato:** Se encuentran los nemátodos que se alimentan de bacterias, células eucariotas o depredan, se clasifican de esta forma porque no se alimentan de un solo recurso alimenticio. Se incluyen a los diplogastéridos y a *Daptonema* sp.
5. **Depredación animal:** Nemátodos que se alimentan de otros nemátodos, rotíferos, enquitréidos y protistas, pueden ser "digestores" (*e.g. Diplogaster, Mononchus, Nygolaimus*) o "perforadores" que succionan los fluidos corporales por medio de un estilete (*e.g. Seinura, Labronema, Laimaphelenchus*).
6. **Alimentación de células eucariotas:** este tipo de alimentación incluye a los nemátodos que se alimentan de esporas de hongos y de levaduras.
7. **Etapas dispersas o infecciosas de parásitos animales:** Se incluyen a las etapas de nemátodos parásitos de animales fuera de sus huéspedes alternativos o definitivos, que pueden ocurrir en el suelo (*e.g., Deladenus, Heterorhabditis*) o de vertebrados (*e.g., Strongyloides*); también se incluyen aquí especies entomófagas.
8. **Omnívoros:** Nemátodos que se alimentan de hifas de hongos y de células unicelulares eucariotas, se incluyen pocas especies de doriláimidos.

Los grupos funcionales de nemátodos pueden considerarse como grupos de especies que tienen efectos similares en los procesos del ecosistema. Estas agrupaciones funcionales son una necesidad práctica, porque con ello se puede determinar cómo afecta cada especie a los procesos del ecosistema. Bongers (1990) clasificó todas las familias de nemátodos terrestres y acuáticos en la escala colonizador-persistente (cp) en cinco grupos, por lo que las familias de nemátodos se clasifican en función de su ecología (Tabla 2).

Tabla 2. Grupos funcionales de nemátodos cp (colonizador-persistente)

Grupo	Descripción	Composición
cp-1	Nemátodos con un tiempo de generación corto. Producen muchos huevos pequeños que resultan en un crecimiento explosivo de la población en condiciones ricas de alimentos. Son relativamente tolerantes al estrés inducido por la contaminación. Tienen una alta actividad metabólica. Estos oportunistas de enriquecimiento muestran una relación forética con insectos y otros vectores, y sólo son activos en condiciones transitorias de alta actividad microbiana, forman larvas dauer (larvas de resistencia) a medida que disminuye la actividad microbiana del medio.	Este grupo está compuesto por consumidores bacterianos rabdítidos, diplogástridos y panagroláimidos.
cp-2	Nemátodos con un tiempo de generación corto y una alta tasa de reproducción, pero no forman larvas dauer. Ocurren tanto en condiciones de abundancia de alimentos como de escasez de alimentos y son muy tolerantes a los contaminantes y otras alteraciones. Se alimentan de células epidérmicas (tilénquidos pequeños), hongos (afelencoides y anguínidos) y bacterias (cefalóbidos, pléctidos y monistéricos).	Este grupo está compuesto por los tilénquidos pequeños, los afelénquidos, anguínidos, cefalóbidos, pléctidos y monistéricos.
cp-3	Nemátodos con características entre los grupos 2 y 4; tienen un tiempo de generación más largo y son relativamente sensibles a los disturbios. Se alimentan de bacterias (teratocéfalos), de capas celulares más profundas en las raíces (tilénquidos grandes), hongos (difterofóridos) y algunos son carnívoros como los tripílidos.	Este grupo está compuesto por los teratocéfalos, Araeolaimida y Chromadorida; tilénquidos grandes; los difterofóridos y los tripílidos.
cp-4	Estos nemátodos se caracterizan por un tiempo de generación prolongada, cutícula permeable y sensibilidad a los contaminantes. Los nemátodos no carnívoros de este grupo son relativamente sésiles, mientras que los carnívoros tienen que moverse. En este grupo hay carnívoros, bacterívoros (Alaimidae y Bathyodontidae) y fitófagos (tricodóridos).	Este grupo está compuesto por los Alaimidae y Bathyodontidae, doriláimidos pequeños y los tricodóridos.
cp-5	Nemátodos con una larga vida útil, baja tasa de reproducción y una baja actividad metabólica. Producen pocos huevos, pero estos organismos son grandes y su motilidad es baja. Tienen una cutícula permeable, son muy sensibles a los contaminantes y otras alteraciones.	Este grupo está compuesto por los doriláimidos más grandes: omnívoros, depredadores y herbívoros.

La escala anterior asigna a los nemátodos en diferentes grupos dependiendo de sus características ecológicas. En esta escala se observa que las especies de nemátodos más sensibles a los contaminantes y otras alteraciones son los nemátodos depredadores y omnívoros. A los depredadores se les considera como reguladores de la biota del suelo porque se alimentan de las presas más dominantes, por lo tanto, permite que aumente la diversidad de otros organismos. Mientras tanto, los omnívoros son “auxiliares” porque se alimentan de bacterias y hongos cuando es necesario. Como estos persistentes son los primeros en desaparecer, es probable que el sistema se vuelva menos estable funcionalmente en términos de patógenos de plantas, transmitidos por el suelo y de amortiguación contra los flujos de nutrientes estacionales e impredecibles (Bongers y Bongers, 1998). Esto implica que la diversidad alta es importante en condiciones cambiantes (*e.g.* fluctuaciones de temperatura, humedad, valor osmótico, concentraciones de CO₂ y O₂, pH y aportes estacionales de material orgánico). Los autores Bongers y Bongers (1998) suponen que, en condiciones naturales fluctuantes en zonas templadas, la lixiviación de nutrientes aumenta con la disminución de la biodiversidad de nemátodos.

El establecimiento de la escala de colonizador-persistente (cp) sentó las bases para proponer índices de medición de la condición del suelo, usando a los nemátodos como bioindicadores. Entre los índices de madurez existentes se encuentran el Índice de Madurez (MI), el Índice de Parásitos de Plantas (PPI) y la relación MI/PPI (Bongers, 1990; Bongers *et al.*, 1997; Bongers y Bongers 1998; Bongers y Ferris, 1999). También se desarrollaron índices de la red trófica edáfica, que se fundamentan en el conocimiento combinado sobre los cinco grupos cp y los cinco grupos tróficos fundamentales (bacterívoros, fungívoros, herbívoros y fitoparásitos, omnívoros y depredadores) (Tabla 2). El desarrollo de estos índices (Índice de Enriquecimiento (IE), Índice de Canal (CI), Índice de Estructura (IE) e Índice Basal (BI)) (Ferris *et al.*, 2001) permitió inferir la función ecológica de los nemátodos del suelo en el marco general de la estructura y función de la red trófica edáfica. Los cuatro índices de la red trófica definen el tipo de descomposición de la materia orgánica predominante en un lugar determinado, así como el grado de complejidad de la red (Sánchez-Moreno y Talavera, 2013).

Por otra parte, a partir de los índices de la red trófica se desarrollaron otras medidas para analizar las características de las comunidades de nemátodos en el suelo, estas medidas son las huellas metabólicas propuestas por Ferris (2010a), debido a que la actividad metabólica de los nemátodos que habitan el suelo es una herramienta útil para conocer el estado de los ecosistemas y la red trófica, puesto que son organismos que dependen de la cantidad de carbono disponible para aumentar su tamaño. La huella metabólica tiene dos componentes, uno de producción y otro de respiración. El componente de producción es la cantidad de vida útil de C (carbono) dividida en crecimiento y producción de huevos; y el componente de respiración evalúa la utilización de C en la actividad metabólica. Por lo que, según Ferris (2010b) supone que las formas y función de las huellas metabólicas son:

- La **huella de enriquecimiento** es la huella metabólica de los nemátodos que responden más rápidamente al enriquecimiento de recursos.
- La **huella de la estructura** es la huella metabólica de niveles tróficos más altos que pueden tener una función reguladora en la red alimentaria y que son indicativos de la abundancia de organismos de funciones similares en taxones no nemátodos.
- La **huella funcional** es el área total de las dos huellas funcionales (enriquecimiento y estructura).
- Las **huellas herbívoras, bacterianas y fúngicas** se basan en los nemátodos indicadores de C y la energía que entra en la red trófica del suelo a través de sus respectivos canales.
- La **huella compuesta** es la huella metabólica del conjunto completo de nemátodos, independientemente del papel trófico o la función del ecosistema.

Las huellas metabólicas proporcionan un componente cuantitativo a los análisis de estructura y función de los ecosistemas, basándose en los componentes de la fauna del suelo. En conjunto, los análisis de los índices de madurez del suelo, los índices de la cadena trófica y la medición de las huellas metabólicas demuestran el potencial del uso de los nemátodos como bioindicadores de la condición del suelo y como réplicas ecológicas del ecosistema del suelo.

ANTECEDENTES

EL ESTUDIO DE LOS NEMÁTODOS EN EL MUNDO Y EN MÉXICO

Nathan Cobb describió más de 1,000 especies de nemátodos y sus publicaciones contribuyeron al conocimiento de los nemátodos en el mundo (Cobb, 1914; 1918). En Inglaterra y los Países Bajos, los autores Howard Ferris y Tom Bongers respectivamente, han propuesto las metodologías base para el estudio de la nematofauna del suelo (Bongers, 1990; Bongers *et al.*, 1997; Bongers y Bongers 1998; Bongers y Ferris 1999; Ferris *et al.*, 2001; Ferris, 2010b).

En Europa y los Países Bajos, se han elaborado una gran variedad de estudios de la condición del suelo usando a los nemátodos como bioindicadores. Algunos ejemplos de estos estudios son los que se han elaborado en suelos con y sin lombrices (Yeates, 1981), en suelos con pastos (Yeates, 1984; Amaro Da Silva *et al.*, 2019), en la paja de cebada enterrada (Sohlenius y Boström, 1984; Sohlenius y Sandor, 1989), suelos desnudos (Ettema y Bongers, 1993), cultivos perennes y anuales (Freckman y Ettema, 1993; Yeates y Bird, 1994; Neher, 2010; Continho *et al.*, 2018), en un área de derrame accidental de cobre-cromo-arsénico (Yeates *et al.*, 1994), en suelos con adición de metales pesados (Korthals *et al.*, 1996), suelos bajo manejo orgánico (Yeates *et al.*, 1997; Neher y Olson, 1999; Amaro Da Silva *et al.*, 2019), pastizales sobre turba (Wasilewska, 1999), pastizales y sitios de cultivo con suelos arcillosos (Saggar *et al.*, 2001), en suelos labrados y con incremento de herbicidas (Sánchez-Moreno *et al.*, 2015), en suelos de bosques después de un disturbio (Rong *et al.*, 2020) y suelos calcáreos rojos (Gao *et al.*, 2021), entre otros más.

El estudio de nemátodos como bioindicadores de la condición del suelo se encuentra en un estado de avance considerable en algunos países. En México el estudio sobre éstos ha estado descontextualizado del ambiente edáfico y de su función en los procesos del suelo (Fragoso *et al.*, 2001; Sánchez, 2001). Son escasos los estudios enfocados en este campo, los cuales se han llevado a cabo en diferentes tipos de ecosistemas, tales como en la selva tropical (Franco y Godinez, 2017), en el desierto (Pen *et al.*, 2008) y en el semi-desierto (Mejía y Sánchez, 2022).

JUSTIFICACIÓN

La investigación de la nematofauna del suelo como indicadora de disturbio es un campo que no se encuentra ampliamente estudiado en México, debido a que existe una notable ausencia de estudios de la micro y mesofauna de los suelos mexicanos, dentro del contexto del ambiente edáfico. Por lo que este trabajo propone el uso de los nemátodos en México, como una herramienta útil para conocer la condición de los suelos mexicanos, puesto que son la base de la agricultura y la salud de los ecosistemas.

OBJETIVOS

GENERALES

- Evaluar la condición del suelo en el parque recreativo La Joya-Barreta, Querétaro, México a través del estudio de su comunidad de nemátodos del suelo.

PARTICULARES

- Identificar la composición de la comunidad de nemátodos de un polígono de aproximadamente 700 m² de suelo ubicado en la zona oeste del parque recreativo La Joya-Barreta, Querétaro.
- Describir los parámetros ecológicos de la comunidad de nemátodos del suelo de la zona oeste del parque recreativo.
- Evaluar la huella metabólica de la nematofauna que habita el suelo de la zona oeste del parque recreativo.

HIPÓTESIS

- Si la comunidad de nemátodos del suelo en el parque recreativo La Joya-Barreta, Querétaro, México está conformada por nemátodos colonizadores y persistentes en su abundancia relativa entonces el suelo es maduro y se encuentra saludable.
- Si la comunidad de nemátodos encontrada en el suelo del parque recreativo La Joya-Barreta, Querétaro, México está conformada por nemátodos colonizadores en mayor

abundancia relativa que los persistentes entonces el suelo no es maduro y se encuentra bajo un efecto de disturbio.

MÉTODOS

SITIO DE ESTUDIO

En el presente trabajo se seleccionó como sitio de estudio el Parque Recreativo “La Joya-Barreta” en la localidad Santa Rosalía de Jáuregui perteneciente al estado de Querétaro, México, debido a que es una zona dirigida restauración y conservación del ecosistema de montaña que ofrece diversos servicios ambientales a la comunidad, tales como infiltración de agua, regulación del clima y funge como una zona de protección de flora y fauna. El parque se encuentra bajo la influencia de actividades antropogénicas enfocadas a la recreación. En el sitio se permite el acceso a vehículos motorizados y al ganado caprino, sin embargo, algunos visitantes contaminan el lugar desechando su basura fuera de los contenedores designados.

El parque es un predio municipal de 2,450,000 m² que pertenece al área natural protegida municipal conocida como "Zona Occidental de Microcuencas", localizado en el noroeste del municipio de Santiago de Querétaro, casi con los límites del Estado de Guanajuato. En particular, el muestreo se realizó dentro del parque entre las coordenadas 20° 48' N y 100° 32' O (Figura 5), la cual tiene una altitud que va de 2437 a 2442 m.s.n.m. y una pendiente de 30°. La fecha de recolecta fue el día 11 de junio del año 2018 entre las 12:45 PM a 14:56 PM en un polígono de 773.105 m² dentro del Parque Recreativo La Joya-Barreta.

CLIMA

El clima que predomina en la región corresponde al tipo BS1 w (W), semiseco templado (Figura 6) con una temperatura media anual estatal de 18°C y una temperatura máxima promedio de 28°C que se presenta en los meses de abril y mayo, la temperatura mínima promedio es de 6°C durante el mes de enero. La precipitación media estatal es de 570 mm anuales, las lluvias se presentan en verano en los meses de junio a septiembre (García, 2004).

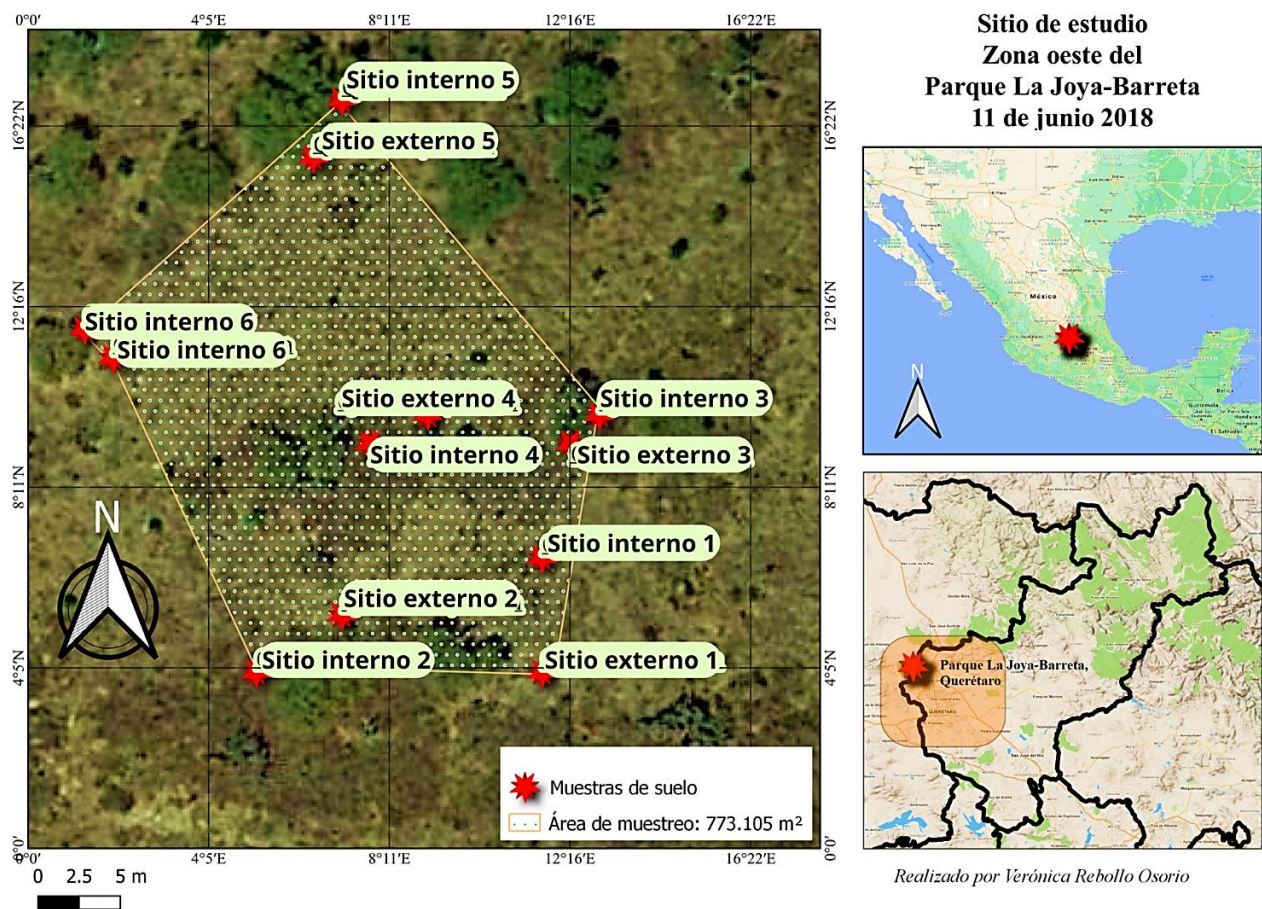


Figura 5. *Sitio de estudio.* El sitio de estudio se ubica en el estado de Querétaro dentro del Parque Recreativo La Joya-Barreta, México. En la imagen de la izquierda se representan los seis árboles muestreados dentro del parque en un área de muestreo total de 773.105 m².

EDAFOLOGÍA

El Parque Recreativo La Joya-Barreta forma parte del Norte de la provincia del Eje Neovolcánico Transmexicano y el tipo de suelo se caracteriza por una estructura volcánica compleja —o estratovolcán— coronada por algunas mesetas angostas alrededor de un amplio cráter, fuertemente erosionado, dentro del cual afloran rocas ígneas ácidas, intermedias (andesitas) y basaltos. Además, La Joya corresponde a la Subprovincia de las Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo, presenta influencia de la Meseta Central por su

cercanía. El tipo de topoforma genérico en el que se localiza es de tipo sierra, formado por escudos volcánicos (Rivera, 2018; INEGI, 2020d).

Con base en la interpretación del Conjunto de Datos Vectorial Edafológico Escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional Querétaro de INEGI (2007) el suelo del Parque Recreativo La Joya-Barreta en el estado de Querétaro está conformado por la fórmula: PHlep+Lpli+PHvrlep/2R la cual se compone de una asociación de hasta tres tipos de suelo con sus calificadores y quiere decir que las limitantes físicas presentes dentro de 100 cm de profundidad es epiléptico, es decir, la roca se sitúa entre 10 a 50 cm; el suelo dominante es del grupo de suelo phaeozem epiléptico (PHlep) que se refiere a suelos con una capa superficial gruesa, de color oscuro, ricos en materia orgánica y nutrientes, su desarrollo requiere una cantidad razonable de precipitación y una vegetación exuberante, preferiblemente pastos; el suelo secundario es leptosol lítico (Lpli) los cuales son suelos poco profundos sobre roca dura, material muy pedregoso o depósitos muy calcáreos. El desarrollo pedogénico limitado da una estructura de suelo débil; se encuentra presente especialmente en regiones montañosas y desérticas, donde la roca dura está expuesta o se acerca a la superficie y la meteorización está activa (Orgiazzi *et al.*, 2016); el suelo terciario es phaeozem vértico epiléptico (PHvrlep), la clase textural es 2 y su limitante superficial es arcilla (R).

VEGETACIÓN

La región en la que se encuentra el Parque Recreativo La Joya-Barreta pertenece a la Región Xerofítica Mexicana caracterizada por zonas semiáridas y áridas del país, estas zonas son habitadas por matorrales xerófilos y matorrales espinosos o de mezquiales (Figura 6) (Rzedowski, 2006). En la zona existen diversos tipos de vegetación: bosque de encino, matorral espinoso y crasicuale, pastizal inducido, vegetación riparia y vegetación rupícola. Este último tipo de vegetación se encuentra restringida a las partes más altas, en el parteaguas de la escorrentía. Presenta una especie de encino dominante formando un dosel de hasta 8 m de alto. Las especies arbóreas asociadas son poco frecuentes y se pueden mencionar al tepozán (*Buddleja cordata*) y al granjeno (*Condalia mexicana*). Existen tres o cuatro manchones bien conservados de este bosque (Rivera, 2018).

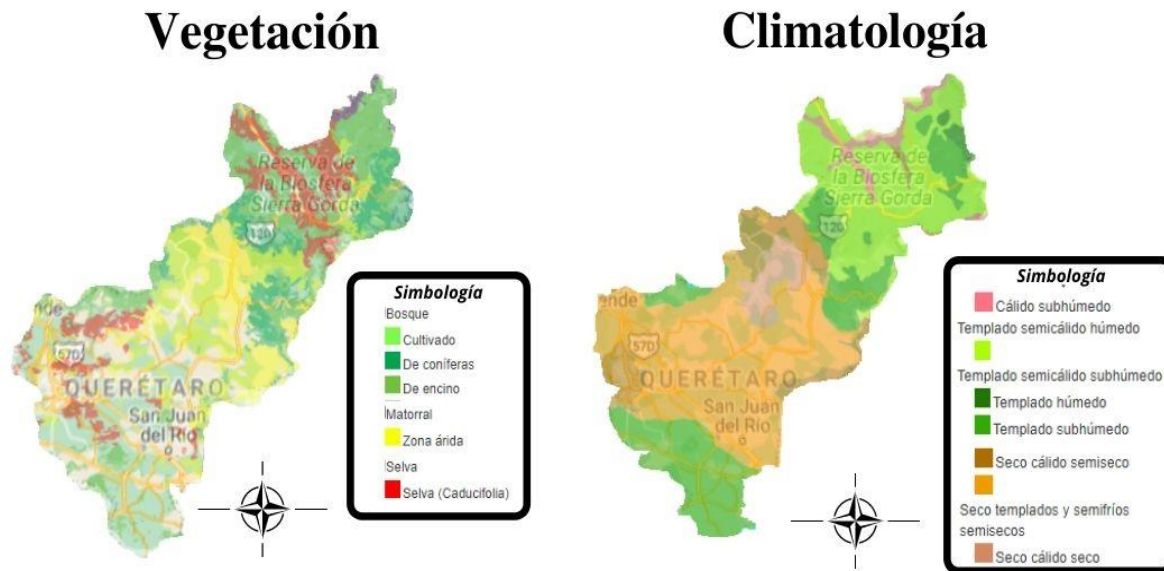


Figura 6. Mapa de tipos de clima y de vegetación que predominan en la región de Querétaro (INEGI, 2020a; INEGI, 2020b).

FAUNA

Entre la fauna que se puede encontrar en los bosques de coníferas y encinos son: pájaro carpintero (*Dryobates scalaris*), matraca serrana (*Campylorhynchus gularis*), ardilla voladora sureña (*Glaucomys volans*), musaraña (*Cryptotis alticola*, *Cryptotis obscura*, *Cryptotis parva* y *Sorex veraecrucis*), venado cola blanca (*Mazama temama*), zorra gris (*Urocyon cinereoargenteus*), cacomixtle (*Bassariscus astutus*), tlacuache (*Didelphis marsupialis*, *Didelphis virginiana* y *Marmosa mexicana*), lince (*Lynx rufus*), comadreja (*Neogale frenata*), tuza (*Thomomys umbrinus*, *Cratogeomys fumosus* y *Heterogenomys hispidus*), mapache (*Procyon lotor*), armadillo (*Dasybus novemcinctus*) y xenosaurio (*Xenosaurus mendozai*) (de Oca *et al.*, 2013; Naturalista, 2021). En el suelo de los diversos tipos de vegetación que existen en el sitio de estudio se pueden encontrar diferentes invertebrados edáficos como nemátodos y ácaros, entre otros (INEGI, 2020c).

RECOLECTA DE MUESTRAS

Se muestrearon seis árboles de la especie *Vachellia schaffneri* (*S. Watson*) Seigler y Ebinger (syn. *Acacia schaeffneri*). Se obtuvieron seis muestras de suelo por árbol representando tres muestras que se tomaron de la parte de suelo más próxima al tronco y tres muestras al suelo expuesto inmediatamente fuera de la sombra del árbol. De esta forma se completaron 36 muestras en total. Las muestras recolectadas para obtener nemátodos, los porcentajes de carbono total (Ct) y nitrógeno total (Nt) se obtuvieron a partir de las 36 muestras. Cada muestra consistió de 400 g de suelo que fueron extraídos manualmente con una pala. Tres muestras adicionales próximas al tronco y tres muestras en suelo expuesto de cada árbol, se tomaron con un nucleador de 100 cc de volumen para estudios de densidad aparente, contenido hídrico y suelo seco. Las muestras internas se realizaron a 10 cm de profundidad y las muestras expuestas a 5-10 cm de profundidad. Todas las muestras fueron almacenadas en bolsas de polietileno sellables, debidamente rotuladas con la localización del sitio de muestreo, el árbol, su procedencia: interna o externa, y un número progresivo que se repitió en cada muestra tanto interna como externa, es decir, afuera de la sombra o dentro de la sombra del árbol. Estas bolsas se colocaron en una hielera con hielo para mantenerlas a baja temperatura durante su transporte al laboratorio. Las coordenadas (ver Tabla 3) y los datos de cada bolsa se anotaron en una libreta de campo.

Tabla 3. *Coordenadas individuales para cada árbol de la especie Vachellia schaffneri.* Para mayor información, consultar el texto.

Muestras	N	W	msnm
Sitio interno 1	20° 48.526'	100° 32.136'	2440
Sitio externo 1	20° 48.522'	100° 32.136'	2443
Sitio interno 2	20° 48.522'	100° 32.146'	2436
Sitio externo 2	20° 48.524'	100° 32.143'	2437
Sitio interno 3	20° 48.531'	100° 32.134'	2436
Sitio externo 3	20° 48.530'	100° 32.135'	2439
Sitio interno 4	20° 48.530'	100° 32.142'	2434
Sitio externo 4	20° 48.531'	100° 32.140'	2434
Sitio interno 5	20° 48.542'	100° 32.143'	2441
Sitio externo 5	20° 48.540'	100° 32.144'	2441
Sitio interno 6	20° 48.534'	100° 32.152'	2441
Sitio externo 6	20° 48.533'	100° 32.151'	2443

PROCESAMIENTO DE LAS MUESTRAS EN LABORATORIO

Una vez que las muestras fueron llevadas al laboratorio, se procedió a refrigerarlas a 4° C y se procesaron para obtener nemátodos durante la semana inmediata posterior a su recolecta.

OBTENCIÓN DE NEMÁTODOS

A cada muestra de suelo se le homogeneizó en su correspondiente bolsa de polietileno. Posteriormente se preparó una probeta de un litro a la cual se agregaron 200 ml de agua corriente. A esta probeta se le agregó una cantidad de muestra de suelo hasta el aforo de 400 ml. Posteriormente se homogeneizó dicha suspensión volteando repetidas veces la probeta y cubriendo la abertura con la palma de la mano. Una vez terminado esto, se vació el contenido de la probeta en una cubeta de plástico. En esta cubeta se homogeneizó la suspensión, deshaciendo los grumos de suelo y descartando rocas de más de cinco centímetros de largo o de diámetro. Una vez homogeneizada la suspensión de suelo, se le dejó decantar de 30 a 40 segundos.

Paso seguido, se le tamizó una vez a través de un tamíz 20 mallas (850 μm) en donde se descartaron ramas pequeñas, rocas, raíces y pasto; posteriormente se tamizó dos veces la suspensión resultante en cada una de las mallas de 60 (250 μm), 100 (150 μm), 200 (75 μm), 325 (45 μm) y 400 (38 μm). A partir del tamiz de 100 mallas, se comenzó a guardar la suspensión tamizada en un vaso de precipitado de 500 ml y en cada tamizado se fue acumulando la suspensión. Una vez obtenida el total de la suspensión (aproximadamente 200 ml) se procedió a colocarlas en embudos de Baermann. Los nemátodos fueron extraídos después de un periodo de 36 a 48 horas en vasos de precipitado de 200 ml. Una vez obtenidas las extracciones se guardaron a 4°C hasta su procesamiento y conteo que se realizó dentro de las siguientes 72 horas. El suelo no utilizado de estas muestras se tamizó y secó para obtener los valores de Ct y Nt (Baermann, 1917).

CONTEO DE NEMÁTODOS

Los nemátodos se contaron a partir de la suspensión obtenida en el embudo de Baermann. De cada suspensión decantada de 200 ml del suelo hidratado se tomó una alícuota de 20 ml para realizar el conteo. De esta forma se aseguró que todos los nemátodos de la muestra de

20 ml fueran contados. Durante el conteo se identificaron los nemátodos hasta el nivel de género; en aquellos casos en los cuales no se les pudo identificar hasta este nivel taxonómico, se les identificó hasta el nivel taxonómico de familia. Los nemátodos se contaron en cámaras contadoras de nemátodos (Chalex, LLC, VETSLIDES.COM) hasta terminar con toda la muestra. Los números se anotaron en las hojas diseñadas ex-profeso para tal fin. Estos datos se capturaron en una hoja de cálculo de Excel y se procedió a realizar la estandarización de los números de ejemplares de cada género y familia de nemátodos a 100 g de suelo seco, para evitar extrapolaciones inexactas relacionadas con el muestreo por áreas (Colwell y Coddington, 1994). Una vez contados los nemátodos fueron fijados en formol al 4% caliente ($\approx 60^{\circ}\text{C}$) para estudios morfológicos. Las cuentas totales de nemátodos se utilizaron para realizar una base de datos con campos correspondientes a cada género encabezando cada columna y organizados por muestra. De esta forma se realizaron columnas por género obtenido y 36 filas por muestra. Los datos fisicoquímicos también se obtuvieron por muestra y se incluyeron en la misma base de datos.

ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS

El carbono total (Ct) se obtuvo por digestión seca a 900°C en un autodeterminador automático de C, TOC SSM 5050A Shimadzu; el N (Nt) se recuperó por el método de Kjeldahl, en una solución de H_2SO_4 en digestión concentrada, arrastre de vapor y destilación. La densidad aparente, el contenido hídrico, peso húmedo y peso seco se obtuvieron primero secando el suelo a 60°C en una mufla. La densidad aparente en g cm^{-3} se calculó al secar una muestra intacta de suelo a 105°C y luego se pesó la muestra. La densidad aparente posteriormente se calculó como el producto del peso por el volumen del nucleador (100 cc). Esto se obtuvo para relacionar la actividad de los nemátodos en los cambios de contenido hídrico (Darby *et al.*, 2010). La porosidad del suelo puede afectar la presencia natural de nemátodos depredadores, o de ácaros oribátidos y teídidos (Freckman *et al.*, 1979) lo cual puede ser un recurso limitante en suelos más “pisados”, como es el caso presente, u ocupados por microrraíces que pueden liberar a los nemátodos de ser presa de depredadores naturales del suelo.

ÍNDICE DE DOMINANCIA DE SIMPSON (D_{si}) E ÍNDICE DE DIVERSIDAD DE SHANNON-WIENER (H')

Para cada muestra de suelo se calculó el índice de dominancia de Simpson (D_{si}) y el índice de diversidad de Shannon-Wiener (H'). El índice de Simpson (D_{si}) (1949) se calculó por medio de la siguiente fórmula:

$$D_{Si} = \sum_{i=1}^S p_i^2 \qquad p_i = \frac{n_i}{N}$$

Donde p_i es la abundancia de la i ésima especie; n_i es el número de individuos de la especie i y N es el número total de individuos para todas las S especies en la comunidad.

El índice de Shannon-Wiener (H') (1949) se calculó usando la fórmula:

$$H' = - \sum_{i=1}^S (p_i * \ln p_i) \qquad p_i = \frac{n_i}{N}$$

Donde p_i es la abundancia de la i ésima especie; n_i es el número de individuos de la especie i y N es el número total de individuos para todas las S especies en la comunidad.

RIQUEZA DE GÉNEROS DE LA COMUNIDAD DE NEMÁTODOS

La riqueza de géneros totales se calculó contabilizando la presencia de individuos de cada género presente en cada muestra.

ANÁLISIS EN EL SOFTWARE NINJA

El índice de madurez (MI), el índice de madurez 2-5 (MI2-5), el índice sigma de madurez (Σ MI), el índice de parásitos de plantas (PPI) y los índices de canalización (CI), basal (BI), de enriquecimiento (EI) y estructural fueron calculados con el programa en línea NINJA (Sieriebriennikov *et al.*, 2014).

ANÁLISIS DE MÉTODOS NO PARAMÉTRICOS

Se realizó una prueba de Shapiro-Wilk para analizar si los datos se distribuían normalmente, la cual comprobó que los datos no eran normales. Debido a la falta de normalidad en los datos y a que la distribución de las abundancias aparentemente mostraba diferencias entre los árboles y entre las zonas internas y externas a las coberturas de las copas se implementó la prueba de Kruskal-Wallis con $\alpha < 0.05$ e intervalo de confianza del 95% para detectar si existían diferencias en la distribución de las abundancias de grupos tróficos, los factores fisicoquímicos, las huellas metabólicas, los índices ecológicos y de perturbación, así como entre los índices de Simpson y Shannon-Wiener entre árboles.

Para comprobar si existían diferencias entre las abundancias de grupos tróficos, índices de perturbación, ecológicos, factores fisicoquímicos, así como los índices de Shannon-Wiener y Simpson entre los sitios internos y externos a las coberturas de las copas de los árboles, se llevó a cabo la prueba paramétrica de U Mann-Whitney con un $\alpha < 0.05$ e intervalo de confianza del 95% (Zar, 2013).

ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA)

Los análisis de componentes principales (PCA) se implementaron debido a que pueden reducir la dimensionalidad de la base de datos y su interpretación estadística no pierda información. Por ejemplo, la reducción de la complejidad de las interacciones entre las variables fisicoquímicas y los grupos tróficos de nemátodos.

Todos los datos obtenidos se emplearon en todos los análisis porque describen de manera significativa la varianza de la interacción especies-ambiente (Darby *et al.*, 2010). El análisis de componentes principales se implementó para explorar la relación del contenido hídrico del suelo (SWC), densidad aparente (BD), C (Ct) y N (Nt) totales, la abundancia por grupo trófico (% total y % de vida libre) contra los árboles y los sitios (internos y externos).

Todos los análisis se corrieron con el programa estadístico SPSS 21 (IBM SPSS Statistics Versión 21) y con el programa estadístico GraphPad Prism 9 (GraphPad Prism Versión 9) para la obtención de las gráficas de los análisis de componentes principales (PCA).

*ANÁLISIS DE LA RED TRÓFICA DE NEMÁTODOS DEL SUELO Y TRIÁNGULO
COLONIZADOR-PERSISTENTE (cp)*

El análisis de la red trófica de la comunidad de nemátodos del suelo (Índices de Madurez (MI), de Parásitos de Plantas (PPI), de Madurez 2-5, de Madurez Sigma Σ MI, de Enriquecimiento (EI), de Estructura (SI), Basal (BI) y Canal (CI)) y las gráficas de análisis de la red trófica de nemátodos del suelo y del triángulo de estrategia de vida colonizador-persistente (cp) se realizaron en el programa en línea NINJA (Nematode Indicator Joint Analysis (beta)) para biomonitorio para conocer el nivel de calidad del estado del suelo del sitio de muestreo (Sieriebriennikov *et al.*, 2014). Estos datos también se agregaron a la base de datos realizada en el programa de Excel.

RESULTADOS

RIQUEZA DE GÉNEROS DE LA COMUNIDAD DE NEMÁTODOS

Se identificaron 3,896 individuos incluyendo larvas dauer (larvas de resistencia) en 100 gr de suelo seco, clasificados en 72 géneros. Los géneros más abundantes en este estudio fueron *Eucephalobus* (bacterívoro) con una abundancia relativa de 750.4 individuos, le siguen los géneros *Plectus* (bacterívoro) con 369.9, *Cephalobus* (bacterívoro) con 326.4, *Helicotylenchus* (herbívoros) con 301.79, *Rhabditis* (bacterívoro) con 219.26, *Filenchus* (fungívoro) con 213.29 y *Tylenchus* (herbívoros) con 125.16 nemátodos (Anexo: Figura 1A y 2A). Los grupos tróficos más abundantes fueron los bacterívoros (64.24%) seguidos del grupo trófico de los herbívoros (19.18%) y fungívoros en tercer lugar (11.56%) (Figura 7).

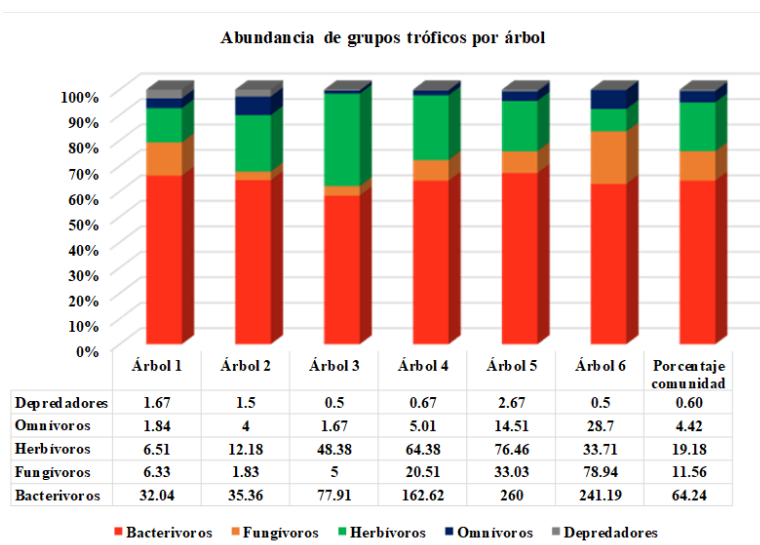


Figura 7. Composición de la abundancia de nemátodos por grupos tróficos de cada árbol del muestreo. El gráfico de barras representa la abundancia de nemátodos por grupos tróficos en cada árbol muestreado, asimismo se puede observar que la mayor parte de la comunidad de nemátodos se conforma por los bacterívoros (64.24%) y en menor proporción se encuentran los grupos tróficos de los omnívoros (4.42%) y los depredadores (0.60%).

La comparación entre la abundancia de nemátodos entre sitios internos y externos de las coberturas de los árboles, indican que los árboles 1, 2, 3 y 6 contienen mayor cantidad de

nemátodos en los sitios internos de los árboles que en los sitios externos, mientras que los árboles 4 y 5 contienen mayor cantidad de nemátodos en los sitios externos (Figura 8). En la Tabla 1A del Anexo se muestran las abundancias de cada género por grupos tróficos y se dan a conocer los índices de perturbación y ecológicos, así como las variables fisicoquímicas.

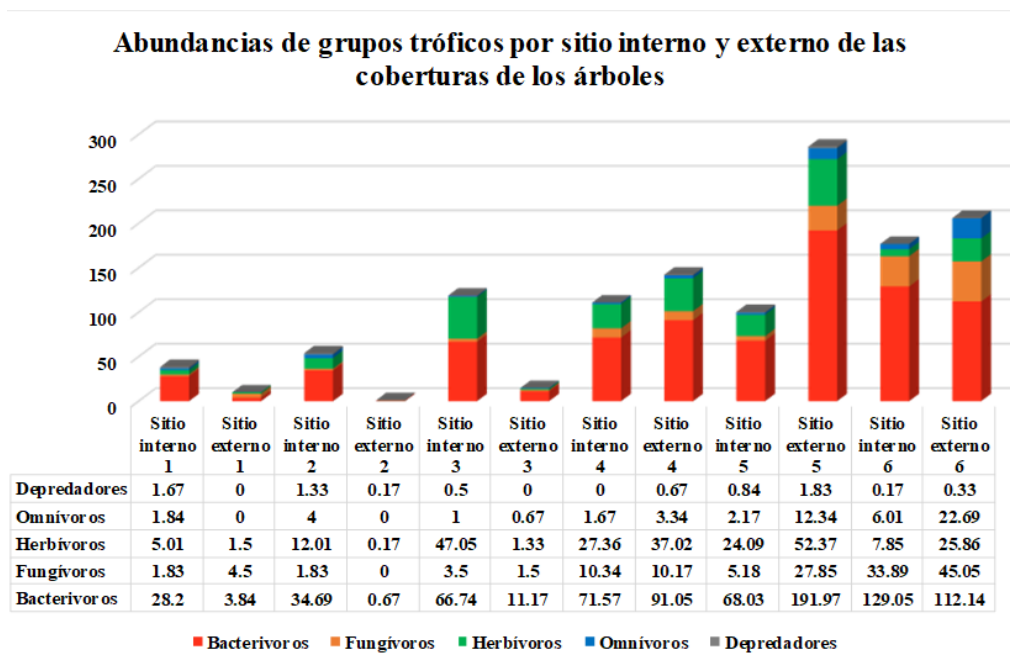


Figura 8. Composición de la comunidad de nemátodos del suelo por grupos tróficos entre los sitios internos y externos a las coberturas de los árboles. En las gráficas de barras se observa que la comunidad de nemátodos está en su mayor parte conformada por bacterívoros en los sitios internos de los árboles 1, 2, 3 y 6, mientras que en los árboles 4 y 5 hay mayor cantidad de nemátodos en los sitios externos de las coberturas de los árboles.

ÍNDICES DE PERTURBACIÓN

El índice de madurez (MI) se basa en el cálculo de la media ponderada de los valores asignados a los géneros de nemátodos que no se alimentan de plantas clasificados en la escala de colonizador y persistente (Bongers, 1990). Los valores de este índice son una medida de la perturbación de la comunidad de nemátodos del suelo, donde valores bajos (e.g. 1 - 2.5) son una representación de que el suelo está conformado por nemátodos

colonizadores cp-1 y cp-2 en su mayoría e indican que el suelo se encuentra eutrofizado o enriquecido de nitrógeno, mientras que valores altos (e.g. 3 - 5) muestran que el suelo se encuentra estable (Bongers, 1990), es decir, es un suelo saludable, fértil y capaz de proporcionar servicios ecosistémicos como el mantenimiento del ciclo de nutrientes, el secuestro de carbono o la producción de alimentos, fibras y madera (Sánchez-Moreno y Talavera, 2013). En el caso de este estudio, los valores que se obtuvieron en las muestras oscilan entre el valor más bajo 1.34 al valor más alto 2.33, lo que refleja que el suelo muestreado contiene en su mayoría nemátodos de la escala cp-1 y cp-2 (Figura 9).

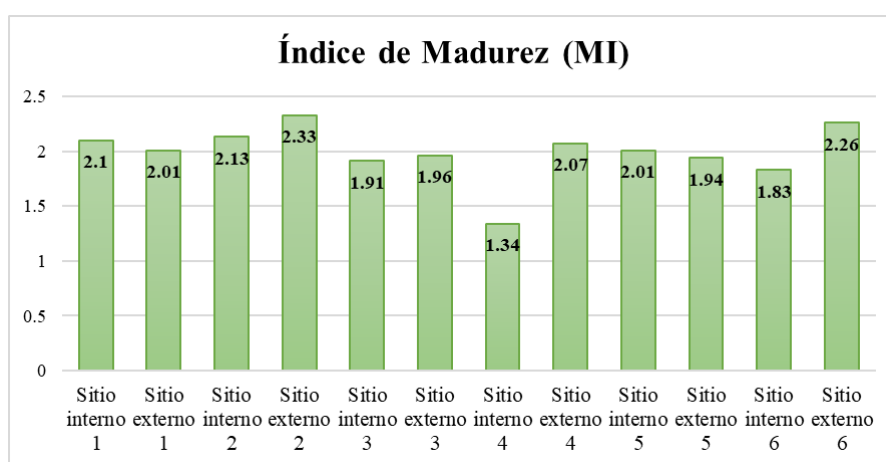


Figura 9. Índices de Madurez (MI) de las muestras del suelo del parque La Joya-Barreta. Los valores de las muestras oscilan entre los valores 1.34 al 2.33, lo que refleja que el suelo muestreado contiene en su mayoría nemátodos de la escala cp-1 y cp-2.

El Índice de Parásitos de Plantas (PPI) es similar al Índice de Madurez (MI) a excepción de que se basa en la abundancia de nemátodos que se alimentan de plantas y a su vez en el vigor de sus plantas hospederas que se rigen bajo el sistema de enriquecimiento de nutrientes del suelo, es decir, los valores bajos de este índice corresponden a condiciones de nutrientes escasos en los suelos de los ecosistemas, al inverso del Índice de Madurez (Bongers, 1990; Bongers *et al.*, 1997; Ferris y Bongers, 2009). En este estudio los valores del PPI en todas las muestras fueron de 2.57 a 3.33 a excepción de la muestra “Sitio externo 2” que tuvo un valor de 5 (Figura 10).

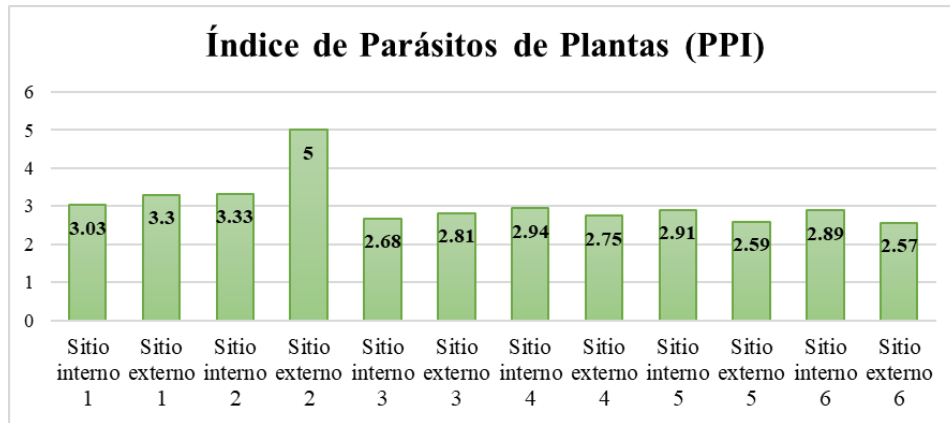


Figura 10. Índice de Parásitos de Plantas (PPI) de las muestras del suelo del parque La Joya-Barreta. Los valores del índice PPI obtenido en las muestras oscilan entre 2.57 y 3.33 en la mayor parte de las muestras, a excepción de la muestra “Sitio externo 2” que tiene un valor de 5.

El índice de madurez 2 – 5 (MI 2-5) en este estudio fue 2.01 hasta 2.43 lo que indica que en la mayor parte de las muestras hay una composición de nemátodos oportunistas generales clasificados en la escala cp-2, es decir, aquellos que responden a condiciones de estrés (Figura 11). Por otro lado, el índice $\sum MI$ se encuentra en todas las muestras en el rango de 1.89 y 2.83 (Figura 12).

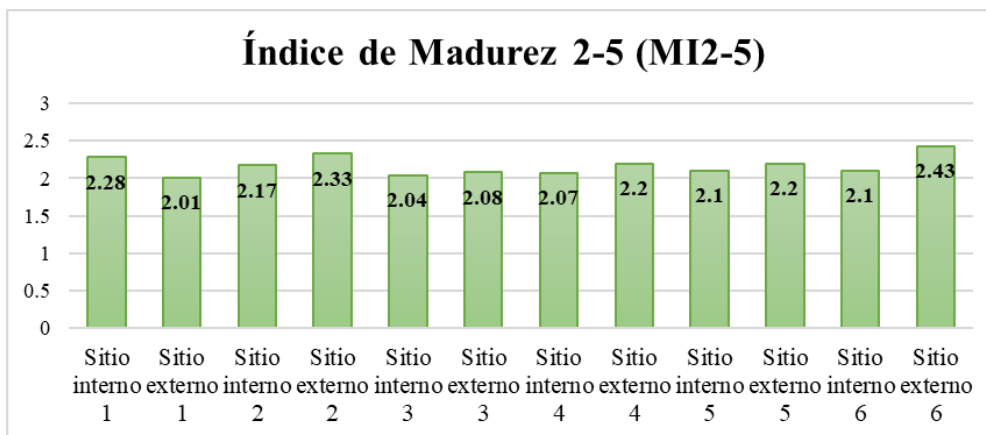


Figura 11. Índice de Madurez 2-5 (MI 2-5) de la comunidad de nemátodos de la zona oeste del parque La Joya-Barreta. Los valores obtenidos oscilan de 2.01 a 2.43.

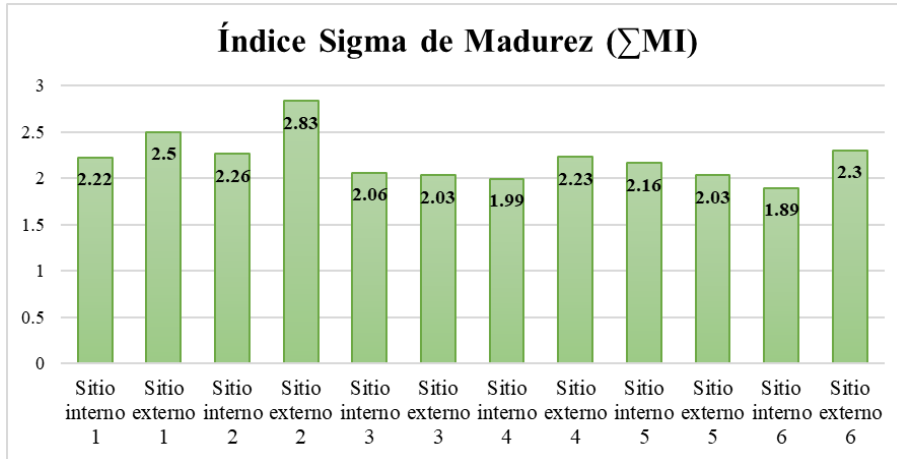


Figura 12. Índice de Madurez Sigma (ΣMI) de la comunidad de nemátodos de la zona oeste del parque La Joya-Barreta. Los valores del índice obtenidos de cada muestra varían de 1.89 a 2.83.

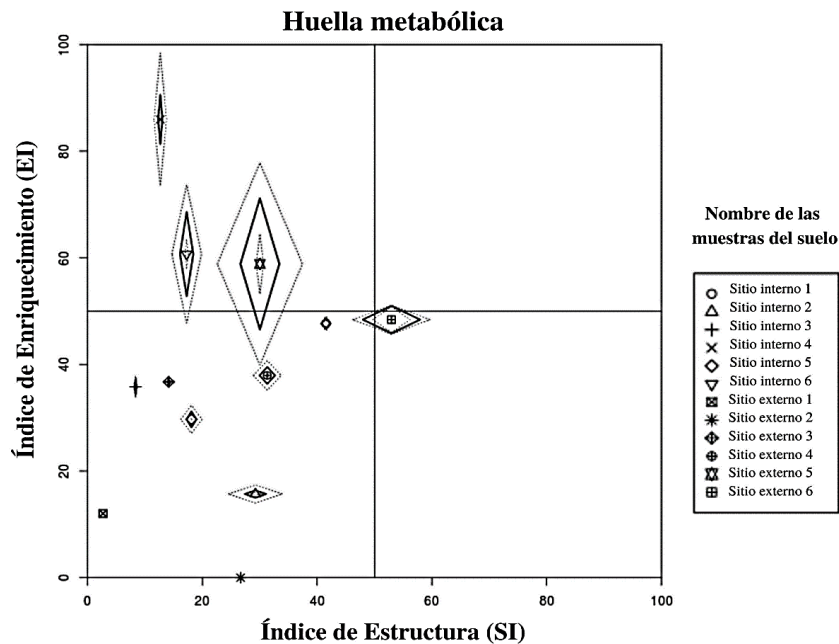


Figura 13. Huella metabólica de la comunidad de nemátodos de la zona oeste del parque La Joya-Barreta. Las muestras “Sitio externo 5” y “Sitio interno 6” presentaron una huella metabólica predominante por un índice mayor de enriquecimiento a comparación con las demás muestras. Mientras que la muestra “Sitio externo 6” tuvo una huella metabólica con un índice de estructura mayor al de las demás muestras.

Los resultados de la huella funcional metabólica de la comunidad de nemátodos del Parque La Joya-Barreta, indican que existen en mayor proporción nemátodos de enriquecimiento que contribuyen más a la red trófica edáfica en contraposición con los nemátodos que brindan estabilidad a la comunidad, tales como depredadores y omnívoros que no están bien representados en el suelo muestreado (Figura 13).

ÍNDICES ECOLÓGICOS

El Índice de Canal (CI) se refiere a la descomposición orgánica del suelo por hongos, sin embargo, este no representa un valor cuantitativo del flujo de componentes de carbono (C) y energía a través de los canales de descomposición de hongos y bacterias; ese grado de calibración del índice no se ha llevado a cabo y puede no ser técnicamente posible (Ferris, 2010). El índice Basal (BI) indica el grado de disminución de una red trófica por estrés ambiental (Ferris, 2010), es decir se mide tomando en cuenta la cantidad de nemátodos de la clasificación colonizador-persistente 2 (cp-2) que se encuentran en las muestras del suelo porque son más resistentes al disturbio ambiental. Por otra parte, el Índice de Enriquecimiento (EI) toma en cuenta la abundancia de nemátodos bacterívoros encontrados en el sistema de clasificación cp-1 y cp-2 que responden más rápidamente a la disponibilidad de recursos del suelo (Ferris, 2010) y finalmente el Índice de Estructura (SI) establece el nivel de estabilidad de la red trófica, porque se basa en la abundancia de nemátodos persistentes de la clasificación cp-3 y cp-5 debido a que son nemátodos depredadores y omnívoros (Ferris, 2010) que demuestran que existen otros recursos disponibles en el suelo para su alimentación.

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos de los índices ecológicos de cada muestra y se encuentran graficados en la Figura 14, en donde se puede observar que el principal canal de descomposición es bacteriano porque el Índice de Canal (CI) es más bajo que el Índice de Enriquecimiento (EI) en la mayoría de las muestras del suelo, a excepción de la muestra “Sitio externo 1” que tiene un CI más alto que el EI y el BI. Además, el BI y el EI de las muestras del suelo indican una proporción alta de enriquecimiento, mientras que el SI tiene valores bajos en todas las muestras en comparación con los demás índices, lo que describe una red trófica incompleta debido a la poca presencia de nemátodos

depredadores y omnívoros, por lo cual la gráfica representa un suelo heterogéneo respecto a su red trófica, dominado principalmente por nemátodos bacterívoros y fungívoros.

Tabla 4. Resultados de los índices ecológicos de Canal (CI), Estructura (SI), Basal (BI) y Enriquecimiento (EI). La mayor parte de las muestras tienen un Índice Basal mayor que el Índice de Canal, además de tener un Índice de Estructura menor en comparación con los demás índices.

Muestras	Índice de Canal (CI)	Índice Basal (BI)	Índice de Enriquecimiento (EI)	Índice de estructura (SI)
Sitio interno 1	8.53	38.38	47.68	41.53
Sitio externo 1	100	86.84	12.04	2.67
Sitio interno 2	10	62.83	15.7	29.24
Sitio externo 2	NA	73.33	0	26.67
Sitio interno 3	16.34	60.17	35.8	8.36
Sitio externo 3	38.3	58.4	36.73	14.12
Sitio interno 4	3.94	13.49	85.95	12.66
Sitio externo 4	24.44	49.22	37.94	31.3
Sitio interno 5	31.16	59.33	29.7	18.09
Sitio externo 5	11.49	34.04	58.86	30.02
Sitio interno 6	16.74	35.85	60.7	17.26
Sitio externo 6	32.84	32.55	48.41	52.95

ANÁLISIS DE LA RED TRÓFICA DE LA COMUNIDAD DE NEMÁTODOS DEL SUELO Y TRIÁNGULO COLONIZADOR-PERSISTENTE (cp)

El análisis de la red trófica de la comunidad de nemátodos del suelo, a través de graficar el índice de enriquecimiento (EI) contra el índice de estructura (SI) de cada muestra, indicó que la mayoría (80%) del suelo muestreado del sitio de la zona oeste del parque La Joya-Barreta es un suelo estresado con un alto grado de perturbación, enriquecido de nitrógeno y en algunas zonas se encuentra agotado. Los canales de descomposición principales son bacterianos y fúngicos, con una alta proporción de C:N y la condición de la red trófica se encuentra degradada en la mayor parte de las muestras del suelo recolectadas (Figura 14).

Análisis de la red trófica de nemátodos del suelo

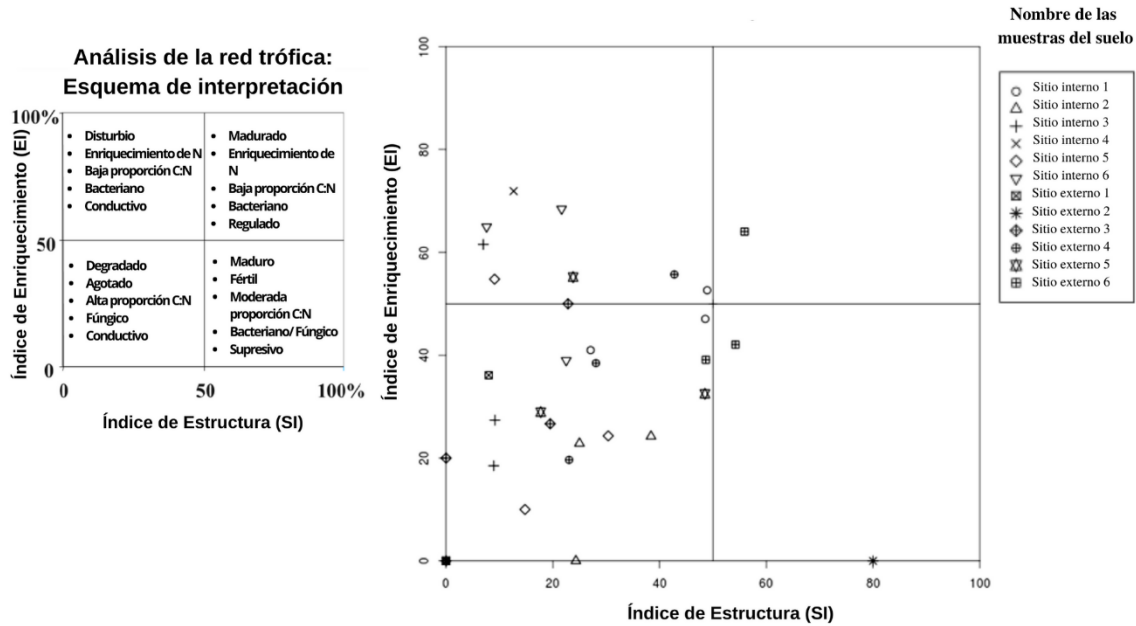


Figura 14. Gráfica del análisis de la red trófica de nemátodos del suelo. Esta gráfica indica que la mayor parte del suelo (80%) de la zona oeste del parque La Joya-Barreta es un suelo degradado, agotado con una alta proporción de C:N, conductivo y conformado por hongos y bacterias en menos proporción.

La gráfica del triángulo de estrategia de vida colonizador-persistente (cp) indicó que el suelo muestreado de la zona oeste del parque La Joya-Barreta es un suelo estresado conformado en su mayoría por nemátodos de estrategia de vida cp-2, es decir nemátodos con tiempos de generación cortos y una alta tasa de reproducción que no forman larvas de resistencia (dauer), estos nemátodos son muy tolerantes a los contaminantes y otras alteraciones. Se alimentan de células epidérmicas (tilénquidos pequeños), hongos (afelencoides y anguínidos) y bacterias (cefalóbidos, pléctidos y monistéricos) (Figura 15).

Triángulo colonizador-persistente (c-p)

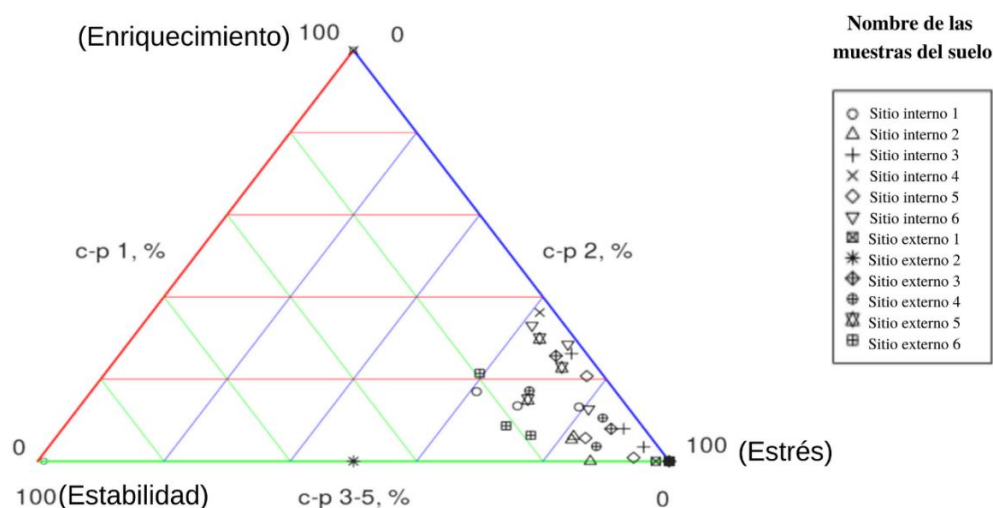


Figura 15. Gráfica del triángulo de estrategia de vida colonizador-persistente de nemátodos. La gráfica muestra que el suelo muestreado de la zona oeste del parque La Joya-Barreta es un suelo estresado y conformado por nemátodos de la clasificación cp-2.

HUELLAS METABÓLICAS

La huella metabólica del grupo trófico de bacterívoros fue mayor (26.43) en comparación con las huellas metabólicas de herbívoros (4.06), omnívoros (7.05), fungívoros (0.95) y depredadores (0.69). Además, la huella metabólica de enriquecimiento (18.04) tuvo un valor mayor a diferencia de la huella metabólica de estructura (8.08). Este último resultado confirma que en el suelo del sitio de estudio existe una mayor actividad biológica por parte de los nemátodos que responden más rápidamente al enriquecimiento de recursos y, al contrario, los niveles tróficos más altos que regulan la red alimentaria tienen una menor actividad metabólica (Figura 16).

**Huellas metabólicas por grupo trófico de la comunidad de nemátodos del
Parque recreativo La Joya-Barreta**

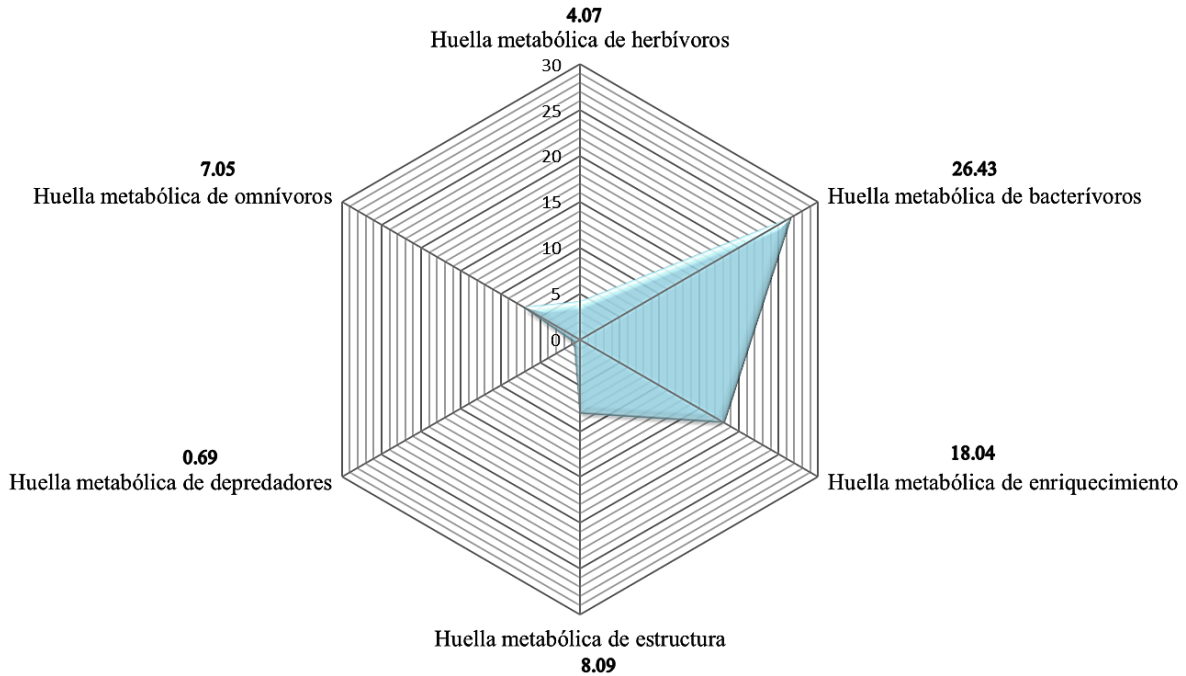


Figura 16. *Huellas metabólicas por grupo trófico de la comunidad de nemátodos del suelo.* Las huellas metabólicas que predominaron en la comunidad de nemátodos muestreada fueron la huella metabólica de enriquecimiento y la huella metabólica de bacterívoros, mientras que las huellas metabólicas de estructura, de omnívoros y herbívoros fueron menores. La huella metabólica de depredadores fue la que tuvo el valor más bajo de toda la comunidad de nemátodos.

ÍNDICES DE SIMPSON (D_{si}) Y SHANNON-WIENER (H')

El valor del índice de Simpson para las muestras del sitio de muestreo se encuentra entre 0.07 y 0.24 (Figura 17), indicando una alta diversidad y una baja dominancia según Simpson (1949), debido a que los valores más próximos a cero indican una menor probabilidad de encontrar a dos individuos de la misma especie. Por otro lado, los valores del índice de Shannon-Wiener fueron de 1.56 a 2.89 (Figura 18) mostrando que la comunidad de nemátodos de la zona oeste del parque La Joya-Barreta muestra valores

medios de diversidad y dentro del rango normal de diversidad en ecosistemas naturales, puesto que valores inferiores a 2 se consideran bajos en diversidad y superiores a 3 se consideran altos en diversidad (Sushchuk y Matveeva, 2021; Pla, 2006) (Tabla 5).

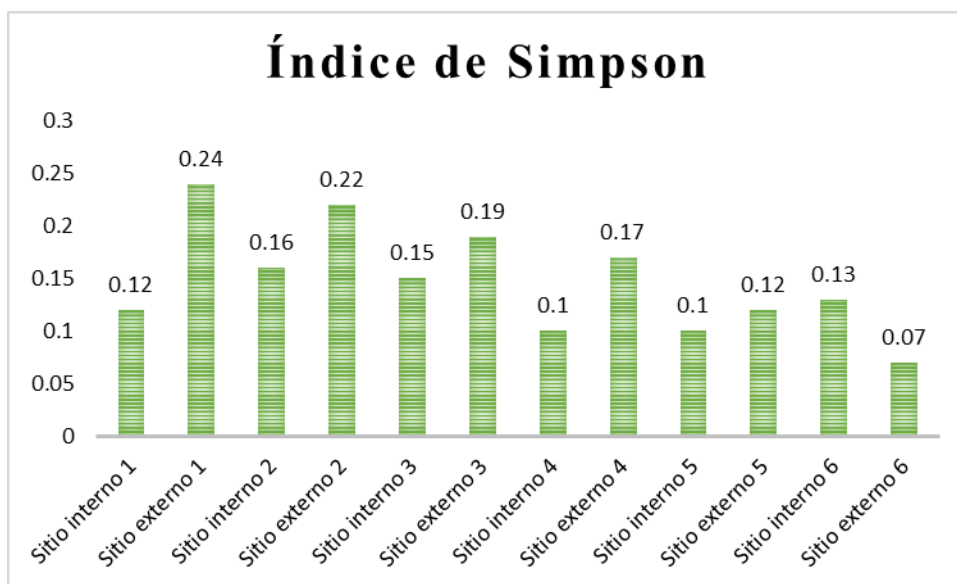


Figura 17. Valores del índice de Simpson de la comunidad de nemátodos del suelo muestreado en la zona oeste del parque La Joya-Barreta.

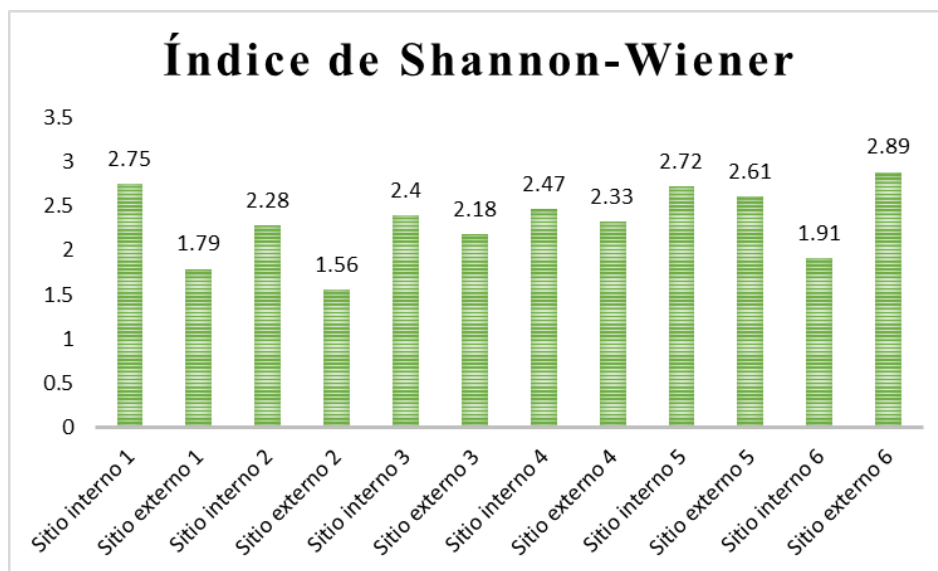


Figura 18. Valores del índice de Shannon-Wiener de la comunidad de nemátodos del suelo muestreado en la zona oeste del parque La Joya-Barreta.

Tabla 5. Interpretación de los valores del índice de Shannon-Wiener

Valores	Significancia
0.5 - 1	Diversidad baja
2 - 3	Valor normal en la mayoría de los ecosistemas
3 - 5	Diversidad alta

Fuente: Pla (2006) y Sushchuk y Matveeva (2021).

ANÁLISIS DE MÉTODOS NO PARAMÉTRICOS

La prueba no paramétrica de U de Mann-Whitney de comparación entre la distribución de las variables fisicoquímicas respecto a los sitios internos y externos, con un nivel de significancia $\alpha < 0.05$ e intervalo de confianza del 95% resultó en que el contenido hídrico tiene un valor de $p = 0.009$, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula que establece que la distribución del contenido hídrico es la misma entre los sitios internos y externos de los árboles y por consiguiente se acepta la hipótesis alternativa que establece que la distribución del contenido hídrico no es la misma entre los sitios internos y externos de los árboles, por lo tanto se infiere que el contenido hídrico se distribuye de manera diferencial entre los sitios internos y externos de los árboles (Tabla 6).

Los resultados de las pruebas no paramétricas Kruskal-Wallis con $\alpha < 0.05$ e intervalo de confianza del 95% que se aplicaron para realizar las comparaciones entre las distribuciones de las abundancias de grupos tróficos, los factores fisicoquímicos, las huellas metabólicas, los índices ecológicos y de perturbación, los índices de Simpson y Shannon-Wiener no demostraron diferencias significativas en su distribución con respecto a los árboles, por lo que se acepta la hipótesis nula que las distribuciones de las abundancias de grupos tróficos, los factores fisicoquímicos, las huellas metabólicas, los índices ecológicos y de perturbación, los índices de Simpson y Shannon-Wiener son las mismas entre árboles (Tabla 6).

La prueba de Kruskal-Wallis con un nivel de significancia de $\alpha < 0.05$ e intervalo de confianza del 95% que se realizó para probar si existían diferencias significativas entre los valores de los índices de perturbación (MI, PPI, MI 2-5 y Σ MI) y ecológicos (CI, SI, EI y BI) entre las muestras no mostró diferencias significativas, por lo que se acepta la hipótesis nula que establece que la distribución de los valores de los índices de perturbación y ecológicos es la misma entre las muestras (Tabla 6).

No se realizaron pruebas post-hoc después del análisis de Kruskal-Wallis debido a que los resultados no presentaron diferencias significativas.

ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA)

El análisis de componentes principales (PCA) entre las variables de abundancias de grupos tróficos con las variables fisicoquímicas y los árboles muestreados indicaron que el componente principal uno (PC1) explica el 42.03% de la variación de las variables fisicoquímicas, contra el componente principal dos (PC2) que explica el 22.54% de la varianza de la abundancia de los grupos tróficos de bacterívoros, depredadores, fungívoros, herbívoros y omnívoros. En la gráfica de la Figura 19 se muestra que el grupo trófico de los depredadores (PT) y la densidad aparente del suelo (BD_{gcm^3}) en el árbol dos muestreado tienen una asociación positiva sobre la abundancia de los depredadores; la asociación entre el contenido hídrico del suelo ($SWC \text{ g H}_2\text{Og}^{-1}$) con el grupo trófico de bacterívoros (BT), el carbono total (Ct) y el nitrógeno total (Nt) en los árboles cinco y tres muestreados es positiva, por lo que el grupo de los bacterívoros tuvo una mayor abundancia en estos árboles. El grupo trófico de los omnívoros (OT) y los fungívoros (FT) tienen una asociación positiva entre ellos junto con el árbol seis del muestreo y una mayor abundancia en este árbol, sin embargo, el grupo trófico de los herbívoros (HT) aparece aislado de las demás variables por lo que no tiene una relación lineal significativa con las otras variables, pero sí tiene una abundancia mayor en el árbol cuatro del muestreo (Figura 19).

Tabla 6. Resultados de las pruebas no paramétricas Kruskal-Wallis y la Prueba de U de Mann-Whitney con nivel de significancia $\alpha < 0.05^*$ e intervalo de confianza del 95% de los árboles y sitios entre variables fisicoquímicas, grupos tróficos, índices de perturbación y ecológicos, huellas metabólicas y los índices de dominancia y diversidad.

	U de Mann-Whitney		Kruskal-Wallis	
	Sitios		Árboles	
	<i>p</i>	<i>a</i>	<i>p</i>	<i>a</i>
<i>Variables fisicoquímicas</i>				
Contenido hídrico (SWC)	0.009*	*	0.656	n.s.
Densidad aparente (BD)	0.394	n.s.	0.106	n.s.
Carbono total (Ct)	0.180	n.s.	0.185	n.s.
Nitrógeno total (Nt)	0.132	n.s.	0.148	n.s.
<i>Grupos tróficos (% promedio)</i>				
Bacterívoros	0.093	n.s.	0.440	n.s.
Fungívoros	0.180	n.s.	0.199	n.s.
Herbívoros	0.699	n.s.	0.354	n.s.
Omnívoros	0.699	n.s.	0.872	n.s.
Depredadores	0.699	n.s.	0.354	n.s.
Individuos totales	0.937	n.s.	0.115	n.s.
<i>Índices de perturbación</i>				
Índice de Madurez (MI)	0.240	n.s.	0.393	n.s.
Índice de Madurez 2-5 (MI 2-5)	0.394	n.s.	0.559	n.s.
Σ Índice de Madurez (Σ MI)	0.180	n.s.	0.393	n.s.
Índice de Parásitos de Plantas (PPI)	0.485	n.s.	0.144	n.s.
<i>Índices ecológicos</i>				
Índice de Canal (CI)	0.240	n.s.	0.571	n.s.
Índice Basal (BI)	0.818	n.s.	0.232	n.s.
Índice de Enriquecimiento (EI)	0.589	n.s.	0.226	n.s.
Índice de Estructura (SI)	0.589	n.s.	0.724	n.s.
<i>Huellas Metabólicas (promedio)</i>				
Biomasa total	0.699	n.s.	0.118	n.s.
Huella metabólica compuesta	0.699	n.s.	0.122	n.s.
Huella metabólica de enriquecimiento	0.589	n.s.	0.122	n.s.
Huella metabólica de estructura	0.937	n.s.	0.371	n.s.
Huella metabólica de fungívoros	0.818	n.s.	0.109	n.s.
Huella metabólica de bacterívoros	0.485	n.s.	0.119	n.s.
Huella metabólica omnívoros	1.000	n.s.	0.354	n.s.
Huella metabólica de herbívoros	0.818	n.s.	0.129	n.s.
Huella metabólica de depredadores	0.485	n.s.	0.576	n.s.
<i>Índices de dominancia y diversidad</i>				
Simpson	0.180	n.s.	0.354	n.s.
Shannon	0.485	n.s.	0.606	n.s.

* $\alpha = 0.05$

En el caso del análisis de los componentes principales (PCA) de las abundancias de los grupos tróficos de nemátodos, con respecto a las variables fisicoquímicas dentro del sitio “interno” de las muestras tomadas cerca de la corteza de los árboles (1) y “externo”, es decir las muestras tomadas fuera de la sombra de los árboles (2) (micrositios) demostró que el componente principal uno (PC1) explica el 40.59% de las variables fisicoquímicas contra el componente principal dos (PC2) que explica el 23.33% de las abundancias de los grupos tróficos de bacterívoros, fungívoros, omnívoros, depredadores y herbívoros. En la gráfica de la Figura 20 las variables fisicoquímicas como el contenido hídrico (SWC $\text{gH}_2\text{Og}^{-1}$), nitrógeno total (Nt), carbono total (Ct) y el grupo trófico de los bacterívoros (BT) tienen una asociación positiva en el sitio interno (1) de los árboles muestreados, es decir que los bacterívoros tienen una mayor abundancia en los sitios internos cercanos a la corteza de los árboles muestreados, mientras que los grupos tróficos de los omnívoros (OT), fungívoros (FT) y herbívoros (HT) tienen una relación directa entre ellos y una abundancia mayor en los sitios externos a la sombra de los árboles muestreados, además el grupo trófico de los depredadores (PT) tuvo una relación positiva con la densidad aparente (BD g cm^{-3}) del suelo en los sitios internos y externos de los árboles del muestreo (Figura 20).

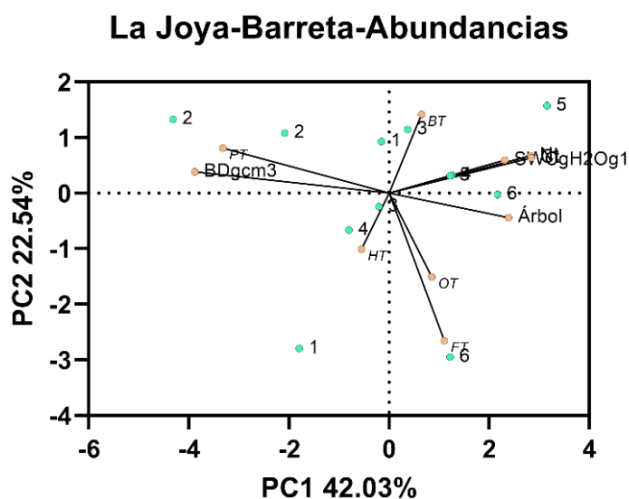


Figura 19. Gráfica de componentes principales (PCA) de abundancias de los grupos tróficos (PC2) y las variables fisicoquímicas (PC1) entre los seis árboles muestreados. Los puntos azules numerados del uno al seis indican los seis árboles muestreados y cada punto

aparece dos veces debido a que en cada árbol se tomaron muestras cerca de la corteza del árbol y fuera de la sombra del árbol. (Grupo trófico de depredadores: PT/ Grupo trófico de bacterívoros: BT/ Grupo trófico de fungívoros: FT/ Grupo trófico de herbívoros: HT/ Grupo trófico de omnívoros: OT/ Contenido hídrico del suelo: SWCgH₂Og¹/ Densidad aparente del suelo: BD g cm⁻³).

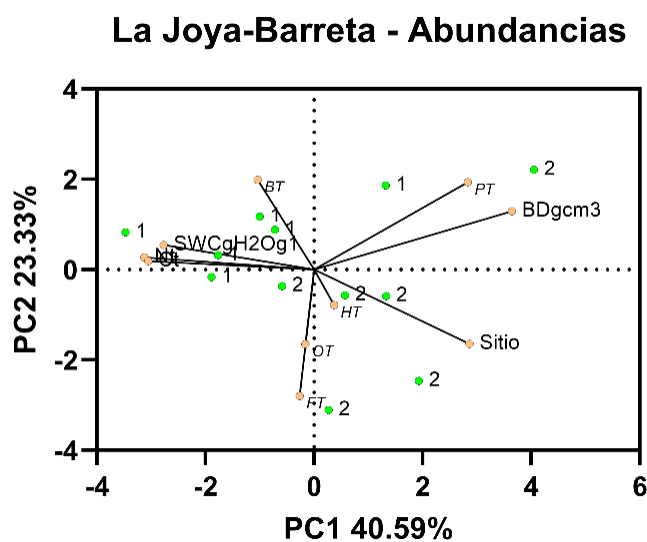


Figura 20. Gráfica de componentes principales (PCA) de abundancias de los grupos tróficos (PC2) y las variables fisicoquímicas (PC1) en los sitios internos de los árboles (1) y externos (2). (Grupo trófico de depredadores: PT/ Grupo trófico de bacterívoros: BT/ Grupo trófico de fungívoros: FT/ Grupo trófico de herbívoros: HT/ Grupo trófico de omnívoros: OT/ Contenido hídrico del suelo: SWCgH₂Og¹/ Densidad aparente del suelo: BDgcm³).

DISCUSIÓN

En suelos que presentan algún tipo de disturbio es común encontrar una mayor proporción de bacterívoros, fungívoros y herbívoros, es decir, nemátodos pertenecientes a la clasificación cp-2 (Tabla 2) (Bongers y Bongers, 1998), los cuales son más abundantes en condiciones de estrés, puesto que tienen una amplitud ecológica mayor que los otros grupos tróficos de nemátodos. Además, son más tolerantes a condiciones adversas, a contaminantes y algunos inclusive son capaces de una supervivencia criptobiótica; también

aprovechan los recursos disponibles deliberadamente a medida que éstos disminuyen su disponibilidad en el suelo (Niño de Guzmán, 2017; Varela-Benavides, 2014).

El incremento de nemátodos del tipo cp-2 en conjunto con la disminución de nemátodos del tipo cp-1, cp-3 y cp-5 reflejan estrés en el suelo (Escamilla Valdez *et al.*, 2017). El estudio realizado por Cerevkova *et al.* (2011) demostró que las comunidades de nemátodos bacterívoros aumentan después de un disturbio, incluso después de tres años, mientras que el resto de los grupos tróficos mantienen una abundancia baja. Los nemátodos depredadores y omnívoros son estrategias K y tienen más probabilidades que otros gremios funcionales de verse afectados por cambios físicos o químicos en el suelo (Korthals *et al.*, 1996; Sánchez-Moreno y Ferris, 2007; Varela-Benavides, 2014).

La baja representación de los nemátodos depredadores (1% del total) y omnívoros (4% del total) en el sitio de muestreo puede ser una explicación de la abundancia de nemátodos herbívoros (17% del total) porque aquéllos regulan la abundancia de especies oportunistas como lo son los herbívoros. Por lo que su ausencia se refleja en un aumento de los nemátodos herbívoros, que a su vez de acuerdo con Sánchez-Moreno y Ferris (2007) y Ferris (2010a) pueden reducir la producción autótrofa y el suministro de energía al sistema edáfico.

Existen estudios (Sánchez-Moreno y Ferris, 2007, Bilgrami *et al.*, 2005, Bilgrami y Gaugler, 2005) que sugieren que la relación entre los nemátodos depredadores y herbívoros sigue una función dependiente de la densidad. Esta función describe que, cuando existe una gran disponibilidad de nemátodos presa, entonces la presión de depredación es débil sobre éstos, pero cuando hay una baja disponibilidad de presas, entonces la presión de depredación sobre los nemátodos presa es alta (Sánchez-Moreno y Ferris, 2007).

La disminución de la biodiversidad dentro de un gremio funcional, en este caso de los nemátodos depredadores y omnívoros, tiene efectos negativos en los ecosistemas (Heemsbergen *et al.*, 2004), debido a que la estructura y función de una red trófica están determinadas por el ingreso de recursos alimenticios y de los grupos tróficos que realizan una función dentro del gremio. Los grupos tróficos tienen diversos atributos para que cada uno contribuya de manera complementaria a la función del sistema; dentro de la red trófica

del suelo cada gremio de nemátodos cumplen una función ecosistémica (*e.g.* los nemátodos depredadores fungen como supresores, los nemátodos herbívoros en la herbivoría y su aumento se convierte en parasitismo, mientras que los nemátodos bacterívoros y fungívoros fungen como mineralizadores de nutrientes del suelo); por esta razón existe una relación positiva entre la magnitud de la función y la diversidad dentro de un gremio funcional (Loreau y Hector, 2001; Loreau, 2004), en consecuencia la ausencia de un gremio funcional deriva en un desequilibrio de la red trófica y su contribución ecológica al ecosistema.

Es importante mencionar que la composición de un gremio funcional no está determinada sólo por un grupo de organismos, sino por diferentes grupos taxonómicos que realizan funciones y servicios similares. De esta manera, un servicio ecosistémico continúa incluso si las condiciones se vuelven desfavorables para algunos componentes del gremio (Ferris, 2010a; Loreau, 2004). Un ejemplo de ello fue encontrado en un bosque danés de *Fagus* donde el muestreo del suelo indicó que existía una dominancia por el grupo de nemátodos bacterívoros Plectidae, a pesar de esto, hubo un reemplazo de los depredadores principales del grupo de nemátodos Mononchidae por animales del Phylum Tardigrada (Yeates y Wardle, 1996).

En varios estudios con la comunidad de nemátodos como indicadores de la condición del suelo, se ha demostrado que independientemente del tipo de suelo y de los factores fisicoquímicos, si el suelo presenta un disturbio de algún tipo, los nemátodos bacterívoros se encuentran en mayor proporción que otros grupos tróficos tales como los depredadores y los omnívoros, los cuales ven reducida su abundancia por efecto del disturbio en la comunidad. Este efecto sobre la comunidad de nemátodos ocasiona la pérdida de grupos tróficos y eso es a lo que se le denomina perturbación. Algunos ejemplos de estos estudios son los que se han elaborado en suelos labrados y con incremento de herbicidas (Sánchez-Moreno *et al.*, 2015), suelo desnudo (Ettema y Bongers, 1993), cultivos perennes y anuales (Freckman y Ettema, 1993; Yeates y Bird, 1994; Neher, 2010; Continho *et al.*, 2018), pastos (Yeates, 1984; Amaro Da Silva *et al.*, 2019), suelos con y sin lombrices (Yeates, 1981), suelos bajo manejo orgánico (Yeates *et al.*, 1997; Neher y Olson, 1999; Amaro Da Silva *et al.*, 2019), pastizales sobre turba (Wasilewska, 1999), pastizales y sitios de cultivo con suelos arcillosos (Saggar *et al.*, 2001), en la paja de cebada enterrada (Sohlenius y

Boström, 1984; Sohlenius y Sandor, 1989), en suelos con adición de metales pesados (Korthals *et al.*, 1996), en bosques después de una perturbación (Rong *et al.*, 2020), suelos calcáreos rojos (Gao *et al.*, 2021) y en un área de derrame accidental de cobre-cromo-arsénico (Yeates *et al.*, 1994). En todos estos estudios, el grupo más abundante que respondió a los disturbios del suelo fueron los bacterívoros de las familias Cephalobidae que incluyen a los géneros *Eucephalobus* y *Cephalobus* y la familia Rhabditidae que incluye al género *Rhabditis*. Los cuales fueron los géneros más abundantes que se encontraron en este estudio.

En contraste con los estudios anteriormente mencionados, se encuentran aquellos en los que se han realizado muestreos del suelo en áreas reforestadas y en áreas naturales. Un estudio de Yeates *et al.* (2000) que consistió en muestras de suelo tomadas de un suelo de piedra pómez en Nueva Zelanda después de veintidós años de plantar *Pinus radiata*, demostró que hubo una disminución en la proporción de nemátodos bacterívoros con el aumento de la densidad de árboles, sin embargo, dentro de esta proporción de nemátodos bacterívoros, el grupo taxonómico que más dominó fueron especies de la familia Cephalobidae.

En un estudio dentro de un matorral en regeneración el grupo más dominante fue el grupo Plectidae (incluye al género *Plectus*) (Yeates, 1996), también lo fue en un bosque danés de *Fagus* (Yeates, 1973). En un estudio de Yin *et al.* (2021) la liberación de árboles de cultivo (CTR: Croop Tree Release *por sus siglas en inglés*) tiene un efecto benéfico al cambiar la luz, el calor y el agua disponibles en el bosque, los resultados indicaron que la estructura comunitaria de los nemátodos del suelo se volvió más estable y madura después de usar esta técnica de silvicultura, ya que aumentaron los nemátodos depredadores y omnívoros en sus muestras de estudio.

Existe evidencia proporcionada por Yeates (2003) que sugiere que el aumento en la abundancia de bacterívoros, en particular de aquellos pertenecientes a la familia Cephalobidae, está determinada por distintos factores, entre los cuales destaca en primer lugar un evento de disturbio en el sistema del suelo, después se encuentran otros factores como la limitación de recursos, la disminución relativa de la porosidad del suelo y el aumento en el contenido de metales pesados en el suelo.

Los índices de perturbación obtenidos en el presente estudio (MI, PPI, 2-5, Σ MI) demostraron que el suelo del sitio de muestreo tiene una red trófica de baja madurez, es decir, se encuentran principalmente nemátodos colonizadores que sobreviven bajo condiciones desfavorables (cp-1 y cp-2), a diferencia de los nemátodos persistentes (como depredadores y omnívoros) que son más sensibles a los eventos de disturbio, que a su vez es un indicador de una red trófica pobre. Además, Sánchez-Moreno y Ferris (2018) sugieren que bajo estas condiciones el suelo tiene una alta sensibilidad al brote de plagas.

Los valores obtenidos de los índices ecológicos del suelo (CI, BI, EI, SI) apuntan que la principal vía de descomposición del sitio muestreado es bacteriana, con poca entrada del recurso de materia orgánica compleja y poca participación de mineralización de nutrientes por parte de los hongos edáficos, asimismo existe un bajo secuestro de carbono y en consecuencia una baja conversión de este elemento en moléculas más complejas. También esos valores son indicativos de que el suelo se encuentra moderadamente fertilizado y de que presenta un disturbio químico o físico (Sánchez y Ferris, 2018).

Por lo anterior, las recomendaciones que se proponen para la condición de un suelo con estas características, según Sánchez-Moreno y Ferris (2018) es que se reduzca el disturbio físico o químico, incrementando los recursos de materia orgánica en el suelo, para asegurar la entrada constante de flujos de carbono hacia los depredadores superiores (especialistas y generalistas), monitorear constantemente el estado de las plantas, y en caso de encontrar síntomas de infección por plagas de las familias de nemátodos Criconematidae, Pratylenchidae, Hoplolaimidae y Dolichodoridae se propone aplicar medidas de restauración ecológica. La gráfica de la huella metabólica (Figura 16) también demostró que el suelo tiene un enriquecimiento de bajo a moderado y que la red trófica se encuentra con una baja estructura, debido a que no están representados todos los grupos tróficos de nemátodos, encontrando en mayor proporción bacterívoros, fungívoros y herbívoros.

En un suelo estable y sano se ha encontrado que los valores altos del CI establecen el dominio de los hongos como la vía de descomposición de materia orgánica a través de diferentes tipos de suelo y regiones geográficas (Beare *et al.*, 1992; Young y Ritz, 2000). Estas vías de descomposición son lentas y paulatinas, mientras que, valores bajos de este

índice muestran una dominancia por bacterias como principal vía de descomposición, la cual es rápida (Sánchez-Moreno y Ferris, 2018).

Cuando los valores del EI son mayores que los valores de CI indican que la vía principal de descomposición en el suelo es bacteriana, asimismo bajo condiciones de disturbio se ha demostrado que algunos factores que favorecen esta vía son la presencia de organismos muertos o los cambios favorables en el medio ambiente (Odum, 1985) y por ello aumenta la actividad microbiana que mejora las condiciones para los nemátodos oportunistas que se alimentan de bacterias (Ferris *et al.*, 2001). En otro estudio realizado por Bardgett *et al.*, (2001) se demostró que en suelos muy pastoreados o en condiciones de disturbio, las comunidades microbianas del suelo toman el papel principal como vías de descomposición de energía, mientras que en los sistemas que son menos pastoreados y sin presencia de disturbio, los hongos son la principal vía de descomposición.

El análisis de la red trófica de nemátodos del suelo (Figura 14) indicó que la mayoría de las muestras se encuentran en una condición degradada, es decir, que la red trófica se ha visto disminuida debido al estrés y la baja disponibilidad de recursos, que son una consecuencia del disturbio o de contaminación reciente (Bongers, 1998; 2001). Es probable que esta condición del suelo se refleje en la comunidad de nemátodos, porque la fecha de muestreo fue el 11 de junio del 2018, es decir, a inicios de la temporada de lluvias en una región donde el clima predominante es semiseco templado BS1 w (W), dicho de otra manera, el sistema edáfico había estado bajo condiciones secas previo al inicio de las precipitaciones. Se ha demostrado en otros estudios, que la lluvia es un factor que aumenta la abundancia de la comunidad de nemátodos (Berkelmans *et al.*, 2003; Liang *et al.*, 2005; Navia, 2006).

En los resultados del análisis de componentes principales (PCA) los nemátodos bacterívoros se relacionaron parcialmente con el contenido hídrico del suelo (Figura 19) y se distribuyeron en la gráfica cerca de los sitios internos del árbol (Figura 20), lo que sugiere que son afines a las condiciones de humedad del suelo. Además, la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis apunta que hay una diferencia significativa ($p = 0.009$ con un $\alpha < 0.05$) entre los sitios internos y externos del árbol en cuanto al contenido hídrico. Ferris y Matute (2003) argumentan que la comunidad de nemátodos responde a cambios drásticos del clima, en específico los nemátodos bacterívoros aumentan su abundancia y

diversidad, ya que en los períodos secos éstos disminuyen. Ch et al. (2012) en su estudio en diferentes usos de suelo durante las épocas seca y de lluvias, mostraron evidencia de que los nemátodos bacterívoros abundaron en la época de lluvias al igual que los nemátodos fungívoros, pero los nemátodos depredadores y omnívoros disminuyeron su abundancia en época de lluvias, en especial los nemátodos depredadores redujeron en un 1.6% su abundancia, mientras que los nemátodos herbívoros no sufrieron ninguna afectación por la precipitación.

Los resultados de los índices ecológicos y de perturbación indicaron que el suelo del sitio muestreado, se encuentra moderadamente fertilizado, es decir, tiene la capacidad de sostener la vida de plantas y otros organismos; una posible causa de este resultado es por la presencia de leguminosas, en específico del “huizache chino” o “huizachillo” como se conoce comúnmente a los árboles de la especie *Vachellia schaffneri* (S. Watson) Seigler y Ebinger, ya que de acuerdo con Gantait et al. (2018) y con Santander-Martínez (2018) esta especie de árbol fija nitrógeno en el suelo y crece en condiciones de disturbio como parte de la vegetación secundaria de pastizales, nopaleras y entre los cultivos, además es reconocida por su capacidad de controlar la erosión del suelo, debido a que sus raíces crecen extendidas lateralmente y superficialmente. No existe evidencia de que la fijación de nitrógeno en el suelo por parte de esta especie de árbol explique la abundancia del grupo trófico de bacterívoros en el sistema edáfico, sin embargo, existen estudios (*e.g.*, Lokupitiya et al., 2000; Wei et al., 2012; Li et al., 2013) que demuestran que la adición de nitrógeno en grandes cantidades en el suelo ($< 80 \text{ Kg N ha}^{-1} \text{ Año}^{-1}$) suprimen a las comunidades de nemátodos edáficos, no obstante, no se conoce con seguridad los efectos que tiene este evento sobre los grupos tróficos de nemátodos del suelo. El estudio de Zhao et al. (2014) consistió en pruebas experimentales de adición de nitrógeno y fósforo en un bosque tropical secundario e informó que la adición de nitrógeno no tuvo efectos sobre las densidades de la comunidad de nemátodos edáficos y está de acuerdo con otros estudios que informaron que la adición de nitrógeno no afectó a los índices ecológicos (Cheng et al., 2008; Liang et al., 2009).

Algunos factores de disturbio del suelo, pueden ser la basura que se encontró a los alrededores del sitio de muestreo, así como colillas de cigarro y algunas pisadas de ganado

caprino. Asimismo, el muestreo se realizó a 21 metros del camino, sobre el cual circulan vehículos dirigidos a la parte recreativa del parque. También, la distancia de la entrada del parque hasta el sitio de muestreo fue de 449 m, lo cual hace posible que el tránsito de vehículos también sea un factor que contribuya a la perturbación de la comunidad de nemátodos de esta zona del parque, sin embargo, en este estudio no se cuentan con evidencias que demuestren que sean los factores principales de la condición del suelo en el momento que se realizó el muestreo.

La hipótesis de este estudio se comprobó al demostrar que, en un suelo con presencia de disturbio, se encontrarían en mayor proporción nemátodos de rápido crecimiento y estrategias *r*, pertenecientes a la clasificación cp-1 y cp-2 en la escala de colonizador-persistente y una baja abundancia de los nemátodos de bajo crecimiento, estrategias *K* y pertenecientes a la clasificación cp-3 a cp-5, que son reguladores de la red trófica edáfica. Una diversidad de estudios sustentan esta conjetura, ya que han evidenciado que la abundancia en nemátodos bacterívoros y estrategias *r* están asociados a las condiciones de disturbio edáfico (Sánchez-Moreno *et al.*, 2007; Darby *et al.*, 2013; Quist *et al.*, 2016; Zhao y Neher, 2014; Sánchez-Moreno *et al.*, 2015; Ettema y Bongers, 1993; Freckman y Ettema, 1993; Yeates y Bird, 1994; Yeates, 1984; Yeates, 1981; Yeates, 1997; Neher y Olson, 1999; Wasilewska, 1999; Saggar *et al.*, 2001; Sohlenius, 1989; Sohlenius y Boström, 1984; Yeates *et al.*, 1994).

Por otra parte, otros estudios comprueban que en ecosistemas con suelos estables existe una abundancia de nemátodos de las clasificaciones cp-3 a cp-5 en mayor proporción, es decir, se encontraban nemátodos depredadores y omnívoros principalmente, puesto que se asocian a condiciones con un bajo grado de disturbio, tales como sistemas de labranza reducida, cultivos perennes o sistemas naturales sin disturbio (Niles y Freckman, 1998; Yeates y Bongers, 1999; Yeates *et al.*, 2000; Li *et al.*, 2016; Bongiorno *et al.*, 2019; Yin *et al.*, 2021).

Algunas mejoras que se podrían realizar en este estudio para conocer a detalle la condición y las interacciones ecológicas de la comunidad de nemátodos, son realizar un muestreo durante dos épocas del año, es decir, durante la época de lluvias y de seca para verificar si los datos sobre abundancia de los grupos tróficos son constantes y así, determinar la

condición del suelo (Ch *et al.*, 2012). También, se podrían tomar mediciones del pH del suelo, la temperatura, salinidad y conductividad para conocer con detalle los parámetros que influyen en la comunidad de nemátodos del suelo (Zhao *et al.*, 2014).

Por otra parte, se pueden hacer muestreos en más zonas del parque, ampliando el área de estudio o realizar más análisis del suelo para contribuir a las mejoras que se podrían llevar a cabo, para mantener en buen estado de conservación el sitio natural. Otra mejora podría ser la identificación taxonómica de los nemátodos, a través de técnicas moleculares, que contribuyan a mejorar la clasificación de los mismos en los grupos tróficos y la clasificación de colonizador-persistente y de esta manera proveer un avance en la ecología del suelo para facilitar su identificación (Floyd *et al.*, 2002; Darby *et al.*, 2013; Sánchez-Moreno y Ferris, 2018).

Los estudios en ecosistemas terrestres usando la fauna de nemátodos del suelo como indicadores, no sólo se limita a ecosistemas naturales (Yeates, 1973; Resch *et al.*, 2019; Neher, 2010; Yin *et al.*, 2021), sino que también se han realizado investigaciones en tierras de cultivo (Neher, 2010; Li *et al.*, 2016; Lujan, 2018), en suelos con manejos orgánicos y convencionales, para determinar el estado del sistema edáfico y los posibles tratamientos aplicables para recuperar la capacidad del suelo de generar recursos alimenticios.

Otra aplicación de los nemátodos como indicadores de la calidad del suelo, es en el campo de la ecotoxicología debido a su sensibilidad a los metales pesados (Chauvin *et al.*, 2020). En un estudio reciente (Bell *et al.*, 2021) se realizó la identificación de nemátodos edáficos, por medio de la evaluación de códigos de barras moleculares centrados en pares específicos de cebadores de PCR, para identificar y caracterizar más fácilmente a estos organismos, debido a que es más tardado clasificarlos morfológicamente. Este estudio se realizó en un cultivo de bananas y su objetivo fue establecer un método para construir un expediente de bioseguridad ambiental, para que en el futuro se evaluara el impacto de los cultivos transgénicos y mejorar los sistemas de cultivo actuales (Bell *et al.*, 2021). Trett *et al.* (2009) propone a los nemátodos como indicadores de contaminación ambiental derivada de algunas industrias, su objetivo es que los actores involucrados se hagan responsables del daño ambiental que ocasionan, para que de esta forma remedien el impacto sobre los suelos.

El estudio del suelo en México es aún limitado, por lo que investigaciones como esta, contribuyen al conocimiento de nuestros suelos y a la descripción de los factores ambientales y antropogénicos que los afectan. El uso de los nemátodos para evaluar la condición del suelo puede ayudar a conocer las propiedades que lo caracterizan. Además, su aplicación en el campo de la ecología puede darnos una pauta de lo que sucede dentro de las redes tróficas edáficas; también nos permite evaluar las posibles estrategias de restauración aplicables para mejorar la calidad de nuestros suelos. Por lo que, este estudio contribuye a una parte del mar de conocimiento que aún nos falta por descubrir y como expone Charles E. Kellog (1938) “*Esencialmente, toda la vida depende del suelo... No puede haber vida sin el suelo y no hay suelo si no hay vida...*” (Citado por Orgiazzi *et al.*, 2016).

Caracterizar las comunidades de nemátodos del parque La Joya-Barreta, Querétaro para conocer el estado del suelo, puede ser un estudio a futuro que podría sentar las bases para elaborar planes de manejo y de restauración en el lugar, de esta forma se busca ayudar al ecosistema a regresar a su estado original (bosque de encino) paulatinamente, porque la restauración de un lugar dependerá del grado de disturbio que persista y en el estado sucesional ecológico en el que se encuentre (Lake, 2013).

CONCLUSIONES

1. La condición del suelo fue evaluada en el parque La Joya-Barreta en Querétaro y se determinó que, en la zona oeste del parque el suelo se encuentra disturbado por agentes físicos o químicos, lo cual se reflejó como perturbación de la comunidad de nemátodos al tener alta diversidad y abundancia de los grupos tróficos de bacterívoros y fungívoros, pertenecientes a la escala colonizador-persistente cp-1 y cp-2.
2. Se identificaron como principales géneros más abundantes en el suelo muestreado de la zona oeste del parque recreativo a *Eucephalobus* (bacterívoro), le siguen los géneros *Plectus* (bacterívoro), *Cephalobus* (bacterívoro), *Helicotylenchus* (herbívoro), *Rhabditis* (bacterívoro), *Filenchus* (fungívoro) y *Tylenchus* (herbívoro).
3. Los parámetros ecológicos de los nemátodos del suelo del parque recreativo fueron descritos como una red trófica inestable, en la que abundaron nemátodos bacterívoros y fungívoros, además la principal vía de descomposición de energía que entra a la red

trófica del suelo fue bacteriana, lo que indicó que el suelo de la zona oeste tiene un nivel que va de moderado a alto de enriquecimiento del suelo. También se determinó que uno de los factores que probablemente influyeron en la abundancia de los bacterívoros y fungívoros en las muestras del suelo, fue la precipitación porque el muestreo se realizó en la temporada de lluvias.

4. La huella metabólica de la comunidad de nemátodos estuvo influenciada por los nemátodos de enriquecimiento u oportunistas y tuvo una baja estructura trófica por la ausencia de nemátodos depredadores y omnívoros, por lo que se sugiere que se tomen medidas de restauración de suelo y adición de materia orgánica para reestablecer el papel principal de la vía de descomposición por hongos y así los nemátodos depredadores y omnívoros tengan más carbono disponible para su desarrollo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilar, I. D. (2016). Ácaros Mesostigmata de la hojarasca como bioindicadores en bosques. In PROCEEDINGS II CONGRESO LATINOAMERICANO DE ACAROLOGÍA (p. 28).
2. Amaro Da Silva, D., Da Silva, D., Tauli Bernardo, J., Bellé, C., Kuhn, P., Lanzaova, M. (2019). Soil attributes and edaphic nematofauna in pastures with pig slurry successive applications. *Rev. Caatinga*, 32(4), 867-876.
3. Ávalos, H. C., Sotelo, E., Domínguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S., y Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta ecológica*, (83), 5-71.
4. Bardgett, R. D., Jones, A. C., Jones, D. L., Kemmitt, S. J., Cook, R., y Hobbs, P. J. (2001). Soil microbial community patterns related to the history and intensity of grazing in sub-montane ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(12-13), 1653-1664.
5. Beare, M. H., Parmelee, R. W., Hendrix, P. F., Cheng, W., Coleman, D. C., y Crossley Jr, D. A. (1992). Microbial and faunal interactions and effects on litter nitrogen and decomposition in agroecosystems. *Ecological Monographs*, 62(4), 569-591.
6. Bell, C. A., Namaganda, J., Urwin, P. E., y Atkinson, H. J. (2021). Next-generation sequencing of the soil nematode community enables the sustainability of banana plantations to be monitored. *Applied Soil Ecology*, 166, 103999.
7. Berkelmans, R., Ferris, H., Tenuta, M., y Van Bruggen, A. H. C. (2003). Effects of long-term crop management on nematode trophic levels other than plant feeders disappear after 1 year of disruptive soil management. *Applied Soil Ecology*, 23(3), 223-235.
8. Bilgrami, A. L., y Gaugler, R. (2005). Feeding behaviour of the predatory nematodes *Laimydrus baldus* and *Discolaimus major* (Nematoda: Dorylaimida). *Nematology*, 7(1), 11-20.
9. Bilgrami, A., Gaugler, R., y Brey, C. (2005). Prey preference and feeding behaviour of the diplogastrid predator *Mononchoides gaugleri* (Nematoda: Diplogastrida). *Nematology*, 7(3), 333-342.
10. Bongers, T. (1990). The Maturity Index: An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia* 83:14-19

11. Bongers, T., Van der Meulen, H., y Korthals, G. (1997). Inverse relationship between the nematode maturity index and plant parasite index under enriched nutrient conditions. *Applied Soil Ecology*, 6(2), 195-199.
12. Bongers, T., y Bongers, M. (1998). Functional diversity of nematodes. *Applied soil ecology*, 10(3), 239-251.
13. Bongers, T., y Ferris, H. (1999). Nematode community structure as a biomonitor in environmental monitoring. *Trends in Ecology and Evolution*, 14:224-228.
14. Bongiorno, G., Bodenhausen, N., Bünemann, E. K., Brussaard, L., Geisen, S., Mäder, P., ... y De Goede, R. G. (2019). Reduced tillage, but not organic matter input, increased nematode diversity and food web stability in European long-term field experiments. *Molecular ecology*, 28(22), 4987-5005.
15. Castro, J. (2017). Papel de la fauna edáfica en el funcionamiento de los ecosistemas agrícolas (Tesis doctoral, Universidad de Vigo). Obtenida el 15 de julio del 2021 del sitio web:
http://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/bitstream/handle/11093/761/Papel_de_la_fauna_ed%C3%A1fica.pdf?sequence=1&isAllowed=y
16. Cerevkova, A., Renco, M., Cagan, N. (2011). Short-term effects of forest disturbances on soil nematode communities in European mountain spruce forests. *Journal of Helminthology*. pp. 1-10.
17. Ch, J. A., Navia, J., y Betancourth, C. (2012). Dinámica poblacional de nemátodos de vida libre en diferentes usos y manejos del suelo. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 29(2), 26-38.
18. Chauvin, C., Trambolho, M., Hedde, M., Makowski, D., Cérémonie, H., Jimenez, A., y Villenave, C. (2020). Soil Nematodes as Indicators of Heavy Metal Pollution: A Meta-Analysis. *Open Journal of Soil Science*, 10(12), 579-601.
19. Cheng, Z., Grewal, P. S., Stinner, B. R., Hurto, K. A., y Hamza, H. B. (2008). Effects of long-term turfgrass management practices on soil nematode community and nutrient pools. *Applied Soil Ecology*, 38(2), 174-184.
20. Chung, J. A., y Boeri, F. (2012). *Nematodes: Morphology, Functions and Management Strategies*. Nova Science Publishers, Inc.

21. Cobb, N. A. (1914). Nematodes and their relationships (pp. 457-490). US Government Printing Office.
22. Cobb, N. A. (1918). Estimating the nema population of soil, with special reference to the sugar-beet and root-gall nemas, *Heterodera schachtii* Schmidt and *Heterodera radicola* (Greef) Müller: and with a description of *Tylencholaimus aequalis* n. sp (Vol. 1). US Government Printing Office.
23. Colwell, R. K., y Coddington, J. A. (1994). Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 345(1311), 101-118.
24. Continho, R., Faleiro, A., Neto, J., Meneguci, P., y Freitas, G. (2018). Nematode communities as biological indicators of disturbance in agricultural systems. *Nematropica*, 48(2), 186-197.
25. Cruz, A. B., Barra, J. E., del Castillo, R. F., y Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Revista ecosistemas*, 13(2).
26. Darby, B. J., Neher, D. A., y Belnap, J. (2010). Impact of biological soil crusts and desert plants on soil microfaunal community composition. *Plant and soil*, 328(1-2), 421-431.
27. Darby, B. J., Todd, T. C., y Herman, M. A. (2013). High-throughput amplicon sequencing of rRNA genes requires a copy number correction to accurately reflect the effects of management practices on soil nematode community structure. *Molecular ecology*, 22(21), 5456-5471.
28. de la Peña, E. (2009). Efectos de la biota edáfica en las interacciones planta-insecto a nivel foliar. *Ecosistemas*, 18(2).
29. de Oca, A. N. M., García-Vázquez, U. O., Zúñiga-Vega, J. J., y Schmidt-Ballardo, W. (2013). A new species of *Xenosaurus* (Squamata: Xenosauridae) from the Sierra Gorda Biosphere Reserve of Querétaro, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84(2), 485-498.
30. Decaëns, T. 2010. Macroecological patterns in soil communities. *Global Ecology and Biogeography*. 19: 287-302.
31. Decaëns, T., Jiménez, J.J., Gioia, C., Measey, G.J., y Lavelle, P. (2006). The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology* 42: S23-S38.

32. Doménech, X. (1995). *Química del suelo: el impacto de los contaminantes* (No. 631.41 D668).
33. Escamilla Valdez, J., Díaz Guzmán, C., Arreaga Monge, K. (2017). Comunidades y grupos funcionales de nemátodos indicadores de la calidad del suelo en dos sistemas de manejo de cafetales en la zona oriental de El Salvador. Universidad del Salvador: Facultad de Ciencias Agronómicas. 38-40.
34. Ettema, C. H., y Bongers, T. (1993). Characterization of nematode colonization and succession in disturbed soil using the Maturity Index. *Biology and Fertility of Soils*, 16(2), 79-85.
35. FAO. (2015). Las amenazas a nuestros suelos. Obtenido el 27 de mayo del 2021 de la página web: <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/326259/>
36. Ferris, H. (2010a). Contribution of nematodes to the structure and function of the soil food web. *Journal of nematology*, 42(1), 63.
37. Ferris, H. (2010b). Form and function: metabolic footprints of nematodes in the soil food web. *European Journal of Soil Biology*, 46(2), 97-104.
38. Ferris, H. y Bongers, T. (2009). Indices developed specifically for analysis of nematode assemblages. *Nematodes as environmental indicators*, 124-145.
39. Ferris, H., Bongers, T., de Goede R.G.M. (2001). A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. *Applied Soil Ecology* 18:13-29.
40. Ferris, H., Venette, R. C., y Scow, K. M. (2004). Soil management to enhance bacterivore and fungivore nematode populations and their nitrogen mineralisation function. *Applied Soil Ecology*, 25(1), 19-35.
41. Ferris, H., y Matute, M. M. (2003). Structural and functional succession in the nematode fauna of a soil food web. *Applied Soil Ecology*, 23(2), 93-110.
42. Floyd, R., Abebe, E., Papert, A., y Blaxter, M. (2002). Molecular barcodes for soil nematode identification. *Molecular ecology*, 11(4), 839-850.
43. Fragoso, C., Castillo, P. R., y Rojas, P. (2001). La importancia de la biota edáfica en México. *Acta Zoológica Mexicana (nueva serie)*, (Es1), 1-10.

44. Franco-Navarro, F., y Godinez-Vidal, D. (2017). Soil nematodes associated with different land uses in the Los Tuxtlas Biosphere Reserve, Veracruz, Mexico. *Revista mexicana de biodiversidad*, 88(1), 136-145.
45. Freckman, D. W., Duncan, D. A., y Larson, J. R. (1979). Nematode density and biomass in an annual grassland ecosystem. *Journal of Range Management*, 32(6), 418-422.
46. Freckman, D. W., y Ettema, C. H. (1993). Assessing nematode communities in agroecosystems of varying human intervention. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 45(3-4), 239-261.
47. Gantait, S., Kundu, S., y Das, P. K. (2018). Acacia: An exclusive survey on in vitro propagation. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(2), 163-177.
48. Gao, D., Moreira-Grez, B., Wang, K., Zhang, W., Xiao, S., Wang, W., Chen, H., Zhao, J. (2021). Effects of ecosystem disturbance on nematode communities in calcareous and red soils: Comparison of taxonomic methods. *Soil Biology and Biochemistry*, 155, 1-10.
49. García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México.
50. Gitanjali, D. (2020). "Nematodes as environmental indicator". *International Journal of Current Research*, 12, (05), 11699-11705.
51. González, C., y Vallarino, A. (2014). Los bioindicadores ¿una alternativa real para la protección del medio ambiente. *Bioindicadores: guardianes de nuestro futuro ambiental*. San Cristóbal de Las Casas y México, DF, México: El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur) y Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).
52. Heemsbergen, D. A., Berg, M. P., Loreau, M., Van Hal, J. R., Faber, J. H., & Verhoef, H. A. (2004). Biodiversity effects on soil processes explained by interspecific functional dissimilarity. *Science*, 306(5698), 1019-1020.
53. Heink, U., y Kowarik, I. (2010). What are indicators? On the definition of indicators in ecology and environmental planning. *Ecological indicators*, 10(3), 584-593.
54. Hernández, A., Ascanio, M., Morales, M., Bojórquez, I., García, N., y García, D. (2008). *El suelo: Fundamentos sobre su formación, los cambios globales y su manejo*. Univ. Autónoma de Nayarit.

55. Herrera, F., y Cuevas, E. (2003). Artrópodos del suelo como bioindicadores de recuperación de sistemas perturbados. *Venezuelas*, 11(1-2), 67-78.
56. INEGI. (2007). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional Querétaro. Obtenido el 13 de diciembre del 2020 en el sitio web: https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/Edafologia_hist/1_250_000/702825235628.pdf
57. INEGI. (2020a). Climatología. Obtenido el 13 de diciembre del 2020 en el sitio web: <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>
58. INEGI. (2020b). Uso de suelo y vegetación. Obtenido el 13 de diciembre del 2020 en el sitio web: <https://www.inegi.org.mx/temas/ususuelo/>
59. INEGI. (2020c). Flora y fauna. Obtenido el 13 de diciembre del 2020 en el sitio web: http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/queret/territorio/recursos_naturales.aspx?tema=me&e=22
60. INEGI. (2020d). Fisiografía. Obtenido el 13 de diciembre del 2020 en el sitio web: <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/>
61. Jenny, H. (1994). *Factors of soil formation: a system of quantitative pedology*. Courier Corporation.
62. Kardol, P., Bezemer, T. M., van der Wal, A., y Van der Putten, W. H. (2005). Successional trajectories of soil nematode and plant communities in a chronosequence of ex-arable lands. *Biological Conservation*, 126(3), 317-327.
63. Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., y Schuman, G. E. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4-10.
64. Klekowski, R. Z., Wasilewska, L., y Paplinska, E. (1972). Oxygen consumption by soil-inhabiting nematodes. *Nematologica*, 18(3), 391-403.
65. Korthals, G. W., Bongers, T., Kammenga, J. E., Alexiev, A. D., y Lexmond, T. M. (1996). Long-term effects of copper and pH on the nematode community in an agroecosystem. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 15(6), 979-985.
66. Laakso, J., y Setälä, H. (1999). Sensitivity of primary production to changes in the architecture of belowground food webs. *Oikos*, 57-64.

67. Lake, P. S. (2013). Resistance, resilience and restoration. *Ecological management & restoration*, 14(1), 20-24.
68. Li, Q., Bai, H., Liang, W., Xia, J., Wan, S., y van der Putten, W. H. (2013). Nitrogen addition and warming independently influence the belowground micro-food web in a temperate steppe. *PloS one*, 8(3), e60441.
69. Li, X., Lewis, E. E., Liu, Q., Li, H., Bai, C., y Wang, Y. (2016). Effects of long-term continuous cropping on soil nematode community and soil condition associated with replant problem in strawberry habitat. *Scientific reports*, 6(1), 1-12.
70. Liang, W. J., Lavian, I., Pen-mouratov, S., y Steinberger, Y. (2005). Diversity and dynamics of soil free-living nematode populations in a mediterranean agroecosystem. *Pedosphere*, 15(2).
71. Liang, W., Lou, Y., Li, Q., Zhong, S., Zhang, X., y Wang, J. (2009). Nematode faunal response to long-term application of nitrogen fertilizer and organic manure in Northeast China. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(5), 883-890.
72. Lokupitiya, E., Stanton, N. L., Seville, R. S., y Snider, J. R. (2000). Effects of increased nitrogen deposition on soil nematodes in alpine tundra soils. *Pedobiologia*, 44(5), 591-608.
73. Loreau, M. (2004). Does functional redundancy exist?. *Oikos*, 104(3), 606-611.
74. Loreau, M., y Hector, A. (2001). Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature*, 412(6842), 72-76.
75. Lujan, R. (2018). Nematodes as soil quality indicators in coffee agroecosystems. *Cuadernos de Agroecología*, 13(1).
76. Martínez, P. A. (2016, May). Ácaros oribátidos en ambientes semiáridos de Argentina. Su potencial bioindicador. In *PROCEEDINGS II CONGRESO LATINOAMERICANO DE ACAROLOGÍA* (p. 31).
77. May, R. M. (1990). How many species? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 330(1257), 293-304.
78. Mejía-Madrid, H. H., y Sánchez-Moreno, S. (2022). Natural ecosystem heterogeneity diversity and functioning of nematode communities in a semi-desert ecosystem in Mexico. *Applied Soil Ecology*, 176, 104477.

79. Momo, F. R., Falco, L. B., y Craig, E. B. (2003). Las lombrices de tierra como indicadores del deterioro del suelo. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 8, 55-63.
80. Naturalista. (2021). Querétaro, MX. Obtenido el 29 de julio del 2021 del sitio web: naturalista.mx/places/67136
81. Navia, J. (2006). Impacto de aportes superficiales de biomasa vegetal de diferente calidad sobre poblaciones nativas de hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA), rizobios y nemátodos, en un suelo agrícola de Santander de Quilichao (Departamento del Cauca) (Doctoral dissertation, Tesis de doctorado en Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira).
82. Neher, D. A. (2010). Ecology of plant and free-living nematodes in natural and agricultural soil. *Annual review of phytopathology*, 48.
83. Neher, D. A., y Olson, R. K. (1999). Nematode communities in soils of four farm cropping management systems. *Pedobiologia*, 43(5), 430-438
84. Niles, R. K., y Freckman, D. W. (1998). From the ground up: nematode ecology in bioassessment and ecosystem health. *Plant and nematode interactions*, 36, 65-85.
85. Niño De Guzmán Tito, M. O. (2017). Nematodos edáficos indicadores de la calidad de suelos: pastizales, cultivo en limpio, cultivo permanente, forestal y de extracción; del valle de Uchumayo-Arequipa. Obtenido de: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/5649/AMSnidegumo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
86. Odum, E. P. (1985). Trends expected in stressed ecosystems. *Bioscience*, 35(7), 419-422.
87. Orgiazzi, A., Bardgett, R.D., Barrios, E., Behan-Pelletier, V., Briones, M.J.I., Chotte, J-L., De Deyn, G.B., Eggleton, P., Fierer, N., Fraser, T., Hedlund, K., Jeffery, S., Johnson, N.C., Jones, A., Kandeler, E., Kaneko, N., Lavelle, P., Lemanceau, P., Miko, L., Montanarella, L., Moreira, F.M.S., Ramirez, K.S., Scheu, S., Singh, B.K., Six, J., van der Putten, W.H., Wall, D.H. (Eds.). (2016). *Global Soil Biodiversity Atlas*. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 176 pp.
88. Paul, E. A. (2007). Soil microbiology, ecology, and biochemistry in perspective. In *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. Academic Press.

89. Pen-Mouratov, S., Rodriguez-Zaragoza, S., y Steinberger, Y. (2008). The effect of *Cercidium praecox* and *Prosopis laevigata* on vertical distribution of soil free-living nematode communities in the Tehuacán Desert, Mexico. *Ecological Research*, 23(6), 973-982
90. Pérez Brandán, C., Huidobro, J., Conforto, C., Arzeno, J. L., March, G., Meriles, J., y Gil, S. V. (2011). Impacto de los sistemas de labranza sobre indicadores biológicos de calidad de suelo. INTA Documentos.
91. Pla, L. (2006). Biodiversidad: Inferencia basada en el índice de Shannon y la riqueza. *Interciencia*, 31(8), 583-590. Recuperado en 23 de junio de 2021, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442006000800008&lng=es&tlng=es.
92. PROFEPA. (2016). Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Diario Oficial de la Federación. Obtenido el 27 de julio del 2021 del sitio web: <https://www.gob.mx/profepa/documentos/norma-oficial-mexicana-nom-147-semarnat-ssa1-2004>
93. Quist, C. W., Schrama, M., de Haan, J. J., Smant, G., Bakker, J., van der Putten, W. H., y Helder, J. (2016). Organic farming practices result in compositional shifts in nematode communities that exceed crop-related changes. *Applied Soil Ecology*, 98, 254-260.
94. Resch, M. C., Schütz, M., Graf, U., Wagenaar, R., van der Putten, W. H., y Risch, A. C. (2019). Does topsoil removal in grassland restoration benefit both soil nematode and plant communities?. *Journal of Applied Ecology*, 56(7), 1782-1793.
95. Rivera, G. B. (2018). Tesis de maestría: Propuesta de prácticas de conservación de suelos en ambientes semiáridos: caso microcuenca La Joya (Querétaro-Guanajuato). Obtenido el 13 de diciembre del 2020 del sitio web: <http://ring.uaq.mx/handle/123456789/752>
96. Rong, S. Xin-Juan, Z., Hai-Qing, W., Fa, Z., Xiao-Yan, Y. (2020). Succession of soil nematode-trapping fungi following fire disturbance in forest. *Journal of Forest Research*, 25(6), 1-6.
97. Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504.

98. Sagar, S., Yeates, G. W., y Shepherd, T. G. (2001). Cultivation effects on soil biological properties, microfauna and organic matter dynamics in Eutric Gleysol and Gleyic Luvisol soils in New Zealand. *Soil and Tillage Research*, 58(1-2), 55-68.
99. Sánchez, J. Á. (2001). Descomposición y ciclo de nutrientes en ecosistemas terrestres de México. *Acta Zoológica Mexicana (nueva serie)*, (Es1), 11-27.
100. Sánchez-Moreno, S., Castro, J., Alonso-Prados, E., Alonso-Prados, J. L., García-Baudín, J. M., Talavera, M., y Durán-Zuazo, V. H. (2015). Tillage and herbicide decrease soil biodiversity in olive orchards. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 691-700.
101. Sánchez-Moreno, S., Smukler, S., Ferris, H., O'Geen, A. T., y Jackson, L. E. (2008). Nematode diversity, food web condition, and chemical and physical properties in different soil habitats of an organic farm. *Biology and Fertility of Soils*, 44(5), 727-744.
102. Sánchez-Moreno, S., y Ferris, H. (2007). Suppressive service of the soil food web: effects of environmental management. *Agriculture, ecosystems & environment*, 119(1-2), 75-87.
103. Sánchez-Moreno, S., y Ferris, H. (2018). Nematode ecology and soil health. En: Sikora, R. a., Coyne, D., Hallmann, J., y Timper, P. (Eds.). *Plant-Parasitic Nematodes in Subtropical and Tropical Agriculture*. CAB International, Wallingford, 62-83.
104. Sánchez-Moreno, S., y Talavera, M. (2013). Los nemátodos como indicadores ambientales en agroecosistemas. *Revista Ecosistemas*, 22(1), 50-55.
105. Santander Martínez, I. R. (2018). Cuantificación de metabolitos secundarios y capacidad antioxidante en extractos de especies de Acacia (*Acacia schaffneri*, *laevigata* y *aculeaticarpa*). (Licenciada). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/2175>
106. Segueda, A. N., Correa, G. V., Blanco, J. L., y Gamino, M. D. L. R. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *Contacto S*, 80, 29-37.
107. SEMARNAT. (2008a). Indicadores básicos del desempeño ambiental. Obtenido el 27 de julio del 2021 dl sitio web: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores14/conjuntob/00_conjunto/introduccion.html

108. SEMARNAT. (2008b). Indicadores de presión. Obtenido el 27 de julio del 2021 dl sitio https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores14/conjuntob/03_suelos/03_suelos_presion.html web:
109. Shannon, C. E., y Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of information*. Urbana: University of Illinois Press, 97.
110. Sieriebriennikov, B., Ferris, H., y de Goede, R.G.M. (2014). "NINJA: An automated calculation system for nematode-based biological monitoring". *European Journal of Soil Biology*, 61: 90-93. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2014.02.004
111. Silva, C. R. y García, J. V. (2018). Suelos, el palpitar de la vida terrestre. *Universitarios potosinos*, 224, 12-17.
112. Simpson, E. H. (1949). Measurement of diversity. *Nature*, 163(4148), 688-688.
113. Socarrás, A. (2013). Mesofauna edáfica: indicador biológico de la calidad del suelo. *Pastos y Forrajes*, 36(1), 5-13.
114. Sohlenius, B., y Bostrom, S. (1984). Colonization, population development and metabolic activity of nematodes in buried barley straw. *Pedobiologia (Jena)*, 27(1), 67-78.
115. Sohlenius, B., y Sandor, A. (1989). Ploughing of a perennial grass ley-effect on the nematode fauna. *Pedobiologia (Jena)*, 33(4), 199-210.
116. Stork, N. E. (1988). Insect diversity: facts, fiction and speculation. *Biological journal of the Linnean Society*, 35(4), 321-337.
117. Sushchuk, A. A., y Matveeva, E. M. (2021). Soil nematodes of coniferous forests in the Finnish-Russian Friendship Nature Reserve. *Nature Conservation Research. Заповедная наука*, 6(S1), 76-88.
118. Swift, M. J., Heal, O. W., Anderson, J. M., y Anderson, J. M. (1979). *Decomposition in terrestrial ecosystems (Vol. 5)*. Univ of California Press.
119. Trett, M. W., Urbano, B. C., Forster, S. J., y Trett, S. P. (2009). Commercial aspects of the use of nematodes as bioindicators. *Nematodes as Environmental Indicators*. CABI Publishing, 275-314.
120. Uribe-Hernández, R., Juárez-Méndez, C. H., Montes de Oca, M. A., Palacios-Vargas, J. G., Cutz-Pool, L., y Mejía-Recarmier, B. E. (2010). Colémbolos (Hexapoda)

- como bioindicadores de la calidad de suelos contaminados con hidrocarburos en el sureste de México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 81(1), 153-162.
121. Varela-Benavides, I. (2014). Las comunidades de nemátodos como indicadores ambientales. *Revista Tecnología En Marcha*, 30-37.
 122. Wasilewska, L. (1999). Soil nematode response to root production in grasslands on fen peat soils. *Polish Journal of Ecology*, 47(3), 231-246.
 123. Wei, C., Zheng, H., Li, Q., Lü, X., Yu, Q., Zhang, H., ... y Han, X. (2012). Nitrogen addition regulates soil nematode community composition through ammonium suppression. *PloS one*, 7(8), e43384.
 124. Yeates, G. W. (1973). Nematoda of a Danish beech forest. II. Production estimates. *Oikos*, 179-185.
 125. Yeates, G. W. (1981). Soil nematode populations depressed in the presence of earthworms. *Pedobiologia*, 22(1), 191-195.
 126. Yeates, G. W. (1984). Variation in soil nematode diversity under pasture with soil and year. *Soil biology and biochemistry*, 16(2), 95-102.
 127. Yeates, G. W. (1996). Diversity of nematode faunae under three vegetation types on a pallic soil in Otago, New Zealand. *New Zealand journal of zoology*, 23(4), 401-407.
 128. Yeates, G. W. (2003). Nematodes as soil indicators: functional and biodiversity aspects. *Biology and Fertility of Soils*, 37(4), 199-210.
 129. Yeates, G. W., Bardgett, R. D., Cook, R., Hobbs, P. J., Bowling, P. J., y Potter, J. F. (1997). Faunal and microbial diversity in three Welsh grassland soils under conventional and organic management regimes. *Journal of Applied Ecology*, 453-470.
 130. Yeates, G. W., Bongers, T. D., De Goede, R. G. M., Freckman, D. W., y Georgieva, S. S. (1993). Feeding habits in soil nematode families and genera-an outline for soil ecologists. *Journal of nematology*, 25(3), 315.
 131. Yeates, G. W., Ferris, H., Moens, T., y Van der Putten, W. H. (2009). The role of nematodes in ecosystems. *Nematodes as Environmental Bioindicators*, 1-44.
 132. Yeates, G. W., Hawke, M. F., y Rijkse, W. C. (2000). Changes in soil fauna and soil conditions under *Pinus radiata* agroforestry regimes during a 25-year tree rotation. *Biology and Fertility of Soils*, 31(5), 391-406.

133. Yeates, G. W., Orchard, V. A., Speir, T. W., Hunt, J. L., y Hermans, M. C. C. (1994). Impact of pasture contamination by copper, chromium, arsenic timber preservative on soil biological activity. *Biology and Fertility of soils*, 18(3), 200-208.
134. Yeates, G. W., y Bird, A. F. (1994). Some observations on the influence of agricultural practices on the nematode faunae of some South Australian soils. *Fundamental and Applied Nematology*, 17(2), 133-145.
135. Yeates, G. W., y Bongers, T. (1999). Nematode diversity in agroecosystems. *Invertebrate biodiversity as bioindicators of sustainable landscapes*, 113-135.
136. Yeates, G. W., y Wardle, D. A. (1996). Nematodes as predators and prey: relationships to biological control and soil processes. *Pedobiologia*, 40(1), 43-50.
137. Yin, H., Su, Y., Li, X., Fan, C., Chen, G., Feng, M., ... y Wu, D. (2021). Crop tree release increased the density of soil nematodes and improved the food web structure. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(999), 1-10.
138. Young, I. M., y Ritz, K. (2000). Tillage, habitat space and function of soil microbes. *Soil and Tillage Research*, 53(3-4), 201-213.
139. Zar, J. H. (2013). *Biostatistical analysis*. India: Pearson.
140. Zhao, J., Wang, F., Li, J., Zou, B., Wang, X., Li, Z., y Fu, S. (2014). Effects of experimental nitrogen and/or phosphorus additions on soil nematode communities in a secondary tropical forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 75, 1-10.
141. Zhao, J., y Neher, D. A. (2014). Soil energy pathways of different ecosystems using nematode trophic group analysis: a meta analysis. *Nematology*, 16(4), 379-385.

ANEXO

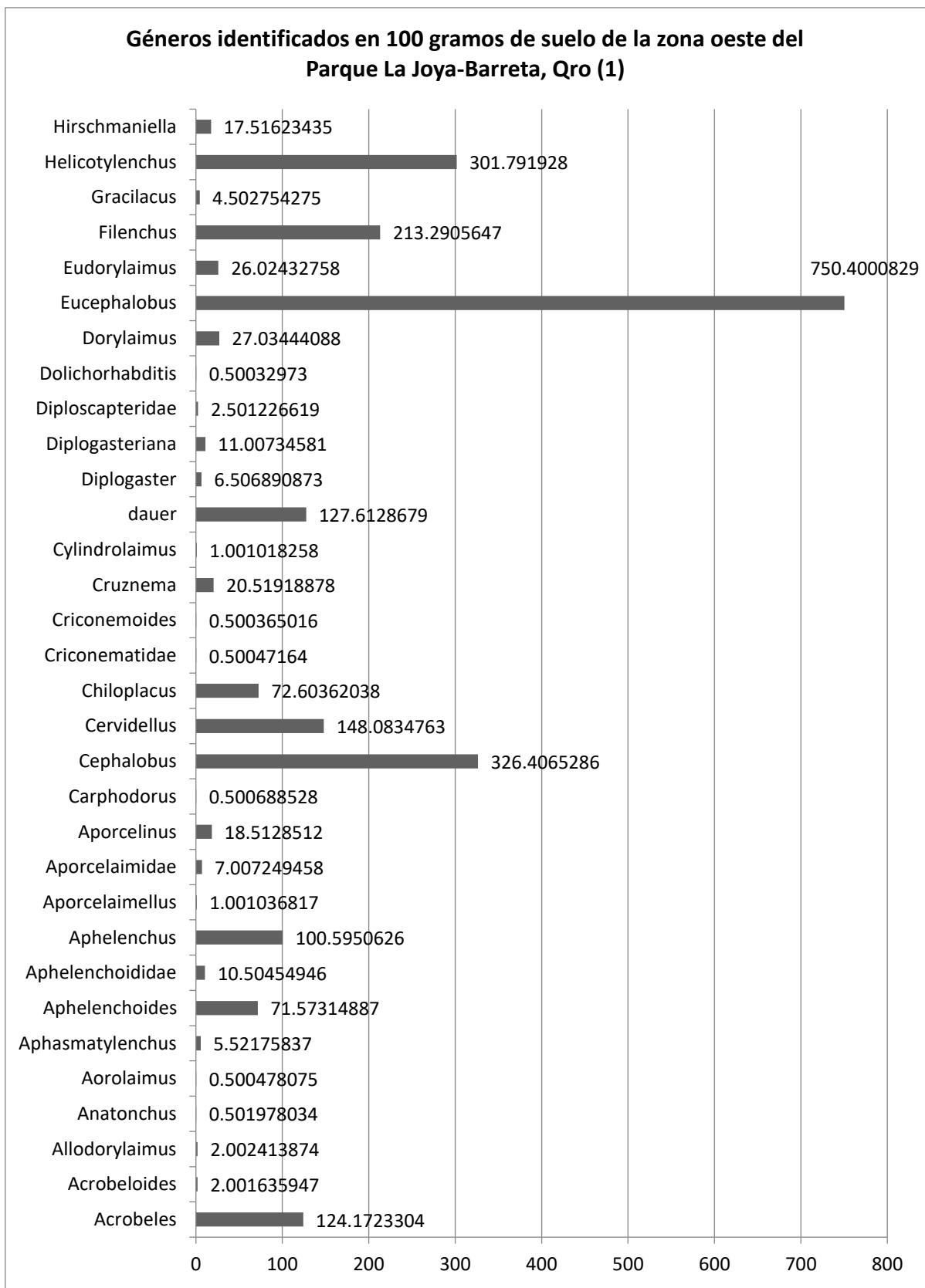


Figura 1A. Abundancias de géneros identificados en 100 gramos de suelo en la zona oeste del Parque La Joya-Barreta.

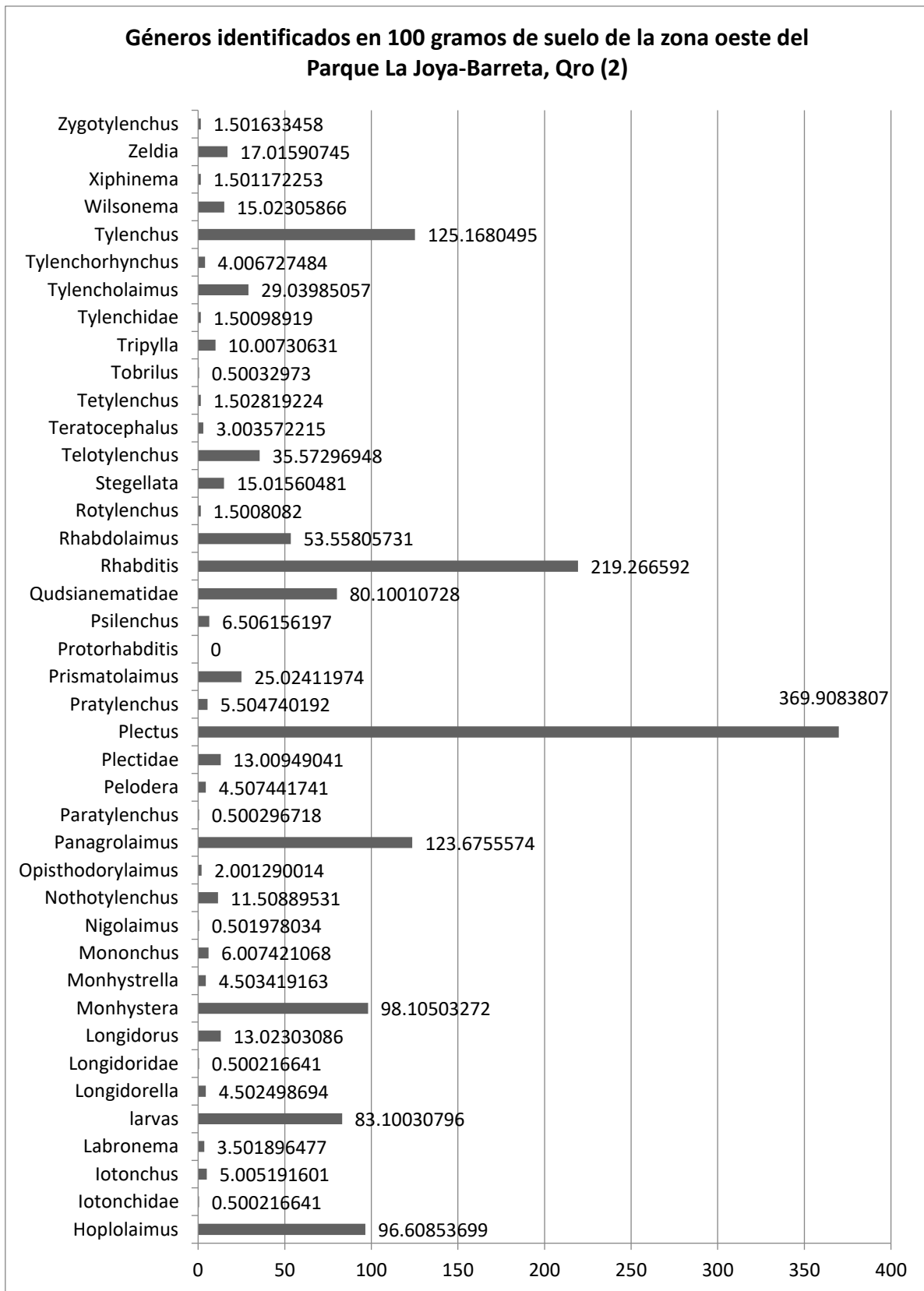


Figura 2A. Abundancias de géneros identificados en 100 gramos de suelo en la zona oeste del Parque La Joya-Barreta.

Tabla 1A. Abundancias de nemátodos por grupo trófico y las variables fisicoquímicas.

Sitio	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo
Árboles	1		2		3		4		5		6	
Muestras	Sitio interno 1	Sitio externo 1	Sitio interno 2	Sitio externo 2	Sitio interno 3	Sitio externo 3	Sitio interno 4	Sitio externo 4	Sitio interno 5	Sitio externo 5	Sitio interno 6	Sitio externo 6
Géneros	Abundancias											
Bacterívoros												
<i>Acrobeles</i>	0.33	0.00	1.50	0.17	7.17	0.67	1.33	0.83	5.85	4.17	4.51	14.85
<i>Acrobeloides</i>	0.50	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Cephalobus</i>	1.67	0.00	0.33	0.00	11.35	1.00	4.17	9.67	10.87	29.86	16.36	23.53
<i>Cervidellus</i>	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.17	0.17	48.86	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Chiloplacus</i>	1.84	0.33	1.67	0.00	4.51	0.00	0.00	0.00	0.17	4.67	10.52	0.50
<i>Cruznama</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	3.17	0.83	1.83
<i>Cylindrolaimus</i>	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Diplogaster</i>	2.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Diplogasteriana</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	1.67	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Diploscapteridae</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Dolichorhabditis</i>	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Eucephalobus</i>	11.51	3.00	13.67	0.17	27.20	5.67	17.02	1.17	21.40	77.39	42.07	29.87
<i>Monhystera</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	8.84	4.67	3.84	6.17	1.34	7.51
<i>Monhystrella</i>	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Panagrolaimus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.83	17.85	0.33	1.84	2.17	5.01	13.19
<i>Pelodera</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.83	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00
<i>Plectidae</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.34
<i>Plectus</i>	0.83	0.00	14.17	0.33	7.01	2.17	8.34	10.67	16.87	33.02	24.04	5.84
<i>Prismatolaimus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.17	4.84	1.17	1.84
<i>Protorhabditis</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Rhabditis</i>	2.34	0.00	2.17	0.00	3.67	0.50	10.68	4.00	4.01	21.18	20.20	4.34
<i>Rhabdolaimus</i>	0.83	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.17	5.84	1.84	4.67	1.34	2.67
<i>Stegelleta</i>	0.00	0.33	0.17	0.00	2.00	0.00	0.83	0.00	0.17	0.50	0.17	0.83
<i>Teratocephalus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.67	0.17	0.00	0.00	0.00
<i>Wilsonema</i>	0.17	0.00	0.00	0.00	0.33	0.17	0.17	1.17	0.50	0.00	1.50	1.00
<i>Zeldia</i>	4.00	0.17	0.67	0.00	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00
Totales	28.20	3.84	34.69	0.67	66.74	11.17	71.57	91.05	68.03	191.97	129.05	112.14

Continuación de la tabla 1A...

Árboles	1		2		3		4		5		6	
Muestras	Sitio interno 1	Sitio externo 1	Sitio interno 2	Sitio externo 2	Sitio interno 3	Sitio externo 3	Sitio interno 4	Sitio externo 4	Sitio interno 5	Sitio externo 5	Sitio interno 6	Sitio externo 6
Fungívoros	Abundancias											
<i>Aphelenchoides</i>	0.00	0.00	0.17	0.00	1.67	1.33	4.17	1.50	1.17	6.67	1.50	5.67
<i>Aphelenchoididae</i>	0.00	3.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Aphelenchus</i>	1.17	0.83	0.83	0.00	1.00	0.17	5.84	3.34	1.84	8.17	1.50	8.84
<i>Filenchus</i>	0.50	0.00	0.83	0.00	0.83	0.00	0.17	3.00	1.67	12.18	29.38	22.53
<i>Itonchidae</i>	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Nothotylenchus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	2.17	0.17	0.67	0.17	0.50
<i>Tylencholaimus</i>	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.33	0.17	1.34	7.51
Totales	1.83	4.50	1.83	0.00	3.50	1.50	10.34	10.17	5.18	27.85	33.89	45.05
Herbívoros												
<i>Allotylenchus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00
<i>Aorolaimus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Aphasmatylenchus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.84	0.00	0.00	0.00
<i>Carphodorus</i>	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Criconematidae</i>	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Criconemoides</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17
<i>Gracilacus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.33
<i>Helicotylenchus</i>	0.83	0.00	7.84	0.00	31.03	0.17	17.35	27.68	5.86	20.18	2.00	8.34
<i>Hirschmanniella</i>	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.17	0.83	0.50	0.00	2.00	0.67	0.33
<i>Hoplolaimus</i>	0.50	0.83	1.67	0.00	1.00	0.17	5.51	4.50	3.85	11.84	0.83	2.17
<i>Longidorella</i>	0.00	0.00	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Longidoridae</i>	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Longidorus</i>	0.33	0.00	0.33	0.17	0.00	0.17	0.00	0.17	1.50	0.00	0.50	1.17
<i>Paratylenchus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00
<i>Pratylenchus</i>	1.33	0.00	0.17	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00
<i>Psilenchus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	4.50	0.33	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00
<i>Rotylenchus</i>	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Telotylenchus</i>	0.33	0.00	0.00	0.00	3.50	0.00	0.33	0.33	4.18	2.67	2.00	0.83
<i>Tylenchidae</i>	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Tylenchorhynchus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	0.67	0.00	0.00	0.00
<i>Tylenchus</i>	0.00	0.17	0.00	0.00	4.50	0.00	3.34	2.17	4.85	15.51	1.84	12.35
<i>Xiphinema</i>	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17
<i>Zygotylenchus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00
Totales	5.01	1.50	12.01	0.17	47.05	1.33	27.36	37.02	24.09	52.37	7.85	25.86

Continuación de la tabla 1A...

Árboles	1		2		3		4		5		6	
	Sitio interno 1	Sitio externo 1	Sitio interno 2	Sitio externo 2	Sitio interno 3	Sitio externo 3	Sitio interno 4	Sitio externo 4	Sitio interno 5	Sitio externo 5	Sitio interno 6	Sitio externo 6
Muestras												
Géneros	Abundancias											
Omnívoros												
<i>Allodorylaimus</i>	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Aporcelaimellus</i>	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Aporcelaimidae</i>	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	0.00	0.50	0.00	0.83
<i>Aporcelinus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.17	0.00	0.00
<i>Dorylaimus</i>	0.33	0.00	1.33	0.00	0.00	0.17	0.33	0.67	0.67	1.83	0.67	3.01
<i>Eudorylaimus</i>	0.00	0.00	1.83	0.00	0.33	0.00	0.00	0.17	0.17	0.00	1.67	4.50
<i>Labronema</i>	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Opisthodorylaimus</i>	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00
<i>Qudsianematidae</i>	0.17	0.00	0.00	0.00	0.67	0.50	1.33	1.17	1.34	3.50	3.67	14.35
Totales	1.84	0.00	4.00	0.00	1.00	0.67	1.67	3.34	2.17	12.34	6.01	22.69
Depredadores	Abundancias											
<i>Anatonchus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00
<i>Iotonchus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	1.33	0.00	0.17
<i>Mononchus</i>	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.67	0.33	0.50	0.17	0.17
<i>Nygolaimus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00
<i>Tobrilus</i>	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Tripyla</i>	1.50	0.00	1.33	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Totales	1.67	0.00	1.33	0.17	0.50	0.00	0.00	0.67	0.84	1.83	0.17	0.33
Variables fisicoquímicas (covariables)												
Árboles	1		2		3		4		5		6	
	Sitio interno 1	Sitio externo 1	Sitio interno 2	Sitio externo 2	Sitio interno 3	Sitio externo 3	Sitio interno 4	Sitio externo 4	Sitio interno 5	Sitio externo 5	Sitio interno 6	Sitio externo 6
Muestras												
Contenido Hídrico (gH₂Og⁻¹)	0.07	0.05	0.07	0.04	0.10	0.06	0.13	0.07	0.13	0.05	0.10	0.07
Densidad aparente (gcm⁻³)	0.58	0.59	0.69	0.94	0.62	0.61	0.56	0.79	0.42	0.52	0.41	0.47
Carbono total	0.78	0.35	0.35	0.24	0.72	0.53	0.84	0.40	1.10	0.86	0.72	0.53
Nitrógeno total	11.25	5.01	4.87	4.02	9.75	7.99	12.22	8.72	16.44	12.46	10.89	7.83