

Polinización por insectos: Servicio ecosistémico, factores que la afectan, importancia, valoración económica, conservación y restauración y desafíos futuros

Insect Pollination: Ecosystem service, influencing factors, importance, economic valuation, conservation and restoration, and future challenges

Pedro S. Castillo-Carrillo¹; Luis Alberto Bermejo Requena^{2*}

1 Universidad Nacional de Tumbes, Escuela Profesional de Agronomía. Tumbes, Perú.

2 Universidad Nacional de Tumbes, Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente. Tumbes, Perú.

* Autor correspondiente: labermerq@gmail.com (L. A. Bermejo Requena).

ORCID de los autores:

P. S. Castillo Carrillo: <http://orcid.org/0000-0002-0255-1047>

L. A. Bermejo Requena: <http://orcid.org/0000-0001-5294-7034>

RESUMEN

La polinización por insectos representa un servicio ecosistémico esencial para la producción agrícola y la conservación de la biodiversidad vegetal. Este proceso natural, mediado principalmente por abejas y otros insectos, influye directamente en la calidad, cantidad y estabilidad de numerosos cultivos. Sin embargo, múltiples factores como la pérdida de hábitat, el uso de pesticidas, el cambio climático y la contaminación del aire amenazan su eficacia y sostenibilidad. A pesar de su alto valor ecológico y económico, los esfuerzos por conservar y restaurar este servicio enfrentan importantes desafíos, incluyendo la escasa valoración económica de los polinizadores silvestres y la limitada integración de estrategias de conservación en políticas agrarias. Este artículo propone fortalecer la investigación sobre polinizadores no tradicionales, especialmente de hábitos nocturnos, cuya contribución a la polinización ha sido históricamente subestimada. Asimismo, se recomienda impulsar estudios que evalúen el efecto de infraestructuras emergentes como los parques solares en la biodiversidad de polinizadores. Un enfoque interdisciplinario, que integre ecología, economía, agricultura y planificación territorial, será clave para diseñar sistemas agrícolas resilientes, sostenibles y compatibles con la conservación de la biodiversidad. Estudios futuros podrían centrarse en el diseño experimental de paisajes multifuncionales que optimicen simultáneamente la producción agrícola y la salud de las comunidades de polinizadores.

Palabras clave: abejas; biodiversidad; polinización; servicio ecosistémico.

ABSTRACT

Insect pollination represents a vital ecosystem service for agricultural production and the conservation of plant biodiversity. This natural process, primarily mediated by bees and other insects, directly influences the quality, quantity, and stability of numerous crops. However, multiple factors such as habitat loss, pesticide use, climate change, and air pollution threaten its effectiveness and sustainability. Despite its high ecological and economic value, efforts to conserve and restore this service face significant challenges, including the undervaluation of wild pollinators and the limited integration of conservation strategies into agricultural policies. This review proposes strengthening research on non-traditional pollinators, especially nocturnal species, whose role in pollination has historically been underestimated. Likewise, studies assessing the impact of emerging infrastructures—such as solar parks—on pollinator biodiversity are strongly encouraged. An interdisciplinary approach that integrates ecology, economics, agriculture, and land-use planning will be key to designing resilient, sustainable agricultural systems that align with biodiversity conservation. Future studies could focus on the experimental design of multifunctional landscapes that simultaneously optimize crop production and pollinator health.

Keywords: bees; biodiversity; ecosystem service; pollination.

Recibido: 13-03-2025.

Aceptado: 10-09-2025.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INTRODUCCIÓN

La polinización de cultivos por animales polinizadores (como ciertos insectos, aves y mamíferos, son vectores animales que cumplen una función biológica crucial en la mayoría de los ecosistemas terrestres y contribuyen a la variabilidad genética de las plantas) (Caballero et al., 2024), es un importante servicio ecosistémico para el cual, actualmente no existe ningún método de valoración generalmente aceptado (Winfrey et al., 2011), al respecto muchos análisis socio ecológicos se han realizado sobre este tema (Balvanera et al., 2012; Cáceres et al. 2015). Este servicio resulta en un beneficio para los seres humanos, ya que produce recursos esenciales para ellos y contribuye a su bienestar.

Los animales son responsables de la polinización de casi el 90% de las especies de flores silvestres y el 35% de las especies agrícolas a nivel mundial, un valor de mercado enorme (IPBES, 2016). (Tabla 1). Sin embargo, la polinización resulta muy perjudicada, debido a la urbanización, y a medida que se modifican las comunidades de insectos y plantas y sus interacciones (Theodorou et al., 2017). Para muchos cultivos, la producción agrícola se beneficia tanto de la polinización como de los servicios naturales de control de plagas que proporcionan los invertebrados (Tscharrntke et al., 2012; Garibaldi et al., 2013; Isaacs et al., 2017). Los insectos polinizadores son importantes para sustentar entre el 15% y el 30% de la producción mundial de alimentos, con un estimado de 153 mil millones de euros al año a la economía mundial (Gallai et al., 2009).

Los artrópodos que tienen un impacto directo en la producción de cultivos (es decir, plagas, enemigos naturales y polinizadores) pueden verse influenciados tanto por el manejo agrícola local como por el contexto dentro del cual se encuentran los campos en el paisaje más amplio. Sin embargo, las contribuciones y las escalas espaciales en las que estos impulsores operan e interactúan no se comprenden completamente, particularmente en el mundo en desarrollo (Otieno et al., 2011).

En la mayoría de las zonas agrícolas, la polinización se consigue mediante una combinación del trabajo durante la colección de néctar y polen realizado por abejas e insectos silvestres. Muchas publicaciones han intentado valorar la polinización de las abejas, mientras que existen pocos estudios para valorar a los polinizadores silvestres. Aunque las abejas son ampliamente conocidas como polinizadores económicamente valiosos, los estudios han demostrado que las especies de polinizadores silvestres suelen ser abundantes como las abejas en las inflorescencias de los cultivos (Zariman et al., 2022).

Existe un proceso conocido como la termogénesis en las plantas que es la capacidad de elevar su temperatura por encima de la del aire circundante a través de procesos metabólicos, y que se detecta especialmente en los órganos reproductivos. El calentamiento beneficia a las plantas al facilitar la transmisión de olores y compuestos que atraen a

los insectos, facilitando de esta manera la polinización entomófila (Peris et al., 2024).

Tabla 1

Dependencia de la polinización por cultivos

Cultivo	Dependencia de polinización (%)	Valor económico estimado en Millones \$ (USDA)
Tomate	65	3 000
Cacao	70	8 000
Café	80	12 000
Manzana	90	15 000
Almendras	100	5 000

La polinización por insectos desempeña un papel fundamental en el éxito reproductivo de muchas plantas con flores, siendo esencial para mantener la biodiversidad y garantizar la seguridad alimentaria en los agroecosistemas. Las plantas entomófilas dependen de los insectos para la transferencia de polen, lo cual asegura su reproducción. Esta interacción mutualista entre plantas y polinizadores es crucial para la sostenibilidad de los ecosistemas naturales y agrícolas. Aunque las plantas pueden beneficiarse de distintos vectores de polinización, los insectos son los principales contribuyentes a este servicio ecosistémico, al trasladar polen mientras buscan néctar y otras recompensas florales (Tanda, 2024). No obstante, los insectos polinizadores enfrentan múltiples amenazas impulsadas por las actividades humanas, tales como la pérdida de hábitat, el uso intensivo de pesticidas y el cambio climático. A estas presiones se suma la creciente contaminación del aire, cuyo impacto sobre las interacciones planta-polinizador. Investigaciones indican que la contaminación atmosférica podría interferir en las señales químicas y visuales emitidas por las flores, dificultando la localización de los recursos florales por parte de los polinizadores, lo que pone en riesgo este proceso vital para los ecosistemas y la producción de alimentos (Duque & Steffan-Dewenter, 2024).

La polinización como servicio ecosistémico es económica, social y ambientalmente irremplazable, tiene importantes repercusiones en el mantenimiento de los ecosistemas y la producción de alimentos (Guimareis et al. 2024). Por tanto, es fundamental mejorar la rentabilidad de la apicultura actividades que se llevan a cabo principalmente en zonas rurales (Fekéténe et al., 2023). Es uno de los servicios ecosistémicos de regulación más cruciales, ya que la mayoría de las especies vegetales dependen de la polinización llevada a cabo por los animales (Potts et al., 2010; Potts et al., 2016; Pan et al., 2022). Los animales que visitan las flores son responsables de polinizar más del 70% de los principales cultivos alimentarios del mundo, lo cual equivale al 35% de la producción global (Holzschuh et al., 2012). Los grupos de polinizadores importantes incluyen insectos, como abejas, mariposas, polillas, moscas, avispas, escarabajos y trips, y vertebrados, como aves, murciélagos, pequeños reptiles y otros mamíferos (Potts et al., 2016; Pires & Maus, 2020).

SERVICIO ECOSISTÉMICO DE LA POLINIZACIÓN

La agricultura moderna de cultivos comerciales se basa cada vez más en polinizadores gestionados, como la introducción de colonias de abejas en huertos o campos para aumentar la producción, y depende menos de especies silvestres de insectos que habitan en los bordes de los campos de cultivo (Richards, 2001). La siembra de flora autóctona o nativa es una estrategia de conservación popular para los polinizadores. Al buscar plantas nativas, los polinizadores pueden encontrar cultivares de plantas nativas, que pueden tener diferentes rasgos fenotípicos que las plantas que se encuentran en poblaciones silvestres (Hayes et al., 2025).

La polinización se ha analizado de manera independiente, aunque sus efectos en la producción de semillas podrían depender e interactuar con otros servicios esenciales para la producción agrícola (Lundin et al., 2013). A menudo, la gestión del servicio de polinización implica la introducción de colmenas de abejas en los sistemas de producción (Rollin & Garibaldi, 2019). Los insectos, especialmente las abejas, contribuyen entre el 5% y el 40% del total de la polinización cruzada (McGregor, 2002). Normalmente, los productores inundan los cultivos con abejas, sin prestar atención a los polinizadores silvestres (DeVetter et al., 2022), o dan poca consideración a cómo el paisaje circundante interactúa con la gestión agrícola e impactan en el suministro de servicios de polinización (Garibaldi et al., 2017). Además, debido a que la relación entre el enfoque centrado en los polinizadores (por ejemplo, diversidad, abundancia o tasa de visitas) y métricas centradas en las plantas (por ejemplo, cuajado de semillas y frutos, calidad o rendimiento del fruto) pueden variar sustancialmente (Bartholomée & Lavorel, 2019).

La contribución de los polinizadores para determinar la métrica de producción puede no ser generalizable a las demás, ya que no todas las métricas de producción son de igual relevancia para los productores, es esencial comprender cómo los servicios de polinización influyen y contribuyen a los diferentes aspectos de la producción. Tal comprensión requiere un enfoque sistémico para investigar cómo el paisaje y la gestión agrícola afectan la abundancia de polinizadores (Tscharntke et al., 2012), lo que afectará las tasas de visita de flores (Garibaldi et al., 2013), deposición de polen a nivel de campo (Shaw et al., 2020) y, en última instancia, los diferentes aspectos de la producción de los cultivos (Garibaldi et al., 2019).

Cuando los servicios de polinización se definen como transferencia de polen, por ejemplo, las métricas incluyen la tasa de visita de polinizadores silvestres y la cantidad de granos de polen depositados (componente ecológico), el área de cultivos dependientes de polinizadores (componente de cobertura terrestre), y el costo de manejo de colmenas para reemplazar polinizadores silvestres (componente de valoración) (Liss et al., 2013). Los insectos polinizadores, como las abejas, las mariposas, los sírfidos, las polillas y otros grupos, desempeñan un papel importante en la polinización de los cultivos y la seguridad alimen-

taria, pero también proporcionan un conjunto de servicios beneficiosos adicionales para la sociedad humana (por ejemplo, contribuir a los medios de vida de los agricultores y apoyar los valores sociales y culturales) y ecosistemas más amplios, por ejemplo, mantener poblaciones silvestres de plantas que sustentan el funcionamiento de los ecosistemas (Potts et al., 2016). Las evaluaciones existentes de la polinización como servicio ecosistémico han sido en gran medida restringidas, a los insectos diurnos, con especial atención a los recolectores generalistas, como las abejas silvestres y melíferas.

A medida que se ha venido conociendo cómo funcionan los sistemas planta-polinizadores, su relevancia para la seguridad alimentaria y la biodiversidad, y la fragilidad de estas interacciones mutuamente beneficiosas se ha ido incrementando. Sin embargo, actualmente la atención se está desviando hacia otros grupos de polinizadores menos estudiados como son los de hábitos nocturnos (MacGregor & Scott-Brown, 2020). Podría decirse que la polinización nocturna es una de las facetas más intrigantes de esta disciplina, pero sigue siendo poco explorada.

Esto es sorprendente ya que las plantas requieren adaptaciones sofisticadas para garantizar que las señales florales sean detectables por los vectores de polen nocturnos (Fenske et al., 2015). Existen numerosos beneficios para el funcionamiento nocturno de ambos organismos socios. Por ejemplo, los polinizadores pueden alimentarse con relativa seguridad en ausencia de depredadores diurnos, evitando al mismo tiempo la competencia directa de la mayoría de las abejas por el polen y el néctar (Hegland et al., 2009). Las plantas asociadas pueden reducir su visibilidad ante los antagonistas que buscan alimento, al tiempo que aumentan la eficiencia de la polinización y/o reducen el riesgo de interferencia heteroespecífica del polen (dado que los polinizadores diurnos generalistas, por ejemplo, las abejas, pueden visitar otras plantas con flores simpátricas a lo largo de su vida) (Brosi, 2016; Miyake & Yahara, 1998). Además, trabajos recientes sugieren que muchas flores generalistas son visitadas tanto durante la noche como durante el día (Knop et al., 2018).

A pesar de estos hechos, los polinizadores nocturnos han sido estudiados con menos frecuencia, por lo que el servicio ecosistémico de la polinización puede estar infravalorado (MacGregor & Scott-Brown, 2020), en gran parte debido a obstáculos prácticos para el uso de metodologías de campo estándar para realizar las evaluaciones del servicio ecosistémico de la polinización durante la noche. (MacGregor et al., 2015). Entre los polinizadores nocturnos, además de algunos murciélagos (Chiroptera), escarabajos (Coleoptera) y moscas (Diptera), las polillas son importantes polinizadores nocturnos (Willmer, 2011); en particular, especies nectarívoras de las familias Sphingidae, Noctuidae y Geometridae (Winfree et al., 2011). y probablemente también las recién definidas Erebidae (LeCroy et al., 2013).

La importancia de la polinización por insectos para

la agricultura es indiscutible. No obstante, sigue siendo debatido si este servicio es proporcionado principalmente por polinizadores silvestres (un servicio ecosistémico genuino), o por polinizadores gestionados (un servicio comercial), y cuál de estos necesita acción inmediata debido a los informes sobre la disminución de polinizadores. Si se utiliza la polinización de cultivos para promover la conservación de la biodiversidad, es crucial distinguir claramente entre los valores de los servicios de polinización gestionada y silvestre. Los métodos actuales subestiman o sobreestiman el valor del servicio de polinización y hacen, uso de factores generales criticados de dependencia de insectos y polinizadores manejados. Las estimaciones de valor de los bienes y servicios de los ecosistemas son útiles para justificar la asignación de recursos para la conservación, pero las estimaciones no concluyentes corren el riesgo de que las asignaciones de recursos sean insostenibles (Allsopp et al., 2008).

La abeja es considerada como el polinizador comercial más importante (Figura 1 a), y aunque también se utilizan otras especies de abejas para la polinización comercial (abejas alcalinas (*Nomia*). (Figura 1 b); abejas albañiles (*Osmia*). Figura 1 c); abejas cortadoras de hojas (*Megachile*). (Figura 1 d); abejorros (*Bombus*). (Figura 1 e), al menos el 90% lo realizan las abejas (Mc. Gregor, 1976; Free, 1993; Richards, 1993; Richards, 2001).

Las abejas son polinizadores generalistas excepcionales, y el valor más significativo derivado de la apicultura comercial a nivel mundial es la polinización comercial (Morse & Calderone, 2000; Richards, 2001). El manejo de polinizadores solitarios, como *Osmia* spp., han demostrado ser una estrategia eficaz para mejorar la productividad en cultivos específicos. Por ejemplo, Bosch et al. (2021). analizaron el uso de abejas solitarias manejadas para la polinización de almendros (*Prunus dulcis*), logrando un aumento significativo

en el cuajado de frutos y la sostenibilidad poblacional de estas especies. Este enfoque resalta el potencial de diversificar los polinizadores manejados, no limitándose únicamente a la abeja melífera (*A. mellifera*), para optimizar los servicios ecosistémicos en cultivos agrícolas clave."

El "valor" de la polinización gestionada por las abejas se ha utilizado para justificar los programas de sostenimiento de los precios de la miel (Robinson et al., 1989); financiación de programas de investigación y extensión en abejas (Richards, 1993; Cook et al., 2007); de malezas invasoras como forraje necesario para las abejas (Gill, 1985; Allsopp & Cherry, 2004); y para la preservación de vegetación autóctona (Turpie et al., 2003). El servicio ecosistémico de polinización forma parte de un caso a favor de la conservación de la biodiversidad natural. En lo global, la crisis de los polinizadores se ha convertido en una causa célebre para los interesados, por las consecuencias ambientales de la agricultura moderna (Buchmann & Nabhan, 1996; Allen-Wardell et al., 1998; Tilman et al., 2002; Burgett et al., 2004; Klein et al., 2007; Kremen et al., 2007), que dio origen a la Iniciativa Internacional sobre Polinizadores, la cual fue aprobada como un programa del Convenio sobre la Diversidad Biológica. Las premisas fundamentales de la iniciativa son: primero, que la seguridad alimentaria mundial está amenazada por la disminución de la producción gestionada por las abejas melíferas y la pérdida de polinizadores silvestres (Guimareis, 2024); y segundo, que la agricultura sostenible necesita el desarrollo de alternativas como los polinizadores no *Apis*, la mejora en la gestión del hábitat para las especies silvestres polinizadoras y mejores prácticas generales de gestión agrícola (Richards, 1993; Tilman et al., 2002). La polinización por insectos es indispensable para la producción mundial de alimentos, y se considera un servicio ecosistémico fundamental (Miñarro et al., 2018.).

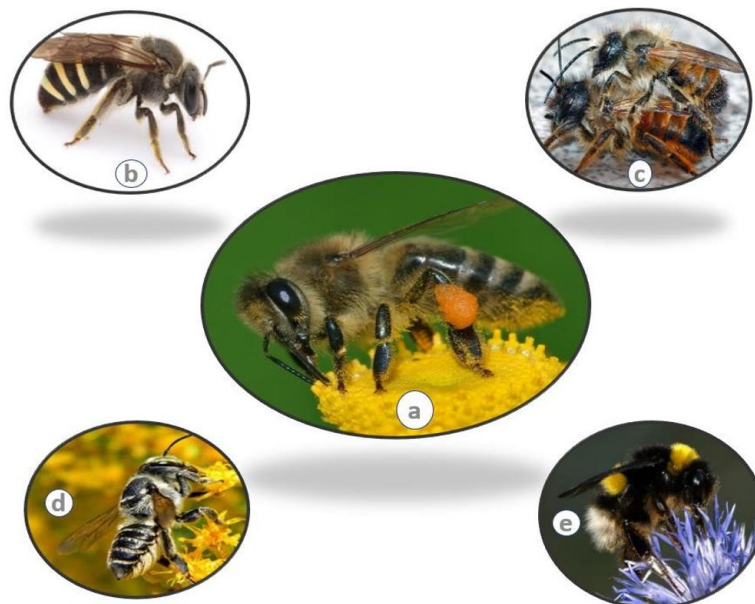


Figura 1. a). abeja común *Apis mellifera* (Crédito. Andreas Trepte), (b). *Nomia* sp. (Crédito. Museum of the Earth), (c). *Osmia rufa* (Crédito. André Karwath), (d). *Megachile* sp. (Crédito. Bob Peterson), (e). *Bombus terrestris* (Crédito. Ferran Turmo Gort).

FACTORES QUE AFECTAN LA POLINIZACIÓN

La estricta interconexión entre la distribución de los polinizadores y la conservación de las plantas es particularmente evidente dada la actual disminución global de los polinizadores (Nicolson & Wright, 2017), con la conservación de las poblaciones de plantas amenazadas por las extinciones locales de especies de polinizadores (Kaiser-Bunbury et al., 2010). La complejidad intrínseca de los sistemas del mundo real hace que sea particularmente difícil descifrar qué factores influyen en la dispersión de los polinizadores en la matriz del paisaje y su distribución entre parches de hábitat adecuados (Favarin et al., 2022). Los remanentes de vegetación nativa dentro de los paisajes agrícolas juegan un papel crucial en el apoyo a la biodiversidad y a los servicios ecosistémicos, como la polinización; sin embargo, sus beneficios no siempre son reconocidos por los agricultores (Amato & Petit, 2025).

Cao et al. (2020) investigaron la expresión de género, la fenología de la floración, el rendimiento reproductivo y los factores que afectan el cuajado (es decir, la sincronía de la floración, el tamaño y la distancia al donante de polen más cercano) en una población de *Juglans regia* (Juglandaceae). heterodicozámica autocompatible y polinizada por el viento. El cuajado dependió del tamaño de la planta sólo para las formas protándricas. El cuajado de frutos de plantas individuales disminuyó al aumentar la distancia al donante de polen más cercano, independientemente de la forma, posiblemente debido a la limitación del polen, pero aumentó con la sincronía de floración, lo que indica que la sincronía de floración podría afectar el éxito reproductivo.

Burd & Allen (1988) indican que, en especies polinizadas por el viento, la asignación relativa a la función masculina puede incrementarse, al aumentar el tamaño y la altura de la planta porque se espera que la dispersión del polen sea más efectiva en plantas más grandes a medida que el polen viaja más lejos, incrementando así oportunidades de la polinización. Esta hipótesis ha sido apoyada por algunos estudios experimentales (Fox, 1993; Friedman & Barrett, 2011).

Antiqueira et al. (2020) señalan que tanto los factores bióticos como abióticos pueden alterar de forma individual o interactiva las interacciones entre plantas y polinizadores, influyendo en la respuesta de la planta. Los autores indican que las variaciones en la temperatura y las precipitaciones modifican el impacto general de los depredadores en estas interacciones, así mismo reportan que, pocos estudios empíricos han evaluado si estas condiciones climáticas influyen en los comportamientos anti depredadores y cómo esta respuesta dependiente del contexto puede repercutir en la respuesta de las plantas. El riesgo de depredación reduce las visitas de polinizadores y altera la riqueza, y composición de las especies de polinizadores. Además, el aumento de las precipitaciones se asocia con una menor visita de flores y riqueza de polinizadores, pero no altera la composición de especies de polinizadores. Sin embargo, la temperatura máxima diaria no afecta

ningún componente del conjunto de polinizadores ni la aptitud de las plantas.

Las interacciones entre polinizadores concurrentes y enemigos naturales pueden resultar en efectos positivos, negativos o neutrales en la prestación de servicios ecosistémicos dependiendo de los factores subyacentes (Garibaldi et al., 2018; Jeavons et al., 2023). Las interacciones positivas (sinérgicas). pueden aumentar la productividad de las plantas, con enemigos naturales que benefician indirectamente a los polinizadores al controlar las plagas, contribuyendo a mayores recompensas por visitas y disponibilidad de flores, especialmente cuando se trata de plagas que infestan flores (Lundin et al., 2013; Sutter & Albrecht, 2016). Una mayor actividad de los polinizadores puede, a su vez, mejorar la diversidad floral, beneficiando enemigos naturales (Albrecht et al., 2012). Las interacciones negativas (antagonistas) indican una eficacia reducida de polinizadores cuando la actividad de control de plagas es alta, o viceversa, y a menudo ocurre por ejemplo competencia debido a la falta de recursos (Lindstrom et al., 2016). Algunos estudios informan de la disminución de la abundancia de parasitoides (Campbell et al., 2012) o del sírfido depredador (Jeavons et al., 2020) en presencia de alta actividad de abejas, mientras que otros perciben una reducción de la visita de abejas en presencia de depredadores generalistas, como insectos depredadores (Greco & Kevan, 1995) y hormigas (Sinu et al., 2017). Los efectos de interacción neutral pueden implicar independencia (relación aditiva). entre gremios o que solo un gremio contribuye principalmente a la productividad de la planta (Gagic et al., 2019).

Ha sido demostrado que las comunidades de insectos asociadas a la agricultura ya sean polinizadoras, enemigos naturales o especies de plagas, se ven afectadas tanto por las prácticas de manejo locales como por el contexto de la granja en el paisaje más amplio, el término “contexto paisajístico” se utiliza para referirse a la cobertura y el uso del suelo que rodean un determinado lugar (Bianchi et al., 2006, Ricketts et al., 2008). El impacto de las prácticas de gestión local, como la aplicación de pesticidas, la aplicación de fertilizantes y la labranza, sobre los invertebrados ha sido bien documentado para muchos sistemas agrícolas (Kevan, 1999; Thompson, 2001; El Hassani et al., 2005; Brittain et al., 2010).

Tabla 2
Factores que afectan la polinización (Figura 2)

Factor	Impacto en la polinización
Temperatura	Altas temperaturas reducen visitas
Humedad	Exceso de humedad dificulta manejo de polen
Velocidad del viento	Vientos fuertes dificultan aterrizajes
Precipitaciones	Lluvias intensas disminuyen actividad
Depredadores	Depredadores reducen visitas

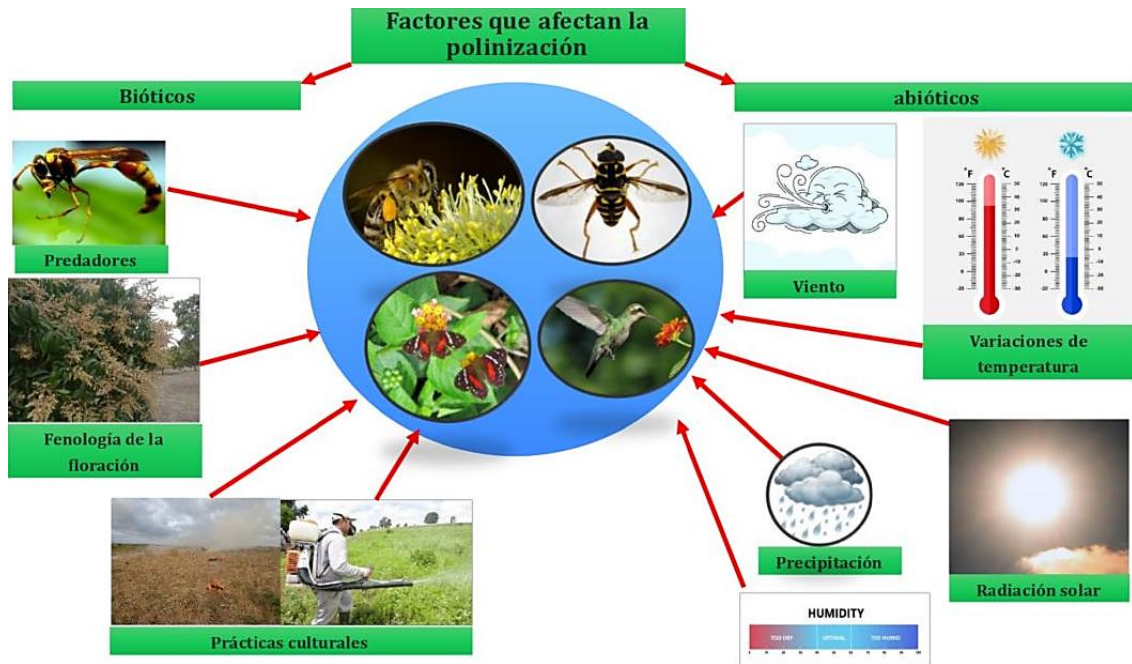


Figura 2. Factores que afectan la polinización: Créditos Fotos: *Apis mellifera* (PublicDomain Pictures), picaflor (Gustavo Fernando Duran), variaciones de T° (123RF), viento (Freepik), precipitación (DeConceptos.com), humedad (Jackson & Sons), prácticas culturales (El Productor).

Es probable que los factores abióticos más significativos que influyen en la actividad de alimentación de las abejas sean las condiciones ambientales (Gouw & Gimenes, 2013; Polatto et al., 2014), particularmente la temperatura, la humedad y radiación solar (De Oliveira et al., 2012; Reddy et al., 2015; Clarke & Robert, 2018; Soares et al., 2019), así como la velocidad del viento (Vicens & Bosch, 2000; Hilário et al., 2007; Reddy et al., 2015). Además, el impacto de estas condiciones en la conducta de búsqueda de alimento por parte de las abejas parece depender también de las características y biología de las propias abejas (Kaluza, 2017). La temperatura puede restringir la capacidad de vuelo de las abejas. A temperaturas muy bajas, los músculos voladores no funcionan (Heinrich, 1993), mientras que las altas temperaturas pueden causar deshidratación y sobrecalentamiento letal (Pereboom & Biesmeijer, 2003; Polatto et al., 2014), o puede evitar que las abejas salgan del nido, especialmente en el caso de las abejas sociales que frecuentemente permanecen en el interior para ventilar el nido (Michener, 1974). La radiación solar también juega un papel crucial en la búsqueda de alimento de las abejas, porque las abejas necesitan poder evitar obstáculos y encontrar sus objetivos florales en el medio ambiente (Baird, 2020; Baird et al., 2020). Así, algunas abejas tienen un umbral de luz mínimo para la búsqueda de alimento que depende de las características de las abejas, especialmente en el tamaño de sus ojos y ocelos (Spaethe & Briscoe, 2005; Kelber et al., 2006; Warrant et al., 2006; Warrant, 2008; Ribí & Warrant, 2020). Mientras que algunas especies de abejas de los géneros *Ptiloglossa*, *Megalopta* y algunas *Xylocopa* pueden alimentarse con condiciones de muy poca luz, como temprano en la mañana o al anochecer

(Kerfoot, 1967; Willmer & Stone 2004; Greiner et al., 2007; Frederiksen et al., 2008; Somanathan et al., 2009; Berry et al., 2011; Cordeiro et al., 2017; Araujo et al., 2024), pero la mayoría de las abejas concentran su búsqueda de alimento durante los lapsos con abundante luz (Heard & Hendrikz, 1993; Willmer & Stone 2004; Gouw & Gimenes, 2013).

Se ha sugerido que la humedad puede cambiar patrones de alimentación en algunas abejas, como *A. mellifera* (Alves et al., 2015), abejas Megachilidae (Abrol, 1998), y algunas abejas sin aguijón, como *Plebeia* (Kleinert-Giovannini, 1982; Hilário et al., 2001), *Tetragonisca* (Iwama, 1977), *Trigona* (Contrera et al., 2004; Soares et al., 2019), *Geotrigona* (Gobatto & Knoll, 2013), *Lepidotrigona* (Sung et al., 2011; Engel & Rasmussen, 2017), y *Melipona* (Guibu & Imperatriz-Fonseca, 1984; Hilário et al., 2000; Fidalgo & Kleinert, 2007; Tomé et al., 2015). En algunos de estos casos, el comportamiento de búsqueda de alimento tendía a ser inversamente proporcional a la humedad relativa. Por lo tanto, la humedad relativa puede tener un efecto sustancial en el comportamiento de las abejas. Por ejemplo, la falta de humedad puede llevar a que las abejas se deshidraten (Polatto et al., 2014), mientras que un exceso de humedad puede dificultar la habilidad de las abejas para manejar y almacenar el polen recolectado (Corbet, 1990).

Los cambios en el clima y las condiciones meteorológicas pueden afectar las relaciones entre las plantas y sus polinizadores al modificar las características de las plantas e influir en la composición de la comunidad y en el comportamiento de los insectos que visitan las flores (Bale et al., 2002; Burkle et al., 2013; Forrest, 2015). También pueden influir indirectamente en estas interacciones al alterar

los vínculos clave de la red alimentaria, dentro de las comunidades, como la capacidad de los depredadores que son habitantes de las flores, para capturar eficazmente visitantes florales (Laws, 2017). Las temperaturas más cálidas y el aumento de la intensidad de las precipitaciones pueden afectar la diversidad de polinizadores al reducir la riqueza de especies alterando la composición de la comunidad (Hegland et al., 2009). Ellos también pueden afectar el comportamiento de los visitantes florales al disminuir la frecuencia de las visitas florales (Sanderson et al. 2015). Asimismo, las condiciones de temperatura y precipitación pueden modificar las características atractivas de las flores, como la calidad y cantidad de néctar disponible (Whitney et al., 2008; Herrera & Medrano, 2017), lo cual tiene repercusiones directas en la selección de polinizadores (Rands & Whitney, 2008; Norgate et al., 2010; Nicolson & human, 2013). Sin embargo, el grado en que los organismos se ven afectados por la variación en las condiciones climáticas puede ser específico de cada especie (Pereboom & Biesmeijer, 2003), fortaleciendo o debilitando sus interacciones con otras especies de la comunidad. (Schweiger et al., 2010; Van der Putten et al., 2010). Las altas velocidades del viento pueden obligar a las abejas a invertir grandes cantidades de energía en estabilizar y contrarrestar las ráfagas de viento durante el vuelo (Combes & Dudley, 2009; Goodwin et al., 2011). y dificultan el aterrizaje de las abejas en las flores para buscar alimento (Chang et al., 2016).

Trani et al. (2022), analizaron el efecto de las condiciones ambientales sobre el comportamiento de las abejas que visitan flores de cultivos de sandía en Panamá, determinaron que las condiciones ambientales afectaron a grupos de abejas de manera diferente y que la proporción

de visitas de las abejas melíferas fue notablemente mayor a bajas temperaturas, radiación solar, velocidad del viento y alta humedad relativa, temprano en la mañana, cuando realizaron alrededor del 90% de sus visitas florales. Las abejas observadas mostraron un comportamiento más homogéneo durante el día, con picos que representan alrededor del 25% - 35% del tiempo diario. El número de visitas mostró una correlación con la temperatura para todas las abejas más comunes excepto *Augochloropsis* spp., con radiación solar para *A. mellifera* y *Lasioglossum* spp., con humedad para todos excepto *Lasioglossum* spp., y con velocidad del viento para todas las abejas analizadas. La duración de las visitas fue notablemente más larga en *Nannotrigona perilampoides* al principio del día. Las condiciones ambientales ejercieron un impacto significativo en cómo las abejas buscan alimento, ya que cada grupo de abejas concentra sus actividades en condiciones favorables según su biología, estableciendo así patrones diarios distintivos de alimentación.

El crecimiento rápido de las áreas urbanizadas representa una de las mayores amenazas para la biodiversidad urbana y los servicios ecosistémicos proporcionados principalmente por los polinizadores. La polinización es más impactada en entornos urbanos, principalmente debido a la reducción de áreas verdes urbanas y otros efectos derivados del proceso de urbanización. (Llodrà-Llabrés & Cariñanos, 2022).

Es ampliamente reconocido que los pesticidas, frecuentemente utilizados en la agricultura convencional, tienen un efecto ecológico negativo en los ecosistemas. Este impacto se extiende a los insectos polinizadores, como las abejas, y ha sido investigado y documentado por varios investigadores (Pantoja et al., 2014).

IMPORTANCIA DE LOS POLINIZADORES

En el año 2000, la Convención sobre la Diversidad Biológica destacó la importancia de los polinizadores y estableció una iniciativa internacional para su conservación y uso sostenible. La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). desarrolló el Plan de Acción Global sobre Servicios de Polinización para una Agricultura Sostenible, diseñado como una guía para los países miembros. Este plan proporciona herramientas para utilizar y conservar los servicios de polinización, además de apoyar la formulación de políticas que garanticen su sostenibilidad en los ecosistemas (Pantoja et al., 2014).

Las abejas son polinizadores esenciales y comprender su capacidad para hacer frente a temperaturas extremas producidas por los cambios climáticos son cruciales para poder predecir su resiliencia al cambio climático (González et al., 2024). Los insectos polinizadores y los enemigos naturales son grupos importantes de invertebrados artrópodos que contribuyen significativamente a la producción de cultivos mediante la polinización y regulación natural de

los insectos plagas (Otieno et al. 2011). La polinización y el control biológico de plagas por parte de insectos son servicios ecosistémicos cruciales para la agricultura. El uso de la tierra y las interacciones entre los polinizadores y los enemigos naturales (que proporcionan control natural de plagas). afectan directamente sus actividades, según investigaciones recientes (Shapira et al., 2023).

Los abejorros, al igual que la mayoría de las abejas (excluyendo parásitos y cleptoparásitos), desempeñan un papel crucial en la polinización de plantas nativas. Recientemente, han ganado importancia económica debido a que especies como *Bombus impatiens* o *B. terrestris* se utilizan comercialmente como polinizadores controlados en invernaderos, lo que ha llevado a la introducción de algunas especies en diferentes partes del mundo (Torres-Ruiz et al., 2013). Los euglosinos (Figura 3 a). también se han utilizado como indicadores biológicos para evaluar la salud de los cultivos orgánicos de café en Costa Rica, donde se encontró que la evaluación es más efectiva durante la estación lluviosa. Se determinó

que las huertas orgánicas de café tienen una mayor diversidad y abundancia de euglosinos en comparación con las convencionales, que utilizan agroquímicos (Hedström et al., 2006). En México, mediante el estudio de abejas y otros polinizadores, se observó que los cultivos de café rústicos o tradicionales (que utilizan sombra de varias especies de plantas o de la selva) albergan una mayor diversidad y riqueza de especies que los cultivos especializados (con una sola especie de planta como sombra o sin sombra). Además, se encontró una relación positiva entre la producción de frutos y la diversidad de especies de polinizadores (Vergara & Badano, 2009).

Kevan et al. (1986) han revisado estudios centrados en la polinización de la palma aceitera en Malasia, donde se ha utilizado la especie introducida de Camerún *Elaeidobius kamerunicus*, un escarabajo picudo de la familia Curculionidae (Figura 3 b). La polinización del chirimoyo (*Annona cherimola* Miller) es crucial para este cultivo debido a su condición de dicogamia protogínica. Los insectos silvestres, especialmente los coleópteros, son los principales polinizadores del chirimoyo (Urbina et al., 2021). En Chile, López & Rojas (1992) identifican a *Carpophilus hemipterus* (L.) (Coleoptera: Nitidulidae) (Figura 3 c) como uno de los insectos visitantes de las flores de chirimoyo, aunque su presencia es relativamente baja. Posteriormente, López & Uquilla (1997) realizaron estudios de polinización bajo condiciones controladas en Chile, concluyendo que *C. hemipterus* fue efectivo en la transferencia de polen entre flores de chirimoyo en condiciones de confinamiento, resultando en una mayor producción de frutos en comparación con la ausencia de estos insectos. En comparación con la polinización manual, que es el método comercial utilizado en chirimoyos, el efecto polinizador de *C. hemipterus* fue casi tan eficiente, aunque dependiente del número de insectos confinados, obteniendo resultados prometedores con una mayor población utilizada. En tres huertos comerciales ubicados en la comuna de Quillota, Región de Valparaíso, en el centro de Chile, que son manejados con poda baja y cubierta

de herbáceas, se observaron adultos del género *Melanophthalma* Motschulsky (Coleoptera: Latridiidae) dentro de las flores de chirimoyo. Varios de estos individuos llevaban polen de la planta adherido a diversas partes de su cuerpo, sugiriendo que especies de este género podrían actuar como polinizadores potenciales del cultivo de chirimoyo en la región central de Chile (Urbina et al., 2021).

Según la FAO (2008) y Gaibor (2018), 90% del cultivo de cacao requiere una polinización adecuada y esta es básicamente entomófila, debido al tamaño, disposición del perianto y la condición de incompatibilidad. Por tanto, la existencia y actividad de los polinizadores, especialmente de la familia Ceratopogonidae del orden Diptera, son cruciales. En su mayoría, se trata de especies del género *Forcipomyia* (Glendinning 1972; Winder 1977) (Figura 3 d), cuya ecología y comportamiento fueron ampliamente estudiados en Ghana, África Occidental, por Kaufmann (1975). Estas diminutas moscas recolectan granos de polen en los pelos de su tórax mientras buscan néctar en las flores de cacao. Durante sus visitas a las flores, al frotar sus cuerpos cubiertos de polen contra el estilo, facilitan la polinización, la fertilización y la formación de frutos (Kauffman, 1975; Córdoba et al., 2013).

Más del 85% de las especies de plantas con flores conocidas dependen en alguna medida de la polinización por animales (Ollerton et al., 2011). Los insectos forrajeros móviles son los principales responsables de esta actividad (Kremen et al., 2007). La polinización realizada por insectos mantiene la diversidad genética en las poblaciones de plantas (Kearns et al., 1998), y ofrece beneficios como una mayor calidad y cantidad de frutos, así como una mejor producción de semillas y fertilidad, lo cual resulta en un mayor vigor para la siguiente generación (Albrecht et al., 2012). Por tanto, desde un punto de vista ecológico, la polinización por insectos es esencial para mantener poblaciones de plantas silvestres diversas y saludables, lo que a su vez sustenta las redes tróficas (Mommott, 1999).

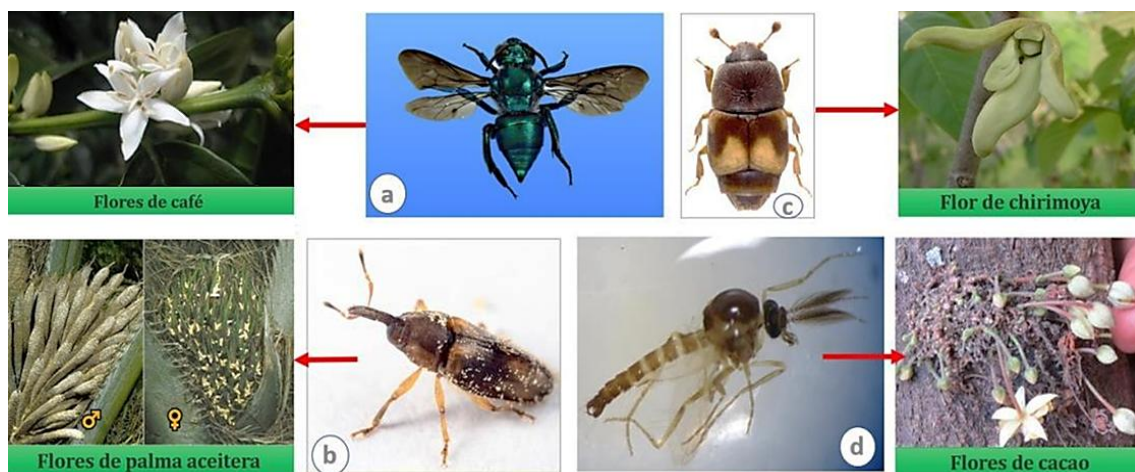


Figura 3. Polinizadores de cultivos importantes: (a). Euglosinae, flores de café (Crédito. Mamá Same), (b). *Elaeidobius kamerunicus* (Crédito. Jungle Dragon), flores de palma aceitera (adaptada de Labarca & Narváez, 2009), (c). *Carpophilus hemipterus* (Crédito. Pinture Insect), flor de Chirimoya (Crédito. Marcelo RosaMelo), (d). *Forcipomyia* sp. (macho), flores de cacao.

VALORIZACIÓN ECONÓMICA DE LA POLINIZACIÓN

La valoración económica de los servicios de polinización es crucial para comprender su impacto en la agricultura, la seguridad alimentaria y la salud de los ecosistemas, ya que los polinizadores, especialmente las abejas, desempeñan un papel fundamental en la mejora del rendimiento y la calidad de numerosos cultivos, lo que se traduce en beneficios económicos sustanciales (Klein et al., 2007). La polinización por insectos, como servicio ecosistémico crítico, contribuye de manera significativa a la productividad agrícola y al valor económico global, y su valorización económica implica cuantificar los beneficios monetarios derivados de este servicio natural, esencial para el crecimiento de muchos cultivos (Gallai et al., 2009; Potts et al., 2016). El valor de los polinizadores silvestres y/o gestionados en el ámbito comercial de la producción agrícola se ha estimado en muchos países utilizando diferentes métodos:

Método del precio de mercado: Este enfoque utiliza los precios de mercado de los cultivos que requieren polinización para estimar su contribución económica. Tiene en cuenta tanto el valor directo de mercado de los cultivos como los beneficios indirectos que proporcionan los polinizadores (FAO, 2008)

Modelos bioeconómicos: Estos modelos evalúan la relación entre el rendimiento de los cultivos y la actividad de los polinizadores considerando factores como la cantidad total de producción de cultivos y los precios de mercado. El valor económico debido

a los insectos polinizadores se puede derivar multiplicando el valor total del cultivo por la relación de dependencia de los polinizadores. (Bartomeus et al., 2004; Hanley et al., 2015)

Enfoque de la Función de Producción: Este método evalúa cómo los cambios en las poblaciones de polinizadores afectan el rendimiento de los cultivos y, posteriormente, calcula el impacto económico en función de estos cambios en el rendimiento. Requiere datos ecológicos detallados para establecer relaciones entre la actividad de los polinizadores y la producción de los cultivos. (Hanley et al., 2015).

Métodos basados en costos: Evalúan los costos asociados con la prestación de servicios alternativos de polinización (por ejemplo, abejas manejadas), o los costos incurridos debido a la disminución de las poblaciones de polinizadores silvestres (Drummond & Hoshide, 2024).

Valoración de mercado y no de mercado: Mientras que la valoración de mercado se centra en los impactos económicos directos (por ejemplo, aumento de los rendimientos), los métodos de valoración no de mercado tienen como objetivo capturar beneficios ecológicos más amplios y bienes públicos asociados con los servicios de polinización. Estos métodos aún están en desarrollo, pero son cruciales para la contabilidad integral de los ecosistemas (Hanley et al., 2015; Khalifa et al., 2021).

BENEFICIOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES DE LA POLINIZACIÓN

La polinización es uno de los servicios ecosistémicos más valiosos, no solo por su contribución a la biodiversidad, sino también por su impacto económico directo en la agricultura. Según Gallai et al. (2009), los insectos polinizadores son responsables de un valor estimado de 153 mil millones de euros anuales a nivel mundial, lo que representa aproximadamente el 9,5% del valor total de la producción agrícola. Este servicio ecosistémico es particularmente relevante en cultivos de alto valor económico, como el cacao, el café y las almendras, que dependen en gran medida de la actividad de los polinizadores para maximizar su producción y calidad.

El manejo de abejas nativas para la polinización ha demostrado ser una estrategia rentable y sostenible en cultivos comerciales de alto valor como los almendros. Koh et al. (2018) evaluaron la ecología y economía del uso de abejas nativas manejadas, destacando su eficacia para aumentar la productividad mientras se minimizan los costos en comparación con el uso exclusivo de *A. mellifera*.

Es importante diversificar los polinizadores manejados para garantizar la sostenibilidad económica y ambiental en sistemas agrícolas modernos. Además de las abejas melíferas, las abejas silvestres juegan un papel crucial en la mejora de la calidad y el tamaño de los frutos. Por

ejemplo, MacInnis & Forrest (2019) demostraron que la polinización por abejas silvestres produce fresas más grandes y de mayor calidad en comparación con las polinizadas por abejas melíferas. Este hallazgo refuerza la importancia de conservar los hábitats naturales y diversificar las fuentes de polinización para optimizar la producción agrícola."

La dependencia de los polinizadores no solo varía entre cultivos, sino también entre regiones, donde factores como las condiciones ambientales y las prácticas agrícolas influyen en la eficiencia del servicio de polinización. Estudios como los de Klein et al. (2007) y Lautenbach et al. (2012) han destacado que la pérdida de polinizadores podría tener consecuencias catastróficas en la seguridad alimentaria y en las economías locales, especialmente en países en desarrollo. En la Figura 4 se presenta una comparación del valor económico estimado de cultivos clave dependientes de la polinización. Esta información ilustra claramente la importancia de este servicio ecosistémico en la sostenibilidad de los sistemas agrícolas modernos. El impacto económico de la polinización varía significativamente según la región. Por ejemplo, las regiones con agricultura intensiva y cultivos de alto valor tienden a ver mayores beneficios de los servicios de polinización.

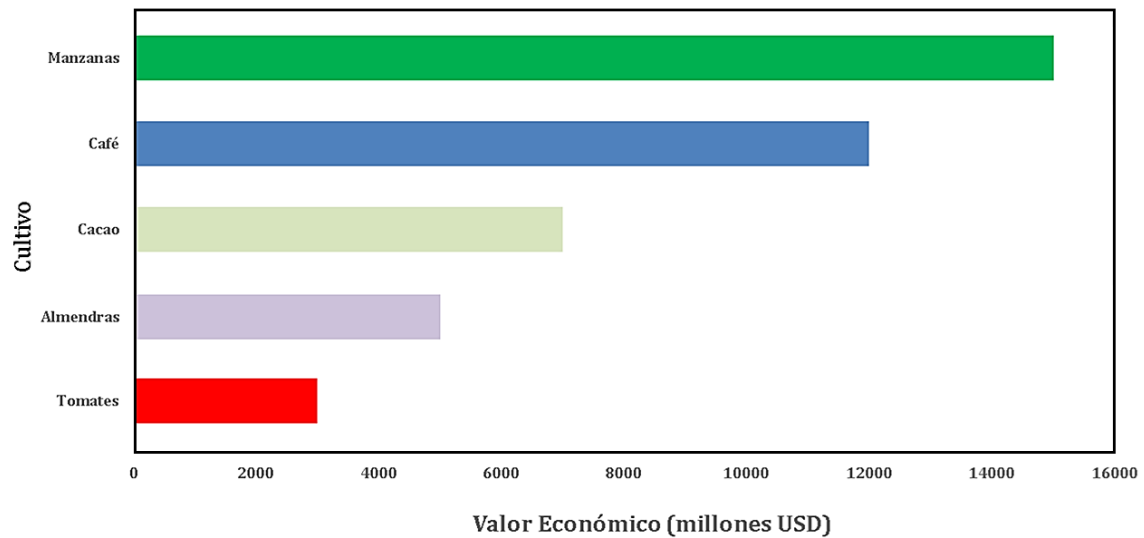


Figura 4. Valor económico de cultivos dependientes de la polinización.

En el Mediterráneo y partes de Asia, las contribuciones económicas de los polinizadores pueden ser particularmente pronunciadas (Khalifa et al., 2021). Un estudio de caso en Etiopía estimó el valor de la polinización solo para la producción de café, lo que ilustra cómo los estudios localizados pueden proporcionar información sobre contextos agrícolas específicos (FAO; 2006). En Ruanda, se descubrió que alrededor del 62% de la producción de cultivos depende directamente de los insectos polinizadores,

y su contribución económica se estimó en más de 100 millones de dólares solo en 2020 (Yocgo et al., 2023). Del mismo modo, en Marruecos, el valor económico de la polinización por insectos alcanzó aproximadamente 1 235 millones de dólares, lo que representa alrededor del 8,52% del PIB agrícola (Yocgo et al., 2023). En la Tabla 3 se dan algunos ejemplos de cultivos con sus polinizadores principales y los beneficios de la polinización.

Tabla 3

Cultivos clave, polinizadores principales y beneficios de la polinización

Cultivo	Polinizadores principales	Beneficio de la polinización
Almendro (<i>Prunus dulcis</i>)	<i>Apis mellifera</i> , abejas solitarias (<i>Osmia</i> spp.)	Aumento del cuajado de frutos en un 40% (Boschet et al., 2022)
Cacao (<i>Theobroma cacao</i>)	<i>Forcipomyia</i> spp. (Ceratopogonidae).	Mejora en la calidad y tamaño de los frutos (Kaufmann, 1975)
Fresa (<i>Fragaria x ananassa</i>)	Abejas silvestres (<i>Bombus</i> spp.)	Frutos más grandes y homogéneos en un 25% (MacInnis & Forrest, 2019)
Café (<i>Coffea arabica</i>)	<i>Apis mellifera</i> , abejas silvestres (<i>Trigona</i> spp.)	Incremento en el rendimiento en un 20% (Ricketts et al., 2004)
Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Abejorros (<i>Bombus</i> spp.)	Polinización vibracional, mejora en la calidad de los frutos (Chang et al., 2016).
Almendra (<i>Prunus dulcis</i>)	<i>Apis mellifera</i> , <i>Bombus</i> spp.	Aumento del rendimiento en un 50% (Koh et al., 2018)
Manzana (<i>Malus domestica</i>)	<i>Apis mellifera</i> , abejas solitarias (<i>Andrena</i> spp.)	Mejora en el tamaño y forma de los frutos (Garratt et al., 2014)

CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN DE LOS POLINIZADORES

Comprender la relación entre los polinizadores y el paisaje es clave para desarrollar estrategias de gestión espacialmente explícitas para los servicios de polinización (Santibañez et al., 2022). El tamaño del cuerpo es un fuerte predictor del rango de alimentación de las abejas (Greenleaf et al., 2007). y se espera que los pequeños polinizadores respondan al paisaje a nivel local, escalas espaciales de alrededor de 200 m (Ramírez-Mejía et al., 2023). Por el contrario, especies más grandes como los abejorros y los colibríes son más propensos a utilizar paisajes a escalas espaciales más grandes (Osborne et al., 2008; Tinoco et al., 2018). Las abejas pueden alimentarse a cientos de metros de su

colmena (Beekman & Ratnieks, 2000), dependiendo de la estructura del paisaje (Steffan-Dewenter & Kuhn, 2003), la fuerza de la colonia (Beekman et al., 2004). y exigencias de recursos (Steffan-Dewenter & Kuhn, 2003). Frisch (1967) informó que el área de alimentación de las abejas melíferas es de hasta 13,5 km. Como Von Frisch no pudo evaluar a las abejas a distancias mayores de 11 a 12 km, concluyó que esta era la distancia máxima de alimentación de las abejas melíferas. En estudios realizados por Ramírez-Mejía et al. (2023) determinaron que la principal respuesta de las abejas al paisaje se observó a 800 m, pero el efecto también se detectó a 1 400 y 4 000 m.

La restauración ecológica tiene el potencial de acelerar la recuperación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en ecosistemas degradados. Sin embargo, la investigación actual cuestiona si es necesaria la restauración activa (Carvalho et al., 2022). Se estima que cerca del 90% de las especies de plantas con flores se benefician de los polinizadores, y se ha demostrado que la polinización influye en la viabilidad de las semillas, la producción de frutos y la variabilidad genética de las poblaciones de plantas a través de la fertilización cruzada (Forup et al., 2008; Menz et al., 2011; Cusser & Goodell, 2013). A medida que las comunidades de polinizadores disminuyen (Christmann, 2019), no promover y gestionar este servicio podría provocar el colapso de las comunidades de plantas en las áreas restauradas (Menz et al., 2011).

Las prácticas agroforestales tradicionales pueden desempeñar un papel crucial en la conservación de los polinizadores y la promoción de plantas forrajeras. Kingazi et al. (2024) documentaron cómo los agricultores del norte de Tanzania aplican este conocimiento en sus sistemas de cultivo, integrando especies vegetales que benefician a los polinizadores. Este enfoque resalta la importancia de combinar estrategias agrícolas tradicionales con prácticas modernas para fortalecer la sostenibilidad de los ecosistemas agrícolas. Por esa razón, cultivar plantas para los polinizadores es una estrategia accesible que utilizan jardineros, agricultores, universidades y empresas para apoyar a los insectos polinizadores en paisajes fragmentados. Las plantaciones de alta calidad pueden sustentar diversos conjuntos de polinizadores, incluidas las abejas (Hymenoptera: Apoidea), mariposas (Lepidoptera: Papilionoidea) y moscas sírfidas (Diptera: Syrphidae) (Di Mauro et al., 2007; Fukase, 2016; Garratt et al., 2017; Baldock et al., 2019; Majewska & Altizer, 2020; Nabors et al., 2022).

Dada la creciente presión sobre el uso de la tierra, es imperativo que los medios para mejorar la biodiversidad de los polinizadores estén integrados en cambios nuevos y en expansión en el uso de la tierra, como el de los parques solares (Randle-Boggis et al., 2020), compuestos por conjuntos de módulos solares fotovoltaicos. Montados sobre soportes metálicos en los campos, los parques solares ocupan actualmente ~15 000 ha de tierra en el Reino Unido (DESNZ, 2023), con crecientes implicaciones para la biodiversidad a medida que aumenta el cambio de uso de la tierra para la energía solar. (Comité de Cambio Climático, 2019). La infraestructura del parque solar y el manejo de estos puede alterar el microclima, el suelo y la vegetación, con consecuencias para otros taxones (Armstrong et al., 2016), aunque tales consecuencias están en gran medida sin resolver, podría haber un potencial para aumentar la biodiversidad en los parques solares,

especialmente si la tierra anteriormente se gestionaba de forma intensiva para la agricultura (Solar Energy UK, 2023). Específicamente, gran parte del terreno dentro de un parque solar está disponible para mejorar el hábitat, ya que la infraestructura y las vías de acceso perturban solo el 5% del terreno y los paneles solares suelen estar elevados entre 80 y 90 cm por encima del suelo en el borde más bajo (BRE, 2014a, 2014b). Además, la energía solar que producen los parques se desarrolla de manera segura y son de relativamente largo plazo, con una duración de vida entre 25 y 40 años, lo que significa que a menudo hay una mínima perturbación humana y tiempo suficiente para que los hábitats se establezcan (Solar Energy UK, 2019). La pérdida de hábitats naturales debido a la conversión de tierras para agricultura, minería o desarrollo urbano es la principal causa de la disminución de polinizadores. Por ello, es crucial incentivar a agricultores, planificadores, trabajadores urbanos, constructores y mineros a adoptar prácticas que promuevan la preservación y restauración de estos hábitats. Algunas de estas prácticas incluyen la creación de franjas de tierra no desarrollada entre los cultivos o en sus bordes, el uso de cercas vivas, el pastoreo controlado de ganado y la siembra de plantas nativas o plantas que hospeden a los insectos polinizadores cerca de carreteras, caminos, líneas de ferrocarril y áreas urbanas. Estas acciones fomentan la diversidad vegetal y facilitan el asentamiento de polinizadores en la zona (Pantoja et al., 2014) (Tabla 4). Hay un cambio cada vez mayor en el uso de la tierra para los parques solares y un creciente reconocimiento de que podrían usarse para apoyar a los insectos polinizadores. Sin embargo, la comprensión de la respuesta de los polinizadores a los desarrollos de parques solares es limitada y faltan datos empíricos (Blaydes et al., 2024).

Tabla 4

Estrategias de conservación y restauración de polinizadores

Estrategia de conservación	Impacto en la biodiversidad
Corredores biológicos	Facilitan el movimiento de polinizadores
Creación de áreas de refugio	Protegen hábitats críticos para polinizadores
Plantación de especies nativas	Proveen recursos de néctar y polen
Control de agroquímicos	Reducen la toxicidad y la mortalidad de polinizadores
Educación y sensibilización	Aumentar la conciencia sobre la importancia de los polinizadores

ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS POR POLINIZADORES

El análisis bibliométrico se realizó utilizando herramientas especializadas como VOSviewer y Bibliometrix, con el objetivo de explorar la evolución y las tendencias de investigación en el campo de los servicios ecosistémicos proporcionados por

los polinizadores, esto nos indica que la producción científica relacionada con la polinización por insectos ha experimentado un crecimiento exponencial en las últimas dos décadas, reflejando un interés cada vez mayor en este tema debido a su relevancia

ecológica, económica y social. Este crecimiento se asocia con la preocupación global sobre la disminución de los polinizadores, los efectos del cambio climático y la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria. Estudios como los de Potts et al. (2010). y IPBES (2016). han establecido la polinización como un eje fundamental en la investigación de los servicios ecosistémicos.

La Figura 5 muestra la evolución del número de publicaciones científicas entre los años 2000 y 2024. Este análisis bibliométrico destaca tres fases principales: (1). una etapa inicial de lento crecimiento (2000-2010), enfocada en estudios básicos sobre la importancia de los polinizadores; (2). una etapa de aceleración (2011-2020), marcada por el incremento en investigaciones sobre el impacto del cambio climático y la intensificación agrícola; y (3). una etapa reciente (2021-2024), donde predominan temas como la sostenibilidad, la intensificación ecológica y las políticas de conservación. Este patrón refleja no solo el aumento en la cantidad de investigaciones, sino también la diversificación temática y metodológica en el campo.

VosViewer se ha empleado extensamente en bibliometría para llevar a cabo análisis de coautoría, co-citación y co-ocurrencia de términos clave (Perianes-Rodriguez et al., 2016). En nuestro estudio, utilizamos un conjunto de datos de 643 documentos obtenidos de Scopus utilizando las palabras clave "Insect, Pollination, Ecosystem y Service". Como resultado del análisis de co-ocurrencia, se presenta lo visualizado en la Figura 6.

Análisis de co-ocurrencia con VOSviewer

Utilizando un conjunto de datos compuesto por 643 documentos extraídos de la base de datos Scopus, se analizaron las palabras clave "insect", "pollination", "ecosystem", y "service". Los resultados revelaron que términos como "ecosystem services" (servicios ecosistémicos), "pollination" (polinización), "bees"

(abejas). y "biodiversity" (biodiversidad) son los más frecuentes y centrales en la red de investigación. Esto subraya la relevancia de estos conceptos en el mantenimiento de la productividad agrícola y la conservación de la biodiversidad.

El mapa de co-ocurrencia mostró una fuerte conexión entre "ecosystem services" y "pollination", lo que refleja la importancia del servicio ecosistémico de la polinización en producción agrícola. Por otro lado, términos emergentes como "biodiversity" (biodiversidad), "pollinators" (polinizadores), "bees" (abejas), "conservation" sugieren un cambio en el enfoque de las investigaciones hacia estrategias agrícolas que integren la conservación de los ecosistemas y la producción sostenible.

La Figura 6 presenta el análisis de co-ocurrencia realizado con VOSviewer, basado en las palabras clave "polinizador", "insectos" y "servicios ecosistémicos". Este análisis permitió identificar patrones clave en la investigación científica sobre polinización, destacando la agrupación de conceptos en tres clusters principales:

Cluster 1 (Rojo): Agrupa términos relacionados con "polinización", "polinizadores", "biodiversidad", "control biológico" y "recursos florales". Esto refleja cómo los estudios se enfocan en el papel crítico de los polinizadores en el mantenimiento de la estructura y función de los ecosistemas. La conexión entre polinización y servicios ecosistémicos destaca la importancia de los polinizadores y los recursos florales para garantizar la estabilidad ecológica.

Cluster 2 (Verde): Incluye conceptos como "servicios ecosistémicos", "agroecología", "abejas silvestres", "polinización de cultivos" insectos polinizadores", "servicios de polinización" y "moscas Syrphidae". Este cluster subraya los desafíos que enfrentan los polinizadores y su importancia ante las prácticas agrícolas intensivas, muchas veces negativas para los polinizadores y agentes de control biológico.

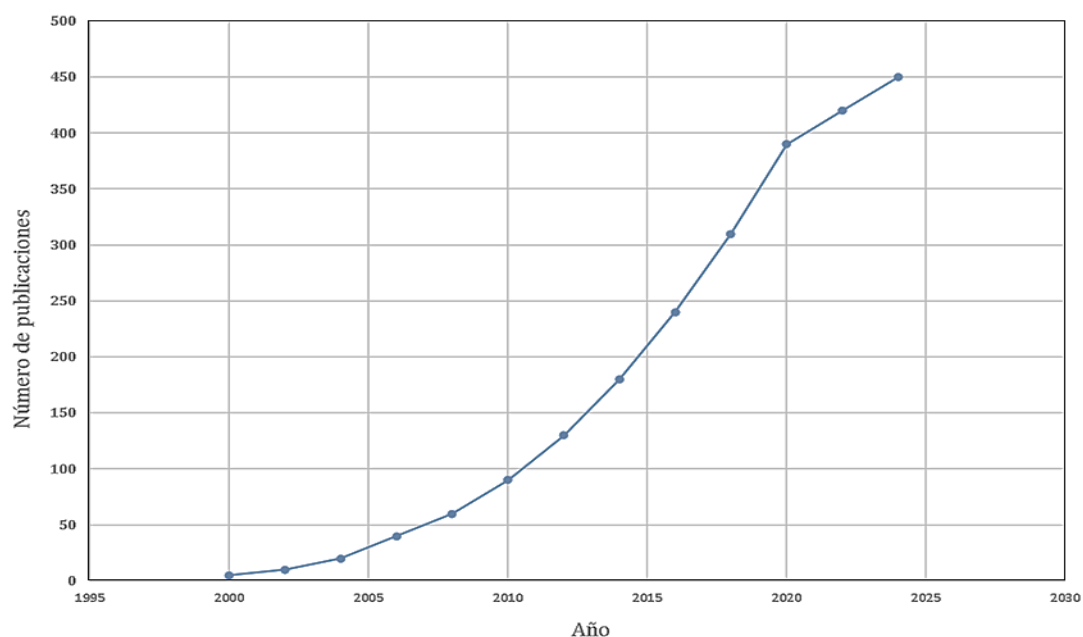


Figura 5. Tendencia de publicaciones sobre polinización por insectos (2000-2024).

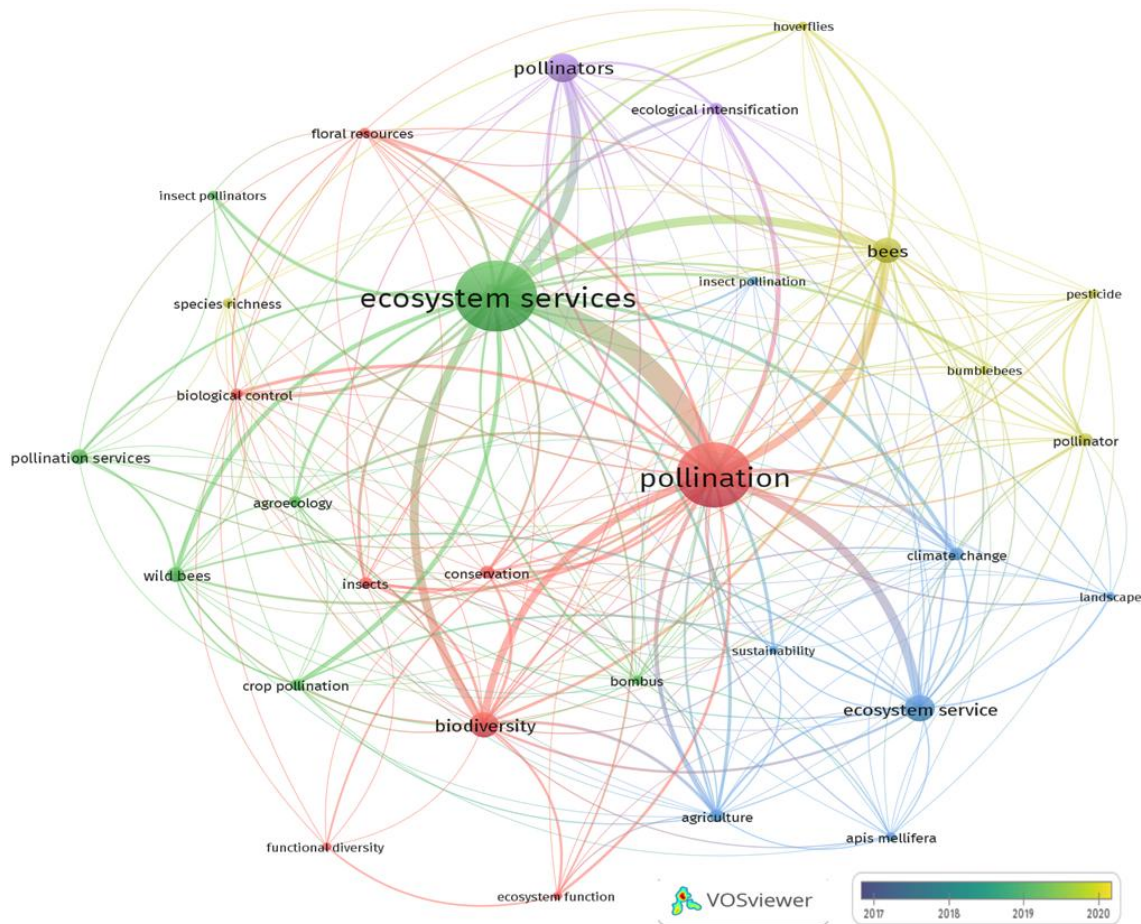


Figura 6. Análisis de Co-ocurrencia conVosViewer con las palabras clave. Polinizador, insectos, servicios ecosistémicos. Método de clusterización: Asociación Strencht.

Cluster 3 (Azul): Está compuesto por términos como "servicios ecosistémicos", "cambio climático", "sostenibilidad", "agricultura" y "*A. mellifera*". Este grupo enfatiza la creciente atención en el cambio climático y como este afecta a uno de los principales polinizadores como es *A. mellifera*.

La visualización de estos clusters proporciona una comprensión integral de las áreas temáticas predominantes en la investigación científica sobre polinización. Estos resultados reflejan una evolución en la literatura científica, donde los estudios iniciales se centraban en comprender la importancia de los polinizadores, y las investigaciones más recientes abordan la importancia de los servicios ecosistémicos proporcionados por los polinizadores en la polinización de cultivos y la flora silvestre.

Análisis de tendencias temporales

Para este análisis bibliométrico se utilizó *Bibliometrix*, una herramienta de código abierto desarrollada en RStudio que permite gestionar y analizar datos bibliográficos de bases como Web of Science y Scopus (Aria & Cuccurullo, 2017), y permite identificar patrones evolutivos en la investigación de polinizadores. Los resultados revelaron tres períodos principales:

2000-2010: Conservación de polinizadores y servicios ecosistémicos básicos.

2011-2020: Impactos del cambio climático y agricultura intensiva.

2021-2024: Sostenibilidad e intensificación ecológica. Estos hallazgos, visualizados en la Figura 7, destacan un cambio hacia enfoques más integrales que combinan conservación y producción agrícola.

La evolución reflejada en las figuras resalta cómo los polinizadores han pasado de ser estudiados como actores ecológicos a ser integrados en estrategias agrícolas sostenibles. Este cambio sugiere la necesidad de abordar desafíos como la pérdida de hábitat y los efectos del cambio climático mediante políticas agrícolas innovadoras y colaboraciones interdisciplinarias.

Retos actuales y desafíos futuros

La valoración de los servicios de polinización presenta varios desafíos:

Complejidad de las interacciones de los ecosistemas: Las interdependencias entre las diferentes especies y los factores ambientales complican la evaluación de cómo los cambios en las poblaciones de polinizadores afectan los productos agrícolas (Huang & D'Odorico, 2021).

Lagunas de datos: Existe una notable falta de datos exhaustivos sobre la dependencia regional de los cultivos de los polinizadores, especialmente en los países en desarrollo donde se cultivan muchos cultivos esenciales (Porto et al., 2020).

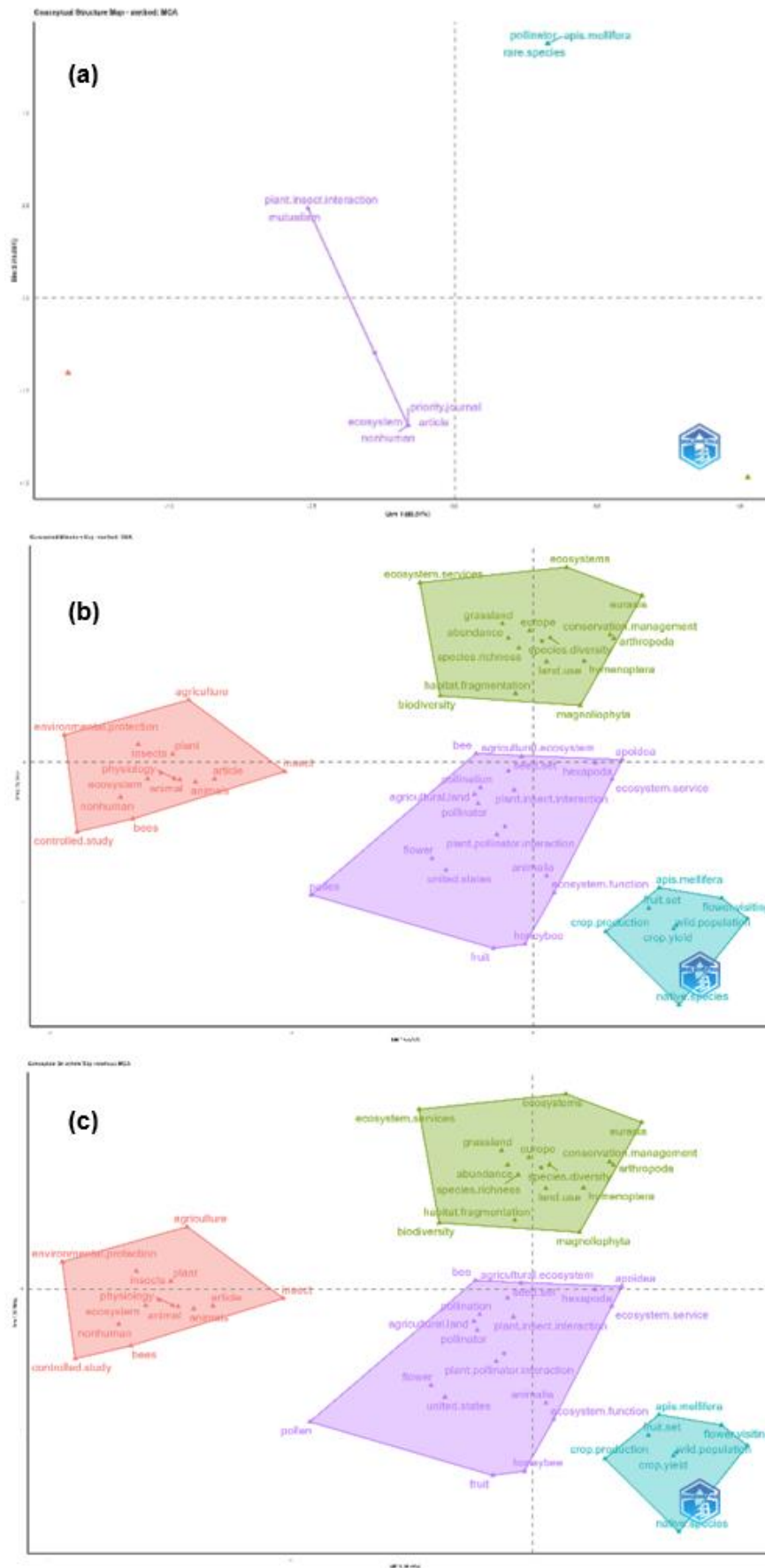


Figura 7. Análisis factorial con Bibliometrix las palabras clave. Polinizador, insectos, servicios ecosistémicos: (a). Década 1994-2004, (b). Década 2004-2014, (c). Década 2014-2024.

Concienciación pública: La limitada comprensión pública del vínculo entre los polinizadores y la producción de alimentos puede obstaculizar los esfuerzos para implementar políticas destinadas a conservar estas especies críticas (Tscharntke, 2021).

En conclusión, la valoración económica de los servicios de polinización es esencial para fundamentar las decisiones políticas y promover los esfuerzos de conservación. A medida que aumentan las demandas agrícolas mundiales junto con las amenazas a las poblaciones de polinizadores por la pérdida de hábitat y el cambio climático, comprender y cuantificar estos servicios será vital para la producción sostenible de alimentos y la gestión de los ecosistemas. Se necesitan metodologías mejoradas y mayores esfuerzos de

recopilación de datos para mejorar la precisión y la aplicabilidad de estas valoraciones en diferentes contextos agrícolas. En la Tabla 5 se presentan algunos enfoques actuales para calcular el valor del servicio de la polinización.

Los valores atribuidos han variado dramáticamente dependiendo de la metodología utilizada, en el caso de las abejas en los EE. UU, los valores anuales se estiman entre 1 600 millones de dólares y el valor anual de mantener el ecosistema con polinización de abejas silvestres por 14 600 millones de dólares. Los servicios en Australia para evitar la introducción del ácaro de la varroa se calcularon entre 16,4 y 38,8 millones de dólares australianos (entre 12,6 y 30,7 millones de dólares estadounidenses). (Cook et al., 2007).

Tabla 5

Enfoques actuales para calcular el valor del servicio de la polinización

Enfoque	Fórmula para calcular el valor del servicio de la polinización	Referencia
Valor total de la producción	= Valor de la producción anual	
Proporción del valor total de la producción atribuida a la polinización de insectos	= Valor de la producción anual x factor dependiente de la especie de insecto	Morse & Calderone (2000).
Valor de reemplazo	= (valor de producción anual atribuido a la polinización por insectos). - (valor de producción anual utilizando el reemplazo de polinizadores*).	Allsopp et al. (2008).
Valor de la polinización gestionada directamente	= Costo de alquiler de la colmena	Burgett et al. (2004).

CONCLUSIONES

La polinización por insectos constituye uno de los servicios ecosistémicos más relevantes para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y la conservación de la biodiversidad. Este proceso natural, mediado principalmente por abejas, sírfidos, mariposas, polillas, escarabajos y otros insectos, garantiza la reproducción de más del 70% de los principales cultivos alimentarios a nivel mundial y el mantenimiento de comunidades vegetales silvestres. Los múltiples beneficios de la polinización abarcan aspectos ecológicos, económicos y sociales. Desde una perspectiva económica, su contribución al valor global de la producción agrícola es significativa, estimándose en más de 150 mil millones de euros anuales. Sin embargo, esta valiosa función se encuentra amenazada por factores como la pérdida de hábitat, el uso intensivo de agroquímicos, el cambio climático, la contaminación del aire, y la urbanización descontrolada.

El análisis bibliométrico evidencia un creciente interés científico por este tema, reflejado en el aumento de

publicaciones que abordan desde aspectos ecológicos y económicos hasta estrategias de conservación e intensificación ecológica. También se destaca un cambio progresivo hacia el estudio de polinizadores no tradicionales, como los nocturnos, y el reconocimiento de su papel en la salud de los ecosistemas.

La conservación y restauración de los polinizadores exige enfoques integrales que combinen prácticas agrícolas sostenibles, manejo adecuado del paisaje, restauración ecológica y políticas públicas eficaces. Es fundamental fortalecer el conocimiento local, promover la educación ambiental y desarrollar estrategias de adaptación frente a los desafíos actuales y futuros.

Finalmente, se requiere mejorar las metodologías de valoración económica y ecológica de los servicios de polinización, con énfasis en los polinizadores silvestres, para garantizar una gestión sostenible y equitativa de este servicio esencial para la seguridad alimentaria global y la resiliencia de los ecosistemas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrol, D. P. (1998). Foraging Ecology and Behaviour of the Alfalfa Pollinating Bee Species *Megachile nana* (Hymenoptera: Megachilidae). *Entomologia generalis*, 22(3-4), 233- 237.
- Allbrecht, M., Schmid, B., Hautier, &, Mueller, C. B. (2012). Diverse pollinator communities enhance plant reproductive success. *Proc. R. Soc. B. Biol. Sci.*, 279, 4845-4852.
- Alves, L. H. S., Cassino, P. C. R., & Prezoto, F. (2015). Effects of abiotic factors on the foraging activity of *Apis mellifera* Linnaeus, 1758 in inflorescences of *Vernonia polyanthes* Less (Asteraceae). *Acta Scientiarum Animal Sciences*, 37, 405-409.
- Allen-Wardell, G., Bernhardt, P., Bitner, R., Burquez, A., Buchmann, S., et al. (1998). The potential consequences of pollinator declines on the conservation of biodiversity and stability of food crop yields. *Cons Biol*, 12, 8-17.
- Allsopp, M. H., de Lange, W. J. & Veldtman, R. (2008). Valuing Insect Pollination Services with Cost of Replacement. *PLoS ONE*, 3(9), e3128. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003128>.
- Allsopp, M. H. & Cherry, M. (2004). An assessment of the impact on the bee and agricultural industries in the Western Cape of the clearing of certain *Eucalyptus* species using questionnaire survey data. Pretoria: National Government of the Republic of South Africa, Department of Water Affairs, Internal Final Report. 58 pp.

- Amato, B., & Petit, S. (2025). Influence of fragment and roadside vegetation on canola (*Brassica napus*) and faba bean (*Vicia faba*). pollination in South Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 382(109481), 109481. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109481>
- Antiqueira, P. A. P., de Omena, P. M., Gonçalves-Souza, T. et al. (2020). Precipitation and predation risk alter the diversity and behavior of pollinators and reduce plant fitness. *Oecologia*, 192, 745–753. <https://doi.org/10.1007/s00442-020-04612-0>
- Araujo, P., de Araujo, F. F., Vidal, D. M., Mota, T., & Schlindwein, C. (2024). The role of visual and olfactory floral cues in twilight foraging by *Ptiloglossa* and *Xylocopa* bees. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 78(2), article id 25. <https://doi.org/10.1007/s00265-024-03>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Armstrong, A., Ostle, N. J., & Whitaker, J. (2016). Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environmental Research Letters*, 11(7), 074016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074016>
- Baird, E. (2020). Obstacle avoidance in bumblebees is robust to changes in light intensity. *Animal cognition*, 23, 1081-1086.
- Baird, E., Tichit, P., & Guiraud, M. (2020). The neuroecology of bee flight behaviours. *Current Opinion in Insect Science* 42, 8-13.
- Baldock, K. C. R., Goddard, M. A., & Hicks, D. M., et al. (2019). A systems approach reveals urban pollinator hotspots and conservation opportunities. *Nat. Ecol. Evol.*, 3, 363–373. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0769-y>
- Bale, J. S., Masters, G. J., Hodkinson, I. D., Awmack, C. et al (2002). Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Glob Change Biol* 8, 1–16. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00451>
- Balvanera, P., Uriarte, M., Almeida-Leñero, L., Altesor, A., DeClerck, F., Gardner, T.; Hall, J.; Lara, A.; Laterra, P.; Peña-Claros, M.; et al. (2012). Ecosystem services research in Latin America: The state of the art. *Ecosyst. Serv.*, 2, 56–70.
- Bartholomé, O., & Lavorel, S. (2019). Disentangling the diversity of definitions for the pollination ecosystem service and associated estimation methods. *Ecological Indicators*, 107, 105576.
- Bartomeus, al. (2014). Contribution of insect pollinators to crop yield and quality varies with agricultural intensification. *PeerJ* 2, e328. <https://doi.org/10.7717/peerj.328>
- Beekman, M., Sumpter, D. J. T., Seraphides, N., & Ratnieks, F. L. W. (2004). Comparing foraging behaviour of small and large honey-bee colonies by decoding waggle dances made by foragers. *Functional Ecology*, 18(6), 829–835.
- Beekman, M., & Ratnieks, F. L. W. (2000). Long-range foraging by the honey-bee, *Apis mellifera* L. *Functional Ecology*, 14(4), 490–496.
- Berry, R. P., Wcislo, W. T., & Warrant, E. J. (2011). Ocular adaptations for dim light vision in a nocturnal bee. *Journal of Experimental Biology* 214, 1283-1293.
- Bianchi, F. J. J. A., Booij, C. J. H. & Tscharntke, T. (2006). Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proc. Roy. Soc. London (Biol.)*, 273, 1715–1727.
- Blaydes, H., Potts, S. G., Whyatt, J. D., & Armstrong, A. (2024). On-site floral resources and surrounding landscape characteristics impact pollinator biodiversity at solar parks. *Ecological Solutions and Evidence*, 5, e12307. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12307>
- Blitzer, E. J., Gibbs, J., Park, M. G. & Danforth, B. N. (2016). Pollination services for apple are dependent on diverse wild bee communities. *Agric Ecosyst Environ*, 221, 1–7.
- Bosch, J., Osorio-Canadas, S., Sgolastra, F. & Vicens, N. (2021). Use of a managed solitary bee to pollinate almonds: Population sustainability and increased fruit set. *Insects*, 12(1), 56. <https://doi.org/10.3390/insects12010056>
- BRE. (2014a). BRE National Solar Centre Biodiversity Guidance for Solar Developments. <https://www.bre.co.uk/filelibrary/pdf/Brochures/NSC-Biodiversity-Guidance.pdf>
- BRE. (2014b). Agricultural Good Practice Guidance for Solar Farms. <https://files.bregroup.com/solar/NSC-Guid-Agricultural-good-practicefor-SFs.0914.pdf>
- Brittain, C. A., Vighi, M., Bommarco, R., Settele, J. & Potts, S. G. (2010). Impacts of a pesticide on pollinator species richness at different spatial scales. *Basic Appl. Ecol.*, 11, 106–115.
- Brosi, B. J. (2016). Pollinator specialization: from the individual to the community. *New Phytol.*, 210, 1190–1194. <https://doi.org/10.1111/nph.13951>
- Buchmann, S. L. & Nabhan, G. P. (1996). The Forgotten Pollinators. Washington DC: Island Press. 312 pp.
- Burd, M., & Allen, T. F. H. (1988). Sexual allocation strategy in wind-pollinated plants. *Evolution*, 42, 403–407. <https://doi.org/10.2307/2409245>
- Burgett, M., Rucker, R. R., & Thurman, W. N. (2004). Economics and honey bee pollination markets. *Am Bee J*, 144, 269–271.
- Burkle, L. A., Marlin, J. C. & Knight, T. M. (2013). Plant–pollinator interaction over 120 years: loss of species, co-occurrence, and function. *Science*, 339, 1611–1615. <https://doi.org/10.1126/science.1232728>
- Caballero Méndez, L. C., Salazar Ríos, D., Chica Builes, J. F., & Franco-Montoya, L. N. (2024). Native stingless bees, their social and ecosystem roles – a review. *Veterinaria Stanica*, 56(4), 493–505. <https://doi.org/10.46419/vs.56.4.10>
- Cáceres, D. M., Tapella, E., Quétier, F. & Díaz, S. (2015). The social value of biodiversity and ecosystem services from the perspectives of different social actors. *Ecol. Soc.*, 20, 62.
- Cao, Guo-Xing; Li, Rui Ting; Li, Lin; Zeng, Hong & Wang, Jingâ Yan (2020). Gender specialization and factors affecting fruit set of the wind-pollinated heterodichogamous *Juglans regia*. *Plant Species Biology*, 1442-1984, 12268. <https://doi.org/10.1111/1442-1984.12268>
- Campbell, A. J., Biesmeijer, J. C., Varma, V. & Wäckers, F. L. (2012). Realising multiple ecosystem services based on the response of three beneficial insect groups to floral traits and trait diversity. *Basic Appl. Ecol.*, 13, 363–370.
- Carvalho, C., Oliveira, A., Caeiro, E., Miralto, O., Parrinha, M., Sampaio, A., Silva, C., Mira, A., & Salgueiro, P. A. (2022). Insect pollination services in actively and spontaneously restored quarries converge differently to natural reference ecosystem. *Journal of Environmental Management*, 318, 115450. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115450>
- Chang, J. J., Crall, J. D., & Combes, S. A. (2016). Wind alters landing dynamics in bumblebees. *Journal of Experimental Biology*, 219, 2819-2822.
- Christmann, S. (2019). Do we realize the full impact of pollinator loss on other ecosystem services and the challenges for any restoration in terrestrial areas? *Restor. Ecol.*, 27, 720–725.
- Clarke, D., & Robert, D. (2018). Predictive modelling of honey bee foraging activity using local weather conditions. *Apidologie*, 49, 386-396.
- Combes, S. A. & Dudley, R. (2009). Turbulence-driven instabilities limit insect flight performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 9105–9108.
- Committee on Climate Change. (2019). Net zero technical report. <https://www.theccc.org.uk/publication/net-zero-technical-report/>
- Contrera, F. A. L., Imperatriz-Fonseca, V. L. & Nieh, J. C. (2004). Temporal and climatological influences on flight activity in the stingless bee *Trigona hyalinata* (Apidae, Meliponini). *Revista Tecnologia e Ambiente*, 10, 35-43.
- Cook, D. C., Thomas, M. B., Cunningham, S. A., Anderson, D. L. & De Barro, P. J. (2007). Predicting the economic impact of an invasive species on an ecosystem service. *Ecol Appl*, 17, 1832–1840.
- Corbet, S. A. (1990). Pollination and the weather. *Israel Journal of Plant Sciences*, 39, 13–30.
- Cordeiro, G. D., Pinheiro, M., Dötterl, S., & Alves-dos-Santos, I. (2017). Pollination of *Campomanesia phaea* (Myrtaceae) by night-active bees: a new nocturnal pollination system mediated by floral scent. *Journal of Plant Biology*, 19(2), 132-139. <https://doi.org/10.1111/plb.12520>
- Cusser, S. & Goodell, K. (2013). Diversity and distribution of floral resources influence the restoration of plant-pollinator networks on a reclaimed strip mine. *Restor. Ecol.*, 21, 713-721. <https://doi.org/10.1111/rec.12003>
- DESNZ. (2023). Renewable Energy Planning Database: Quarterly extract. <https://www.gov.uk/government/publications/renewable-energy-planning-database-monthly-extract>
- De Oliveira, F. L., Dias, V. H. P., Da Costa, E. M., Filgueira, M. A. & Sobrinho, J. E. (2012). Influência das variações ambientais na atividade de vôo das abelhas jandairas *Melipona subnitida* Ducke (Meliponinae). *Revista Ciência Agronômica*, 43, 598-603.
- DeVetter, L. W., Chabert, S., Milbrath, M. O., Mallinger, R. E., Walters, J., Isaacs, R., Galinato, S. P., Kogan, C., Brouwer, K., Melathopoulos, A., & Eeraerts, M. (2022). Toward evidence-based decision support systems to optimize pollination and yields in highbush blueberry. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1006201>
- Di Mauro, D., Dietz, T., & Rockwood, L. (2007). Determining the effect of urbanization on generalist butterfly species diversity in butterfly gardens. *Urban Ecosyst*, 10, 427–439. <https://doi.org/10.1007/s11252-007-0039-2>
- Drummond, F. A., & Hoshida, A. K. (2024). An economic cost/benefit tool to assess bee pollinator conservation, pollination strategies, and sustainable policies: A lowbush blueberry case study. *Sustainability*, 16(8), 3242. <https://doi.org/10.3390/su16083242>
- Duque, L., & Steffan-Dewenter, I. (2024). Air pollution: a threat to insect pollination. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 22(3), e2701. <https://doi.org/10.1002/fee.2701>

- El Hassani, A. K., Dacher, M., Gauthier, M., & Armengaud, C. (2005). Effects of sublethal doses of fipronil on the behavior of the honeybee (*Apis mellifera*). *Pharmacol. Biochem. Behav.*, 82, 30–39.
- Engel, M. S., & Rasmussen, C. (2017). Diversity and Distribution of Stingless Bees. In S. M. Sakagami, R. Zucchi, & D. W. Roubik (Eds.), *Stingless Bees Biology, Management and Conservation* (pp. 9–34). Springer.
- Favarin, S., Fantinato, E., & Buffa, G. (2022). Pollinator distribution in patches of suitable habitat depends more on patch isolation than on floral abundance. *Flora*, 296, 152165. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.flora.2022.152165>
- Fenske, M. P., Hewett Hazelton, K. D., Hempton, A. K., Shim, J. S., Yamamoto, B. M., Riffell, J. A. et al. (2015). Circadian clock gene late elongated hypocotyl directly regulates the timing of floral scent emission in *Petunia*. *Proc. Natl Acad. Sci.*, 112, 9775–9780. <https://doi.org/10.1073/pnas.1422875112>
- Feketéné Ferenczi, A., Szűcs, I., Bauerné Gáthy, A. (2023). Evaluation of the Pollination Ecosystem Service of the Honey Bee (*Apis mellifera*). Based on a Beekeeping Model in Hungary. *Sustainability*, 15, 9906. <https://doi.org/10.3390/su15139906>
- Fidalgo, A. D. O., & Kleinert, A. D. M. P. (2007). Foraging behavior of *Melipona rufiventris* Lepeletier (Apinae; Meliponini). in Ubatuba, SP, Brazil. *Brazilian Journal of Biology* 67, 133–140.
- Forrest, J. R. K. (2015). Plant—pollinator interactions and phenological change: what can we learn about climate impacts from experiments and observations? *Oikos* 124, 4–13. <https://doi.org/10.1111/oik.01386>
- Forup, M. L., Henson, K. S. E., Craze, P. G. & Memmott, J. (2008). The restoration of ecological interactions: plant-pollinator networks on ancient and restored heathlands. *J. Appl. Ecol.*, 45, 742–752. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01390>
- Fox, J. F. (1993). Size and sex allocation in monoecious woody plants. *Oecologia*, 94, 110–113. <https://doi.org/10.1007/BF00317310>
- Frederiksen, R., Wcislo, W. T., & Warrant, E. J. (2008). Visual reliability and information rate in the retina of a nocturnal bee. *Current Biology*, 18(4), 349–353. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.01.057>
- Free, J. B. (1993). *Insect pollination of crops*. London: Academic Press.
- Friedman, J., & Barrett, S. C. (2011). Genetic and environmental control of temporal and size-dependent sex allocation in a wind-pollinated plant. *Evolution*, 65, 2061–2074. <https://doi.org/10.2307/41240798>
- Frisch, von K. (1967). *The Dance Language and Orientation of Bees*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Fukase, J. (2016). Increased pollinator activity in urban gardens with more native flora. *Appl. Ecol. Environ. Res.* 14, 297–310. https://doi.org/10.15666/aeer/1401_297310
- Gagic, V., Marcora, A., & Howie, L. (2019). Additive and interactive effects of pollination and biological pest control on crop yield. *J. Appl. Ecol.*, 56, 2528–2535.
- Gaibor, J. (2018). Poblaciones y porcentajes de polinización de *Forcipomyia* spp. en el cultivo de cacao, en época lluviosa en la Zona de San José del Tambo (Tesis de pregrado). Babahoyo, Ecuador: Universidad Técnica de Babahoyo. Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- Gallai, N., Salles, J. M., Settele, J., & Vaissière, B. E. (2009). Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline. *Ecological Economics*, 68(3), 810–821. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.06.014>
- Garratt, M. P. D., Senapathi, D., Coston, D. J., Mortimer, S. R., & Potts, S. G. (2017). The benefits of hedgerows for pollinators and natural enemies depends on hedge quality and landscape context. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 247, 363–370. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.048>
- Glendinning, D.R. (1972). Natural pollination of cocoa. *New Phytologist*, 71(4), 719–729. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1972.tb01284.x>
- Gallai, N., Salles, J. M., Settele, J., & Vaissiere, B. E., (2009). Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted to pollinator decline. *Ecol. Econ.*, 68(3), 810–821.
- Garibaldi, L. A., Pérez-Méndez, N., Garratt, M. P. D., Gemmill-Herren, B., Miguez, F. E., & Dicks, L. V. (2019). Policies for ecological intensification of crop production. *Trends in Ecology & Evolution*, 34(4), 282–286.
- Garibaldi, L. A., Andersson, G. K. S., Requier, F., Fijen, T. P. M., Hipólito, J., Kleijn, D. Pérez-Méndez, N., & Rollin, O. (2018). Complementarity and synergisms among ecosystem services supporting crop yield. *Glob. Food Secur.* 17, 38–47.
- Garibaldi, L. A., Requier, F., Rollin, O., & Andersson, G. K. (2017). Towards an integrated species and habitat management of crop pollination. *Current Opinion in Insect Science*, 21, 105–114.
- Garibaldi, L. A., Steffan-Dewenter, I., Winfree, R., Aizen, M. A., Bommarco, R., Cunningham, S. A., Kremen, C., Carvalheiro, L. G., Harder, L. D., Afik, O., Bartomeus, I., Benjamin, F., Boreux, V., Cariveau, D., Chacoff, N. P., Dudenhöffer, J. H., Freitas, B. M., Ghazoul, J., Greenleaf, S. & Klein, A. M. (2013). Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *Science*, 339, 1608–1611.
- Gill, R. A. (1985). Biological control of *Echium* species. Industries Assistance Commission, report No. 371. Canberra: Australian Government Printer.
- Gobatto, A. L., & Knoll, F. (2013). Influence of seasonal changes in daily activity and annual life cycle of *Geotrigona mombuca* (Hymenoptera, Apidae). in a Cerrado habitat, São Paulo, Brazil. *Iheringia. Série Zoologia*, 103, 367–373.
- González, V. H., Herbison, N., Robles-Pérez, G., Panganiban, T., Haefner, L., Tschulin, T., Petanidou, T., & Hranitz, J. (2024). Bees display limited acclimation capacity for heat tolerance. *Biology Open*: <https://doi.org/10.1242/bio.060179>
- Goodwin, R. M., Cox, H. M., Taylor, M. A., Evans, L. J. & Mc Brydie, H. M. (2011). Number of honey bee visits required to fully pollinate white clover (*Trifolium repens*). seed crops in Canterbury, New Zealand. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 39, 7–19.
- Gouw, M. S., & Gimenes, M. (2013). Differences of the daily flight activity rhythm in two Neotropical stingless bees (Hymenoptera, Apidae). *Sociobiology*, 60, 183–189.
- Greco, C. F. & Kevan, P. G. (1995). Patch choice in the anthophilous ambush predator *Phymata americana*: Improvement by switching hunting sites as part of the initial choice. *Can. J. Zool. Rev. Can. Zool.* 73, 1912–1917.
- Greenleaf, S. S., Williams, N. M., Winfree, R., & Kremen, C. (2007). Bee foraging ranges and their relationship to body size. *Oecologia*, 153(3), 589–596.
- Greiner, B., Cronin, T. W., Ribi, W. A., Wcislo, W. T., & Warrant, E. J. (2007). Anatomical and physiological evidence for polarisation vision in the nocturnal bee *Megalopta genalis*. *Journal of Comparative Physiology*, 193, 591–600.
- Guibu, L. S., Imperatriz-Fonseca, V. L. (1984). Atividade externa de *Melipona quadrifasciata* Lepeletier (Hymenoptera, Apidae, Meliponinae). *Ciência e Cultura*, 36, 623.
- Guimarães, B. M. da C., Arista, M., Oliveira, P. E., & Nogueira-Ferreira, F. H. (2024). What should we teach to promote bee conservation awareness? Insights from the perception of Brazilian middle school students. *Neotropical Entomology*, 54(1). <https://doi.org/10.1007/s13744-024-01241-7>
- Hanley, N., Breeze, T. D., Ellis, C., & Goulson, D. (2015). Measuring the economic value of pollination services: Principles, evidence and knowledge gaps. *Ecosystem Services*, 14, 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.09.013>
- Hayes, J. J.-M., Bell, N. C., Best, L. R., Bruslind, S. R., Johnson, D. O., Mead, M. E., Spofford, T. S., & Langelotto, G. A. (2025). Pacific Northwest native plants and native cultivars, part I: pollinator visitation. *Environmental Entomology*. <https://doi.org/10.1093/ee/nvae126>
- Heard, T. A. & Hendrikz, J. K. (1993). Factors influencing flight activity of colonies of the stingless bee *Trigona carbonaria* (Hymenoptera, Apidae). *Australian Journal of Zoology*, 41, 343–353.
- Hedström, L., Harris, J., & Fergus, K. (2006). Euglossine bees as potential bio-indicators of coffee farms: Does forest access, on a seasonal basis, affect abundance? *Revista de Biología Tropical*, 54, 1188–1195.
- Hegland, S. J., Nielsen, A., Lázaro, A., Bjerknes, A. L. & Totland, O. (2009). How does climate warming affect plant–pollinator interactions? *Ecol Lett.* <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01269>
- Hegland, S. J., Grynnes, J. A. & Totland, O. (2009). The relative importance of positive and negative interactions for pollinator attraction in a plant community. *Ecol. Res.*, 24, 929–936. <https://doi.org/10.1007/s11284-008-0572-3>
- Heinrich, B. (1993). *The hot-blooded insects: Strategies and mechanisms of thermoregulation*. Harvard University Press. <https://doi.org/10.4159/harvard.9780674491604>
- Herrera, C. M., & Medrano, M. (2017). Pollination consequences of simulated intrafloral microbial warming in an early-blooming herb. *Flora*, 232, 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2016.10.003>
- Hilário, S. D., Imperatriz-Fonseca, V. L., & Kleinert, A. (2000). Flight activity and colony strength in the stingless bee *Melipona bicolor bicolor* (Apidae, Meliponinae). *Revista Brasileira de Biologia*, 60, 299–306.
- Hilário, S., Imperatriz-Fonseca, V. L., & Kleinert, A. M. P. (2001). Responses to climatic factors by foragers of *Plebeia pugnax* Moure (in litt.). (Apidae, Meliponinae). *Revista Brasileira de Biologia*, 61(2), 191–196. <https://doi.org/10.1590/S0034-71082001000200005>
- Hilário, S. D., de Fátima Ribeiro, M., & Imperatriz-Fonseca, V. L. (2007). Efeito do vento sobre a atividade de voo de *Plebeia remota* (Holmberg, 1903). (Apidae, Meliponini). *Biota Neotropica*, 7, 225–232.
- Holzschuh, A., Dudenhöffer, J. H., & Tscharnkte, T. (2012). Landscapes with wild bee habitats enhance pollination, fruit set and yield of sweet cherry. *Biol Conserv*, 153, 101–107.

- Huang, H., Tu, C., & D'Odorico, P. (2021). Ecosystem complexity enhances the resilience of plant-pollinator systems. *One Earth (Cambridge, Mass.)*, 4(9), 1286–1296. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.08.008>
- IPBES, (2016). Summary for policy makers of the assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production., UNEP/GRID Europe. <https://doi.org/10.1007/s00442-010-1809-8>
- Isaacs, R., Williams, N., Ellis, J., & Pitts-Singer, T. L. (2017). Integrated Crop Pollination: Combining Strategies to Ensure Stable and Sustainable Yields of Pollination-Dependent Crops. *Basic and Applied Ecology*, 18, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2016.09.006>
- Iwama, S. (1977). A influência dos fatores climáticos na atividade externa de *Tetragonisca angustula* (Apidae, Meliponinae). *Bol. Zool.*, 2, 189–201.
- Jeavons, E., Le Lann, C. & van Baaren, J. (2023). Interactions between natural enemies and pollinators: Combining ecological theory with agroecological management. *Entomol. Gen.*, 43, 243–259.
- Jeavons, E., van Baaren, J. & Le Lann, C. (2020). Resource partitioning among a pollinator guild: A case study of monospecific flower crops under high honeybee pressure. *Acta Oecologica*, 104, 103527.
- Kaluza, B. F. (2017). Impacts of landscape resource diversity and availability on bee foraging and fitness. Dissertation, Universitätsbibliothek der Leuphana Universität Lüneburg.
- Kaiser-Bunbury, C. N., Muff, S., Memmott, J., Müller, C. B., & Cafisch, A. (2010). The robustness of pollination networks to the loss of species and interactions: a quantitative approach incorporating pollinator behaviour. *Ecology Letters*, 13(4), 442–452. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01437.x>
- Kaufmann, T. (1975). Ecology and Behavior of Cocoa Pollinating Ceratopogonidae in Ghana, W. Africa, *Environmental Entomology*, 4(2), 347–351.
- Kearns, C. A., Inouye, D. W., & Waser, N. M. (1998). Endangered mutualisms: the conservation of plant-pollinator interactions. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 29, 83–112.
- Kelber, A., Warrant, E. J., Pfaff, M., Wallén, R., Theobald, J. C., Wcislo, W. T., & Raguso, R. A. (2006). Light intensity limits foraging activity in nocturnal and crepuscular bees. *Behavioral Ecology*, 17(1), 63–72. <https://doi.org/10.1093/beheco/arj001>
- Kerfoot, W. B. (1967). The lunar periodicity of *Sphex dogastrus texana*, a nocturnal bee (Hymenoptera: Halictidae). *Animal Behaviour*, 15, 479–486.
- Kevan, P. G., Hussein, M. Y., Hussey, N. & Wahid, M. B. (1986). Modelling the use of *Elaeidobius kamerunicus* for pollination of oil palm. *The Planter*, 62, 89–99.
- Kevan, P. G. (1999). Pollinators as bioindicators of the state of the environment: species, activity and diversity. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 74, 373–393.
- Khalifa, S. A. M., Elshafey, E. H., Shetaia, A. A., El-Wahed, A. A. A., Algethami, A. F., Musharraf, S. G., AlAjmi, M. F., Zhao, C., Masry, S. H. D., Abdel-Daim, M. M., Halabi, M. F., Kai, G., Al Naggar, Y., Bishr, M., Diab, M. A. M., & El-Seedi, H. R. (2021). Overview of bee pollination and its economic value for crop production. *Insects*, 12(8), 688. <https://doi.org/10.3390/insects12080688>
- Kingazi, N., Temu, R.-A., Sirima, A., & Jonsson, M. (2024). Pollination knowledge among local farmers in northern Tanzania and the role of traditional agroforestry practices in promoting pollinator forage plants. *Environmental and Sustainability Indicators*, 23, 100435. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100435>
- Klein, A. M., Vaissière, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., et al. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proc Biol Sci*, 274(1608), 303–313.
- Kleinert-Giovannini, A. (1982). Influence of climatic factors on flight activity of *Plebeia emerina* Friese (Hymenoptera, Apidae, Meliponinae). in winter. *Revista Brasileira de Entomologia*, 26, 13.
- Knop, E., Gerpe, C., Ryser, R., Hofmann, F., Menz, M. H. M., Trösch, S. et al. (2018). Rush hours in flower visitors over a day-night cycle. *Insect Conserv. Divers* 11, 267–275 <https://doi.org/10.1111/icad.12277>
- Koh, I., Lonsdorf, E. V., Artz, D. R., Pitts-Singer, T. L. & Ricketts, T. H. (2018). Ecology and economics of using native managed bees for almond pollination. *J Econ Entomol.*, 111(1), 16–25.
- Kremen, C., Williams, N. M., Aizen, M. A., Gemmill-Herren, B., Lebuhn, G., Minckley, R., packer, L., Potts, S. G., Roulston, T. A., Steffan-Dewenter, I., Vazquez, D. P., Winfree, R., Adams, L., Crone, E. E., Greenleaf, S. S., Keitt, T. H., Klein, A. M., Regetz, J., & Ricketts, T. H. (2007). Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: a conceptual framework for the effects of land-use change. *Ecol. Lett.*, 10, 299–314.
- Labarca, M. V., & Narváez, Z. (2009). Identificación y fluctuación poblacional de insectos polinizadores en palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacquin). en el sur del lago de Maracaibo, estado Zulia, Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 26(3), 305–324.
- Lautenbach, S., Seppelt, R., Liebscher, J., & Dormann, C. F. (2012). Spatial and temporal trends of global pollination benefit. *PLoS ONE*, 7(4), e35954. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035954>
- Laws, A. N. (2017). Climate change effects on predator-prey interactions. *Curr Opin Insect* 406(23), 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2017.06.010>
- LeCroy, K. A., Shew, H. W. & van Zandt, P. A. (2013). Pollen presence on nocturnal moths in the Ketona Dolomite glades of Bibb County, Alabama. *Southern Lepidopterists' News*, 35, 136–142.
- Lindstrom, S. A. M., Herbertsson, L., Rundlöf, M., Bommarco, R., & Smith, H. G. (2016). Experimental evidence that honeybees depress wild insect densities in a flowering crop. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, 283, 20161641.
- Liss, K. N., Mitchell, M. G. E., MacDonald, G. K., Mahajan, S. L., Méthot, J., Jacob, A. L., Maguire, D. Y., Metson, G. S., Ziter, C., Dancose, K., Martins, K., Terrado, M., & Bennett, E. M. (2013). Variability in ecosystem service measurement: a pollination service case study. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(8), 414–422.
- López, E. & Rojas, R. (1992). Artrópodos asociados a la floración del chirimoyo (*Annona cherimolia* Mill.) en la localidad de Quillota, Quinta Región, Chile. *Acta Entomológica Chilena*, 17, 101–106.
- López, E., & Uquillas, C. (1997). *Carpophilus hemipterus* (Coleoptera: Nitidulidae). como agente polinizante de chirimoyo (*Annona cherimolia* Mill.) bajo condiciones controladas. *Acta Entomológica Chilena*, 21, 89–92.
- Llodrà-Llabrés, J. & Cariñanos, P. (2022). Enhancing pollination ecosystem service in urban green areas: An opportunity for the conservation of pollinators, *Urban Forestry & Urban Greening*, 74, 127621. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127621>
- Lundin, O., Smith, H. G., Rundlöf, M. & Bommarco, R. (2013). When ecosystem services interact: crop pollination benefits depend on the level of pest control. *Proc. R. Soc. B*, 280, 201224320122243. <http://doi.org/10.1098/rspb.2012.2243>
- McGregor, S. (1976). Insect pollination of cultivated crop plants. Washington (DC): US Department of Agriculture, Agriculture Handbook 496.
- McGregor, S. E., (2002). Insect Pollination of Cultivated Crop Plants. Agriculture Research Service.
- MacGregor, C. J., Pocock, M. J. O., Fox, R. & Evans, D. M. (2015). Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of light pollution: a review. *Ecol. Entomol.*, 40, 187–198. <https://doi.org/10.1111/een.12174>
- MacGregor, C. J., & Scott-Brown, A. S. (2020). Nocturnal pollination: an overlooked ecosystem service vulnerable to environmental change. *Emerging Topics in Life Sciences*, 4(1), 19–32. <https://doi.org/10.1042/etls20190134>
- MacInnis, G. & Forrest, J. R. K. (2019). Pollination by wild bees yields larger strawberries than pollination by honey bees. *J Appl Ecol.*, 56(4), 824–832.
- Majewska, A. A. & Altizer, S. (2020). Planting gardens to support insect pollinators. *Conserv. Biol.* 34, 15–25. <https://doi.org/10.1111/cobi.13271>
- Mandelik, Y., & Roll, U. (2009). Diversity patterns of wild bees in almond orchards and their surrounding landscape. *Isr J Plant Sci.*, 57(3), 185–191.
- Mallinger, R. E. & Gratton, C. (2015). Species richness of wild bees, but not the use of managed honeybees, increases fruit set of a pollinator-dependent crop. *J Appl Ecol.*, 52(2), 323–330.
- Memmott, J. (1999). The structure of a plant-pollinator food web. *Ecology Letters*, 2(5), 276–280. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.1999.00087.x>
- Menz, M. H. M., Phillips, R. D., Winfree, R., Kremen, C., Aizen, M. A., Johnson, S. D., & Dixon, K. W. (2011). Reconnecting plants and pollinators: challenges in the restoration of pollination mutualisms trends. *Plant Sci.*, 16, 4–12. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.09.006>
- Michener, C. D. (1974). The social behavior of the bees: a comparative study (Vol. 73, No. 87379). Harvard University Press.
- Miñarro, M., García, D., & Martínez, R. (2018). Los insectos polinizadores en la agricultura: importancia y gestión de su biodiversidad: *Ecosistemas*, 27(2), 81–90. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1394>
- Miyake, T., & Yahara, T. (1998). Why does the flower of *Lonicera japonica* open at dusk? *Can. J. Bot.*, 76, 1806–1811. <https://doi.org/10.1139/b98-119>
- Morse, R. A. & Calderone, N. W. (2000). The value of honey bees as pollinators of U.S. crops in 2000. *Bee Cult*, 128, 1–15.
- Nabors, A., Hung, K. L. J., Corkidi, L., et al. (2022). California native perennials attract greater native pollinator abundance and diversity than nonnative, commercially available ornamentals in Southern California. *Environ. Entomol.* 51, 836–847. <https://doi.org/10.1093/ee/nvac046>
- Nicolson, S. & Human, H. (2013). Chemical composition of the 'low quality' pollen of sunflower (*Helianthus annuus*, Asteraceae). *Apidologie*, 44, 144–152. <https://doi.org/10.1007/s13592-012-0166-5>

- Nicholls, E., & Hempel de Ibarra, N. (2017). Assessment of pollen rewards for foraging bees. *Functional Ecology*, 31, 76–87.
- Nieto, A., Roberts, S. P. M., Kemp, J., Rasmont, P., Kuhlmann, M., García Criado, M., et al. (2014). European Red List of bees. Luxembourg: Publication Office of the European Union.
- Norgate, M., Boyd-Gerny, S., Simonov, V., Rosa, M. G. P., Heard, T. A. & Dyer, A. G. (2010). Ambient temperature influences Australian native stingless bee (*Trigona carbonaria*). preference for warm nectar. *PLoS One*, 5, e12000. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012000>
- Ollerton, J., Winfree, R., & Tarrant, S. (2011). How many flowering plants are pollinated by animals? *Oikos*, 120, 321–326.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2008. Polinización, un servicio del ecosistema.
- Osborne, J. L., Martin, A. P., Carreck, N. L., Swain, J. L., Knight, M. E., Goulson, D., Hale, R. J., & Sanderson, R. A. (2008). Bumblebee flight distances in relation to the forage landscape. *The Journal of Animal Ecology*, 77(2), 406–415.
- Otieno, M., Woodcock, B. A., Wilby, A., Vogiatzakis, I. N., Mauchline, A. L., Gikungu, M. W., & Potts, S. G. (2011). Local management and landscape drivers of pollination and biological control services in a Kenyan agro-ecosystem. *Biological Conservation*, 144, 2424–2431.
- Pan, K., Marshall, L., Biesmeijer, K., & de Snoo, G. R. (2022). The distributions of insect, wind and self pollination of plants in the Netherlands in relation to habitat types and 3D vegetation structure. *J Pollinat Ecol*, 31, 16–28.
- Pantoja, A., Smith-Pardo, A., & García, Anamaria (2014). Principios y avances sobre polinización como servicio Ambiental para la agricultura sostenible en países de Latinoamérica y el Caribe. Edit FAO. 52 pp.
- Pereboom, J. J. & Biesmeijer, J. C. (2003). Thermal constraints for stingless bee foragers: the importance of body size and coloration. *Oecologia*, 137, 42–50. <https://doi.org/10.1111/bv.12366>
- Perianes-Rodríguez, A., Waltman, L., & van Eck, N. J. (2016). Constructing bibliometric networks: A comparison between full and fractional counting. *Journal of Informetrics*, 10(4), 1178–1195. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2016.10.006>
- Peris, D., Postigo-Mijarra, J. M., Peñalver, E., Pellicer, J., Labandeira, C. C., Peña-Kairath, C., Pérez-Lorenzo, I., Sauquet, H., Delclòs, X., & Barrón, E. (2024). The impact of thermogenesis on the origin of insect pollination. *Nature Plants*, 10(9), 1297–1303. <https://doi.org/10.1038/s41477-024-01775-z>
- Pires, C. S. S., & Maués, M. M. (2020). Insect pollinators, major threats and mitigation measures. *Neotrop Entomol*, 49(4), 469–471.
- Polatto, L. P., Chaud-Netto, J., & Alves-Junior, V. V. (2014). Influence of abiotic factors and floral resource availability on daily foraging activity of bees. *Journal of Insect Behavior*, 27, 593–612.
- Porto, R. G., de Almeida, R. F., Cruz-Neto, O., Tabarelli, M., Viana, B. F., Peres, C. A., & Lopes, A. V. (2020). Pollination ecosystem services: A comprehensive review of economic values, research funding and policy actions. *Food Security*, 12(6), 1425–1442. <https://doi.org/10.1007/s12571-020-01043-w>
- Potts, S. G., Biesmeijer, J. C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O. & Kunin, W. E. (2010). Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends Ecol Evol*, 25(6), 345–53.
- Potts, S. G., Imperatriz-Fonseca, V. L., Ngo, H. T., Aizen, M. A., Biesmeijer, J. C., Breeze, T. D. & Viana, B. F. (2016). Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*, 540(7632), 220–229. <https://doi.org/10.1038/nature20588>
- Ramírez-Mejía, A. F., Lomáscolo, S., & Blendinger, P. G. (2023). Hummingbirds, honeybees, and wild insect pollinators affect yield and berry quality of blueberries depending on cultivar and farm's spatial context. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 342, 108229.
- Randle-Boggis, R., White, P. C. L., Cruz, J., Parker, G., Montag, H., Scurlock, J., & Armstrong, A. (2020). Realising co-benefits for natural capital and ecosystem services from solar parks: A codeveloped, evidence-based approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 125, 109775. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109775>
- Rands, S. A. & Whitney, A. M. (2008). Floral temperature and optimal foraging: is heat a feasible floral reward for pollinators? *PLoS One* 3, e269. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002007>
- Reddy, P. R., Rashmi, T., & Verghese, A. (2015). Foraging activity of Indian honey bee *Apis cerana*, in relation to ambient climate variables under tropical conditions. *J. Environ. Bio*, 136, 577–581.
- Ribi, W. A., & Warrant, E. J. (2020). Spatial vision and visually guided behavior in Apidae. *Insects*, 11(3), 199. <https://doi.org/10.3390/insects11030199>
- Richards, K. W. (1993). Non-Apis bees as crop pollinators. *Rev Suisse Zool*, 100, 807–822.
- Richards, A. J. (2001). Does low biodiversity resulting from modern agricultural practice affect crop pollination and yield? *Annals Bot*, 88, 165–172.
- Ricketts, T. H., Regetz, J., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., Bodgancki, A., Gemmil-Herren, B., Greenleaf, S. S., Klein, A. M., Mayfield, M. M., Morandin, L. A., Ochieng, A., Potts, S. G., & Viana, B. F. (2008). Landscape effects of on crop pollination services, are there general patterns? *Ecol. Lett.*, 57(4), 157–176.
- Robinson, W. S., Nowogrodzki, R., & Morse, R. A. (1989). The value of honey bees as pollinators of the United States crops. *Am Bee J*, 129, 477–487.
- Rollin, O., & Garibaldi, L. A. (2019). Impacts of honeybee density on crop yield: A meta-analysis. *The Journal of Applied Ecology*, 56(5), 1152–1163.
- Sanderson, R. A., Goffe, L. A., & Leifert, C. (2015). Time-series models to quantify short-term effects of meteorological conditions on bumblebee forager activity in agricultural landscapes. *Agric For Entomol*, 17, 270–276. <https://doi.org/10.1111/afe.12102>
- Santibañez, F., Joseph, J., Abramson, G., Kuperman, M. N., Laguna, M. F., & Garibaldi, L. A. (2022). Designing crop pollination services: A spatially explicit agent-based model for real agricultural landscapes. *Ecological Modelling*, 472, 110094.
- Shapira, T., Roth, T., Bar, A., Coll, M., & Mandelik, Y. (2023). Complex Effects of a Land-Use Gradient on Pollinators and Natural Enemies: Natural Habitats Mitigate the Effects of Aphid Infestation on Pollination Services. *Insects*, 14, 872. <https://doi.org/10.3390/insects14110872>
- Shaw, R. F., Phillips, B. B., Doyle, T., Pell, J. K., Redhead, J. W., Savage, J., Woodcock, B. A., Bullock, J. M., & Osborne, J. L. (2020). Mass-flowering crops have a greater impact than semi-natural habitat on crop pollinators and pollen deposition. *Landscape Ecology*, 35(2), 513–527.
- Schweiger, O., Biesmeijer, J. C., Bommarco, R., Hickler, T., Hulme, P. E., Klotz, S. et al (2010). Multiple stressors on biotic interactions: how climate change and alien species interact to affect pollination. *Biol Rev*, 85, 777–795. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2010.00125.x>
- Sinu, P. A., Sibisha, V. C., Reshmi, M. V. N., Reshmi, K. S., Jasna, T. V., Aswathi, K., & Megha, P. P. (2017). Invasive ant (*Anoplolepis gracilipes*). disrupts pollination in pumpkin. *Biol. Invasions*, 19, 2599–2607.
- Soares, K. O., Lima, M. V., Evangelista-Rodrigues, A., Silva, A. A. F., Silva, F. J. D. A., Lima, A. I. B., & Da Costa, C. R. G. (2019). Factors influencing the foraging behavior of *Trigona spinipes* (Apidae, Meliponinae). *Biological Rhythm Research*, 1–11.
- Solar Energy UK. (2019). The Natural Capital Value of Solar. <https://solarenergyuk.org/resource/natural-capital/>
- Somanathan, H., Kelber, A., Borges, R. M., Wallén, R., & Warrant, E. J. (2009). Visual ecology of Indian carpenter bees II: adaptations of eyes and ocelli to nocturnal and diurnal lifestyles. *Journal of Comparative Physiology A*, 195, 571–583.
- Spaethe, J., & Briscoe, A. D. (2005). Molecular characterization and expression of the UV opsin in bumblebees: Three opsin genes in *Bombus terrestris*. *Journal of Experimental Biology*, 208(20), 3775–3787. <https://doi.org/10.1242/jeb.01833>
- Steffan-Dewenter, I., & Kuhn, A. (2003). Honeybee foraging in differentially structured landscapes. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 270, 569–575.
- Sung, I., Yamane, S., Lu, S. S., & Ho, K. K. (2011). Climatological Influences on the Flight Activity of Stingless Bees (*Lepidotrigona hoozana*). and Honeybees (*Apis cerana*). in Taiwan (Hymenoptera, Apidae). *Sociobiology*, 58, 835–850.
- Sutter, L., & Albrecht, M. (2016). Synergistic interactions of ecosystem services: Florivorous pest control boosts crop yield increase through insect pollination. *Proceedings. Biol. Sci. R. Soc.*, 283, 20152529.
- Tanda, A. S. (2024). Insect pollination: An incredible natural service for food sustainability in agroecosystems-A review. *Agricultural Research Journal*, 61(5), 668–684. <https://doi.org/10.5958/2395-146x.2024.00082.7>
- Trani, J. C. D., Ramírez, V. M., Añino, Y., & Barba, A. (2022). Environmental conditions and bee foraging on watermelon crops in Panama. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, 10(4), 1–9. <https://doi.org/10.31893/jabb.22034>
- Theodorou, P., Albig, K., Radzevičiūtė, R., Settele, J., Schweiger, O., Murray, T. E. & Paxton, R. J. (2017). The structure of flower visitor networks in relation to pollination across an agricultural to urban gradient. *Funct. Ecol.*, 31, 838–847. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12803>
- Thompson, H. M. (2001). Assessing the exposure and toxicity of pesticides to bumblebees (*Bombus* sp.). *Apidologie*, 32, 305–321.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418, 671–677.
- Tinoco, B. A., Santillán, V. E., & Graham, C. H. (2018). Land use change has stronger effects on functional diversity than taxonomic diversity in tropical Andean hummingbirds. *Ecology and Evolution*, 8(6), 3478–3490.

- Tomé, H. V. V., Martins, G. F., Lima, M. A. P., Campos, L. A. O., & Guedes, R. N. C. (2015). Imidacloprid-induced impairment of mushroom bodies and behavior of the native stingless bee *Melipona quadrifasciata anthidioides*. *Ecotoxicology*, 24(5), 1304-1316. <https://doi.org/10.1007/s10646-015-1489-6>
- Torres-Ruiz, A., Jones, R. W., & Ayala-Barajas, R. (2013). Present and Potencial Use of Bees as Managed Pollinators in México. *Southwestern Entomologist* 38, 133-147.
- Tscharntke, T. (2021). Disrupting plant-pollinator systems endangers food security. *One Earth (Cambridge, Mass.)*, 4(9), 1217-1219. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.08.022>
- Tscharntke, T., Clough, Y., Wanger, T. C., Jackson, L., Motzke, I., Perfecto, I., & Whitbread, A. (2012). "Global Food Security, Biodiversity Conservation and the Future of Agricultural Intensification. *Biological Conservation*, 151(1), 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.01.068>
- Tscharntke, T., Tylanakis, J. M., Rand, T. A., Didham, R. K., Fahrig, L., Batáry, P., Bengtsson, J., Clough, Y., Crist, T. O., Dormann, C. F., Ewers, R. M., Fründ, J., Holt, R. D., Holzschuh, A., Klein, A. M., Kleijn, D., Kremen, C., Landis, D. A., Laurance, W., & Westphal, C. (2012). Landscape moderation of biodiversity patterns and processes—Eight hypotheses. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 87(3), 661-685.
- Turpie, J. K., Heydenrych, B. J., & Lamberth, S. J. (2003). Economic value of terrestrial and marine biodiversity in the Cape Floristic region: implications for defining effective and socially optimal strategies. *Biol Cons*, 112, 233-251.
- Urbina, Á., Vicencio, V., Hormaza, J. I., Tobar, S., Aguado, L. O., Lora, J., García, C., Labarca, J., & Gratacós, E. (2021). *Melanophthalma* Motschulsky, 1866 (Coleoptera: Latridiidae). como visitante floral de *Annona cherimola* Miller, 1768 (Magnoliales: Annonaceae). en Chile central. *Revista chilena de entomología*, 47(2), 305-310. <https://doi.org/10.35249/rche.47.2.21.16>
- van der Putten, W.H., Macel, M. & Visser, M.E. (2010). Predicting species distribution and abundance responses to climate change: why it is essential to include biotic interactions across trophic levels. *Phil Trans R Soc B*, 365, 2025-2034. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0037>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523-538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Vergara, H. C., & Badano, E. I. (2009). Pollinator diversity increases fruit production in Mexican coffee plantations: the importance of rustic management systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 129, 117-123.
- Vicens, N., & Bosch, J. (2000). Weather-dependent pollinator activity in an apple orchard, with special reference to *Osmia cornuta* and *Apis mellifera* (Hymenoptera: Megachilidae and Apidae). *Environmental Entomology*, 29, 413-420.
- Warrant, E. J., Kelber, A., Wallén, R., & Wcislo, W. T. (2006). Ocellar optics in nocturnal and diurnal bees and wasps. *Arthropod structure & development*, 35, 293-305.
- Warrant, E. J. (2008). Seeing in the dark: vision and visual behaviour in nocturnal bees and wasps. *Journal of Experimental Biology*, 211, 1737-1746.
- Whitney, H. M., Dyer, A., Chittka, L., Rands, S. A., & Glover, B. J. (2008). The interaction of temperature and sucrose concentration on foraging preferences in bumblebees. *Naturwissenschaften*, 95, 845-850. <https://doi.org/10.1007/s00114-008-0393-9>
- Willmer, P. G., & Stone, G. N. (2004). Behavioral, ecological, and physiological determinants of the activity patterns of bees. *Advances in the Study of Behavior*, 34, 347-466.
- Willmer, P. (2011). *Pollination and Floral Ecology*. Princeton University Press. Williams, I.H. (1996). Aspects of bee diversity and crop pollination in the European Union. In: Matheson A, Buchmann SL, O'Toole C, Westrich P, Williams IH, editors. *The Conservation of Bees*. New York: Academic Press. pp. 63-80.
- Winder, J. A. (1977). Field observations on Ceratopogonidae and other Diptera: Nematocera associated with cocoa flowers in Brazil. *Bulletin of Entomological Research*, 67(1), 57-63. <https://doi.org/10.1017/S0007485300010890>
- Winfree, R., Gross, B. J., & Kremen, C. (2011). Valuing pollination services to agriculture. *Ecol. Econ.*, 71, 80-88.
- Yocgo, R. E. E., Hitimana, I., Hakizimana, M., & Birachi, E. A. (2023). Insect pollinators can unlock an annual monetary value of more than US \$100 million from crop production in Rwanda. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46936-w>
- Zariman, N. A., Omar, N. A., & Huda, A. N. (2022). Plant Attractants and Rewards for Pollinators: Their Significant to Successful Crop Pollination. *Int. J. Life Sci. Biotechnol.*, 5, 270-293.