



SOCIBI

Sociedad Científica Internacional
de Biotecnólogos A.C.

World Journal of Bioscience and Biotechnology 2025, 1 (2):1-16

Journal homepage: <https://socibiotech.com/journals/wjbb>



REVIEW

ISSN: 3061-8185



Diversidad de relaciones interespecíficas entre hormigas y *Opuntias* nativas de México

Diversity of interspecific relationships between ants and *Opuntias* native to Mexico

Maria Guadalupe Martinez-Mastranzo¹, Carlos Lara², Citlalli Castillo-Guevara², Cecilia Diaz-Castelazo³, Mariana Cuautle²

¹Maestría en Biotecnología y Manejo de Recursos Naturales, Centro de Investigación en Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Km 10.5 Autopista Tlaxcala–San Martín Texmelucan, 90120, San Felipe Ixtacuixtla, Tlaxcala, Mexico.

²Centro de Investigación en Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Km 10.5 Autopista Tlaxcala–San Martín Texmelucan, 90120, San Felipe Ixtacuixtla, Tlaxcala, Mexico.

³Red de Interacciones Multitróficas, Instituto de Ecología, A.C., Carretera Antigua a Coatepec 351, 91073, El Haya, Xalapa, Veracruz, Mexico.



Mariana Cuautle
mcuautle2004@gmail.com

ABSTRACT

Plant species of the genus *Opuntia* represent key structural components in arid and semi-arid ecosystems in the Americas, where their morphology and physiology influence multiple ecological processes. Their interaction with ants constitutes a representative example of facultative mutualism, in which plants provide resources such as extrafloral nectar, fruits, and shelter, allowing ants to defend themselves against herbivores and, in some cases, facilitate seed dispersal. These associations are modulated by morphological variability among *Opuntia* species, which

determines the intensity and specificity of the interactions. Therefore, understanding the dynamics of these interspecific relationships is essential for the conservation of ecological systems. *Opuntia* acts as a key plant in mutualistic networks between ants and plants, where its functional traits determine not only the attraction of ants but also the intensity and stability of the interspecific interactions that contribute to maintaining functional biodiversity in arid ecosystems. This study provides a detailed comparison of the main methods used in the analysis of interaction networks between ants and species of the *Opuntia* genus, highlighting their operational

characteristics, such as seed dispersal, protection and pest control, as well as their ecological impact, methodological limitations and specific recommendations for xerophilous systems.

Keywords: Ant, extrafloral nectaries, mimercophilia, mutualism, *Opuntia*.

RESUMEN

Las plantas del género *Opuntia* representan componentes estructurales clave en los ecosistemas áridos y semiáridos de América, donde su morfología y fisiología influyen en múltiples procesos ecológicos. La interacción entre *Opuntias* y hormigas constituye un ejemplo representativo de mutualismo facultativo, en el que las plantas ofrecen recursos como néctar extrafloral, frutos y refugio, y las hormigas proveen defensa contra herbívoros y facilitan la dispersión de semillas. Estas asociaciones están moduladas por la variabilidad morfológica entre las especies de *Opuntias*, que determinan la intensidad y especificidad de las interacciones. Comprender la dinámica de estas relaciones interespecíficas es esencial para la conservación de los sistemas ecológicos. *Opuntia* actúa como una planta

clave en las redes mutualistas hormiga-planta, donde sus rasgos funcionales no sólo determinan la atracción de hormigas, si no también la intensidad y estabilidad de las interacciones interespecíficas que contribuyen al mantenimiento de la biodiversidad funcional en ecosistemas áridos. El presente estudio muestra una comparación de los principales métodos utilizados en el análisis de redes de interacción entre hormigas y especies del género *Opuntia*, destacando sus características operativas, como la dispersión de semillas, protección, control de plagas y destaca su impacto ecológico, limitaciones metodológicas y recomendaciones específicas para sistemas xerófilos.

Palabras clave: Hormiga, mimercofilia, mutualismo, nectarios extraflorales, *Opuntia*.

Received: 5 October 2025 / Received in revised form: 5 November 2025 / Accepted: 21 November 2025 / Published online: 1 December 2025.

<https://doi.org/10.29267/wjbb.2025.1.2.1-16>

1. Introducción

La familia Cactaceae comprende alrededor de 1500 a 2000 especies, distribuidas en aproximadamente 128 a 330 géneros, organizados tradicionalmente en 3 subfamilias, aunque algunas clasificaciones proponen hasta 6. La subfamilia *Opuntioideae*, se caracteriza por hojas fugaces tubulares, gloquidios (espinas pequeñas) en las areolas y semillas con arilo. Dentro de esta familia se encuentra el género *Opuntia*, el cual es el más diverso. La principal característica morfológica del género son los artejos aplanados (Porras-Flórez, 2017). El género *Opuntia* es endémico de América y está distribuido desde Canadá hasta Argentina, mostrando un alto número de especies endémicas regionales en México (González-Elizondo *et al.*, 2017).

La identificación de las especies de *Opuntia* es complicado debido a que se ha observado una gran variación en la forma de la *Opuntia*; así como en el color y el tamaño de los cladodios, al igual que las espinas en sus individuos, incluso de una misma población (Majure *et al.*, 2017) (Fig. 1). Además, se ha reportado la aparición de híbridos intergenéricos (cruzamiento de individuos de diferentes géneros) e interespecíficos (cruzamiento entre individuos del mismo género) (Andersen, 2002; Majure *et al.*, 2017). Debido a lo anterior, y para complementar la información morfológica, se ha recurrido a la biología molecular para definir y distinguir taxones. Entre los marcadores de DNA barcoding utilizados con mayor éxito se encuentran la región trnK–matK y el espaciador interno transcrita (ITS), los cuales han sido empleados para definir y delimitar clados dentro de la familia Cactáceas, incluido miembros del género *Opuntia* (Bárcenas *et al.*, 2011).

Muchas especies de plantas, principalmente de ecosistemas tropicales han establecido asociaciones con diferentes especies de hormigas donde ambos niveles tróficos (plantas y hormigas) obtienen un beneficio en su adecuación (interacciones mutualistas). Un ejemplo son las plantas con nectarios extraflorales (i.e. glándulas que producen néctar no asociado a la polinización) el cual es forrajeado por una variedad de hormigas a cambio para defender a la planta de especies herbívoras (Rico-Gray & Oliveira, 2007).

En el caso de las redes mutualistas, éstas suelen presentar una estructura anidada, caracterizada por un núcleo de especies generalistas que interactúan entre sí y con especies especialistas (aquellas con menos interacciones) dentro de la comunidad (Bascompte & Jordano, 2007). La estructura anidada, ha sido ampliamente documentada en redes planta-hormiga, especialmente en aquellas mediadas por nectarios extraflorales (Bascompte *et al.*, 2003; Guimarães *et al.*, 2006; Del-Claro *et al.*, 2018). Se ha observado que en las redes planta-hormiga también existen subgrupos de especies con interacciones más frecuentes entre sí que con el resto de la red, generando estructuras modulares (Del-Claro & Torezan-Silingardi, 2021; Cuautle *et al.*, 2022). El estudio de las redes ecológicas reportadas entre hormigas y plantas se ha llevado a cabo bajo distintos nichos ecológicos, en estudios realizados entre los años 2006 a 2023 en el territorio entre México y Brasil, la actividad de las hormigas cambia entre día y noche, como resultado, la estructura anidada de la red se mantiene durante el día y la noche (Juárez-Juárez *et al.*, 2023).

El objetivo de este artículo de revisión es establecer la importancia de las opuntias nativas de México como escenario de interacción con hormigas; el papel de sus rasgos funcionales en

dichas interacciones y las metodologías empleadas para su estudio, destacando su relevancia como elemento clave de los ecosistemas áridos y semiáridos.

2. *Opuntias* como escenarios de interacción con hormigas

Las interacciones que se dan entre hormigas y plantas son fundamentales para la estructura y funcionamiento de los ecosistemas terrestres (Tabla 1) (Silknetter *et al.*, 2020). Dichas interacciones abarcan desde mutualismos obligados y/o facultativos hasta antagonismos, donde su dinámica puede verse profundamente afectada por la fragmentación del hábitat y el cambio en el uso del suelo (Crist, 2009). Hormigas como *Forelius sp.* y *Camponotus spp.* han sido observadas protegiendo *Opuntias* de herbívoros, atraídas por el néctar extrafloral en ecosistemas áridos y semiáridos (Sinisterra *et al.*, 2016).

Tabla 1. Tipo de interacción entre hormigas y *Opuntias*.

Table 1. Type of interaction between ants and *Opuntias*.

Tipo de Interacción	Descripción	Ejemplos	Interacciones con <i>Opuntias</i>
Mutualismo	Ambas especies se benefician mutuamente	Dispersión de semillas (myrmecocoria); protección contra herbívoros a cambio de néctar	Las hormigas protegen a las <i>Opuntias</i> de herbívoros en intercambio por néctar de glándulas extraflorales, lo que incrementa el éxito reproductivo de la planta
Comensalismo	Una especie se beneficia sin afectar significativamente a la otra	Uso de estructuras vegetales como refugio o sitio de nidificación	Las hormigas pueden anidar en cavidades naturales de <i>Opuntias</i> sin causar daño aparente a la planta
Antagonismo (Herbívora o Parasitismo)	Una especie se beneficia a expensas de la otra	Hormigas que consumen partes de la planta; interferencia con la polinización	Algunas hormigas pueden interferir con la polinización de <i>Opuntias</i> al excluir polinizadores o consumir recursos florales
Facilitación indirecta	Interacción que mejora el entorno ecológico para otras especies	Modificación de las propiedades del suelo por hormigas que favorecen el crecimiento vegetal	Las colonias de hormigas cerca de <i>Opuntias</i> pueden aumentar la disponibilidad de nutrientes del suelo y mejorar las condiciones de crecimiento

Las hormigas suelen seleccionar las plantas hospederas dependiendo de los recursos que la planta ofrezca, por lo que las hormigas no se limitan a ser únicamente especies mimercofilas obligadas (Bächtold *et al.*, 2014). Las interacciones entre hormigas y *Opuntia* constituyen un modelo funcional de mutualismo ecológico, donde ambas especies obtienen beneficios clave;

tal como lo es la defensa contra herbívoros para la planta, control de colonias de hemípteros (Parker & Kronauer, 2021) y recursos alimenticios junto con refugio para las hormigas. Estas asociaciones modulan procesos, tales como la estructura de comunidades, la dispersión de semillas y la resiliencia frente a perturbaciones; en cuanto a su importancia biológica, esta radica en que actúan como nodos de conectividad en redes ecológicas, favoreciendo la estabilidad ecosistémica. Preservar estas interacciones es esencial para mantener la biodiversidad funcional en ambientes áridos y semiáridos.

3. Interacciones interespecíficas entre hormiga y *Opuntia* nativas en México

Para el género *Opuntia* y su interacción con hormigas, se han encontrado registros de la existencia de una marcada asociación mutualista; dicha interacción se ve caracterizada por las visitas de las hormigas a los nectarios extraflorales y por la protección contra herbívoros (Oliveira *et al.*, 1999; Gómez-Otamendi *et al.*, 2018). Sin embargo, no todas las *Opuntias* tienen nectarios extraflorales y/o el mutualismo se vuelve facultativo (Miller, 2007; Gómez-Otamendi *et al.*, 2018). Las interacciones entre hormigas y plantas del género *Opuntia* constituyen un modelo relevante para el estudio de mutualismos facultativos en ecosistemas áridos y semiáridos, donde los recursos son limitados y las relaciones interespecíficas adquieren un papel funcional clave (Rico-Gray & Oliveira, 2007; Juárez-Juárez *et al.*, 2023). En estos sistemas, las hormigas pueden actuar como protectoras frente a herbívoros, dispersoras de semillas o consumidoras de exudados; mientras que *Opuntia* provee estructuras arquitectónicas, néctar extrafloral y frutos como recursos tróficos (Díaz-Castelazo *et al.*, 2004; Del-Claro *et al.*, 2018).

Las especies de hormigas encontradas en distintos estudios reportados a lo largo de esta década demuestran que las *Opuntias* interactúan con una gran diversidad de hormigas. El estudio realizado por Gómez-Otamendi *et al.* (2018) destacó el análisis de la diversidad de hormigas epigeas en *Opuntia albicarpa*, *Opuntia heliabravoana*, *Opuntia robusta*, *Opuntia spinulifera* y *Opuntia streptacantha*, en Hidalgo, México. Aunque no se trató de un estudio centrado exclusivamente en interacciones específicas entre cada especie de hormiga y cada especie de *Opuntia*, sí se destacaron algunos patrones ecológicos y mutualismos relevantes para el desarrollo de la investigación sobre interacciones y servicios entre ambas especies (Tabla 2).

La complejidad de estas interacciones ha sido abordada mediante enfoques de redes ecológicas, que permiten identificar patrones estructurales como el anidamiento y la organización de su sistema, así como especies clave en la dinámica de la comunidad (Juárez-Juárez *et al.*, 2023). Aunque la red de interacción planta-hormiga, presenta elementos estructurales típicos de mutualismos (como modularidad y anidamiento), los procesos coevolutivos clásicos, como la señal y el seguimiento filogenéticos, no están claramente presentes. Lo anterior se ha encontrado en redes ecológicas en dónde la interacción entre *Opuntias* y hormigas está presente, lo que sugiere que esta interacción está más influenciada por factores ecológicos contemporáneos que por una historia evolutiva compartida (Gómez-Lazaga *et al.*, 2024). Asimismo, condiciones microambientales específicas, como el pH del suelo o la cobertura vegetal (Dátilo *et al.*, 2013), así como la calidad del néctar y la disponibilidad de recursos parecen ser los principales mecanismos que estructuran estas redes

mutualistas, más allá de la cantidad de néctar secretado (Blüthgen & Fiedler, 2004; Dátillo *et al.*, 2013).

Tabla 2. Diversidad de especies de hormigas que frecuentan *Opuntias*, tipo de interacción y servicios relacionados.

Table 2. Diversity of ant species that frequent *Opuntias*, type of interaction and related services.

Especie de hormiga	Especie de <i>Opuntia sp.</i>	Tipo de interacción	Servicios ofrecidos por las hormigas
<i>Liometopum apiculatum</i>	<i>Opuntia albicarpa</i>	Mutualismo facultativo	Protección contra herbívoros; incremento potencial del éxito reproductivo
<i>Tapinoma sessile</i>	<i>Opuntia albicarpa</i>	Mutualismo facultativo	Protección contra herbívoros; función como bioindicador de ambientes con bajo disturbio
<i>Camponotus pudorosus</i>	<i>Opuntia heliabrunnea</i> , <i>Opuntia robusta</i> , <i>Opuntia spinulifera</i> , <i>Opuntia streptacantha</i>	Mutualismo facultativo	Protección contra herbívoros; explotación de nectarios extraflorales
<i>Pheidole obtusospinosa</i>	<i>Opuntia heliabrunnea</i> , <i>Opuntia robusta</i> , <i>Opuntia spinulifera</i> , <i>Opuntia streptacantha</i>	Mutualismo facultativo	Protección contra herbívoros; especie dominante con alta abundancia
<i>Dorymyrmex</i> ssp.	<i>Opuntia albicarpa</i>	Mutualismo facultativo	Protección contra herbívoros; función como especie indicadora de sistemas de cultivos
<i>Pseudomyrmex gracilis</i>	<i>Opuntia heliabrunnea</i> , <i>Opuntia robusta</i> , <i>Opuntia spinulifera</i> , <i>Opuntia streptacantha</i>	Mutualismo facultativo	Protección contra herbívoros; interacción poco documentada en el estudio

4. *Opuntias* y sus rasgos funcionales

Las especies del género *Opuntia* presentan una serie de rasgos funcionales que las posicionan como organismos relevantes en redes ecológicas de interacción con hormigas, especialmente en ecosistemas áridos y semiáridos. La presencia de nectarios extraflorales en frutos y cladodios constituye un recurso trófico clave que atrae a diversas especies de hormigas,

particularmente de los géneros *Camponotus*, *Crematogaster* y *Pheidole*, las cuales han sido registradas interactuando con *Opuntias* (Rico-Gray & Oliveira, 2007; Sinisterra *et al.*, 2016).

El estudio de los rasgos funcionales de distintas especies de *Opuntia* ha mostrado que existe una variabilidad morfológica entre las distintas poblaciones, especialmente en la forma, tamaño y número de cladodios, así como en la disposición y forma de las espinas. En algunos casos se encuentran gloquidios y algunas particularidades en las características florales y fructíferas (López-Borja *et al.*, 2017). Esta variabilidad no solo tiene implicaciones taxonómicas, sino que define un rango funcional estructural que influye directamente en la interacción con hormigas.

Las hormigas que interactúan con *Opuntia* han modificado con el paso del tiempo a las comunidades de herbívoros, la dispersión de semillas y la estructura del suelo. Además, esta variabilidad morfológica genera patrones diferenciados en las redes de interacción, donde ciertos morfotipos se asocian con conjuntos específicos de hormigas, aumentando la resiliencia frente a perturbaciones en el mismo hábitat (Tabla 3) (Folgarait, 1998; López-Borja *et al.*, 2017).

Tabla 3. Rasgos funcionales de genero *Opuntia* y su relevancia ecológica en interacciones con hormigas.

Table 3. Functional traits of *Opuntia* and their ecological relevance in interactions with ants.

Rasgo funcional de <i>Opuntia</i>	Descripción ecológica	Interacción con hormigas	Referencia
Presencia de exudados azucarados en frutos y cladodios	Producción de sustancias ricas en carbohidratos durante la maduración	Atrae hormigas forrajeras que consumen exudados y pueden proteger la planta de herbívoros	Rico-Gray & Oliveira, 2007; Sinisterra <i>et al.</i> , 2016.
Arquitectura ramificada y superficie espinosa	Estructura tridimensional que ofrece refugio y rutas de forrajeo	Facilita el establecimiento de colonias y patrullaje de hormigas	Das & Das, 2023.
Fenología asincrónica de floración y fructificación	Producción escalonada de recursos a lo largo del año	Mantiene presencia constante de hormigas asociadas	Del-Claro <i>et al.</i> , 2018; Das & Das, 2023.
Capacidad CAM (metabolismo ácido de las crasuláceas)	Adaptación fisiológica a ambientes áridos con alta eficiencia hídrica	Permite coexistencia con hormigas en hábitats xerófitos	Rico-Gray & Oliveira, 2007; Dátillo <i>et al.</i> , 2013.
Producción de frutos carnosos con semillas expuestas	Frutos accesibles con alto contenido energético	Promueve dispersión secundaria por hormigas (mirmecocoria facultativa)	Sinisterra <i>et al.</i> , 2016; Das & Das, 2023.

Andersen *et al.* (2002) reportaron que en las plantas han evolucionado características específicas para atraer a las hormigas, tales como nectarios extraflorales que secretan néctar en hojas y tallos. También están los domacios que son estructuras huecas que sirven como refugio para las colonias de hormigas (Sandoval-Molina, 2022) y cuerpos alimenticios (eleosomas) que constituyen reservas de alimentos adheridos a las semillas que las hormigas recolectan y dispersan al desechar la semilla.

Las hormigas utilizan las estructuras de *Opuntia*, principalmente de tres maneras (Fig. 1). En primer lugar, las hormigas usan como sitio de refugio y anidación a la *Opuntia*, donde las cavidades naturales entre cladodios, fisuras en la base y zonas protegidas por espinas permiten el establecimiento de nidos, especialmente en especies como *Camponotus* y *Forelius* (Juárez-Juárez *et al.*, 2023). La segunda manera, es para aprovechar la estructura de la *Opuntia* como recurso alimenticio, las exudaciones de los nectarios extraflorales y los frutos maduros son fuentes de carbohidratos. La variabilidad en la producción de néctar y frutos entre morfotipos determina la frecuencia y permanencia de visitas por parte de hormigas (Crist, 2009). Finalmente, la arquitectura funcional de la *Opuntia* permite, mediante la estructura tridimensional de la planta, la conectividad del microhábitat. Las *Opuntias* con mayor ramificación y altura permiten rutas de forrajeo más seguras y eficientes, lo que puede aumentar las redes de interacción (Juárez-Juárez *et al.*, 2023). Además, la arquitectura ramificada de *Opuntia*, junto con su fenología asincrónica, permite una oferta continua de refugio y alimento, favoreciendo el establecimiento de colonias y el patrullaje territorial por parte de las hormigas. Este comportamiento puede traducirse en servicios ecosistémicos como la protección contra herbívoros, la dispersión de semillas y, en algunos casos, la polinización incidental (Das & Das, 2023).

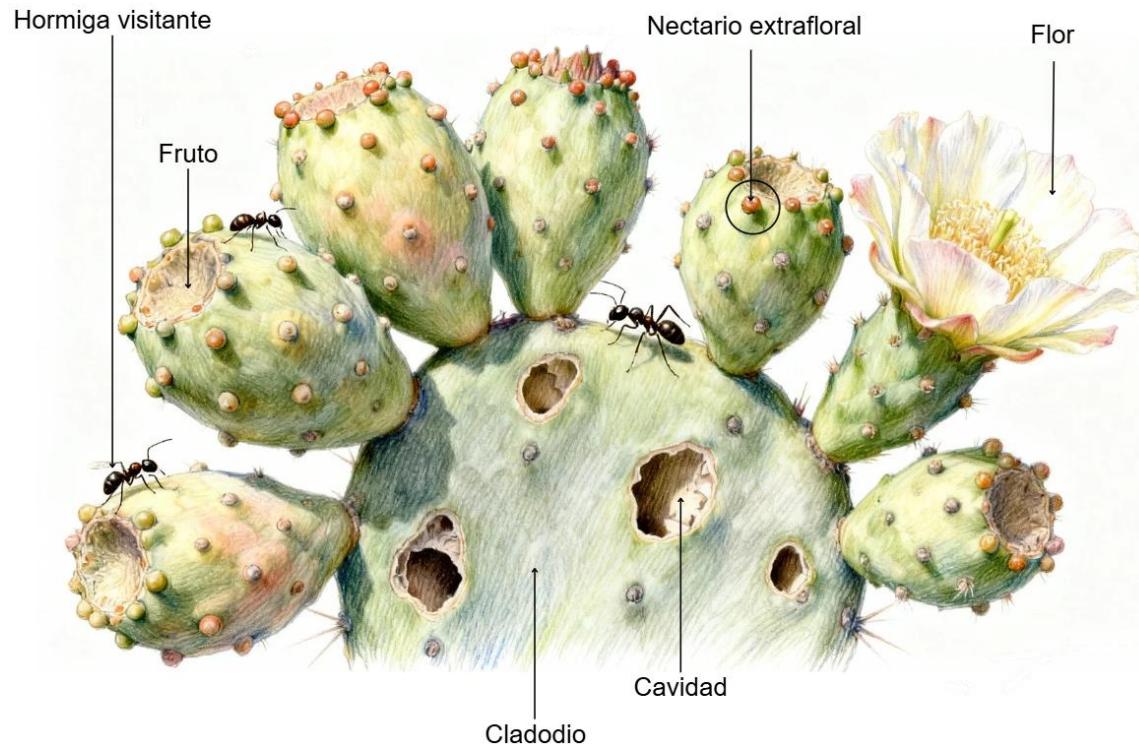


Fig. 1. Rasgos funcionales de la planta *Opuntia* que atraen a diversas especies de hormigas.
Fig. 1. Functional features of *Opuntia* that attract various species of ants.

Los cladodios, dependiendo de la edad de la planta, presentan una gran variación morfológica vegetal en cuanto a su peso, tamaño y grosor (Arroyo-Figueroa *et al.*, 2020), ofreciendo una mayor superficie para el establecimiento de colonias de hemípteros, mientras que la densidad y orientación de espinas modulan el acceso de artrópodos; en cuanto a las glándulas extraflorales, estas actúan como puntos de atracción para hormigas mutualistas, que defienden la planta de herbívoros (Rico-Gray & Oliveira, 2007).

Dentro de un ecosistema, las diversas interacciones ecológicas que resultan de la coexistencia entre distintas especies son vitales para el mantenimiento y sostenibilidad de la biodiversidad, “sin ellas, sería como tener las piezas de un juego, pero sin saber cómo jugar una partida” (Guix, 2021). Una clave importante para entender la magnitud de la importancia de las interacciones es saber, que todas están entrelazadas a través de una especie intermediaria (directa o indirecta). Un ejemplo es la cascada trófica en *Opuntia* (Fig. 2), donde se puede observar que todos los organismos vivientes de distintas especies establecen con frecuencia entre sí una gran variedad de interacciones ecológicas (Silknetter *et al.*, 2020). Las cascadas tróficas son el resultado de los efectos en cadena que se propagan a través de los diferentes niveles de la red alimenticia, afectando a especies que interactúan directa o indirectamente (Sotomayor & Lortie, 2015).

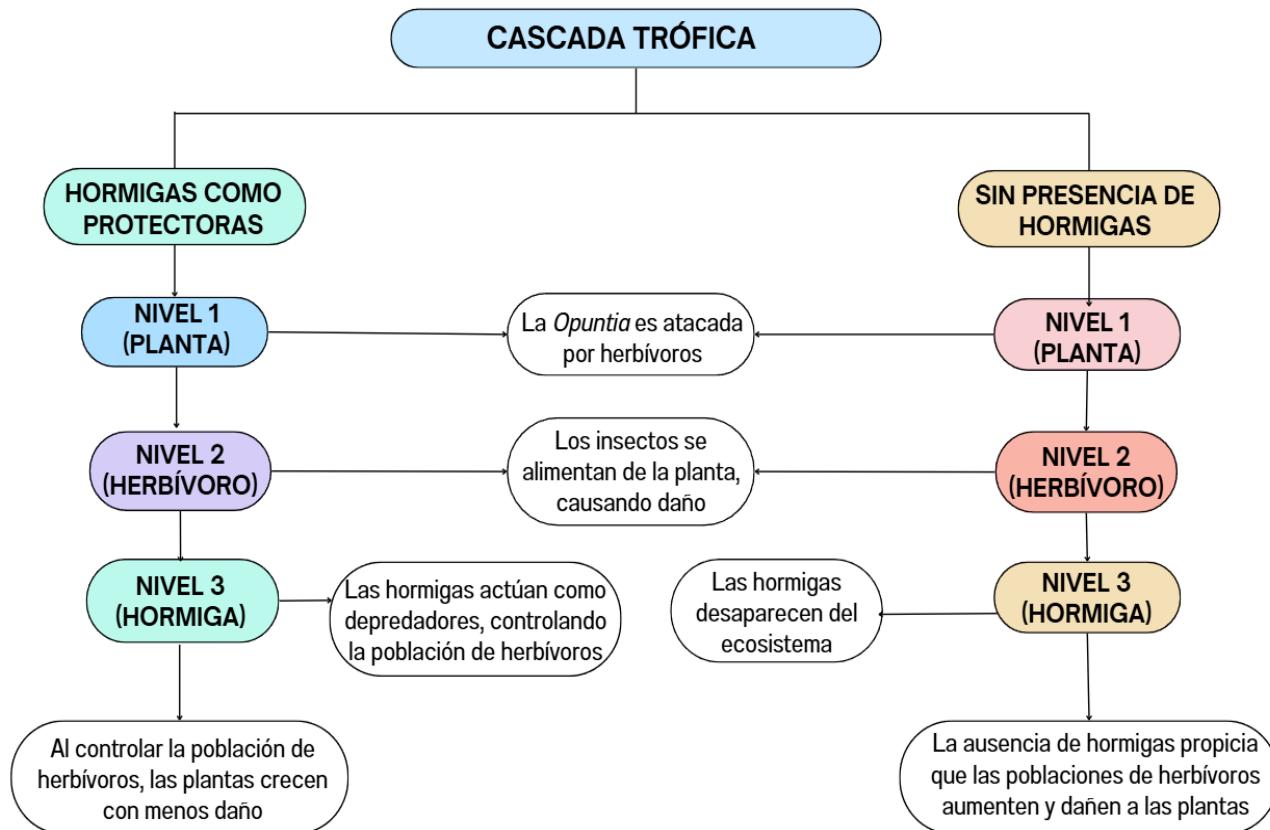


Fig. 2. Ejemplo de cascada trófica como resultado de interacciones entre *Opuntia* y hormigas.
Fig. 2. Example of a trophic cascade as a result of interactions between *Opuntia* and ants.

5. Métodos para el estudio de interacciones entre *Opuntias* y hormigas

En el estudio de las interacciones entre *Opuntias* y hormigas, se han utilizado diversas metodologías, de las cuales podemos seleccionar la que mejor se adecue al sistema opuntia-hormigas a estudiar (Tabla 4). Es importante destacar que en sistemas áridos y matorrales con *Opuntia* en el Altiplano mexicano, es importante que el estudio de las interacciones entre *Opuntias* y hormigas se realicen muestreos que combinén franjas horarias (i.e. se hagan muestreos diurnos y nocturnos) para cubrir una mayor gama de interacciones realizadas por las especies de hormigas visitantes.

Tabla 4. Descripción comparativa de métodos utilizados en el análisis de redes de interacción entre hormigas y *Opuntia*.

Table 4. Comparative description of the methods used in the analysis of interaction networks between ants and *Opuntia*.

Método	Descripción	Impacto	Limitaciones	Aplicación	Referencia
Muestreo directo (manual, aspirador entomológico)	Registro <i>in situ</i> de hormigas forajeando en plantas individuales	Alta especificidad: vincula especies y recursos; alta flexibilidad en micro hábitats	Dependiente del observador; subestima actividad nocturna si no se realiza muestreo nocturno	Recomendado para observar defensa mediante néctar/exudados y visitas a flores/frutos de <i>Opuntia</i> en matorrales xerófilos	Del-Claro et al., 2018; Juárez-Juárez et al., 2023.
Sombrilla entomológica	Captura mediante el derribo suave de artrópodos desde la planta hacia una sombrilla colectora	Eficiente para el estrato de canopia/subdós el. complementa el muestreo directo	Menor resolución del comportamiento de interacción; puede mezclar diferentes procedencias	Útil en arbustos asociados con <i>Opuntia</i> y para registrar hormigas en arquitectura espinosa sin daño	Díaz-Castelazo et al., 2004; Juárez-Juárez et al., 2023.
Trampas de caída cebadas	Trampas con cebo azucarado / proteico colocadas a nivel del sustrato	Metodología estandarizable; captura especies críticas u oportunistas	Baja especificidad planta–hormiga; atrae individuos desde fuera	Complementa el estudio de ensambles en suelos pedregosos alrededor de <i>Opuntia</i> y el análisis de	Del-Claro & Torezan-Silingardi, 2021; Juárez-Juárez et al., 2023

			del microhábitat	rutas de forrajeo	
Trampas de caída (sin cebo)	Captura pasiva por intercepción	Efectiva para caracterizar la comunidad de hormigas de base	Poco informativa sobre los recursos vegetales que explotan	Útil como línea de referencia del ensamble en parches con <i>Opuntia</i>	Antoniazzi et al., 2020; Juárez-Juárez et al., 2023
Cebos en planta	Colocación de cebos en dosel para captura con redes/bolsas	Permite el acceso a interacciones en estratos altos	Logística compleja; menos aplicable en ecosistemas abiertos	Poco usado con <i>Opuntia</i> ; más útil para estudiar acompañantes arbustivos	Rico-Gray & Oliveira, 2007; Juárez-Juárez et al., 2023

La Tabla 4 permite contrastar la eficiencia y limitaciones de cada metodología; además ayuda a contextualizar su aplicación en sistemas dominados por *Opuntia*, donde la estructura vegetal y su fenología condicionan la dinámica de la interacción entre las especies. De esta manera se promueve una visión crítica y metodológica para el diseño y la implementación de estudios futuros sobre redes hormiga-planta en distintos ambientes ecológicos. La elección metodológica para los estudios de interacción hormiga y *Opuntia* no sólo determina la calidad de los datos recolectados, si no que incide directamente en la detección y caracterización de patrones estructurales en redes ecológicas, tales como el anidamiento, su sistema de organización y la especialización. En sistemas con *Opuntia*, el uso de métodos con bajo impacto espacial pueden minimizar la señal modular, afectando la interpretación ecológica de los datos. Por lo tanto, la especialización ayuda a cuantificar la frecuencia y exclusividad de las interacciones presentes en un sistema planta-hormiga, lo cual solo puede lograrse mediante técnicas que capturen la dinámica temporal y espacial de los encuentros interespecíficos con los sujetos de estudio involucrados (Jordano et al., 2009; Antoniazzi et al., 2020).

6. Redes de interacción interespecífica entre hormiga y *Opuntia*

La diversidad de especies y la riqueza de sus interacciones son fundamentales para comprender la estructura y funcionalidad de los ecosistemas. Las redes ecológicas permiten visualizar la conexión de las especies entre sí, revelando patrones de modularidad, anidamiento y redundancia funcional que contribuyen a la estabilidad del sistema frente a perturbaciones (Martínez-Falcón et al., 2019). Esto hace de la biodiversidad un pilar importante, no solo para conservar la biodiversidad taxonómica, sino también la diversidad de roles ecológicos. Es por ello, que la relación interespecífica óptima entre las hormigas y las *Opuntias* contempla su hábitat y al mismo tiempo su estacionalidad. Los cambios en el medio ambiente también influyen directamente sobre la capacidad que tienen las hormigas para su desarrollo biológico, así como sobre las plantas, las cuales son afectadas directamente por agentes externos, siendo este uno de los principales puntos a considerar es la estacionalidad, que puede disminuir la capacidad de las hormigas para desarrollarse debido a la disponibilidad de recursos (Cuautle et al., 2025). Sin embargo, un factor importante adicional que se debe considerar son las perturbaciones antropogénicas (Juárez-Juárez et al., 2025).

7. Conclusión

Desde una perspectiva biológica y de redes de interacción, se concluye que las asociaciones entre hormigas y *Opuntias* nativas de México representan un mutualismo facultativo clave en ecosistemas áridos y semiáridos, mediado por rasgos funcionales como la presencia de nectarios extraflorales y la fenología asincrónica de las *Opuntias*. Estas características favorecen la formación de redes ecológicas con estructura anidada y modular, donde especies generalistas de hormigas (como *Camponotus* y *Pheidole*) interactúan con múltiples morfotipos de *Opuntia*, mientras que las especies especialistas responden a condiciones microambientales específicas.

Las interacciones entre hormigas y especies del género *Opuntia* constituyen un modelo funcional de mutualismo facultativo en ecosistemas áridos y semiáridos, donde la disponibilidad de recursos es limitada y la presión ambiental elevada. Estas asociaciones interespecíficas no solo reflejan una dinámica ecológica compleja, sino que también modulan procesos clave como la defensa contra herbívoros, la dispersión de semillas y la estructuración de comunidades.

Por otro lado, la elección metodológica en el estudio de estas interacciones (desde el muestreo directo hasta el uso de trampas cebadas), ayuda a conocer los distintos patrones estructurales de las redes de interacción entre hormigas y *Opuntias*, tomando en cuenta escalas horarias (diurnos/nocturnos) y espaciales (suelo y dosel) los cuales permiten detectar con mayor precisión la especialización, la modularidad y el papel de especies clave. Esta aproximación metodológica integral es esencial para entender la dinámica coevolutiva y ecológica de estas interacciones, así como para diseñar estrategias de conservación que preserven no sólo la diversidad taxonómica de las especies (Vásquez-Bolaños, 2015), sino también la integridad funcional de estos mutualismos en ecosistemas sujetos a cambios globales y fragmentación.

Preservar estas interacciones es esencial para mantener la biodiversidad funcional en ambientes xerófitos, donde *Opuntia* en interacción con las hormigas como agentes clave en la provisión de servicios ecosistémicos. En este sentido, el estudio de redes de interacción entre hormigas y *Opuntia* ofrece una vía para evaluar la funcionalidad ecológica, la resiliencia frente a perturbaciones y el diseño de estrategias de conservación adaptadas a sistemas áridos.

Agradecimientos

Agradecemos profundamente el respaldo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), cuyo apoyo ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo. Extendemos también nuestro reconocimiento al Posgrado en Ciencias Biológicas por brindar el espacio académico y formativo que permitió consolidar esta revisión.

Contribución de autores

Mariana Cuautle: Conceptualización, metodología, validación, recursos, revisión y edición, supervisión. Carlos Lara: Conceptualización, metodología, validación, recursos, revisión. Citlalli Castillo-Guevara: Validación, visualización, revisión, conceptualización. Cecilia Díaz-Castelazo:

Revisión, supervisión. María Guadalupe Martínez-Mastranzo: Redacción-borrador inicial, investigación, metodología, revisión y edición.

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Referencias

Andersen, A. N., Hoffmann, B. D., Müller, W. J., & Griffiths, A. D. (2002). Using ants as bioindicators in land management: simplifying assessment of ant community responses. *Journal of Applied Ecology*, 39(1), 8–17. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2002.00704.x>

Antoniazzi, R., Del-Claro, K., & Torezan-Silingardi, H. M. (2020). Ant diversity and interactions with extrafloral nectaries in a Brazilian savanna: Effects of seasonality and vegetation structure. *Biotropica*, 52(1), 123–132.

Arroyo-Figueroa, G., Medina-Saavedra, T., Pérez-Sánchez, R. E., & Ortiz-Rodríguez, R. (2020). Morfología y edad del cladodio de *Opuntia ficus-indica* sobre la producción de *Dactylopius coccus* costa y contenido de ácido carmínico. *Nova Scientia*, 12(25), 00019. <https://doi.org/10.21640/ns.v12i25.2519>

Bächtold, A., Alves-Silva, E., Kaminski, L. A., & Del-Claro, K. (2014). The role of tending ants in host plant selection and egg parasitism of two facultative myrmecophilous butterflies. *Die Naturwissenschaften*, 101(11), 913–919. <https://doi.org/10.1007/s00114-014-1232-9>

Bárcenas, R. T., Yesson, C., & Hawkins, J. A. (2011). Molecular systematics of the Cactaceae. *Cladistics*, 27(5), 470–489. <https://doi.org/10.1111/j.1096-0031.2011.00350.x>

Bascompte, J., & Jordano, P. (2007). Plant–animal mutualistic networks: The architecture of biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 38(1), 567–593. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.38.091206.095818>

Bascompte, J., Jordano, P., Melián, C. J., & Olesen, J. M. (2003). El ensamblaje anidado de redes mutualistas planta–animal. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(16), 9383–9387. <https://doi.org/10.1073/pnas.1633576100>

Blüthgen, N., & Fiedler, K. (2004). Preferences for sugars and amino acids and their role in ant–plant interactions. *Oecologia*, 140(3), 445–452.

Crist, T. O. (2009). Biodiversidad, interacciones entre especies y roles funcionales de las hormigas (Hymenoptera: Formicidae) en paisajes fragmentados: una revisión. *Noticias Mirmecológicas*, 12, 3–13.

Cuautle, M., Castillo-Guevara, C., Juárez-Juárez, B., & Lara, C. (2025). Efectos de la perturbación antropogénica y la estacionalidad sobre la diversidad alfa de las redes de

interacción hormiga–planta en los bosques templados mexicanos. *Ecología Comunitaria*, 26(1), 143–162.

Cuautle, M., Díaz-Castelazo, C., Castillo-Guevara, C., & Torres Lagunes, C. G. (2022). Changes in the core species of the ant–plant network of oak forest converted to grassland: replacement of its ant functional groups. *PeerJ*, 10, e13679. <https://doi.org/10.7717/peerj.13679>

Das, S., & Das, A. (2023). Ants are more than just curious bystanders to some flowers: they act as significant pollinators. *Frontiers in Insect Science*, 3, 1145761. <https://doi.org/10.3389/finsc.2023.1145761>

Dátillo, W., Rico-Gray, V., Rodrigues, D. J., & Izzo, T. J. (2013). Las características del suelo y la vegetación determinan el patrón anidado de las redes de hormigas y plantas en una selva tropical. *Ecological Entomology*, 38(4), 450–459. <https://doi.org/10.1111/een.12029>

Del-Claro, K., & Torezan-Silingardi, H. M. (2021). Ant–plant interactions in tropical environments: A review of methodological approaches and ecological patterns. *Arthropod-Plant Interactions*, 15(1), 1–15.

Del-Claro, K., Lange, D., Torezan-Silingardi, H. M., Anjos, D. V., Calixto, E. S., Dátillo, W., & Rico-Gray, V. (2018). The complex ant–plant relationship within tropical ecological networks. In *Ecological networks in the tropics: an integrative overview of species interactions from some of the most species-rich habitats on Earth* (pp. 59–71). Springer International Publishing. Cham, Switzerland.

Díaz-Castelazo, C., Rico-Gray, V., Ortega, F., & Ángeles, G. (2004). Morphological variation and phenological patterns of extrafloral nectaries in an ant–plant interaction network in Mexico. *Flora*, 199(2), 120–135.

Folgarait, P. J. (1998). La biodiversidad de las hormigas y su relación con el funcionamiento de los ecosistemas: una revisión. *Biodiversity and Conservation*, 7(9), 1221–1244.

Gómez-Lazaga, M., Cuautle, M., Valenzuela-González, J. E., Vásquez-Bolaños, M., & De los Monteros, A. E. (2024). Exploring co-evolutionary processes in ant–plant mutualism networks: Evidence from a phylogenetic analysis. *Food Webs*, e00383. <https://doi.org/10.1016/j.fooweb.2024.e00383>

Gómez-Otamendi, E., Ortiz-Arteaga, Y., Ávila-Gómez, E. S., Pérez-Toledo, G., Valenzuela, J., & Moreno, C. E. (2018). Diversidad de hormigas epigeas en cultivos de nopal tunero (*Opuntia albicarpa*) y matorrales de *Opuntia* spp. del estado de Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 89(2), 454–465. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2018.2.2293>

González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., López-Enríquez, I. L., Tena-Flores, J. A., González-Gallegos, J. G., Ruacho-González, L., Melgoza-Castillo, A., Villarreal-Quintanilla, J. Á., & Estrada-Castillón, A. E. (2017). Diagnóstico del conocimiento taxonómico y florístico de

las plantas vasculares del norte de México. *Botanical Sciences*, 95(4), 760–779. <https://doi.org/10.17129/botsci.1865>

Guimarães, P. R., Rico-Gray, V., Dos-Reis, S. F., & Thompson, J. N. (2006). Asymmetries in specialization in ant–plant mutualistic networks. *Proceedings of the Royal Society B*, 273, 2041–2047. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3548>

Guix, J. C. (2021). Interacciones mutualistas entre animales y plantas. I. Introducción general. España. <https://hdl.handle.net/2445/173194> (consultado septiembre 2025).

Jordano, P., Vázquez, D. P., & Bascompte, J. (2009). Redes complejas de interacciones mutualistas planta–animal. En R. Medel, M. A. Aizen & R. Zamora (Eds.), *Ecología y evolución de interacciones planta–animal* (pp. 17–41). Editorial Universitaria. Chile.

Juárez-Juárez, B., Dátilo, W., & Moreno, C. E. (2023). Synthesis and perspectives on the study of ant–plant interaction networks: A global overview. *Ecological Entomology*, 48(3), 269–283. <https://doi.org/10.1111/een.13227>

López-Borja, E. N., Romo-Campos, R. de L., Arreola-Nava, H. J., Muñoz-Urías, A., & Loza-Cornejo, S. (2017). Morphological variation in *Opuntia jaliscana* (Cactaceae). *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 74(1), e058. <https://doi.org/10.3989/ajbm.2431>

Majure, L. C., Judd, W. S., Soltis, P. M., & Soltis, D. E. (2017). Taxonomic revision of the *Opuntia humifusa* complex (Opuntieae: Cactaceae) of the eastern United States. *Phytotaxa*, 290(1), 1–65. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.290.1.1>

Martínez-Falcón, A. P., Martínez-Adriano, C. A., & Dátilo, W. (2019). Redes complejas como herramientas para estudiar la diversidad de las interacciones ecológicas. En C. E. Moreno (Ed.), *La biodiversidad en un mundo cambiante: Fundamentos teóricos y metodológicos para su estudio* (pp. 265–283). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo / Libermex. México.

Miller, T. E. X. (2007). Does having multiple partners weaken the benefits of facultative mutualism? A test with cacti and cactus-tending ants. *Oikos*, 116, 500–512. <https://doi.org/10.1111/j.2007.0030-1299.15317.x>

Oliveira, P. S., Rico-Gray, V., Díaz-Castelazo, C., & Castillo-Guevara, C. (1999). Interaction between ants, extrafloral nectaries and insect herbivores in neotropical coastal sand dunes. *Functional Ecology*, 13, 623–631. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.1999.00360.x>

Parker, J., & Kronauer, D. J. (2021). How ants shape biodiversity. *Current Biology*, 31(19), R1208–R1214. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.08.015>

Porras-Flórez, D., Albesiano, S., & Arrieta-Violet, L. (2017). El género *Opuntia* (Opuntioideae–Cactaceae) en el departamento de Santander, Colombia. *Biota Colombiana*, 18(2), 111–131. <https://doi.org/10.21068/c2017.v18n02a07>

Rico-Gray, V., & Oliveira, P. S. (2007). The ecology and evolution of ant–plant interactions. University of Chicago Press. USA.

Sandoval-Molina, M. A., Lugo-García, B. R., Mendoza-Mendoza, A. D., & Janczur, M. K. (2022). Females restrict the position of domatia and suffer more herbivory than hermaphrodites in *Myriocarpa longipes*. *Journal of Tropical Ecology*, 38(2), 99–105. <https://doi.org/10.1017/S0266467421000584>

Silkinetter, S., Creed, R. P., Brown, B. L., Frimpong, E. A., Skelton, J., & Peoples, B. K. (2020). Positive biotic interactions in freshwaters: A review and research directive. *Freshwater Biology*, 65, 811–822. <https://doi.org/10.1111/fwb.13476>

Sinisterra, R. M., Gallego-Ropero, M. C., & Armbrecht, I. (2016). Hormigas asociadas a nectarios extraflorales de árboles de dos especies de Inga en cafetales de Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*, 65(1), 9–15. <https://doi.org/10.15446/acaq.v65n1.47167>

Sotomayor, D. A., & Lortie, C. J. (2015). Indirect interactions in terrestrial plant communities: emerging patterns and research gaps. *Ecosphere*, 6(6), 1–23. <https://doi.org/10.1890/ES14-00117.1>

Vásquez-Bolaños, M. (2015). Taxonomía de Formicidae (Hymenoptera) para México. *Métodos en Ecología y Sistemática*, 10, 1–53.