

Artigo

Interseções entre ecologia e geotecnologias: duas décadas de avanços no estudo de abelhas e polinizadores por sensoriamento remoto (2005 a 2025)

Intersections between ecology and geotechnologies: two decades of advances in the study of bees and pollinators by remote sensing (2005 to 2025)

Leonardo Souza do Prado Júnior¹, Adryele Gomes Maia², Abacar Augusto Joaquin³ e Janaína Barbosa da Silva⁴

¹Doutorando em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais pela Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba. ORCID: 0000-0001-5195-0389. E-mail: leonardosouzadopradojr@gmail.com;

²Doutoranda em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais pela Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba. ORCID: 0000-0002-7433-7138. E-mail: adryelegm@gmail.com;

³Mestrando em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais pela Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba. ORCID: 0009-0007-7145-4279. E-mail: abacaraugusto2020brazil@gmail.com;

⁴Doutora em Geografia pela Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco. Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais pela Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba. ORCID: 0000-0001-6366-2165. E-mail: janainasimov@yahoo.com.br.

Submetido em: 02/11/2025, revisado em: 05/11/2025 e aceito para publicação em: 12/11/2025.

RESUMO: Este estudo apresenta uma análise bibliométrica abrangente sobre a aplicação do sensoriamento remoto em pesquisas envolvendo abelhas e polinizadores entre os anos de 2005 e 2025. Foram identificados 306 artigos na base *Web of Science*, os quais revelam um crescimento contínuo e expressivo da produção científica, especialmente a partir de 2015. A expansão está associada ao avanço das tecnologias de observação da Terra e à consolidação de abordagens interdisciplinares que integram ecologia, geotecnologias e conservação da biodiversidade. Os resultados evidenciam três polos principais de colaboração científica — América do Norte, Europa e países emergentes como Brasil, China e África do Sul —, destacando o fortalecimento de redes internacionais e institucionais. A análise das palavras-chave e das coocorrências temáticas revela dois eixos dominantes: o biológico-genético e o ecológico-espacial, refletindo a integração entre genética, ecologia e sensoriamento remoto. Conclui-se que o campo vem evoluindo de estudos descritivos para abordagens multiescalares e preditivas, apoiadas em tecnologias como LiDAR, UAVs e aprendizado de máquina, consolidando o sensoriamento remoto como ferramenta essencial para o monitoramento e a conservação de abelhas e seus habitats.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Abelhas; Polinizadores; Bibliometria; Ecologia da paisagem.

ABSTRACT: This study presents a comprehensive bibliometric analysis on the application of remote sensing in research involving bees and pollinators between the years 2005 and 2025. A total of 306 articles were identified in the *Web of Science* database, which reveal a continuous and significant growth in scientific production, especially from 2015 onwards. The expansion is associated with the advancement of Earth observation technologies and the consolidation of interdisciplinary approaches that integrate ecology, geotechnologies and biodiversity conservation. The results show three main poles of scientific collaboration — North America, Europe, and emerging countries such as Brazil, China, and South Africa — highlighting the strengthening of international and institutional networks. The analysis of the keywords and thematic co-occurrences reveals two dominant axes: the biological-genetic and the ecological-spatial, reflecting the integration between genetics, ecology and remote sensing. It is concluded that the field has been evolving from descriptive studies to multi-scale and predictive approaches, supported by technologies such as LiDAR, UAVs and machine learning, consolidating remote sensing as an essential tool for monitoring and conserving bees and their habitats.

Keywords: Remote sensing; Bees; Pollinators; Bibliometrics; Landscape ecology.

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A polinização constitui um dos serviços ecossistêmicos de maior relevância para a produção agrícola sustentável, sendo indispensável à reprodução de inúmeras plantas cultivadas. As florações requerem vetores para a transferência de pólen, tanto bióticos quanto abióticos, entre os quais se destacam insetos, aves, morcegos e outros animais — sendo os insetos os mais eficientes e frequentes (FAO, 2016; Katumo et al., 2022). A diversidade e a abundância desses polinizadores exercem influência direta sobre a produtividade agrícola, resultando em colheitas mais uniformes, de maior rendimento e com melhor qualidade de frutos (IPBES, 2016; Turo et al., 2024).

Estima-se que mais de 75% das culturas alimentares globais dependam, ao menos em parte, de polinizadores animais, com os insetos respondendo por grande parte desse serviço (IPBES, 2016; Van Der Sluijs; Vaage, 2016). Nesse contexto, as abelhas assumem papel central por sua eficácia e especialização em diversos ecossistemas agrícolas, bem como por sua relevância econômica e ecológica, ao realizarem parcela substancial da polinização comercial global (Hutchinson et al., 2022; Reilly et al., 2024).

Há evidências de que a capacidade de serviço de polinização oferecida por abelhas manejadas pode não ser suficiente para suprir toda a demanda agrícola global em determinadas regiões. Em âmbito mundial, embora o número de colônias de abelhas tenha aumentado, esse

crescimento tem sido inferior ao incremento da demanda por culturas dependentes de polinização — aproximadamente 2,3 vezes maior entre 1989 e 2019, em contraste com um crescimento anual de apenas 0,95% no estoque de colônias (Mashilingi et al., 2022).

Nesse cenário, o uso de tecnologias de monitoramento, como o sensoriamento remoto, tem se mostrado uma alternativa promissora, pois possibilita avaliar a disponibilidade de habitats, a dinâmica da cobertura vegetal e a oferta de recursos florais em diferentes escalas, além de permitir análises mais precisas sobre a capacidade de suporte ambiental para polinizadores. Essa abordagem contribui ainda para o mapeamento de áreas prioritárias à conservação, a previsão de períodos críticos de escassez de forragem e o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficazes (Ariza et al., 2022; Barnsley; Lovett; Dicks, 2022; Gonzales; Hempel de Ibarra; Anderson, 2022).

O sensoriamento remoto consiste no uso de sensores capazes de captar informações da superfície terrestre sem contato direto, utilizando plataformas como satélites, aeronaves e drones. Esse recurso tem se consolidado como uma ferramenta estratégica para a ecologia da paisagem e o monitoramento ambiental (Jensen, 2009; Lillesand; Kiefer; Chipman, 2015). O avanço dos sensores ópticos, hiperespectrais, térmicos e de sistemas LiDAR ampliou as possibilidades de análise, permitindo desde a caracterização da fenologia das plantas até a mensuração da estrutura da vegetação em alta resolução (Cavender-Bares et al., 2017).

Tais técnicas, quando integradas a dados de campo e modelos ecológicos, têm sido utilizadas como *proxies* de diversidade e funcionamento dos ecossistemas, oferecendo uma visão multiescalar das relações entre paisagem, recursos florais e dinâmica populacional de polinizadores (Gonzales; Hempel de Ibarra; Anderson, 2022; Rocchini et al., 2016).

Para compreender a evolução das pesquisas sobre abelhas no campo do sensoriamento remoto, este estudo realiza uma análise bibliométrica sistemática da produção

científica no período de 2005 a 2025, utilizando os softwares **CiteSpace** (Chen, 2006), **Bibliometrix R-package** (Dervis, 2019) e **VOSviewer** (Van Eck; Waltman, 2010). A investigação buscou identificar o estado atual do conhecimento, os tópicos emergentes e as tendências de pesquisa que relacionam o sensoriamento remoto à ecologia de abelhas e à conservação da biodiversidade. Ao mapear e analisar a literatura existente, pretende-se oferecer uma base científica sólida que sirva de referência para o avanço de estudos futuros nesse domínio interdisciplinar.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 FONTES DE DADOS

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir da Web of Science (WOS) Core Collection, no Science Citation Index (SCI), abrangendo o período de 2005 a 2025, conforme detalhado no Quadro 1. A escolha dessa base justifica-se por sua relevância, abrangência internacional e rigor científico, assegurando acesso à literatura acadêmica de alta qualidade.

A estratégia de busca utilizou combinações de palavras-chave relacionadas a abelhas e polinizadores (por exemplo: “abelh”, “bee*”, “pollinator*”, “Apis mellifera”, “stingless bee*”, “meliponíneo*” e *Bombus*) associadas a termos referentes ao sensoriamento remoto e geotecnologias (“remote sensing”, “sensoriamento remoto”, “satellite imagery”, “NDVI”, “EVI”, “multispectral”, “hyperspectral”, “drone”, “UAV”, “GIS” e “LiDAR”).

Para refinar os resultados, foram aplicadas palavras-chave de exclusão (“conference”, “proceedings”, “review”, “meta-analysis”, “honey quality”, “beekeeping” e “apitherapy”). A triagem final incluiu a remoção manual de duplicatas e de documentos irrelevantes.

Como resultado, 306 artigos foram considerados pertinentes para esta revisão, constituindo uma base sólida para a análise bibliográfica subsequente.

Quadro 1 – Estratégia de busca para revisão de literatura sobre abelhas e sensoriamento remoto (2005–2025)

Componente	Descrição	Expressão de consulta	Observações
Fonte de dados	SCI dentro da Coleção Principal WOS	–	Abrange o período de 2005 a 2025.
Palavras-chave	Estudos sobre abelhas e polinizadores	TS = (“abelh*” OR “bee*” OR “pollinator*” OR “Apis mellifera” OR “stingless bee*” OR “meliponíneo*” OR <i>Bombus</i> *)	Inclui termos em português e inglês, contemplando singular, plural e principais gêneros de interesse.
Métodos	Técnicas de sensoriamento remoto aplicado à ecologia	TS = (“remote sensing” OR “sensoriamento de remoto” OR “satellite imagery” OR “NDVI” OR “EVI” OR “multispectral” OR “hyperspectral” OR “drone” OR UAV* OR geotecnologias. GIS OR LiDAR OR LIDAR)	Abrange desde sensoriamento por satélite até <i>drones</i> e GIS.
Objetivos	Habitat, distribuição, serviços ecossistêmicos e conservação	TS = (“habitat” OR “distribution” OR “conservation” OR “ecosystem services” OR “landscape ecology” OR “biodiversity”)	Direciona para estudos de ecologia, conservação e dinâmica espacial das abelhas.
Exclusões	Exclusão de tópicos não pertinentes	NOT TS = (“conference” OR “proceedings” OR “review” OR “meta-analysis” OR “honey quality” OR beekeeping OR apitherapy)	Evita artigos secundários, sobre qualidade de mel, apicultura comercial e revisões.

Componente	Descrição	Expressão de consulta	Observações
Limpeza de dados	de Remoção de duplicatas e irrelevantes	–	Triagem manual após exportação. Resultaram 306 artigos relevantes.

Notas: Notas: As pesquisas analisadas foram extraídas do Science Citation Index, disponível na Web of Science Core Collection, abrangendo o período de 2005 a 2025. A tabela apresenta estudos que empregam técnicas de sensoriamento remoto e geotecnologias aplicadas à análise de habitat, distribuição, serviços ecossistêmicos e conservação de abelhas e outros polinizadores. Foram excluídos os trabalhos relacionados à qualidade do mel, apicultura, apiterapia, bem como anais de congressos e artigos de revisão. Após um processo rigoroso de triagem, que incluiu a remoção de duplicatas e a verificação da relevância temática, foram selecionados 306 artigos considerados pertinentes à proposta do estudo.

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

2.2 MÉTODOS

Este estudo utiliza os softwares Bibliometrix (R-package 4.1.4), Cite Space 5.7.R5 e VOS viewer 1.6.20 para uma análise bibliométrica detalhada da literatura sobre abelhas e sensoriamento remoto entre 2005 e 2025. Primeiro, o pacote Bibliometrix foi empregado para identificar indicadores bibliométricos relevantes, incluindo número de publicações, citações, periódicos, autores e instituições, permitindo avaliar o desempenho da produção científica e a contribuição relativa de países, instituições e periódicos (Aria; Cuccurullo, 2017).

As etapas específicas envolveram a contagem de artigos publicados anualmente para discernir tendências no volume da literatura e avaliar a distribuição das principais forças de pesquisa com base na afiliação dos autores. Para analisar ainda mais as redes de colaboração e os pontos críticos de pesquisa, o Cite Space foi utilizado para construir mapas de conhecimento, revelando colaborações entre autores e instituições, além de identificar a base intelectual consolidada e os *hubs* emergentes relacionados à ecologia de polinizadores e ao sensoriamento remoto.

Além disso, a coocorrência de palavras-chave foi examinada com o VOS viewer, possibilitando a identificação de *clusters* temáticos e suas interconexões, destacando os tópicos centrais de cada publicação. A evolução das palavras-chave ao longo do tempo foi analisada com o Bibliometrix, evidenciando mudanças nas linhas de pesquisa e tendências futuras. O CiteSpace também foi empregado para detectar *bursts* de palavras-chave, revelando tópicos populares nos últimos anos e destacando áreas emergentes na interface entre ecologia de abelhas, sensoriamento remoto e conservação da biodiversidade.

```
DT=(ARTICLE OR EARLY ACCESS OR DATA
PAPER)
AND TS=(
("honey bee" OR "Apis mellifera" OR "stingless bee*"
OR meliponi* OR Bombus* OR pollinator*)
AND
("remote sensing" OR "satellite" OR drone* OR UAV*
OR GIS OR LiDAR OR LIDAR)
AND
(habitat OR distribution OR "ecosystem services" OR
conservation OR biodiversity)
)
```

```
NOT TS=(conference OR proceedings OR review OR
"meta-analysis" OR "honey quality" OR beekeeping OR
apitherapy)
```

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise bibliométrica identificou um total de **306 artigos publicados entre 2005 e 2025** relacionados à aplicação do sensoriamento remoto em pesquisas sobre abelhas e polinizadores. Esse conjunto de publicações evidencia um **crescimento gradual e consistente** ao longo das duas últimas décadas, com um aumento expressivo a partir de 2015 — período que coincide com o avanço das tecnologias de observação da Terra e o fortalecimento das discussões globais sobre serviços ecossistêmicos e biodiversidade. Tendência semelhante foi observada em outros campos da ecologia aplicada, nos quais a incorporação de geotecnologias passou a desempenhar papel central nas estratégias de monitoramento ambiental (Cavender-Bares et al., 2016; Arroyo-Rodríguez et al., 2020).

O comportamento ascendente da produção científica evidencia o amadurecimento da **interdisciplinaridade entre a ecologia de polinizadores e as ciências geoespaciais**. Inicialmente restritos a estudos de mapeamento de vegetação e uso do solo, os trabalhos mais recentes passaram a integrar índices de vegetação, modelagem espacial e dados de alta resolução para estimar a disponibilidade de recursos florais, a fragmentação de habitats e os padrões de uso da terra (Gonzales; Hempel de Ibarra; Anderson, 2022). Essa evolução metodológica reflete a consolidação do sensoriamento remoto como **ferramenta essencial de apoio às pesquisas de conservação e manejo de abelhas**, especialmente em paisagens agrícolas.

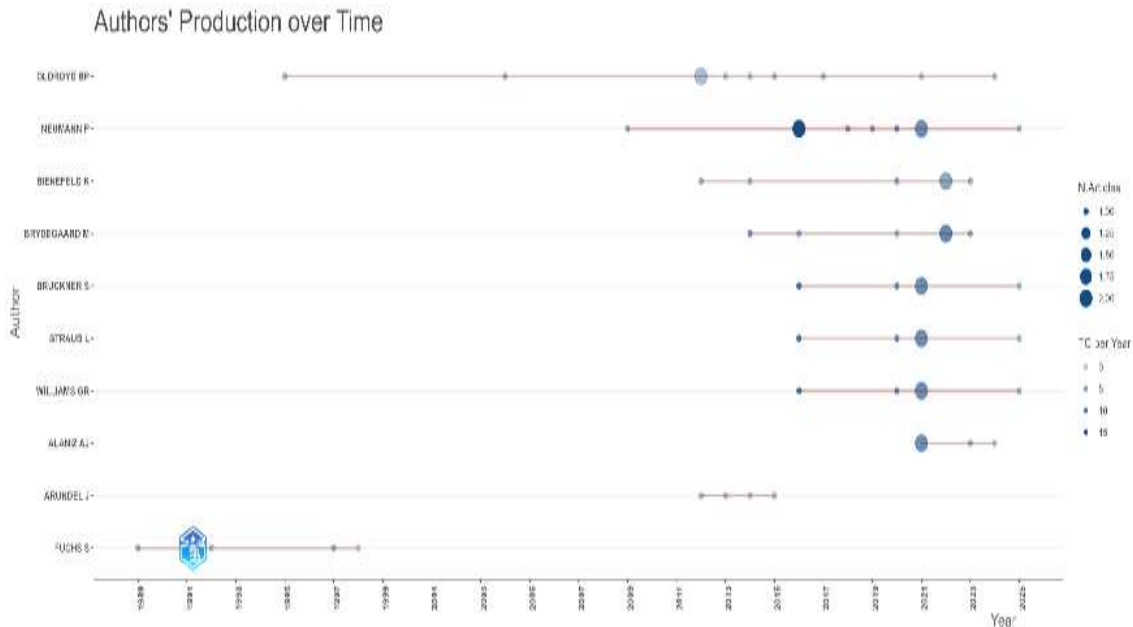
Além disso, observa-se que o ritmo de publicações acompanhou a **ampliação do uso de softwares e técnicas de análise espacial**, como NDVI, LiDAR e UAVs, que possibilitaram a obtenção de dados mais precisos sobre a dinâmica da vegetação e a estrutura dos habitats (Barnsley; Lovett; Dicks, 2022). A integração desses métodos aos estudos sobre polinização tem permitido uma compreensão mais abrangente das interações entre abelhas e ambiente, reforçando a relevância das tecnologias de sensoriamento remoto para a ecologia da paisagem e a conservação da biodiversidade (Ariza et al., 2022).

3.1 EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS PUBLICAÇÕES

A **Figura 1** demonstra a evolução temporal da produção científica dos principais autores que investigam a interface entre abelhas e sensoriamento remoto, segundo dados extraídos da base *Web of Science*. No eixo vertical

(y) estão listados os autores mais produtivos, enquanto o eixo horizontal (x) representa o período de publicação. Cada ponto ou bolha indica um ano de publicação; o tamanho da bolha corresponde ao número de artigos e a intensidade da cor reflete o impacto em citações.

Figura 1 – Tendência temporal das publicações científicas

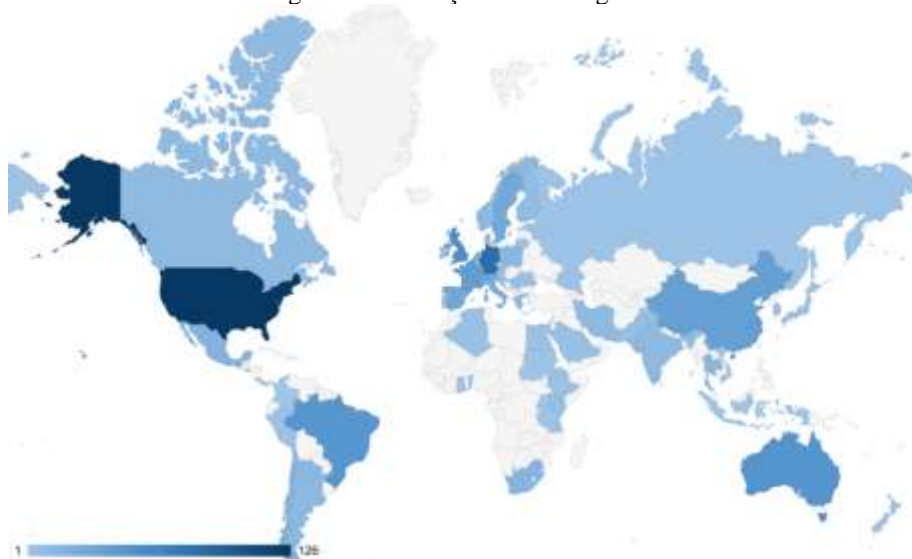


Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

A produção científica sobre o uso do sensoriamento remoto na pesquisa com abelhas apresentou **crescimento contínuo entre 2005 e 2025**, indicando o fortalecimento dessa interface interdisciplinar entre ecologia e geotecnologias. Nos primeiros anos do período analisado (2005–2010), os estudos eram escassos e majoritariamente exploratórios, com foco na

caracterização da cobertura vegetal e na identificação de habitats potenciais para polinizadores em diferentes países (Figura 2). Esses trabalhos pioneiros contribuíram para estabelecer os fundamentos metodológicos que sustentam as análises espaciais aplicadas à ecologia de abelhas (Jensen, 2009; Lillesand; Kiefer; Chipman, 2015).

Figura 2 – Produção científica global



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

A partir de 2015, observa-se um **crescimento expressivo e diversificado** da produção, impulsionado pela expansão tecnológica e pela aplicação de novas plataformas de coleta e análise de dados. Essa evolução permitiu aprimorar a avaliação da heterogeneidade da paisagem e da disponibilidade de recursos florais em escalas regionais e locais (Cavender-Bares et al., 2016; Ariza et al., 2022). Paralelamente, o fortalecimento da **agenda global de sustentabilidade**, impulsionado pelos **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)**, fomentou o interesse em compreender as relações entre mudanças ambientais e serviços ecossistêmicos de polinização (IPBES, 2016; FAO, 2016).

Entre 2020 e 2025, o campo atinge sua fase de **maior expansão**, caracterizada pela diversificação temática e pela adoção de abordagens integradas, combinando modelagem ecológica, análises de séries temporais e dados obtidos por *drones* (UAVs). Esses avanços possibilitaram o monitoramento mais detalhado da dinâmica sazonal da vegetação e a identificação de áreas críticas para a conservação de polinizadores nativos (Gonzales; Hempel de Ibarra; Anderson, 2022).

Os resultados indicam que o período mais recente se destaca por **maior densidade de publicações e colaborações interinstitucionais**, refletindo a consolidação do sensoriamento remoto como ferramenta essencial na ecologia da paisagem e na conservação da biodiversidade. Essa tendência reforça o papel estratégico das tecnologias espaciais na formulação de políticas públicas e no manejo sustentável de ecossistemas agrícolas e naturais (Arroyo-Rodríguez et al., 2020; Mashilingi et al., 2022).

Observa-se, ainda, um deslocamento das pesquisas **puramente descritivas para abordagens integradas e multiescalares**, incorporando dados espectrais, climáticos e ecológicos. Essa transição indica a maturidade científica da área e sua crescente relevância para o planejamento territorial e a gestão ambiental (Cavender-Bares et al., 2016; Rocchini et al., 2016).

Por fim, a análise temporal demonstra que, nos últimos cinco anos, o campo tem se orientado para **modelagens preditivas da disponibilidade de recursos florais** e para a **avaliação da vulnerabilidade de**

polinizadores em cenários de mudança climática, consolidando-se como uma das fronteiras mais promissoras da ecologia aplicada e das ciências ambientais (Turó et al., 2024; Reilly et al., 2024).

3.2 PRODUÇÃO CIENTÍFICA GLOBAL

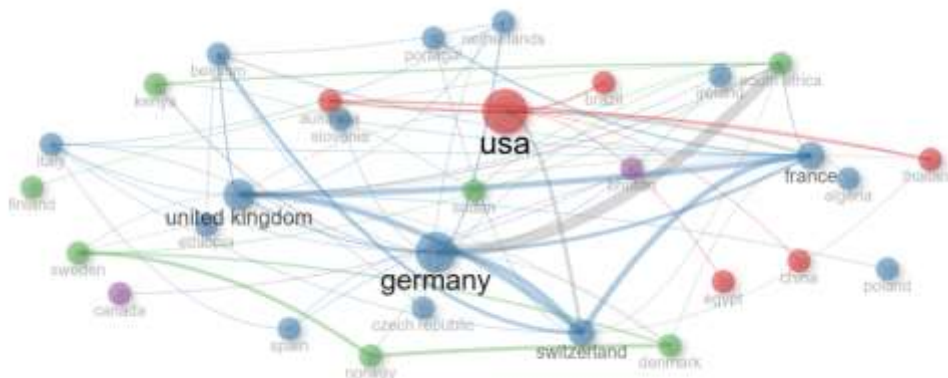
Os resultados evidenciam que o campo de pesquisa envolvendo abelhas e sensoriamento remoto tem apresentado **expansão significativa nas duas últimas décadas**, com destaque para o crescimento após 2015. O **mapa de calor mundial** (Figura 2) demonstra que Estados Unidos, Alemanha, Reino Unido, França e Suíça concentram o maior número de publicações, seguidos por China, Austrália e Brasil. Esse padrão reflete a liderança dos países do Hemisfério Norte na pesquisa ecológica aplicada e o fortalecimento de redes internacionais voltadas à conservação de polinizadores (IPBES, 2016; Gonzales; Hempel de Ibarra; Anderson, 2022).

A predominância norte-americana e europeia pode ser explicada pela **disponibilidade de infraestrutura tecnológica e bases de dados orbitais**, além do apoio institucional a programas de monitoramento ambiental e serviços ecossistêmicos. Entretanto, observa-se um aumento gradual da **participação de países do Sul Global**, como Brasil, China e África do Sul, sinalizando a internacionalização progressiva da agenda de pesquisa sobre polinizadores e ecossistemas tropicais (Ariza et al., 2022).

3.3 COLABORAÇÕES INTERNACIONAIS

A rede de coautoria entre países revela uma estrutura altamente conectada, com **três polos principais**: (i) um eixo central formado por Estados Unidos, Reino Unido e Alemanha, responsáveis pelas colaborações de maior densidade; (ii) um segundo grupo integrado por França, Suíça e Austrália; e (iii) um núcleo emergente composto por Brasil, China e África do Sul (Figura 3).

Figura 3 – Colaborações internacionais



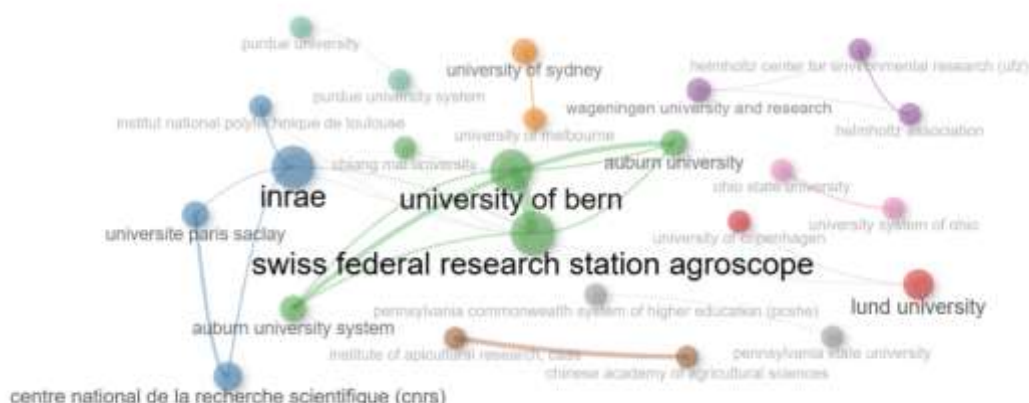
Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

3.4 PRODUÇÃO E COLABORAÇÕES INSTITUCIONAIS

Essas conexões reforçam o papel das nações desenvolvidas como centros de difusão de métodos e tecnologias, enquanto os países em desenvolvimento se consolidam como **territórios estratégicos de coleta de dados e estudos de campo**, principalmente em ecossistemas de alta biodiversidade (Barnsley; Lovett; Dicks, 2022). A ampliação dessas colaborações indica uma **mudança de paradigma** nas pesquisas sobre abelhas, que passam de estudos locais e taxonômicos para **análises espaciais integradas**, evidenciando avanços teóricos e metodológicos significativos (Cavender-Bares et al., 2016).

Na análise institucional, destacam-se a **University of Bern**, o **Swiss Federal Research Station Agroscop** e o **INRAE (França)** como instituições de maior centralidade e colaboração. Essa concentração europeia revela a influência de centros de excelência em **ecologia e agricultura sustentável**, que articulam redes interdisciplinares envolvendo universidades e agências de pesquisa (Figura 4).

Figura 4 – Produção e colaborações institucionais



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

3.5 AUTORES E REDES DE COAUTORIA

Outras instituições de destaque incluem a **Lund University (Suécia)**, o **Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)** e a **Auburn University System (EUA)**, que contribuem para a disseminação de abordagens baseadas em geotecnologias e modelagem espacial. Essas colaborações demonstram uma tendência de integração entre **dados de sensoriamento remoto e estudos populacionais e genéticos de abelhas**, ampliando a compreensão dos efeitos da fragmentação de habitats e das mudanças climáticas sobre a polinização (Arroyo-Rodríguez et al., 2020).

Os pesquisadores **Oldroyd B.P., Neumann P., Bienefeld K., Williams G.R. e Bruckner S.** são os autores mais produtivos e influentes no período analisado. Esses pesquisadores atuam de forma colaborativa, especialmente em estudos sobre **ecologia de abelhas manejadas, declínio populacional e saúde das colônias**. A análise temporal indica que Oldroyd B.P. apresenta uma trajetória contínua desde 1990, sendo um dos pioneiros na integração entre **genética e ecologia aplicada** (Figura 5).

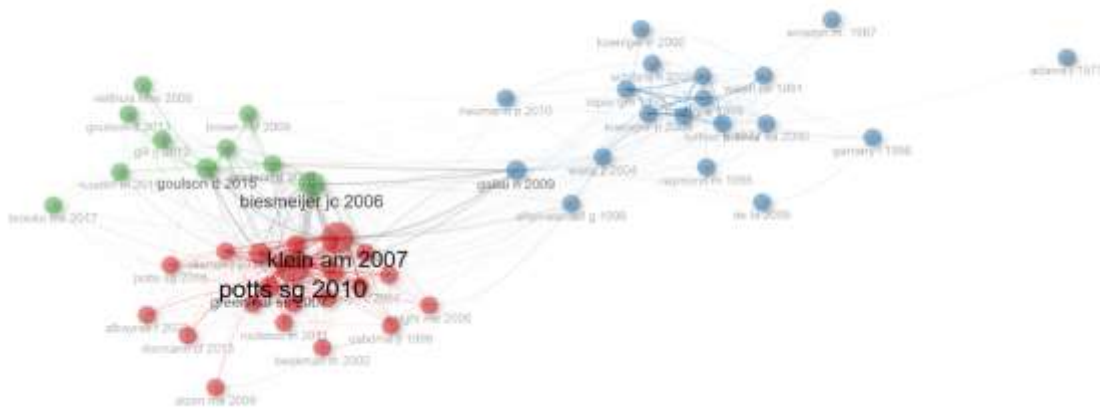
Figura 5 – Autores e redes de coautoria

Essa divisão evidencia uma **dupla vertente de pesquisa**: de um lado, o monitoramento ecológico e a conservação de habitats; de outro, o estudo de fatores genéticos e comportamentais que afetam as populações de abelhas. A intersecção entre esses eixos é essencial para compreender os impactos combinados das **mudanças climáticas e do uso do solo** sobre os serviços de polinização (Potts et al., 2010; Klein et al., 2007). Temas emergentes, como *drone-based monitoring*, *LiDAR ecology* e *climate resilience*, indicam a tendência de integração entre **dados orbitais e modelos preditivos ecológicos** (Gonzales; Hempel de Ibarra; Anderson, 2022).

A rede de co-citação mostra que os autores mais citados — **Klein A.M. (2007)**, **Potts S.G. (2010)** e **Biesmeijer J.C. (2006)** — constituem a **base intelectual consolidada** do campo. Esses estudos clássicos tratam da importância global da polinização para a segurança alimentar e a conservação da biodiversidade, servindo como referência para pesquisas que associam **variações espaciais e ambientais ao declínio de polinizadores** (Figura 8). A coesão entre esses trabalhos demonstra que a literatura recente ancora-se em **abordagens ecossistêmicas e integradas**, nas quais o sensoriamento remoto atua como instrumento de diagnóstico e suporte às políticas de mitigação e planejamento ambiental (IPBES, 2016; Reilly et al., 2024).

3.7 REDE DE CO-CITAÇÃO E AGRUPAMENTOS TEMÁTICOS

Figura 8 – Rede de co-citação



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

O **dendrograma de grupos temáticos interligados** (Figura 9) revela uma forte integração entre áreas como **ecologia de polinizadores, geotecnologias, serviços ecossistêmicos, modelagem espacial e mudanças climáticas**, confirmando o caráter interdisciplinar e em expansão desse campo. As análises indicam que a pesquisa em sensoriamento remoto e abelhas vem se consolidando como **domínio científico estratégico**, sustentado por redes internacionais e abordagens multiescalares e preditivas.

Um exemplo é o estudo de **Heath et al. (2024)**, que avaliou a **refletância ultravioleta (UV)** de cultivares de morango e sua influência na visibilidade das flores para polinizadores, destacando a importância de incorporar **bandas espectrais UV/azul** em sensores agrícolas. De modo semelhante, **Lavín (2024)** analisou a **modelagem de mapas de polinização** em vinhedos chilenos, demonstrando seu potencial para o **planejamento territorial e a agricultura sustentável**.

Figura 9 – Dendrograma de inter-relações entre grupos temáticos

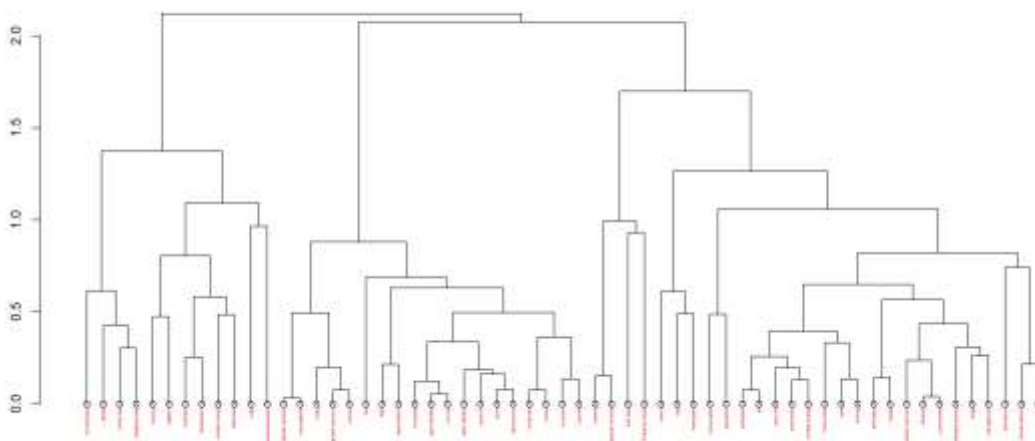
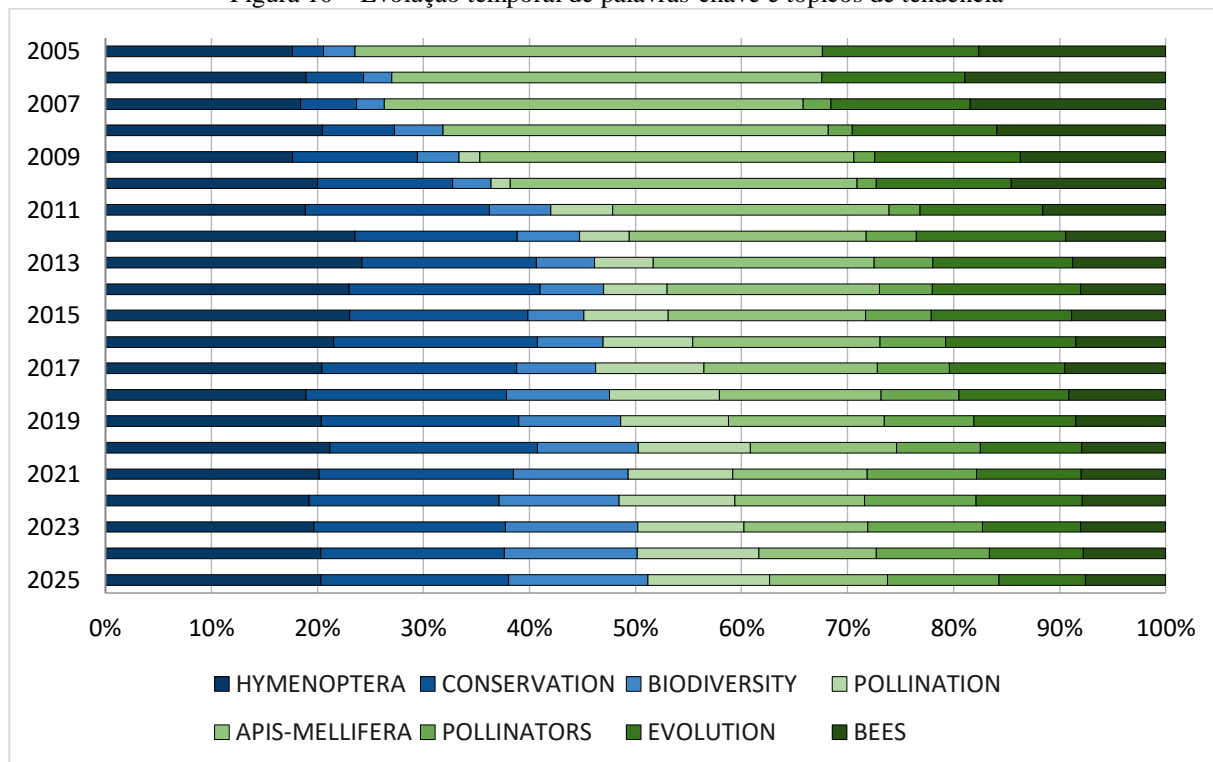


Figura 10 – Evolução temporal de palavras-chave e tópicos de tendência



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

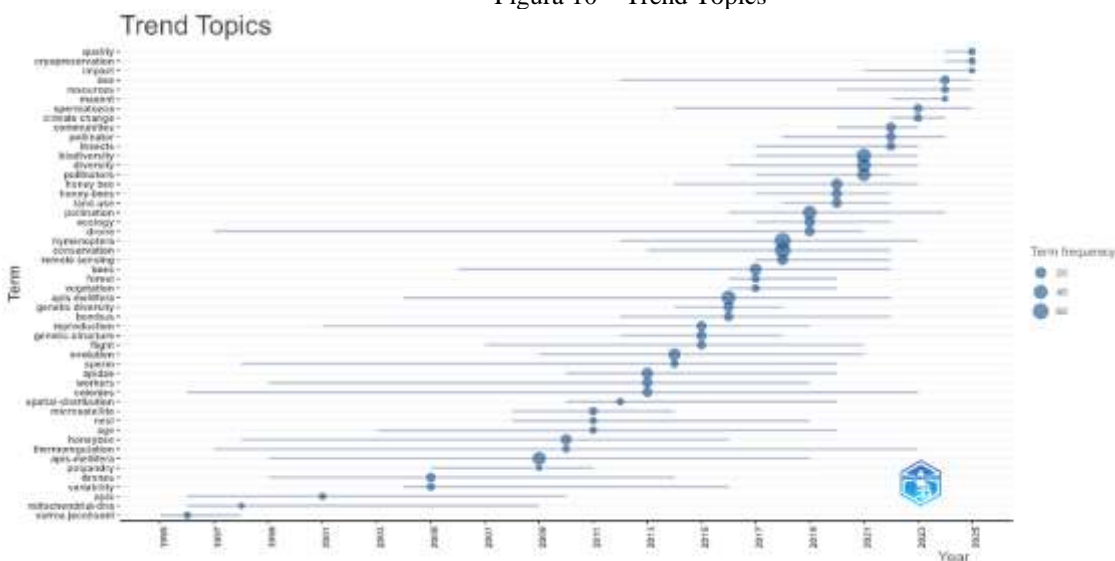
A análise temporal das palavras-chave revela que, nos primeiros anos (2005–2013), predominavam termos como *Hymenoptera*, *Conservation* e *Biodiversity*, indicando foco em aspectos taxonômicos e ecológicos. A partir de 2015, passaram a ganhar destaque os termos *Pollination*, *Pollinators* e *Apis mellifera*, refletindo um avanço para **abordagens aplicadas** à agricultura sustentável e aos serviços ecossistêmicos.

Nos anos mais recentes (2020–2025), a intensificação de termos ou Trend Tops como *Evolution* e

Bees aponta para uma ampliação conceitual, incorporando dimensões genéticas e adaptativas das respostas das abelhas às mudanças climáticas (Figura 11).

Um exemplo dessa tendência é o estudo de **Bie et al. (2025)**, que realizou uma análise bibliométrica sobre **polinização por *Bombus*** em sistemas agrícolas sustentáveis, destacando a integração tecnológica e as perspectivas futuras do campo.

Figura 10 – Trend Topics



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa demonstrou que o campo de estudo envolvendo **abelhas e sensoriamento remoto** cresceu significativamente nas últimas duas décadas, impulsionado pelos avanços das tecnologias de observação da Terra e pela busca por soluções sustentáveis voltadas à conservação das espécies. Verificou-se uma **transição de estudos descritivos para abordagens preditivas e interdisciplinares**, com destaque para o uso de drones, LiDAR e aprendizado de máquina, aplicados à conservação e à agricultura.

Países como **Estados Unidos, Reino Unido, China, Brasil e México** lideram a produção científica, consolidando o tema como um **ramo estratégico para o monitoramento ambiental e a proteção dos polinizadores**, elementos fundamentais à sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas e à segurança alimentar global.

REFERÊNCIAS

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: Uma ferramenta R para análise abrangente de mapeamento científico. **Journal of Informetrics**, [S. l.], v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017.

ARIZA, D. *et al.* Linking remote sensing data to the estimation of pollination services in agroecosystems. **Ecological Applications**, [S. l.], v. 32, n. 5, p. e2605, 2022.

ARROYO-RODRÍGUEZ, V. *et al.* Designing optimal human-modified landscapes for forest biodiversity conservation. **Ecology Letters**, [S. l.], v. 23, n. 9, p. 1404-1420, 2020.

BARNESLEY, S. L.; LOVETT, A.; DICKS, L. V. Mapping nectar-rich pollinator floral resources using airborne multispectral imagery. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 313, p. 114942, 2022.

BIE, M. *et al.* Advancing sustainable agriculture through bumblebee pollination: Bibliometric insights and future directions. **Sustainability**, [S. l.], v. 17, n. 5, p. 2177, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su17052177>.

CAVENDER-BARES, J. *et al.* Associations of leaf spectra with genetic and phylogenetic variation in oaks: prospects for remote detection of biodiversity. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 221, 2016.

CHEN, C. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, [S. l.], v. 57, n. 3, p. 359-377, 2006.

DERVIS, H. Bibliometric analysis using bibliometrix an R package. **Journal of Scientometric Research**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 156-160, 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Pollinators vital to our food supply under threat**. [S. l.]: FAO, 26 fev. 2016. Disponível em: <https://www.fao.org/newsroom/detail/Pollinators-vital-to-our-food-supply-under-threat/en>. Acesso em: 17 out. 2025.

GONZALES, D.; HEMPEL DE IBARRA, N.; ANDERSON, K. Remote sensing of floral resources for pollinators – new horizons from satellites to drones. **Frontiers in Ecology and Evolution**, [S. l.], v. 10, p. 869751, 2022.

HEATH, M. *et al.* UV reflectance in crop remote sensing: Assessing the current state of knowledge and extending research with strawberry cultivars. **PLOS ONE**, [S. l.], v. 19, n. 5, p. e0285912, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285912>.

HINSON, A. L. *et al.* Native bee pollination ecosystem services in agricultural wetlands and riparian protected lands. **Wetlands Ecology and Management**, [S. l.], v. 32, p. 287-304, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13157-024-01872-x>.

HUTCHINSON, L. A. *et al.* Stability of crop pollinator occurrence is influenced by bee community composition. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, [S. l.], v. 6, p. 943309, 2022.

INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES (IPBES). **The assessment report on pollinators, pollination and food production**. Bonn: IPBES, 2016. Disponível em: <https://ipbes.net>.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2009.

KATUMO, D. M. *et al.* Pollinator diversity benefits natural and agricultural ecosystems, environmental health, and human welfare. **Plant Diversity**, [S. l.], v. 44, n. 5, p. 429-435, 2022.

KLEIN, A. M. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. **Proc R Soc B Biol Sci**, [S. l.], v. 274, p. 303-313, 2007.

LAVÍN, U. *et al.* Modelling pollination maps in agroecosystems of a Chilean vineyard. **Geo: Geography and Environment**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. e2358471, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/26395916.2024.2358471>.

LILLESAND, T.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J.
Remote sensing and image interpretation. 7. ed. New
Jersey: John Wiley & Sons, 2015.

MASHILINGI, S. K. *et al.* Honeybees are far too
insufficient to supply optimum pollination services in
agricultural systems worldwide. **Agriculture,
Ecosystems & Environment**, [S. l.], v. 335, p. 108003,
2022.

POTTS, S. G. *et al.* Global pollinator declines: trends,
impacts and drivers. **Trends in Ecology & Evolution**, [S.
l.], v. 25, n. 6, p. 345-353, 2010.

REILLY, J. *et al.* Wild insects and honey bees are equally
important to crop yields in a global analysis. **Global
Ecology and Biogeography**, [S. l.], v. 33, n. 7, p. e13843,
2024.

TURNER, W. *et al.* Remote sensing for biodiversity
science and conservation. **Trends in Ecology &
Evolution**, [S. l.], v. 18, n. 6, p. 306-314, 2003.

TURO, K. J. *et al.* Insufficient pollinator visitation often
limits yield in crop systems worldwide. **Nature Ecology
& Evolution**, [S. l.], v. 8, n. 9, p. 1612-1622, 2024.

VAN DER SLUIJS, J. P.; VAAGE, N. S. Pollinators and
global food security: the need for holistic global
stewardship. **Food Ethics**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 75-91,
2016.

VAN ECK, N.; WALTMAN, L. Software survey:
VOSviewer, a computer program for bibliometric
mapping. **Scientometrics**, [S. l.], v. 84, n. 2, p. 523-538,
2010.