

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO FORESTAL



Estructura de las Interacciones Planta-Visitante Floral Asociadas a Cactáceas del
Jardín Botánico " Ing. Gustavo Aguirre Benavides"

Por:

BERNARDO FABIAN LOPEZ GARCIA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO FORESTAL

Estructura de las Interacciones Planta-Visitante Floral Asociadas a Cactáceas del
Jardín Botánico " Ing. Gustavo Aguirre Benavides"

Por:

BERNARDO FABIAN LOPEZ GARCIA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

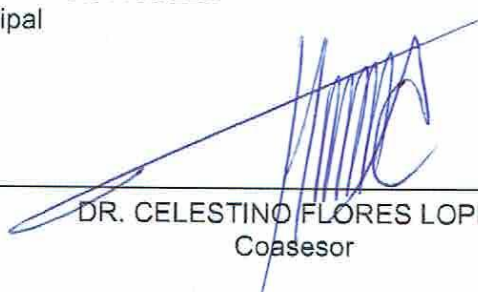
Aprobada por el Comité Asesor:



DRA. MICHELLE IVONNE RAMOS ROBLES
Asesor Principal



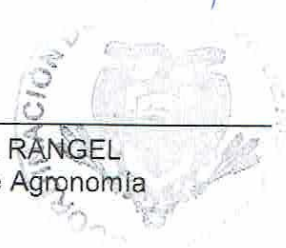
DR. JOSE ANTONIO HERNANDEZ HERRERA
Coasesor



DR. CELESTINO FLORES LOPEZ
Coasesor



DR ALBERTO SANDOVAL RANGEL
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Junio 2026

Derechos de Autor y Declaración de no plagio

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Est. Bernardo Fabian López García

Dra. Michelle Ivonne Ramos Robles

AGRADECIMIENTOS

A mis abuelos, Nidia Estela Ibarra González y Roberto García López, por ser parte fundamental de mi historia y de mis raíces. Gracias por el cariño, los valores y las enseñanzas que han formado parte del camino que hoy me permite llegar hasta este momento.

A mi madre, Nidia García Ibarra, por su amor y esfuerzo constante. Gracias por acompañarme, por creer en mí y por estar presente incluso en los momentos difíciles.

A mi padre, Javier López Villela, por su apoyo, y por contribuir a mi formación a lo largo de los años.

A mis hermanos, Enrique y Brian, por ser parte de mi vida, por los momentos compartidos y por acompañarme, cada uno a su manera, durante este camino.

A la Dra. Michelle Ivonne Ramos Robles, por su guía, apoyo y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por entender mi forma de aprender, por orientarme con paciencia y por motivarme a seguir avanzando. Su confianza y manera de enseñar fueron fundamentales para concluir esta etapa.

A mi mejor amiga, Alexa Monserrat Romero Montaña, por su amistad, apoyo y compañía durante este proceso.

A Rexalindo, mi perro, por su compañía fiel e incondicional, por estar presente en los días buenos y difíciles, y por brindarme alegría durante este proceso.

A mis amigos y a todas las personas que conocí durante esta etapa, gracias por las experiencias, conversaciones y aprendizajes.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3 HIPÓTESIS	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1 Interacciones ecológicas y redes mutualistas en ecosistemas áridos.....	5
2.1.1 Modularidad.....	9
2.1.2 Disponibilidad de recursos florales y estructura de las redes	10
2.2 Redes planta–polinizador en ambientes áridos	11
2.3 Cactáceas y visitantes florales	13
2.4 Jardines botánicos como espacios de conservación funcional.....	15
3. MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1 Área de estudio	18
3.2 Diseño del muestreo y registro de interacciones	19
3.3 Análisis de la red de interacción planta-visitante floral.....	21
4. RESULTADOS	24
4.1 Especies de cactáceas registradas y disponibilidad floral.....	24
4.2 Composición y frecuencia de visitantes florales.....	25
4.3 Frecuencia de interacciones por especie de cactácea.....	26
4.4 Relación entre disponibilidad floral y número de visitas	27
4.5 Estructura general de la red planta–visitante floral	28
4.6 Módulos de interacción.....	29
4.7 Métricas a nivel especie de los visitantes florales	30
4.8 Métricas a nivel especie de las cactáceas.....	31
5. DISCUSIÓN	35
6. CONCLUSIONES	40
7. LITERATURA CITADA.....	42

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Visitantes florales registrados y número de interacciones observadas	25
Cuadro 2. Especies de cactáceas registradas y número de interacciones observadas ...	27
Cuadro 3. Métricas a nivel especie de los visitantes florales.	31
Cuadro 4. Métricas a nivel especie de las cactáceas.	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución espacial de las especies de cactáceas en el Jardín Botánico “Ing. Gustavo Aguirre Benavides”.....	18
Figura 2. Disponibilidad floral de las especies de cactáceas registradas durante el periodo de muestreo en el Jardín Botánico “Ing. Gustavo Aguirre Benavides”.....	25
Figura 3. Número total de interacciones registradas para cada grupo de visitantes florales asociados a las especies de cactáceas estudiadas.	26
Figura 4. Relación entre el número total de flores y el número total de visitas registradas por especie de cactácea. La línea representa la tendencia general de la asociación entre ambas variables.	28
Figura 5. Red de interacción planta–visitante floral asociada a las cactáceas estudiadas. Los nodos representan especies de cactáceas y visitantes florales; el grosor de los enlaces indica la frecuencia de interacción y los colores corresponden a los módulos identificados en la red.	30
Figura 6. Valores de importancia relativa (<i>species strength</i>) y especialización (d') de las especies de cactáceas registradas en la red planta–visitante floral. A) Importancia relativa (<i>species strength</i>); B) Especialización (d').....	34
Figura 7. Ejemplos de interacciones planta–visitante floral registradas en especies de cactáceas del Jardín Botánico “Ing. Gustavo Aguirre Benavides”. (A) <i>Apis mellifera</i> visitando la flor de <i>Echinocactus platyacanthus</i> ; (B) <i>Megachile aurantipennis</i> interactuando con la flor de <i>Coryphantha ramillosa</i> .; (C) <i>Agapostemon</i> sp. visitando la flor de <i>Neolloydia conoidea</i> ; y (D) escarabajos del género <i>Brassicogethes</i> asociados a la flor de <i>Echinocereus stramineus</i>	47
Figura 8. Especies de cactáceas evaluadas durante el estudio. (E) <i>Epithelantha micromeris</i> ; (F) <i>Thelocactus macdowellii</i> en floración; (G) <i>Mammillaria chionocephala</i> ; y (H) <i>Thelocactus rinconensis</i> en floración. Las especies mostradas representan parte de la diversidad de cactáceas incluidas en el análisis de las interacciones planta–visitante floral.....	48
Figura 9. Especies de cactáceas evaluadas durante el estudio. (I) <i>Echinocactus platyacanthus</i> ; (J) <i>Neolloydia conoidea</i> en floración; (K) <i>Turbinicarpus valdezianus</i> ; y (L) <i>Astrophytum-myriostigma</i> en floración. Las especies mostradas representan parte de la diversidad de cactáceas incluidas en el análisis de las interacciones planta–visitante floral..	49
Figura 10. Especies de cactáceas evaluadas durante el estudio. (M) <i>Thelocactus bicolor</i> en floración; (N) <i>Lophophora williamsii</i> en floración; (Ñ) <i>Coryphantha ramillosa</i> en floración; y (O) <i>Echinocereus stramineus</i> en floración. Estas especies formaron parte de la comunidad de cactáceas evaluada para caracterizar la estructura de la red de interacción con visitantes florales.	50

RESUMEN

Las interacciones planta–visitante floral cumplen un papel central en el mantenimiento de la biodiversidad y en el funcionamiento de los ecosistemas áridos, donde una gran proporción de las especies vegetales depende directamente de la polinización para completar su ciclo reproductivo. En regiones como el Desierto Chihuahuense, donde las condiciones ambientales son extremas y la riqueza de endemismos es elevada, estas relaciones adquieren una relevancia aún mayor, ya que sostienen la continuidad de las comunidades naturales. Bajo este panorama, los jardines botánicos no solo funcionan como espacios de conservación de especies, sino también como escenarios donde es posible resguardar procesos ecológicos fundamentales, como la polinización.

En este sentido, el presente estudio se enfocó en analizar la diversidad, abundancia y estructura de las interacciones planta–visitante floral asociadas a cactáceas dentro del Jardín Botánico “Ing. Gustavo Aguirre Benavides”, ubicado en Saltillo, Coahuila. El trabajo se desarrolló entre marzo y mayo de 2026, registrando interacciones directas en campo entre visitantes florales y 13 especies de cactáceas. Para ello, se utilizó un enfoque de redes bipartitas, complementado con el cálculo de métricas estructurales en el entorno estadístico R.

En total, se registraron 1,641 interacciones, lo que dio lugar a una red con alta conectancia (0.7077), un nivel bajo de especialización ($H_2' = 0.2948$) y un valor de anidamiento (WNODF = 49.36). En conjunto, estos resultados describen una red predominantemente generalista, con una estructura parcialmente anidada y con alta integración entre sus componentes. En cuanto a los visitantes florales, los más frecuentes fueron *Apis mellifera* (36.75 %), *Brassicogethes* sp. (32.54 %) y *Megachile aurantipennis* (28.52 %), mientras que dentro de las cactáceas, *Echinocereus stramineus* destacó por su relevancia estructural dentro de la red.

Más allá de los valores numéricos, la estructura observada sugiere un sistema ecológico bien conectado y funcionalmente cohesivo. Esta organización podría estar asociada a una cierta capacidad de respuesta frente a perturbaciones, aunque este aspecto no fue evaluado directamente en el estudio, por lo que debe interpretarse con cautela. Aun así, los resultados en conjunto apuntan a que el Jardín Botánico actúa como un espacio relevante para la conservación funcional ex situ, al mantener activas interacciones de polinización y otros procesos ecológicos esenciales dentro de un entorno claramente antropizado.

Palabras clave: redes ecológicas, cactáceas, visitantes florales, polinización, conservación ex situ, Desierto Chihuahuense.

1. INTRODUCCIÓN

Las interacciones biológicas son fundamentales para el funcionamiento de los ecosistemas, ya que conectan a las especies mediante procesos como la polinización, la dispersión de semillas y distintas relaciones mutualistas. Más que vínculos aislados, estas interacciones sostienen la dinámica y permanencia de las comunidades naturales. Además de favorecer la reproducción de las especies, contribuyen a mantener la estabilidad ecológica y la organización funcional de los ecosistemas (Bascompte y Jordano, 2007).

En ecosistemas áridos y semiáridos, las cactáceas representan uno de los grupos vegetales más característicos debido a las adaptaciones que les permiten sobrevivir bajo condiciones extremas de estrés hídrico. A pesar de esta resistencia, muchas especies dependen estrechamente de sus visitantes florales para completar sus procesos reproductivos. Abejas, aves y murciélagos participan activamente en la transferencia de polen y, en varios casos, son esenciales para asegurar la formación de frutos y semillas viables (Fleming y Valiente-Banuet, 2002; Munguía-Rosas et al., 2009).

En regiones como el Desierto Chihuahuense, reconocido por su elevada diversidad y endemismo de cactáceas (Hernández, 1994), estas relaciones adquieren especial relevancia frente a problemáticas actuales como la fragmentación del hábitat y los cambios de uso de suelo. En este contexto, evaluar únicamente la presencia o abundancia de las especies resulta insuficiente para comprender el funcionamiento de los ecosistemas, ya que las interacciones ecológicas también forman parte de la estructura y dinámica de las comunidades biológicas (Bascompte et al., 2003; Tylianakis et al., 2010).

Durante las últimas décadas, el estudio de redes ecológicas ha cambiado la manera de analizar la biodiversidad. Este enfoque permite integrar las múltiples relaciones que ocurren entre especies dentro de una comunidad, en lugar de estudiar organismos de manera aislada. En las redes bipartitas planta–visitante floral, las especies se representan como nodos y las interacciones como enlaces funcionales. A partir de ello pueden evaluarse propiedades estructurales como conectancia, anidamiento, modularidad y especialización.

Además del anidamiento y la especialización, la modularidad constituye una propiedad relevante para comprender la organización de las redes mutualistas. Una red modular se caracteriza por la presencia de grupos de especies que interactúan con mayor frecuencia

entre sí que con el resto de la comunidad. Estos módulos pueden originarse por diferencias en la fenología, la distribución espacial de las especies, las preferencias de forrajeo o la disponibilidad de recursos florales (Olesen et al., 2007). Diversos autores han señalado que la modularidad puede contribuir a la estabilidad ecológica al limitar la propagación de perturbaciones dentro de la red, favoreciendo que los efectos de la pérdida de especies permanezcan parcialmente contenidos dentro de determinados grupos funcionales (Dormann y Strauss, 2014).

La disponibilidad de recursos florales también representa un factor determinante en la estructura de las redes planta–visitante floral. La cantidad de flores abiertas, así como la oferta de néctar y polen disponible en una comunidad, pueden influir directamente en la abundancia y diversidad de visitantes florales. En ecosistemas áridos, donde la floración suele concentrarse en periodos específicos del año, las especies con mayor producción floral pueden actuar como recursos clave para numerosos organismos, incrementando la frecuencia de interacciones y favoreciendo una mayor conectividad dentro de la red (Valiente-Banuet et al., 1996; Waser et al., 1996). Por ello, la disponibilidad de alimento para los visitantes florales constituye un elemento fundamental para comprender los patrones de organización y funcionamiento de las comunidades mutualistas.

Otra propiedad ampliamente estudiada en las redes mutualistas es el anidamiento. Las redes con una estructura anidada suelen asociarse con una mayor estabilidad estructural, ya que las especies generalistas mantienen conectada gran parte de la red incluso cuando algunas especies con pocas interacciones disminuyen o desaparecen localmente (Bascompte et al., 2003). Más allá de describir relaciones biológicas, este enfoque permite entender cómo se organiza funcionalmente una comunidad y qué tan vulnerable puede ser ante cambios ambientales.

Los jardines botánicos también han adquirido un papel más amplio dentro de la conservación biológica. Ya no se consideran únicamente espacios destinados al resguardo de colecciones vegetales; actualmente funcionan como sitios para investigación, educación ambiental y conservación de procesos ecológicos. Aunque históricamente la conservación ex situ se centró en preservar especies individuales, existe un interés creciente por conservar también las interacciones ecológicas que sostienen la funcionalidad de las poblaciones (Vovides et al., 2013).

Aun así, el estudio de redes de interacción en ambientes *ex situ* continúa siendo limitado, especialmente en comparación con ecosistemas naturales (Kaiser-Bunbury et al., 2017). Esta falta de información es particularmente relevante en grupos como las cactáceas, cuya reproducción depende estrechamente de los visitantes florales. En este sentido, los jardines botánicos pueden funcionar como laboratorios ecológicos donde es posible documentar procesos biológicos bajo condiciones relativamente controladas.

El Jardín Botánico Ing. Gustavo Aguirre Benavides, ubicado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, alberga una colección representativa de cactáceas del Desierto Chihuahuense, incluidas especies endémicas y algunas bajo categorías de riesgo. Aunque se han realizado investigaciones relacionadas con diversidad de insectos y entomofauna, hasta ahora no se ha evaluado la estructura de las interacciones planta–visitante floral desde un enfoque de redes ecológicas.

Por ello, resulta importante conocer cómo se organizan las interacciones entre cactáceas y visitantes florales dentro de sistemas de conservación *ex situ* como los jardines botánicos. Aunque estos espacios han sido ampliamente utilizados para la conservación de especies vegetales, existe poca información sobre su capacidad para mantener interacciones ecológicas activas. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar la composición de visitantes florales, la frecuencia de interacción y la estructura de la red planta–visitante floral asociada a cactáceas en el Jardín Botánico “Ing. Gustavo Aguirre Benavides”, con la finalidad de aportar información sobre el papel que estos espacios pueden desempeñar en la conservación de las interacciones ecológicas en ambientes áridos.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la diversidad, abundancia y estructura de las interacciones planta–visitante floral asociadas a cactáceas en el Jardín Botánico Ing. Gustavo Aguirre Benavides.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar las especies de visitantes florales asociadas a cactáceas en el Jardín Botánico Ing. Gustavo Aguirre Benavides.
2. Cuantificar la abundancia y frecuencia de visitas entre cactáceas y sus visitantes florales.
3. Caracterizar la estructura de la red de interacción planta–visitante floral asociada a cactáceas mediante métricas de redes ecológicas.
4. Determinar el grado de generalización o especialización de la red de interacción planta–visitante floral.

1.3 HIPÓTESIS

1. Las especies de cactáceas con una mayor disponibilidad floral recibirán un mayor número de visitas por parte de los visitantes florales, debido a que ofrecen una mayor cantidad de recursos alimenticios.
2. La red de interacción cactácea–visitante floral presentará una estructura predominantemente generalista y anidada, caracterizada por una alta conectancia y por la presencia de especies de visitantes que interactúan con múltiples especies de cactáceas.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Interacciones ecológicas y redes mutualistas en ecosistemas áridos

Las interacciones ecológicas forman parte de los procesos que sostienen la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. A través de ellas se regulan aspectos relacionados con la reproducción de las especies, el flujo de energía y la dinámica de las comunidades biológicas, además de influir en la permanencia de numerosos organismos dentro del ambiente (Bascompte y Jordano, 2007). Estas relaciones pueden expresarse de distintas maneras dependiendo de las especies involucradas y de las condiciones ecológicas donde ocurren. Algunas generan beneficios mutuos, otras implican competencia y ciertas interacciones incluso producen efectos negativos para alguno de los organismos participantes. Entre todas ellas, el mutualismo ha recibido especial atención debido a la importancia que tiene para el mantenimiento de diversos procesos biológicos esenciales (Bronstein, 1994).

Uno de los ejemplos más representativos de mutualismo corresponde a las interacciones planta–polinizador. Muchas angiospermas dependen parcial o totalmente de animales para transferir polen y producir semillas viables, por lo que este tipo de relación resulta indispensable para su reproducción sexual. Ollerton et al. (2011) estimaron que cerca del 87 % de las plantas con flor presentan algún grado de dependencia hacia los polinizadores. Sin embargo, la relevancia ecológica de estas interacciones no se limita únicamente a la reproducción vegetal. También participan en procesos vinculados con la regeneración de la vegetación, la disponibilidad de recursos para otros organismos y el mantenimiento general de la biodiversidad (Kearns et al., 1998). En buena medida, la estabilidad funcional de numerosos ecosistemas terrestres depende de la permanencia de estas relaciones biológicas.

En ambientes áridos y semiáridos, donde la disponibilidad de agua suele ser limitada y las condiciones ambientales presentan fuertes variaciones térmicas, las interacciones mutualistas adquieren todavía mayor relevancia. Bajo este tipo de condiciones muchas especies dependen estrechamente de relaciones ecológicas que les permitan completar su ciclo de vida y mantener poblaciones funcionales a lo largo del tiempo (Valiente-Banuet et al., 1991). La disponibilidad de recursos florales, por ejemplo, puede cambiar considerablemente entre temporadas, de modo que las redes de interacción desempeñan un papel importante en la estabilidad y permanencia de las comunidades biológicas. En

ecosistemas sometidos a estrés ambiental constante, incluso alteraciones relativamente pequeñas en las interacciones ecológicas podrían afectar la capacidad de recuperación de las comunidades frente a perturbaciones naturales o antrópicas.

Durante varias décadas, buena parte de las investigaciones sobre polinización se enfocó principalmente en describir relaciones individuales entre pares de especies. Ese enfoque permitió comprender numerosos mecanismos ecológicos, aunque resultaba limitado cuando se intentaba explicar el funcionamiento integral de las comunidades. Conforme aumentó el interés por entender cómo se organizan múltiples especies dentro de un mismo sistema, comenzó a consolidarse el enfoque de redes ecológicas (Bascompte y Jordano, 2007). Bajo esta perspectiva, las especies son representadas como nodos y las interacciones como enlaces, permitiendo visualizar patrones relacionados con la conectividad y organización de las comunidades mutualistas. Esto permitió reconocer que las especies no interactúan de forma aislada, sino como parte de sistemas complejos donde numerosas relaciones permanecen funcionalmente conectadas.

Dentro de las redes mutualistas pueden identificarse distintas propiedades estructurales que ayudan a describir la manera en que las especies se organizan e interactúan dentro de una comunidad. Entre las métricas más utilizadas destacan la conectancia, el anidamiento, la modularidad y la especialización ecológica (Dormann et al., 2009). En conjunto, estas propiedades permiten evaluar distintos aspectos relacionados con la complejidad y estabilidad funcional de las redes ecológicas.

No todas las especies dentro de una red interactúan con la misma intensidad ni con el mismo número de organismos. Una de las métricas utilizadas para describir este nivel de interacción es la conectancia, la cual representa la proporción de interacciones observadas respecto al total de interacciones potenciales dentro de una red (Jordano, 1987). Valores elevados de conectancia suelen asociarse con comunidades donde existe una amplia compartición de interacciones entre especies, lo que puede incrementar la redundancia funcional y proporcionar rutas alternativas para mantener procesos ecológicos cuando algunas especies disminuyen o desaparecen. Por el contrario, redes con baja conectancia presentan interacciones más restringidas y una mayor dependencia de vínculos específicos entre organismos (Dunne et al., 2002). En muchas redes mutualistas suele observarse que las especies con menos interacciones tienden a relacionarse principalmente con organismos altamente generalistas. Este patrón corresponde al anidamiento y constituye una de las propiedades estructurales más frecuentes en este tipo

de redes (Bascompte et al., 2003). Diversos estudios sugieren que esta organización puede contribuir a mantener la cohesión estructural de las comunidades y reducir parcialmente el riesgo de colapso funcional ante la pérdida de especies menos frecuentes. Las especies altamente conectadas, además, suelen desempeñar un papel importante en la integración de múltiples interacciones dentro del sistema ecológico. El anidamiento puede evaluarse mediante diferentes métricas, siendo una de las más utilizadas el índice NODF (Nestedness metric based on Overlap and Decreasing Fill), desarrollado para cuantificar el grado en que las especies especialistas interactúan con subconjuntos de las especies utilizadas por organismos más generalistas. En redes cuantitativas, la versión ponderada WNODF incorpora además la frecuencia de las interacciones registradas, proporcionando una descripción más detallada de la estructura de la red (Almeida-Neto et al., 2008).

La distribución de las interacciones dentro de una red tampoco suele ser completamente homogénea. En algunos casos pueden formarse subconjuntos de especies que interactúan con mayor frecuencia entre sí que con el resto de la comunidad. Este patrón se conoce como modularidad (Olesen et al., 2007) y puede relacionarse con diferencias fenológicas, preferencias florales, comportamiento de forrajeo o variaciones ambientales presentes dentro del hábitat. Algunos autores consideran que las redes con mayor modularidad pueden presentar cierto grado de estabilidad frente a perturbaciones localizadas, debido a que determinados efectos negativos permanecen relativamente contenidos dentro de cada módulo y no necesariamente se propagan de manera inmediata hacia toda la red.

Mientras algunas especies establecen vínculos con numerosos organismos, otras restringen sus interacciones a un conjunto mucho más reducido. La especialización ecológica se relaciona precisamente con ese grado de restricción en las interacciones dentro de la comunidad. En sistemas altamente especializados predominan relaciones más estrechas y específicas, mientras que en redes generalistas las interacciones suelen compartirse entre múltiples especies (Blüthgen et al., 2006). En ambientes sometidos a cambios frecuentes, las estrategias generalistas suelen observarse con mayor frecuencia, probablemente debido a la flexibilidad ecológica que ofrecen frente a variaciones temporales en la disponibilidad de recursos. A nivel de red, el grado de especialización suele cuantificarse mediante el índice H_2' , una métrica estandarizada que permite comparar la diferenciación de nicho entre especies independientemente del tamaño y densidad de la red. Valores cercanos a cero indican sistemas predominantemente

generalistas, mientras que valores próximos a uno reflejan redes con una alta especialización ecológica (Blüthgen et al., 2006). La especialización influye directamente en la respuesta de las redes frente a perturbaciones ambientales. Las redes altamente especializadas pueden ser más sensibles a la pérdida de especies debido a la dependencia de interacciones particulares, mientras que las redes generalistas suelen mostrar una mayor capacidad de reorganización funcional ante cambios en la composición de la comunidad (Memmott et al., 2004).

Otra propiedad importante dentro de las redes mutualistas es la redundancia funcional. Este concepto hace referencia a la capacidad que poseen distintas especies para desempeñar funciones ecológicas similares dentro de una comunidad. En sistemas planta–polinizador, la presencia de múltiples visitantes florales asociados con una misma especie vegetal puede incrementar la resiliencia ecológica y favorecer la continuidad de los procesos de polinización incluso cuando algunas especies disminuyen temporalmente (Kaiser-Bunbury y Blüthgen, 2015). Comunidades con mayor redundancia funcional suelen presentar también una capacidad más alta de respuesta frente a disturbios ambientales moderados.

Las redes mutualistas difícilmente se organizan de manera aleatoria. Diversos estudios sugieren que detrás de estas interacciones existen procesos ecológicos y evolutivos que terminan moldeando la estructura de las comunidades (Bascompte y Jordano, 2007). A partir de ello surgió el concepto de “arquitectura de la biodiversidad”, el cual propone que ciertas especies altamente conectadas pueden funcionar como nodos centrales o “hubs” ecológicos dentro de las redes de interacción. Estas especies concentran una proporción considerable de los vínculos presentes dentro del sistema y desempeñan un papel importante en el mantenimiento de la conectividad estructural y funcional de las comunidades biológicas.

En años recientes, el estudio de redes ecológicas mutualistas ha adquirido gran relevancia dentro de la biología de la conservación. Esto ocurre porque permite evaluar no solamente la diversidad de especies presentes en un ecosistema, sino también las relaciones funcionales que sostienen numerosos procesos ecológicos. Actualmente, distintos autores consideran que conservar las interacciones ecológicas puede resultar tan importante como preservar las especies individuales, debido a que la pérdida de vínculos mutualistas puede alterar significativamente la estabilidad y funcionamiento de las comunidades biológicas (Tylianakis et al., 2010). Bajo esta perspectiva, comprender la estructura y organización

de las redes planta–polinizador representa una herramienta importante para el desarrollo de estrategias de conservación orientadas no solo a proteger especies, sino también los procesos ecológicos que mantienen la funcionalidad de los ecosistemas.

2.1.1 Modularidad

La modularidad constituye una de las propiedades estructurales más importantes de las redes ecológicas. Este patrón ocurre cuando las especies se organizan en grupos o módulos que presentan una mayor frecuencia de interacciones entre sí que con el resto de las especies de la comunidad (Olesen et al., 2007). En las redes planta–polinizador, los módulos pueden estar formados por conjuntos de especies vegetales y visitantes florales que comparten preferencias ecológicas, periodos de actividad similares o características morfológicas compatibles.

La formación de módulos puede estar influenciada por diversos factores, entre ellos la fenología de las especies, la disponibilidad de recursos florales, la distribución espacial de los organismos y las preferencias de forrajeo de los visitantes (Olesen et al., 2007; Dormann y Strauss, 2014). Debido a ello, la modularidad proporciona información sobre la organización interna de las comunidades y permite identificar subconjuntos funcionales dentro de las redes mutualistas.

Desde una perspectiva ecológica, diversos autores han sugerido que una estructura modular puede contribuir a incrementar la estabilidad de las redes al limitar la propagación de perturbaciones entre grupos de especies (Bascompte y Jordano, 2007). Cuando una perturbación afecta a un módulo específico, sus efectos pueden permanecer relativamente contenidos dentro de ese subconjunto de especies, reduciendo el impacto potencial sobre toda la comunidad. Por esta razón, la modularidad es considerada un componente importante en el estudio de la resiliencia y organización funcional de las redes ecológicas.

La intensidad de este patrón suele cuantificarse mediante el índice de modularidad Q , el cual evalúa el grado en que las interacciones se encuentran agrupadas dentro de módulos definidos. Valores elevados de Q indican una organización más compartimentada de la red, mientras que valores bajos sugieren una distribución más homogénea de las interacciones entre las especies de la comunidad (Newman, 2006; Dormann y Strauss, 2014).

2.1.2 Disponibilidad de recursos florales y estructura de las redes

La disponibilidad de recursos florales constituye uno de los principales factores que determinan la abundancia y diversidad de visitantes florales dentro de una comunidad. Recursos como néctar, polen y aceites florales representan la principal fuente de alimento para numerosos insectos polinizadores, por lo que las variaciones en la cantidad y distribución de flores pueden influir directamente sobre los patrones de interacción observados en las redes mutualistas (Waser et al., 1996).

En ecosistemas áridos y semiáridos, la disponibilidad de flores suele presentar una marcada estacionalidad asociada a los periodos de precipitación y a las condiciones climáticas predominantes (Valiente-Banuet et al., 1996). Durante los eventos de floración masiva, las plantas pueden atraer una mayor diversidad y abundancia de visitantes florales, incrementando la frecuencia de interacciones y favoreciendo una mayor conectividad dentro de la red.

Diversos estudios han demostrado que especies con una elevada producción floral suelen concentrar un mayor número de visitas debido a la mayor oferta de recursos alimenticios disponibles para los polinizadores (Fleming y Valiente-Banuet, 2002). Como consecuencia, estas especies pueden desempeñar un papel estructural importante dentro de las redes ecológicas, funcionando como nodos altamente conectados que favorecen la integración de múltiples especies de visitantes.

Asimismo, la heterogeneidad en la disponibilidad de recursos florales puede influir sobre propiedades estructurales de las redes como la conectancia, el anidamiento y la modularidad. Comunidades con una oferta floral diversa y continua suelen favorecer interacciones más generalistas, mientras que una disponibilidad limitada o altamente estacional puede promover relaciones más restringidas entre especies (Petanidou et al., 2008). Por ello, la evaluación de la disponibilidad floral resulta fundamental para comprender los mecanismos ecológicos que determinan la estructura y funcionamiento de las redes planta–visitante floral.

En consecuencia, variables como el número de flores disponibles y la duración de los eventos de floración pueden influir directamente sobre la frecuencia de visitas y la importancia estructural que determinadas especies vegetales adquieren dentro de la red mutualista.

2.2 Redes planta–polinizador en ambientes áridos

Los ecosistemas áridos y semiáridos cubren aproximadamente una tercera parte de la superficie terrestre y se caracterizan por presentar disponibilidad limitada de agua, temperaturas elevadas, alta radiación solar y una marcada variación temporal en los recursos disponibles (Whitford, 2019). A pesar de estas condiciones ambientales, albergan una importante diversidad biológica y numerosas interacciones ecológicas adaptadas al estrés ambiental. En muchos casos, la permanencia de las especies dentro de estos ambientes depende de mecanismos ecológicos que permiten aprovechar recursos que suelen presentarse de forma temporal o impredecible.

Dentro de estos ecosistemas, las interacciones planta–polinizador desempeñan un papel particularmente importante en la reproducción sexual de numerosas especies vegetales. Debido a la temporalidad de las lluvias y a la marcada estacionalidad de la floración, los recursos florales suelen concentrarse durante periodos relativamente cortos. Esto favorece la actividad de distintos visitantes florales y propicia el establecimiento de redes mutualistas dinámicas (Valiente-Banuet et al., 1996). La disponibilidad temporal de flores también genera variaciones importantes en la composición y abundancia de organismos visitantes entre temporadas.

En ambientes áridos, muchas redes planta–polinizador suelen mostrar una organización predominantemente generalista, caracterizada por niveles relativamente altos de conectancia y bajos niveles de especialización ecológica (Petanidou et al., 2008). Este comportamiento probablemente se relaciona con la necesidad de mantener múltiples oportunidades de interacción bajo condiciones ambientales variables, donde tanto la disponibilidad de flores como la abundancia de visitantes pueden cambiar considerablemente entre periodos de floración. Bajo estas condiciones, compartir recursos florales entre distintas especies puede favorecer la estabilidad de las interacciones dentro de la comunidad.

Las estrategias generalistas suelen ser frecuentes en ecosistemas sometidos a elevada variabilidad ambiental. Mientras algunas especies interactúan con un número reducido de organismos, otras establecen vínculos con múltiples especies dentro de la red mutualista. Esta flexibilidad ecológica puede aumentar la probabilidad de reproducción y reducir parcialmente la dependencia hacia socios específicos, especialmente en ambientes donde la disponibilidad de recursos cambia constantemente.

En muchas redes mutualistas de zonas áridas existen especies altamente conectadas que funcionan como nodos centrales dentro del sistema ecológico. Generalmente, estas especies interactúan con numerosos organismos y favorecen la conectividad entre especies menos frecuentes o con interacciones más restringidas (Bascompte et al., 2003). Entre los visitantes florales más importantes destacan distintos himenópteros sociales y solitarios, particularmente por su capacidad de desplazamiento, eficiencia de forrajeo y flexibilidad ecológica (Michener, 2007).

No obstante, los himenópteros no son los únicos organismos que participan en estas interacciones. Diversos coleópteros, dípteros y lepidópteros también visitan activamente las flores dentro de ecosistemas xerófitos. En algunos casos actúan únicamente como consumidores oportunistas de recursos florales, aunque otros contribuyen de manera importante a la transferencia de polen y al mantenimiento de la conectividad dentro de las redes mutualistas (Bernhardt, 2000). La participación de distintos grupos funcionales puede incrementar la redundancia ecológica y favorecer la continuidad de ciertos procesos incluso cuando algunas especies disminuyen temporalmente.

Otro patrón frecuente en redes mutualistas de ambientes áridos es el anidamiento. De forma general, las especies menos conectadas suelen interactuar principalmente con organismos generalistas ampliamente distribuidos dentro de la comunidad (Bascompte y Jordano, 2007). Este tipo de organización puede contribuir a mantener la cohesión estructural de la red y proporcionar cierta redundancia funcional frente a fluctuaciones ambientales o pérdida de especies. Aun así, la intensidad de este patrón puede variar dependiendo de las condiciones ecológicas y de la composición biológica de cada comunidad.

En años recientes, diversos factores antropogénicos han comenzado a modificar la estructura de las redes planta–polinizador en numerosos ecosistemas áridos. Factores como la fragmentación del hábitat, la urbanización, el cambio de uso de suelo o la introducción de especies exóticas pueden alterar la disponibilidad de recursos florales y modificar la composición de visitantes presentes dentro de las comunidades biológicas (Aizen et al., 2008). En consecuencia, algunas redes mutualistas pueden experimentar procesos de simplificación ecológica, pérdida de interacciones y cierta homogenización funcional.

En México, los ecosistemas áridos y semiáridos albergan una elevada diversidad de cactáceas y otros grupos vegetales que dependen estrechamente de polinizadores animales. Estas interacciones representan componentes importantes para la permanencia y regeneración de numerosas especies endémicas del Desierto Chihuahuense y de otras regiones xerófitas del país (Mandujano et al., 2010). Bajo esta perspectiva, el análisis de redes planta–polinizador resulta relevante para comprender los procesos ecológicos que sostienen la biodiversidad y para desarrollar estrategias de conservación orientadas no solo a proteger especies individuales, sino también las interacciones ecológicas que mantienen la funcionalidad de los ecosistemas.

2.3 Cactáceas y visitantes florales

La familia Cactaceae constituye uno de los grupos vegetales más representativos de los ecosistemas áridos y semiáridos del continente americano. México es considerado uno de los principales centros de diversificación de esta familia, ya que alberga aproximadamente el 70 % de las especies conocidas a nivel mundial, muchas de ellas endémicas y restringidas a regiones específicas del país (Hernández y Godínez, 1994). Debido a esta riqueza biológica, las cactáceas poseen una elevada importancia ecológica y de conservación dentro de las regiones áridas mexicanas.

Las cactáceas presentan una amplia diversidad de estrategias reproductivas y adaptaciones florales relacionadas con la atracción de visitantes y la eficiencia de la polinización. Entre estas características destacan la forma floral, el tamaño de las flores, los horarios de apertura, la producción de néctar y polen, así como los colores y aromas particulares. En conjunto, estos rasgos conforman distintos síndromes de polinización asociados con grupos específicos de visitantes florales (Nobel, 2002).

Algunas especies producen flores diurnas con colores vistosos que atraen principalmente abejas, mariposas y otros insectos activos durante el día. Otras especies presentan flores nocturnas grandes, claras y aromáticas, asociadas principalmente con murciélagos y polillas nocturnas (Fleming y Valiente-Banuet, 2002). Estas diferencias morfológicas y fenológicas influyen directamente en la composición y frecuencia de visitantes florales observados en cada especie.

Uno de los síndromes de polinización más comunes en cactáceas es la melitofilia, donde las abejas actúan como principales vectores de polen. Diversos estudios realizados en el Desierto Chihuahuense han documentado que estos insectos representan los visitantes

florales más frecuentes y eficientes en géneros como *Mammillaria*, *Turbinicarpus* y *Echinocereus* (Valiente-Banuet et al., 1996). Esto se debe, en parte, a que las abejas presentan una elevada capacidad para localizar recursos florales y transportar polen entre flores de manera eficiente.

Entre los visitantes florales más importantes destacan diversas abejas nativas pertenecientes a géneros como *Megachile* y *Agapostemon*. Estas especies suelen presentar patrones de forrajeo eficientes y, en algunos casos, cierta preferencia hacia recursos florales específicos. Gracias a ello, contribuyen significativamente a la transferencia efectiva de polen y al mantenimiento de las interacciones ecológicas dentro de ecosistemas áridos (Michener, 2007).

Las especies del género *Megachile* pertenecen a la familia *Megachilidae* y son reconocidas por transportar polen mediante estructuras especializadas conocidas como escopas ventrales. Este mecanismo les permite movilizar cantidades importantes de polen durante sus recorridos florales. Diversos estudios sugieren que algunas especies de este grupo funcionan como polinizadores particularmente eficientes en plantas adaptadas a zonas secas debido a la frecuencia de visita y al contacto directo con las estructuras reproductivas de las flores.

Por otro lado, las abejas del género *Agapostemon* pertenecen a la familia *Halictidae* y suelen presentar hábitos más generalistas, interactuando con múltiples especies vegetales a lo largo de la temporada de floración. Esta flexibilidad ecológica favorece la conectividad entre diferentes plantas y contribuye al mantenimiento de la cohesión estructural dentro de las redes mutualistas.

La situación cambia con *Apis mellifera*, abeja doméstica ampliamente distribuida tanto en ambientes urbanos como naturales. Debido a su comportamiento eusocial y elevada capacidad de reclutamiento, esta especie suele dominar numéricamente numerosas comunidades de visitantes florales. Aunque puede actuar como un polinizador eficiente en distintas especies vegetales, algunos estudios sugieren que su abundancia también puede modificar parcialmente la estructura de las redes mutualistas e incluso generar competencia con especies nativas por los recursos florales disponibles (Goulson, 2003; Aizen et al., 2008).

Desde la perspectiva de redes ecológicas, la presencia dominante de especies altamente generalistas puede incrementar la conectancia y centralización de las interacciones

planta-visitante floral. Sin embargo, depender excesivamente de una sola especie polinizadora también podría incrementar la vulnerabilidad del sistema frente a perturbaciones ambientales o disminuciones poblacionales.

Además de las abejas, distintos coleópteros participan frecuentemente como visitantes florales de cactáceas. Algunos consumen polen o tejidos florales y pueden actuar como polinizadores incidentales mediante el transporte accidental de polen entre flores (Bernhardt, 2000). La eficiencia de estos organismos suele variar dependiendo de la especie y de su comportamiento dentro de las flores.

Las interacciones entre cactáceas y visitantes florales poseen una elevada importancia ecológica debido a que numerosas especies presentan distribuciones restringidas, poblaciones reducidas o algún grado de amenaza. La alteración de estas redes mutualistas puede afectar directamente los procesos reproductivos, la producción de semillas y la permanencia de las poblaciones vegetales dentro de ecosistemas áridos (Valiente-Banuet y Godínez-Álvarez, 2002). Por ello, comprender la estructura y funcionamiento de estas interacciones resulta importante para desarrollar estrategias de conservación orientadas no solo a las especies vegetales, sino también a los organismos que participan en sus procesos de polinización.

2.4 Jardines botánicos como espacios de conservación funcional

Los jardines botánicos han dejado de considerarse únicamente colecciones vegetales orientadas a fines taxonómicos o de exhibición. Actualmente, muchos de estos espacios cumplen funciones relacionadas con la conservación ex situ, la investigación científica, la educación ambiental y la protección de especies amenazadas (Heywood, 2011). Sin embargo, distintos autores han señalado que conservar solamente individuos vegetales no garantiza necesariamente la permanencia de los procesos ecológicos asociados con las especies, especialmente aquellos relacionados con la polinización, dispersión de semillas y otras interacciones biológicas fundamentales (Mace et al., 2012; Vovides et al., 2013).

Desde esta perspectiva, considerar a los jardines botánicos como espacios donde también ocurren procesos ecológicos implica prestar atención no solo a las especies resguardadas, sino también a las interacciones biológicas que se desarrollan dentro de sus colecciones. Estos sitios ofrecen ventajas importantes para la conservación aplicada debido a que cuentan con infraestructura especializada, experiencia hortícola y áreas destinadas a investigación y educación ambiental. Aun así, conservar ejemplares vivos por sí solo

difícilmente asegura que los procesos ecológicos permanezcan funcionales a lo largo del tiempo. En muchos casos también resulta necesario registrar y evaluar las interacciones biológicas presentes dentro de estos espacios mediante observaciones sistemáticas de visitantes florales y otros organismos asociados.

En las últimas décadas, los jardines botánicos han adquirido mayor relevancia dentro de ambientes urbanos y periurbanos, particularmente porque pueden funcionar como refugios ecológicos en paisajes fuertemente transformados por actividades humanas (Hall et al., 2017). Estos espacios suelen proporcionar recursos florales, sitios de refugio y microhábitats favorables para diversos organismos, especialmente insectos polinizadores. Incluso dentro de ciudades altamente urbanizadas, algunas áreas verdes pueden mantener parte de la biodiversidad local y favorecer la permanencia temporal de distintas especies.

La urbanización, por otra parte, suele provocar fragmentación y pérdida de hábitat, generando aislamiento entre poblaciones naturales y reduciendo la conectividad ecológica entre comunidades biológicas. Frente a esta situación, los jardines botánicos y otras áreas verdes urbanas pueden ayudar a mantener cierta conectividad funcional, facilitando el movimiento y permanencia de organismos dentro de paisajes antropizados (Aronson et al., 2017). Aunque estos espacios no reemplazan a los ecosistemas naturales, sí pueden contribuir parcialmente a conservar algunas interacciones ecológicas importantes dentro de ambientes urbanos.

Diversos estudios sugieren que jardines botánicos con alta diversidad vegetal pueden mantener comunidades relativamente estables de polinizadores y redes planta–visitante floral que, en ciertos aspectos, llegan a parecerse a las registradas en ambientes naturales (Vilella-Arnizaut et al., 2022). La disponibilidad continua de recursos florales y la heterogeneidad vegetal favorecen tanto a especies generalistas como a organismos con interacciones más restringidas, permitiendo que múltiples relaciones ecológicas permanezcan activas incluso dentro de ambientes urbanos. No obstante, la composición y estructura de estas redes puede variar considerablemente dependiendo del manejo de la vegetación y de las características del entorno donde se ubican los jardines botánicos.

Las condiciones propias de estos sistemas manejados también pueden influir sobre la estructura de las interacciones ecológicas registradas. La proximidad espacial entre especies vegetales, el manejo constante de la vegetación y la concentración relativamente alta de recursos florales pueden incrementar la frecuencia de encuentros entre visitantes

y flores, modificando parcialmente métricas como conectancia y especialización ecológica (Waser et al., 1996). Bajo ciertas condiciones, algunas redes registradas en jardines botánicos pueden presentar niveles de generalización más altos que los observados en ecosistemas naturales con mayor heterogeneidad ambiental.

Además de conservar biodiversidad, estos espacios poseen relevancia para la conservación genética de especies amenazadas o endémicas. En las cactáceas del Desierto Chihuahuense, por ejemplo, muchas poblaciones naturales presentan tamaños reducidos y distribución fragmentada, situación que puede afectar la viabilidad reproductiva de las especies a largo plazo. Debido a ello, mantener procesos reproductivos funcionales dentro de colecciones vivas resulta importante para conservar parte de la variabilidad genética de las especies resguardadas (Vovides et al., 2013).

A pesar de la creciente importancia de los jardines botánicos dentro de la conservación biológica, todavía existe información limitada sobre la estructura y funcionamiento de las redes planta–visitante floral en colecciones ex situ, particularmente en ecosistemas áridos y semiáridos. La mayoría de las investigaciones disponibles se ha desarrollado en ambientes naturales, mientras que las interacciones ecológicas presentes dentro de jardines botánicos han recibido comparativamente menos atención. Esto ha generado vacíos de información relacionados con el papel funcional que estos espacios pueden desempeñar en la conservación de procesos ecológicos.

En el Jardín Botánico “Ing. Gustavo Aguirre Benavides” se han realizado investigaciones relacionadas con diversidad de insectos y entomofauna asociada; sin embargo, hasta el momento no se había evaluado la estructura ecológica de las interacciones planta–visitante floral asociadas a cactáceas. Bajo esta perspectiva, el presente estudio busca analizar la diversidad, abundancia y organización estructural de dichas interacciones mediante el enfoque de redes ecológicas. Con ello se pretende aportar información sobre el papel funcional que pueden desempeñar los jardines botánicos en la conservación de procesos mutualistas y biodiversidad funcional dentro de ambientes áridos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

El estudio se realizó en el Jardín Botánico “Ing. Gustavo Aguirre Benavides”, ubicado dentro de las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, México (Figura 1). Este jardín botánico está destinado a la conservación ex situ de especies vegetales, así como al desarrollo de actividades de investigación, educación ambiental y divulgación científica, con énfasis en la flora del Desierto Chihuahuense (Ramos Robles et al., 2023).

El jardín cuenta con una superficie aproximada de cuatro hectáreas, distribuidas en diferentes secciones que representan distintos tipos de vegetación regional, además de áreas de cultivo en campo abierto y vivero. Alberga alrededor de 300 especies vegetales, con una representación importante de la familia Cactaceae, muchas de ellas endémicas y catalogadas en alguna categoría de riesgo, lo que convierte al sitio en un área de gran importancia para estudios de conservación y manejo de especies vegetales (Ramos-Robles et al., 2023).

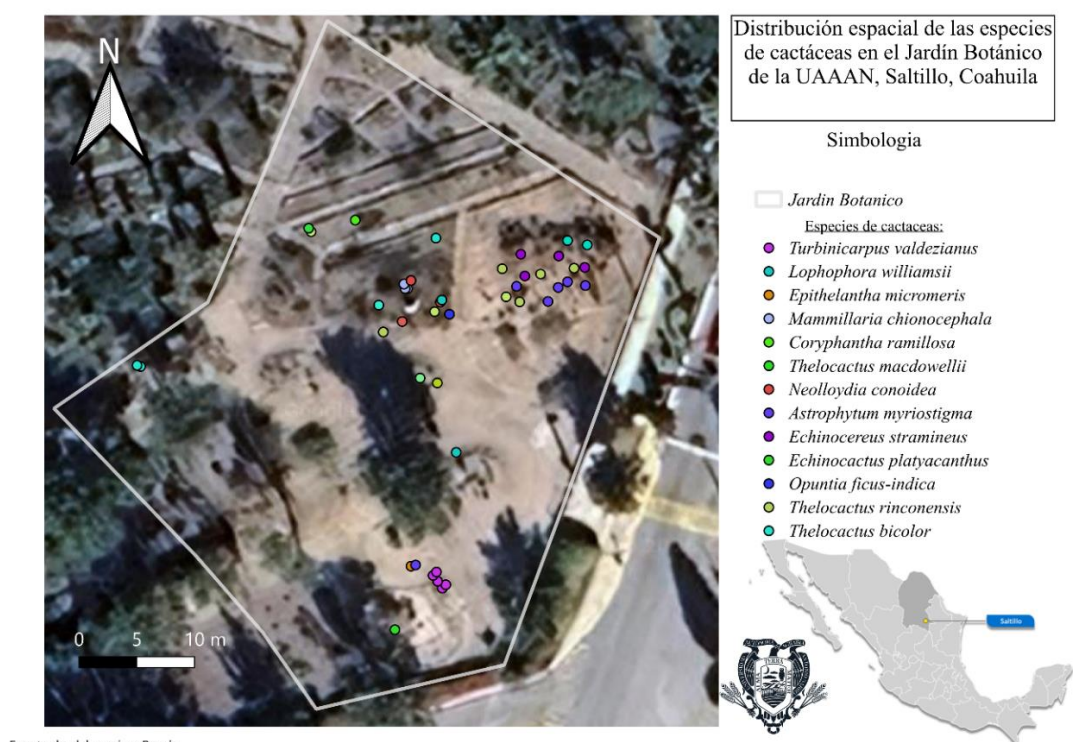


Figura 1. Distribución espacial de las especies de cactáceas en el Jardín Botánico “Ing. Gustavo Aguirre Benavides”.

3.2 Diseño del muestreo y registro de interacciones

Previamente al muestreo formal, durante junio de 2025 se realizó una fase exploratoria con el propósito de identificar las especies de cactáceas en floración y ajustar el diseño metodológico. Esta etapa permitió definir los horarios de observación, la duración de las sesiones y el número de individuos por especie considerados durante el muestreo definitivo. El uso de observaciones directas en campo constituye uno de los enfoques más utilizados para la construcción de redes de interacción planta–visitante floral, debido a que la estructura de estas redes depende directamente de la intensidad y estandarización del esfuerzo de muestreo (Nielsen et al., 2011).

El muestreo formal se desarrolló del 2 de marzo al 22 de mayo de 2026, periodo que coincidió con la floración de la mayoría de las especies de cactáceas presentes en el jardín botánico.

Las observaciones se realizaron de lunes a viernes en un horario de 10:00 a 13:00 h. La selección de este intervalo se basó en la fase exploratoria realizada previamente en el Jardín Botánico “Ing. Gustavo Aguirre Benavides”, durante la cual se monitoreó la apertura floral y la actividad de los visitantes florales en las especies de cactáceas presentes. Se observó que la mayoría de las especies incluidas en el estudio presentaban flores completamente abiertas durante este periodo, coincidiendo además con la mayor frecuencia de visitas registradas. Por ello, el horario fue estandarizado para todas las especies con el fin de mantener un esfuerzo de muestreo homogéneo y permitir la comparación de las interacciones registradas entre especies. Aunque algunas cactáceas pueden presentar antesis en horarios más tempranos o incluso nocturnos, las especies que florecieron durante el periodo de estudio mostraron disponibilidad floral y actividad de visitantes suficiente dentro del intervalo seleccionado, por lo que se consideró representativo para los objetivos de esta investigación. Cada jornada comprendió tres horas efectivas de observación, acumulando un esfuerzo total de 180 horas distribuidas en 12 semanas consecutivas.

Las observaciones se realizaron exclusivamente en individuos con floración activa. Para cada especie se seleccionaron entre tres y cinco individuos adultos, dependiendo de su disponibilidad dentro de la colección y de la presencia simultánea de flores funcionales. Todos los individuos presentaron al menos una flor completamente abierta al momento del muestreo. Además, se procuró mantener una separación espacial entre individuos y

considerar distintas secciones del jardín botánico, con el fin de reducir posibles efectos de pseudorreplicación espacial y minimizar la agregación artificial propia de un sistema *ex situ*.

En cada individuo se realizaron dos sesiones de observación de cinco minutos, acumulando un esfuerzo de 10 minutos por individuo durante cada jornada de muestreo. La duración de cinco minutos por sesión se estableció como una unidad de muestreo estandarizada para registrar la frecuencia de visitas florales, criterio empleado en estudios de biología de la polinización y comportamiento de forrajeo, donde la frecuencia de visita se expresa como número de visitas por flor en intervalos de cinco minutos (Latif et al., 2019). La repetición de dos sesiones por individuo permitió aumentar la probabilidad de detección de visitantes florales, disminuir el efecto de variaciones momentáneas en la actividad de los insectos y mantener un esfuerzo de observación homogéneo entre los individuos muestreados. Durante cada sesión se registró cualquier interacción observada entre los visitantes florales y las flores. Para este estudio se consideró como interacción cualquier contacto directo de un organismo con las estructuras florales de una cactácea, incluyendo pétalos, anteras o estigma, independientemente de que se confirmara o no la transferencia efectiva de polen. Debido a ello, se utilizó el término “visitante floral” para referirse a todos los organismos observados interactuando con las flores durante el periodo de estudio. Las observaciones se realizaron únicamente bajo condiciones ambientales favorables, evitando periodos con lluvia o vientos intensos que pudieran interferir con la actividad de los visitantes florales.

La identificación de visitantes florales se realizó mediante observación directa y registro fotográfico. Posteriormente, las fotografías fueron revisadas utilizando la plataforma Naturalist (Naturalist, 2026) y bibliografía especializada, con el fin de corroborar la identidad taxonómica de los organismos registrados. Asimismo, se consultó un proyecto previamente establecido dentro de la plataforma correspondiente al Jardín Botánico “Ing. Gustavo Aguirre Benavides”, el cual integra registros de diversidad biológica asociados al área de estudio y permitió complementar la identificación taxonómica de algunos organismos registrados.

No se realizó colecta de ejemplares, priorizando un enfoque no invasivo acorde con los principios de conservación biológica y manejo de especies de interés ecológico. Los registros obtenidos se organizaron en una matriz cuantitativa de interacción planta–

visitante floral, donde las filas representaron las especies de cactáceas y las columnas los visitantes florales registrados. Cada celda correspondió a la frecuencia total de visitas observadas entre pares de especies durante el periodo de muestreo. Este tipo de matrices constituye la base fundamental para el análisis estructural de redes ecológicas bipartitas (Dormann et al., 2008).

3.3 Análisis de la red de interacción planta-visitante floral

Para describir la comunidad de visitantes florales asociada a las especies de cactáceas estudiadas, se obtuvo el número total de registros de cada grupo de visitantes a partir de las observaciones realizadas durante el periodo de muestreo. Asimismo, se calculó el número total de flores registradas por especie de cactácea con el fin de evaluar la disponibilidad floral y comparar la oferta de recursos entre las especies estudiadas.

Con el propósito de analizar la relación entre la disponibilidad floral y la frecuencia de visitas, se calculó el número total de visitas registradas para cada especie de cactácea mediante la suma de todos los visitantes observados durante el estudio. La relación entre el número total de flores y el número total de visitas se evaluó mediante una correlación de rangos de Spearman.

A partir de los registros obtenidos en campo se construyó una matriz cuantitativa de interacción planta-visitante floral, donde las filas correspondieron a las especies de visitantes florales y las columnas a las especies de cactáceas. Cada celda de la matriz representó la frecuencia de interacción observada entre una especie de visitante y una especie de planta. Con esta matriz se construyó una red bipartita cuantitativa, donde los nodos representaron las especies de cactáceas y los visitantes florales registrados, mientras que los enlaces representaron las interacciones observadas entre ambos grupos biológicos. El análisis de redes bipartitas permite evaluar patrones de organización ecológica y describir el grado de conectividad, generalización y especialización de las comunidades mutualistas (Bascompte y Jordano, 2007).

Como medida general de la estructura de la red se calculó la conectancia (C), definida como la proporción de interacciones observadas respecto al número total de interacciones posibles dentro de la red, mediante la ecuación:

$$C = \frac{L}{P \times V} \text{ donde;}$$

L = es el número de enlaces observados,

P =el número de especies de cactáceas

V = el número de visitantes florales registrados. Este índice permite evaluar el grado de interconexión general de la red (Dormann et al., 2009).

El grado de especialización de la red se evaluó mediante el índice H_2' , cuyos valores varían entre 0 y 1. Valores cercanos a 0 indican redes predominantemente generalistas y valores próximos a 1 representan redes altamente especializadas (Blüthgen et al., 2006).

El anidamiento de la red se evaluó mediante el índice WNODF (Weighted Nestedness based on Overlap and Decreasing Fill), una extensión cuantitativa del índice NODF que incorpora la frecuencia de las interacciones registradas entre especies. Este índice varía de 0 a 100, donde valores cercanos a 0 indican ausencia de anidamiento y valores cercanos a 100 representan una estructura altamente anidada. Para probar si las estimaciones de WNODF diferían significativamente de redes con especies que interactúan aleatoriamente, comparamos el anidamiento observado con el anidamiento de 1000 redes aleatorias basadas en un modelo nulo de Patefield conservando los totales marginales de filas y columnas de la matriz de interacción. Posteriormente, el valor observado se comparó con la distribución de valores obtenida a partir de las matrices aleatorizadas mediante la función null.t.test, obteniendo un estadístico t y su correspondiente valor de probabilidad (Almeida-Neto et al., 2008; Dormann et al., 2009).

La modularidad de la red se evaluó mediante el índice Q , el cual cuantifica el grado en que las especies se organizan en módulos o grupos de interacción relativamente independientes dentro de la red. Un módulo está conformado por especies que interactúan con mayor frecuencia entre sí que con especies pertenecientes a otros módulos. La detección de módulos se realizó mediante el algoritmo QuanBiMo (Quantitative Bipartite Modularity), diseñado específicamente para redes bipartitas cuantitativas (Dormann & Strauss, 2014). Para evaluar la significancia de la modularidad observada, se generaron 1000 redes aleatorias mediante el algoritmo de Patefield. Posteriormente, se calculó la modularidad de cada red aleatoria y se comparó con la modularidad observada.

Asimismo, se calcularon métricas a nivel de especie, incluyendo el grado de interacción (degree), la fuerza de interacción o importancia relativa (species strength) y la especialización a nivel especie (d'). El grado corresponde al número de especies con las que interactúa cada organismo. El species strength estima la importancia relativa de cada especie dentro de la red considerando la frecuencia de sus interacciones, de manera que valores elevados indican especies con una mayor contribución a la estructura de la red. Por su parte el índice d' evalúa el grado de especialización de cada especie con respecto a los patrones de interacción observados.

Todos los análisis se realizaron en el programa R versión 4.4.1 (R Core Team, 2025), utilizando el paquetería bipartite (Dormann et al., 2008). Las representaciones gráficas se elaboraron utilizando los paquetes ggplot2 y ggrepel.

4. RESULTADOS

4.1 Especies de cactáceas registradas y disponibilidad floral

Durante el periodo de estudio se registraron 1,641 interacciones entre visitantes florales y 13 especies de cactáceas en floración: *Astrophytum myriostigma*, *Coryphantha ramillosa*, *Echinocactus platyacanthus*, *Echinocereus stramineus*, *Epithelantha micromeris*, *Lophophora williamsii*, *Mammillaria chionocephala*, *Neolloydia conoidea*, *Opuntia ficus-indica*, *Thelocactus bicolor*, *Thelocactus macdowellii*, *Thelocactus rinconensis* y *Turbinicarpus valdezius*.

Se registró un total de 385 flores durante el periodo de muestreo. El número de flores varió entre especie (Figura 2), siendo *Mammillaria chionocephala* la que presentó el mayor número de flores registradas (66), seguida de *Echinocereus stramineus* (62) y *Coryphantha ramillosa* (51), mientras que *Lophophora williamsii* presentó la menor cantidad de flores observadas (9).

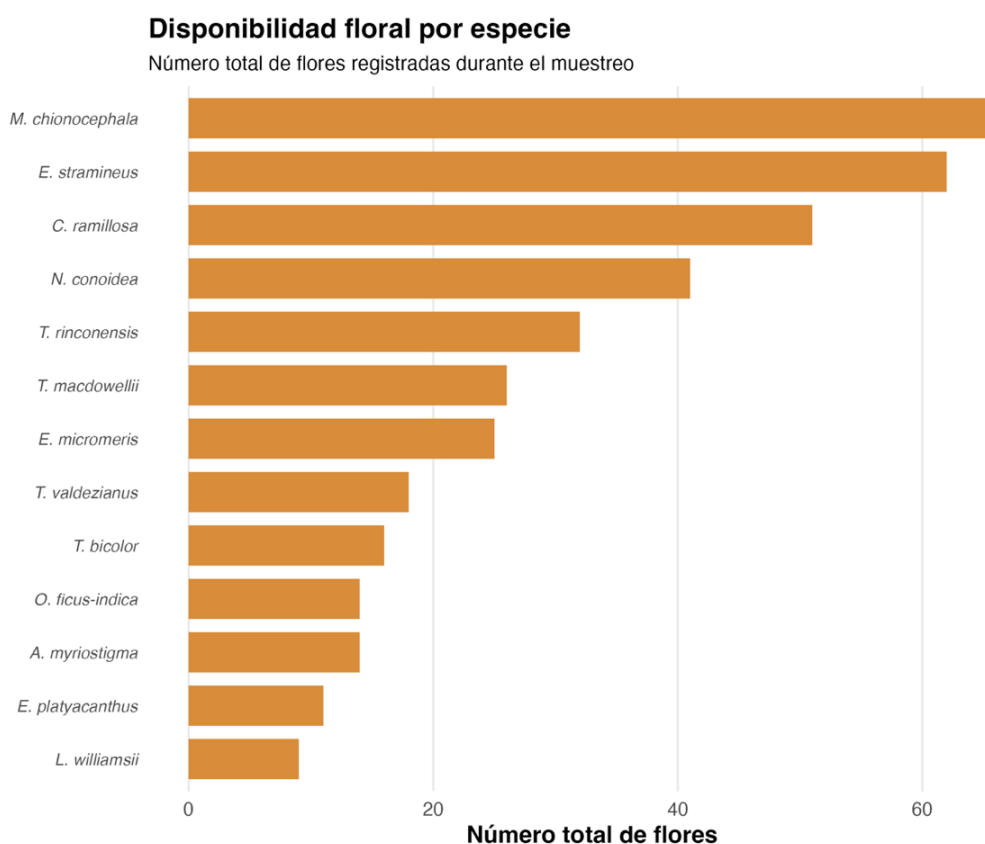


Figura 2. Disponibilidad floral de las especies de cactáceas registradas durante el periodo de muestreo en el Jardín Botánico “Ing. Gustavo Aguirre Benavides”.

4.2 Composición y frecuencia de visitantes florales

En total se registraron cinco grupos principales de visitantes florales asociados a estas especies de cactáceas: abejas sociales (*Apis mellifera*), abejas solitarias (*Megachile aurantipennis*), abejas halictidas (*Agapostemon* sp1), coleópteros (*Brassicogethes* sp1) y hormigas (Formicidae sp1) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Visitantes florales registrados y número de interacciones observadas

Familia	Especie	Número de interacciones
Apidae	<i>Apis mellifera</i>	603
Nitidulidae	<i>Brassicogethes</i> sp.	534
Megachilidae	<i>Megachile aurantipennis</i>	468
Formicidae	Formicidae sp. 1	21
Halictidae	<i>Agapostemon</i> sp. 1	15

Apis mellifera presentó el mayor número de registros, con 603 interacciones, equivalentes al 36.75 % del total observado (Cuadro 1). Esta especie interactuó con las 13 especies de cactáceas registradas. Los coleópteros del género *Brassicogethes* acumuló 534 interacciones (32.54 %), mientras que *Megachile aurantipennis* presentó 468 interacciones (28.52 %) y al igual que *Apis mellifera*, también interactuó con todas las especies de cactáceas registradas. En conjunto, estas tres especies concentraron el 97.81 % de las interacciones observadas.

En contraste, *Agapostemon* sp.1 registró 15 visitas (0.91 %), mientras que la hormiga sp1 acumuló 21 registros (1.28 %), representando los grupos con menor frecuencia de interacción dentro de la red observada (Cuadro 1).

La composición de los visitantes florales estuvo dominada por *Apis mellifera*, *Brassicogethes* sp. y *Megachile aurantipennis*, las cuales concentraron la mayor proporción de las interacciones registradas (Figura 3). En conjunto, estas especies representaron más del 97 % de las interacciones observadas durante el periodo de estudio.

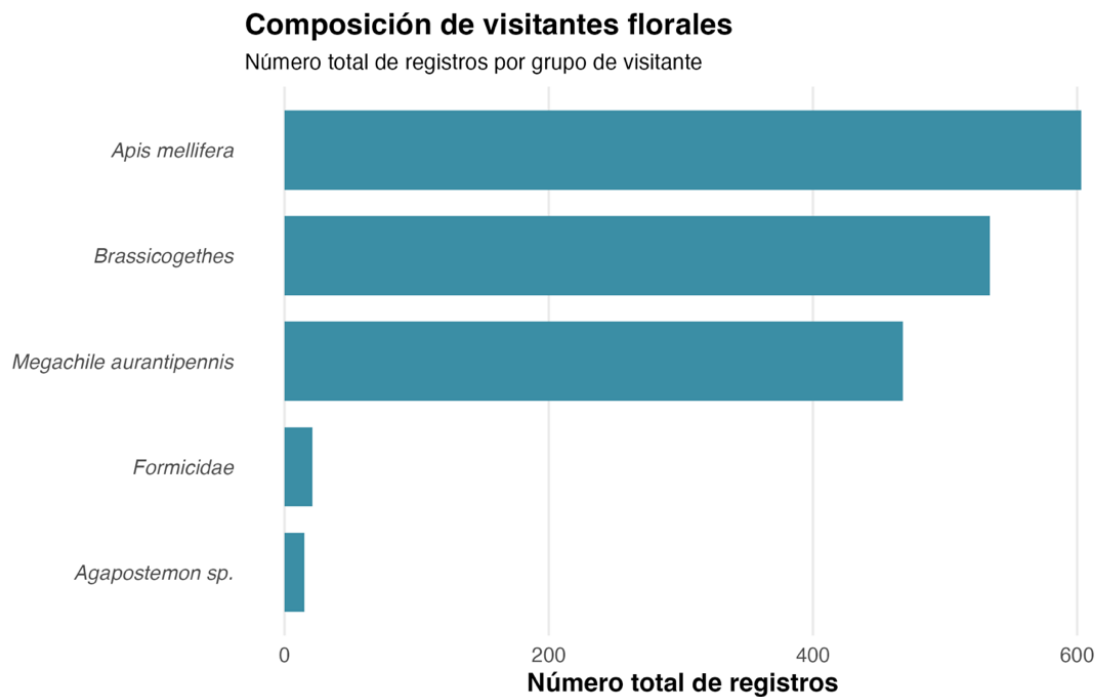


Figura 3. Número total de interacciones registradas para cada grupo de visitantes florales asociados a las especies de cactáceas estudiadas.

4.3 Frecuencia de interacciones por especie de cactácea

El número de interacciones también varió entre las especies de cactáceas registradas (Cuadro 2). *Echinocereus stramineus* presentó el mayor número de interacciones, con 513 registros, seguida de *Coryphantha ramillosa* con 162, *Mammillaria chionocephala* con 151, *Thelocactus macdowellii* con 148 y *Turbincarpus valdezianus* con 132 interacciones.

En contraste, las especies con menor número de interacciones fueron *Echinocactus platyacanthus* con 31 registros, *Lophophora williamsii* con 38, *Thelocactus bicolor* con 55 y *Opuntia ficus-indica* con 64 interacciones. Estos resultados muestran que la frecuencia de visitas no se distribuyó de manera homogénea entre las especies vegetales, sino que algunas cactáceas concentraron una mayor proporción de las interacciones observadas.

Cuadro 2. Especies de cactáceas registradas y número de interacciones observadas

Familia	Especie	Número de interacciones
Cactaceae	<i>Echinocereus stramineus</i>	513
Cactaceae	<i>Coryphantha ramillosa</i>	162
Cactaceae	<i>Mammillaria chionocephala</i>	151
Cactaceae	<i>Thelocactus macdowellii</i>	148
Cactaceae	<i>Turbinicarpus valdezianus</i>	132
Cactaceae	<i>Neolloydia conoidea</i>	121
Cactaceae	<i>Epithelantha micromeris</i>	80
Cactaceae	<i>Astrophytum myriostigma</i>	74
Cactaceae	<i>Thelocactus rinconensis</i>	72
Cactaceae	<i>Opuntia ficus-indica</i>	64
Cactaceae	<i>Thelocactus bicolor</i>	55
Cactaceae	<i>Lophophora williamsii</i>	38
Cactaceae	<i>Echinocactus platyacanthus</i>	31

4.4 Relación entre disponibilidad floral y número de visitas

Se observó una relación positiva entre el número total de flores y el número total de visitas registradas por especie de cactácea (Figura 4). El análisis de correlación de Spearman mostró una asociación positiva fuerte y significativa entre ambas variables ($\rho = 0.858$, $p < 0.001$), lo que indica que las especies con una mayor disponibilidad floral tendieron a recibir un mayor número de visitas por parte de los visitantes florales registrados.

Este resultado respalda la primera hipótesis del estudio, ya que las cactáceas con mayor oferta floral concentraron una mayor frecuencia de interacciones.

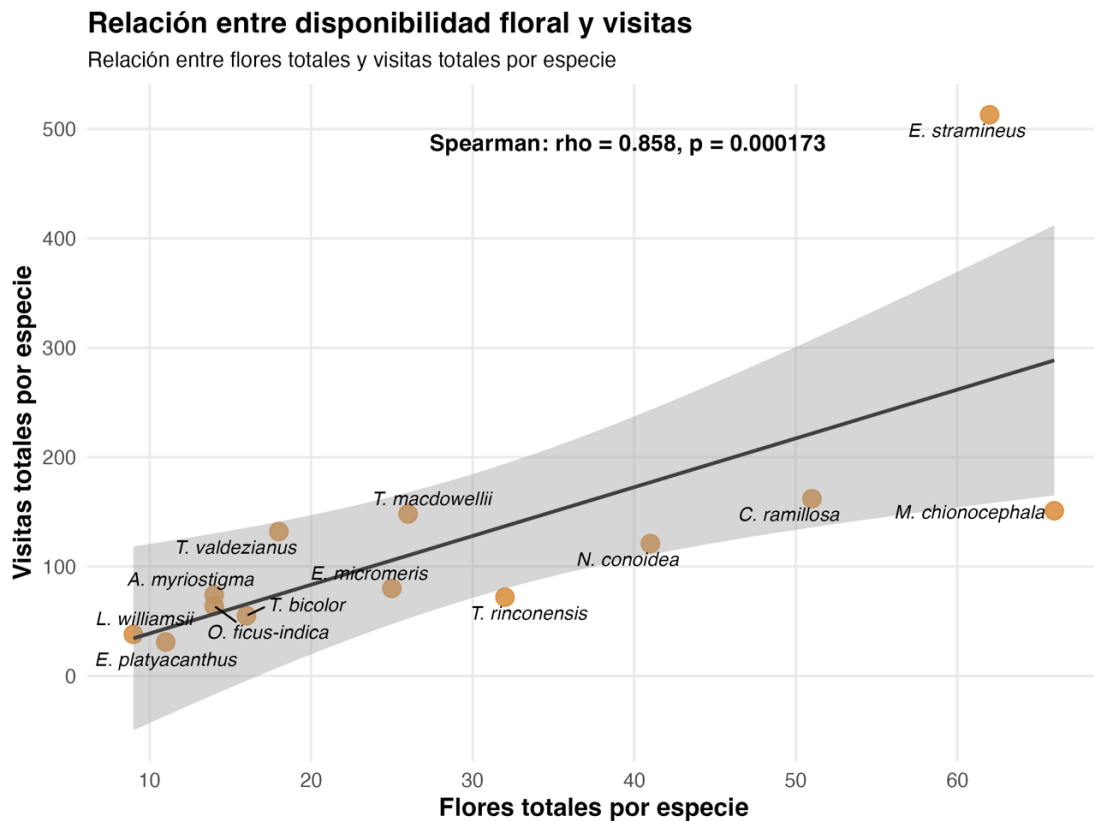


Figura 4. Relación entre el número total de flores y el número total de visitas registradas por especie de cactácea. La línea representa la tendencia general de la asociación entre ambas variables.

4.5 Estructura general de la red planta–visitante floral

El análisis de la red planta–visitante floral mostró una conectancia de 0.70, lo que indica que una alta proporción de las interacciones potenciales entre especies de cactáceas y visitantes florales estuvo presente en la red. Este patrón estuvo asociado principalmente con la presencia de visitantes florales generalistas, particularmente *Apis mellifera* y *Megachile aurantipennis*, las cuales interactuaron con todas las especies de cactáceas registradas.

La red presentó además una asimetría positiva (web asymmetry = 0.44), reflejando un desbalance en el número de especies presentes en cada nivel de interacción. Asimismo, el índice de especialización de la red fue bajo ($H2' = 0.29$), lo que indica una estructura predominantemente generalista.

El análisis de anidamiento mediante el índice WNODF mostró un valor observado de 49.36. Este valor fue significativamente mayor al esperado por azar de acuerdo con los

modelos nulos generados (media nula = 48.65; IC95 % = 48.22–49.08; $p = 0.001$), indicando la presencia de una estructura anidada dentro de la red.

Por otra parte, el análisis de modularidad mediante el algoritmo QuanBiMo detectó una estructura modular significativa, con un valor de modularidad de $Q = 0.301$. La comparación con 1000 redes aleatorias indicó que la modularidad observada fue considerablemente mayor a la esperada por azar ($Z = 39.66$), evidenciando la presencia de grupos de especies que interactuaron con mayor frecuencia entre sí que con el resto de la red.

4.6 Módulos de interacción

Se identificaron cuatro módulos dentro de la red planta–visitante floral (Figura 5). El módulo 1 estuvo conformado por *Apis mellifera* y siete especies de cactáceas: *Epithelantha micromeris*, *Lophophora williamsii*, *Coryphantha ramillosa*, *Mammillaria chionocephala*, *Neolloydia conoidea*, *Astrophytum myriostigma* y *Echinocactus platyacanthus*. Este módulo concentró la mayor cantidad de especies vegetales registradas.

El módulo 2 estuvo integrado por *Megachile aurantipennis* y *Agapostemon* sp. 1, asociados principalmente con *Turbinicarpus valdezianus* y *Thelocactus macdowellii*.

El módulo 3 estuvo conformado por *Brassicogethes* sp. y las especies *Opuntia ficus-indica*, *Echinocereus stramineus* y *Thelocactus bicolor*.

Finalmente, el módulo 4 estuvo integrado por Formicidae sp. 1 y *Thelocactus rinconensis*.

Aunque se identificaron grupos de interacción definidos, también se observaron enlaces entre módulos, particularmente asociados con *Apis mellifera* y *Megachile aurantipennis*, lo que refleja la presencia de visitantes florales con comportamiento generalista dentro de la red.

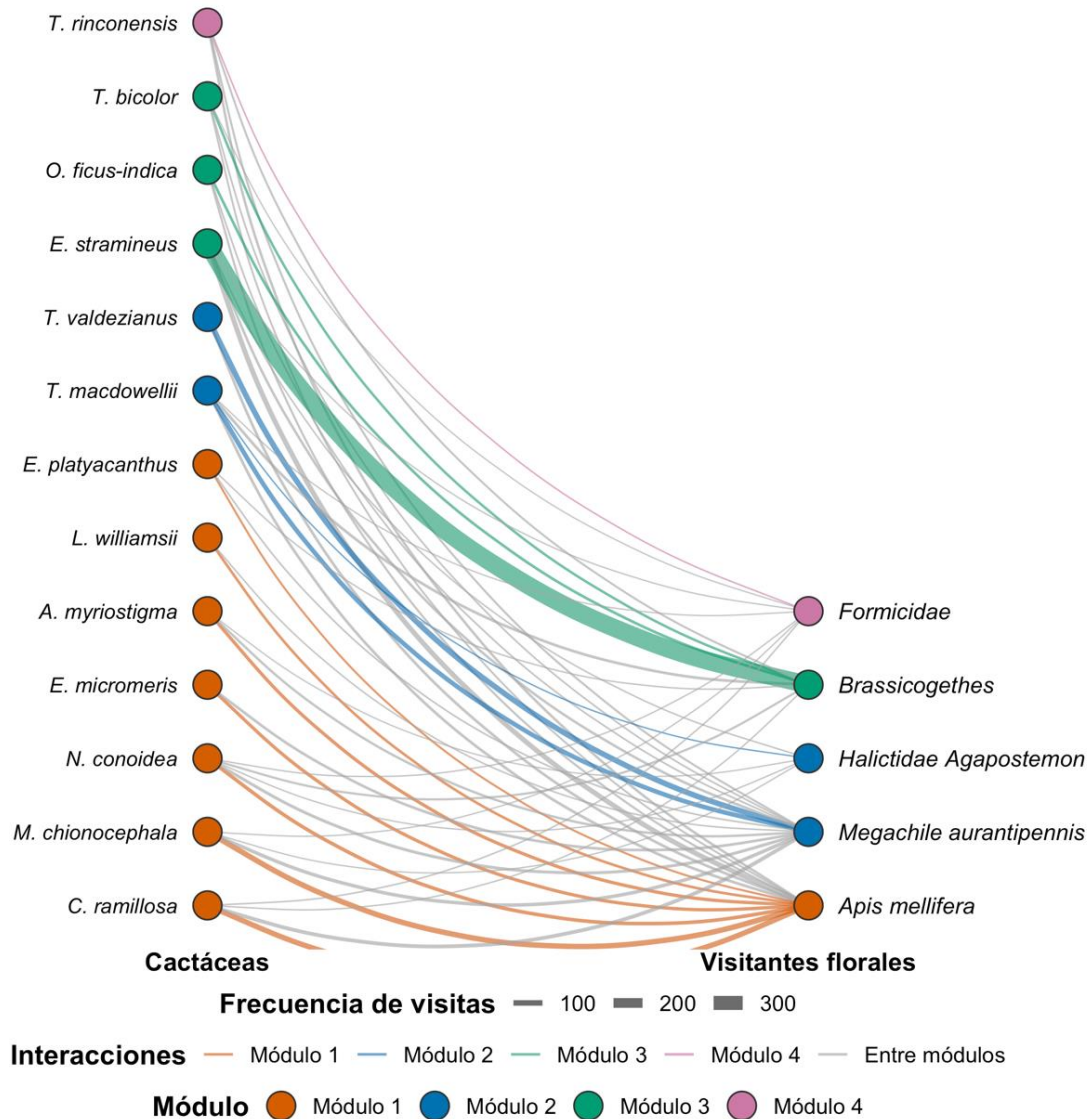


Figura 5. Red de interacción planta–visitante floral asociada a las cactáceas estudiadas. Los nodos representan especies de cactáceas y visitantes florales; el grosor de los enlaces indica la frecuencia de interacción y los colores corresponden a los módulos identificados en la red.

4.7 Métricas a nivel especie de los visitantes florales

El grado promedio fue de 3.2 para las especies vegetales y de 9.2 para los visitantes florales, indicando que los visitantes interactuaron, en promedio, con un mayor número de especies de cactáceas que las plantas con visitantes florales.

Entre los visitantes florales, *Apis mellifera* y *Megachile aurantipennis* presentaron los valores más altos de grado, ambas con interacción registrada con las 13 especies de

cactáceas (Cuadro 3). Además, *Apis mellifera* presentó la mayor importancia relativa dentro de la red (*species strength* = 5.92), seguida de *Megachile aurantipennis* (4.19) y *Brassicogethes* sp. (2.61).

En contraste, Formicidae sp. 1 y *Agapostemon* sp. 1 registraron valores bajos de importancia relativa, con 0.18 y 0.08, respectivamente, lo que refleja una menor contribución relativa dentro de la estructura de la red.

Los valores de d' fueron bajos para *Apis mellifera* (0.14), *Megachile aurantipennis* (0.21) y *Brassicogethes* sp. (0.10), indicando una tendencia generalista. En contraste, Formicidae sp. 1 presentó el valor más alto de especialización relativa ($d' = 0.53$), aunque su baja frecuencia de interacción limita la interpretación ecológica de este valor.

Cuadro 3. Métricas a nivel especie de los visitantes florales.

Visitante floral	Grado	Species strength	d'
<i>Apis mellifera</i>	13	5.92	0.1432
<i>Megachile aurantipennis</i>	13	4.19	0.2119
<i>Brassicogethes</i> sp1	8	2.61	0.0960
<i>Formicidae</i> sp1	7	0.18	0.5307
<i>Agapostemon</i> sp1	5	0.08	0.1781

4.8 Métricas a nivel especie de las cactáceas

Las métricas a nivel especie mostraron diferencias importantes en la participación de las cactáceas dentro de la red (Cuadro 4). Las especies con mayor grado fueron *Echinocereus stramineus*, *Thelocactus macdowellii* y *Neolloydia conoidea*, cada una con interacción registrada con los cinco grupos de visitantes florales. Posteriormente, *Mammillaria chionocephala*, *Coryphantha ramillosa*, *Thelocactus rinconensis* y *Thelocactus bicolor* presentaron un grado de cuatro.

En cuanto a la importancia relativa dentro de la red, medida mediante *species strength*, el valor más alto correspondió a *Echinocereus stramineus* (1.4304), lo que indica que esta especie concentró una mayor proporción de las interacciones registradas con los visitantes florales. Le siguieron *Coryphantha ramillosa* (0.5730), *Neolloydia conoidea* (0.5572), *Thelocactus macdowellii* (0.5301) y *Mammillaria chionocephala* (0.4967), especies que también tuvieron una participación relevante dentro de la estructura de la red.

Respecto al índice de especialización d' , la mayoría de las especies vegetales mostró valores bajos, lo que indica una tendencia generalista y una amplia compartición de visitantes florales. Sin embargo, *Echinocereus stramineus* presentó el valor más alto de especialización relativa ($d' = 0.36$), seguido de *Turbinicarpus valdezianus* (0.25), *Mammillaria chionocephala* (0.17) y *Lophophora williamsii* (0.16). Estos valores sugieren una mayor diferenciación relativa en el patrón de interacción de dichas especies en comparación con el resto de las cactáceas.

Cuadro 4. Métricas a nivel especie de las cactáceas.

Espece vegetal	Grado	Species strength	d'
<i>Echinocereus stramineus</i>	5	1.4304	0.36
<i>Turbinicarpus valdezianus</i>	2	0.2663	0.25
<i>Mammillaria chionocephala</i>	4	0.4967	0.17
<i>Lophophora williamsii</i>	2	0.0659	0.16
<i>Epithelantha micromeris</i>	2	0.1485	0.14
<i>Coryphantha ramillosa</i>	4	0.5730	0.14
<i>Astrophytum myriostigma</i>	3	0.2002	0.14
<i>Thelocactus macdowellii</i>	5	0.5301	0.05
<i>Thelocactus rinconensis</i>	4	0.4081	0.03
<i>Echinocactus platyacanthus</i>	3	0.0566	0.03
<i>Opuntia ficus-indica</i>	3	0.1185	0.03
<i>Thelocactus bicolor</i>	4	0.1486	0.03

<i>Neolloydia conoidea</i>	5	0.5572	0.03
----------------------------	---	--------	------

La distribución de los valores de importancia relativa y especialización mostró diferencias entre las especies de cactáceas registradas (Figura 6). *Echinocereus stramineus* destacó por presentar el mayor valor de *species strength*, mientras que las demás especies mostraron valores comparativamente menores. En cuanto a la especialización, la mayoría de las especies presentó valores bajos de d' , lo que es consistente con el carácter generalista observado a nivel de red.

Métricas a nivel de especie para las cactáceas
Species strength y especialización d'

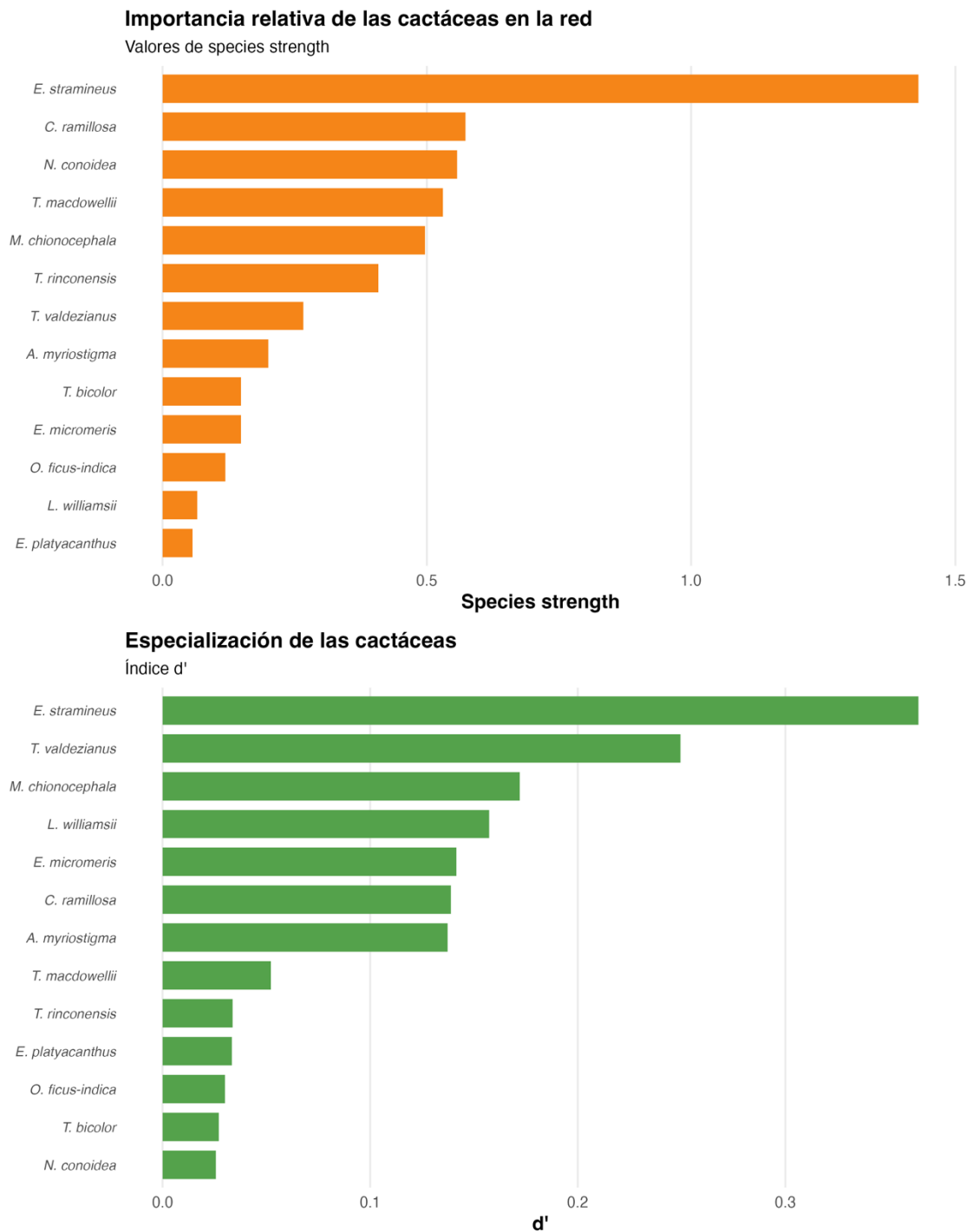


Figura 6. Valores de importancia relativa (*species strength*) y especialización (d') de las especies de cactáceas registradas en la red planta–visitante floral. A) Importancia relativa (*species strength*); B) Especialización (d').

5. DISCUSIÓN

La composición de visitantes florales registrada en este estudio coincide con lo reportado en ecosistemas áridos y semiáridos, donde himenópteros y coleópteros suelen encontrarse entre los grupos más frecuentes asociados a flores de cactáceas (Grant y Grant, 1979; Valiente-Banuet et al., 1996; Mandujano et al., 2010).

Apis mellifera fue la especie que registró el mayor número de interacciones y presentó los valores más altos de fuerza de interacción dentro de la red. Este resultado coincide con lo reportado en distintos ambientes urbanos, agrícolas y perturbados, donde esta especie suele encontrarse entre los visitantes florales más frecuentes debido a su comportamiento eusocial, amplia capacidad de forrajeo y elevada abundancia poblacional (Aizen et al., 2008; Hung et al., 2018). Su presencia en todas las especies de cactáceas registradas sugiere un comportamiento generalista y una amplia utilización de los recursos florales disponibles en el jardín botánico. Los elevados valores de fuerza de interacción registrados para *Apis mellifera* y *Megachile aurantipennis* indican que ambas especies desempeñaron un papel central dentro de la red observada.

Megachile aurantipennis también presentó una elevada frecuencia de interacción y se registró en todas las especies de cactáceas observadas. Las especies del género *Megachile* son reconocidas como importantes polinizadores de plantas de zonas áridas debido a su comportamiento de forrajeo y a la capacidad de transportar grandes cantidades de polen mediante escopas ventrales especializadas (Michener, 2007). La abundancia registrada en este estudio sugiere que el jardín botánico proporciona recursos florales que favorecen la presencia de abejas nativas asociadas a ecosistemas xerófitos.

Brassicogethes sp. 1 fue uno de los visitantes florales más frecuentes durante el periodo de estudio, concentrando una proporción importante de las interacciones registradas. Aunque los coleópteros suelen recibir menor atención que las abejas en estudios de polinización, diversos trabajos han documentado su presencia recurrente en flores de cactáceas y otras plantas de ambientes áridos, donde pueden actuar como visitantes florales frecuentes e incluso contribuir al transporte incidental de polen (Bernhardt, 2000).

Por otra parte, se observó una relación positiva entre la disponibilidad floral y el número de visitas registradas. Las especies con una mayor producción de flores tendieron a recibir un mayor número de interacciones, lo que respalda la primera hipótesis planteada en este

estudio. Este patrón coincide con lo reportado por Waser et al. (1996), Fleming y Valiente-Banuet (2002) y Petanidou et al. (2008), quienes señalan que las especies con una mayor oferta de recursos florales suelen atraer una mayor abundancia de visitantes debido a la disponibilidad de néctar y polen. La fuerte asociación observada entre el número de flores y la frecuencia de visitas sugiere que la disponibilidad de recursos florales constituye uno de los principales factores que estructuran las interacciones planta–visitante floral dentro del jardín botánico. En este sentido, especies como *Echinocereus stramineus*, *Mammillaria chionocephala* y *Coryphantha ramillosa* no solamente presentaron una elevada producción floral, sino que también concentraron una proporción importante de las interacciones registradas. Este resultado sugiere que la abundancia floral desempeñó un papel importante en la atracción de visitantes y en la organización de la red observada.

Los resultados obtenidos indican que la red de interacción planta–visitante floral asociada a cactáceas en el Jardín Botánico “Ing. Gustavo Aguirre Benavides” presentó una organización predominantemente generalista. Este tipo de estructura es común en redes mutualistas de ambientes áridos y semiáridos, donde la disponibilidad de recursos florales puede variar espacial y temporalmente, favoreciendo que los visitantes florales utilicen distintas especies de plantas durante los periodos de floración (Bascompte y Jordano, 2007; Ollerton, 2017). En este estudio, la mayoría de los visitantes florales interactuó con varias especies de cactáceas, lo que contribuyó a la formación de una red ampliamente conectada.

La baja especialización observada sugiere que los visitantes florales no dependieron de una sola especie de cactácea para obtener recursos. Este patrón ha sido documentado en diferentes redes planta–polinizador, donde las especies generalistas suelen interactuar con múltiples socios y contribuyen al mantenimiento de la conectividad de la red (Bascompte et al., 2003). Valores de H_2' cercanos a cero suelen caracterizar redes generalistas, donde la mayoría de las especies interactúan con múltiples socios potenciales (Blüthgen et al., 2006). En este estudio, los visitantes florales aprovecharon recursos disponibles en varias especies de cactáceas durante el periodo de floración, contribuyendo a la formación de una red altamente conectada.

Asimismo, la presencia de numerosas interacciones entre especies sugiere un amplio solapamiento de nicho en el uso de los recursos florales disponibles, particularmente entre los visitantes florales generalistas registrados en la red. Este patrón indica que varias

especies compartieron recursos similares durante el periodo de floración de las cactáceas, situación frecuente en redes mutualistas de ambientes áridos y semiáridos. Sin embargo, aspectos relacionados con la estabilidad o resiliencia de la red frente a perturbaciones no fueron evaluados directamente en este estudio, por lo que cualquier inferencia en ese sentido debe considerarse con cautela.

El análisis de anidamiento mostró que la red presentó un patrón significativamente diferente de lo esperado por azar. Este resultado indica que las interacciones no se distribuyeron aleatoriamente entre las especies, sino que tendieron a organizarse de manera jerárquica, donde las especies con menor número de interacciones se asociaron principalmente con especies más generalistas. Este patrón coincide con lo reportado para numerosas redes mutualistas (Bascompte et al., 2003; Bascompte y Jordano, 2007) y sugiere que ciertas especies desempeñan un papel importante en la conectividad de la red.

La segunda hipótesis planteó que la red de interacción planta–visitante floral presentaría una estructura predominantemente generalista y anidada. Los resultados obtenidos apoyan esta hipótesis, ya que la red mostró una alta conectancia, un bajo nivel de especialización ($H_2' = 0.29$) y un patrón de anidamiento significativo. Sin embargo, además de estas características, la red presentó una estructura modular compuesta por cuatro módulos principales (Figura 5). Este resultado no contradice la hipótesis inicial, sino que aporta información adicional sobre la organización de las interacciones.

La presencia de módulos indica que las interacciones tendieron a agruparse en subconjuntos de especies que interactuaron con mayor frecuencia entre sí que con el resto de la red. Este patrón coincide con lo señalado por Olesen et al. (2007), quienes proponen que las redes mutualistas pueden organizarse en grupos funcionales asociados a diferencias en la disponibilidad de recursos, preferencias de forrajeo o distribución espacial de las especies. Aunque las redes planta–visitante floral suelen caracterizarse por presentar altos niveles de anidamiento (Bascompte et al., 2003; Bascompte y Jordano, 2007), la coexistencia de anidamiento y modularidad observada en este estudio sugiere una organización más compleja de las interacciones.

En conjunto, los resultados indican que la red estuvo dominada por especies generalistas, particularmente *Apis mellifera* y *Megachile aurantipennis*, las cuales contribuyeron de manera importante a la conectividad de la red. Al mismo tiempo, la presencia de módulos refleja la existencia de asociaciones más frecuentes entre determinados grupos de cactáceas y visitantes florales. Es posible que la proximidad espacial de las plantas y la

concentración de recursos florales dentro del sistema de conservación ex situ hayan contribuido a la formación de estos patrones de interacción.

Además, los valores relativamente bajos de especialización (d') registrados para *Apis mellifera* (0.14), *Megachile aurantipennis* (0.21) y *Brassicogethes* sp. (0.09) refuerzan el carácter generalista de estos visitantes florales, ya que interactuaron con una amplia proporción de las especies de cactáceas presentes en la red. En contraste, *Formicidae* sp. 1 presentó el valor más alto de d' (0.53), lo que sugiere una mayor restricción en sus patrones de interacción, aunque su baja frecuencia de visitas limita la interpretación ecológica de este resultado. De manera general, los valores observados son consistentes con la baja especialización detectada a nivel de red ($H2' = 0.29$), indicando que las interacciones estuvieron dominadas por visitantes florales con una amplia utilización de los recursos disponibles.

Entre las especies vegetales, *Echinocereus stramineus* presentó los valores más altos de fuerza de interacción y conectividad dentro de la red, al interactuar con todos los grupos de visitantes florales registrados. Este resultado indica que fue una de las especies con mayor número de asociaciones durante el periodo de estudio. La elevada frecuencia de interacciones observada en esta cactácea podría estar relacionada con una mayor disponibilidad de flores durante el periodo de muestreo o con características florales que favorecieron la visita de distintos grupos de insectos. Resultados similares han sido documentados en otras redes planta–visitante floral, donde ciertas especies vegetales concentran una proporción importante de las interacciones registradas dentro de la comunidad (Fenster et al., 2004). En el presente estudio, *Echinocereus stramineus* destacó como una de las especies vegetales más asociadas a los visitantes florales observados en el jardín botánico.

Aunque el presente estudio no evaluó directamente la transferencia de polen, la alta frecuencia de visitas de *Apis mellifera* y *Megachile aurantipennis* sugiere que ambas especies podrían contribuir al flujo de polen entre las cactáceas estudiadas. Sin embargo, estudios complementarios que incluyan análisis de carga polínica o experimentos de exclusión de visitantes son necesarios para confirmar su papel como polinizadores efectivos.

Los resultados obtenidos muestran que el Jardín Botánico “Ing. Gustavo Aguirre Benavides” mantiene una comunidad activa de visitantes florales asociada a distintas especies de cactáceas. La presencia de múltiples interacciones entre plantas y visitantes

indica que estos espacios pueden contribuir al mantenimiento de relaciones ecológicas que forman parte de los procesos reproductivos de las especies vegetales.

Tradicionalmente, los jardines botánicos han sido considerados espacios destinados a la conservación de especies vegetales. Sin embargo, los resultados de este estudio muestran que también pueden funcionar como sitios donde se mantienen interacciones entre plantas y visitantes florales. En este sentido, además de resguardar colecciones vivas de cactáceas, el Jardín Botánico “Ing. Gustavo Aguirre Benavides” proporciona recursos florales que son utilizados por diferentes grupos de insectos, favoreciendo la permanencia de estas interacciones dentro de un sistema de conservación ex situ.

La red planta–visitante floral presentó una estructura predominantemente generalista, con alta conectancia, un patrón de anidamiento estadísticamente diferente de lo esperado al azar y una organización modular compuesta por cuatro módulos principales. Aunque el anidamiento observado fue relativamente débil desde el punto de vista biológico, la presencia simultánea de modularidad y conectancia elevada indica que las interacciones se organizaron tanto alrededor de especies generalistas como en grupos de interacción relativamente definidos. *Apis mellifera*, *Megachile aurantipennis* y *Brassicogethes* sp. concentraron la mayor parte de las interacciones registradas, mientras que *Echinocereus stramineus* destacó entre las especies vegetales por su elevada frecuencia de asociación con los visitantes florales.

En conjunto, los resultados obtenidos apoyan parcialmente las hipótesis planteadas. Se observaron diferencias en la frecuencia de visitas entre las especies de cactáceas, así como una relación positiva entre la disponibilidad floral y el número de interacciones registradas. La red presentó una estructura predominantemente generalista, caracterizada por una alta conectancia y un bajo nivel de especialización. Asimismo, se detectó un patrón de anidamiento estadísticamente significativo y una organización modular compuesta por cuatro módulos principales, lo que indica que las interacciones se estructuraron tanto alrededor de especies generalistas como en grupos de interacción relativamente definidos.

6. CONCLUSIONES

1. Se registraron cinco grupos principales de visitantes florales asociados a las cactáceas del Jardín Botánico “Ing. Gustavo Aguirre Benavides”: *Apis mellifera*, *Megachile aurantipennis*, *Brassicogethes* sp., *Agapostemon* sp. 1 y Formicidae sp. 1. Los himenópteros y coleópteros concentraron la mayor parte de las interacciones observadas durante el periodo de estudio.
2. Se documentaron 1,641 interacciones entre visitantes florales y 13 especies de cactáceas en floración. *Apis mellifera* presentó la mayor frecuencia de interacción, seguida de *Brassicogethes* sp. y *Megachile aurantipennis*. Entre las especies vegetales, *Echinocereus stramineus* registró el mayor número de interacciones y la mayor importancia relativa dentro de la red
3. La disponibilidad floral estuvo positivamente relacionada con el número de visitas registradas. Las especies con una mayor cantidad de flores tendieron a recibir un mayor número de interacciones, lo que sugiere que la oferta floral influye en la actividad de los visitantes florales.
4. La red planta–visitante floral presentó una conectancia alta (0.70) y un bajo nivel de especialización ($H_2' = 0.29$), indicando una estructura predominantemente generalista. Este patrón estuvo asociado principalmente con *Apis mellifera* y *Megachile aurantipennis*, las cuales interactuaron con todas las especies de cactáceas registradas.
5. El análisis de anidamiento mostró una estructura significativamente diferente de la esperada por azar, lo que indica una organización no aleatoria de las interacciones. Asimismo, la red presentó una estructura modular conformada por cuatro módulos principales, reflejando la existencia de grupos de especies que interactuaron con mayor frecuencia entre sí.
6. *Apis mellifera* y *Megachile aurantipennis* fueron los visitantes con mayor importancia relativa dentro de la red, mientras que *Echinocereus stramineus* constituyó la especie vegetal más importante. Estas especies desempeñaron un papel relevante en el mantenimiento de la estructura general de la red de interacción.
7. Los resultados obtenidos muestran que el Jardín Botánico “Ing. Gustavo Aguirre Benavides” mantiene interacciones activas entre cactáceas y visitantes florales. Esto resalta la importancia de estos espacios para la conservación ex situ no solamente de las

especies vegetales, sino también de las interacciones ecológicas que contribuyen al mantenimiento de la biodiversidad

7. LITERATURA CITADA

- Almeida-Neto, M., Guimarães, P., Guimarães Jr., P. R., Loyola, R. D., y Ulrich, W. (2008). A consistent metric for nestedness analysis in ecological systems: reconciling concept and measurement. *Oikos*, 117, 1227–1239 <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2008.16644.x>
- Aizen, M. A., Morales, C. L., & Morales, J. M. (2008). Invasive mutualists erode native pollination webs. *PLoS Biology*, 6(2), e31. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060031>
- Aronson, M. F. J., Lepczyk, C. A., Evans, K. L., Goddard, M. A., Lerman, S. B., y MacIvor, J. S. (2017). Biodiversity in the city: Key challenges for urban green space management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(4), 189–196. <https://doi.org/10.1002/fee.1480>
- Beattie, A. J., Turnbull, C., Knox, R. B., & Williams, E. G. (1984). Ant inhibition of pollen function: A possible reason why ant pollination is rare. *American Journal of Botany*, 71(3), 421–426. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1984.tb12527.x>
- Blüthgen, N., Menzel, F., & Blüthgen, N. (2006). Measuring specialization in species interaction networks. *BMC Ecology*, 6, 9. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-6-9>
- Bernhardt, P. (2000). Convergent evolution and adaptive radiation of beetle-pollinated angiosperms. *Plant Systematics and Evolution*, 222, 293–320. <https://doi.org/10.1007/BF00984110>
- Baldock, K. C. R., Goddard, M. A., Hicks, D. M., Kunin, W. E., Mitschunas, N., Osgathorpe, L. M., Potts, S. G., Robertson, K. M., Scott, A. V., Stone, G. N., Vaughan, I. P., y Memmott, J. (2015). Where is the UK's pollinator biodiversity? The importance of urban areas for flower-visiting insects. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1803), 20142849. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.2849>
- Bascompte, J., y Jordano, P. (2007). Plant–animal mutualistic networks: The architecture of biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 38, 567–593. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.38.091206.095818>
- Bascompte, J., Jordano, P., Melián, C. J., y Olesen, J. M. (2003). The nested assembly of plant–animal mutualistic networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100, 9383–9387. <https://doi.org/10.1073/pnas.1633576100>
- Dormann, C. F., Gruber, B., & Fründ, J. (2008). Introducing the bipartite package: Analysing ecological networks. *R News*, 8(2), 8–11.
- Dormann, C. F., Fründ, J., Blüthgen, N., y Gruber, B. (2009). Indices, graphs and null models: analyzing bipartite ecological networks. *The Open Ecology Journal*, 2, 7–24.
- Dunne, J. A., Williams, R. J., & Martinez, N. D. (2002). Network structure and biodiversity loss in food webs: Robustness increases with connectance. *Ecology Letters*, 5(4), 558–567. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2002.00354.x>

- Enríquez, P. L., Martínez Morales, M. Á., y Rangel Salazar, J. L. (2014). Conservación ex situ como salvavidas de especies. *Ecofronteras*, 19(53), 14–17.
- Fleming, T. H., & Valiente-Banuet, A. (Eds.). (2002). *Columnar Cacti and Their Mutualists: Evolution, Ecology, and Conservation*. University of Arizona Press.
<https://doi.org/10.2307/j.ctv23khmrw>
- Fleming, T. H., y Valiente-Banuet, A. (2002). Cactus–bat mutualisms in North America. *Journal of Mammalogy*, 83(3), 789–795.
- Fenster, C. B., Armbruster, W. S., Wilson, P., Dudash, M. R., & Thomson, J. D. (2004). Pollination syndromes and floral specialization. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35, 375–403.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132347>
- Grant, V., & Grant, K. A. (1979). The pollination spectrum in the southwestern American cactus flora. *Plant Systematics and Evolution*, 133, 29–37.
- Gibson, Rachel & Knott, Ben & Eberlein, Tim & Memmott, Jane. (2010). Sampling method influences the structure of plant–pollinator networks. *Oikos*. 120. 822 - 831.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18927.x>
- Godínez-Álvarez, H., Valverde, T., y Ortega-Baes, P. (2003). Demographic trends in the Cactaceae. *The Botanical Review*, 69(2), 173–201. [https://doi.org/10.1663/0006-8101\(2003\)069\[0173:DTITC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0006-8101(2003)069[0173:DTITC]2.0.CO;2)
- Goulson, D. (2003). Effects of introduced bees on native ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34, 1–26.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132355>
- Godínez-Álvarez, H., Valiente-Banuet, A., y Valiente-Banuet, L. (1999). Biotic interactions and the population dynamics of the long-lived columnar cactus *Neobuxbaumia tetetzo* in the Tehuacán Valley, Mexico. *Canadian Journal of Botany*, 77(2), 203–208.
<https://doi.org/10.1139/cjb-77-2-203>
- Hung, K. L. J., Kingston, J. M., Albrecht, M., Holway, D. A., & Kohn, J. R. (2018). The worldwide importance of honey bees as pollinators in natural habitats. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1870), 20172140.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2017.2140>
- Herrera, C. M. (1987). Components of pollinator “quality”: Comparative analysis of a diverse insect assemblage. *Oikos*, 50(1), 79–90. <https://doi.org/10.2307/3565403>
- Hernández, H. M., & Godínez-Álvarez, H. (1994). Contribución al conocimiento de las cactáceas mexicanas amenazadas. *Acta Botanica Mexicana*, 26, 33–52.
<https://doi.org/10.21829/abm26.1994.690>
- Hall, D. M., Camilo, G. R., Tonietto, R. K., Ollerton, J., Ahrné, K., Arduser, M., Ascher, J. S., Baldock, K. C. R., Fowler, R., Frankie, G., Goulson, D., Gunnarsson, B., Hanley, M. E., Jackson, J. I., Langellotto, G., Lowenstein, D., Minor, E. S., Philpott, S. M., Potts, S. G.,

- ... Threlfall, C. G. (2017). *The city as a refuge for insect pollinators*. *Conservation Biology*, 31(1), 24–29. <https://doi.org/10.1111/cobi.12840>
- Hatfield, R. G., Jepsen, S., Vaughan, M., Black, S., & Lee-Mäder, E. (2018). An overview of the potential impacts of honey bees to native bees, plant communities, and ecosystems in wild landscapes: recommendations for land managers. The Xerces Society, Portland, OR, USA Available at: https://www.xerces.org/sites/default/files/2018-05/12-028_1.
- Heywood, V. H. (2011). The role of botanic gardens as resource and introduction centres in the face of global change. *Biodiversity and Conservation*, 20(2), 221–239. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9781-5>
- Jordano, P. (1987). Patterns of mutualistic interactions in pollination and seed dispersal: Connectance, dependence asymmetries, and coevolution. *The American Naturalist*, 129(5), 657–677. <https://doi.org/10.1086/284665>
- Kaiser-Bunbury, C. N., y Blüthgen, N. (2015). Integrating network ecology with applied conservation: A synthesis and guide to implementation. *AoB Plants*, 7, plv076. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plv076>
- Kaiser-Bunbury, C., Mougal, J., Whittington, A. *et al.* Ecosystem restoration strengthens pollination network resilience and function. *Nature* 542, 223–227 (2017). <https://doi.org/10.1038/nature21071>
- Latif, A., Malik, S. A., Saeed, S., Zaka, S. M., Sarwar, Z. M., Ali, M., Azhar, M. F., Javaid, M., Ishtiaq, M., Naeem-Ullah, U., Naoreen, M., Khan, K. A., Ghramh, H. A., & Shahzad, M. A. (2019). Pollination biology of *Albizia lebbbeck* (L.) Benth. (Fabaceae: Mimosoideae) with reference to insect floral visitors. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(7), 1548–1552. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.12.005>
- Mandujano, M. C., Carrillo-Angeles, I., Martínez-Peralta, C., & Golubov, J. (2010). Reproductive biology of Cactaceae. En K. G. Ramawat (Ed.), *Desert plants: Biology and biotechnology* (pp. 197–230). Springer. DOI: [10.1007/978-3-642-02550-1_10](https://doi.org/10.1007/978-3-642-02550-1_10)
- Mace, G. M., Norris, K., y Fitter, A. H. (2012). Biodiversity and ecosystem services: A multilayered relationship. *Trends in Ecology and Evolution*, 27(1), 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.08.006>
- Michener, C. D. (2007). *The Bees of the World* Johns Hopkins University Press. Baltimore, Md, USA <https://doi.org/10.56021/9780801885730>
- Martínez-Falcón, A. P., Martínez-Adriano, C. A., y Dáttilo, 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.
- Memmott, J., Waser, N. M., y Price, M. V. (2004). Tolerance of pollination networks to species extinctions. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 271(1557), 2605–2611. <https://doi.org/10.1098/rspb.2004.2909>

- Munguía-Soto, E. O. (2017). *Facilitación en la polinización por abejas generalistas y especialistas de cactáceas del semidesierto de Querétaro* (Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, Departamento de Biología). Repositorio institucional. <https://doi.org/10.24275/uami.c247ds35t>
- Munguía-Rosas, M. A., Sosa, V. J., Ojeda, M. M., y De-Nova, J. A. (2009). Specialization clines in the pollination systems of agaves (Agavaceae) and columnar cacti (Cactaceae): A phylogenetically controlled meta-analysis. *American Journal of Botany*, 96(10), 1887–1895. <https://doi.org/10.3732/ajb.0800392>
- Miller, J. R., y Hobbs, R. J. (2002). Conservation where people live and work. *Conservation Biology*, 16(2), 330–337. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2002.00420.x>
- Nobel, P. S., & Bobich, E. G. (2002). Environmental biology. *Cacti: biology and uses*, 57-74.
- Naturalista. (2026). *Naturalista* [Plataforma digital]. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y California Academy of Sciences. <https://www.naturalista.mx>
- Ollerton, J. (2017). *Pollinator diversity: Distribution, ecological function, and conservation*. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 48, 353–376. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110316-022919>
- Oldfield, S. F. (2009). Botanic gardens and the conservation of tree species. *Trends in Plant Science*, 14(11), 581–583. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.08.013>
- Olesen, J. M., Bascompte, J., Dupont, Y. L., y Jordano, P. (2007). The modularity of pollination networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 19891–19896. <https://doi.org/10.1073/pnas.0706375104>
- Petanidou, T., Kallimanis, A. S., Tzanopoulos, J., Sgardelis, S. P., & Pantis, J. D. (2008). Long-term observation of a pollination network: fluctuation in species and interactions, relative invariance of network structure and implications for estimates of specialization. *Ecology Letters*, 11(6), 564–575. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01170.x>
- R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.4.1) [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Ramos-Robles, M., Villarreal-Quintanilla, J. A., & Valdés-Reyna, J. (2023). Jardín Botánico Ing. Gustavo Aguirre Benavides: Espacio de conservación de plantas de zonas áridas del sureste del Desierto Chihuahuense. En *México megadiverso visto a través de sus jardines y sus protagonistas* (pp. 36-45). Asociación Mexicana de Jardines Botánicos (AMJB) y Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT).
- Nielsen, A., Bascompte, J., Elberling, H., & Jordano, P. (2011). Temporal dynamics in a pollination network. *Ecology*, 92(3), 589–597 DOI:[10.1890/07-0451.1](https://doi.org/10.1890/07-0451.1)
- Tylianakis, J. M., Laliberté, E., Nielsen, A., y Bascompte, J. (2010). Conservation of species interaction networks. *Biological Conservation*, 143(10), 2270–2279. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.12.004>
- Vilella-Arnizaut, I. B., Roeder, D. V., & Fenster, C. B. (2022). Uso de jardines botánicos como arcas para conservar polinizadores e interacciones planta-polinizador: un estudio de caso

- de las Grandes Llanuras del Norte de Estados Unidos. *Journal of Pollination Ecology*, 31, 53–69. [https://doi.org/10.26786/1920-7603\(2022\)645](https://doi.org/10.26786/1920-7603(2022)645)
- Vovides, A. P., Iglesias, C., Luna, V., y Balcázar, T. (2013). Los jardines botánicos y la crisis de la biodiversidad. *Botanical Sciences*, 91(3), 239–250.
- Valiente-Banuet, A., Arizmendi, M. del C., Rojas-Martínez, A., y Domínguez-Canseco, L. (1996). *Ecological relationships between columnar cacti and nectar-feeding bats in Mexico*. *Journal of Tropical Ecology*, 12(1), 103–119. Cambridge University Press.
- Valiente-Banuet, A., Bolongaro-Crevenna, A., Briones, O., Ezcurra, E., Rosas, M., Núñez, H., Barnard, G., y Vázquez, E. (1991). *Spatial relationships between cacti and nurse shrubs in a semi-arid environment in central Mexico*. *Journal of Vegetation Science*, 2(1), 15–20. <https://doi.org/10.2307/3235893>
- Wyse Jackson, P. S., y Sutherland, L. A. (2000). *International agenda for botanic gardens in conservation*. Botanic Gardens Conservation International.
- Waser, N. M., Chittka, L., Price, M. V., Williams, N. M., & Ollerton, J. (1996). Generalization in pollination systems, and why it matters. *Ecology*, 77(4), 1043–1060. <https://doi.org/10.2307/2265575>
- Whitford, W. G., & Duval, B. D. (2019). *Ecology of desert systems* (2nd ed.). Academic Press. 473 pp.

8. ANEXOS

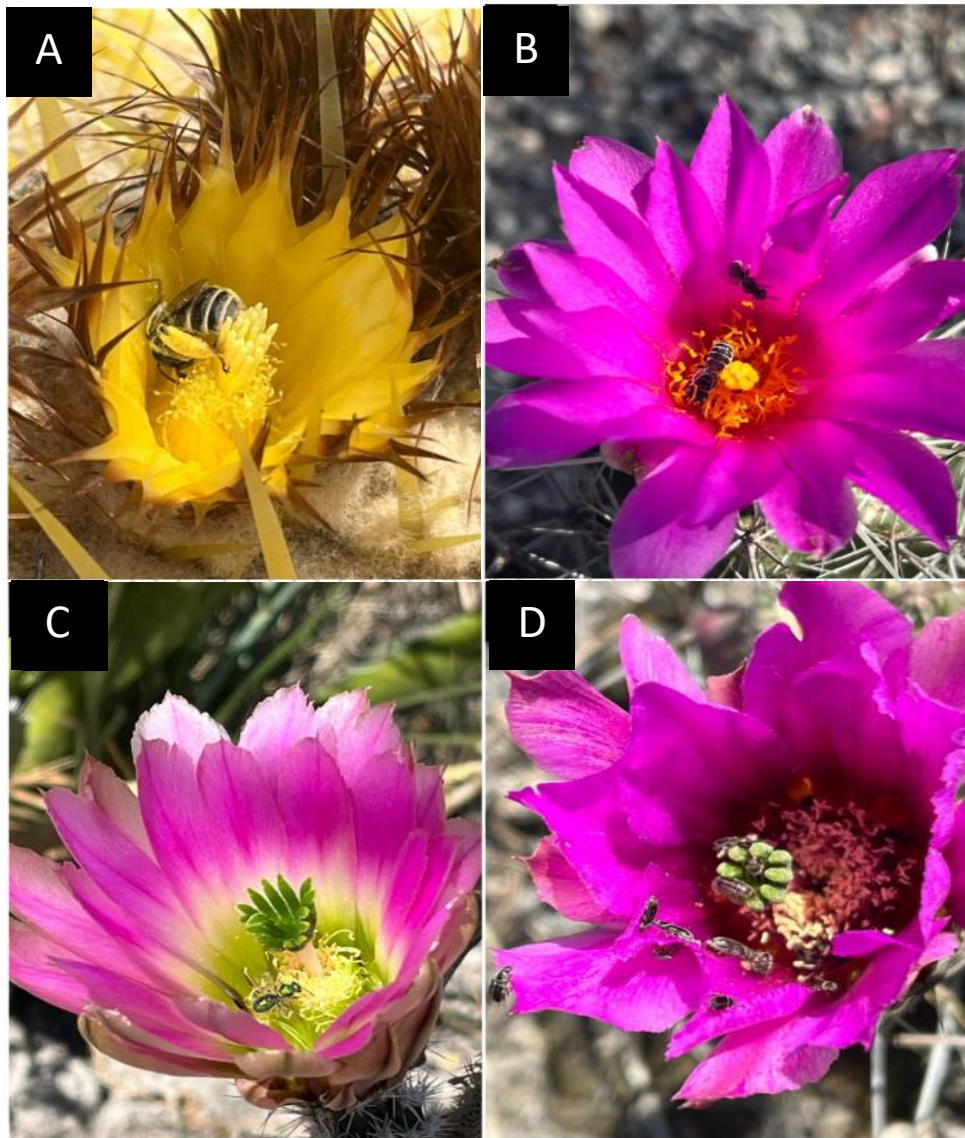


Figura 7. Ejemplos de interacciones planta–visitante floral registradas en especies de cactáceas del Jardín Botánico “Ing. Gustavo Aguirre Benavides”. (A) *Apis mellifera* visitando la flor de *Echinocactus platyacanthus*; (B) *Megachile aurantipennis* interactuando con la flor de *Coryphantha ramillosa*.; (C) *Agapostemon* sp. visitando la flor de *Neolloydia conoidea*; y (D) escarabajos del género *Brassicogethes* asociados a la flor de *Echinocereus stramineus*. Fotografías: Bernardo Fabián López García (2026).

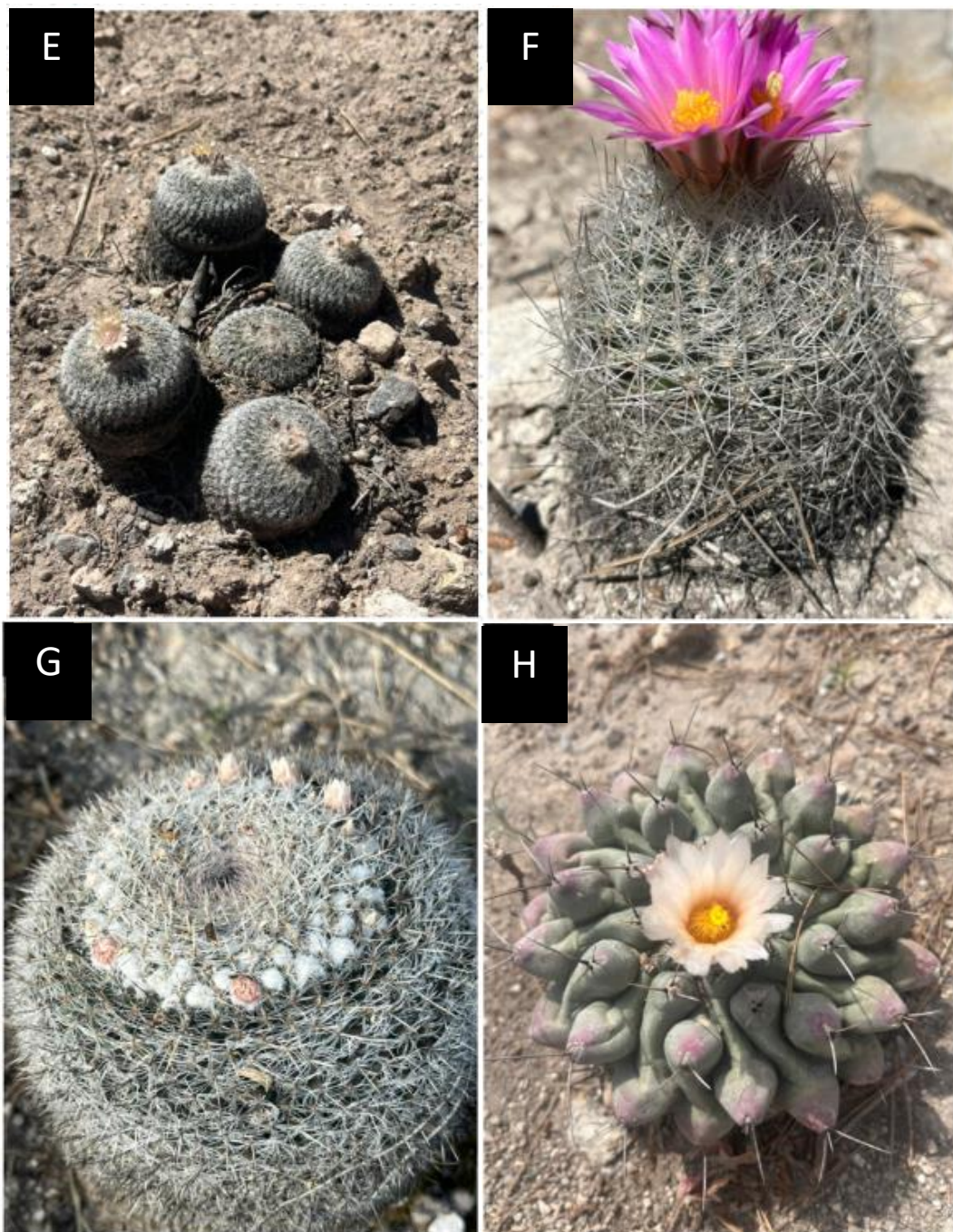


Figura 8. Especies de cactáceas evaluadas durante el estudio. (E) *Epithelantha micromeris*; (F) *Thelocactus macdowellii* en floración; (G) *Mammillaria chionocephala*; y (H) *Thelocactus rinconensis* en floración. Las especies mostradas representan parte de la diversidad de cactáceas incluidas en el análisis de las interacciones planta–visitante floral. Fotografías: Bernardo Fabián López García (2026).



Figura 9. Especies de cactáceas evaluadas durante el estudio. (I) *Echinocactus platyacanthus*; (J) *Neolloydia conoidea* en floración; (K) *Turbinicarpus valdezianus*; y (L) *Astrophytum-myriostigma* en floración. Las especies mostradas representan parte de la diversidad de cactáceas incluidas en el análisis de las interacciones planta–visitante floral. Fotografías: Bernardo Fabián López García (2026).

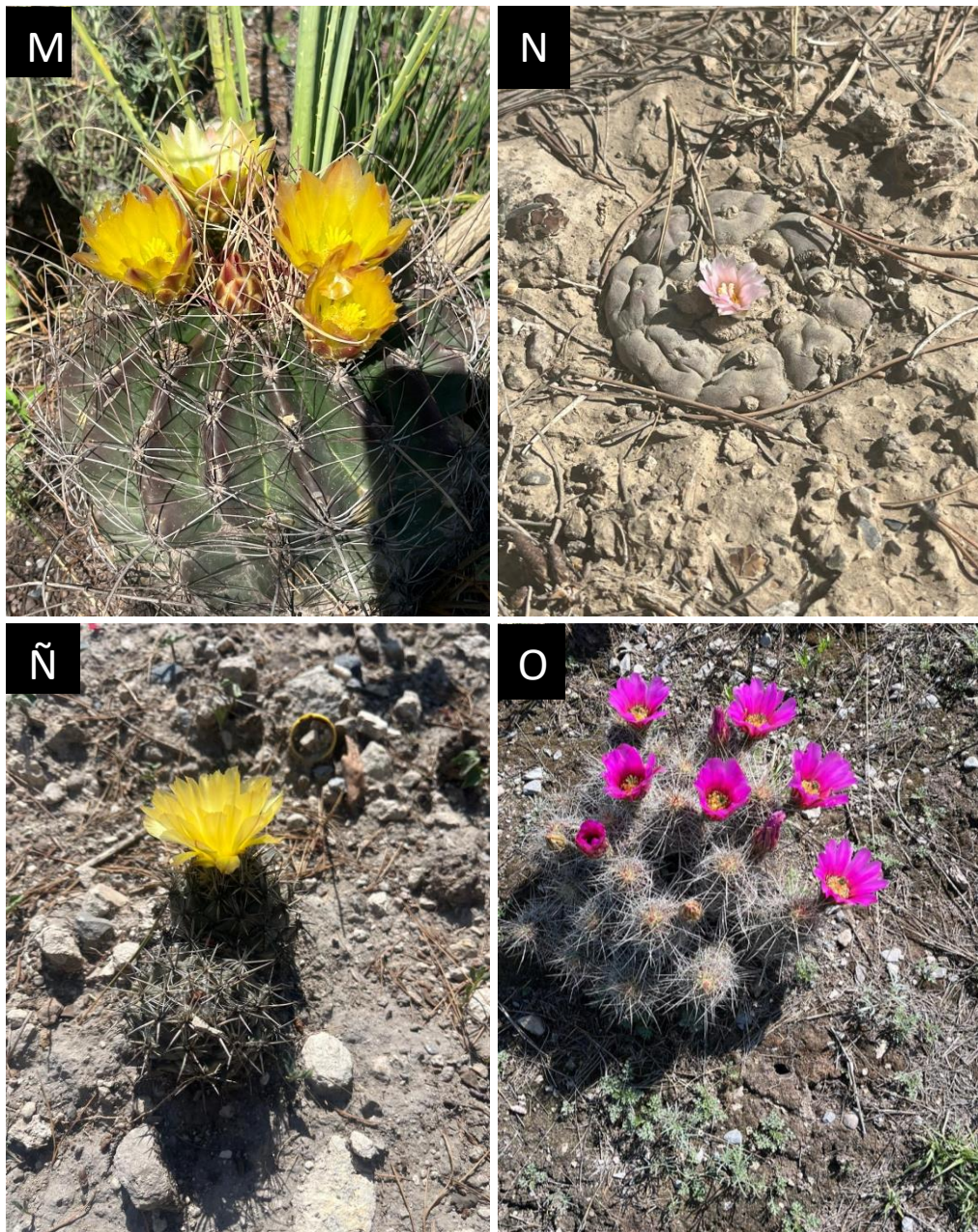


Figura 10. Especies de cactáceas evaluadas durante el estudio. (M) *Thelocactus bicolor* en floración; (N) *Lophophora williamsii* en floración; (Ñ) *Coryphantha ramillosa* en floración; y (O) *Echinocereus stramineus* en floración. Estas especies formaron parte de la comunidad de cactáceas evaluada para caracterizar la estructura de la red de interacción con visitantes florales. Fotografías: Bernardo Fabián López García (2026).