



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ANÁLISIS DE LA COMUNIDAD DE MESO Y  
MACROFAUNA EDÁFICA EN *MYRTILLOCACTUS  
GEOMETRIZANS* (MART. EX PFEIFF) CON  
DISTINTOS TIPOS DE HERBIVORÍA EN UN  
MATORRAL XERÓFILO EN HUICHAPAN,  
HIDALGO, MÉXICO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**BIÓLOGO**

**P R E S E N T A:**

**LEONARDO JAVIER GARCÍA AYALA**



**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. FRANCISCO JAVIER ÁLVAREZ SÁNCHEZ**

**CO-DIRECTORA DE TESIS:  
DRA. MARGARITA OJEDA CARRASCO**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX., 2024**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. Javier Álvarez Sánchez, por la dedicación y el tiempo brindado al asesorar esta tesis, su buena disposición para enseñar, compartir conocimiento y adentrarme al estudio de la ecología del suelo.

A la Dra. Margarita Ojeda Carrasco, por su invaluable asesoría en esta tesis, por su apoyo incondicional, su buen consejo y por presentarme el mundo de los ácaros y otros habitantes del suelo.

Al Dr. José Palacios Vargas, por sus valiosos comentarios como sinodal a este escrito, y por permitirme aprender con él en su laboratorio, por la confianza y todo el apoyo que me ha brindado.

A la Dra. Alicia Callejas Chavero, quien además de ser sinodal de este trabajo, y mejorar con sus observaciones el escrito, junto con su familia me brindó todo el apoyo y facilidades en el trabajo en campo.

Al Dr. Johnattan Hernández Cumplido, un excelente profesor en mi formación, y ahora mi sinodal, cuyas acotaciones al escrito aportaron cuantiosamente al mismo.

A la Dra. Irene Sánchez, la Dra. Guadalupe Barajas, y el M. en C. Juan Carlos Peña, quienes además de ser grandes profesores no sólo en el taller sino en otras materias a lo largo de mi formación aportaron conocimientos valiosos y diversas enseñanzas.

A la Dra. Blanca Mejía Recamier y al M. en C. Ricardo Iglesias Mendoza, que compartieron su conocimiento en el montaje e identificación de los microartrópodos conmigo, además de mostrar siempre una gran vocación por enseñar.

A la M. en C. Angela Arango, la M. en C. Maira Montejó y el Biól. Jair Páez, por permitirme aprender de ellos desde que llegué al LESM, su buen recibimiento en este y sus consejos.

A Maricarmen Ayala y Javier García León, por ser unos excelentes padres, a los que admiro y quiénes son responsables de mis logros.

A Javier García Lucatero, Isabel León; Lourdes, Alhelí y Vianey García; Monserrat Reséndiz; Santiago, Ximena, Hannia y Nestor Paredes, por formar una familia que es mi sostén, llena de apoyo y amor.

A las valiosas amistades que conocí o reforcé gracias a la biología, que siempre han estado para apoyarme, y a los que admiro: Caro Jiménez, Ana Betanzos, Karen Claro, Zaira Rosales, Alan Hernández, Tania Arroyo, Nadia López, y Genaro Ortíz.

A Brasil Baltazar, Eduardo Juárez y Zefe Diego, admirables personas que siempre me han brindado su apoyo, comprensión y cariño.

A la Facultad de Ciencias y la UNAM, por el aprendizaje, el conocimiento y la oportunidad de coincidir con personas extraordinarias.

**A mi familia, este logro también les pertenece**

**A los biólogos de este país**

**A la memoria de Martha Pérez Soria**

## CONTENIDO

RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	2
1.1. La fauna del suelo .....	2
1.2. Clasificación de la fauna del suelo.....	3
1.3. Importancia de la fauna del suelo. ....	4
1.4. Fauna del suelo en sistemas áridos y semiáridos.....	5
1.5. El matorral xerófilo en Huichapan, Hidalgo. ....	7
1.6. El garambullo ( <i>Myrtillocactus geometrizans</i> ).....	8
1.7. Herbivoría en <i>M. geometrizans</i> .....	8
1.8. Efecto de la herbivoría sobre <i>M. geometrizans</i> .....	10
1.9. Interacciones sobre y debajo del suelo.....	11
2. ANTECEDENTES .....	12
3. JUSTIFICACIÓN.....	14
4. OBJETIVOS.....	14
4.1. General .....	14
4.2. Particulares .....	14
5. HIPÓTESIS.....	14
6. MÉTODO .....	15
6.1. Zona de estudio.....	15
6.2. Especie de estudio .....	16
6.3. Método de Muestreo.....	17
6.4. Análisis Estadísticos.....	20
7. RESULTADOS.....	21
7.1. Riqueza y abundancia de la meso y macrofauna del suelo.....	21
7.2. Composición y diversidad de los artrópodos edáficos.....	28
7.3. Otros factores que afectan la herbivoría en el garambullo. ....	31
8. DISCUSIÓN.....	33
8.1. Riqueza y abundancia de la meso y macrofauna del suelo.....	33
8.2. Composición y diversidad de los artrópodos edáficos.....	38
8.3. Otros factores que afectan la herbivoría en el garambullo .....	39
9. CONCLUSIONES .....	40
10. LITERATURA CONSULTADA.....	42
11. ANEXOS.....	54

## RESUMEN

La fauna edáfica desempeña diferentes funciones en los procesos del suelo, participando en la descomposición de la materia orgánica, formación de humus y el ciclo de nutrientes, también repercute en características del suelo como la porosidad y fertilidad. Asimismo, la fauna del suelo participa en las interacciones que ocurren sobre y debajo del suelo, las cuales son mediadas por las plantas, por ejemplo, a través de las fuerzas ascendentes y descendentes. A pesar de abarcar la mayor parte del territorio nacional, los sistemas áridos y semiáridos han sido poco estudiados, lo que también se ve reflejado en el estudio de los artrópodos del suelo; el presente estudio se centra en el matorral xerófilo de Huichapan, Hidalgo, en el cual se presentan garambullales, en este sitio, los garambullos presentan distintas asociaciones con herbívoros, provocando daños diferenciales en la planta. El objetivo de este estudio es determinar la composición y diversidad de la comunidad de meso y macrofauna del suelo asociada a *Myrtillocactus geometrizans* con distintos tipos de herbivoría, se espera que en los garambullos con la presencia de *T. martinezae*, el fitófago que causa más daño la abundancia sea mayor, pero la diversidad menor. Para ello, se identificaron cuatro condiciones de herbivoría, de cada una de ellas se seleccionaron cuatro individuos, y de cada uno se tomaron tres muestras de suelo, con un volumen de aproximadamente 540 cm<sup>3</sup>, se tomaron datos de cobertura del garambullo, así como variables microambientales como temperatura y humedad del suelo y aire; las muestras de suelo fueron procesadas en embudos de Berlese-Tullgren, posteriormente cuantificadas, y se elaboraron preparaciones semipermanentes con líquido de Hoyer para su identificación taxonómica. Los artrópodos edáficos encontrados incluyen un nuevo registro a nivel orden, 22 de familia y 37 géneros para el estado de Hidalgo. Se encontró que los garambullos con un mayor daño presentan una mayor abundancia de artrópodos edáficos, mismo que podría ser atribuible a un mayor aporte de materia orgánica al suelo, consecuencia del daño causado por la herbivoría a través de la caída de ramas. Por otro lado, la diversidad resultó mayor en aquellos garambullos con menor daño, lo que podría ser consecuencia de una mejor calidad de materia orgánica proveniente de organismos sin fitófagos, que favorece una red trófica más compleja, adicionalmente, esta diversidad de los artrópodos del suelo podría mejorar la capacidad de defensa de las plantas, por ejemplo, a través de la formación de canales en el suelo y un mejor acceso a los nutrientes. En el matorral xerófilo de Huichapan, Hidalgo, la abundancia y diversidad de la comunidad de artrópodos edáficos actúa de forma diferencial en función de la interacción del garambullo con los fitófagos, además, algunos factores microclimáticos demostraron estar relacionados con el fitófago que se establecía en el garambullo.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. La fauna del suelo

El suelo es un sistema abierto, formado por materia orgánica, mineral y organo-mineral, en el cual interactúan factores físicos, químicos y biológicos; se localiza en la superficie de la Tierra, y presenta una biota característica que influye en la formación, propiedades y procesos del suelo (Gerrard, 2000; Lavelle y Spain, 2005). En la composición de un suelo en general, la fracción mineral abarca el 45%, mientras que la materia orgánica el 5%, el restante es representado por los poros del suelo, ocupado en partes iguales por agua y aire (Kalev y Toor, 2017), aunque esto puede variar de acuerdo con factores como la estructura, la humedad, y en general con el tipo de suelo (FAO, 2009). Dentro de los factores formadores del suelo se incluyen al clima, topografía, material parental, el tiempo y a la biota del suelo, esta última incluye los efectos tróficos y los no tróficos de todos los seres vivos en el suelo, ya sea directamente o a través de los productos de su metabolismo y descomposición (Jenny, 1941; Lavelle y Spain, 2005).

En el suelo, se ha documentado ampliamente la participación de la fauna edáfica en los procesos de éste, dentro del cual juegan un rol fundamental en la descomposición de la materia orgánica, la formación del humus y en el ciclo de nutrientes como Nitrógeno, Fósforo y Carbono. Así mismo la fauna influye en la porosidad del suelo, la infiltración del agua y la distribución de materia orgánica (Menta, 2012).

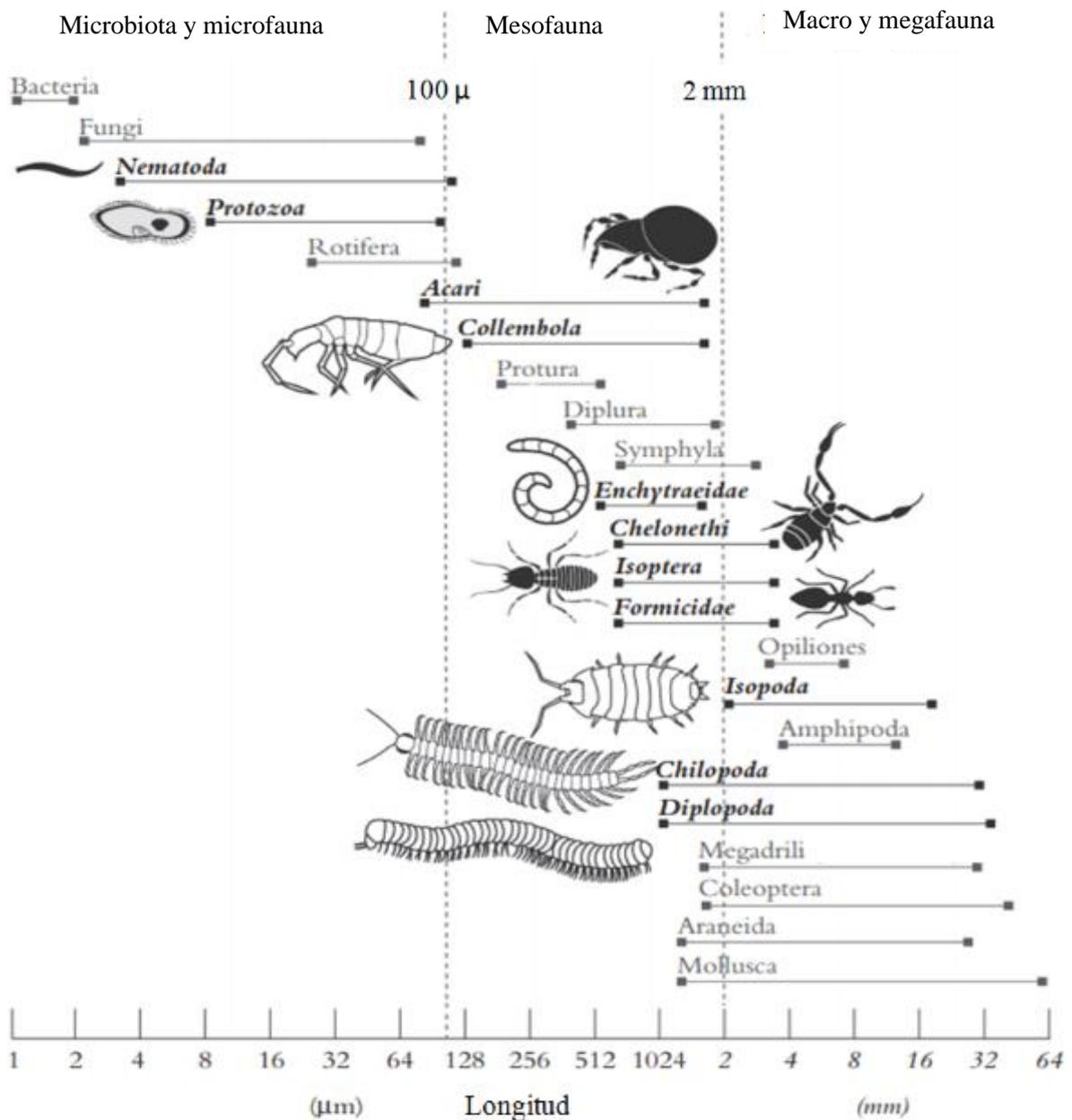
La fauna del suelo influye en la fertilidad del suelo; de acuerdo con Lavelle *et al.* (1992), se puede entender en sus dos componentes principales:

1. El suministro de nutrientes para las plantas, en el cual la fauna influye en la descomposición de la materia orgánica, y que junto con la capacidad del suelo para intercambiar cationes representan los procesos clave para este componente.

2. La estructura física del suelo, la cual está relacionada con el espacio que hay entre los agregados de suelo, y por lo tanto determina la cantidad de agua y aire que podrá estar contenida en los poros, donde algunos grupos de la fauna edáfica como Formicidae y Lumbricidae tienen influencia al moverse y formar galerías a través de él.

## 1.2. Clasificación de la fauna del suelo

La fauna del suelo se ha clasificado con base en su tamaño en tres grupos: microfauna, mesofauna y macrofauna (Swift *et al.*, 1979). La microfauna comprende organismos con un tamaño menor a 100 micras, como nematodos y rotíferos; la mesofauna abarca un rango de tamaño que va desde 100 micras hasta dos milímetros, y en él se incluyen a los ácaros, colémbolos, proturos y dipluros; por último, la macrofauna incluye a los organismos con un tamaño mayor a 2 milímetros, en el que se encuentran el resto de los artrópodos, así como las lombrices (Fig. 1)



**Figura 1.** Clasificación de la fauna del suelo con base en su tamaño. Modificado de Nielsen (2019).

Además de la clasificación anterior, la fauna edáfica también se ha agrupado con base en algunos atributos ecológicos y de forma de vida; por ejemplo, la dependencia del agua divide a la fauna en dos tipos de organismos: los hidrobiontes y los higrobiontes, los primeros son organismos acuáticos que viven en el agua del suelo, mientras que los higrobiontes tienen un sistema de respiración aéreo, sin embargo, son dependientes del agua disponible y alta humedad (Tabla 1) (Lavelle y Spain, 2005).

**Tabla 1.** Diferentes clasificaciones ecológicas para la fauna del suelo, se muestran los grupos correspondientes a la meso y macrofauna. Modificado de Lavelle y Spain (2005).

<b>Grupo Funcional</b>	Mesofauna (0.2-10 mm)	Macrofauna (> 10mm)
<b>Taxa</b>	Microartrópodos (Collembola, Acari)	Termitas, miriápodos, hormigas, etc.
<b>Dependencia de agua</b>	Higrobionte	Higrobionte
<b>Interacción con microbiota</b>	Depredación, dispersión, asociaciones en tracto digestivo.	Depredación, dispersión, asociaciones en tracto digestivo.
<b>Capacidad de cambiar su medio físico</b>	Limitada (Pellets fecales)	Alta (Galerías, madrigueras, formación de agregados)
<b>Resistencia al estrés ambiental</b>	Intermedia	Baja (Puede haber compensación conductual)

### 1.3. Importancia de la fauna del suelo.

de interacciones complejas entre sí, que en conjunto conforman la dinámica del suelo. Dentro de los seres vivos que se encuentran en el suelo, la fauna edáfica está representada por tardígrados, rotíferos, nematodos, anélidos (lombrices y enquitreidos), artrópodos (ácaros, colémbolos, miriápodos, isópodos, hormigas y termitas) y mamíferos que construyen sus madrigueras en el suelo (Orgiazzi *et al.*, 2016). La fauna edáfica juega un rol muy importante,

actuando como depredadores de la biota microbiana (principalmente hongos y bacterias) regulando sus poblaciones; también son fragmentadores del mantillo, incrementando la superficie para que los microorganismos actúen en la descomposición de ésta, asimismo humidifican la materia orgánica al pasar por sus tractos digestivos, donde algunos grupos, como las lombrices cuentan con asociaciones con microorganismos que facilitan su degradación, además debido a su movimiento en el suelo, favorecen la formación del espacio poroso. En el caso de algunos artrópodos, como los ácaros, transportan esporas de hongos en su cuerpo, dispersándolos por el suelo; de igual modo mezclan la fracción mineral del suelo con la materia orgánica incorporándola al sistema, por último, los ingenieros del ecosistema como lombrices, termitas y hormigas modifican la estructura del suelo, por ejemplo, con la formación de agregados (Lavelle y Spain, 2005).

Fenton (1947) puntualiza sobre la importancia y participación de la fauna en los procesos del suelo, mencionando las principales funciones de algunos grupos como Gasteropoda, Lumbricidae y Arthropoda que son fragmentadores del mantillo. Por otro lado, grupos particulares de ácaros, colémbolos y dípteros tienen la capacidad de realizar túneles entre las hojas y raíces muertas, facilitando su descomposición; también menciona a los depredadores (Chilopoda, Araneae, Staphylinidae) que junto con los ingenieros del ecosistema (Lumbricidae, Formicidae e Isoptera) contribuyen a amalgamar la materia orgánica y mineral, además de influir en la porosidad del suelo. Por último, se considera que los grupos que se alimentan de las bacterias, hongos y material parcialmente degradado, tales como los ácaros, colémbolos, enquitreidos y nematodos tienen un papel fundamental al actuar como fragmentadores de la materia orgánica.

#### **1.4. Fauna del suelo en sistemas áridos y semiáridos.**

Dentro de los sistemas áridos y semiáridos, podemos encontrar taxa representativos; un taxón que destaca por su gran abundancia son las termitas, que representan una fracción importante de la biomasa de la fauna del suelo. Asimismo, se pueden encontrar nematodos, destacando los bacteriófagos. Los microartrópodos representan un grupo diverso y abundante, reportándose la presencia de Collembola y Psocoptera durante ciertas épocas del año, cuando el suelo se encuentra húmedo; sin embargo, los microartrópodos están principalmente representados por los ácaros, con algunas familias características como Nanorchestidae, Tydeidae, Pyemotidae, Tarsonemidae y Bdellidae (Whitford y Parker, 1989).

En estos ecosistemas, se ha estudiado la importancia de la fauna del suelo, donde los organismos han sido reconocidos como reguladores de las poblaciones de microorganismos,

influyendo así indirectamente en la tasa de descomposición de la materia orgánica y la mineralización e inmovilización de los nutrientes (Whitford y Parker, 1989).

Por ejemplo, en el desierto Chihuahuense, los ácaros micófagos son los principales responsables de la disponibilidad del nitrógeno inmovilizado en la biomasa fúngica al alimentarse de ésta (Parker *et al.*, 1984). Por otro lado, los ácaros de la familia Tydeidae se han identificado como grupo clave en las primeras etapas de descomposición, al controlar la población de nematodos bacteriófagos, disminuyendo el número de bacterias consumidas, que afectan directamente la tasa de descomposición de la materia orgánica (Whitford, 1996).

Whitford y Parker (1989) señalan que los sistemas áridos y semiáridos son los más propensos a la desertificación, lo cual implica la degradación de la vegetación y del suelo; a pesar de ello, la mayoría de los trabajos se ha concentrado únicamente en la vegetación, por lo que es necesario considerar el sistema completo, para así entender las contribuciones de la biota del suelo en la estabilidad del ecosistema, y de este modo, proponer estrategias que permitan mitigar o evitar los procesos de desertificación.

Varios estudios se han centrado en la diversidad de microartrópodos, encontrando que pueden ser muy diversos, como lo observado por Santos *et al.* (1978) en una cuenca del desierto Chihuahuense en Nuevo México, donde *Larrea tridentata* es la especie dominante se encontró a 114 especies de microartrópodos, de las cuales sólo 28 representaban el 85% de la abundancia total. Cepeda y Whitford (1990) en el mismo sitio de estudio reportan que la composición de la comunidad de microartrópodos depende principalmente de la presencia y cantidad de mantillo en el suelo, así como de sus características físicas y químicas.

En cuanto a la influencia de la macrofauna, se ha reportado que las hormigas y termitas aumentan la porosidad del suelo y la infiltración, además de alterar la concentración y distribución de los nutrientes del suelo; por ejemplo, se ha observado que alrededor de algunos hormigueros, se incrementa la cantidad de nutrientes (Whitford, 1996).

Del mismo modo, se ha observado que en ambientes xerófilos los artrópodos no se encuentran distribuidos homogéneamente, sino que están asociados a características particulares como la cubierta vegetal, propiedades del suelo y las comunidades bióticas sobre y debajo del suelo, representando "islas de artrópodos" (Liu *et al.*, 2016a), efecto que puede verse incrementado debido a factores estacionales, y de forma directa aumentando el efecto de la vegetación sobre la distribución de algunos grupos particulares (Liu *et al.*, 2016b; Liu y Steinberger, 2017).

Al estudiar los factores ambientales que influyen en los artrópodos del suelo, Chikoski *et al.* (2006) demostraron que la adición de agua en un bosque de *Populus tremuloides* al suelo aumenta la abundancia de algunos grupos de artrópodos, en particular Acari y Collembola, los cuales representan una parte muy significativa de los artrópodos del suelo, lo que apoya la idea de que las comunidades de artrópodos en ambientes áridos y semiáridos son dependientes del agua.

Así mismo, algunas otras propiedades del suelo como el pH, la relación C/N, humedad del suelo y textura del suelo influyen en la composición y abundancia de la comunidad de microartrópodos del suelo (Noble *et al.*, 1996; Chikoski *et al.*, 2006).

### **1.5. El matorral xerófilo en Huichapan, Hidalgo.**

El matorral xerófilo del estado de Hidalgo forma parte del desierto Chihuahuense, el cual incluye varias zonas áridas y semiáridas de valles intermontanos y cañones localizados en la Sierra Madre Oriental, así como algunos valles y depresiones aislados geográfica y climáticamente ubicados en lo que se conoce como la zona árida Queretana-Hidalguense, en donde se encuentra el matorral xerófilo de Huichapan (Hernández y Gómez-Hinostrosa, 2005).

De acuerdo a Henrickson y Johnston (1986) en el desierto Chihuahuense se pueden encontrar ocho asociaciones vegetales del matorral xerófilo: matorral desierto micrófilo, lechuguillal, izotal, mezquital, matorral halofítico, matorral gipsófilo, bosque ripario y matorral crasicaule; este último representa alrededor del 1% de la superficie del desierto Chihuahuense y en él se encuentran las siguientes especies vegetales: *Myrtillocactus geometrizans*, *Stenocereus pruinosus*, *Prosopis laevigata*, *Acacia constricta*, *Yucca filifera*, *Mimosa spp.*, *Gymnosperma glutinosum*, *Jatropha dioica*, *Opuntia streptacantha*, *O. leucotricha*, *O. microdasys*, y varias especies de *Agave*.

Específicamente, del matorral crasicaule existen algunas regiones en los estados de San Luis Potosí, Guanajuato e Hidalgo dominadas por *Myrtillocactus geometrizans*, que son denominadas garambullales, las cuales son comunidades vegetales con presencia del garambullo y otras cactáceas, además de elementos de la selva baja caducifolia, y que se encuentran entre los 1,800 y 2,100 m s.n.m. (López-Galindo *et al.*, 2003; Jiménez, 2011).

## 1.6. El garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*)

En los garambullales, *Myrtillocactus geometrizans* representa una especie clave, forma parte del estrato arbustivo o arborescente (son plantas con tallos que van desde los dos hasta los siete metros de altura), funcionan como nodriza, proporcionando condiciones microclimáticas más favorables para el establecimiento de otras plantas y sirviendo como refugio, sitio de alimentación y apareamiento de algunos animales (Arias *et al.*, 2012; Martínez-Hernández y Callejas-Chavero, 2015).

Se ha reportado en estudios realizados en zonas áridas y semiáridas que las plantas que conforman la cobertura vegetal juegan un papel importante al actuar como elementos clave que favorecen una gran heterogeneidad de microhábitats específicamente para los artrópodos (Liu *et al.*, 2015, 2016b; Meloni *et al.*, 2020), además de proveer condiciones abióticas diferentes a las de zonas abiertas, como una menor temperatura del suelo, mayor contenido de agua, de carbono y nitrógeno en el suelo, resultando en una mayor riqueza y abundancia de la comunidad de artrópodos que habitan bajo esta cobertura vegetal (Liu *et al.*, 2011).

Algunos autores como Sánchez y Parmenter (2002) han propuesto estudiar los ambientes áridos y semiáridos considerando la teoría de biogeografía de islas (MacArthur y Wilson, 1963), donde algunas especies vegetales representan una “isla” para aquellas especies estrechamente relacionadas con ellas, como el caso de los herbívoros especialistas, sus depredadores y los detritívoros asociados con la calidad de materia orgánica; además, se ha demostrado que la heterogeneidad ambiental generada por estas especies vegetales influye en la tasa de descomposición de la materia orgánica desacelerándola en comparación con aquella en “suelo desnudo” (Arriaga y Maya, 2007), es por ello que en el matorral xerófilo de Huichapan, las poblaciones de garambullos podrían representar una “isla” para la fauna edáfica.

## 1.7. Herbivoría en *M. geometrizans*

En la parte aérea del garambullo, se han reportado diversas interacciones con artrópodos, como la herbivoría, depredación de los frutos, refugio, sitio de apareamiento y de captura de presas (Sanjuan-Trejo *et al.* 2021).

En el caso particular de Huichapan, se han descrito múltiples interacciones que se establecen ente diferentes especies de insectos con el garambullo, una de ellas es la

herbivoría producida por dos especies de fitófagos (*Toumeyella martinezae* y *Opuntiaspis philococcus*) (Martínez-Hernández, 2015, 2017).

Además, se ha demostrado la competencia por el espacio entre ambas escamas, con *O. philococcus* siendo mayormente afectada por la presencia de su competidor, cuando ambas compiten, esta presenta un decremento del 77% en su población, frente a un 28% de *T. martinezae*; esta ventaja competitiva, se debe en buena parte a que *T. martinezae* establece una relación mutualista con la hormiga escamolera *Liometopum apiculatum*, ya que sin la presencia de la hormiga, su abundancia decrece en un 80%, mientras que la de *O. philococcus* aumenta en un 13% (Callejas-Chavero *et al.*, 2020).

El mutualismo de *L. apiculatum*, también reduce la tasa de parasitoidismo en *T. martinezae*, de un 32% a 17% (Callejas-Chavero *et al.*, 2020). Entre los parasitoides identificados que parasitan a *T. martinezae* se encuentran *Mexidalgus toumeyellus* (Hymenoptera: Aphelinidae), *Coccophagus ruizi* (Hymenoptera: Aphelinidae) y *Metaphycus* sp. (Hymenoptera: Encyrtidae) (Martínez-Hernández, 2015) y de los que parasitan a *O. philococcus* están *Signiphora* sp., *Ablerus bajacalifornicus*, *Encarsia* sp. y *Plagiomerus diaspidis* (Islas Estrada, 2021).

Se ha observado también que la herbivoría sobre la planta causa “encorchamiento”, es decir la lignificación del tejido como respuesta a las heridas causadas por herbívoros, reduciendo el área fotosintética de la planta (Martínez-Hernández, 2015). Así mismo, las heridas causadas en el garrambullo por los herbívoros favorecen el establecimiento de otros hongos fitopatógenos como *Fusarium oxysporum*, *Colletotrichum gloeosporioides*, *Phoma* sp., *Monilia* sp. y *Phoma epicoccina* (Monreal-Vargas *et al.*, 2014).

Por otro lado, se ha reportado que la ambrosía secretada por *T. martinezae* sirve como sustrato para el hongo *Fumagospora* sp., causando una patología conocida como fumagina, donde se forma una capa negra sobre la cutícula de la planta, reduciendo así su área fotosintética (Martínez-Hernández *et al.*, 2015). Se ha observado también que la tasa de parasitoidismo de *Mexidalgus toumeyellus* sobre *T. martinezae* aumenta directamente con la densidad de la población de las escamas, sin embargo, comienza a disminuir a partir de densidades intermedias, probablemente debido al efecto de la ambrosía, que al acumularse podría causar la muerte de las escamas, reducir su calidad como hospederos, o bien, inhibir la ovoposición de los parasitoides, al contener compuestos de defensa de la planta (Callejas-Chavero *et al.*, 2023).

### 1.8. Efecto de la herbivoría sobre *M. geometrizans*

Una de las defensas de las plantas contra los herbívoros consiste en la síntesis de metabolitos antibacterianos, antifúngicos, tóxicos o repelentes de insectos, así como compuestos volátiles que atraen depredadores de los herbívoros que los atacan (Vivanco, *et al.* 2005). En el caso del garambullo, se han identificado compuestos como el peniocerol, macdougalina y chichipegenina que actúan como insecticidas contra algunos herbívoros como *Tenebrio molitor* y *Spodoptera frugiperda* (Céspedes *et al.*, 2005).

García-Najar (2017) observó en condiciones de invernadero que la presencia de *T. martinezae* y *O. philococcus* en *M. geometrizans* afecta el número de semillas producidas, encontrando un mayor número en los frutos de las plantas sin presencia de fitófagos, a diferencia de las infestadas, donde el número fue menor. Además, de que se registró una velocidad de germinación mayor en aquellas semillas cuya progenitora no tuviera presencia de escamas.

Así mismo, Martínez-Hernández (2017) encontró que el número de semillas germinadas es distinto de acuerdo con el fitófago presente, teniendo un mayor número en los garambullos sin presencia de estos, seguida por los garambullos con *O. philococcus*, después aquellos con ambas escamas y al final los que tienen la presencia de *T. martinezae*, similar a lo reportado por García-Najar (2017).

En cuanto a las características reproductivas, Martínez-Hernández (2017) reportó diferencias debido a que los garambullos infestados con la escama blanda presentan la menor cantidad de frutos maduros, así como un menor número de semillas por fruto, mientras que, en los garambullos con ambas escamas, los frutos tienen una menor longitud, de la misma manera, las plantas con presencia de *T. martinezae* tanto sola como con la otra escama presentan los frutos con menor peso en gramos, también reporta que las flores de los garambullos sin herbivoría presentan las corolas más grandes.

En el mismo trabajo, se reportó que el crecimiento anual de las ramas disminuye significativamente en presencia de *T. martinezae*, con promedios de 2.5 por sí sola y 1.5 cm en co-ocurrencia con *O. philococcus*, frente a los 3.9 cm anuales sólo con la escama armada o sin presencia de escamas. Es importante mencionar que también se reportó la caída de tres ramas debido al daño producido en la condición blanda.

En resumen, ambos fitófagos afectan negativamente a la planta, con la escama armada teniendo un menor efecto que la blanda, además la co-existencia de ambas especies

muestra un daño menor que aquel donde sólo está presente *T. martinezae*, debido a la competencia entre ambas.

### **1.9. Interacciones sobre y debajo del suelo**

Diversos estudios han reconocido las interacciones que existen entre los organismos que habitan en el suelo, y aquellos que lo hacen sobre el mismo. Estas interacciones suelen estar mediadas por las plantas, ya que sus raíces se encuentran en el suelo, mientras que las partes aéreas sobre el mismo (Van der Putten *et al.*, 2001; Wardle *et al.*, 2014; Barber *et al.*, 2015).

Wall y Moore (1999) mencionan la importancia del mutualismo en las interacciones sobre y debajo del suelo, destacando su relevancia como un factor central que moldea la comunidad del suelo, por ejemplo, a través de los mutualismos que ocurren en la rizósfera con hongos micorrícicos y proteobacterias como *Rhizobium*, las cuales mejoran el acceso de los nutrientes para la planta.

Una visión más holística menciona los vínculos que actúan como mediadores entre las interacciones sobre y debajo del suelo a nivel local (por ejemplo, a través de las plantas), destacando las fuerzas ascendentes (*bottom-up*) y descendentes (*top-down*). Las primeras representadas por los desintegradores y simbioses que influyen en la disponibilidad de los nutrientes, y en la productividad primaria, mientras que las fuerzas descendentes se verían disparadas por herbívoros y patógenos, provocando respuestas diferenciales dependiendo de la planta (De Deyn y Van der Putten, 2005).

En particular, para los microartrópodos se ha descrito que las interacciones de éstos con las plantas pueden incrementar el desempeño, la productividad y crecimiento, a través de diversos mecanismos como el aumento de la obtención de agua al favorecer la formación de canales, e incrementando la fertilidad del suelo a través de la fragmentación de la materia orgánica (Bedano *et al.*, 2005; Prieto *et al.*, 2005; Callejas-Chavero *et al.*, 2015).

Algunos estudios se han enfocado en visualizar la interacción de las fuerzas ascendentes y descendentes entre sí. La interacción de la fauna edáfica con las plantas afecta a los herbívoros, parásitos, parasitoides y polinizadores, al actuar como un detonante de respuestas metabólicas, por ejemplo, al favorecer la producción y movilización de metabolitos secundarios que protegen a la planta del ataque de herbívoros y patógenos (De la Peña, 2009; Kaplan *et al.*, 2008); mientras que, los patógenos y herbívoros pueden

aumentar la actividad de los desintegradores y por lo tanto, la disponibilidad de nutrientes para la planta (Bardgett *et al.*, 1999).

Bezemer *et al.* (2003) reportan que la exposición a herbívoros de raíces (*Agriotes lineatus*) en la planta de algodón, reduce en más de 50% la tasa de crecimiento y de consumo de hojas de un herbívoro foliar (*Spodoptera exigua*), atribuible a un aumento en los niveles de terpenoides tanto en las raíces como en las hojas. Por otro lado, Barber *et al.* (2011) reportan en *Cucumis sativus* que tanto la herbivoría en raíces, hojas y el efecto combinado resulta en un mayor número de efectos negativos sobre la planta, al reducir su crecimiento, la producción de flores y el tiempo que pasan las abejas polinizadoras en estas.

Recientemente, se han enlistado temas prioritarios para la investigación en ecología del suelo, entre los cuales se incluyen tópicos relacionados con las interacciones sobre y debajo del suelo; por ejemplo, analizar la contribución de las fuerzas ascendentes y descendentes en las redes tróficas del suelo, o cómo podemos vincular las redes tróficas que ocurren sobre y debajo del suelo en modelos dinámicos (Eisenhauer, *et al.*, 2017).

Así, a pesar del reciente interés por el estudio de las interacciones sobre y debajo del suelo, la mayoría de los trabajos se han centrado en el efecto que las comunidades edáficas tienen en la parte aérea de la planta, sin embargo, poco se ha analizado el efecto que la herbivoría en las partes aéreas de las plantas podría tener sobre la comunidad del suelo, destaca el meta-análisis realizado por Andriuzzi y Wall (2017), encontrando efectos diferenciales en función de los taxa y variables ambientales; por ejemplo, el efecto de los herbívoros en la fauna del suelo, pasa de negativo a positivo conforme incrementa la precipitación, así mismo, los oribátidos se ven afectados negativamente con la presencia de herbívoros, mientras que los colémbolos no presentan efecto.

## 2. ANTECEDENTES

En México existen pocos trabajos que estudien a los sistemas áridos y semiáridos y a su fauna asociada. Uno de los primeros trabajos corresponde a la tesis de licenciatura de Estrada-Venegas y Sánchez-Rocha (1986), quienes estudian a los ácaros del suelo en el matorral xerófilo de Tehuacán, Puebla; reportando 53 familias y 70 géneros, con los ácaros Prostigmata teniendo la mayor abundancia y diversidad; dentro de las familias cuyos representantes registran las mayores abundancias se enlistan Tydeidae, Nanorchestidae, Paratydeidae, Stigmaeidae, Ctenacaridae y Cosmochthoniidae.

Sánchez-Chávez (2013) estudió a los ácaros oribátidos asociados al suelo de *Prosopis laevigata*, *Parkinsonia praecox* y suelo sin vegetación en Zapotitlán Salinas, Puebla; reporta una mayor abundancia y riqueza de oribátidos para el suelo asociado a *P. laevigata*, y el hallazgo de las siguientes familias: Scutoverticidae, Oribatulidae, Eremaeozetidae, Scheloribatidae, Aphelacaridae, Brachychthoniidae, Parakalumnidae, Cosmochthoniidae, Cymbaeremaeidae, Ooppiidae y Oripodidae.

En el mismo sitio de estudio, Miguel (2013) estudió a la fauna en las costras biológicas del suelo (Las CBS son comunidades compuestas por cianobacterias, algas, hongos microscópicos, líquenes y musgos que se establecen en la superficie del suelo) y el suelo dentro y fuera de la copa de *Mimosa luisana*; encontrando una mayor riqueza y densidad en las CBS. Dentro de los taxa encontrados se mencionan: Oribatida, Prostigmata, Mesostigmata, Hemiptera, Psocoptera, Coleoptera, Hymenoptera, Thysanoptera, Lepidoptera, Diptera, Neuroptera, Collembola, Nematoda, Diplura, Pseudoscorpionida, Araneae y Chilopoda.

En el matorral xerófilo de Baja California Sur, Villarreal-Rosas *et al.* (2014) estudiaron las comunidades de microartrópodos asociadas a las CBS. En dicho estudio se reporta a los ácaros del orden Prostigmata con una mayor riqueza comparada con los Oribatida; y donde las familias Acaridae, Aphelacaridae y Pygmephoridae fueron las más abundantes.

Sánchez-Rocha (2014) estudió a los ácaros del suelo en el matorral xerófilo de la cuenca del río Estórax, Querétaro en cinco distintas asociaciones vegetales; encontrando 69 familias, 118 géneros y 126 especies, con los Prostigmata mostrando la mayor riqueza y abundancia. A nivel familia, Nanorchestidae, Tydeidae, Aphelacaridae y Linotetranidae fueron las más abundantes.

Posteriormente, Sánchez-Chávez (2015) estudió a los ácaros del suelo, agregando también a *Myrtillocactus geometrizans* y a las CBS, realizando 4 muestreos a lo largo del año, encontrando un total de 43 familias: Oribatida y Prostigmata con 17 familias, seguidos por Endeostigmata con 4 familias, Mesostigmata con 3 y por último Astigmata con 2 familias. En especial para *M. geometrizans* se registraron 37 de las 43 familias totales.

Otro esfuerzo para conocer la fauna del suelo lo representa el trabajo realizado en Cuatrociénegas, Coahuila, donde se estudiaron a los microartrópodos del suelo, encontrando 6 clases, 20 órdenes y 60 familias, con los ácaros siendo los organismos más abundantes y diversos, dentro de los cuales 20 familias corresponden a Prostigmata y 16 a Oribatida (Ojeda y Gasca-Pineda, 2019).

### 3. JUSTIFICACIÓN

Diversos estudios han señalado la relevancia de la fauna del suelo en los procesos de descomposición de la materia orgánica, así como su rol en las redes tróficas, sin embargo, pocos estudios se han centrado en el efecto de las interacciones sobre y debajo del suelo en los artrópodos edáficos; del mismo modo, el estudio taxonómico de muchos de los grupos que conforman la fauna del suelo ha sido limitado, lo cual es particularmente notable en los ambientes áridos y semi-áridos, donde pocos trabajos se han llevado a cabo. La presente tesis representa una contribución al conocimiento taxonómico y ecológico de los artrópodos del suelo de las zonas semi-áridas del país, en específico del matorral xerófilo de Huichapan, Hidalgo, México, además de explorar algunos de los efectos que las interacciones en las partes aéreas de la planta tienen en la macro y mesofauna del suelo, así como los efectos que la fauna edáfica genera en la planta.

### 4. OBJETIVOS

#### 4.1. General

Determinar la composición y diversidad de la comunidad de meso y macrofauna del suelo asociada a *Myrtillocactus geometrizans* con distintos tipos de herbivoría (control, blanda, armada, mixta).

#### 4.2. Particulares

1. Describir la riqueza y abundancia de la meso y macrofauna asociada a *M. geometrizans* en el matorral xerófilo de Huichapan, Hidalgo.
2. Comparar la composición y diversidad de la fauna edáfica en cuatro condiciones de herbivoría.
3. Determinar si los factores microclimáticos, la cobertura vegetal del garambullo, o su interacción tienen relación con la variación en la composición y diversidad de la meso y macrofauna.

### 5. HIPÓTESIS

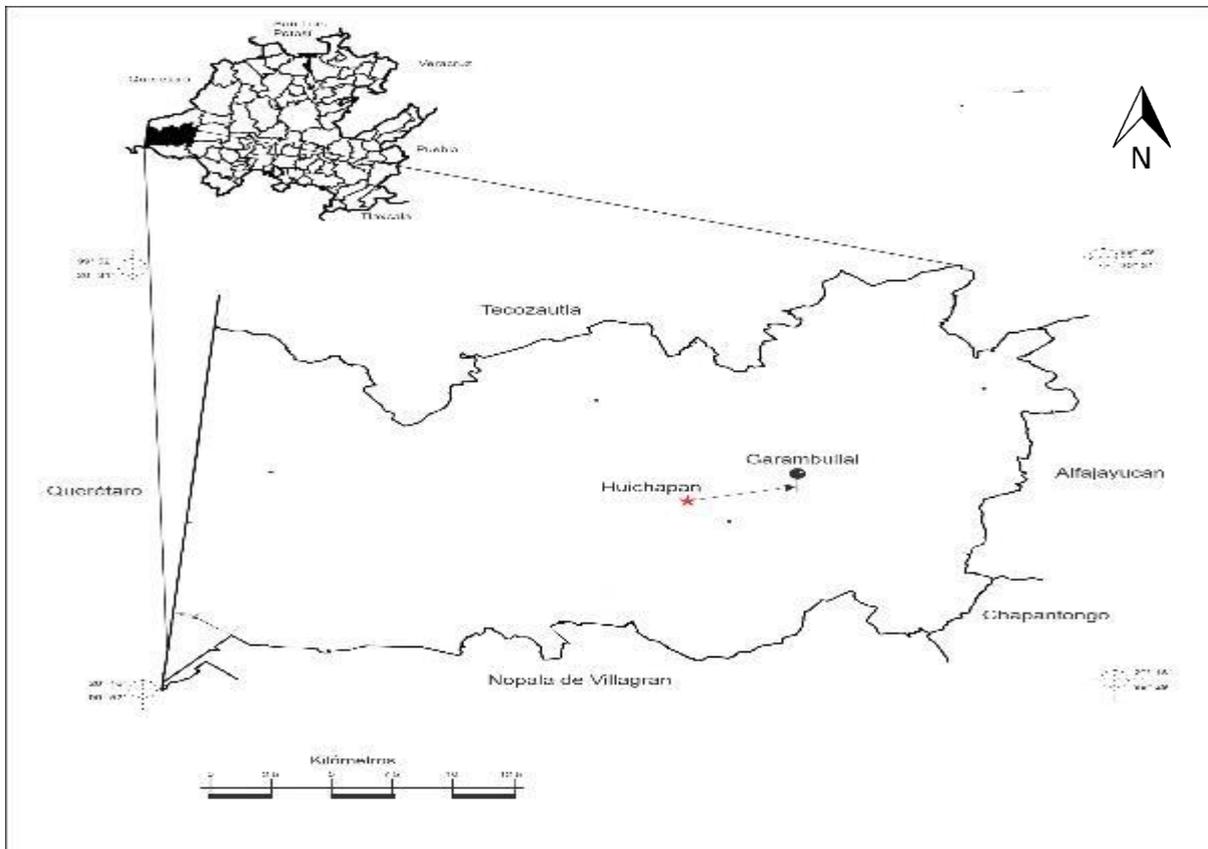
Si la calidad de la materia orgánica incorporada al suelo desde un garambullo sin fitófagos es superior a aquella que contiene la presencia de estos últimos, entonces, se espera que la diversidad de la meso y macrofauna del suelo sea mayor en los garambullos sin fitófagos en comparación con aquellos que sí los tienen.

Si el tipo de fitófago asociado a *M. geometrizzans* afecta el aporte de materia orgánica al suelo, a través de las ramas caídas, o la propia biomasa de los herbívoros, entonces, encontraremos una mayor abundancia de macro y mesofauna en los suelos de los garrambullos con la presencia de *Toumeyella martinezae* en comparación con las otras condiciones.

## 6. MÉTODO

### 6.1. Zona de estudio

El estudio se realizó en un matorral xerófilo, ubicado en el municipio de Huichapan, Hidalgo, en la localidad de Zequetejé, el sitio de colecta se encuentra entre las siguientes coordenadas: 20° 22' 42.2" -20° 22' 45.6" N y 99° 36' 21.7" - 99° 36' 23.1" O, con una altitud promedio de 2,182 ± 7 m s.n.m. (Fig. 2). Presenta un clima semiseco-templado, con un régimen de lluvias de verano, y una precipitación anual que va de los 500 a los 700 mm, el rango de temperatura promedio en el municipio oscila entre los 12 y 18° C.

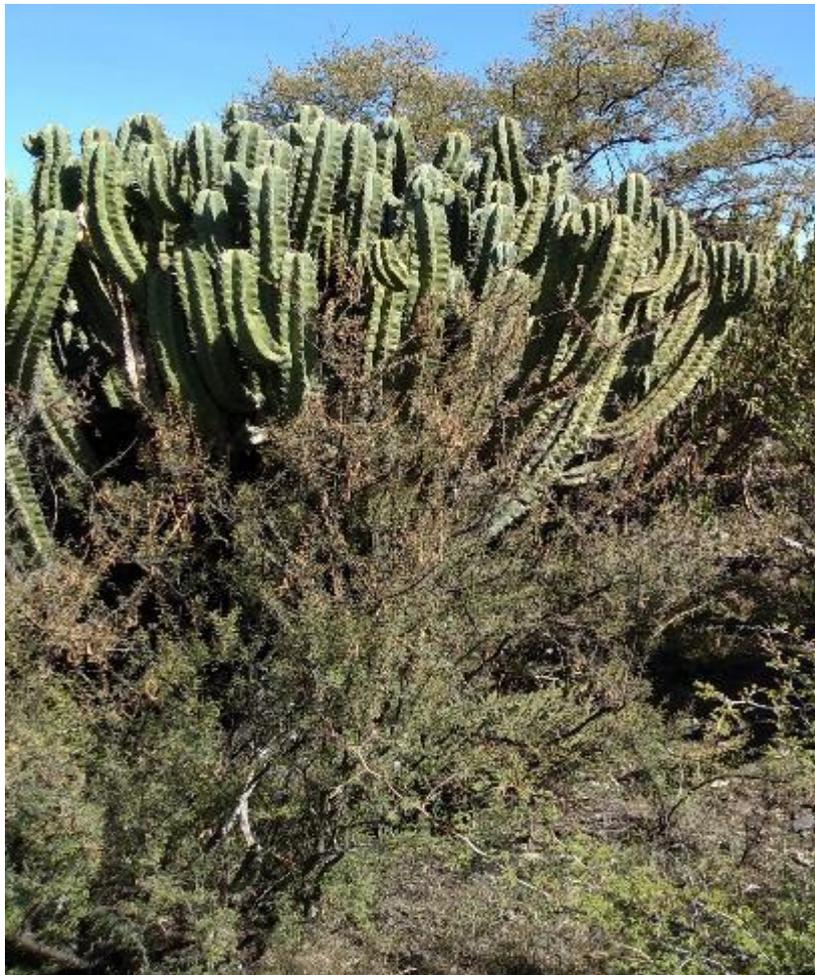


**Figura 2.** Mapa del sitio de estudio, ubicado en Huichapan, Hidalgo. El garrambullal se ubica a 5 kilómetros al oriente del centro de Huichapan. Mapa elaborado por Jair Páez.

El suelo reportado para el municipio es de origen volcánico, semidesértico, predominantemente de tipo feozem, seguido por vertisol y luvisol (INEGI, 2009). La vegetación corresponde a un matorral xerófilo, compuesto principalmente por suculentas y cactáceas, entre las que destaca el garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*), que en esta zona sufre la infestación de las escamas *Toumeyella martinezae* y *Opuntiaspis phylococcus* (Martínez-Hernández, 2015, 2017).

## 6.2. Especie de estudio

El garambullo: *Myrtillocactus geometrizans* (Cactaceae) (Fig. 3) es una cactácea candelabriforme, endémica de México, con amplia distribución, encontrándose en 18 estados del país, presente en ambientes áridos, con precipitaciones anuales menores a los 600 mm (Jiménez, 2011). Exhibe un porte arborescente o arbustivo, tallos que se ramifican por arriba de la parte media de color verde claro a verde azulado, flores tubulares de 3.5 cm de color blanco y frutos globulosos de alrededor de 1.5 cm, de tonos rojos a negros (Arias *et al.*, 2012).

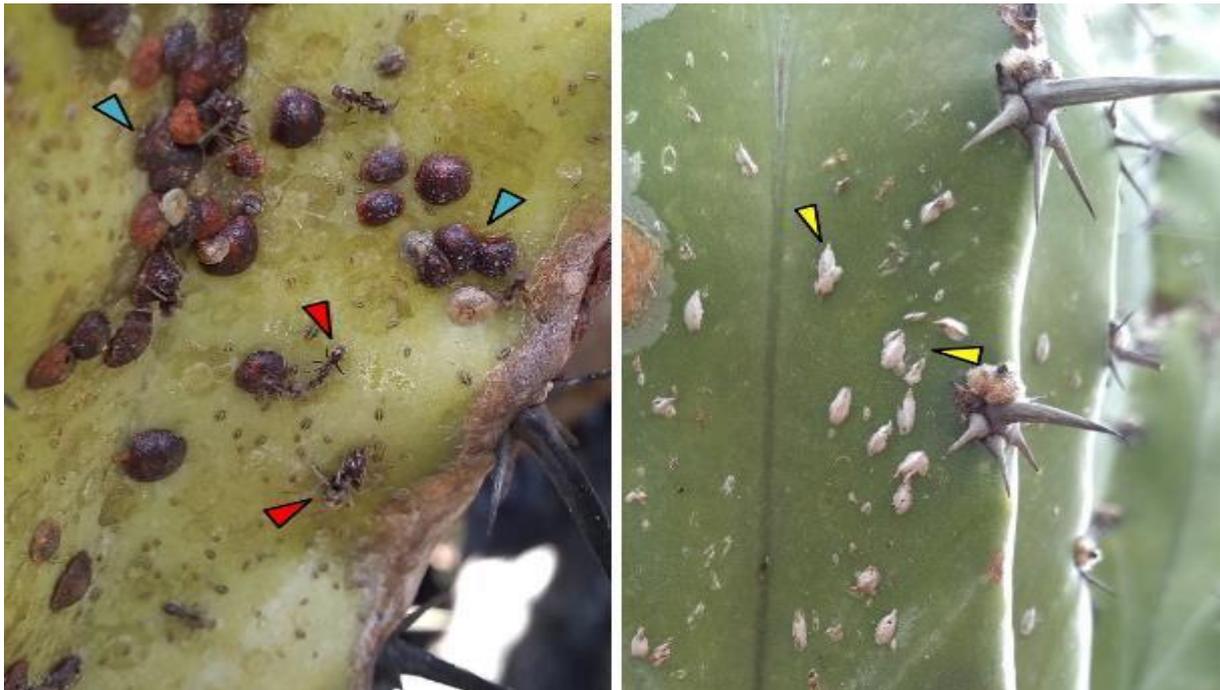


**Figura 3.** *Myrtillocactus geometrizans* en el sitio de estudio. Fotografía por Leonardo J. García Ayala.

### 6.3. Método de Muestreo

Se realizó un muestreo entre los días 17 y 18 de octubre de 2019, abarcando la época de lluvias en la región. Dentro de un terreno de 10 hectáreas, con una densidad de 0.01 individuo por m<sup>2</sup> (Callejas-Chavero *et al.*, 2020) se seleccionaron en total 16 individuos de *Myrtillocactus geometrizans* que presentaron distintos tipos de herbivoría (blanda, armada, mixta y control).

Con base en la especie de fitófago que alberga, los garambullos se dividieron en cuatro condiciones: 1) la condición control, donde el garambullo no establece interacción con ningún fitófago; 2) la condición armada tiene la presencia de *Opuntiaspis philococcus* (Hemiptera: Diaspididae), conocida como escama armada, llamada así por poseer una cubierta tegumentaria dura, éste herbívoro se ha reportado también en cactáceas del género *Opuntia* (Alvarado-Jaramillo y Santín-Calva, 2017); 3) la condición blanda se caracteriza por la presencia de *Toumeyella martinezae* (Hemiptera: Coccidae), llamada escama blanda, con una cubierta tegumentaria delgada, que además establece un mutualismo con *Liometopum apiculatum* (Hymenoptera: Formicidae), la hormiga escamolera, ya que *T. martinezae* secreta una sustancia azucarada llamada ambrosía, que las hormigas aprovechan a cambio de defensa contra parasitoides; por último, 4) en la condición mixta el garambullo sufre de herbivoría por parte de *O. philococcus* y *T. martinezae* (Martínez-Hernández, 2015, 2017) (Fig. 4).



**Figura 4.** Se muestra a la escama blanda: *Toumeyella martinezae* (flechas azules) siendo atendida por *Liometopum apiculatum* (flechas rojas). A la derecha se observa a la escama armada: *Opuntiaspis philococcus* (flechas amarillas). Fotografías por Leonardo J. García Ayala.

De cada una de las condiciones (blanda, armada, mixta y control) se seleccionaron cuatro individuos, los cuales fueron seleccionados con la asesoría de la doctora Callejas-Chavero, quien ha trabajado este sistema en el sitio de estudio (Fig. 5).



**Figura 5.** Se señala la ubicación de los garambullos seleccionados para el estudio. En verde la condición control, en azul la armada, amarillo para la condición blanda y el rojo identifica a la mixta. Imagen obtenida y modificada de Google Earth, 2021.

Además, se tomó la cobertura de cada uno de los garambullos, utilizando un flexómetro para medir ambos diámetros de la cobertura de la planta (asumiendo una forma de óvalo), posteriormente se calculó el área de cobertura utilizando la siguiente fórmula:  $A = \pi r_1 r_2$ . (Tabla 2).

**Tabla 2.** Se muestra la cobertura (m<sup>2</sup>) de cada uno de los garambullos, divididos en las cuatro condiciones de herbivoría.

Garambullo	Área de cobertura (m <sup>2</sup> )	Garambullo	Área de cobertura (m <sup>2</sup> )
Control 1	6.803	Mixta 1	16.399
Control 2	15.504	Mixta 2	3.711
Control 3	11.64	Mixta 3	6.039
Control 4	8.168	Mixta 4	16.98
Armada 1	12.252	Blanda 1	9.33
Armada 2	22.93	Blanda 2	31.915
Armada 3	19.615	Blanda 3	8.247
Armada 4	8.423	Blanda 4	5.726

Así mismo, se realizó un ANOVA para comparar las áreas de cobertura promedio por condición, obteniendo que no hay diferencias significativas entre ellos ( $F_{(3,16)} = 0.403$ ,  $p > 0.05$ )

En dos individuos de cada condición, se colocaron sensores (Hobos) de humedad y temperatura de aire a la altura de las ramas del garambullo y de temperatura en el suelo, enterrados en los primeros 10 cm del suelo, los cuales permanecieron un lapso de 23 horas, de las 12:00 horas del 17 de octubre de 2019 a las 11:00 horas del 18 de octubre del mismo año, en cada uno de los individuos seleccionados.

Para la obtención de las muestras del suelo, se seleccionaron tres puntos bajo la cobertura del garambullo, equidistantes entre sí y a 80 cm de la base de la planta. De cada uno de los puntos se tomó una porción de mantillo y suelo de una profundidad de hasta 10 cm con la utilización de una pala de mano, las muestras fueron colocadas en recipientes plásticos con un volumen de 540 cm<sup>3</sup> y etiquetadas para su traslado al laboratorio en la Facultad de Ciencias.

Cada una de las muestras fue procesada en el Laboratorio de Ecología y Sistemática de Microartrópodos en la Facultad de Ciencias, utilizando embudos de Berlese-Tullgren, los que funcionan aprovechando la fototaxia negativa de los organismos del suelo, debido a que cerca de la boca superior del embudo se coloca un foco incandescente de 40 watts, por lo que los organismos migran por el embudo hasta caer en un frasco colector que es llenado a un tercio de su volumen con alcohol etílico al 70%, las muestras fueron dejadas en los embudos durante tres días a temperatura ambiente y tres días con la luz del foco.

Los organismos extraídos fueron cuantificados utilizando un microscopio de disección (Zeiss Stemi DV4) e identificados a nivel de orden, a excepción de los ácaros y colémbolos, de los cuales se elaboraron preparaciones semipermanentes utilizando líquido de Hoyer (Palacios-Vargas y Mejía-Recamier, 2007) para su identificación taxonómica a nivel de género, utilizando un microscopio óptico (Zeiss Axostar Plus), y las siguientes claves especializadas: Southcott (1986), Smith y Ueckermann (1987), Welbourn y Young (1987), Balogh y Balogh (1988), Balogh y Balogh (1990), Fajardo-Swift (1996), Ueckermann y Grout (2007), Krantz y Walter (2009), Wohltmann (2010), Khanjani *et al.* (2012), Taylor *et al.* (2013), Khaustov (2014), Da Silva *et al.* (2016), Fan *et al.* (2016), Sobhi *et al.* (2017).

#### 6.4. Análisis Estadísticos

Para averiguar en qué condiciones de herbivoría existe mayor o menor abundancia de artrópodos edáficos, los datos de abundancia fueron transformados utilizando la siguiente fórmula:  $\sqrt{x} + 0.5$  (Zar, 1984), posteriormente, se realizó la prueba de normalidad utilizando la prueba de Shapiro-Wilks, y la homocedasticidad fue probada utilizando la prueba de Levene. Una vez cumplidos ambos supuestos se realizó un ANOVA de una vía, y la prueba de medias de Tukey para conocer las diferencias entre los grupos. Los análisis fueron realizados en el programa STATISTICA 8.0.

Considerando que el 81% de los artrópodos edáficos fueron ácaros, también se analizaron por separado, por lo cual, los datos de abundancia fueron transformados utilizando la fórmula:  $\sqrt{x} + 0.5$  (Zar, 1984), posteriormente se verificó que cumplieran el supuesto de normalidad con la prueba de Shapiro-Wilks y la homocedasticidad con la prueba de Levene, se realizó un ANOVA de una vía, y la prueba de medias de Tukey; del mismo modo, los ácaros se separaron por gremios alimenticios de acuerdo con Schuster (1956), en: macrofitófagos donde se incluyeron 6 géneros, microfitófagos con 28 géneros y depredadores con 25 géneros, en cada uno se realizó la transformación de datos y las pruebas estadísticas mencionadas anteriormente.

Con el fin de analizar la diversidad para los grupos de ácaros, se tomaron en cuenta géneros identificados, y las morfoespecies en el caso de las familias Laelapidae, Parasitidae, Trombiculidae y Trombidiidae, omitiendo algunos ácaros inmaduros que no fueron identificados; se calcularon los números de Hill, utilizando RStudio 2022.02.3, y el paquete estadístico iNext, se obtuvieron los tres órdenes de diversidad;  ${}^0D$  representa la riqueza de especies,  ${}^1D$  denominada diversidad de Shannon, puede ser entendida como el número

efectivo de especies comunes, <sup>2</sup>D llamada diversidad de Simpson es el número efectivo de especies dominantes (Hsieh *et al.*, 2016).

Con los datos de abundancia de artrópodos edáficos, las variables ambientales obtenidas con los Hobos y el área de cobertura de los garambullos se elaboró un Análisis de Componentes Principales (PCA), utilizando STATISTICA 8.0. Previo a la realización del PCA, los datos fueron escalados utilizando la función “scale” en RStudio 2022.02.3.

## 7. RESULTADOS

### 7.1. Riqueza y abundancia de la meso y macrofauna del suelo

Se colectaron un total de 20,649 artrópodos asociados al suelo debajo de *Myrtillocactus geometrizans*; todos ellos fueron identificados a nivel orden, encontrando un total de cinco órdenes del subphylum Chelicerata, doce Hexapoda y un orden perteneciente a Myriapoda (Anexo 1).

Los organismos pertenecientes a los grupos Collembola y Acari fueron identificados a nivel género, encontrando para los colémbolos siete familias, cada una representada por un género (Anexo 2). Para los ácaros se identificaron tres morfotipos en Trombidiidae, dos morfotipos dentro de la familia Laelapidae, uno en Parasitidae y Trombiculidae; del resto de las familias de ácaros se obtuvo la identificación taxonómica a nivel género, con un total de 47 familias y 52 géneros (Anexo 3).

El listado taxonómico de los artrópodos edáficos en el matorral xerófilo de Huichapan, Hidalgo, incluye el primer registro de un orden, 22 familias y 37 géneros (Tabla 3).

**Tabla 3.** Listado de los nuevos registros para órdenes, familias y géneros encontrados en el suelo del matorral xerófilo de Huichapan. Nuevos registros de orden <sup>1</sup>, familia <sup>2</sup> y género <sup>3</sup>.

<b>HEXAPODA</b>	
	<b>Orden Symphypleona</b>
Bourletiellidae <sup>2</sup>	
<i>Bourletiella</i> <sup>3</sup>	
	<b>Orden Embioptera<sup>1</sup></b>
<b>CHELICERATA</b>	
	<b>Suborden Endeostigmata</b>
Nanorchestidae <sup>2</sup>	
<i>Nanorchestes</i> <sup>3</sup>	

**Suborden Monogynaspida**Ascidae<sup>2</sup>Parasitidae<sup>2</sup>*Asca*<sup>3</sup>**Suborden Oribatida**Aphelacaridae<sup>2</sup>*Aphelacarus*<sup>3</sup>Brachychthoniidae<sup>2</sup>*Brachychthonius*<sup>3</sup>Ceratokalummidae<sup>2</sup>*Cultrobates*<sup>3</sup>Ctenacaridae<sup>2</sup>*Gilarovella*<sup>3</sup>Damaeidae<sup>2</sup>*Damaeus*<sup>3</sup>Galumnidae<sup>2</sup>*Galumna*<sup>3</sup>

Gymnodamaeidae

*Plesiodamaeus*<sup>3</sup>

Haplozetidae

*Incabates*<sup>3</sup>

Oppiidae

*Amerioppia*<sup>3</sup>Passalozetidae<sup>2</sup>*Passalozetes*<sup>3</sup>Phenopelopidae<sup>2</sup>*Eupelops*<sup>3</sup>Trhypochthoniidae<sup>2</sup>*Allonothrus*<sup>3</sup>*Trhypochthonius*<sup>3</sup>**Suborden Prostigmata**Adamystidae<sup>2</sup>*Adamystis*<sup>3</sup>

Bdellidae

*Spinibdella*<sup>3</sup>Caeculidae<sup>2</sup>*Neocaeculus*<sup>3</sup>Caligonellidae<sup>2</sup>*Coptocheles*<sup>3</sup>*Neognathus*<sup>3</sup>Cryptognathidae<sup>2</sup>*Favognathus*<sup>3</sup>

Cunaxidae

*Armascirus*<sup>3</sup>*Pulaeus*<sup>3</sup>

Erythraeidae

*Augustsonella*<sup>3</sup>*Lasioerythraeus*<sup>3</sup>

Eupodidae

*Eupodes*<sup>3</sup>Linotetranidae<sup>2</sup>*Linotetranus*<sup>3</sup>Paratydeidae<sup>2</sup>*Tanytydeus*<sup>3</sup>

Rhagidiidae

*Coccorhagidia*<sup>3</sup>Scutacaridae<sup>2</sup>*Scutacarus*<sup>3</sup>

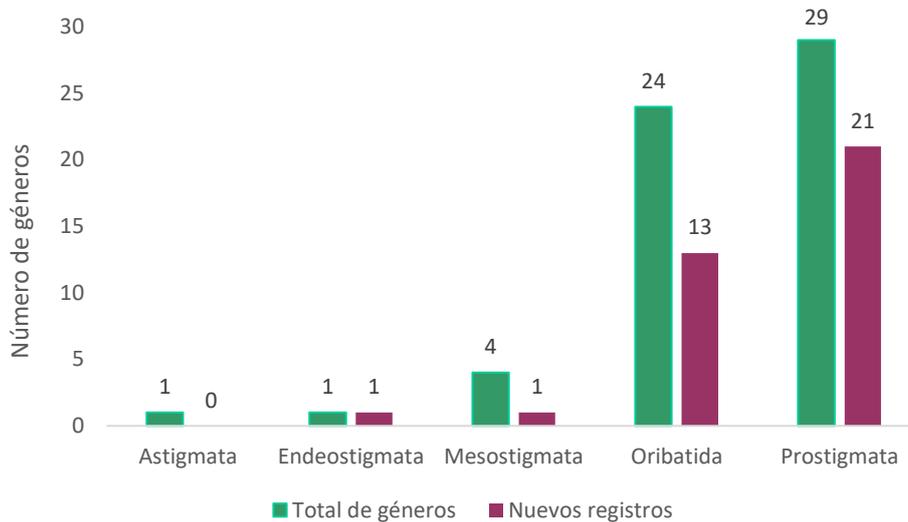
Smarididae

*Fessonnia*<sup>3</sup>Stigmaeidae<sup>2</sup>*Eustigmaeus*<sup>3</sup>*Ledermuelleriopsis*<sup>3</sup>Tydeidae<sup>2</sup>*Afrotydeidae*<sup>3</sup>*Pretydeus*<sup>3</sup>*Tydeus*<sup>3</sup>

En este estudio se obtuvieron nuevos registros para algunas familias y géneros de ácaros. En el caso de los Mesostigmata, el registro de las familias Parasitidae, Ascidae y el género *Asca* son nuevos para el estado de Hidalgo; para los Endeostigmata la familia Nanorchestidae, y el género *Nanorchestes* también son nuevos registros.

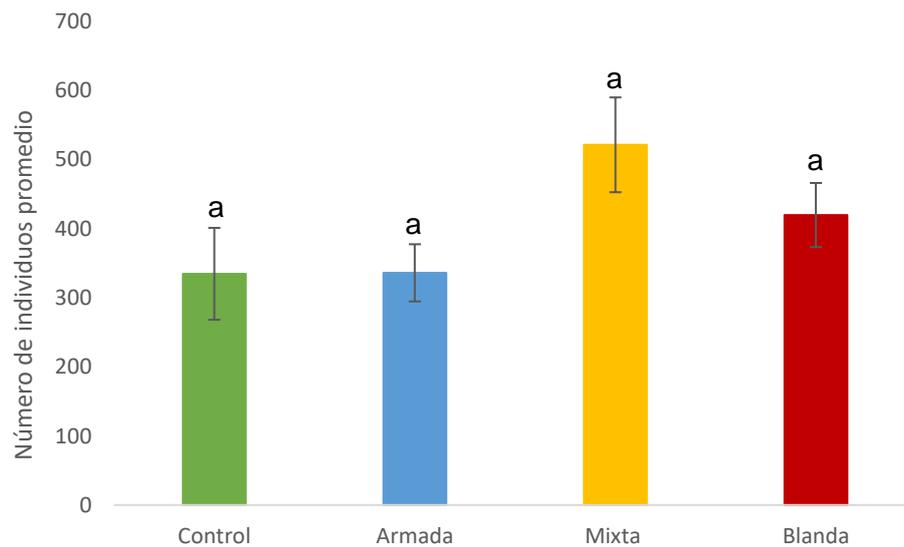
Para los Prostigmata, 21 de los 29 géneros corresponden a nuevos registros, así como también se realizó el primer registro de las siguientes familias: Adamystidae, Caeculidae, Caligonellidae, Cryptognathidae, Linotetranidae, Paratydeidae, Scutacaridae, Stigmaeidae y Tydeidae.

Por último, de los 24 géneros de ácaros oribátidos encontrados, 13 de ellos son nuevos registros para el estado de Hidalgo; así mismo, las siguientes familias se reportan por primera vez: Aphelacaridae, Brachychthoniidae, Ceratokalummidae, Ctenacaridae, Damaeidae, Galumnidae, Passalozetidae, Phenopelopidae y Trhypochthoniidae. (Fig. 6).



**Figura 6.** Nuevos registros de géneros para el estado de Hidalgo por grupo de ácaros.

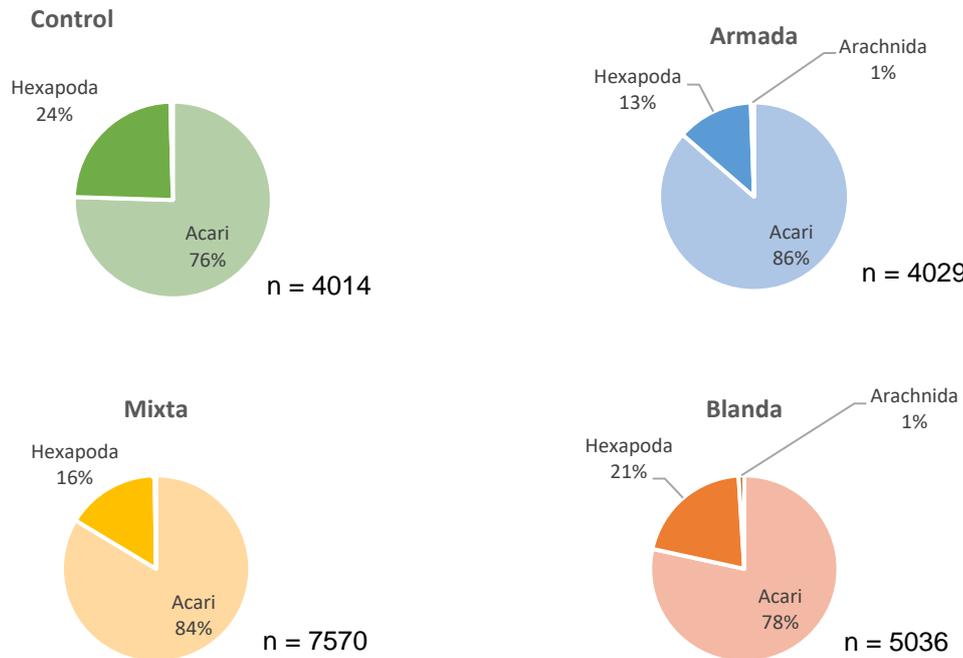
En cuanto a la abundancia de los artrópodos edáficos, se encontró un mayor número de individuos en la condición mixta, con un total de 7,570 individuos, seguidos por la condición blanda que presentó 5,036 y las condiciones armada y control con 4,029 y 4,014 respectivamente (Fig. 7), sin embargo, esta diferencia no resultó estadísticamente significativa ( $F_{(3, 48)} = 2.45, p=0.07$ ).



**Figura 7.** Abundancia promedio de los artrópodos edáficos. Las letras iguales indican que no se obtuvieron diferencias significativas entre las condiciones ( $\bar{X} \pm$  error estándar).

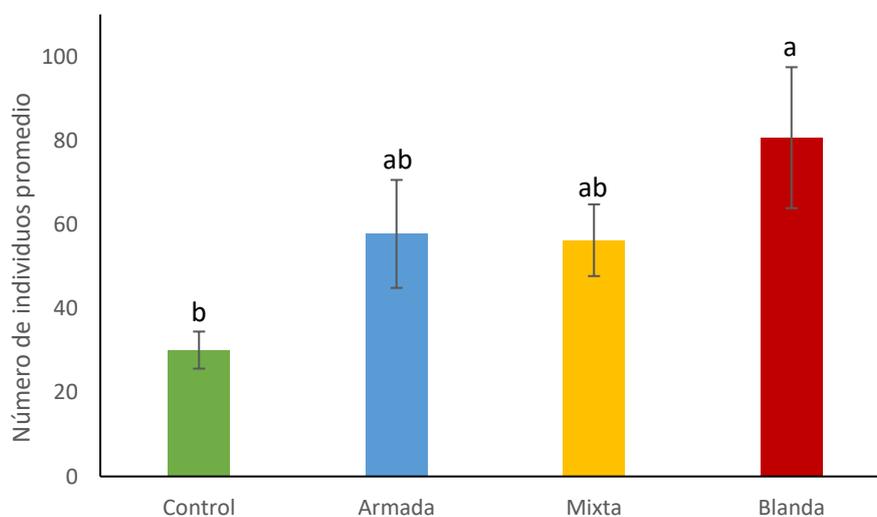
Del total de los artrópodos, el grupo más abundante fue el de los ácaros, con 3,030 individuos en la condición control; 3,483 en la armada; 6,330 en la mixta y 3,949 en la blanda, representando en total el 81% del total de los artrópodos edáficos asociados al garambullo.

El siguiente grupo más abundante son los hexápodos, mientras que los miriápodos y arácnidos (exceptuando Acari) representan una fracción marginal de la proporción total (Fig. 8).



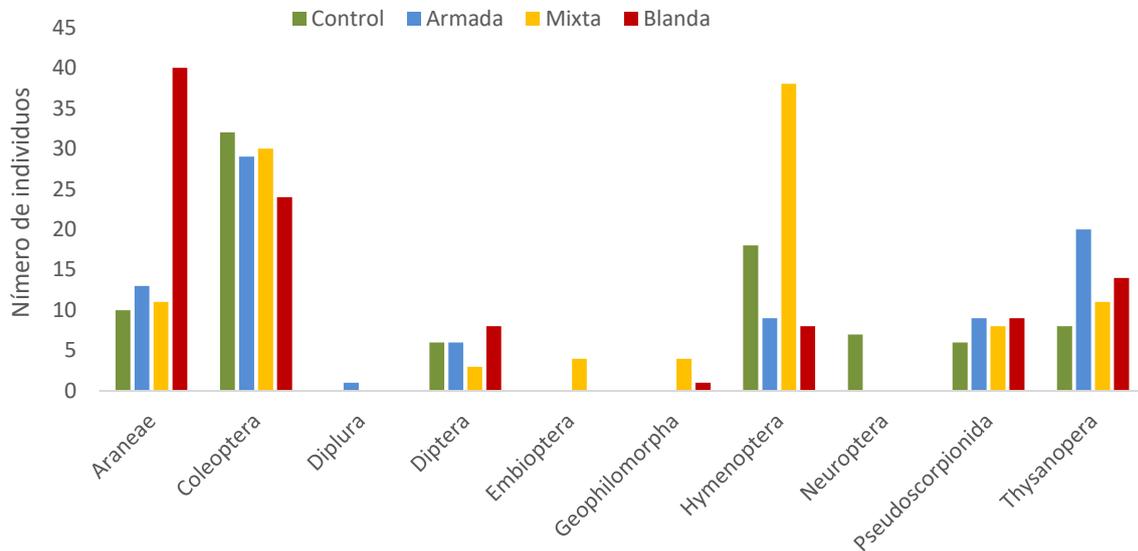
**Figura 8.** Abundancia relativa de los principales grupos taxonómicos encontrados en cada condición.

Al analizar la abundancia de los grupos de artrópodos (exceptuando ácaros), se encontró una abundancia significativamente mayor en la condición mixta respecto a la condición control ( $F_{(3, 48)} = 2.94, p=0.04$ ), con las condiciones armada y mixta presentando valores intermedios entre ambas (Fig. 9).



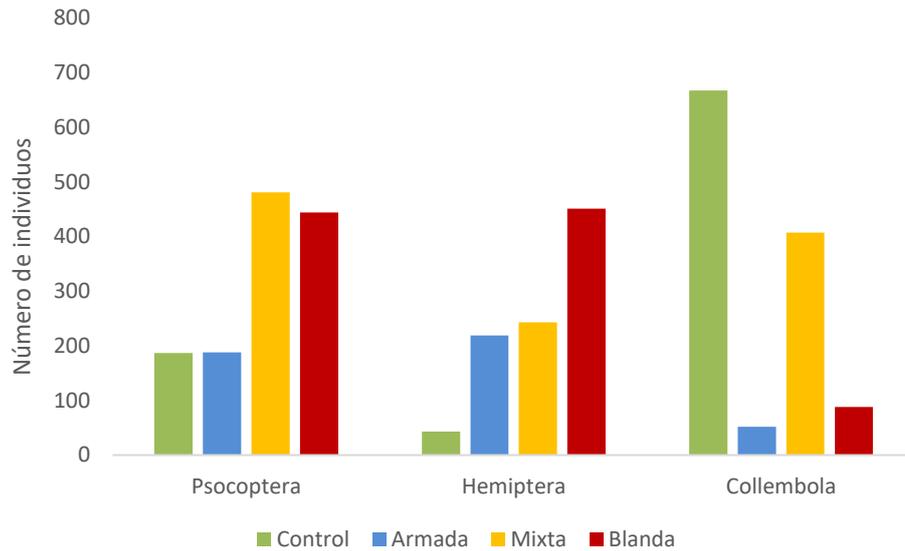
**Figura 9.** Abundancia promedio de los grupos que conforman la fauna del suelo, exceptuando Acari. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba *post hoc* de Tukey ( $\bar{x} \pm$  error estándar).

Al estudiar por grupos taxonómicos la abundancia de los artrópodos edáficos, en algunos casos resultó similar entre las condiciones, como en coleópteros, dípteros, pseudoescorpiones y tisanópteros, por otro lado, las arañas y los himenópteros tuvieron una mayor abundancia en la condición control y mixta respectivamente, en el caso de los dipluros, embiópteros y neurópteros, sólo se registraron en una condición y en abundancias bajas, parecido al caso de Geophilomorpha registrándose en dos condiciones (Fig. 10).



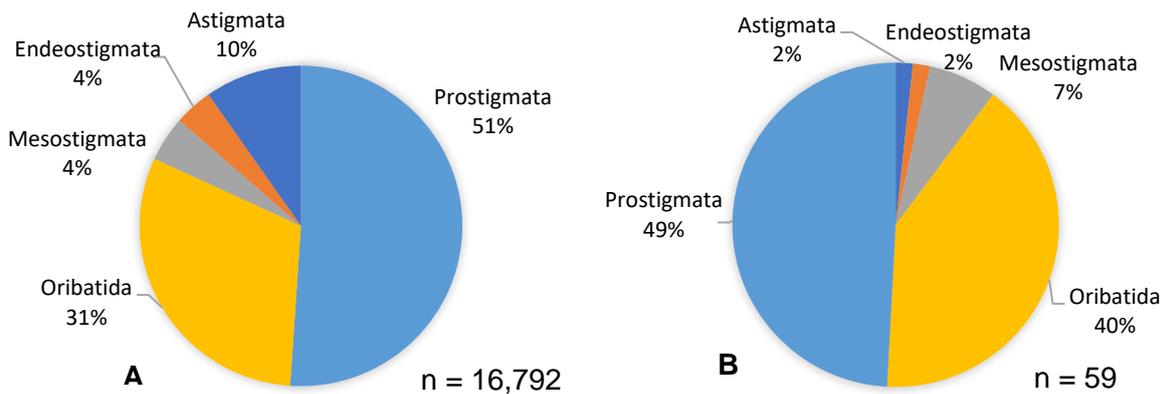
**Figura 10.** Se muestra el número de individuos registrados para cada orden en las cuatro condiciones de herbivoría de *M. geometrizans*.

En comparación con los órdenes mostrados en la figura 10, los psocópteros, hemípteros y colémbolos presentan abundancias de cientos de individuos, en el caso de los psocópteros, las condiciones mixta y blanda presentaron una mayor abundancia, para los hemípteros, la condición blanda exhibe la mayor abundancia, mientras que en la condición control se registraron menos de 100 individuos, contrario al caso de los colémbolos, los cuales tuvieron la mayor abundancia en la condición control (Fig. 11).



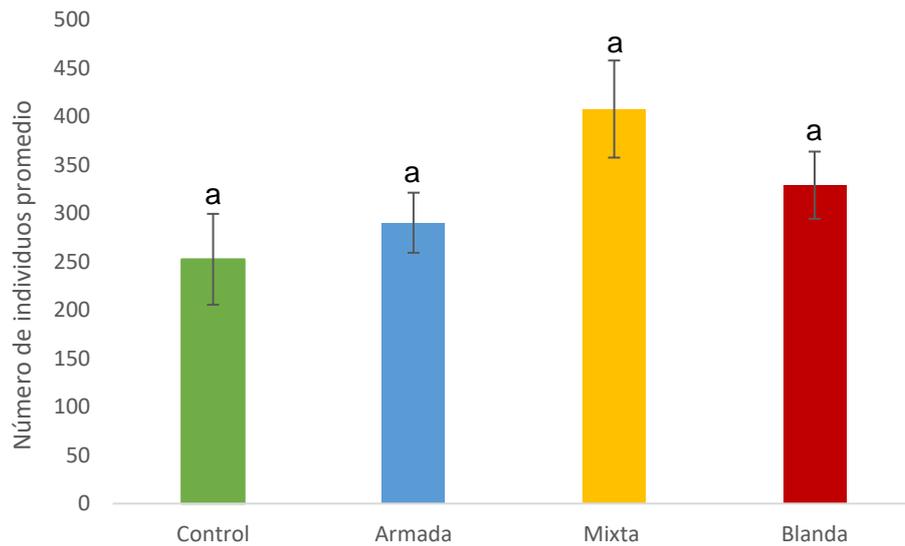
**Figura 11.** Se muestra la abundancia de Psocoptera, Hemiptera y Collembola, para cada una de las condiciones de herbivoría en el garambullo.

Para el caso de los ácaros, se encontraron un total de 16,792 individuos, de los cuales 8,575 (51%) son prostigmados, resultando el grupo más abundante. En cuanto a la diversidad, de los 59 géneros de ácaros (incluyendo los morfotipos que se mencionan en el anexo 3), un total de 29 corresponden a Prostigmata (Fig. 12).



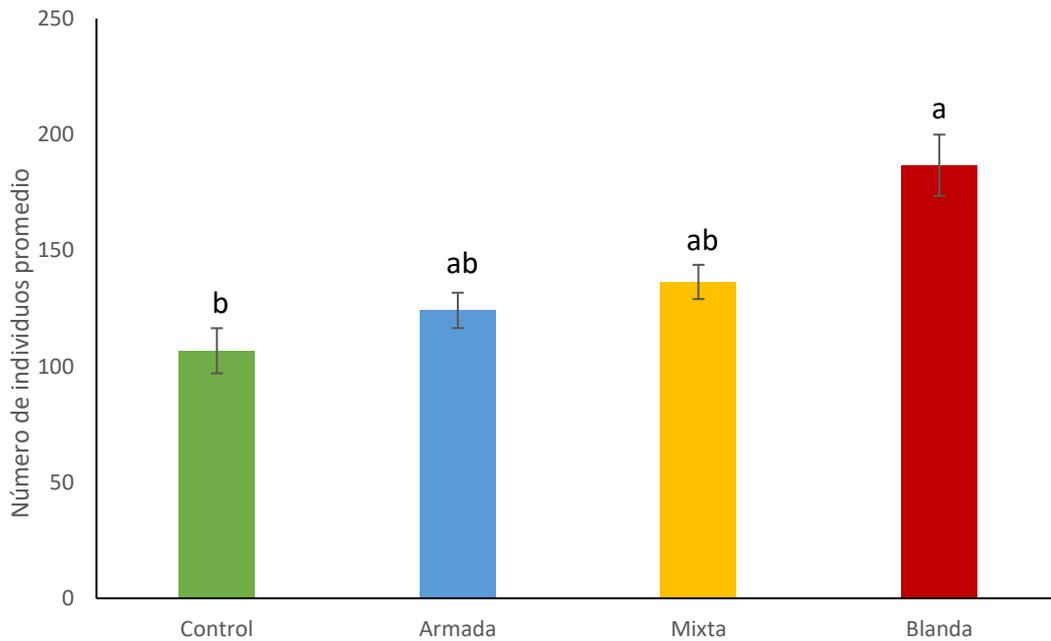
**Figura 12. A.** Se muestra la abundancia relativa por grupos de los ácaros del matorral xerófilo de Huichapan. **B.** Porcentaje de géneros de ácaros registrados por grupo.

Al analizar la abundancia de los ácaros y comparándola en cada una de las condiciones no se obtuvo una diferencia significativa ( $F_{(3,48)} = 2.55, p=0.06$ ), a pesar de ello, la condición mixta presenta un número notablemente mayor de individuos (407.75 individuos promedio por muestra), mientras que la condición control exhibe una menor cantidad de artrópodos (252.5 individuos en promedio por muestra) (Fig. 13).



**Figura 13.** Abundancia de los ácaros en cada una de las condiciones de *Myrtillocactus geometrizans*, las letras iguales señalan que no se encontraron diferencias significativas ( $\bar{x} \pm$  error estándar).

Considerando los hábitos alimenticios de los géneros (6 fueron designados como macrofitófagos, 25 como depredadores y 28 como microfitófagos), se obtuvo para los macrofitófagos la mayor abundancia en la condición blanda, y la condición control fue la de menor, aunque no se obtuvieron diferencias significativas ( $F_{(3,48)} = 2.30$ ,  $p=0.09$ ). Para los depredadores tampoco se encontraron diferencias significativas en cuanto a su abundancia por condición ( $F_{(3,48)} = 0.95$ ,  $p=0.43$ ). Mientras que, en los microfitófagos, se observó una diferencia significativa entre la abundancia de la condición control y blanda ( $F_{(3,48)} = 3.08$ ,  $p=0.037$ ), con esta última presentando una mayor abundancia, la condición armada y mixta no presentaron diferencias significativas entre sí (Fig. 14).



**Figura 14.** Número de ácaros microfitófagos encontrados en el suelo asociado al garambullo, la abundancia en la condición blanda es significativamente mayor respecto a la condición control. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba *post hoc* de Tukey ( $\bar{x} \pm$  error estándar).

## 7.2. Composición y diversidad de los artrópodos edáficos

Los grupos de meso y macrofauna encontrados fueron determinados a nivel orden encontrando un total de 12 órdenes (a excepción de los colémbolos y ácaros, cuya determinación se realizó hasta género), 8 de los cuales fueron encontrados en las cuatro condiciones, mientras que Geophilomorpha sólo se registró en las condiciones mixta y blanda, Diplura, Embioptera y Neuroptera sólo estuvieron presentes en la condición armada, mixta y control, respectivamente. En total, las condiciones control, armada y blanda registraron nueve ordenes, y la condición mixta reportó 10 de ellos. Así mismo, la abundancia reportada en cada condición difiere notablemente en grupos como Araneae, Hemiptera y Psocoptera (Tabla 4).

**Tabla 4.** Órdenes de artrópodos y su abundancia en cada una de las condiciones. Se señala con un asterisco a los grupos encontrados exclusivamente en una condición.

	Control	Armada	Mixta	Blanda
<b>Araneae</b>	10	13	11	40
<b>Coleoptera</b>	32	29	30	24
<b>Diplura</b>	0	1 *	0	0
<b>Diptera</b>	6	6	3	8
<b>Embioptera</b>	0	0	4 *	0
<b>Geophilomorpha</b>	0	0	4	1
<b>Hemiptera</b>	43	219	243	451

<b>Hymenoptera</b>	18	9	38	8
<b>Neuroptera</b>	7 *	0	0	0
<b>Pseudoscorpionida</b>	6	9	8	9
<b>Psocoptera</b>	187	188	481	444
<b>Thysanoptera</b>	8	20	11	14

En el caso de los colémbolos, se encontraron un total de siete géneros, la condición control registró la presencia de los siete géneros, seguido por los garambullos de condición mixta con seis géneros, y al último la condición armada y blanda con dos géneros. Así mismo, el género *Americabrya* fue el único presente en todas las condiciones, mientras que *Willemia* fue exclusivo de la condición control (Tabla 5).

**Tabla 5.** Géneros de Collembola registrados en cada una de las condiciones generadas por los fitófagos en *M. geometrizans*.

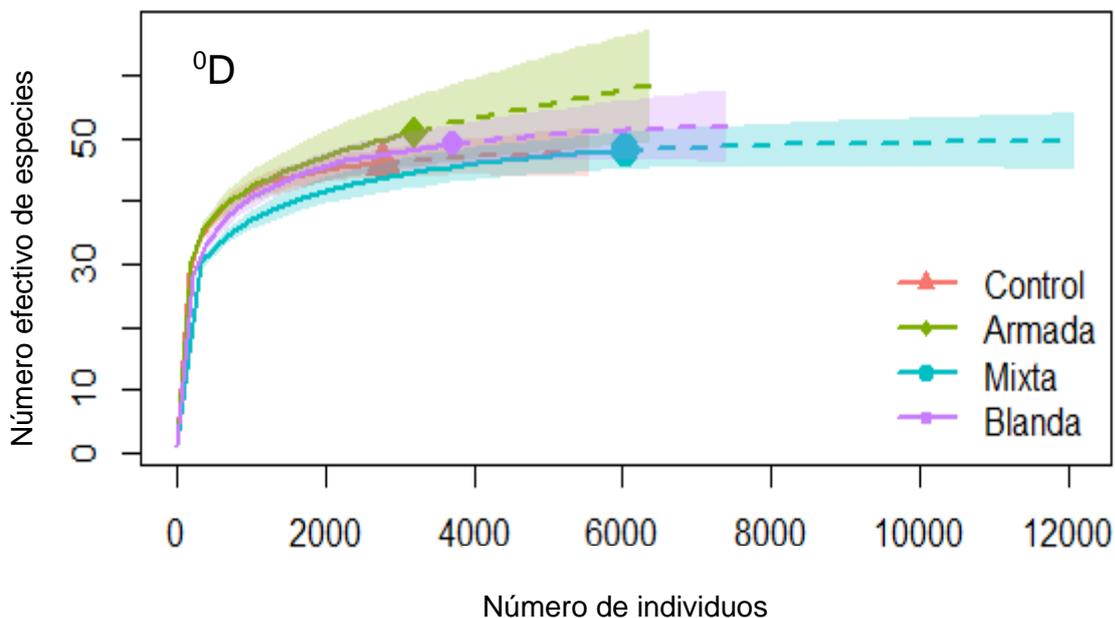
	<b>Control</b>	<b>Armada</b>	<b>Mixta</b>	<b>Blanda</b>
	<i>Americabrya</i>	<i>Americabrya</i>	<i>Americabrya</i>	<i>Americabrya</i>
	<i>Bourletiella</i>	<i>Proisotoma</i>	<i>Bourletiella</i>	<i>Sphaeridia</i>
<b>Géneros de Collembola</b>	<i>Brachystomella</i>		<i>Brachystomella</i>	
	<i>Proisotoma</i>		<i>Proisotoma</i>	
	<i>Pseudachorutes</i>		<i>Pseudachorutes</i>	
	<i>Sphaeridia</i>		<i>Sphaeridia</i>	
	<i>Willemia</i>			

Para los ácaros, considerando que representaron el 81% de los artrópodos edáficos encontrados, además de que se identificaron 52 géneros y 7 morfoespecies, se calcularon los números de Hill, así como la cobertura de muestreo para cada una de las condiciones (Tabla 6).

**Tabla 6.** Se muestra la abundancia (N), los números de Hill:  ${}^0D$  = riqueza,  ${}^1D$  = número efectivo de especies comunes,  ${}^2D$  = número efectivo de especies dominantes, y la cobertura de muestreo (SC) para los ácaros en cada una de las condiciones del garambullo.

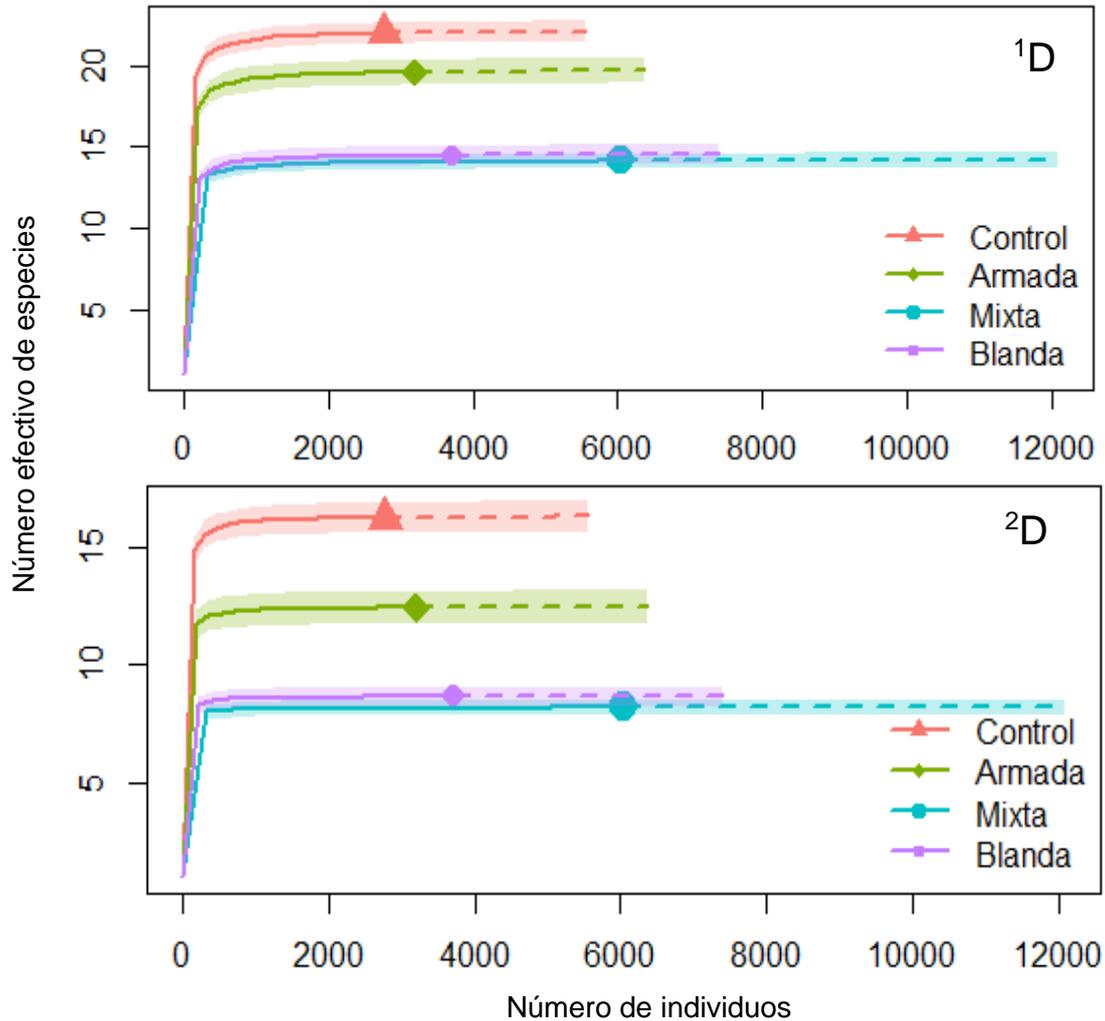
Condición	N	${}^0D$	${}^1D$	${}^2D$	SC
Control	2771	46	21.976	16.216	0.998
Armada	3190	51	19.576	12.409	0.997
Mixta	6047	48	14.132	8.182	0.999
Blanda	3700	49	14.485	8.638	0.998

En el caso de  ${}^0D$ , correspondiente a la riqueza de especies, se obtuvo una mayor riqueza en la condición armada, seguida por las condiciones blanda, mixta y control, aunque al considerar los valores de interpolación y extrapolación, junto con los límites de confianza, se observa que la diversidad en este orden no difiere entre los tratamientos (Fig. 15).



**Figura 15.** Curvas de interpolación y extrapolación de la riqueza ( ${}^0D$ ) de ácaros en cada una de las condiciones de herbivoría del garambullo. Se muestran los intervalos de confianza al 95%.

En el caso del número efectivo de especies comunes ( ${}^1D$ ) y de especies dominantes ( ${}^2D$ ), se obtuvieron patrones similares, con la condición control teniendo una mayor diversidad, y la condición armada en segundo lugar, mientras que las condiciones donde el garambullo exhibe un mayor daño: mixta y blanda, no difirieron entre sí, exhibiendo la menor diversidad (Fig. 16).



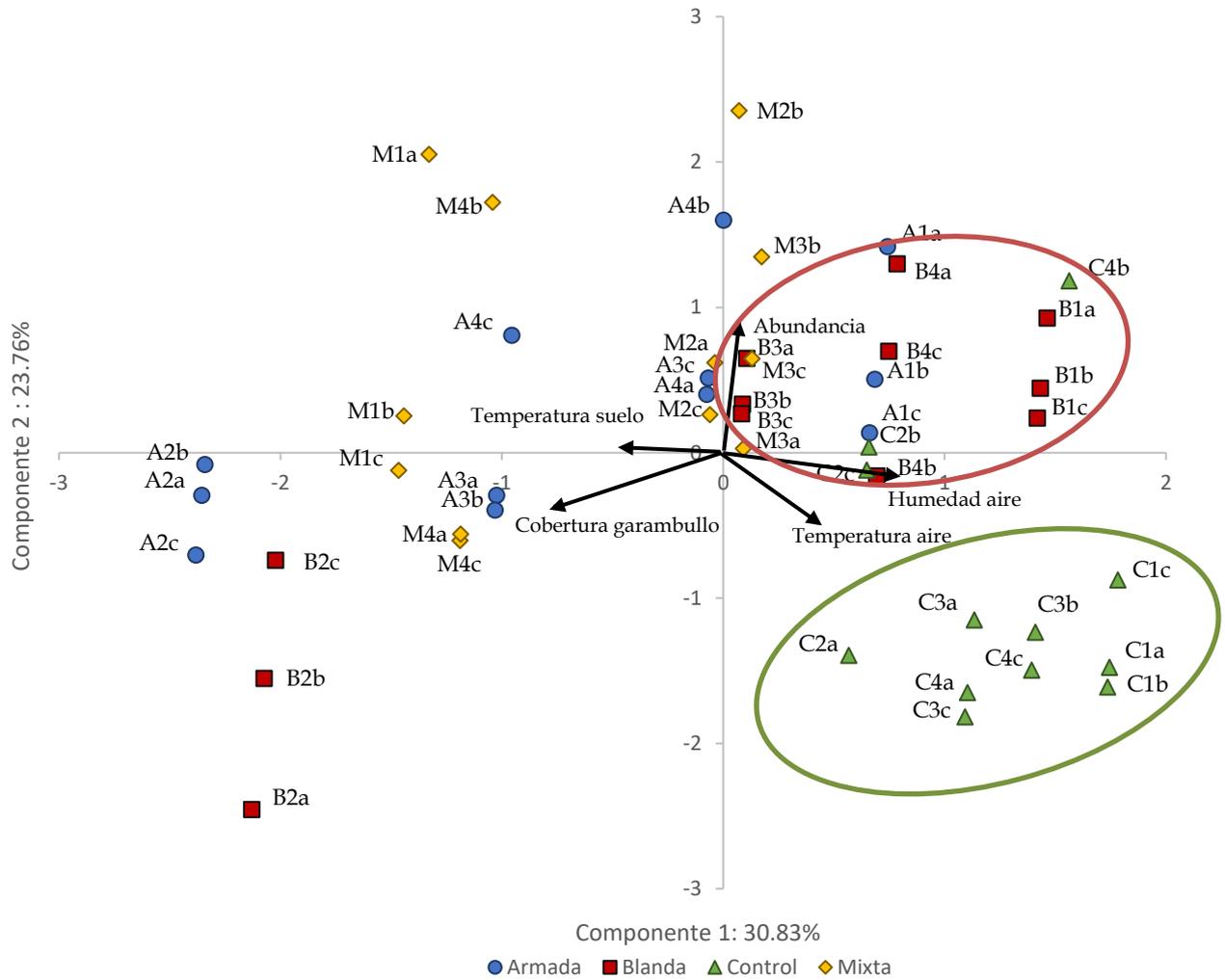
**Figura 16.** Curvas de interpolación y extrapolación de los números efectivos de especies comunes y especies dominantes de ácaros para cada una de las condiciones de herbivoría en *M. geometrizans*. Se muestran los intervalos de confianza al 95%.

### 7.3. Otros factores que afectan la herbivoría en el garrambullo.

En el análisis de componentes principales (PCA) se incluyeron las variables microambientales: humedad y temperatura en la zona aérea (a la altura de las ramas del garrambullo), temperatura del suelo, área de cobertura de los garrambullos y abundancia de la meso y macrofauna, se observó que 9 de los 12 puntos correspondientes a los garrambullos control se agruparon en un cuadrante respondiendo a las variables humedad y temperatura del suelo, mientras que 9 de las muestras correspondientes a la condición blanda formaron un grupo respondiendo a las variables de abundancia y humedad del aire (Fig. 17).

El 30.83% del modelo es explicado por el primer componente, y un 23.76% por el segundo, dando un total de 54.59%. Para el primer componente, las variables humedad del aire y

cobertura del garrambullo son las que aportan una mayor contribución, con un 75.9 %; en el caso del segundo componente, la abundancia de los artrópodos edáficos por sí sola aporta un 66.9% (Tabla 7).



**Figura 17.** Análisis de componentes principales para las condiciones del garrambullo, se señala con un ovalo verde a una agrupación de garrambullos de la condición control, y con un círculo rojo a un grupo de la condición blanda. Cada condición se representa con una forma y color. A= Armada, B= Blanda, C= Control, M= Mixta; los números representan a cada uno de los 4 individuos considerados en el estudio, y las letras minúsculas muestras distintas.

**Tabla 7.** Contribución por cada variable a la explicación del componente 1 y 2.

Variable	Contribución de la variable	
	Componente 1	Componente 2
Humedad aire	0.382	0.021
Temperatura aire	0.113	0.196
Temperatura suelo	0.125	0.001
Cobertura garambullo	0.377	0.113
Abundancia	0.003	0.669

## 8. DISCUSIÓN

De manera general, podemos decir que la presencia de los fitófagos en *M. geometrizzans* tiene efecto sobre la comunidad de meso y macrofauna del suelo asociada a los mismos, al referirnos a la abundancia, esta se incrementa en los garambullos con la presencia exclusiva de *T. martinezae* (la condición blanda), mientras que la diversidad resultó mayor en los garambullos sin presencia de fitófagos (la condición control), esto coincide, al menos en un patrón general con lo planteado en las hipótesis, se discute a detalle a continuación:

### 8.1. Riqueza y abundancia de la meso y macrofauna del suelo

La fauna del suelo en ambientes áridos y semi-áridos ha sido poco estudiada, para el caso del estado de Hidalgo, este representa el primer estudio taxonómico sobre los artrópodos del suelo, por lo cual, se esperaba que muchos de los registros obtenidos (Anexos 1-3) sean nuevos para el estado, obteniendo un orden, 22 familias y 37 géneros (Tabla 3). Esto resulta importante, pues tal como menciona Whitford (1996), muchos de los estudios llevados a cabo en ambientes áridos y semi-áridos se han realizado con experimentos de microcosmos, con pocos grupos, y a niveles taxonómicos de familia o superiores, lo cual dificulta vislumbrar la importancia de cada especie en el ecosistema, así como el nivel de redundancia funcional presente, por lo que conocer la identidad taxonómica de la comunidad edáfica en este tipo de

ambientes es fundamental, por ejemplo, para tener elementos para proponer acciones que mitiguen o ayuden a prevenir los procesos de desertificación (Whitford y Parker, 1989).

En los colémbolos, la familia Bourletiellidae, con el género *Bourletiella* representa un nuevo registro, este género de colémbolos ha sido reportado en ambientes semi-áridos y arenosos, como dunas costeras (Ellis, 1975), estepas (Flórián *et al.*, 2019), y en una cuenca en el desierto de Chihuahua (Loring *et al.*, 1988), por lo cual este registro en el estado de Hidalgo apunta a la afinidad de las especies del género a este tipo de ambientes.

En el caso de los ácaros, donde se obtuvo una identidad taxonómica con mayor resolución, es posible comparar las familias de ácaros con otros estudios en México que se han realizado en ambientes semi-áridos, encontrando varias familias coincidentes, por ejemplo, Estrada-Venegas y Sánchez-Rocha (1986) reportan 28 de las 47 familias encontradas en Hidalgo. En los trabajos de Sánchez-Chávez (2015) y de Ojeda y Gasca-Pineda (2019) se reportan 29 de las familias, y para el caso del trabajo de Sánchez-Rocha (2014) el número asciende a 34 familias. Las siguientes seis familias no habían sido reportadas en ninguno de los trabajos anteriores, y están presentes en Hidalgo: Ceratokalummidae, Oribatellidae, Phenopeloppidae, Phthiracaridae, Scutacaridae y Trombiculidae.

Por otro lado, las familias: Acaridae, Nanorchestidae, Ascidae, Cosmochthoniidae, Oppiidae, Oribatulidae, Bdellidae, Caeculidae, Caligonellidae, Cunaxidae, Eupodidae, Paratydeidae y Stigmaeidae se encuentran presentes tanto en este trabajo como los mencionados anteriormente, realizados en otras zonas semi-áridas del país, lo cual nos habla de la fuerte afinidad de estas familias hacia este tipo de ambientes.

Con base en los datos de Hoffmann y López-Campos (2000), y Palacios-Vargas e Iglesias (2004), en este estudio se obtuvieron nuevos registros para los ácaros: 21 a nivel familia y 36 géneros.

Los nuevos registros a nivel género se encontraron principalmente en Prostigmata, con 21 nuevos registros, es decir, un total del 72% de los géneros encontrados no habían sido reportados para el estado; en el caso de Oribatida el 54% son nuevos registros; el único género encontrado en Endeostigmata también es novedoso para el estado, mientras que en Mesostigmata, se encuentra sólo un nuevo registro, dado que dos de las familias no fueron identificadas a género en este grupo (Fig. 6).

Al analizar la abundancia de la meso y macrofauna del suelo, se encontró que los garrambullos con condición mixta tuvieron un mayor número de individuos, seguidos por la condición blanda (Fig. 7), lo cual coincide con lo propuesto en las hipótesis, ya que estos son los garrambullos con presencia de *T. martinezae*, la cual genera un mayor daño en el garrambullo; a pesar de ello, esta diferencia no resultó significativa, probablemente atribuible a un enmascaramiento dadas las respuestas diferenciales de cada grupo taxonómico, por lo cual se optó por analizar por separado a los ácaros y al resto de los artrópodos edáficos, ya que los primeros representan el 81% de la abundancia total.

Al considerar la abundancia para los artrópodos excluyendo a los ácaros (Fig. 9) se encontró una mayor abundancia para la condición blanda, mientras que la menor fue reportada para la condición control, con las condiciones armada y mixta con valores intermedios, esto refleja que el patrón general de estos taxa coincide con lo planteado en la hipótesis, pues en la condición blanda es donde se presenta el mayor daño al garrambullo, incluyendo la caída de ramas, que representa un mayor aporte de materia orgánica en esta condición.

Al estudiar la abundancia de algunos taxa, destacan algunos órdenes, por ejemplo, aquellos que fueron encontrados en sólo una condición (Diplura, Embioptera y Neuroptera), lo cual probablemente podría ser explicado por la baja abundancia (uno, cuatro y siete individuos respectivamente) de estos taxa, y la heterogeneidad y distribución en parches de la biota del suelo (Ettema y Wardle, 2002), más que por alguna respuesta a las interacciones del garrambullo sobre el suelo. El resto de los taxa (Coleoptera, Diptera, Pseudoscorpionida, Thysanoptera) presentan una abundancia uniforme entre las condiciones, por lo cual no resultan afectados por las distintas condiciones de herbivoría en cada uno de los garrambullos, por otro lado, las arañas tuvieron una mayor abundancia en los garrambullos de condición blanda, probablemente atribuible a un mayor número de sus potenciales presas en estos garrambullos (Fig. 10).

Por otro lado, los hemípteros, colémbolos y psocópteros presentaron abundancias de cientos (Fig. 11), los primeros fueron abundantes en las condiciones armada, mixta y blanda, que son las que presentan infestación por estos hemípteros en la parte aérea; mientras que en el suelo de garrambullos con condición control, apenas fueron encontrados 43 individuos; muchos de los hemípteros encontrados corresponden a los primeros estadios de desarrollo, por lo que no se descarta puedan pertenecer a los estadios móviles de *Toumeyella martinezae* y/o *Opuntiaspis philococcus*. El caso de Collembola es destacable, pues presenta abundancias muy superiores en las condiciones control y mixta, principalmente debido a

individuos del género *Sphaeridia*, lo cual nos demuestra que, a niveles específicos, los artrópodos pueden comportarse diferencialmente de acuerdo con otras variables que no fueron medidas en este estudio.

Se encontró a los ácaros como el taxón más diverso, representando el 81% del total de los artrópodos encontrados (Fig. 8), lo que coincide con lo reportado por Orgiazzi *et al.* (2016), donde menciona que los ácaros representan más del 40% de los microartrópodos del suelo; además, probablemente encontrar un porcentaje tan elevado en el presente estudio podría responder a la fecha de colecta, correspondiente al periodo de lluvias, donde los ácaros son más abundantes (Chikoski *et al.* 2006), debido a las condiciones de humedad más adecuadas. Además, con el aporte de algunos grupos, que tienen la capacidad de incrementar su número poblacional cuando existe recurso disponible, como es el caso del astigmatino *Tyrophagus*, que en condiciones de laboratorio (22 °C) se ha observado que una hembra puede poner en promedio  $327.3 \pm 81.5$  huevos en su ciclo de vida reproductivo, el cual dura bajo estas condiciones  $36.5 \pm 8.7$  días (Barker, 1967). En el caso del suelo debajo del garambullo en este estudio, se encontró en una muestra correspondiente a la condición mixta con aproximadamente 1,352 individuos de este género.

Por otra parte, autores como Orgiazzi *et al.*, (2016) mencionan que la abundancia de ácaros en el suelo de desiertos tropicales es de unos cientos por metro cuadrado; en comparación con lo reportado en este estudio, en donde la abundancia por metro cuadrado se encontró en el orden de los miles, lo que nos habla de un ambiente con condiciones menos limitantes comparado con el desierto, probablemente atribuible a las condiciones particulares formadas por el garambullo al actuar como una isla de recursos y con condiciones microclimáticas particulares (Liu *et al.*, 2016a). Sin embargo, al comparar con ecosistemas como los bosques templados, donde las abundancias son superiores a un millón de individuos por metro cuadrado (Orgiazzi *et al.*, 2016), la abundancia en este sitio dista de los ecosistemas que presentan mayor abundancia.

Con respecto a los análisis sobre los grupos de ácaros, se encontró a los Prostigmata como el más diverso y abundante en el suelo (Fig. 12), lo cual coincide con lo reportado para este tipo de ambientes (Estrada-Venegas y Sánchez-Rocha, 1986; Cepeda y Whitford, 1990; Noble *et al.*, 1996; Neher *et al.*, 2009; Sánchez-Rocha, 2014; Ojeda y Gasca-Pineda, 2019). Sin embargo, algunos estudios en sistemas áridos y semi-áridos reportan a los oribátidos como aquellos con mayor abundancia y diversidad (Wallwork, 1972; Miguel, 2013; Sánchez-Chávez, 2015; Juan-Ovejero *et al.*, 2023). Es destacable que en el trabajo de Wallwork (1972) se describe al suelo del sitio de estudio como partículas de suelo empaquetadas junto con el

mantillo por micelio de color blanco, mientras que los otros dos estudios fueron realizados en zonas con CBS; la predominancia de los oribátidos en estos estudios podría responder a que estas asociaciones con hongos, microorganismos y el suelo puede proveer de una mayor cantidad de materia orgánica, y por tanto de recurso para los oribátidos, los cuales son más abundantes en sitios con alta cantidad de materia orgánica, donde pueden alimentarse directamente del mantillo y los hongos que ahí se desarrollan (Villarreal-Rosas *et al.* 2014).

La abundancia de los ácaros se comportó, en orden descendente, de la siguiente forma en las condiciones: mixta, blanda, armada y control (Fig. 13), esto podría ser coincidente con el aporte de materia orgánica debido al daño ocasionado por los herbívoros a través de la caída de ramas, tal como lo menciona Martínez-Hernández (2017) para la condición blanda; ya que la mayor abundancia fue reportada en las condiciones con mayor daño; del mismo modo, géneros como *Aphelacarus*, *Tydeus* y *Tyrophagus* fueron más abundantes en estas condiciones, lo cual podría sugerir que están aprovechando esos recursos. Mientras que, la menor abundancia en los gámbulos con menor daño nos indica una menor cantidad de recursos disponibles, al no añadirse materia orgánica por el daño provocado a los gámbulos, por lo cual la comunidad de meso y macrofauna estaría regulada por fuerzas *bottom-up*, con mayor abundancia en los sitios con mayor aporte de materia orgánica al suelo (Cole *et al.* 2006).

Al separar las familias de ácaros de acuerdo con gremios tróficos (Schuster, 1956), no se obtuvieron diferencias significativas de la abundancias entre las condiciones para los depredadores y macrofitófagos, esto podría sugerir para el caso de los depredadores una alta proporción de depredadores generalistas, los cuales al poder alimentarse de distintos microartrópodos, no se verían afectados por las interacciones de los herbívoros en la zona aérea del gámbulo; algo similar ocurriría con los macrofitófagos, ya que al alimentarse directamente del mantillo, no verían afectado de forma significativa su recurso por las diferentes condiciones causadas por los herbívoros en el gámbulo. Por otro lado, los microfitófagos presentaron una diferencia significativa entre la condición control y la mixta, teniendo esta última la mayor abundancia (Fig. 14), lo cual podría estar relacionado con su forma de alimentación, los microfitófagos se alimentan de hongos, musgos, líquenes y algas; en el sitio de estudio, una fuente de hongos podría resultar la proveniente de la descomposición de las ramas caídas en aquellos gámbulos con mayor daño (condición mixta y blanda), lo cual explicaría la mayor abundancia de los microfitófagos en estos gámbulos.

## 8.2. Composición y diversidad de los artrópodos edáficos

Al realizar la identificación a nivel orden (excepto Acari y Collembola) de los artrópodos edáficos, se encontraron 12 órdenes, 8 de los cuales estuvieron en las cuatro condiciones (Tabla 4), lo cual nos sugiere que a este nivel taxonómico, los órdenes no se ven afectados por la condición de herbivoría, sin embargo, se precisa una mejor resolución taxonómica que permita encontrar patrones de algunas familias, géneros o especies que respondan ante los cambios causados por los fitófagos en *M. geometrizarans*, por lo que estudios posteriores deberían centrarse en una identificación taxonómica más precisa, a pesar de ello, se lograron hacer algunas observaciones importantes, por ejemplo, destaca el hallazgo en la condición mixta de cuatro individuos pertenecientes al orden Embioptera, el cual representa el primer reporte de este orden en el estado de Hidalgo, los embiópteros son un grupo raramente colectado o detectado, debido a que viven en redes de seda debajo de rocas o troncos, las cuales secretan desde glándulas en el tarso del primer par de patas, muchas especies están asociadas a climas secos, alimentándose de plantas (Curtiss *et al.*, 2022).

Del mismo modo, la mayoría de los hemípteros colectados corresponden a fases móviles de la superfamilia Coccoidea, por lo que su identificación taxonómica podría indicar si se tratan de *T. martinezae* y *O. philococcus*, aunque en la descripción de su ciclo de vida no se menciona que se desarrollen en el suelo (Martínez-Hernández, 2015), podrían formar parte de la red trófica al ser presa de algunos de los depredadores del suelo, por otra parte, su ocurrencia en el suelo también podría deberse a procesos de dispersión, mediados por las hormigas, por ejemplo, en la condición mixta se registró una mayor abundancia de himenópteros, la mayoría de los cuales corresponde a la familia Formicidae, es necesaria la identificación a especie, para corroborar que se traten de *L. apiculatum*, la hormiga que atiende a *T. martinezae*.

Para los colémbolos, las condiciones control y mixta presentaron siete y seis géneros respectivamente, frente a sólo dos en las condiciones blanda y armada (Tabla 5), este número es menor comparado con un estudio llevado en el mismo estado, con clima semi-árido, donde se registraron 29 y 19 especies en dos sitios (Cutz-Pool *et al.*, 2007), esto podría deberse a la temporalidad, pues la colecta se realizó sólo en un mes, por lo cual no representa enteramente la comunidad de colémbolos edáficos en el sitio de estudio, a diferencia del estudio mencionado, donde se realizaron colectas bimensuales.

Para calcular los números de Hill, se utilizaron a los ácaros, ya que fueron identificados a género, con una riqueza de 59 géneros y representan el 81% de la abundancia total; de

acuerdo con el cálculo del número efectivo de especies, a pesar de que no hay diferencia entre las condiciones en el primero orden de diversidad ( $^0D$ ) (Fig. 15), en los siguientes órdenes ( $^1D$  y  $^2D$ ) se puede observar un patrón con la mayor diversidad presente en la condición control, donde los fitófagos no han logrado establecerse en la planta, seguida por la condición armada, mientras que las condiciones blanda y mixta, donde *T. martinezae*, el fitófago que causa mayor daño ha logrado establecerse, tienen la menor diversidad y no exhiben diferencia entre ellas (Fig. 16); esto apoya la hipótesis planteada, ya que los garrambullos en la condición control presentaron la mayor diversidad, lo que podría reflejar una mejor calidad en la materia orgánica que se integra al sistema desde los garrambullos sin fitófagos, ya que algunos autores señalan que menor calidad de materia orgánica podría generar una red trófica menos compleja y por lo tanto con menor diversidad (Doblas-Miranda, *et al.*, 2009; Sauvadet, *et al.*, 2016).

Del mismo modo, la diversidad está relacionada con la estabilidad, resistencia y resiliencia de un ecosistema (Wall, 2004); al cambiar la escala y centrarnos en las interacciones sobre y debajo del suelo a través de la planta, podemos considerar que una mayor diversidad, permite a las plantas mejores defensas, a través de un mayor acceso a los nutrientes al fragmentar la materia orgánica y favorecer la descomposición de la misma, y a través de la formación de canales que facilitan la absorción de agua, el intercambio de gases y absorción de nutrientes (Callejas-Chavero *et al.*, 2015; Prieto *et al.*, 2005; Bedano *et al.*, 2005); por lo cual, que la condición control y armada tengan una mayor diversidad podría sugerir que los ácaros del suelo mejoran las defensas de la planta ante el ataque de los fitófagos; a pesar de ello, estudios posteriores deberían centrarse en comprobar la redundancia funcional de la comunidad, con el fin de corroborar que con la pérdida de algunos taxa, se pierdan funciones que no puedan llevarse a cabo por alguno distinto.

Cabe señalar que el muestreo se realizó sólo en temporada de lluvias, por lo cual posteriormente se requiere analizar los patrones temporales, ya que se ha reportado que la comunidad de ácaros del suelo responde fuertemente a los cambios temporales en ambientes áridos y semi-áridos, marcados fuertemente por la precipitación y, por tanto, humedad del suelo (Sánchez-Chávez, 2015).

### **8.3. Otros factores que afectan la herbivoría en el garrambullo**

Los ambientes áridos y semi-áridos ofrecen una serie de condiciones ambientales muy particulares, que influyen en la comunidad edáfica, por ejemplo, suelen presentar una menor abundancia debido a que muchos de los artrópodos del suelo, como los ácaros y colémbolos

aumentan su abundancia conforme aumenta la humedad del suelo, siendo este uno de los factores limitantes en estos grupos de animales (Chikoski, *et al.* 2006). Es probable que éste, junto con otros factores ambientales como la temperatura del suelo (Whitford, 1996) moldeen una comunidad de artrópodos con adaptaciones particulares para estas condiciones; en este trabajo el PCA demostró que ambos factores son los que explican la mayor parte de la variación de los datos.

Además de los factores propios del suelo, existen factores microclimáticos que podrían estar involucrados en la explicación de las distintas condiciones del garambullo en el sitio de estudio. De acuerdo con el PCA (Fig. 17), los garambullos de la condición control se agrupan por la humedad y temperatura del aire, lo que sugiere que estos factores ambientales podrían ser fundamentales para que el garambullo no presente herbívoros en la parte aérea, o bien, podría indicar que, a consecuencia de la presencia de estos herbívoros, las condiciones microclimáticas proporcionadas por el propio garambullo se ven afectadas.

Del mismo modo, otro grupo correspondiente a la condición blanda resultó agrupado por la abundancia y humedad del aire, lo cual se explica al tener una abundancia alta en la condición blanda, muy probablemente atribuible a la caída de las ramas, a causa de los herbívoros, lo cual también podría estar afectando la humedad en la parte aérea de la planta, ya que la pérdida de estas ramas disminuiría la capacidad de retención de humedad en el aire por parte de la planta. La condición mixta y armada no mostraron grupos bien definidos a causa de estas variables, aunado a que los dos componentes del PCA explican sólo el 54.6% del modelo, sugiere que la explicación de las distintas condiciones del garambullo depende de más variables, por lo cual conocer las características del suelo, así como otros taxa de la biota del suelo como las bacterias y hongos clarificará las interacciones sobre y debajo del suelo en el garambullo.

## 9. CONCLUSIONES

Las interacciones de herbivoría que ocurren en *M. geometrizans* en el matorral xerófilo de Huichapan, Hidalgo influyen sobre las características de la comunidad del suelo asociados a ellos:

La abundancia es mayor en los individuos con presencia de *T. martinezae*, lo cual es probablemente atribuible a un mayor aporte de materia orgánica al suelo, causado por el daño provocado por estos herbívoros. Sin embargo, este patrón no se ve reflejado en todos los grupos, sino que destaca en aquellos con hábitos alimenticios microfitófagos.

Por otro lado, la diversidad resultó mayor en los garambullos con menor daño, lo cual podría ser resultado de fuerzas *bottom-up*, al tener una mejor calidad de materia orgánica y un efecto *top-down* reflejado en las ventajas obtenidas por la planta.

Algunos factores microclimáticos demostraron tener relación en determinar la herbivoría en los garambullos, lo cual sugiere una respuesta multifactorial, por lo cual futuros estudios deberían considerar variables como las propiedades físicas y químicas del suelo y a otros miembros de la biota del suelo como hongos y bacterias.

Por último, es importante resaltar la importancia taxonómica del estudio, ya que representa un importante avance en el conocimiento de la artropodofauna del suelo para el estado de Hidalgo, al presentar un listado taxonómico con un nuevo registro a nivel orden, 22 de familia y 37 géneros para el estado, lo cual suma al estudio de los ecosistemas semiáridos del país.

## 10. LITERATURA CONSULTADA

- Alvarado-Jaramillo, V., y Santín-Calva, J. (2017). Plagas y enfermedades de la tuna *Opuntia ficus indica* L. en las condiciones ecológicas de la provincia de Loja. *Bosques Latitud Cero*, 7(1): 1-17. ISSN: 2528-7818
- Andriuzzi, W.S., y Wall, D.H. (2017). Responses of belowground communities to large aboveground herbivores: Meta-analysis reveals biome-dependent patterns and critical research gaps. *Global Change Biology*, 23: 3857-3868. DOI: 10.1111/gcb.13675
- Arias, S., Gama-López, S., Guzmán-Cruz, L., y Vázquez-Benítez, B. (2012). Cactaceae. *Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán*, 95: 1-235. ISBN: 9786070230790
- Arriaga, L., y Maya, Y. (2007). Spatial variability in decomposition rates in a desert scrub of Northwestern Mexico. *Plant Ecology*, 189: 213-225. DOI: 10.1007/s11258-006-9178-4
- Balogh, J., y Balogh, P. (1988) *Oribatid mites of the Neotropical Region I*. Elsevier, Países Bajos. ISBN: 9780444989352
- Balogh, J., y Balogh, P. (1990) *Oribatid mites of the Neotropical Region II*. Elsevier, Países Bajos. ISBN: 9780444988096
- Barber, N., Adler, L., y Bernardo, H. (2011). Effects of above- and belowground herbivory on growth, pollination, and reproduction in cucumber. *Oecologia*, 165: 377-386. DOI: 10.1007/s00442-010-1779-x
- Barber, N., Milano, N., Kiers, E., Theis, N., Bartolo, V., Hazzard, R., y Adler, L. (2015). Root herbivory indirectly affects above- and below-ground community members and directly reduces plant performance. *Journal of Ecology*, 103 (6): 1509-1518. DOI: 10.1111/1365-2745.12464
- Bardgett, R., Denton, C., y Cook, R. (1999). Below-ground herbivory promotes soil nutrient transfer and root growth in grassland. *Ecology Letters*, 2 (6): 357-360. DOI: 10.1046/j.1461-0248.1999.00001.x
- Barker, P. (1967). The effects of high humidity and different temperatures on the biology of *Tyrophagus putrescentiae* (Schrank) (Acarina: Tyroglyphidae). *Canadian Journal of Zoology*, 45 (1): 91-96. DOI:10.1139/z67-011

- Bedano, J., Cantú, P., y Doucet, M. (2005). Abundance of soil mites (Arachnida: Acari) in natural soil of central Argentina. *Zoological Studies*, 44: 506–512.
- Bezemer, T., Wagenaar, R., Van Dam, N., y Wäckers, F. (2003). Interactions between above- and belowground insect herbivores as mediated by the plant defense system. *Oikos*, 101 (3): 555-562. DOI: 10.1034/j.1600-0706.2003.12424.x
- Callejas-Chavero, A., Castaño-Meneses, G., Razo-González, M., Pérez-Velázquez, D., Palacios-Vargas, J., y Flores-Martínez, A. (2015). Soil Microarthropods and Their Relationship to Higher Trophic Levels in the Pedregal de San Angel Ecological Reserve, Mexico. *Journal of Insect Science*, 15 (1): 1-9. DOI: 10.1093/jisesa/iev039
- Callejas-Chavero, A., Martínez-Hernández, D., Flores-Martínez, A., Moncada-Orellana, A., Díaz-Quñones, Y., y Vargas-Mendoza, C.F. (2020). Herbivory in Cacti: Fitness Effects of Two Herbivores, One Tending-Ant on *Myrtillocactus geometrizans* (Cactaceae). En: Núñez-Farfán, J., y Valverde, P.L. (eds.). *Evolutionary Ecology of plant-herbivore interaction*. Suiza: Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-46012-9\_6.
- Callejas-Chavero, A., Martínez-Hernández, D.G., Vargas-Mendoza, C.F., y Flores-Martínez, A. (2023). Herbivory in *Myrtillocactus geometrizans* (Cactaceae): Do Parasitoids Provide Indirect Defense or a Direct Advantage?. *Plants*, 12, 47: 1-14. DOI: 10.3390/plants12010047
- Cepeda, J., y Whitford, W. (1990). Decomposition Patterns of Surface Leaf Litter of Six Plant Species Along a Chihuahuan Desert Watershed. *American Midland Naturalist*, 123(2): 319-330. DOI: 10.2307/2426560
- Céspedes, C., Salazar, J., Martínez, M., y Aranda, E. (2005). Insect growth regulatory effects of some extracts and sterols from *Myrtillocactus geometrizans* (Cactaceae) against *Spodoptera frugiperda* and *Tenebrio molitor*. *Phytochemistry*, 66: 2481-2493. DOI: 10.1016/j.phytochem.2005.07.010
- Chikoski, J., Ferguson, S., y Meyer, L. (2006). Effects of water addition on soil arthropods and soil characteristics in a precipitation-limited environment. *Acta Oecologica*, 30 (2): 203-211. DOI: 10.1016/j.actao.2006.04.005
- Cole, L., Bradford, M.A., Shaw, P., y Bardgett, R. (2006). The abundance, richness and functional role of soil meso- and macrofauna in temperate grassland – A case study. *Applied Soil Ecology*, 33(2): 186-198. DOI: 10.1016/j.apsoil.2005.11.003

- Curtiss, R.T., Skoda, A., Bossert, S., y Orpet, R.J. (2022). First record and long-term establishment of the order Embioptera in Washington State. *Proceedings of the Entomological Society of Washington*, 124 (2): 195-201. DOI:10.4289/0013-8797.124.2.1958
- Cutz-Pool, L.Q., Palacios-Vargas, J.G., Castaño-Meneses, G., y García-Calderón, N. (2007). Edaphic collembola from two agroecosystems with contrasting irrigation type in Hidalgo State, Mexico. *Applied Soil Ecology*, 36(1): 46-52. DOI: 10.1016/j.apsoil.2006.11.009
- Da Silva, G., Metzethin, M., Da Silva, O., y Juárez, N. (2016). Catalogue of the mite family Tydeidae (Acari: Prostigmata) with the world key to species. *Zootaxa*, 4135 (1): 1-68. DOI: 10.11646/zootaxa.4135.1.1
- De Deyn, G., y Van der Putten, W. (2005). Linking aboveground and belowground diversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 20 (11): 625-633. DOI: 10.1016/j.tree.2005.08.009
- De la Peña, E. (2009). Efectos de la biota edáfica en las interacciones planta-insecto a nivel foliar. *Ecosistemas*, 18: 64–78. ISSN: 1697-2473.
- Doblas-Miranda, E., Sánchez-Piñero, F., y González-Megías, A. (2009). Different structuring factors but connected dynamics shape litter and belowground soil macrofaunal food webs. *Soil Biology and Biochemistry*, 41 (12): 2543-2550. DOI: 10.1016/j.soilbio.2009.09.014
- Eisenhauer, N., Antunes, P., Bennett, A., Birkhofer, K., Bissett, A., Bowker, M., Caruso, T., Chen, B., Coleman, D., de Boer, W., de Ruiter, P., DeLuca, T., Frati, F., Griffiths, B., Hart, M., Hättenschwiler, S., Haimi, J., Heethoff, M., Kaneko, N., Kelly, L., Leinaas, H., Lindo, Z., Macdonald, C., Rillig, M., Ruess, L., Scheu, S., Schmidt, O., Seastedt, T., van Straalen, N., Tiunov, A., Zimmer, M., y Powell, J. (2017). Priorities for research in soil ecology. *Pedobiología*, 63: 1-7. DOI: 10.1016/j.pedobi.2017.05.003
- Ellis, W.N. (1975). *On Bourletiella (Cassagnaudiella) pruinosa* (Tullberg, 1871) and its allies (Collembola: Sminthuridae). *Bulletin Zoologisch Museum, Universiteit Van Amsterdam*, 4(9): 69-81.
- Estrada-Venegas, E., y Sánchez-Rocha, I. (1986). Ácaros del suelo de dos zonas del Valle de Tehuacán, Puebla. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, E.N.E.P. Iztacala.

- Ettema, C., y Wardle, D. (2002). Spatial soil ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 17 (4): 177-183. DOI: 10.1016/S0169-5347(02)02496-5
- Fajardo-Swift, S. (1996). Hawaiian Raphignathoidea: Family Caligonellidae (Acari: Prostigmata), with descriptions of five new taxa and a key to genera and species. *Annals of the Entomological Society of America*, 89 (3): 313-327. DOI: 10.1080/01647959608684083
- Fan, Q., Flechtmann, C., y De Moraes. (2016). Annotated catalogue of Stigmaeidae (Acari: Prostigmata), with a pictorial key to genera. *Zootaxa*, 4176(1): 1-199. DOI: 10.11646/zootaxa.4176.1.1
- FAO. (2009). *Guía para la descripción de suelos* (4ªed.). FAO, Roma, Italia, 99 pp. ISBN: 978-92-5-305521-0
- Fenton, G. (1947). The Soil Fauna: With Special Reference to the Ecosystem of Forest Soil. *The Journal of Animal Ecology*, 16(1): 76-93. DOI: 10.2307/1508
- Flórián, N., Ladányi, M., Itzész, A., Kröel-Dulay, G., Ónodi, G., Mucsi, M., Szili-Kovács, T., Gergócs, V., Dányi, L., y Dombos, M. (2019). Effects of single and repeated drought on soil microarthropods in a semi-arid ecosystem depend more on timing and duration than drought severity. *PLOS ONE*, 14 (7): 1-16. DOI:10.1371/journal.pone.0219975
- García-Najar, M. (2017). Efecto de la herbivoría sobre la germinación y establecimiento de *Myrtillocactus geometrizans* (Cactaceae) en condiciones de invernadero. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Gerrard, J. (2000). *Fundamentals of Soils*. Routledge, Londres, Reino Unido, 230 pp. ISBN: 9780415170055
- Henrickson, J., y Johnston, M. (1986). Vegetation and community types of the Chihuahuan Desert. En: Barlow, J., Powell, A., y Timmermann, B. (eds.). *Second Symposium on Resources of the Chihuahuan Desert Region, United States and Mexico*. Estados Unidos: Chihuahuan Desert Research Institute. ISBN: 09-358-68267
- Hernández, H., y Gómez-Hinostrosa, C. (2005). *Cactus diversity and endemism in the Chihuahuan Desert Region*. En: Cartron, J., Ceballos, G., y Felger, R. (eds.). *Biodiversity, ecosystems, and conservation in Northern Mexico*. Estados Unidos: Oxford University Press. 514 pp. ISBN: 978-0195156720

- Hoffmann, A., y López-Campos, G. (2000). *Biodiversidad de los ácaros en México*. México: CONABIO. 230 pp. ISBN: 970-9000-14-4
- Hsieh, T.C., Ma, K.H., y Chao, A. (2016). iNEXT: An R package for rarefaction and extrapolation of species diversity (Hill numbers). *Methods in Ecology and Evolution*, 7, 1451-1456.
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Huichapan, Hidalgo*. (Consultado en: [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/13/13029.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/13/13029.pdf)).
- Islas-Estrada, S. (2021). Ciclo de vida de *Opuntiaspis philococcus* (Hemiptera: Diaspididae) e identificación de sus enemigos naturales, asociados a *Myrtillocactus geometrizans* (Cactaceae) en Hidalgo, México. Tesis de Licenciatura. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN, México.
- Jiménez, C. (2011). Las cactáceas mexicanas y los riesgos que enfrentan. *Revista Digital Universitaria*, 12 (1): 3-23. ISSN: 1067-6079
- Jenny, H. (1941). *Factors of soil formation: A system of quantitative pedology*. McGraw-Hill, Nueva York, Estados Unidos, 282 pp. ISBN: 978-0486681283
- Juan-Ovejero, R., Álvarez-Rogel, J., Peñalver-Alcalá, A., Verweij, R.A., Van Gestel, C., y González-Alcaraz, M. (2023). Microarthropod communities act as functional mediators of ecosystem recovery in abandoned metal (loid) mine tailings in semiarid areas. *Science of the Total Environment*, 881: 1-9. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163394
- Kalev, S., y Toor, G. (2017). The composition of soils and sediments. En: Török, B., y Dransfield, T. (eds.). *Green chemistry. An inclusive approach*. Países Bajos: Elsevier. 1043 pp. ISBN: 978-0-12-809270-5
- Kaplan, L., Halitsch, R., Kessler, A., Rehill, B., Sardanelli, S., y Denno, R. (2008). Physiological integration of roots and shoots in plant defense strategies links above and belowground herbivory. *Ecology Letters*, 11: 841–851. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2008.01200.x

- Khanjani, M., Mohammadi, E., Izadi, H., y Khanjani, M. (2012). A new species of *Linotetranus* (Acariformes: Tetranychoidae: Linotetranae) from the Southeast of Iran. *Acarologia*, 52(4): 419-424. DOI: 10.1051/acarologia/20122070
- Khaustov, A. (2014). A new genus and species in the mite family Eupodidae (Acari, Eupodoidea) from Crimea. *ZooKeys*, 422: 11-22. DOI: 10.3897/zookeys.422.7802
- Krantz, G., y Walter, D. (2009). *A manual of Acarology* (3° ed.). Texas Tech University Press, Texas, Estados Unidos. 807 pp. ISBN: 978-0896726208
- Lavelle, P., Blanchart, E., Martin, A., Spain, A., y Martin, S. (1992). Impact of soil fauna on the properties of soils in the humid tropics. En: Lal, R., y Sánchez, P (eds.) *Myths and Science of Soils of the Tropic*. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc. 185pp. ISBN: 978-0891188001
- Lavelle, P., y Spain, A. (2005). *Soil Ecology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda, 654 pp. DOI: 10.1007/0-306-48162-6
- Liu, R., Zhao, H., Zhao, X., y Drake, S. (2011). Facilitative effects of shrubs in shifting sand on soil macro-faunal community in Horqin Sand Land of Inner Mongolia, Northern China. *European Journal of Soil Biology*, 47 (5): 316-321. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2011.07.006
- Liu, R., Zhu, F., y Steinberger, Y. (2015). Effect of shrub microhabitats on aboveground and belowground arthropod distribution in a desertified steppe ecosystem. *Polish Journal of Ecology*, 63 (4): 534-548. DOI: 10.3161/15052249PJE2015.63.4.006
- Liu, R., Pen-Mouratov, S., y Steinberger, Y. (2016a). Shrub cover expressed as an 'arthropod island' in xeric environments. *Arthropod-Plant Interactions*, 10: 393-402. DOI: 10.1007/s11829-016-9450-z
- Liu, R., Zhu, F., y Steinberger, Y. (2016b). Changes in ground-dwelling arthropod diversity related to the proximity of shrub cover in a desertified system. *Journal of Arid Environments*, 124: 172-179. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2015.08.014
- Liu, R., y Steinberger, Y. (2017). Seasonal distribution and diversity of ground-active arthropods between shrub microhábitats in the Negev Desert, Israel. *Arid Land Research and Management*, 32 (1): 91-110. DOI: 10.1080/15324982.2017.1389774

- López-Galindo, F., Muñoz-Iniestra, D., Hernández-Moreno, M., Soler-Aburto, A., Castillo-López, M., y Hernández-Arzate, I. (2003). Análisis integral de la toposecuencia y su influencia en la distribución de la vegetación y la degradación del suelo en la Subcuenca de Zapotitlán Salinas, Puebla. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 56(1): 19-41. DOI: 10.22201/igl.14053322p.BSGM560103
- Loring, S.L., Weems, D.C., y Whitford, W. (1988). Abundance and diversity of surface-active Collembola along a watershed in the Northern Chihuahuan Desert. *The American Midland Naturalist*, 119(1): 21-30. DOI: 10.2307/2426050
- MacArthur, R.H., y Wilson, E.O. (1963). An equilibrium theory of insular zoogeography. *Evolution*, 17 (4): 373-387. DOI: 10.2307/2407089
- Martínez-Hernández, D. (2015). Efecto de *Liometopum apiculatum* (Hymenoptera: Formicidae) sobre la tasa de parasitoidismo de *Toumeyella martinezi* (Hemiptera: Coccidae) asociados a *Myrtillocactus geometrizans* (Cactaceae) en un matorral xerófilo de Huichapan, Hidalgo. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Martínez-Hernández, D. (2017). Efecto de las interacciones que establecen los herbívoros *Toumeyella martinezi* y *Opuntiaspis philococcus* sobre la calidad y reproducción de *Myrtillocactus geometrizans*. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Martínez-Hernández, D., Arriola-Padilla, V., Callejas-Chavero, A., González-Hernández, H., y Gijón-Hernández, A. (2015). Biología de la escama blanda *Toumeyella martinezi* Kondo y González (Hemiptera: Coccidae) del Garambullo (*Myrtillocactus geometrizans* (mart. ex pfeiff) console) en Huichapan, Hidalgo. *Entomología Mexicana*, 2: 172-179. ISSN: 2448-475X
- Martínez-Hernández, D., y Callejas-Chavero, A. (2015). Efecto mutualista de *Liometopum apiculatum* (Hymenoptera: Formicidae) sobre la tasa de parasitoidismo en *Toumeyella martinezi* (Hemiptera: Coccidae) asociados a *Myrtillocactus geometrizans* (Cactaceae). En: Castaño-Meneses, G., Vázquez-Bolaños, M., Navarrete-Heredia, J., Quiroz-Rocha, G., y Alcalá-Martínez, I. (eds.). *Avances de Formicidae en México*. Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México, 210 pp. ISBN: 978-607-9450-01-4

- Meloni, F., Civieta, B., Zaragoza, J., Moraza, M., y Bautista, S. (2020). Vegetation pattern modulates ground arthropod diversity in semi-arid mediterranean steppes. *Insects*, 11 (1): 1-17. DOI:10.3390/insects11010059
- Menta, C. (2012). Soil fauna diversity-function, soil degradation, biological indices, soil restoration. En: Lameed, G. (ed.) *Biodiversity conservation and utilization in a diverse world*. Intechopen. DOI: 10.5772/3330
- Miguel, J. (2013). Fauna de costras biológicas y suelo de islas de recursos formadas por *Mimosa luisana*, en el Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. FES Zaragoza.
- Monreal-Vargas, C., Espitia-Méndez, E., y Escandón-Quiroz, O. (2014). Hongos patógenos del garambullo *Myrtillocactus geometrizans* (Mart. ex. Pfeiff.) Console en Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 1 (6): 45-59. ISSN: 2334-2501
- Neher, D., Lewins, S., Weicht, T., y Darby, B. (2009). Microarthropod communities associated with biological soil crusts in the Colorado Plateau and Chihuahuan deserts. *Journal of Arid Environments*, 73: 672-677. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2009.01.013
- Nielsen, F. (2019). *Soil fauna assemblages. Global to local scales*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 351pp. DOI:10.1017/9781108123518
- Noble, J., Whitford, W., y Kaliszewski, M. (1996). Soil and litter microarthropod populations from two contrasting ecosystems in semi-arid eastern Australia. *Journal of Arid Environments*, 32: 329-346. DOI: 10.1006/jare.1996.0027
- Ojeda, M., y Gasca-Pineda, J. (2019). *Abundance and diversity of the soil microarthropod fauna from the Cuatro Ciénegas Basin*. En: Álvarez, F., y Ojeda, M. (eds.). *Animal Diversity and Biogeography of the Cuatro Ciénegas Basin*. USA: Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-11262-2\_3
- Orgiazzi, A., Bardgett, R., Barrios, E., Behan-Pelletier, V., Briones, M., Chotte, J., De Deyn, G., Eggleton, P., Fierer, N., Fraser, T., Hedlund, K., Jeffrey, S., Johnson, N., Jones, A., Kandeler, E., Kaneko, N., Lavelle, P., Lemanceau, P., Miko, L., Montanarella, L., de Souza Moreira, F., Ramirez, Scheu, K., Singh, B., Six, J., van der Putten, W., y Wall, D. (2016). *Global Soil Biodiversity Atlas*. European Commission, Publications

Office of the European Union, Luxemburgo, Luxemburgo. 176 pp. DOI: 10.2788/799182

Palacios-Vargas, J., e Iglesias, R. (2004). Oribatei (Acari). En: Llorente, J., Morrone, J., Yáñez-Ordóñez, O., y Vargas, I. (eds.). *Biodiversidad, taxonomía y biogeografía de artrópodos de México: hacia una síntesis de su conocimiento, vol. 4*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN: 970-32-1041-4

Palacios-Vargas, J., y Mejía-Recamier, B. (2007). *Técnicas de colecta, montaje y preservación de microartrópodos*. Las prensas de Ciencias, Ciudad de México, México, 75 pp. ISBN: 978-970-32-4316-9

Parker, L., Freckman, D., Steinberger, Y., Driggers, L. and Whitford, W. (1984). Effects of simulated rainfall and litter quantities on desert soil biota: soil respiration, microflora, and litter quantities on desert soil biota: soil respiration, microflora and Protozoa. *Pedobiología*, 27:185-95. ISSN: 0031-4056

Prieto, D., González, M., y Tcherva, T. (2005). Microartrópodos asociados a la hojarasca de un bosque semidecídulo de Bacunayagua, Matanzas, Cuba. *Revista Biología*, 19: 57–64. ISSN: 0864-3490

Sánchez, B., y Parmenter, R. (2002). Patterns of shrub-dwelling arthropod diversity across a desert shrubland-grassland ecotone: a test of island biogeographic theory. *Journal of Arid Environments*, 50 (2): 247-265. DOI: 10.1006/jare.2001.0920

Sánchez-Chávez, D. (2013). Estructura de la comunidad de ácaros oribátidos del suelo (Acari: Oribatida) asociada a la zona de raíces de *Prosopis laevigata* y *Parkinsonia praecox* en una terraza degradada en el Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. FES Iztacala.

Sánchez-Chávez, D. (2015). Estructura de la comunidad de ácaros del suelo en cinco microambientes de una terraza degradada del Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, en diferentes épocas del año. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Ciencias Biológicas.

Sánchez-Rocha, I. (2014). Algunos aspectos ecológicos de los ácaros del suelo de la Cuenca del Río Estórax, Qro. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Ciencias Biológicas.

- Sanjuan-Trejo, G., Mejía-Segovia, D., y Moreno, C. (2021). Ensamblajes de artrópodos asociados a los frutos de garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*) en dos localidades del valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 92: 1-11. DOI: 10.22201/ib.20078706e.2021.92.3487
- Santos, P., DePree, E., y Whitford, W. (1978). Spatial distribution of litter and microarthropods in a Chihuahuan desert ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 1: 41-48. DOI: 10.1016/S0140-1963(18)31753-1
- Sauvadet, M., Chauvat, M., Cluzeau, D., Maron, P.A., Villenave, C., y Bertrand, I. (2016). The dynamics of soil micro-food web structure and functions vary according to litter quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 95: 262-274. DOI: 10.1016/j.soilbio.2016.01.003
- Schuster, R. (1956). *Der anteil der oribatiden an den zersetzungsvorgängen im boden. Zeitschrift für Morphologie und Ökologie der Tiere*, 45 (1): 1-33.
- Smith, M., y Ueckermann, E. (1987). A taxonomic study of some Anystidae (Acari: Prostigmata). *Entomology Memoir*. Department of Agriculture and Water Supply, 68: 1-37. ISSN: 0255-0180
- Sobhi, M., Hajiqanbar, H., y Mortazavi, A. (2017). A contribution to the knowledge of scutacarid mites (Acari: Pygmephoroidae: Scutacaridae) associated with Coleoptera and Hymenoptera (Arthropoda: Insecta) from northwestern Iran. *Acarologia*, 57 (4): 1103-1111. DOI: 10.24349/acarologia/20174222
- Southcott, R. (1986). Studies on the taxonomy and biology of the subfamily Trombidiinae (Acarina: Trombidiidae) with a critical revision of the genera. *Australian Journal of Zoology*, 123: 1-116. DOI: 10.1071/AJZS123
- Swift, M., Heal, O., y Anderson, M. (1979). *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. University of California Press, Los Angeles, Estados Unidos, 371 pp. DOI: 10.1007/0-387-21663-4\_7
- Taylor, C., Gunawardene, N., y Kinnear, A. (2013). A new species of Neocaeculus (Acari: Prostigmata: Caeculidae) from Barrow Island, Western Australia, with a checklist of world Caeculidae. *Acarologia*, 53 (4): 439-452. DOI: 10.1051/acarologia/20132105

- Ueckermann, E., y Grout, T. (2007). Tydeoid mites (Acari: Tydeidae, Edbakerellidae, Iolinidae) occurring on *Citrus* in southern Africa. *Journal of Natural History*, 41: 37-40. DOI: 10.1080/00222930701589921
- Van der Putten, W., Vet, L., Harvey, J., y Wäckers, F. (2001). Linking above- and belowground multitrophic interactions of plants, herbivores, pathogens, and their antagonists. *Trends in Ecology & Evolution*, 16 (10): 547-554. DOI: 10.1016/S0169-5347(01)02265-0
- Villarreal-Rosas, J., Palacios-Vargas, J., y Maya, Y. (2014). Microarthropod communities related with biological soil crusts in a desert scrub in northwestern Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85: 513-522. DOI: 10.7550/rmb.38104
- Vivanco, J., Cosío, E., Loyola-Vargas, M., y Flores, H. (2005). Mecanismos químicos de defensa en las plantas. *Investigación y Ciencia*, 341 (2): 68-75.
- Wall, D. (2004). *Sustaining biodiversity and ecosystem services in soils and sediments*. Island Press, Washington, D.C., Estados Unidos, 275pp. ISBN: 1559637609
- Wall, D., y Moore, J. (1999). Interactions underground: Soil biodiversity, mutualism, and ecosystem processes. *BioScience*, 49 (2): 109-117. DOI:10.2307/1313536
- Wallwork, J. (1972). Distribution patterns and population dynamics of the micro-arthropods of a desert soil in Southern California. *Journal of Animal Ecology*, 41 (2): 291-310. DOI: 10.2307/3470
- Wardle, D., Bellingham, P., Kardol, P., Giesler, R., y Tanner, E. (2014). Coordination of aboveground and belowground responses to local-scale soil fertility differences between two contrasting Jamaican rain forest types. *Oikos*, 124 (3): 285-297. DOI: 10.1111/oik.01584
- Welbourn, W., y Young, O. (1987). New genus and species of Erythraeinae (Acari: Erythraeidae) from Mississippi with a key to the genera of North American Erythraeidae. *Annals of the entomological society of America*, 80 (2): 230-242. DOI: 10.1093/aesa/80.2.230
- Whitford, W. (1996). The importance of the biodiversity of soil biota in arid ecosystems. *Biodiversity and Conservation*, 5: 185-195. DOI: 10.1007/BF00055829

- Whitford, W., y Parker, L. (1989). Contributions of soil fauna to decomposition and mineralization processes in semiarid and arid ecosystems. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 3 (2): 199-215. DOI: 10.1080/15324988909381199
- Wohltmann, A. (2010). Notes on the taxonomy and biology of Smarididae (Acari: Prostigmata: Parasitengona). *Annales Zoologici*, 60 (3): 355-381. DOI: 10.3161/000345410X535361
- Zar, J. (1984). *Biostatistical Analysis* (2° ed.). Prentice Hall, Inc., Nueva Jersey, Estados Unidos, 718 pp. ISBN: 0130779253

## 11. ANEXOS

**Anexo 1.** Órdenes de artrópodos encontrados en el matorral xerófilo de Huichapan, Hidalgo. El asterisco indica un nuevo registro para el estado de Hidalgo.

ARTHROPODA	
Chelicerata	Hexapoda
Araneae	Diplura
Mesostigmata	Diptera
Sarcoptiformes	Embioptera*
Trombidiformes	Entomobryomorpha
Pseudoscorpionida	Hemiptera
Myriapoda	Hymenoptera
Geophilomorpha	Neuroptera
	Poduromorpha
	Psocoptera
	Symphyleona
	Thysanoptera

**Anexo 2.** Familias y géneros de Collembola encontrados en el matorral xerófilo de Huichapan, Hidalgo. Los nuevos registros para el estado de Hidalgo se marcan con un asterisco.

COLLEMBOLA	
Poduromorpha	Entomobryomorpha
Brachystomellidae	Entomobryidae
<i>Brachystomella</i>	<i>Americabrya</i>
Hypogastruridae	Isotomidae
<i>Willemia</i>	<i>Proisotoma</i>
Neanuridae	Symphyleona
<i>Pseudachorutes</i>	Bourletiellidae*
	<i>Bourletiella</i> *
	Sminthurididae
	<i>Sphaeridia</i>

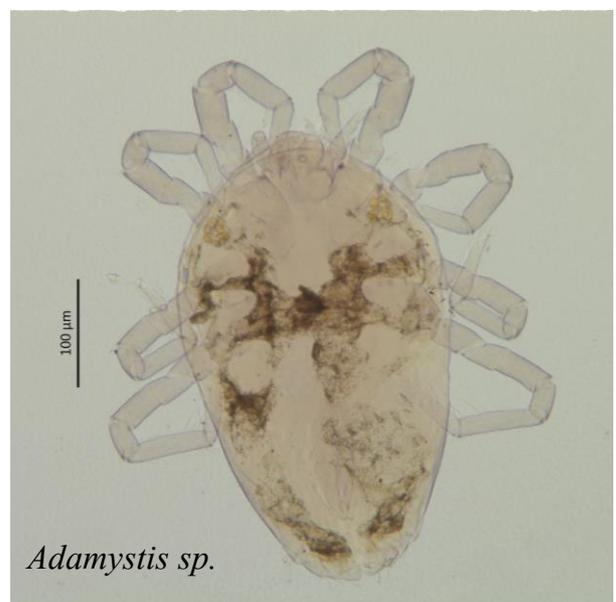
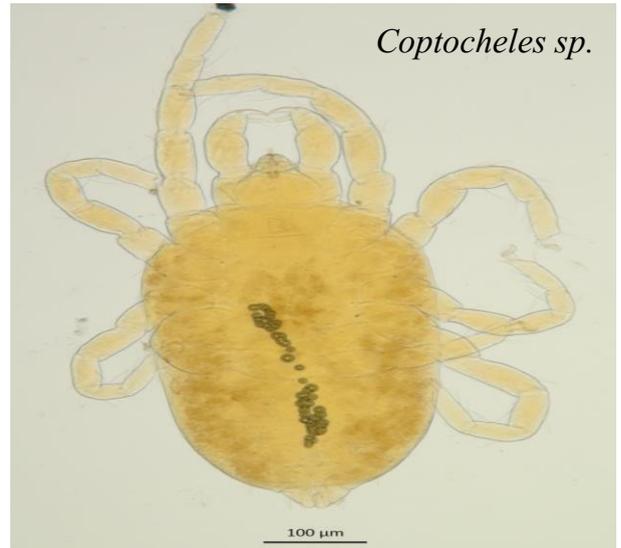
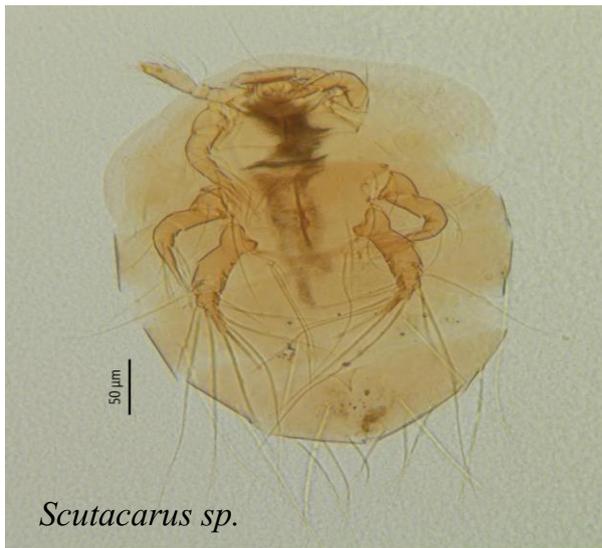
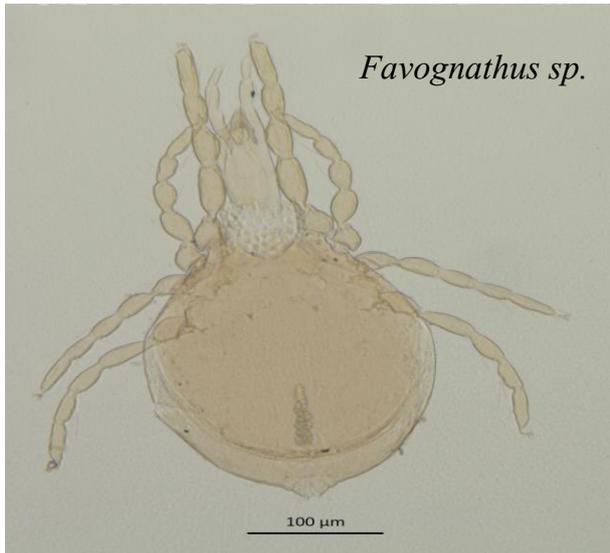
**Anexo 3.** Familias y géneros de los ácaros encontrados en el matorral xerófilo de Huichapan, Hidalgo. Se señala con un asterisco a los nuevos registros para el estado de Hidalgo.

ACARI	
Monogynaspida	Endeostigmata
Ascidae*	Nanorchestidae*
<i>Asca</i> *	<i>Nanorchestes</i> *
Laelapidae	Oribatida
Morfoespecie 1	Aphelacaridae*
Morfoespecie 2	<i>Aphelacarus</i> *
Parasitidae	Brachychthoniidae*
Morfoespecie 1	<i>Brachychthonius</i> *

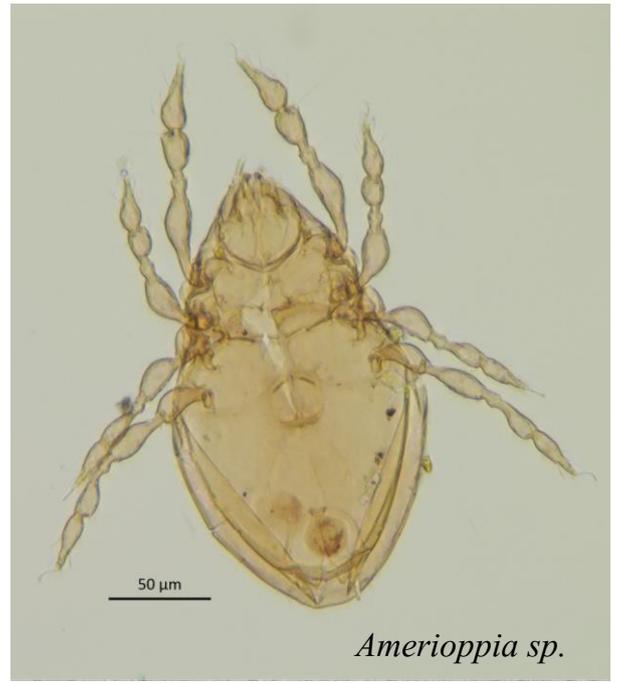
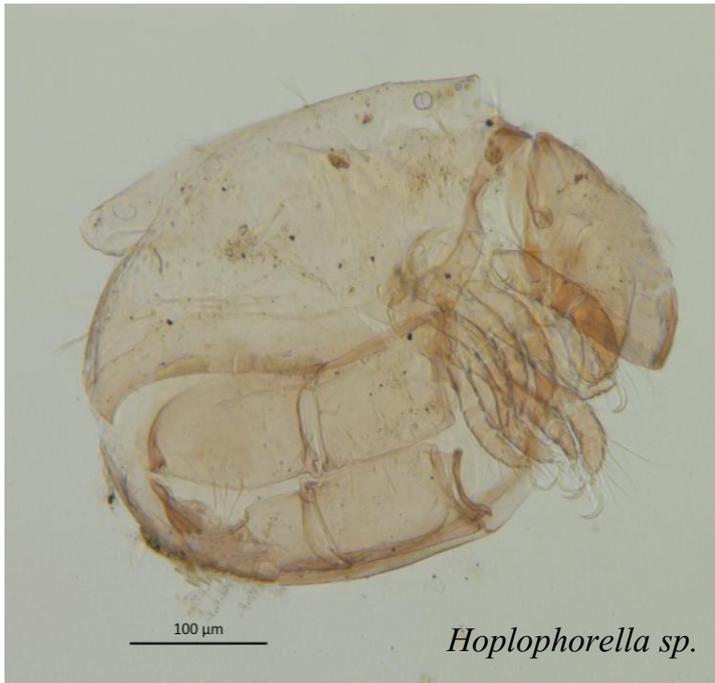
<b>Prostigmata</b>	
Adamystidae*	Camisiidae
<i>Adamystis</i> *	<i>Camisia</i>
Anystidae	Ceratokalummidae*
<i>Anystis</i>	<i>Cultrobates</i> *
Bdellidae	Ceratozetidae
<i>Cyta</i>	<i>Ceratozetes</i>
<i>Spinibdella</i> *	Cosmochthoniidae
Caeculidae*	<i>Cosmochthonius</i>
<i>Neocaeculus</i> *	Ctenacaridae*
Caligonellidae*	<i>Gilarovella</i> *
<i>Coptocheles</i> *	Cymbaeremaeidae
<i>Neognathus</i> *	<i>Scapheremaeus</i>
Cryptognathidae*	Damaeidae*
<i>Favognathus</i> *	<i>Damaeus</i> *
Cunaxidae	Epilohmanniidae
<i>Armascirus</i> *	<i>Epilohmannia</i>
<i>Cunaxa</i>	Euphthiracaridae
<i>Pulaeus</i> *	<i>Rhysotritia</i>
Erythraeidae	Galumnidae*
<i>Augustsonella</i> *	<i>Galumna</i> *
<i>Lasioerythraeus</i> *	Gymnodamaeidae
Eupodidae	<i>Plesiodamaeus</i> *
<i>Eupodes</i> *	Haplozetidae
Linotetránidae*	<i>Incabates</i> *
<i>Linotetranus</i> *	Oppiidae
Paratydeidae*	<i>Amerioppia</i> *
<i>Tanytydeus</i> *	Oribatellidae
Rhagidiidae	<i>Oribatella</i>
<i>Coccorhagidia</i> *	Oribatulidae
Scutacaridae*	<i>Zygoribatula</i>
<i>Scutacarus</i> *	Passalozetidae*
Smarididae	<i>Passalozetes</i> *
<i>Fessonina</i> *	Phenopelopidae*
Stigmaeidae*	<i>Eupelops</i> *
<i>Eustigmaeus</i> *	Phthiracaridae
<i>Ledermuelleriopsis</i> *	<i>Hoplophorella</i>
Tetranychidae	Schelorbitidae
<i>Eotetranychus</i>	<i>Schelorbates</i>
Trombiculidae	Tectocepheidae
Morfoespecie 1	<i>Tectocepheus</i>
Trombidiidae	Trhypochthoniidae*
Morfoespecie 1	<i>Allonothrus</i> *
Morfoespecie 2	<i>Trhypochthonius</i> *
Morfoespecie 3	
Tydeidae*	<b>Astigmata</b>
<i>Afrotydeus</i> *	Acaridae
<i>Pretydeus</i> *	<i>Tyrophagus</i>
<i>Tydeus</i> *	

Anexo 4. Microfotografías de algunos ácaros encontrados en Huichapan, Hidalgo.









**Anexo 5.** Eigenvalores, porcentajes de variación y eigenvectores para los dos primeros componentes obtenidos en el Análisis de Componentes Principales.

	Componente 1	Componente 2
Eigenvalor	1.541	1.188
Porcentaje de variación explicado	30.829	23.764
Porcentaje de variación acumulativo	30.829	54.593
Eigenvector		
	Componente 1	Componente 2
Humedad aire	0.618	-0.143
Temperatura aire	0.336	-0.443
Temperatura suelo	-0.353	-0.034
Cobertura garambullo	-0.614	-0.337
Abundancia	0.052	0.818