Universitat de les Illes Balears

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTRUCTURA DE LA RED DE POLINIZACIÓN EN UN ISLOTE DEL ARCHIPIÉLAGO DE CABRERA

Araceli Guillem Bosch

Grado de Biología

Facultad de Ciencias

Año Académico 2019-20

ESTRUCTURA DE LA RED DE POLINIZACIÓN EN UN ISLOTE DEL ARCHIPIÉLAGO DE CABRERA

Araceli Guillem Bosch

Trabajo de Fin de Grado

Facultad de Ciencias

Universidad de las Illes Balears

Año Académico 2019-20

Palabras clave del trabajo:

redes de interacción planta-polinizador, interacción mutualista, isla, sistema ecológico complejo

Nombre Tutor/Tutora del Trabajo Anna Traveset

	Autor		Tutor	
Se autoriza la Universidad a incluir este trabajo en el Repositorio Institucional para su consulta en acceso abierto y difusión en línea, con fines exclusivamente académicos y de investigación	Sí	No	Sí	No
	☒	☐	☒	☐

Índice

RESUMEN 6
ABSTRACT 6
INTRODUCCIÓN 7
METODOLOGÍA 9
Zona de estudio 9
Censo de visitas a flores por parte de insectos, lagartijas y aves 9
Recolección de muestras de polen procedentes de lagartijas y aves 9
Colección de referencia e identificación de los granos de polen 10
Construcción y análisis de las redes 10
RESULTADOS 12
DISCUSIÓN 23
CONCLUSIONES 24
AGRADECIMIENTOS 25
REFERENCIAS 25

RESUMEN

Las redes de polinización permiten analizar las interacciones planta-polinizador e identificar las especies más importantes. Se usan para entender mejor el funcionamiento del ecosistema, ya que esta información es fundamental a la hora de tomar decisiones frente a posibles perturbaciones. En islas, estos mutualismos son particularmente interesantes porque los vertebrados amplían su nicho trófico alimentándose de polen, néctar y agua floral y, en consecuencia, actúan como polinizadores. En este estudio se utiliza un enfoque de redes para analizar, por primera vez, las interacciones planta-polinizador en un islote del archipiélago de Cabrera, Na Redona. Para detectar las interacciones planta-polinizador se realizaron observaciones directas de visitas a flores, registros con cámaras automáticas con sensor de movimiento y frotis de polen. Se identificaron 28 especies de polinizadores potenciales: 24 insectos, *Podarcis lilfordi*, y tres especies de aves que visitaron un total de 17 especies vegetales. Los polinizadores más abundantes son los dípteros donde destaca la familia Agromyzidae. Las lagartijas se presentan como polinizadores generalistas pero muy selectivos y también se observan aves como potenciales polinizadores. Las especies vegetales más visitadas son *Withania frutescens, Allium subvillosum, Diplotaxis ibicensis* y *Euphorbia dendroides.* Las especies anteriores son clave para la estructura y funcionalidad del ecosistema del islote. Las redes de polinización de Na Redona presentan un pequeño tamaño, anidamiento bajo y elevada especialización de tal forma que las confiere de elevada vulnerabilidad.

ABSTRACT

Pollination networks allow the analysis of plant-pollinator interactions and the identification of the most important species. They are used to better understand the functioning of the ecosystem, since this information is fundamental when making decisions in the face of possible disturbances. In islands, these mutualisms are particularly interesting because vertebrates expand their trophic niche by feeding on pollen, nectar, and floral water and, consequently, act as pollinators. In this study a network approach is used to analyze, for the first time, plant-pollinator interactions on an islet in the Cabrera archipelago, Na Redona. To detect plant-pollinator interactions, direct observations of flower visits, records with automatic cameras with motion sensor and pollen smears were made. Twenty-eight species of potential pollinators were identified: 24 insects, *Podarcis lilfordi*, and three bird species that visited a total of 17 plant species. The most abundant pollinators are *diptera* where the family Agromyzidae stands out. Lizards are presented as generalist pollinators but very selective and birds are also observed as potential pollinators. The most visited plant species are *Withania frutescens, Allium subvillosum, Diplotaxis ibicensis* and *Euphorbia dendroides*. The above species are key to the structure and functionality of the islet ecosystem. Na Redona's pollination networks are small, low nesting and highly specialized, which makes them highly vulnerable.

INTRODUCCIÓN

La interacción mutualista entre una planta y un polinizador es muy importante para el éxito reproductivo de las plantas, ya que más del 87% de las angiospermas dependen de los polinizadores para reproducirse (Ollerton et al. 2011). La planta ofrece un tipo de recompensa energética al polinizador y este transporta el polen de las anteras hasta los estigmas de otra flor. Así, en este tipo de interacción se lleva a cabo la fecundación cruzada, crucial para angiospermas incapaces de polinizarse de manera autónoma, contribuyendo a su diversidad genética. La selección natural actúa sobre las plantas y a su vez sobre los polinizadores, por lo que se encuentran en una continua adaptación entre ellos (coevolución), aumentando la especificidad entre las especies (Simón-Porcar et al. 2018). Se trata por tanto de un proceso muy importante para la diversidad y funcionalidad de los sistemas ecológicos complejos (Jordano et al. 2009).

Las interacciones mutualistas planta-animal son especialmente interesantes en islas. Éstas presentan una diversidad de animales y plantas menor que las presentes en el continente más cercano, por lo que las interacciones tróficas tienden a ser más simples y generalistas. Las especies presentes en islas están expuestas a un riesgo de depredación y tasa de parasitismo menor, por lo que tienden a ser abundantes y, debido a la escasez de alimento típico, se establece una competencia intraespecífica elevada (Traveset et al. 2016). Es por esto por lo que especies de vertebrados típicamente insectívoras en los continentes, como las aves y lagartijas, se ven obligados a ampliar su nicho trófico alimentándose de polen y néctar para poder suplementar su dieta por la escasez de insectos en islas y, en consecuencia, actúan como polinizadores potenciales. Este proceso resulta muy importante para las especies de plantas que presentan pocos polinizadores, particularmente en los sistemas insulares (Traveset et al. 2015).

Además de presentar interacciones bióticas más simples, las islas también se caracterizan por presentar una mayor cantidad de endemismos, lo que provoca que sean más vulnerables que los continentes a perturbaciones como la fragmentación del hábitat, la introducción de especies exóticas, la sobreexplotación de los recursos naturales o la desaparición de especies (Traveset & Richardson, 2006; Dupont et al. 2013; Kaiser-Bunbury et al. 2009). El estudio de las interacciones bióticas es necesario para entender la respuesta ecológica a estas perturbaciones y poder proponer medidas de gestión más adecuadas contemplando la integridad de los ecosistemas (Santamaría et al. 2015; Kaiser-Bunbury et al. 2017)

Un conjunto de interacciones bióticas puede ser representado gráficamente como una red. Las redes ecológicas consideran no solo las especies sino también las interacciones que establecen entre sí y son claves para poder entender el funcionamiento y la organización de los sistemas diversos complejos. Se caracterizan por tener un modelo *scale-free*, donde el número de conexiones entre los miembros no se distribuyen de manera aleatoria y las distribuciones de las frecuencias siguen la ley de potencia

truncada, es decir, las incorporaciones de las interacciones presentan un enlace preferencial (Jordano et al. 2009). En las redes las especies se representan con nodos (*nodes* en inglés) y las relaciones que establecen con otras especies mediante conexiones o enlaces (*egdes* en inglés), y permiten obtener una representación visual de la estructura de una comunidad con características tipológicas y funcionales propias (Fig. 1).

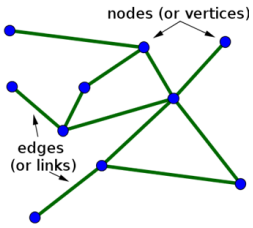


Figura 1. Representación gráfica de una red mediante nodos (*nodes*) unidos por enlaces (*edges*).

Las redes binarias cualitativas se construyen a partir de la presencia o ausencia de interacción, por ejemplo, entre una planta y un polinizador determinado, y permiten identificar patrones generales con una perspectiva descriptiva. En cambio, las redes cuantitativas o ponderadas contienen información cuantitativa sobre la intensidad o peso de los enlaces y permiten describir la fuerza de las interacciones entre las especies observadas, incrementando la información que podemos obtener de la red y mejorando la interpretación ecológica de la comunidad (Castro-Urgal et al. 2012). Cuando se habla de redes de polinización potenciales, se supone que la calidad de cada visita es independiente de su frecuencia, es decir, la cantidad de visitas por parte de un polinizador a la planta no asegura que ocurra la polinización, pero estudios previos confirman que se pueden realizar estimaciones robustas del potencial polinizador a partir de la frecuencia de interacción planta-polinizador (Jordano et al. 2009).

Este trabajo utiliza un enfoque de redes para analizar, por primera vez, las interacciones planta-polinizador en un islote del archipiélago de Cabrera, Na Redona. El principal **objetivo** es caracterizar los patrones de polinización potenciales presentes en este islote a partir de: a) estudiar el uso de flores por la comunidad de polinizadores en función de su grupo funcional y los polinizadores compartidos por las plantas; b) identificar las especies clave y el análisis de la vulnerabilidad de las comunidades de plantas y polinizadores a la pérdida de especies que dependen de ellas; c) analizar el patrón de interacción dentro de una misma especie animal y detectar diferencias entre los individuos en el uso de flores.

METODOLOGÍA

Zona de estudio

El estudio se centra en el islote de Na Redona que forma parte del Parque Nacional del archipiélago de Cabrera, situado en las Islas Baleares, y se caracteriza por formar parte de la Red Natura 2000 de la Unión Europea y ser una Zona Protegida de Interés para el Mediterráneo, considerado un punto de biodiversidad de especies (MITECO, 2019; CAIB, 2019). El islote presenta una forma circular con una extensión de 10,7 hectáreas y un perímetro de 1.257 metros. En la parte central alcanza los 57 metros de altura y en la costa NE presenta acantilados importantes. Presenta un clima mediterráneo semiárido con temperaturas suaves y precipitaciones ocasionales (Alcover et al. 1993). Respecto a la flora vascular, se encuentran aproximadamente 108 especies vegetales descritas de distribución mediterránea, de las cuales la mayor parte son herbáceas, como por ejemplo *Limonium ebusitanum, Diplotaxis ibicensis* y *Sonchus tenerrimus*, y arbustivas, como por ejemplo, *Olea europaea subsp. europaea var. silvestris*, pero no presenta árboles de gran porte (Cañellas et al. 1993). La recolección de los datos para el estudio se realizó durante las visitas al islote en abril y mayo de 2018 y 2019.

Censo de visitas a flores por parte de insectos, lagartijas y aves

Se realizaron observaciones directas de los visitantes a las flores en periodos de 15 minutos, entre las 9h y las 17:30h, durante el período de floración. Aproximadamente 7 individuos de cada especie fueron observados, primero a una distancia menor de 2 m para insectos, y después a más de 2 m para lagartijas y aves. Durante los censos se registró el comportamiento de cada visitante, número de visitas, el número de flores contactadas y observadas, y el número de flores abiertas disponibles. Una visita a la flor fue considerada efectiva cuando el insecto o lagartija entró en contacto con los órganos reproductores de la flor. Una vez concluido el periodo de observación, las flores fueron inspeccionadas a corta distancia para confirmar la especie del insecto o recolectar el espécimen para su posterior identificación en el laboratorio. Además, se utilizaron cámaras automáticas con sensor de movimiento con el fin de detectar otras especies de potenciales polinizadores no observadas en los censos.

Recolección de muestras de polen procedentes de lagartijas y aves

Se muestrearon un total de 101 individuos, 38 lagartijas y 23 aves para el año 2018 y 40 lagartijas en 2019. Las capturas de las lagartijas se hicieron a mano con un lazo regulable y se marcaron temporalmente con esmalte para evitar muestrear el mismo individuo. Posteriormente, se liberaron en el mismo lugar donde fueron capturadas, siguiendo el mismo procedimiento que en Hervías-Parejo et al. 2020. Las aves se capturaron con redes de niebla, que funcionaron durante aproximadamente 4 horas consecutivas en cada día de muestreo, y se marcaron individualmente para evitar el muestrear las recapturas. Para recoger el polen presente en los animales, se prepararon previamente cubos de 3 mm^3 de glicerogelatina, los cuales se utilizaron para hacer un frotis del hocico de las lagartijas, o pico, cuello

y frente en el caso de las aves. Posteriormente, la glicerogelatina se derritió en un portaobjetos y se cubrió con un cubreobjetos sellando los lados con esmalte para evitar contaminación de las muestras durante su transporte.

Colección de referencia e identificación de los granos de polen

Para la identificación de las especies vegetales a partir de los granos de polen, se creó una palinoteca o colección de referencia. En primer lugar, se colectaron muestras de polen de todas las especies encontradas en flor durante las visitas a Na Redona mediante la metodología anterior pero esta vez pasando el cubo de glicerogelatina por los estambres de la flor. En el laboratorio, cada muestra de referencia se examinó con el microscopio óptico y se fotografiaron los granos de polen mediante el programa LAS v. 4.12.0 con distintas vistas (ecuatorial y polar) con el aumento x100 de aceite de inmersión. Para aquellas especies no encontradas en flor durante las visitas y que son comunes en el islote (Cañellas et al. 1993), se hizo una búsqueda de artículos científicos y referencias de polen digitales. Cuando no se encontró fotografía o descripción de la especie, se utilizó la fotografía e información del género. Todas las fotografías se incluyeron en un documento final especificando especie o género y familia (Anexo 1). Además, se creó un documento donde figuran las principales características de los granos de polen de cada especie: forma de cada vista, polaridad, simetría, unidad formadora, tamaño, número y tipo de aberturas, tipo de exina y ornamentación (Anexo 2). Toda esta información se tuvo como referencia a la hora de identificar las muestras de polen.

Una vez recopilados los datos de referencia, se examinó cada muestra procedente de lagartija y ave al microscopio óptico en busca de polen, con un aumento de x10 mediante barridos empezando por la parte de abajo-derecha del cubreobjetos hasta cubrir la totalidad de la muestra. Primero se descartaron las muestras que presentaban igual o menos de cinco granos de polen de la misma especie ya que se consideraron posible contaminación durante el muestreo (da Silva et al. 2017). Durante los barridos, se hizo un dibujo aproximado de la forma y tamaño de cada grano de polen encontrado. Cuando un mismo tipo de polen apareció más de 5 veces en una muestra, se le fotografió con un aumento de x100 aceite de inmersión, asignó un código y contabilizó el número de granos. Una vez examinadas todas las muestras, se compararon las fotografías de los tipos polínicos con los datos de referencia.

Construcción y análisis de las redes

En primer lugar, se construyó una **red cualitativa binaria** (1 = presencia; 0 = ausencia de interacción) con todas las interacciones entre especies detectadas mediante los tres tipos de muestreo, las observaciones de visitas a flores, las cámaras automáticas y los frotis de polen.

En segundo lugar, a partir de los datos de visitas a flores por insectos y lagartijas y aves, se construyeron **tres redes cuantitativas a nivel de especie** (nodo = especie): 1) red frecuencia de ocurrencia donde el peso de la interacción es el número de individuos de una especie de planta visitados por una determinada

especie de polinizador, 2) red tasa de visita de polinizadores donde el peso de la interacción es el número de visitas por unidad de tiempo, es decir, se sumó el número de visitas de una especie de polinizador a una determinada especie de planta dividido por el tiempo de observación, y 3) red tasa de visita floral donde el peso de la interacción es el número de flores de una especie de planta visitadas por una especie de polinizador determinada. Por último, se construyó una red **cuantitativa a nivel de individuo** (nodo = individuo) con los datos obtenidos de los frotis de lagartijas y aves, donde el peso de la interacción es el número de granos de polen de una especie vegetal determinada. Esta red permite detectar diferencias en el uso de flores entre los individuos de una misma especie.

Se calcularon las siguientes métricas a **nivel de red**: número de especies animales o individuos (A), número de especies vegetales (P), número de interacciones (I), conectancia y conectancia cuantitativa (C/WC), anidamiento y anidamiento cuantitativo (NODF/WNODF), *interaction evenness* o uniformidad de la interacción (E) y el índice de especialización de la red (H_2'). También se calcularon las siguientes métricas a **nivel de especie**: *linkage level* o número total de interacciones con otras especies (L), *species strength* o fuerza de interacción (SS) y el índice de especificidad o selectividad (d'). Se definen como:

- **Conectancia (C) y conectancia cuantitativa (WC)**: fracción de interacciones registradas del total de las posibles en la red. La conectancia disminuye a medida que aumenta la riqueza de especies, ya que a más especies la fracción de interacciones registradas será menor (Dunne et al. 2002; Jordano et al. 2009) y en el caso de la conectancia cuantitativa se mide la densidad de enlaces dividida por el número de especies de la red, (Ecuación 1) (Bersier et al. 2002).

$$C = \frac{I}{P \times A}$$

Ecuación 1. Conectancia (C); interacciones (I); especies vegetales (P); especies animales (A).

- **Anidamiento (NODF) y anidamiento cuantitativo (WNODF)**: Mide hasta qué punto el patrón de interacción se asemeja a un patrón perfecto en el que las especies especializadas con bajas frecuencias de interacción conectan sólo con subconjuntos anidados de especies más generalistas y frecuentes, es decir, las especies especialistas interactúan con las generalistas y las generalistas entre sí. La versión cuantitativa se basa en la superposición y la disminución de los rellenos (Almeida-Neto & Ulrich 2010). Su valor va de 0 (no anidado) a 100 (anidado perfecto). Para comprobar si el NODF/WNODF observado fue significativamente diferente del esperado bajo una distribución aleatoria de interacciones, lo comparamos con los valores del NODF/WNODF obtenidos en 1000 aleatorizaciones de la misma red utilizando el modelo nulo de matriz de totales restringidos de filas y columnas fijas (modelo nulo de Patefield). H_0: no existen diferencias entre el NODF/WNODF

observado y el del modelo nulo; H_1: existen diferencias entre el NODF/WNODF observado y el del modelo nulo. Se aplicó la función *oecosimu* para comprobar si se acepta o rechaza la H_0.

- **Uniformidad de la interacción (E)**: cuantifica cuán equilibrada (uniforme) es la distribución de las interacciones entre las especies, basada en el índice de uniformidad de Shannon. Va de 0 (red desigual) a 1 (red uniforme). Una red no uniforme es aquella con una alta asimetría en la distribución de las frecuencias de interacción (Tylianakis et al. 2007).

- **Índice de especialización de la red (H_2')**: índice de entropía de Shannon estandarizado y bidimensional que cuantifica el grado de divergencia de nicho entre las especies de plantas y polinizadores de la red. El valor observado se compara con una distribución de probabilidad esperada de las frecuencias de interacción, que supone que todas las especies interactúan con sus parejas en proporción a sus frecuencias totales observadas (Blüthgen et al. 2006). El índice oscila entre 0 (baja especialización, alta superposición de nichos) y 1 (alta especialización, baja superposición de nichos). Es el equivalente al índice *d*' pero a nivel de red.

- **Fuerza de la interacción (SS)**: Suma de las dependencias de cada especie. Cuantifica la relevancia de una especie dentro de la red (Bascompte et al. 2006).

- **Índice de especificidad (*d*'):** calcula la fuerza con la que una especie se desvía de un muestreo aleatorio de las parejas interactivas disponibles (Blüthgen et al. 2006). Este índice permite calcular la especificidad (selectividad) de cada especie en base a la abundancia del recurso del que disponga. Su valor va de 0 (sin especialización) a 1 (especialista perfecto). Un polinizador puede interactuar sólo con una especie de planta, pero si esta última es la más dominante, el polinizador tendrá un valor bajo de *d*', será poco selectivo. Por el contrario, un polinizador que sólo visita las plantas más raras tendría un valor muy alto de *d*'.

La estimación de las principales métricas a nivel de red y especie y la visualización de las redes se realizó con el entorno de desarrollo integrado RStudio para R v. 4.0.0, con el paquete *Bipartite* y finalmente las redes dibujadas se editaron con el programa *Inkscape* v. 1.0.

RESULTADOS

En total, se registraron 17 especies vegetales (aprox. un 16% del total descritas para Na Redona) visitadas de forma efectiva por 28 especies de animales: una especie de lagartija, 3 especies de aves y 24 especies de insectos de los cuales 38% son dípteros, 29% lepidópteros, 25% himenópteros y 8% coleópteros (Fig. 1). Un 82% de las interacciones planta-polinizador fueron detectadas mediante los

censos de visitas a flores mientras que el 18% restante fue detectado en los frotis de lagartija y ave y en las cámaras automáticas. El porcentaje de frotis de lagartija y ave recogidos que contenían polen fue para las lagartijas fue del 31% y para las aves del 35%. En los censos de observación, sin embargo, no se detectaron visitas a flores por aves. La red cualitativa se encuentra anidada. Cinco plantas (*Withania frutescens, Allium subvillosum, Lavatera maritima, Diplotaxis ibicensis* y *Euphorbia dendroides*) presentan los valores superiores en *linkage level* (Gráfico 1) y las lagartijas (*Podarcis lilfordi*) representan el 21% de las interacciones totales (Gráfico 2).

En general, las tres redes cuantitativas a nivel de especie presentan una estructura similar caracterizada por una conectancia y anidamiento bajo y una distribución asimétrica de las interacciones (Tabla 1). Además, la dependencia de las plantas por los polinizadores es consistentemente mayor que la de los polinizadores en las tres redes. La principal diferencia a nivel de red se encuentra en los índices de especialización *(H_2'*), siendo mucho más elevado para la red de tasa de visita floral. A nivel de especie, las tres redes presentan índices de especificidad (*d*') altos, siendo mayor en plantas, lo que indica que las especies vegetales son visitadas por polinizadores más selectivos (Tabla 2).

Según la red frecuencia de ocurrencia, las especies vegetales más visitadas son *Allium subvillosum* y *Withania frutescens*, cada una con un 19% de individuos visitados respecto al total. Con relación a los polinizadores, el grupo funcional más común son los dípteros (visitan el 40% del total de las plantas), seguido por las lagartijas (21%), los himenópteros (18%), los lepidópteros (17%) y los coleópteros (4%) (Fig. 2). En el caso de la red de tasa de visita de polinizadores, se observa que Agromyzidae realiza un 31% del total de las visitas, seguido del sírfido *Episyrphus balteatus* (13%). Además, aunque las lagartijas puedan parecer el principal polinizador por ser las más generalistas (con mayor número de interacciones; Tabla 2), solo un 9% de los individuos visitan la misma especie vegetal. Según la red de tasa de visita floral, la especie más visitada es *Diplotaxis ibicensis*, principalmente por dos especies de abejas (Apidae), y representan el 19% del total de flores visitadas. La sigue *Euphorbia dendroides* (12%) visitada por dos especies de *Diptera*. En las dos últimas redes se observa que los grupos funcionales que más interaccionan con las flores son los dípteros, seguido de himenópteros, lepidópteros, lagartijas y por último coleópteros (Fig. 3 y 4).

En la red a nivel de individuo, el 31% de los frotis de lagartija y 35% de aves presentaron polen de 11 especies de plantas. Un 41% de los frotis de lagartija y ave presentaban solo polen de *Olea europaea* var. *sylvestris*, muy abundante en el islote, y un 9% de *Pistacia lentiscus* que se encuentra puntualmente. Sin embargo, estas especies se polinizan principalmente por el viento y no se incluyeron en la red. Se observa una conectancia muy baja, las interacciones se reparten asimétricamente y un nivel de especialización muy alto. Esto quiere decir que un individuo de lagartija o de ave visita una sola especie de planta que a su vez no es visitada por ningún otro individuo, por lo que también existe una mayor dependencia entre ellos (Tabla 3 y Fig. 5).

Tabla 1. Valores de las métricas aplicadas a cada tipo de red. A: número de polinizadores; P: número de plantas; I: número de interacciones; C/WC: conectancia ó conectancia cuantitativa; NODF/WNODF: anidamiento ó anidamiento cuantitativo; E: uniformidad de interacción; H_2': índice de especialización; L_A: promedio del número de interacciones para los polinizadores; L_P: promedio del número de interacciones para las plantas; SS_A: promedio de la fuerza de interacción para los polinizadores; SS_P: promedio de la fuerza de interacción para las plantas; d'_A: promedio del índice de especificidad para los polinizadores; d'_P: promedio del índice de especificidad para las plantas; SD: desviación estándar. * valores significativamente diferentes del modelo nulo (P < 0,05).

	Métricas a nivel de red							**Métricas a nivel de especie**					
Tipo de red	**A**	**P**	**I**	**C/WC**	**NODF/ WNODF**	**E**	***H₂'***	**L_A ± SD**	**L_P ± SD**	**SS_A ± SD**	**SS_P ± SD**	**d'_A ± SD**	**d'_P ± SD**
Red cualitativa	28	17	68	0,143	29,688*	-	-	2,43 ± 2,53	4 ± 2,76	-	-	-	-
Red frecuencia de ocurrencia	25	13	56	0,101	8,001*	0,657	0,438	2,24 ±1,54	4,31 ± 2,32	0,52 ± 0,63	1,92 ± 1,80	0,34 ± 0,22	0,44 ± 0,26
Red tasa de visita de polinizadores	25	13	56	0,096	10,547*	0,611	0,560	2,24 ±1,54	4,31 ± 2,32	0,52 ± 0,57	1,92 ± 1,69	0,48 ± 0,16	0,58 ± 0,16
Red tasa de visita floral	25	13	56	0,084	11,133*	0,588	0,700	2,24 ±1,54	4,31 ± 2,32	0,52 ± 0,54	1,92 ± 1,92	0,48 ± 0,15	0,62 ± 0,17
Red a nivel de individuo	9	9	10	0,064	0*	0,505	1,000	1,00 ± 0,33	1,11 ± 0,33	1,00 ± 0,44	1,00 ± 0,43	0,93 ± 0,14	0,94 ± 0,12

Tabla 2. Valores de las métricas a nivel de especie para las tres redes cuantitativas (red frecuencia de ocurrencia, red tasa de visita de polinizadores y red tasa de visita floral). L: *linkage level*; SS: fuerza de la interacción y *d*': índice de especificidad

			Red frecuencia de ocurrencia		Red tasa de visita de polinizadores		Red tasa de visita floral	
	Especies	**L**	**SS**	***d '***	**SS**	***d '***	**SS**	***d '***
Polinizadores	*Podarcis lilfordi*	7	3,212	0,499	2,530	0,484	2,467	0,404
	Agromyzidae	4	1,203	0,472	1,735	0,465	1,242	0,630
	Apidae sp.1	4	0,767	0,337	0,726	0,401	1,087	0,350
	Diptera sp.2	4	0,719	0,297	0,608	0,412	0,385	0,322
	Episyrphus balteatus	4	0,703	0,268	1,088	0,311	0,385	0,281
	Eristalis tenax	4	0,603	0,180	0,692	0,301	0,876	0,449
	Apidae sp.2	3	0,617	0,401	0,579	0,489	0,898	0,585
	Parasyrphus macularis	3	0,355	0,131	0,228	0,242	0,659	0,508
	Ancistocerus ebusianus	2	0,325	0,314	0,469	0,598	0,205	0,406
	Colias croceus	2	0,353	0,352	0,350	0,366	0,321	0,499
	Diptera sp.1	2	0,600	0,491	0,578	0,532	0,701	0,448
	Diptera sp.3	2	0,417	0,407	0,804	0,664	0,731	0,498
	Formicidae sp.1	2	0,333	0,358	0,380	0,534	0,172	0,353
	Utetheisa pulchella	2	0,767	0,689	0,411	0,526	0,911	0,573
	Amegilla sp.	1	0,053	0,000	0,135	0,559	0,445	0,683
	Calliphora vicina	1	0,211	0,416	0,079	0,291	0,050	0,417
	Coleoptera sp.1	1	0,250	0,503	0,107	0,519	0,166	0,452
	Dasytidae	1	0,500	0,765	0,500	0,867	0,330	0,821
	Diptera sp.4	1	0,167	0,391	0,119	0,532	0,353	0,587
	Lepidoptera sp.1	1	0,053	0,000	0,135	0,559	0,022	0,312
	Lepidoptera sp.2	1	0,105	0,235	0,135	0,559	0,022	0,312
	Macroglossum stellatarum	1	0,500	0,765	0,401	0,799	0,401	0,835
	Pieris sp.	1	0,053	0,000	0,045	0,251	0,050	0,417
	Vanessa cardui	1	0,053	0,000	0,045	0,251	0,050	0,417
	Vespidae sp.1	1	0,083	0,156	0,119	0,532	0,069	0,356
Especies vegetales	*Allium subvillosum*	8	5,330	0,699	5,190	0,542	4,802	0,769
	Withania frutescens	8	4,929	0,543	4,332	0,673	5,269	0,781
	Euphorbia dendroides	7	4,581	0,700	4,639	0,751	4,963	0,778
	Diplotaxis ibicensis	6	2,043	0,447	2,191	0,354	3,158	0,707
	Lavatera maritima	5	1,281	0,279	1,620	0,579	0,883	0,444
	Erodium chium	4	0,851	0,265	0,949	0,301	1,198	0,611
	Medicago arborea	4	0,700	0,128	1,064	0,496	0,658	0,493
	Fagonia cretica	3	0,700	0,349	0,647	0,497	0,087	0,233
	Heliotropium sp.	3	1,098	0,561	1,125	0,665	1,033	0,701
	Narcissus tazetta	3	1,417	0,641	1,377	0,734	1,186	0,682
	Ephedra fragilis	2	1,500	0,865	1,330	0,878	1,335	0,857
	Geranium molle	2	0,476	0,217	0,476	0,621	0,356	0,551
	Geranium rotundifolium	1	0,095	0,082	0,061	0,458	0,072	0,486

Tabla 3. Valores *linkage level* (L), fuerza de interacción (SS) y índice de especificidad (*d*') para los polinizadores y especies vegetales de la red a nivel de individuo.

	Especies	**L**	**SS**	***d '***
Polinizadores	*Podarcis lilfordi 1*	2	2,000	1,000
	Podarcis lilfordi 2	1	1,000	1,000
	Podarcis lilfordi 3	1	1,000	1,000
	Podarcis lilfordi 4	1	1,000	1,000
	Podarcis lilfordi 5	1	0,600	0,763
	Podarcis lilfordi 6	1	1,000	1,000
	Sylvia melanocephala 1	1	0,400	0,625
	Sylvia melanocephala 2	1	1,000	1,000
	Sylvia sarda	1	1,000	1,000
Especies vegetales	*Sisymbrium* sp.	2	2,000	1,000
	Centrathus calcitrapae	1	0,462	0,704
	Chenopodium murale	1	0,538	0,757
	Diplotaxis ibicensis	1	1,000	1,000
	Ephedra fragilis	1	1,000	1,000
	Fagonia cretica	1	1,000	1,000
	Lavatera maritima	1	1,000	1,000
	Suaeda vera	1	1,000	1,000
	Withania frutescens	1	1,000	1,000

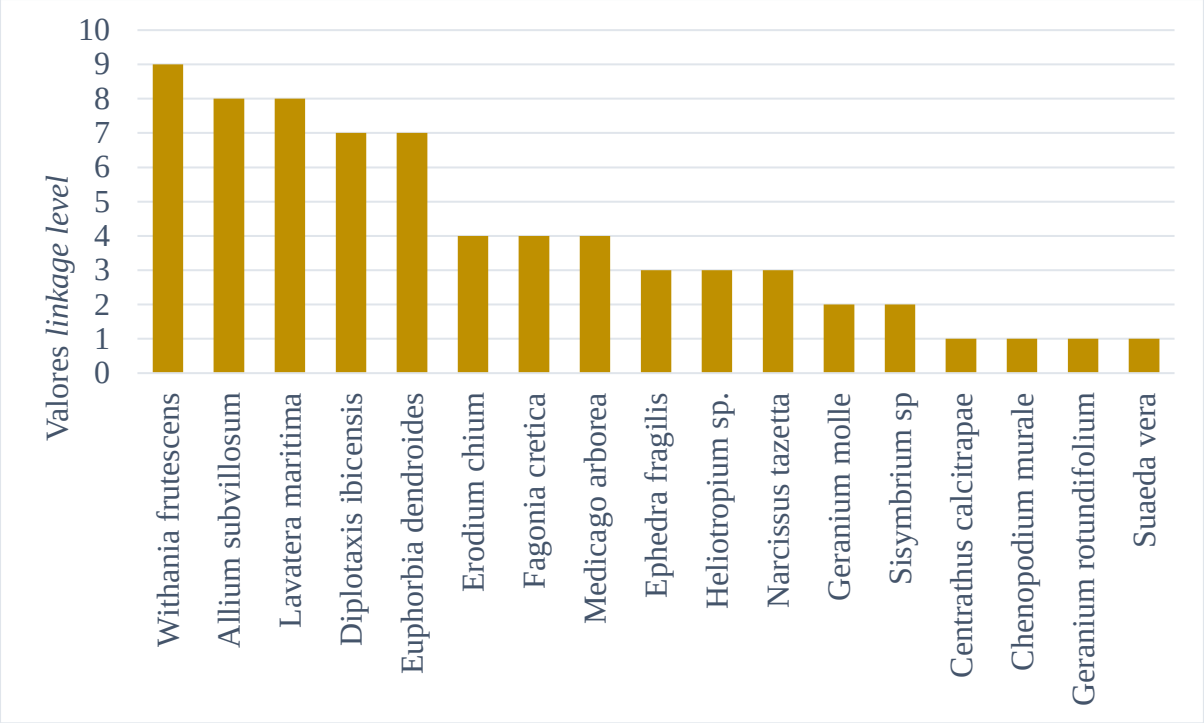


Gráfico 1. Valores de *linkage level* para las especies de vegetales en la red cualitativa.

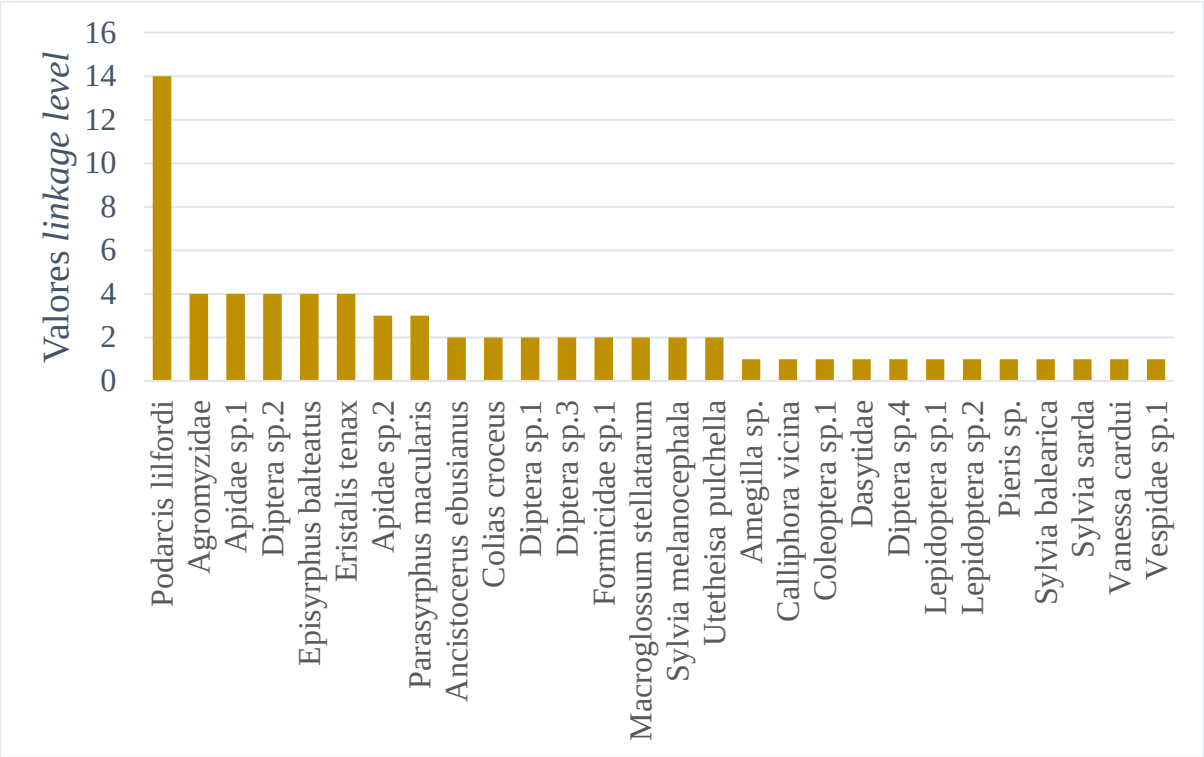


Gráfico 2. Valores de *linkage level* para las especies de animales en la red cualitativa.

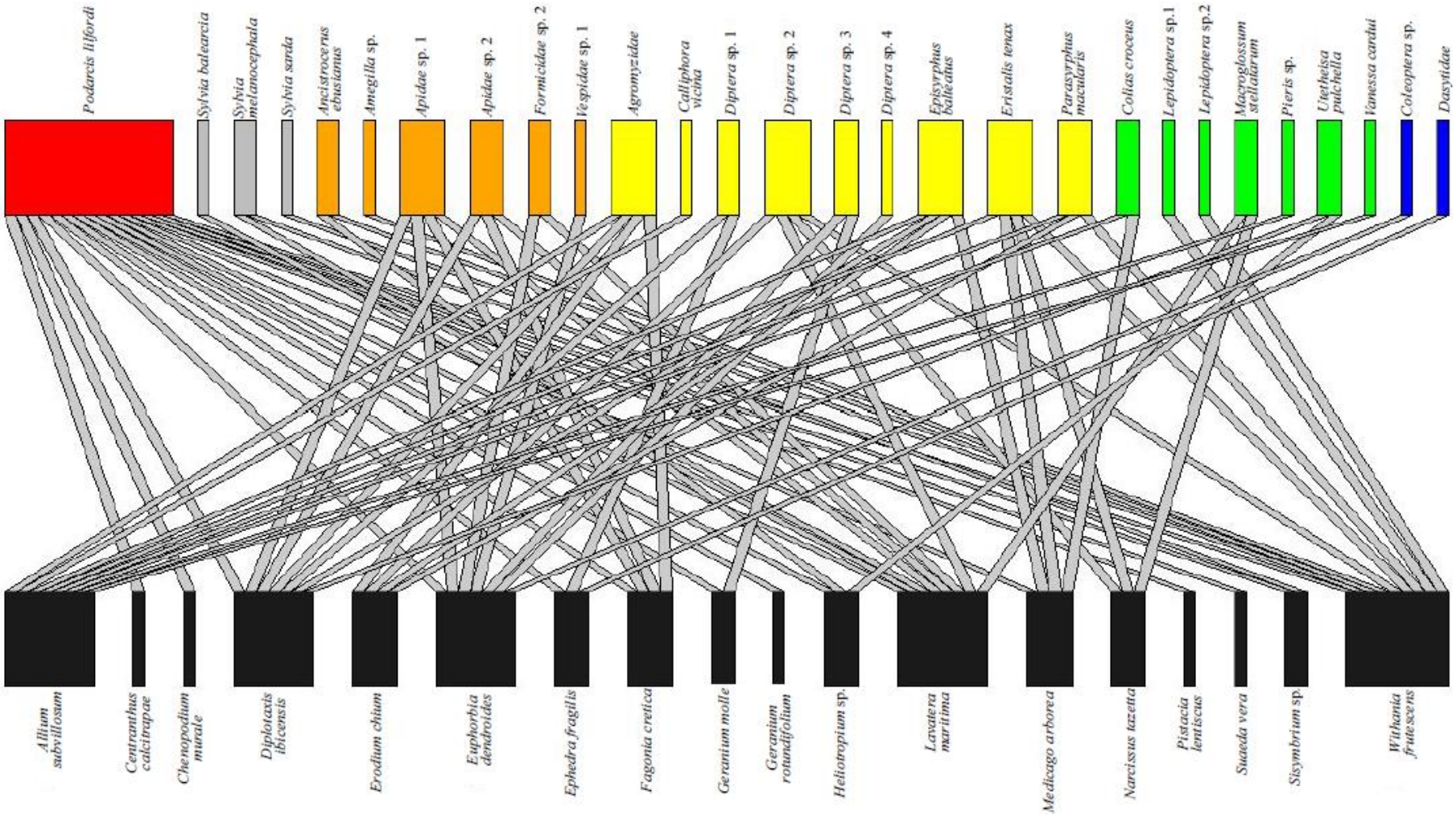


Figura 1. Red cualitativa de interacciones planta-polinizador donde se representan en el nivel más alto las especies de polinizadores ordenadas alfabéticamente y por grupos funcionales (rectángulos del mismo color), y en el nivel más bajo las especies de plantas (rectángulos negros) unidos mediante conexiones (gris). Rojo: lagartijas; gris: aves; naranja: himenópteros; amarillo: dípteros; verde: lepidópteros; azul: coleópteros.

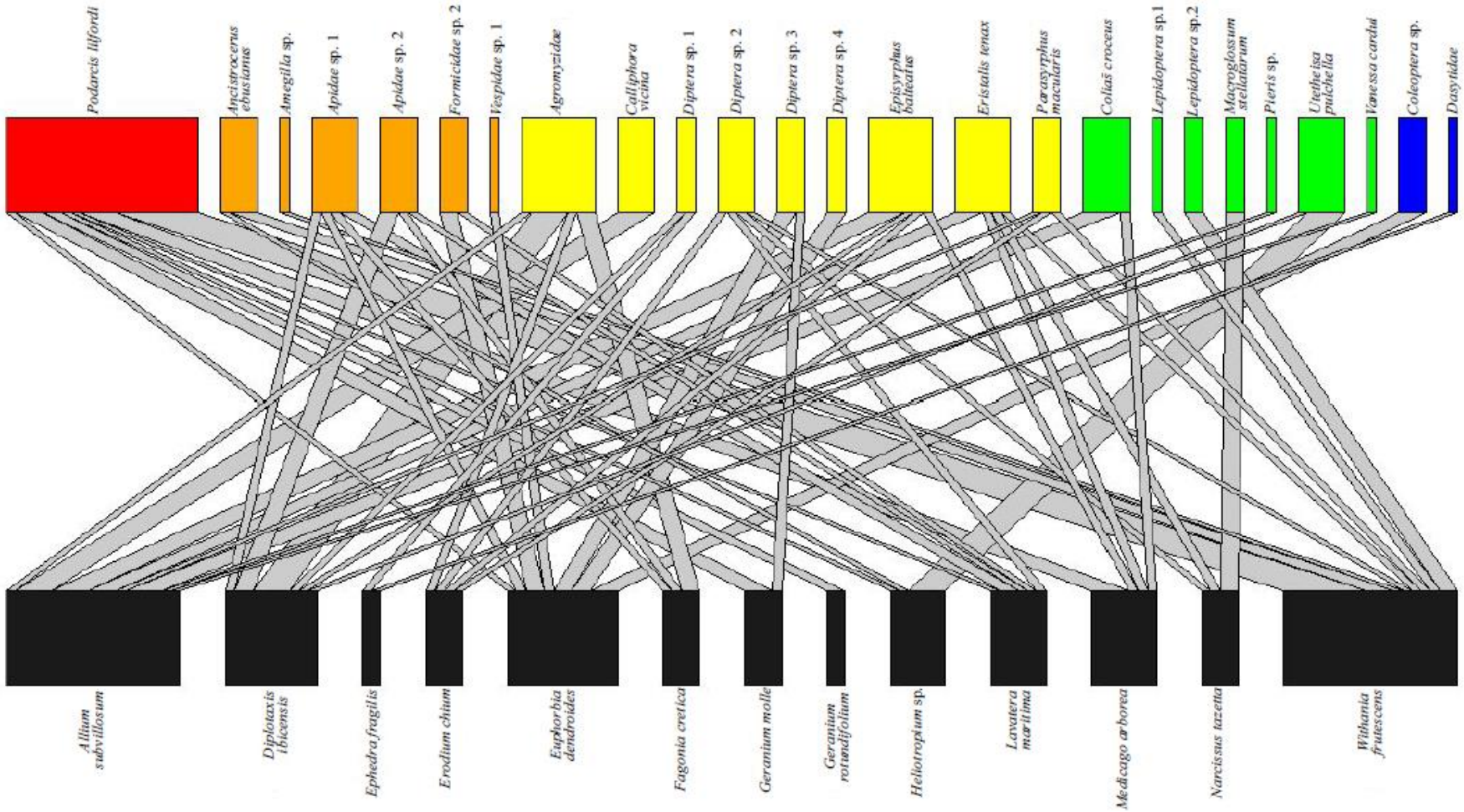


Figura 2. Red frecuencia de ocurrencia. Se representan en el nivel más alto las especies de polinizadores ordenadas alfabéticamente y por grupos funcionales (rectángulos del mismo color) y las especies de planta en el nivel más bajo (rectángulos negros). El peso de la interacción es el número de individuos de una especie de planta que es visitada por una especie determinada de polinizador. Rojo: lagartijas; naranja: himenópteros; amarillo: dípteros; verde: lepidópteros; azul: coleópteros.

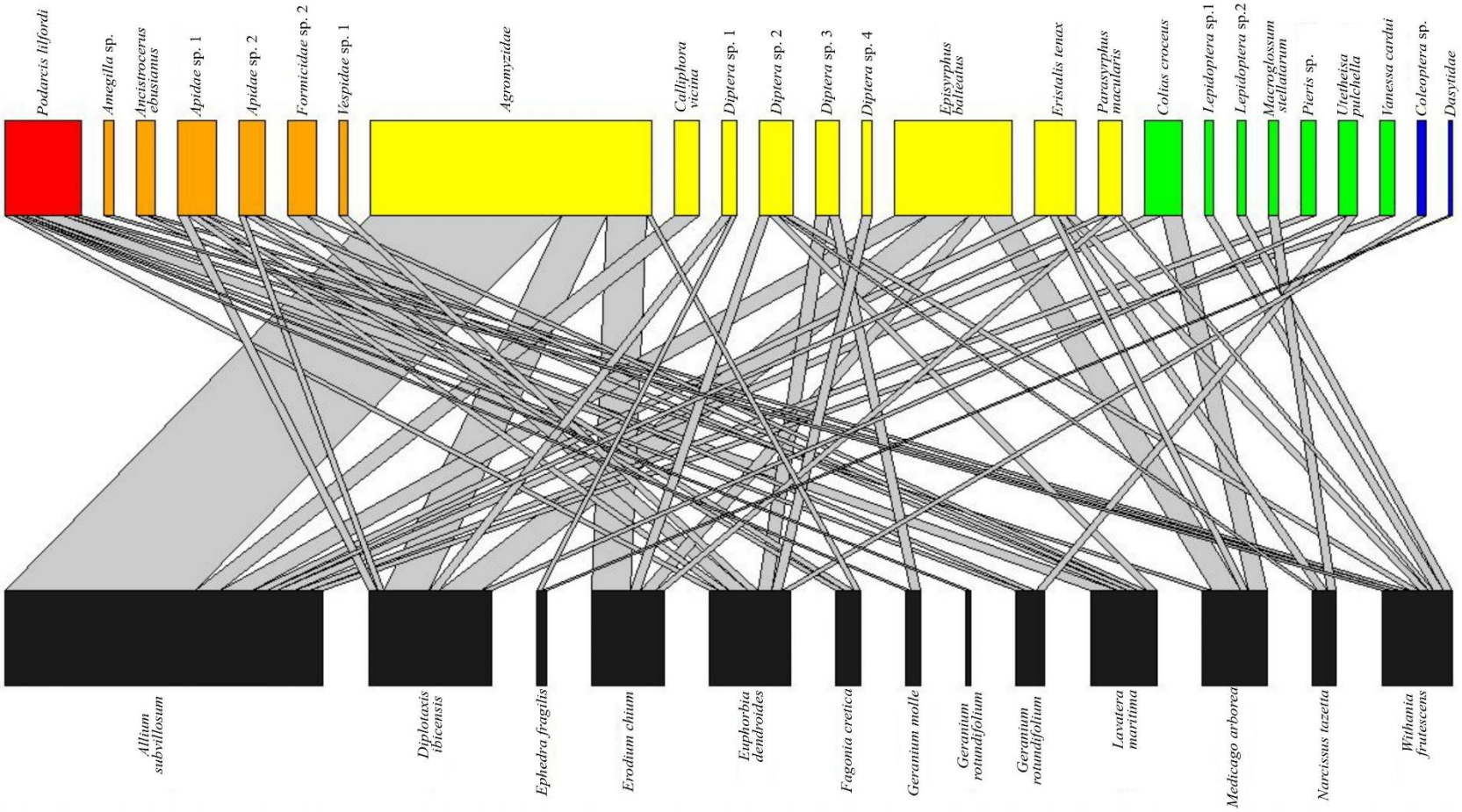


Figura 3. Red tasa de visita de polinizadores. Se representa las especies de polinizadores (arriba) ordenados alfabéticamente y por grupos funcionales (rectángulos del mismo color) y las especies de plantas (abajo) y sus interacciones medidas como el número de visitas de cada polinizador por unidad de tiempo. Rojo: lagartijas; naranja: himenópteros; amarillo: dípteros; verde: lepidópteros; azul: coleópteros.

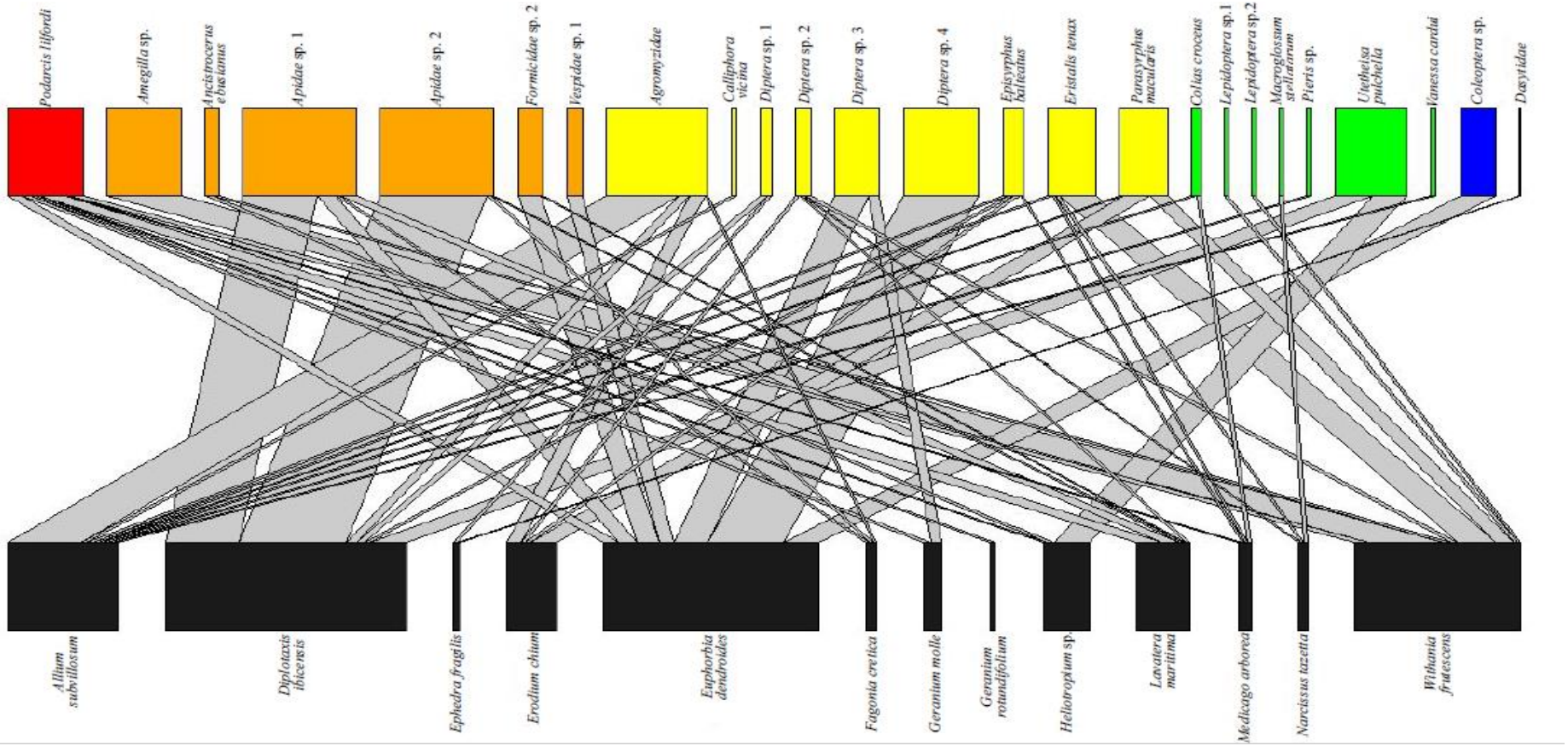


Figura 4. Red tasa de visita floral. Se representa las especies de polinizadores (arriba) ordenados alfabéticamente y por grupos funcionales (rectángulos del mismo color) y las especies de plantas (abajo) y sus interacciones que representan el número de flores de cada especie de planta visitadas por cada polinizador. Rojo: lagartijas; naranja: himenópteros; amarillo: dípteros; verde: lepidópteros; azul: coleópteros.

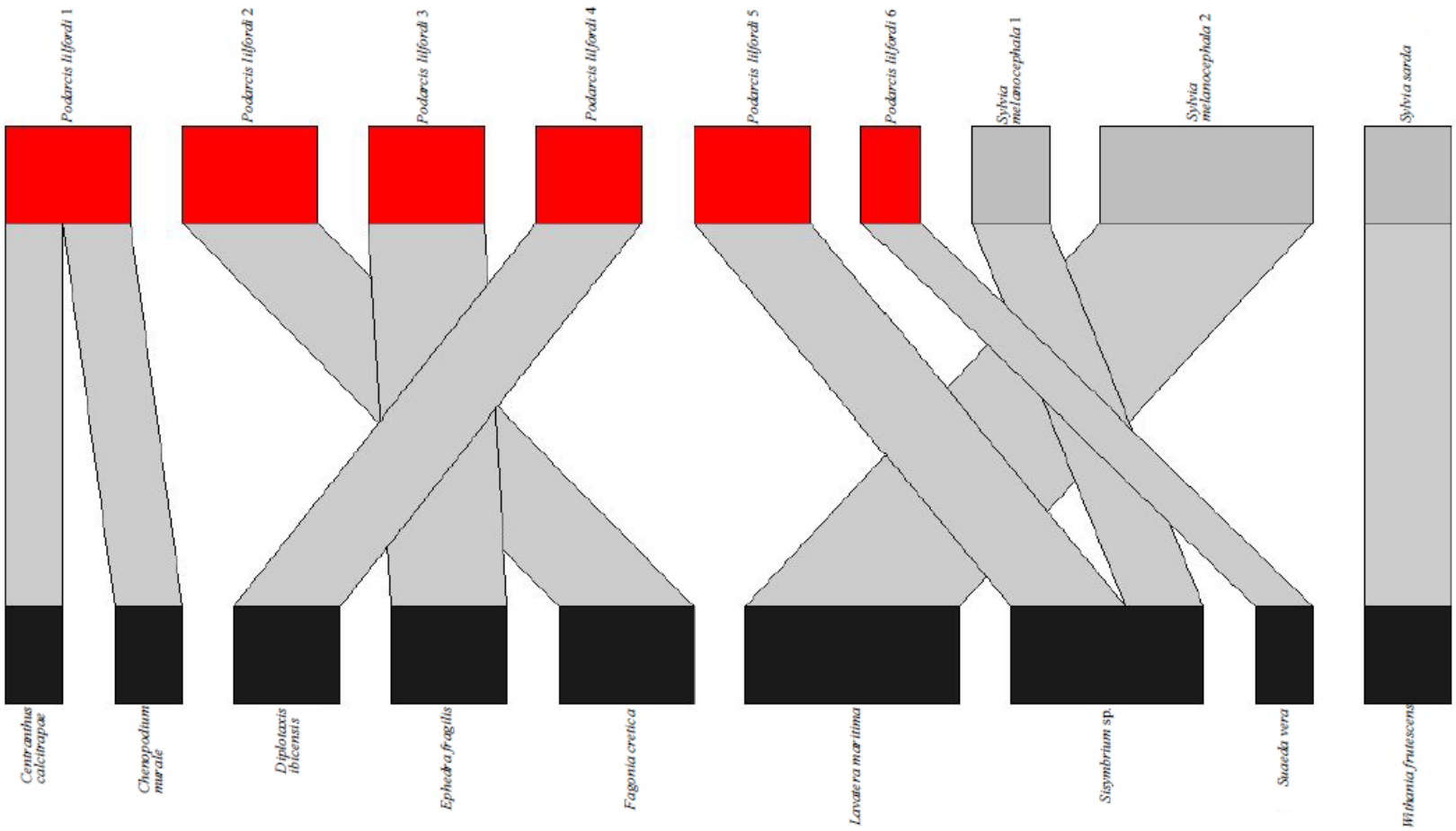


Figura 5. Red cuantitativa de interacción planta-polinizador a nivel de individuo que representa en el nivel más alto las lagartijas (rojo) y aves (gris) y en el nivel más bajo las especies vegetales (negro) unidas por conexiones que representan el número de granos de polen encontrados en cada individuo.

DISCUSIÓN

Este estudio presenta las primeras redes planta-polinizador para el islote de Na Redona. Además, el uso de redes cualitativas/cuantitativas y a nivel de especie/individuo ha permitido caracterizar mejor el patrón de interacciones presente en un ecosistema y complementar la distinta información que aportan. En la red cualitativa se muestran todas las interacciones planta-polinizador de Na Redona detectadas mediante tres métodos de muestreo. La combinación de los tres tipos de muestreo fue especialmente útil en el caso de las lagartijas y aves ya que los frotis y las cámaras automáticas nos permitieron detectar interacciones no observadas en los censos de visitas a flores. Las lagartijas se caracterizan por ser generalistas, pero con un nivel de selectividad bastante elevado, es decir, aportan estabilidad a la red ya que visita muchas especies vegetales, algunas especies no comunes, y además dependen de las lagartijas como único polinizador. Para las aves, solo se detectaron cuatro interacciones con plantas y este número tan bajo puede deberse a que son poco frecuentes en Na Redona y difíciles de capturar por el tipo de vegetación presente en la zona. Los resultados de este trabajo corroboran una vez más el papel de las lagartijas y el de las aves como potenciales polinizadores en sistemas insulares (Dupont et al. 2003; Traveset et al. 2015; Hervías-Parejo et al. 2020). Aun así, los insectos siguen siendo los principales polinizadores en Na Redona participado en un 74% de las interacciones.

Las redes cuantitativas se observan poco anidadas porque las especies presentan niveles de especificidad altos, ya que se encuentran pocas especies generalistas que interactúen con especies especialistas. Este hecho puede deberse a la disponibilidad de recursos de la zona. A partir de los resultados, se observa que la red de visita floral presenta el índice de especialización más elevado, lo que indica que los polinizadores visitan pies de plantas con pocas flores y también con muchas flores. Los valores elevados de especialización (H_2') y selectividad (d') indican que existe una poca redundancia funcional y, por tanto, el ecosistema se presenta más vulnerable (Kaiser-Bunbury et al. 2009). Esto junto al pequeño tamaño de las redes, característico de los sistemas insulares, y la elevada dependencia entre las especies, puede provocar que la desaparición de unas pocas especies tenga un gran impacto sobre la red. El valor bajo de conectancia observado puede deberse a las pocas interacciones registradas.

Los órdenes de polinizadores encontrados en el islote son los típicos identificados en otros sistemas insulares, como por ejemplo, en islas Seycheless (Kaiser-Bunbury, et al. 2017). En las tres redes cuantitativas se observa que los dípteros son los polinizadores más abundantes y los coleópteros los que menos, mientras que los porcentajes de himenópteros y de lepidópteros que contribuyen en las redes son muy similares. El polinizador que más individuos de especies vegetales visita es la lagartija sin tener en cuenta el número de individuos de lagartijas ni el número de flores que visita, es por esto, que en las otras dos redes cuantitativas su importancia como polinizador es mucho menor. La contribución

de los polinizadores Agromyzidae y *Episyrphus balteatus* se ve reducida en la red de tasa floral porque los individuos visitan las mismas especies. *Withania frutescens, Allium subvillosum, Diplotaxis ibicensis* y *Euphorbia dendroides* son las más generalistas y a su vez las más visitadas, por ello son las que aportan cierto grado de estabilidad a la red. La pérdida de las especies anteriores y de sus interacciones provocaría que la estabilidad y funcionalidad del ecosistema disminuya.

La elevada frecuencia de ocurrencia de granos de polen de *Olea europaea* var. *sylvestris* en las muestras de lagartija y los pocos individuos de *Pistacia lentiscus* en el islote, indica que los granos de polen deben quedar adheridos a las lagartijas cuando utilizan estas especies para alimentarse de sus flores o de algún otro recurso presente en estas plantas. Además, las visitas de lagartija a flores de especies que no se observan en los frotis, parece indicar que algunos tipos polínicos quedan peor adheridos en su hocico. La elevada selectividad de las lagartijas revela comportamientos tróficos distintos entre individuos de la misma especie. Puede deberse a que las lagartijas son territoriales y solo visitan las flores de especies que se encuentran en una zona en concreto. Las aves también muestran elevada selectividad. La selectividad por un tipo de flores depende de la disponibilidad de recursos que se encuentren en la zona (Sargent & Otto, 2005).

Se podría obtener una mejor comprensión del funcionamiento y de la evolución del ecosistema ecológico si se realizara un muestreo que incluyera variaciones temporales más largas y aumentar el número de interacciones registradas. Con esta información se obtendrían unos datos más robustos y se podrían comparar con los patrones de polinización presentes en otras islas de Cabrera para contribuir al conocimiento de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas ecológicos insulares situados en el mediterráneo.

CONCLUSIONES

Las redes que se muestran en este estudio se consideran las primeras descritas para Na Redona, son una herramienta útil para predecir la respuesta de un ecosistema ecológico frente a perturbaciones que puedan afectar a las especies y a su entorno. Con relación a los tipos de muestreo, las observaciones directas de las visitas a flores permiten detectar más interacciones de insectos, en cambio, las cámaras automáticas de sensor de movimiento y los frotis de lagartija y ave permite detectar más interacciones de lagartijas y aves, aun así, se registran muy pocas interacciones. Los órdenes de los polinizadores observados son los típicamente presentes en los ecosistemas insulares, siendo los dípteros los más abundantes. Se corrobora el papel de las lagartijas y aves como potenciales polinizadores, pero los insectos siguen siendo los polinizadores más comunes. El uso de flores por parte de los polinizadores, así como la presencia de polinizadores generalistas es muy limitado. Por lo que las redes de polinización de Na Redona se caracterizan por ser pequeñas y vulnerables a la pérdida de pocas especies. Los datos anteriores nos permiten tener una idea del funcionamiento y de la estructura de este ecosistema en

concreto, aun así, se registran pocas interacciones por lo que se necesitaría un muestreo más largo en el tiempo para obtener datos más robustos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Dra. Sandra Hervías-Parejo y a la Dra. Anna Maria Traveset Vilaginés del departamento de Ecología Terrestre del IMEDEA (UIB-CSIC) la prestación de material y datos, así como la ayuda, supervisión continúa y resolución de dudas durante todo momento y la enorme contribución a este trabajo. Agradezco también a Sílvia Pérez, Fish Ecology Lab del IMEDEA la prestación del microscopio. Agradezco también a la Dra. Maria del Mar Trigo Pérez del Departamento de Botánica y Fisiología Vegetal de la Universidad de Málaga la ayuda en la identificación de las tipologías polínicas.

REFERENCIAS

Alcover, J. A., Ballesteros, E. & Fornós, J. J. (1993). Història natural de l'Arxipèlag de Cabrera. Editorial Moll – CSIC. Monografies de la societat d'història natural de les Illes Balears.

Almeida-Neto, M. & Ulrich, W. (2010). A straightforward computational approach for measuring nestedness using quantitative matrices. Environmental Modelling & Software, 26: 173-178.

Bascompte, J., Jordano, P. & Olesen, J. M. (2006). Asymmetric coevolutionary networks facilitate biodiversity maintenance. Science, 312: 431–433.

Bersier, L. F., Banasek-Richter, C., and Cattin, M. F. (2002). Quantitative descriptors of food-web matrices. Ecology, 83: 2394-2407.

Cañellas, G. B., Alomar, G., & Rita, J. (1993). Flora vascular dels illots i addicions a la flora de Cabrera Gran. In Història natural de l'Arxipelag de Cabrera. Societat d'Història Natural de les Balears, 179-206.

Blüthgen N., Menzel F. & Blüthgen N. (2006). Measuring specialization in species interaction networks. BMC Ecology, 6: 9.

Castro-Urgal, R., Tur, C., Albrecht, M. & Traveset, A. (2012). How different link weights affect the structure of quantitative flower-visitation networks. Basic and Applied Ecology, 13: 500-508.

da Silva, L. P., Ramos, J. A., Coutinho, A. P., Tenreiro, P. Q. & Heleno, R. H. (2017). Flower visitation by European birds offers the first evidence of interaction release in continents. Journal of Biogeography, 44: 687-695.

Dupont, Y. L., Dennis, M. H. & Olesen, J. M. (2003). Structure of a plant-flower-visitor network in the high-altitude aub-alpine desert of Tenerife, Canary Islands. Ecography, 26: 301-310.

Dunne, J. A., Williams, R. J., and Martinez, N. D. (2002). Food-web structure and network theory: The role of connectance and size. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 99: 12917-12922.

Gobierno de las Islas Baleares. Espacios naturales protegidos. Parque nacional marítimo terrestre del archipiélago de Cabrera. Disponible en: http://www.caib.es/sites/espaisnaturalsprotegits/es/parc_nacional_maritim-terrestre_de_larxipelag_de_cabrera-21479/ Visitado el 8/4/2020.

Hervías-Parejo, S., Nogales, M., Guzmán, B., Trigo, M. M., Olesen, J. M., Vargas, P., Heleno, R. & A. Traveset. (2020). Potential role of lava lizards as pollinators across the Galápagos Islands. Integrative Zoology, 15: 144-148.

Hervías-Parejo, S. & A. Traveset. (2018). Pollination effectiveness of opportunistic Galápagos birds compared to that of insects: From fruit set of seedling emergence. American Journal of Botany, 105: 1-12.

Jordano, P., Vázquez, D. & Bascompte, J. (2009). Redes complejas de interacciones mutualistas planta-animal. Editorial Universitaria, Santiago, Chile, 17-41.

Kaiser-Bunbury, C. N., Memmott, J. & Müller, C. B. (2009). Community structure of pollination webs of Mauritanian heatland habitats. Plant Ecology, Evolution and Systemics, 11: 241-254.

Kaiser-Bunbury, C. N., Mougal, J., Whittington, A. E., Valentin, T., Gabriel, R., Olesen, J. M. & Blüthgen, N. (2017). Ecosystem restoration strengthens pollination network resilience and function. Nature, 542: 223-227.

Ministerio para la Transición Ecológica. (Gobierno de España). Archipiélago de Cabrera: Conservación de la biodiversidad. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/red-parques-nacionales/nuestros-parques/cabrera/conservacion-biodiversidad/default.aspx Visitado el 8/4/2020.

Ollerton, J., Winfree, R. & Tarrant, S. (2011). How many flowering plants are pollinated by animals?. Oikos, 120: 321-326.

Santamaría, S., Galeano, J., Pastor, J. M. & Méndez, M. (2015). Removing interactions, rather tan species, casts doubt on the high robustness of pollination networks. Oikos, 125: 526-534.

Sargent, R. D. & Otto, S. P. (2005). The Role of Local Species Abundance in Evolution of Pollinator Attraction in Flowering Plants. The American Naturalist, 167: 1

Simón-Porcar, V. I., Mohamed, A., & Arroyo, J. (2018). El papel de los polinizadores en la evolución floral: una perspectiva mediterránea. Ecosistemas, 27: 70-80.

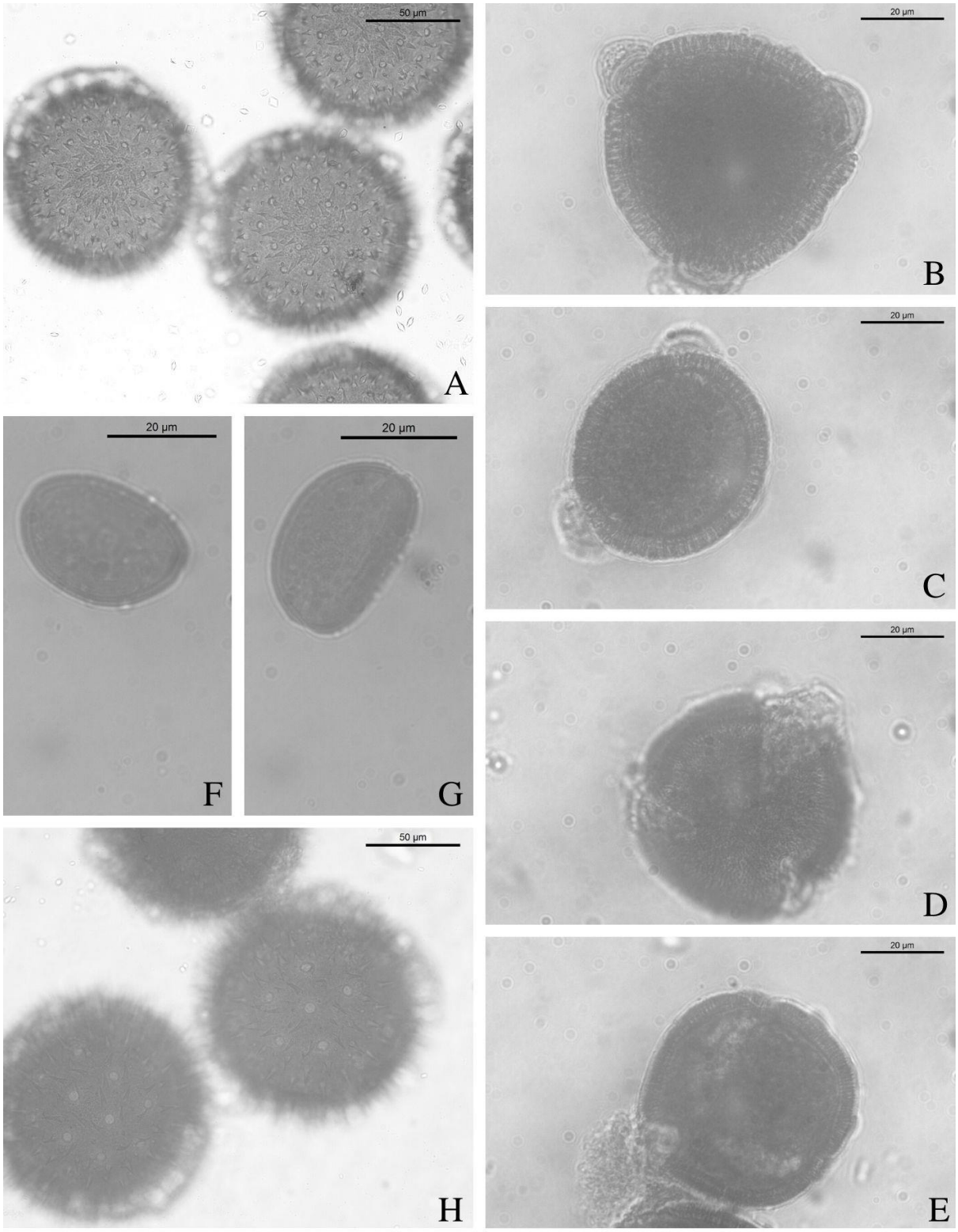
Traveset, A., Olesen, M. J., Nogales, M., Vargas, P., Jaramillo, P., Antolín, E., Trigo, M. M. & Heleno, R. (2015). Bird-flower visitation networks in the Galápagos unveil a widespread interaction release. Nature communications, 6.

Traveset, A. & Richardson, D. M. (2006). Biological invasions as disruptors of plant reproductive mutualisms. Trends in Ecology & Evolution, 21: 208-216.

Traveset, A., Tur, C., Trojelsgaard, K., Heleno, R., Castro-Urgal, R. & Olesen, J. M. (2016). Global patterns of mainland and insular pollination networks. Global Ecology and Biogeography, 25: 880-890.

Tylianakis J. M., Tscharntke T. & Lewis O.T. (2007). Habitat modification alters the structure of tropical host-parasitoid food webs. Nature, 445: 202-205.

Anexo 1. Lámina ejemplo de las fotografías de los granos de polen para la colección de referencia.



A: *Malva sylvestris*; B: *Geranium rotundifolium*, vista polar; C: *Geranium rotundifolium*, vista ecuatorial; D: *Convolvulus siculus*, vista polar; D: *Convolvulus siculus*, vista ecuatorial; F: *Allium ampeloprasum*, vista polar: G: *Allium ampeloprasum*, vista ecuatorial; H: *Lavatera maritima*. Fotos sacadas con MO.

Anexo 2. Principales fuentes de donde se extrajo la información para las principales características de los granos de polen de cada especie vegetal.

- PalDat. Palynological Database (https://www.paldat.org/search/A)
- PollenAtlas (https://pollenatlas.net/)
- Australasian Pollen and Spore Atlas (http://apsa.anu.edu.au/)
- Red de Catálogos Polínicos online (http://rcpol.org.br/es/pagina-inicial/)
- Punto de Información Aerobiológica (https://lap.uab.cat/aerobiologia/es/pollen)
- The Global Pollen Project (https://globalpollenproject.org/)
- Manual de identificación de los principales tipos de esporas y polen de la atmósfera europea