



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

ANA VITÓRIA MACIEL FEIJÓ

**ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA DAS PESQUISAS SOBRE FUNGOS FORMADORES
DE MICORRIZAS: TENDÊNCIAS E PERSPECTIVAS**

**FORTALEZA
2025**

ANA VITÓRIA MACIEL FEIJÓ

**ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA DAS PESQUISAS SOBRE FUNGOS FORMADORES DE
MICORRIZAS: TENDÊNCIAS E PERSPECTIVAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Agronomia do
Centro de Ciências Agrárias da Universidade
Federal do Ceará, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de
Bacharelado em Agronomia.

Orientador(a): Prof. Dr. Arthur Prudêncio de
Araújo Pereira.

FORTALEZA
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F328a Feijó, Ana Vitória Maciel.

Análise cienciométrica das pesquisas sobre fungos formadores de micorrizas : tendências e perspectivas / Ana Vitória Maciel Feijó. – 2025.

49 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Arthur Prudêncio de Araújo Pereira.

1. Micorrizas. 2. Análise cienciométrica. 3. Fungos micorrízicos. 4. Agricultura sustentável. I. Título.
CDD 630

ANA VITÓRIA MACIEL FEIJÓ

ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA DAS PESQUISAS SOBRE FUNGOS FORMADORES DE
MICORRIZAS: TENDÊNCIAS E PERSPECTIVAS.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Agronomia do
Centro de Ciências Agrárias da Universidade
Federal do Ceará, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de
Bacharelado em Agronomia.

Aprovado em 28/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Arthur Prudêncio de Araújo Pereira (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Murilo de Sousa Almeida
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Francisco Luan Almeida Barbosa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Katriny Kellen da Silva Negreiros
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Em memória de meu amado, avô, Olívio Rodrigues Feijó, que não pôde me ver alcançando esse sonho. Mas, como diria BK:

[...]

*Eu sou a continuação de um sonho
Da minha mãe, do meu pai
De todos que vieram antes de mim
Eu sou a continuação de um sonho
Da minha vó, do meu vó
Quem sangrou pra gente poder sorrir.
- BK, Continuação de um sonho (2022).*

AGRADECIMENTOS

Ao Divino, por me conceder mais uma chance de viver.

Aos meus pais, Lucinéia de Sousa Maciel e Olívio Rodrigues Feijó Júnior. A minha mãe, por ser minha âncora. Ao meu pai, por me ensinar a ser corajosa. Ao meu irmão, Vítor Olívio Maciel Feijó, pela parceria e humor que me salva até nos dias mais sombrios.

Aos meus avós, Olívio Rodrigues Feijó (*in memoriam*) e Maria Helena Bezerra Feijó, por serem minha base. Em especial, a minha avó, embora acometida pelo mal de Alzheimer, por ainda me fazer sentir amada e bem querida.

A minha tia, Ana Cerly, ao meu tio, Aurísio Gomes, ao meu primo, Maycon Feijó, e a minha afilhada, Mariana, por serem meu refúgio diário e fonte de alegria dos meus dias.

Aos meus entes queridos (*in memoriam*), tio Maciel, tio Everardo, avó Francisca, avô Otávio. A minha prima Nathália Maciel (*in memoriam*), pelo sorriso gostoso que faz falta.

Ao Professor Dr. Arthur Prudêncio de Araújo Pereira, por me influenciar a amar a microbiologia do solo. Por aceitar me orientar, pela paciência com meu processo e simpatia de sempre. E por acreditar que seria possível.

Ao Me. Murilo de Sousa Almeida, ao Me. Francisco Luan Almeida Barbosa, a Katriny Kellen da Silva Negreiros, por se disponibilizar na participação da banca de defesa desta monografia.

Aos meus queridos amigos, Ana, Abigail, Alexandre, Caiafo, Estefane, Karla Beatriz, Leonardo, Ruth, por dedicarem um tempo de vida para compartilhar com a minha. Em especial, a Suelen, por me fazer sentir especial e ser uma amiga exemplar.

Ao PET Agrárias - Conexão de Saberes, por me ensinar sobre humanidade e a importância da minha profissão. A professora-orientadora do PET, Maria Lúcia, por ser uma profissional fora da curva. Aos amigos e às amigas que fiz, pela troca de saberes.

Ao Grupo Agroecológico da UFC, por me sequestrar do senso comum e me influenciar a ter senso crítico e justiça social para exercer minha profissão. Aos meus companheiros e companheiras do grupo, por me ensinarem tanto.

A equipe do laboratório de análise química e física de solos, Amilson, Brenda, Lívia, Thamires, Ismael e Felipe, pelos longos dois anos de companheirismo e afeto.

Aos funcionários da Universidade Federal do Ceará, principalmente os lotados no Departamento de Ciências do Solo.

A todos que de algum modo contribuíram direta ou indiretamente para a execução deste trabalho e ensinamentos.

“É preciso não se contentar com a superfície.”
- Nise da Silveira.

RESUMO

Os fungos formadores de micorrizas (FFM) são essenciais para a sustentabilidade dos ecossistemas, promovendo a absorção de nutrientes, a estabilidade do solo e a resiliência das plantas em condições adversas. O crescente interesse científico por esses microrganismos têm impulsionado avanços na sua aplicação agrícola e ecológica. No entanto, compreender as tendências, colaborações e lacunas na pesquisa sobre FFM ainda representa um desafio. Diante desse cenário, este estudo realizou uma análise cirométrica das publicações científicas sobre FFM, com ênfase na produção acadêmica global e no Brasil. Os dados foram extraídos da Web of Science e analisados por meio do software VOSviewer, possibilitando a construção de mapas de coautoria, coocorrência de palavras-chave e citações. Os resultados revelaram um aumento expressivo na produção científica sobre o tema, com destaque para a participação de instituições brasileiras e a expansão das pesquisas sobre FFM em biomas semiáridos, como a Caatinga. A análise dos clusters temáticos indicou uma transição dos estudos taxonômicos e ecológicos para abordagens aplicadas, incluindo o uso de FFM na agricultura sustentável, mitigação dos impactos das mudanças climáticas e recuperação de solos degradados. Além disso, a pesquisa evidenciou a necessidade de fortalecer colaborações interinstitucionais e internacionais, ampliando a participação de universidades nordestinas na rede científica sobre FFM. Dessa forma, este estudo contribuiu para o entendimento das principais tendências e perspectivas da pesquisa sobre FFM, oferecendo subsídios para novos estudos e incentivando o uso desses microrganismos em estratégias sustentáveis de manejo agrícola e ambiental.

Palavras-chave: micorrizas; análise cirométrica; fungos micorrízicos; VOSviewer; agricultura sustentável.

ABSTRACT

Mycorrhizal fungi (MF) are essential for the sustainability of ecosystems, promoting nutrient uptake, soil stability, and plant resilience under adverse conditions. The growing scientific interest in these microorganisms has driven advances in their agricultural and ecological applications. However, understanding trends, collaborations, and research gaps on MF remains a challenge. Given this scenario, this study conducted a scientometric analysis of scientific publications on MF, emphasizing global and Brazilian academic production. Data were extracted from the Web of Science and analyzed using the VOSviewer software, enabling the construction of co-authorship, keyword co-occurrence, and citation maps. The results revealed a significant increase in scientific production on the subject, highlighting the participation of Brazilian institutions and the expansion of research on MF in semi-arid biomes, such as the Caatinga. The thematic cluster analysis indicated a transition from taxonomic and ecological studies to applied approaches, including the use of MF in sustainable agriculture, climate change impact mitigation, and degraded soil recovery. Furthermore, the research highlighted the need to strengthen interinstitutional and international collaborations, increasing the participation of northeastern universities in the scientific network on MF. Thus, this study contributed to understanding the main trends and perspectives of MF research, providing insights for new studies and encouraging the use of these microorganisms in sustainable agricultural and environmental management strategies.

Keywords: mycorrhizae; scientometric analysis; mycorrhizal fungi; VOSviewer; sustainable agriculture.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1	Fungos formadores de micorriza (FFM).....	14
2.2	Relevância dos FFM na agricultura e ecossistemas naturais.....	17
2.3	Cienciometria e sua aplicação à pesquisa em micorrizas.....	19
3	METODOLOGIA.....	20
3.1	Coleta de dados.....	21
3.2	Critérios de escolha da plataforma.....	21
3.3	Estratégia de busca.....	22
3.4	Período de análise.....	22
3.5	Critérios de inclusão.....	22
3.6	Análise cienciométrica.....	22
3.6.1	<i>Etapas de análise no VOSviewer.....</i>	23
3.6.2	<i>Tipos de análises realizadas.....</i>	23
3.6.3	<i>Apresentação e interpretação dos resultados.....</i>	24
3.6.3.1	<i>Distribuição temporal das publicações.....</i>	24
3.6.3.2	<i>Análise geográfica e institucional.....</i>	24
3.6.3.3	<i>Clusters de palavras-chave.....</i>	24
3.7	Limitações metodológicas.....	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
4.1	Análise da distribuição geográfica das publicações sobre FFM.....	28
4.2	Análise da produção científica sobre FFM no Brasil.....	30
4.2.1	<i>Análise bibliométrica com o software VOSviewer sobre FFM no Brasil.....</i>	32
4.3	Análise da produção científica sobre FFM na Caatinga.....	39
5	CONCLUSÃO.....	48
	REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

Os fungos formadores de micorrizas (FFM) desempenham um papel fundamental na dinâmica dos ecossistemas terrestres, estabelecendo associações simbióticas com a maioria das plantas vasculares. Essa interação é caracterizada pela troca bidirecional de recursos, na qual o fungo facilita a absorção de nutrientes do solo, como fósforo (P), nitrogênio (N) e micronutrientes, enquanto a planta hospedeira fornece carboidratos derivados da fotossíntese (Smith & Read, 2008). Dentre os principais grupos, destacam-se os fungos micorrízicos arbusculares (FMA), pertencentes ao filo *Glomeromycota*, que exercem influência significativa no crescimento vegetal - como alterações positivas na altura da planta, número de folhas, área foliar ou até mesmo em ganhos de produtividade (kg/ha); e na saúde do solo - em teor de matéria orgânica, estabilidade de agregados do solo, disponibilidade nutrimental ou condutividade elétrica (Brundrett, 2009).

O interesse científico pelos FFM tem crescido nas últimas décadas, impulsionado pela busca de alternativas sustentáveis para o manejo agrícola. Estudos demonstram que a inoculação com fungos micorrízicos pode aumentar a eficiência no uso de fertilizantes, melhorar a estrutura do solo e contribuir para a resiliência das plantas frente a estresses abióticos, como seca e salinidade (Jeffries et al., 2003; Smith & Read, 2008).

Além disso, os FFM contribuem para a captura e retenção de carbono no solo por meio da produção de glomalina, especialmente os fungos micorrízicos arbusculares (FMA), que produzem essa proteína atuante na estabilização dos agregados do solo. A glomalina é rica em carbono e tem decomposição lenta, ajudando a manter o carbono orgânico no solo por longos períodos. Os FFM melhoram a absorção de nutrientes e aumentam a produtividade das plantas, levando a maior fixação de carbono via fotossíntese, logo, a matéria orgânica das plantas retorna ao solo após a senescência, contribuindo para o armazenamento de carbono. A presença de FFM melhora a estabilidade dos agregados do solo, reduzindo a decomposição rápida da matéria orgânica e, consequentemente, a emissão de CO₂ para a atmosfera. Solos colonizados por FFM geralmente apresentam maior teor de carbono orgânico em comparação com solos não micorrizados (Rilling, 2004).

Na diversidade microbiana do solo, os FFM interagem com diferentes grupos de microrganismos e influenciam a estrutura da comunidade microbiana total, aspecto importante para indicar a atividade microbiana no solo, podendo mensurar o Carbono da Biomassa Microbiana (CBM), esse parâmetro é essencial para avaliar a qualidade do solo e o impacto das práticas agrícolas na microbiota.

Os FFM estabelecem relações com bactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPBs), como *Rhizobium*, *Azospirillum* e *Bacillus*, melhorando a absorção de nutrientes. Além de liberarem exsudatos radiculares que servem de substrato para outros microrganismos, estimulando a atividade enzimática e a decomposição da matéria orgânica. Também favorecem a presença de actinobactérias e outros fungos benéficos, que ajudam no equilíbrio biológico do solo. Os FFM podem competir por espaço e nutrientes com fungos e bactérias patogênicas, reduzindo a incidência de doenças, ao colonizar as raízes das plantas. Além disso, podem induzir resistência sistêmica na planta, tornando-a mais tolerante a pragas e doenças. Portanto, o papel dos FFM no sequestro de carbono e na biodiversidade microbiana destaca sua importância para práticas agrícolas de baixo impacto ambiental (Bardgett & Van Der Putten, 2014). Sua aplicação em sistemas agrícolas sustentáveis reforça seu potencial para reduzir a dependência de insumos químicos e promover o equilíbrio ecológico.

Apesar de sua reconhecida importância, ainda existem lacunas no conhecimento sobre a aplicação em larga escala dos FFM na agricultura, especialmente em regiões semiáridas e ecossistemas degradados. A eficácia da inoculação com FFM pode variar conforme as condições do solo, a espécie vegetal e as interações microbianas, demandando mais estudos para otimizar seu uso. A integração da análise cirométrica à pesquisa sobre micorrizas pode auxiliar na identificação dessas lacunas, fornecendo informações sobre áreas pouco exploradas e orientando futuros estudos sobre suas aplicações agrícolas e ambientais.

A análise cirométrica tem se mostrado uma ferramenta eficaz para compreender o desenvolvimento das pesquisas relacionadas aos fungos micorrízicos, permitindo identificar tendências, colaborações científicas e lacunas no conhecimento (Van Eck & Waltman, 2010). O uso de bases de dados internacionais, como a Web of Science (WoS), associado a ferramentas de visualização, como o VOSviewer, possibilita uma análise quantitativa e qualitativa da produção acadêmica na área. Essa abordagem contribui para o planejamento de futuras investigações e o desenvolvimento de tecnologias aplicadas à agricultura sustentável. Diante disso, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise cirométrica das pesquisas sobre fungos formadores de micorrizas, com ênfase na identificação de tendências, colaborações internacionais e perspectivas futuras para o uso desses organismos na agricultura.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Fungos formadores de micorriza (FFM)

Os FFM são micro-organismos simbóticos que estabelecem associações com a maioria das plantas vasculares, desempenhando funções essenciais na absorção de nutrientes, na saúde do solo e na produtividade vegetal. Estima-se que cerca de 80% das plantas terrestres estabeleçam algum tipo de simbiose micorrízica (Smith; Read, 2008). Esses fungos, pertencentes ao filo *Glomeromycota*, desenvolvem estruturas intracelulares especializadas, como os arbusculos, responsáveis pela troca de nutrientes entre o fungo e a planta hospedeira (Brundrett, 2009).

As micorrizas representam uma das associações simbóticas mais antigas e bem-sucedidas do planeta. Estima-se que essa relação tenha surgido há aproximadamente 460 milhões de anos, desempenhando um papel fundamental na colonização de ambientes terrestres pelas plantas (Redecker et al., 2000; Brundrett, 2004). Essa simbiose proporciona vantagens fisiológicas e ecológicas às plantas hospedeiras, como maior eficiência na absorção de nutrientes, maior resiliência a estresses abióticos e maior eficiência hídrica (Smith; Read, 2008). A classificação das micorrizas baseia-se, principalmente, nas características anatômicas e funcionais das associações estabelecidas entre fungo e planta. De modo geral, as micorrizas podem ser agrupadas em cinco principais tipos: micorrizas arbusculares, ectomicorrizas, micorrizas ericoides, micorrizas orquidoides e micorrizas arbutóides (Brundrett, 2004; Smith; Read, 2008). Cada uma dessas formas possui características específicas e desempenha funções distintas nos ecossistemas naturais e agrícolas.

As micorrizas arbusculares são as mais comuns e amplamente distribuídas no planeta, estabelecendo associação com cerca de 80% das plantas vasculares, incluindo importantes culturas agrícolas, como milho (*Zea mays*), soja (*Glycine max*) e trigo (*Triticum aestivum*) (Smith; Read, 2008; Brundrett, 2009). Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) são caracterizados pela formação de arbusculos, estruturas intracelulares ramificadas que atuam como sítios de troca de nutrientes entre o fungo e a planta (Schüßler; Walker, 2010). Além dos arbusculos, esses fungos podem formar vesículas, que funcionam como estruturas de reserva energética, e hifas extrarradiculares, que aumenta significativamente a área de exploração do solo.

As micorrizas arbusculares (FMA) são as mais comuns e possuem relevância ecológica e agrícola significativa. A simbiose com FMA aumenta a eficiência de absorção dos

nutrientes aplicados, reduzindo perdas por lixiviação. Isso permite diminuir a dose de fertilizantes nitrogenados e potássicos, reduzindo custos e impactos ambientais.. Estudos indicam que esses fungos são essenciais para o sucesso de plantas em solos pobres em nutrientes, como fósforo (P), zinco (Zn) e cobre (Cu), além de contribuírem para a manutenção da biodiversidade e o equilíbrio de ecossistemas naturais (Smith; Read, 2008; Van Der Heijden et al., 2015). Os FMA são aliados estratégicos para a agricultura sustentável, promovendo a absorção eficiente de nutrientes e reduzindo a necessidade de fertilizantes sintéticos. Seu uso pode ser potencializado por meio de práticas como inoculação de solos, cultivos diversificados e manejo conservacionista, garantindo maior resiliência dos sistemas agrícolas e menores impactos ambientais.

Além disso, contribuem para a estruturação física do solo por meio da produção de glomalina, uma glicoproteína que favorece a formação de agregados estáveis (Wright; Upadhyaya, 1998). Essa capacidade de otimizar a absorção de nutrientes tem sido amplamente estudada em sistemas agrícolas, onde o uso de inoculantes micorrízicos têm mostrado resultados positivos no aumento da produtividade, especialmente em solos de baixa fertilidade, como os do bioma Caatinga (Souza et. al., 2014).

As ectomicorrizas ocorrem predominantemente em árvores de florestas temperadas e boreais, estabelecendo simbiose com espécies de importância econômica, como pinheiros (*Pinus spp.*), carvalhos (*Quercus spp.*) e eucaliptos (*Eucalyptus spp.*) (Smith; Read, 2008). Contudo, sua presença não se limita a essas regiões. No Brasil, ectomicorrizas têm sido amplamente registradas em plantios de eucalipto, além de associações naturais com árvores nativas de biomas como o Cerrado, a Mata Atlântica e a Amazônia, incluindo espécies das famílias Fabaceae e Myrtaceae (Tedersoo et al., 2014).

Ao contrário das micorrizas arbusculares, as ectomicorrizas não penetram nas células corticais. Elas formam uma rede de Hartig, estrutura que envolve as células corticais e facilita a troca de nutrientes, além de um manto externo de hifas que cobre a superfície radicular (Brundrett, 2004). Estas são fundamentais na ciclagem de carbono e nutrientes em florestas temperadas, pois contribuem para a degradação da matéria orgânica e a liberação de nutrientes essenciais para o crescimento das árvores (Smith; Read, 2008). Em sistemas de reflorestamento, especialmente com espécies exóticas, a inoculação com fungos ectomicorrízicos tem se mostrado uma prática eficiente para acelerar o crescimento das mudas e aumentar a taxa de sobrevivência (Rillig et al., 2018).

As micorrizas ericóides são características de plantas da família Ericaceae, que predominam em solos ácidos, pobres em nutrientes e com alta concentração de alumínio

(Al³⁺), isso ocorre porque os fungos micorrízicos formam uma barreira física ao redor das raízes, limitando a quantidade de Al³⁺ que entra nas células (Smith; Read, 2008). Além disso, os fungos podem modificar a composição do solo, aumentando a disponibilidade de nutrientes essenciais para a planta. Esse tipo de micorriza é formada por hifas que penetram as células epidérmicas das raízes, estabelecendo uma interface de troca de nutrientes altamente especializada. Os fungos ericoides contribuem para a dinâmica do carbono e do nitrogênio nos ecossistemas florestais, desempenhando um papel importante na decomposição da matéria orgânica e na liberação de nutrientes para planta hospedeira (Ward et al., 2022).

As micorrizas ericoides são essenciais para o crescimento de plantas em solos ácidos e oligotróficos, como urzes (*Calluna vulgaris*) e rododendros (*Rhododendron spp.*). Além disso, desempenham um papel relevante na revegetação de solos degradados e na tolerância a metais pesados, auxiliando na absorção de nutrientes mesmo em condições adversas (Cairney; Meharg, 2003).

As micorrizas orquidóides são exclusivas da família Orchidaceae e são indispensáveis para a germinação das sementes dessa família (Smith; Read, 2008). Isso se dá devido a uma relação simbiótica única entre essas micorrizas e as sementes dessas plantas. Esse processo de germinação é particularmente interessante porque as sementes de orquídeas são minúsculas e não contêm reservas nutritivas, o que dificulta sua germinação em solos comuns, logo, as sementes dependem das micorrizas para o fornecimento de carboidratos, nutrientes minerais e substâncias bioativas necessárias ao desenvolvimento inicial (Rasmussen & Rasmussen, 2009). As micorrizas orquidóides são fundamentais para a conservação de orquídeas ameaçadas, sendo utilizadas em programas de propagação e reintrodução de espécies em habitats naturais (Rasmussen & Rasmussen, 2009).

As micorrizas arbutóides são menos comuns e ocorrem em plantas das famílias Ericaceae e Arbutaceae, estabelecendo uma simbiose intermediária entre as micorrizas ericoides e ectomicorrizas (Brundrett, 2004). Nessas associações, as hifas penetram as células das raízes e formam um manto externo, semelhante ao observado nas ectomicorrizas (Cairney; Meharg, 2003). São comuns em ambientes temperados e desempenham papel importante na ciclagem de nutrientes e na adaptação das plantas a solos pobres e ácidos.

A diversidade de micorrizas reflete a complexidade das interações entre plantas e fungos no solo. Cada tipo desempenha funções específicas que impactam diretamente a produtividade agrícola, a saúde do solo e a biodiversidade dos ecossistemas. O entendimento dessas associações é fundamental para a aplicação de práticas agrícolas sustentáveis e o

desenvolvimento de estratégias de manejo ecológico, especialmente em regiões semiáridas, como a Caatinga brasileira.

2.2 Relevância dos FFM na agricultura e ecossistemas naturais

Os FFM são organismos essenciais para a manutenção da saúde do solo, o aumento da eficiência na absorção de nutrientes e a promoção da resiliência das plantas frente a estresses ambientais. Essa parceria evolutiva contribuiu significativamente para a colonização das plantas em ambientes terrestres, permitindo a adaptação a solos com baixa disponibilidade de nutrientes (Smith; Read, 2008).

A atuação dos FFM na estruturação do solo é amplamente reconhecida devido à capacidade destes fungos de formar uma extensa rede de hifas extrarradiculares que interligam partículas do solo, promovendo sua agregação e melhorando suas propriedades físicas (Rillig; Mummmey, 2006). A produção de glomalina, uma glicoproteína liberada pelas hifas micorrízicas, tem papel fundamental na formação e estabilização dos agregados do solo, aumentando sua porosidade e capacidade de retenção de água (Wright; Upadhyaya, 1998).

Estudos demonstram que áreas agrícolas manejadas com práticas que favorecem o desenvolvimento de FFM apresentam maior estabilidade estrutural e menores taxas de erosão (Caravaca et al., 2006). Em sistemas de plantio direto, por exemplo, a presença desses fungos promove uma melhor estruturação do solo, com reflexos positivos no armazenamento de carbono e na sustentabilidade da produção agrícola (Rillig et al., 2018). Além disso, os FFM influenciam a dinâmica biológica do solo ao interagirem com outros microrganismos benéficos, como rizóbios e actinobactérias, criando uma rede complexa de interações que favorece o equilíbrio microbiológico e a ciclagem eficiente de nutrientes (Barea et al., 2005).

A principal função ecológica dos FFM é facilitar a absorção de nutrientes, especialmente aqueles de baixa mobilidade no solo, como fósforo (P), zinco (Zn) e cobre (Cu) (Smith; Read, 2008). O fósforo, em particular, é um nutriente limitante em muitos solos agrícolas, especialmente em regiões tropicais, onde frequentemente se encontra em formas insolúveis e indisponíveis para as plantas. A baixa mobilidade do fósforo no solo exige estratégias eficientes de absorção, como a associação com fungos micorrízicos (Plassard; Dell, 2010).

A simbiose micorrízica permite que as plantas acessem esse fósforo por meio da exploração de uma área maior do solo pelas hifas fúngicas, que conseguem atingir regiões além da zona de depleção radicular (Berbara et. al. 2006). Além do fósforo, os FFM

desempenham papel importante na absorção de nitrogênio (N), especialmente na forma de amônio, além de micronutrientes essenciais, como ferro (Fe) e manganês (Mn) (Smith; Read, 2008). Essa contribuição é particularmente relevante em solos degradados ou de baixa fertilidade, comuns em biomas semiáridos, como a Caatinga brasileira (Souza et al., 2014).

Os FFM são importantes para a ciclagem de nutrientes, aumentando sua importância para a agricultura. A interação dos FMAs com outros microrganismos benéficos, como rizóbios e actinobactérias, pode potencializar a ciclagem de nutrientes e melhorar a produtividade agrícola em solos degradados de várias maneiras: aumento da disponibilidade de nutrientes, melhoria da estrutura do solo, aumento da resiliência e saúde do solo, e aumento da produtividade. Os rizóbios fixam nitrogênio atmosférico e o disponibilizam para as plantas na forma de amônia, um nutriente essencial. Os FMAs ajudam as plantas a absorver nutrientes minerais, como fósforo e micronutrientes, que são frequentemente limitantes em solos degradados. A interação entre os rizóbios e os FMAs cria um ambiente mais eficiente para a absorção de nutrientes, já que ambos os microrganismos ajudam a planta a acessar diferentes fontes de nutrientes no solo (Wang et al., 2011).

Já as actinobactérias, ao decompor a matéria orgânica, geram compostos como ácidos orgânicos que ajudam na liberação de nutrientes no solo. Esses nutrientes, como o fósforo, são absorvidos pelos FMAs e transferidos para as raízes das plantas. Além disso, os FMAs aumentam a eficiência da ciclagem de nutrientes no solo, ajudando a fixar nutrientes essenciais e tornando-os mais acessíveis (Van Der Heijden et al., 2015).

Os FFM também conferem maior resiliência às plantas frente a estresses abióticos, como seca, salinidade e toxidez por metais pesados. Em condições de estresse hídrico, as hifas micorrízicas melhoram a eficiência de absorção de água e estimulam a produção de solutos compatíveis, como prolina e açúcares solúveis, que ajudam a planta a manter seu potencial osmótico (Wahab et. al., 2023).

Em solos salinos, os FFM promovem mecanismos de exclusão seletiva de íons tóxicos, como o sódio (Na^+), além de estimularem a produção de antioxidantes, como superóxido dismutase (SOD) e peroxidase (POD), que protegem as células contra o estresse oxidativo (Evelin et al., 2009). Esses mecanismos tornam os fungos micorrízicos aliados importantes para o manejo de culturas em regiões semiáridas, como a Caatinga, onde a salinidade e a irregularidade das chuvas são desafios recorrentes.

A Caatinga é um bioma exclusivamente brasileiro, caracteriza-se por solos com baixa disponibilidade de nutrientes, alta sazonalidade hídrica e temperaturas elevadas, condições que desafiam o desenvolvimento agrícola sustentável (Sampaio, 1995). A remoção

contínua da vegetação nativa e o manejo inadequado do solo têm intensificado os impactos ambientais na Caatinga, um bioma predominantemente localizado no semiárido brasileiro. Entre os principais problemas resultantes dessas práticas estão a perda de biodiversidade, a degradação do solo e o avanço da desertificação, comprometendo a sustentabilidade ecológica da região (Bezerra et al., 2014).

Nesse contexto, os FFM desempenham um papel fundamental na nutrição vegetal, especialmente em solos de baixa fertilidade e ambientes sujeitos a estresses hídricos e nutricionais. Sua associação simbiótica com as raízes das plantas melhora a absorção de nutrientes essenciais, tornando-se uma estratégia promissora para a agricultura ecológica e a recuperação de ecossistemas degradados (Junior et al., 2006).

A inserção dos FFM no manejo agrícola sustentável tem sido amplamente estudada nas últimas décadas, especialmente no contexto de práticas agrícolas conservacionistas (Jeffries et al., 2003). O uso de inoculantes micorrízicos tem se mostrado uma alternativa eficaz para reduzir a dependência de fertilizantes minerais, diminuir os custos de produção e mitigar os impactos ambientais associados ao uso excessivo de adubos fosfatados (Devi et al., 2021). O uso desses fungos também tem sido recomendado em sistemas agroflorestais e em práticas de restauração ecológica, dada sua capacidade de facilitar o estabelecimento de espécies nativas e acelerar o processo de sucessão ecológica (Barea et al., 2005).

Além disso, a análise da produção científica sobre FFM na Caatinga pode fornecer subsídios para políticas públicas voltadas ao desenvolvimento de tecnologias adaptadas às condições semiáridas, com potencial para aumentar a produtividade e a segurança alimentar de comunidades agrícolas dependentes desse bioma.

2.3 Cienciometria e sua aplicação à pesquisa em micorrizas

A cienciometria é uma área do conhecimento que se dedica à análise quantitativa da produção científica, buscando identificar padrões, tendências, redes de colaboração e o impacto das pesquisas em diferentes campos do saber (Spinak, 1996). O termo foi introduzido por Nalimov e Mulchenko, em 1969, como uma ferramenta para medir o progresso científico a partir de indicadores bibliométricos, como número de publicações, citações, produtividade de autores, impacto de periódicos e colaborações institucionais (Nalimov; Mulchenko, 1969).

A análise cienciométrica é frequentemente utilizada para mapear o desenvolvimento de áreas emergentes, identificar pesquisadores influentes, compreender

dinâmicas de colaboração internacional e fornecer subsídios para a definição de políticas de pesquisa e desenvolvimento (Van Eck; Waltman, 2010).

Para isso, utiliza-se ferramentas especializadas, como o software VOSviewer e a base de dados Web of Science (WoS), que permitem a construção de mapas de redes e a identificação de tendências temáticas ao longo do tempo. O WoS é uma base de dados multidisciplinar que fornece acesso a publicações científicas e permite a análise de métricas como número de citações, índice h e colaborações internacionais. O VOSviewer: Software gratuito que permite a construção e visualização de mapas de redes baseados em dados bibliométricos, como redes de coautoria, coocorrência de palavras-chave e análise de citações (Van Eck; Waltman, 2010).

Estudos cienciométricos possibilitam compreender como novas práticas agrícolas, como o uso de bioinsumos, têm sido abordadas na literatura científica, além de identificar as principais lacunas e oportunidades de investigação. Em relação aos FFM, a aplicação da cienciometria permite mapear o crescimento do interesse científico sobre esses organismos, destacando sua relevância para a sustentabilidade agrícola e a saúde dos ecossistemas. O aumento da preocupação global com o manejo sustentável do solo e a busca por alternativas que reduzam a dependência de fertilizantes químicos tem impulsionado pesquisas sobre os benefícios das micorrizas no aumento da eficiência de uso de nutrientes (Smith; Read, 2008).

A cienciometria tem se mostrado uma ferramenta indispensável para compreender o avanço das pesquisas sobre fungos formadores de micorriza, permitindo identificar padrões, tendências e lacunas no conhecimento científico. O Brasil, com sua biodiversidade singular e a crescente demanda por práticas agrícolas sustentáveis, tem se destacado nesse cenário, especialmente nas pesquisas voltadas para o bioma Caatinga. O uso de ferramentas como o VOSviewer e a base Web of Science oferece subsídios importantes para direcionar novas investigações e fortalecer as colaborações nacionais e internacionais nesse campo.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento científico sobre Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMAs) e suas interações no solo pode ser bem mapeado por meio de métodos cienciométricos, como o apresentado, que permite identificar tendências, colaborações e a evolução do conhecimento global, no Brasil e em regiões semiáridas, incluindo a Caatinga. A metodologia descrita para a coleta e análise de dados pode ser estruturada da seguinte forma:

3.1 Coleta de dados

A coleta de dados foi realizada na ferramenta WoS, uma das principais bases de dados de produção científica internacional, reconhecida por sua abrangência e confiabilidade. A WoS oferece acesso a milhares de periódicos científicos revisados por pares, abrangendo diversas áreas do conhecimento, incluindo agricultura, ecologia, microbiologia e ciências ambientais, que são fundamentais para a compreensão das interações micorrízicas no solo.

A escolha da WoS se deve à sua capacidade de fornecer metadados detalhados das publicações, incluindo informações sobre autores, instituições, países, palavras-chave, citações e índices de impacto, além de permitir a exportação de dados compatíveis com softwares de análise bibliométrica, como o VOSviewer (Van Eck; Waltman, 2010). Essa base é reconhecida por sua capacidade de fornecer dados precisos e estruturados, fundamentais para a análise do desenvolvimento histórico das pesquisas sobre FFM, além de permitir a identificação de padrões de colaboração entre pesquisadores, instituições e países.

3.2 Critérios de escolha da plataforma

A plataforma WoS foi escolhida por:

A cobertura internacional e multidisciplinar: a WoS indexa periódicos científicos de diversas áreas do conhecimento, abrangendo desde ciências agrárias até ecologia, microbiologia e ciências ambientais — áreas diretamente relacionadas ao tema desta pesquisa. Além disso, a base inclui publicações de mais de 190 países, com acesso a periódicos de alto impacto internacional, como o *Mycorrhiza*, *Soil Biology & Biochemistry* e *Agricultural Systems*, que frequentemente abordam estudos relacionados à simbiose micorrízica, ao manejo sustentável do solo e às práticas agrícolas em biomas semiáridos.

A indexação de periódicos de alto impacto na área agrícola e ambiental: a WoS é reconhecida pela indexação de periódicos de alto impacto e rigor acadêmico, por meio de sua divisão em coleções especializadas, como a *Science Citation Index Expanded* (SCIE) e o *Emerging Sources Citation Index* (ESCI). Essas coleções incluem revistas de renome que publicam estudos relevantes sobre o papel dos fungos micorrízicos na saúde do solo, no aumento da eficiência no uso de nutrientes e na sustentabilidade agrícola.

A compatibilidade com ferramentas de análise bibliométrica: a WoS oferece funcionalidades que permitem a exportação de dados de maneira estruturada, facilitando sua integração com ferramentas de análise bibliométrica, como o VOSviewer, utilizado neste estudo.

Aos filtros avançados para segmentação de pesquisas: outro diferencial da WoS é a disponibilidade de filtros avançados para a segmentação precisa das publicações.

3.3 Estratégia de busca

A estratégia de busca foi formulada para abranger uma gama ampla de termos relacionados aos FMAs, como "mycorrhizal", "mycorrhiza" e "mycorrhizal fungi", com o objetivo de mapear toda a produção científica relevante. Além disso, termos adicionais foram utilizados para segmentar as publicações com foco no Brasil, bioma Caatinga e regiões semiáridas, como "caatinga" e "semiarid climate".

3.4 Período de análise

O período de análise estabelecido (01/01/1945 a 31/12/2024) permite uma avaliação completa desde os primeiros estudos sobre micorrizas até as pesquisas mais recentes, oferecendo uma visão histórica das tendências e da evolução do campo.

3.5 Critérios de inclusão

Foram definidos critérios claros de inclusão de artigos que discutem a presença ou aplicação de FMAs na agricultura e ecologia de biomas semiáridos. A inclusão do Brasil e da Caatinga nas buscas ajuda a destacar o contexto específico das interações micorrízicas nessas regiões, cujas práticas agrícolas e ecologia do solo podem ser desafiadas por características ambientais adversas, como a seca. Os termos utilizados, a fim de destacar o Brasil e o bioma Caatinga, foram: "mycorrhizal", "caatinga" (usando a ferramenta de inclusão, pesquisa dentro do tópico), "semiarid Climate" (pesquisa dentro do tópico); e "BRAZIL" (usando a ferramenta de Countries/Regions).

3.6 Análise cienciométrica

A análise cienciométrica, por meio da exportação de dados para ferramentas como o VOSviewer, permite a visualização das redes colaborativas, identificação dos países e instituições mais ativos, e a evolução das palavras-chave. Esse tipo de análise não apenas fornece insights sobre o desenvolvimento do conhecimento, mas também ajuda a identificar quais áreas têm maior potencial para avanço, além de promover a identificação de gaps e a colaboração entre pesquisadores de diferentes regiões e instituições.

3.6.1 Etapas de análise no VOSviewer

O processo de análise foi conduzido em várias etapas, começando pela importação dos dados. Os arquivos exportados da Web of Science foram carregados no software VOSviewer no formato WoS.txt, garantindo que todas as informações necessárias estivessem disponíveis para processamento. Em seguida, foram configurados os parâmetros de análise, incluindo a definição das métricas e dos critérios de corte. Para a inclusão de termos, autores e instituições nos mapas gerados, estabeleceu-se um limite mínimo de cinco ocorrências.

Com os critérios definidos, os dados foram processados para a construção de mapas de redes, os quais representavam as interconexões entre autores, instituições e palavras-chave, permitindo uma melhor visualização das relações existentes. Após a geração dos mapas, realizou-se um ajuste detalhado, considerando aspectos como densidade e agrupamento. Esse refinamento foi feito por meio do método de normalização baseado no índice de associação, assegurando maior precisão na interpretação dos resultados.

3.6.2 Tipos de análises realizadas

O VOSviewer foi empregado para a realização de diversas análises, possibilitando uma compreensão mais aprofundada das conexões e tendências na produção científica. Inicialmente, a análise de coautoria permitiu identificar as principais redes de colaboração entre pesquisadores e instituições, evidenciando parcerias e interações acadêmicas.

Além disso, a análise de coocorrência de palavras-chave possibilitou mapear os termos mais frequentes, destacando temas recorrentes e identificando tópicos emergentes dentro da área estudada. Paralelamente, a análise de citações permitiu determinar os estudos mais influentes, assim como os autores de maior impacto, proporcionando uma visão clara da relevância de determinadas pesquisas.

Por fim, a análise de acoplamento bibliográfico foi realizada para verificar as conexões entre artigos com base nas referências compartilhadas, permitindo compreender como diferentes estudos se relacionam e contribuem para a evolução do conhecimento científico.

3.6.3 Apresentação e interpretação dos resultados

Os resultados obtidos foram organizados e apresentados em gráficos, tabelas e mapas de rede, de modo a facilitar a compreensão das tendências e padrões identificados. As análises foram estruturadas conforme as seguintes categorias:

3.6.3.1 Distribuição temporal das publicações

A análise da distribuição temporal das publicações é uma etapa fundamental em estudos cirométricos, pois permite visualizar a evolução histórica da produção científica em determinada área, identificando padrões de crescimento, períodos de estagnação e possíveis fatores associados a essas dinâmicas. No contexto desta pesquisa, essa análise buscou compreender como o interesse acadêmico pelos FFM evoluiu ao longo do tempo, com destaque para sua aplicação na agricultura sustentável e sua relevância em biomas semiáridos, como a Caatinga.

3.6.3.2 Análise geográfica e institucional

Foi realizada a elaboração de um gráfico que ilustra a evolução do número de publicações entre 1945 e 2024. Assim como a identificação de períodos de crescimento, estabilidade e possíveis fatores associados a essas dinâmicas.

A análise geográfica e institucional representa uma etapa crucial na compreensão da dinâmica global das pesquisas sobre FFM. Essa análise permite identificar os principais países, instituições e regiões responsáveis pela produção científica no tema, bem como avaliar a distribuição espacial do conhecimento e as redes de colaboração internacional estabelecidas ao longo do tempo.

No contexto deste estudo, essa análise foi conduzida com o auxílio da base WoS e do software VOSviewer, com o objetivo de: identificar os países líderes na produção científica sobre FFM; analisar a distribuição institucional das publicações para compreender quais universidades, centros de pesquisa e organizações têm se destacado; observar a evolução histórica da produção científica em diferentes regiões, identificando tendências de crescimento, estagnação e possíveis lacunas geográficas no desenvolvimento do conhecimento sobre micorrizas.

Para avaliar o filtro geográfico, foi feita a construção de um gráfico destacando os países com maior número de publicações sobre FFM.

3.6.3.3 Clusters de palavras-chave

A análise de clusters de palavras-chave é uma etapa fundamental na compreensão das tendências e direções de uma determinada área de pesquisa. No contexto deste estudo, essa análise foi aplicada para identificar os principais temas abordados nas pesquisas sobre

fungos FFM, com ênfase nas aplicações agrícolas, na dinâmica de absorção de nutrientes e na biodiversidade microbiana em biomas semiáridos, como a Caatinga.

Clusters de palavras-chave são agrupamentos de termos que aparecem frequentemente juntos nas publicações, indicando relações temáticas relevantes. Esses agrupamentos são formados com base na análise de coocorrência, que identifica a frequência e a proximidade com que determinados termos aparecem simultaneamente em diferentes artigos (Van Eck; Waltman, 2010). No contexto ciociométrico, a análise de clusters permite: mapear as áreas de maior relevância no campo de estudo; visualizar conexões entre diferentes temas; identificar lacunas de conhecimento; monitorar a evolução das tendências temáticas ao longo do tempo.

Logo, foram gerados mapas de coocorrência de palavras-chave, com identificação de agrupamentos temáticos (clusters). Por conseguinte, foi realizada a análise dos clusters para determinar as principais áreas de interesse e os tópicos emergentes relacionados aos fungos formadores de micorriza. Os resultados foram discutidos com base na literatura existente, buscando identificar convergências, divergências e lacunas de conhecimento que possam orientar pesquisas futuras.

3.7 Limitações metodológicas

Durante a realização deste estudo, algumas limitações metodológicas foram identificadas, influenciando a abrangência e a precisão dos resultados obtidos. Uma das principais restrições decorre da dependência exclusiva das publicações indexadas na WoS, o que pode levar à exclusão de estudos relevantes que estejam disponíveis em outras bases de dados. Essa limitação pode comprometer a representatividade do mapeamento científico ao restringir a análise a um conjunto específico de fontes. Outro desafio identificado refere-se à variação na nomenclatura das palavras-chave utilizadas pelos autores. Como não há um padrão universal para a terminologia adotada, algumas ocorrências podem não ser capturadas, resultando na perda de registros potencialmente importantes. Essa inconsistência pode afetar a precisão da análise de coocorrência de termos e a identificação de tendências emergentes.

Além disso, há restrições inerentes à abordagem ciociométrica, que se baseia exclusivamente em indicadores quantitativos, sem considerar a qualidade ou a profundidade do conteúdo das publicações analisadas. Assim, um estudo pode ser altamente citado sem necessariamente possuir rigor científico ou relevância acadêmica. Por fim, a predominância de publicações em inglês na Web of Science pode representar um obstáculo para a inclusão de pesquisas publicadas em outros idiomas. Essa limitação pode impactar especialmente estudos

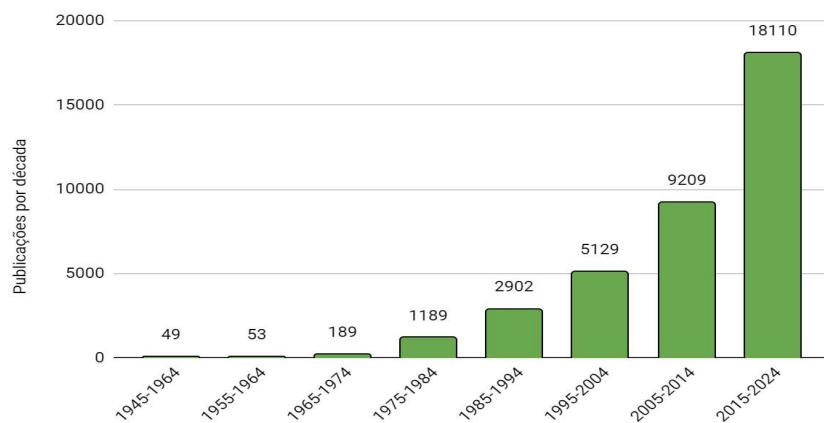
regionais ou produzidos em contextos nos quais a publicação em inglês não é predominante, reduzindo a diversidade das perspectivas analisadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca inicial realizada na base WoS, utilizando os termos "mycorrhizal", "mycorrhizal fungi" e "mycorrhiza", resultou em 36.860 publicações indexadas entre o ano de 1945 a 2024. Esse número expressivo demonstra a relevância científica dos FFM.

A análise dos dados iniciais obtidos na WoS e sintetizados no gráfico 1 revela um crescimento exponencial no número de publicações científicas sobre FFM ao longo das décadas. Esse aumento reflete não apenas o avanço tecnológico e metodológico na área, mas também a crescente relevância ecológica e agrícola desses organismos, especialmente em contextos de sustentabilidade e manejo do solo (Tedersoo et al., 2020; Öpik et al., 2010).

Gráfico 1 - Número de publicações indexadas por década no período de 1945-2024.



Fonte: Web of Science (2025).

O gráfico apresenta a evolução do número de publicações científicas sobre os FFM ao longo das décadas, desde 1945 até 2024. A análise desses dados revela um crescimento exponencial da produção científica na área de estudo, especialmente a partir da década de 1980.

O levantamento realizado mostra que, entre 1945 e 2024, um montante de 36.860 publicações foram indexadas na WoS. No entanto, esse volume não foi distribuído uniformemente ao longo do tempo. A análise por décadas demonstra que as pesquisas sobre FFM permaneceram incipientes até a década de 1970, com menos de 500 publicações acumuladas até esta data. Esse período inicial foi caracterizado principalmente por estudos

descritivos sobre a estrutura e morfologia das micorrizas, sem grande aprofundamento funcional (Tedersoo et al., 2014).

As pesquisas dessa década estavam voltadas principalmente para a identificação das diferentes formas de micorrizas, como as arbusculares, ectomicorrizas e micorrizas ericóides (Öpik et al., 2010). Além disso, foram estabelecidos os primeiros experimentos de inoculação micorrízica em espécies de importância agrícola, abrindo caminho para a aplicação desses fungos na melhoria da nutrição das plantas (Genre et al., 2020).

Entre as décadas de 1970 e 1990, a pesquisa sobre FFM começou a se expandir rapidamente, impulsionada pela crescente preocupação com o manejo sustentável do solo e pela busca por alternativas ao uso intensivo de fertilizantes minerais. O número de publicações cresceu significativamente, saltando de 1.189 entre 1975-1984 para 2.902 entre 1985-1994, refletindo o aumento do interesse científico pelo tema. Esse crescimento coincide com a incorporação de novas técnicas experimentais e com o início das discussões sobre a aplicação das micorrizas na agricultura sustentável (Smith; Read, 2008; Van Der Heijden et al., 2015).

Nesse período, começaram a ser desenvolvidos os primeiros bioinoculantes comerciais à base de FFM, especialmente para culturas como trigo, milho e soja. Esse avanço marcou a transição da pesquisa básica para aplicações práticas na agricultura, promovendo a adoção dessas biotecnologias para melhorar a absorção de nutrientes e a resistência das plantas a estresses ambientais (Vosátka et al., 2013). Além disso, a introdução das técnicas de microscopia eletrônica permitiu a observação detalhada das estruturas micorrízicas, como os arbúsculos e hifas extrarradiculares, possibilitando um melhor entendimento da relação simbiótica entre plantas e fungos (Tedersoo et al., 2014).

A partir da década de 1990, a pesquisa sobre FFM entrou em uma nova fase, caracterizada pelo uso de ferramentas de biologia molecular e pelo crescente interesse no papel ecológico das micorrizas em ecossistemas naturais e agrícolas. O número de publicações continuou crescendo, atingindo 5.129 entre 1995-2004 e 9.209 entre 2005-2014.

O avanço das técnicas de PCR e sequenciamento de DNA permitiu a identificação mais precisa das espécies de FFM, revelando uma diversidade muito maior do que se imaginava anteriormente (Öpik et al., 2010; Van Der Heijden et al., 2015). Paralelamente, pesquisas começaram a enfatizar a importância das micorrizas na mitigação das mudanças climáticas, evidenciando seu papel no sequestro de carbono no solo e na adaptação das plantas a estresses ambientais, como seca e salinidade (Begum et al., 2019; Averill; Hawkes, 2016).

A sustentabilidade agrícola também ganhou destaque nesse período. Pesquisas demonstraram que a inoculação com FFM pode reduzir a necessidade de fertilizantes sintéticos, aumentar a produtividade e melhorar a resiliência das plantas em solos degradados. Esses benefícios impulsionaram a adoção de práticas baseadas em micorrizas em sistemas de agricultura regenerativa e agroecologia, destacando seu papel essencial na manutenção da fertilidade do solo e na promoção de serviços ecossistêmicos.

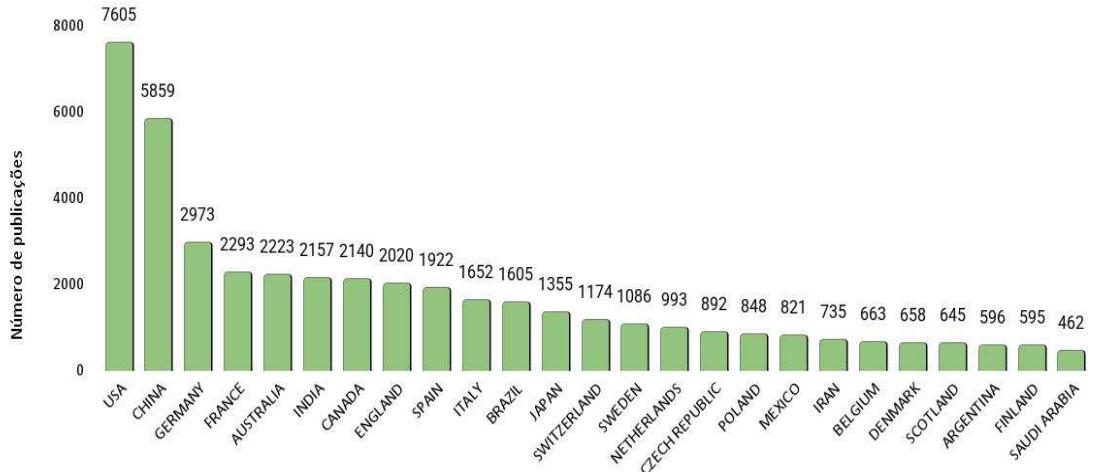
Nos últimos anos, a pesquisa sobre FFM atingiu um pico histórico, com 18.110 publicações entre 2015 e 2024, representando quase 50% de toda a produção científica sobre o tema. Esse aumento reflete o crescimento da pesquisa interdisciplinar, combinando ecologia, biotecnologia, microbiologia do solo e inteligência artificial, tem sido essencial para compreender a dinâmica dos FFM em diferentes ecossistemas. A inteligência artificial tem se mostrado uma ferramenta promissora para analisar o microbioma do solo, permitindo prever e otimizar sua funcionalidade em prol da sustentabilidade agrícola e da saúde dos ecossistemas (Pace et al., 2025).

4.1 Análise da distribuição geográfica das publicações sobre FFM

Diante dos dados coletados no WoS, pode-se analisar a distribuição geográfica da produção científica sobre FFM. Historicamente, os países desenvolvidos da América do Norte e Europa dominaram a produção científica na área, impulsionados por instituições de pesquisa de renome, financiamento robusto e infraestrutura avançada para estudos em microbiologia do solo, ecologia e biotecnologia agrícola (Tedersoo et al., 2020). No entanto, nas últimas duas décadas, houve um crescimento significativo na produção científica em países emergentes, particularmente na Ásia e América Latina, impulsionado pelo interesse crescente em práticas agrícolas sustentáveis e pela valorização dos serviços ecossistêmicos prestados pelas micorrizas.

A partir dos dados foi feito um gráfico que demonstra a publicação por país (gráfico 2), permitindo uma análise detalhada da produção científica global na área. A distribuição evidencia a concentração da pesquisa em países com infraestrutura consolidada em ciência e tecnologia, além de indicar o crescimento da participação de países emergentes, como o Brasil.

Gráfico 2 - Ranking de publicações indexadas por países no período de 1945-2024.



Fonte: Web of Science (2025).

Os dados obtidos na WoS indicam que os Estados Unidos (7.605 publicações) lideram a produção científica sobre FFM, seguidos pela China (5.859 publicações) e Alemanha (2.973 publicações). Esse domínio norte-americano e europeu pode ser atribuído à forte presença de programas de pesquisa e financiamento voltados para a microbiologia do solo, biotecnologia agrícola e ecologia aplicada (Van Der Heijden et al., 2015).

Nos últimos anos, a China tem registrado um crescimento acelerado na produção científica, impulsionada por investimentos governamentais em pesquisa agroecológica e biotecnologia para aumentar a sustentabilidade da produção agrícola (Chen et al., 2012). A presença da Alemanha e da França entre os países com maior número de publicações também reflete a tradição europeia de pesquisa em interações planta-microrganismo, com enfoque em práticas agrícolas sustentáveis e restauração ecológica (Tedersoo et al., 2020).

Entre os países emergentes, o Brasil se destaca com 1.605 publicações, ocupando uma posição de destaque na América Latina. A pesquisa brasileira sobre FFM está fortemente associada a estudos sobre agricultura tropical, solos degradados e ecossistemas semiáridos, como a Caatinga e o Cerrado. Esse crescimento é impulsionado por instituições como a Embrapa, Universidades Federais e centros de pesquisa em microbiologia do solo, que têm investido na aplicação de FFM para melhorar a produtividade agrícola e reduzir a dependência de fertilizantes químicos (Bonfim et al., 2013).

Além do Brasil, outros países emergentes, como Índia (2.157 publicações) e México (821 publicações), também têm aumentado sua produção científica, motivados pela necessidade de desenvolver sistemas agrícolas mais resilientes e sustentáveis, especialmente em regiões sujeitas a estresses ambientais (Singh et al., 2020).

Outro fator determinante na evolução da pesquisa sobre FFM tem sido a expansão das redes de colaboração internacional. Projetos como a Global Mycorrhizal Network e iniciativas financiadas por órgãos internacionais têm promovido o intercâmbio de pesquisadores e a geração de bancos de dados globais sobre diversidade e função dos FFM.

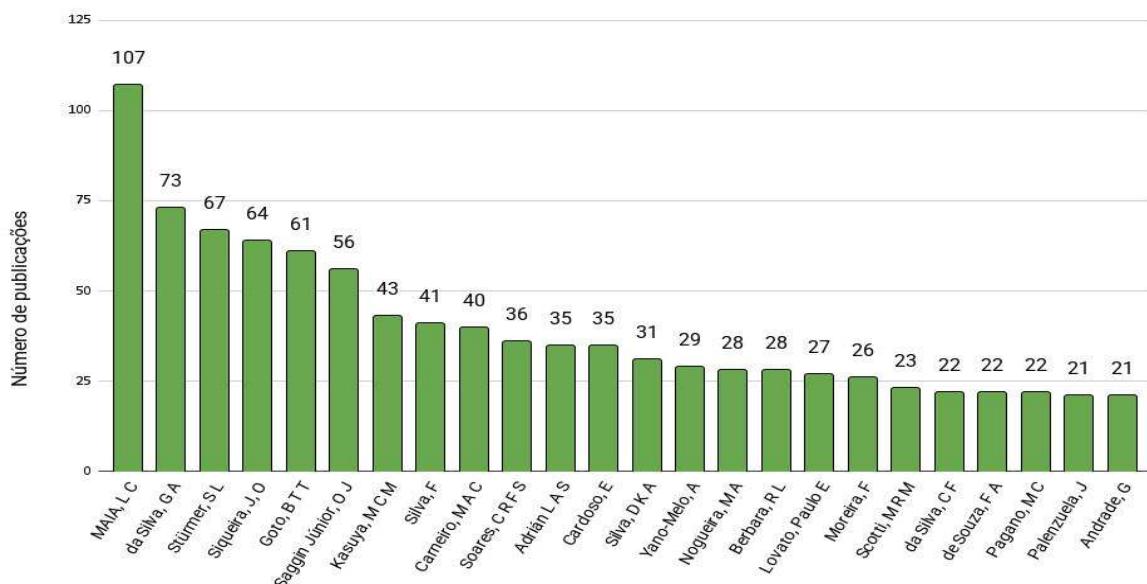
Além disso, análises bibliométricas indicam que países como EUA, China e Alemanha possuem forte colaboração internacional, enquanto países emergentes ainda enfrentam desafios na integração em redes de pesquisa globais, devido a barreiras de financiamento e infraestrutura (Tedersoo et al., 2020).

A análise da distribuição geográfica da pesquisa sobre FFM revela um cenário de transição, com países tradicionalmente líderes mantendo sua relevância, mas com um crescimento expressivo da produção científica em países emergentes. No futuro, espera-se que o conhecimento gerado por essas pesquisas contribua para a conservação da biodiversidade do solo, melhoria da produtividade agrícola e mitigação dos impactos ambientais da agricultura convencional.

4.2 Análise da produção científica sobre FFM no Brasil

A pesquisa sobre FFM no Brasil tem se consolidado ao longo das últimas décadas, refletindo o crescimento da microbiologia do solo e sua aplicação na agricultura sustentável, ecologia e restauração ambiental.

Gráfico 3 - Ranking de publicações indexadas por autores no Brasil no período de 1945-2024.



Fonte: Web of Science (2025).

O gráfico 3 exibe o ranking dos pesquisadores brasileiros mais produtivos na área. Com 107 publicações, a pesquisadora mais produtiva no Brasil sobre FFM é a Leonor Costa Maia (Maia, L. C.), pesquisadora da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), possui um vasto histórico de publicações voltadas à diversidade e biogeografia dos fungos micorrízicos, especialmente em ecossistemas semiáridos, como a Caatinga. Seu trabalho contribuiu significativamente para a compreensão da importância dos FFM na adaptação das plantas ao estresse hídrico e na recuperação de solos degradados.

Gladstone Alves da Silva (da Silva, G. A.), com 73 publicações, atualmente é professor adjunto da UFPE. Tem experiência na área de Micologia, atuando principalmente nas áreas de taxonomia molecular e ecologia de fungos. Além de estudos avaliando o potencial de infectividade de fungos micorrízicos.

O pesquisador Sérgio Luís Stürmer (Stürmer, S. L.), com 67 publicações, tem uma forte atuação na área de biogeografia e conservação de FFM, analisando como esses fungos são influenciados por mudanças ambientais e pelo uso do solo. Seus estudos têm sido fundamentais para a criação de estratégias de preservação da microbiota do solo em ambientes impactados pela atividade agrícola.

José O. Siqueira (Siqueira, J. O.), com 64 publicações, é o pioneiro na pesquisa sobre FFM e sua aplicação na recuperação de solos degradados, Siqueira tem explorado a interação entre fungos micorrízicos e a rizosfera de plantas cultivadas e nativas. Seu trabalho teve grande impacto na agroecologia e no desenvolvimento de tecnologias para aumentar a eficiência do uso de fertilizantes.

O autor Bruno T. Goto (GOTO, B. T.), pesquisador da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) com 61 publicações, é especialista na área de botânica criptogâmica e microbiologia, com ênfase em taxonomia de fungos. Goto tem descrito novas espécies de *Glomeromycota* e estudado sua filogenia, trazendo contribuições importantes para a classificação desses microrganismos.

Danielle Karla A. da Silva (Da Silva, D. K. A.), pesquisadora da UFPE, com 31 publicações, tem experiência na área de micologia, com ênfase nos fungos micorrízicos arbusculares. Atuando principalmente nos temas de diversidade, ecologia e aplicação de fungos micorrízicos arbusculares e avaliação da atividade microbiana do solo. Ela têm investigado interações entre fungos e plantas nativas do Brasil, particularmente em biomas como a Mata Atlântica e o Cerrado. Seus estudos fornecem insights sobre como os FFM influenciam a absorção de nutrientes e a resistência das plantas ao estresse ambiental.

Adriana Mayumi Yano de Melo (Yano-Melo, A. M.), atua na Universidade Federal do Vale do São Francisco (Univasf) e na UFPE, com 29 publicações, possui experiência na área de botânica e microbiologia, com ênfase em botânica aplicada e microbiologia do solo, atuando principalmente nos temas de aplicação e produção de FMA, uso de FMA na mitigação de estresse abiótico no semiárido e produção de mudas.

Diante do ranking dos autores mais produtivos elencados no gráfico 3, é importante salientar a atuação dos pesquisadores advindos da região Nordeste do Brasil. Esse protagonismo está associado à alta biodiversidade microbiana dos biomas nordestinos e à necessidade de estratégias sustentáveis para a melhoria da fertilidade do solo e mitigação dos impactos da degradação ambiental.

4.2.1 Análise bibliométrica com o software VOSviewer sobre FFM no Brasil

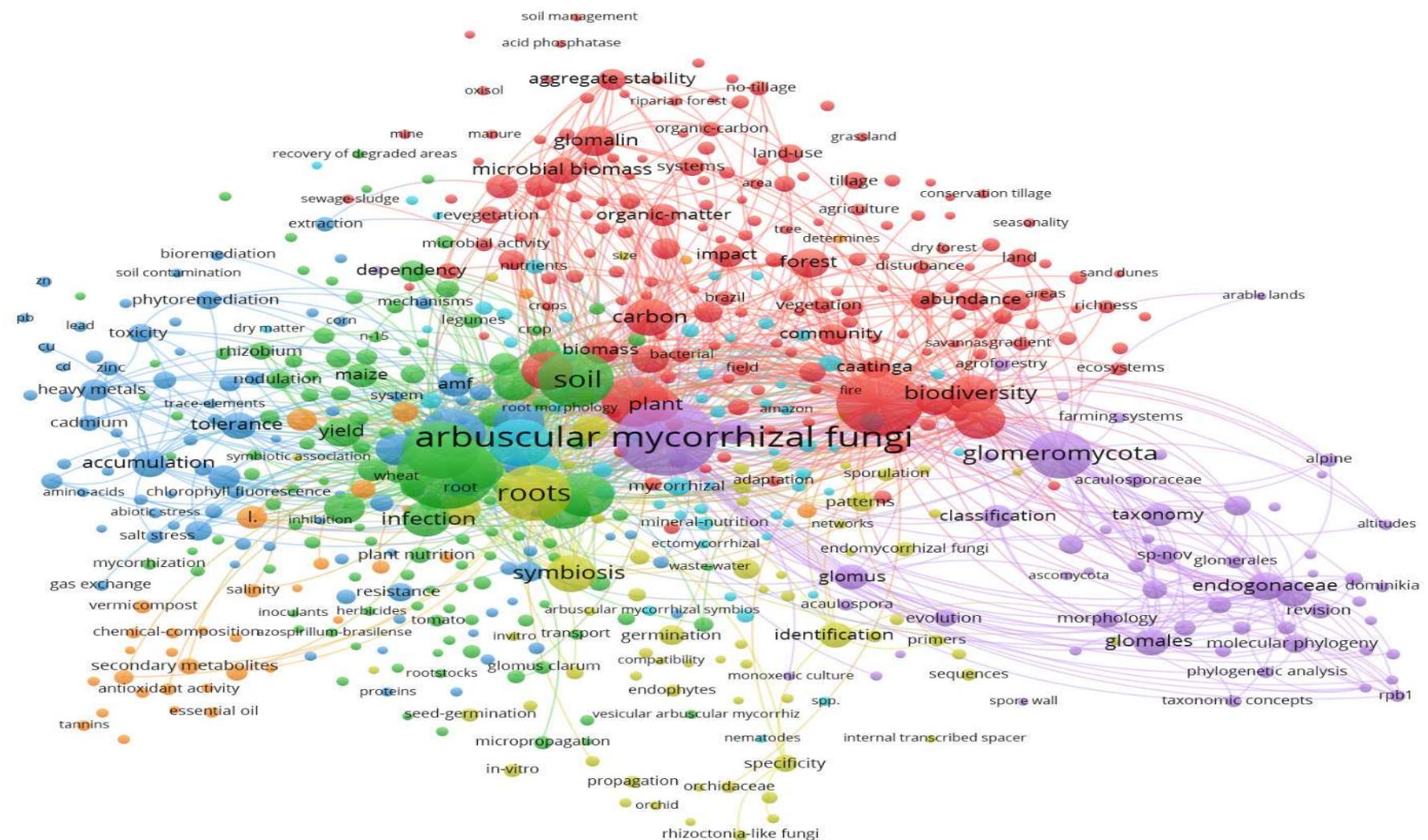
A análise bibliométrica com o software VOSviewer permitiu compreender melhor as tendências e conexões temáticas dentro desse campo. Através do mapeamento de coocorrência de palavras-chave, foi possível identificar 8 clusters temáticos: quatro clusters principais, diferenciados por cores, e alguns clusters menores interligados. Cada cluster representa um conjunto de temas e palavras-chave que aparecem com frequência nas pesquisas sobre FFM.

Na figura 1, o cluster principal na cor verde, apresenta termos que mais se destacaram tais quais: *arbuscular mycorrhizal fungi, roots, symbiosis, infection, resistance, yield, maize, plant nutrition*. Este grupo de termos destaca a interação simbiótica entre FMA e plantas, abordando temas como absorção de nutrientes, resistência ao estresse e impacto na produtividade agrícola. Estudos indicam que os FMA desempenham um papel fundamental na nutrição vegetal, principalmente na absorção de fósforo, além de promoverem maior resiliência das plantas a fatores abióticos, como seca e salinidade (Smith & Read, 2008; Gianinazzi et al., 2010).

O crescente interesse pelos FMA nessa área tem impulsionado a adoção de inoculantes micorrízicos em sistemas agrícolas, visando reduzir o uso de fertilizantes minerais e melhorar a sustentabilidade da produção agrícola (Vosátká et al., 2013).

O cluster azul, foi um dos mais bem definidos na análise, apresentando termos como *phytoremediation, heavy metals, tolerance, bioremediation, cadmium, toxicity, abiotic stress*. Esse cluster está relacionado ao uso dos FMA na recuperação de solos contaminados e degradados.

Figura 1 - Rede bibliométrica de palavras-chaves em coocorrência nas pesquisas indexadas no Brasil.



Fonte: Dados - Web of Science. Rede bibliométrica: VOSViewer (2025).

Pesquisas demonstram que os FMA podem aumentar a tolerância das plantas a metais pesados, como cádmio e chumbo, além de favorecerem a fitorremediação ao influenciar a absorção e imobilização desses elementos no solo (Orwin et al., 2011; Begum et al., 2019). Além disso, os FMA contribuem para a redução dos impactos de fatores ambientais adversos, como estresse hídrico, promovendo a adaptação de espécies vegetais em regiões áridas e semiáridas (Ruiz-Lozano et al., 2016).

O cluster vermelho apresentou *biodiversity, microbial biomass, carbon, organic matter, impact, soil management, land use, conservation* como termos principais. Esse cluster explora o papel dos FMA nos ciclos biogeoquímicos, destacando sua relevância na formação da biomassa microbiana, no sequestro de carbono e na estabilidade do solo (Wang et al., 2016).

O quarto cluster principal, na cor roxa, apresentou os seguintes termos: *glomeromycota, classification, taxonomy, glomus, phylogeny, molecular analysis*. Esse grupo foca no estudo taxonômico e genético dos FMA, com ênfase no filo Glomeromycota. Os avanços em sequenciamento metagenômico e transcriptômico permitiram uma melhor caracterização dos FMA diretamente no solo, sem necessidade de cultivo em laboratório (Tedersoo et al., 2020).

Essas abordagens são fundamentais para identificar novas espécies e compreender a diversidade genética dos FFM, o que pode contribuir para o desenvolvimento de inoculantes micorrízicos mais eficientes para diferentes tipos de solo e culturas agrícolas.

Além dos quatro clusters principais identificados na análise bibliométrica da pesquisa sobre FFM no Brasil, há também clusters secundários que representam subáreas emergentes ou conexões interdisciplinares dentro desse campo de estudo. Esses clusters menores não são independentes, mas sim ramificações dos temas centrais, indicando como a pesquisa sobre FFM tem se expandido para diferentes aplicações e abordagens científicas.

O cluster secundário amarelo apresentou termos como: *inoculants, propagation, compatibility, biotechnology, biofertilizers*. Esse grupo está relacionado ao desenvolvimento de inoculantes micorrízicos comerciais e à biotecnologia aplicada à produção de biofertilizantes. A crescente adoção desses produtos visa substituir fertilizantes químicos, promovendo eficiência na absorção de nutrientes e aumento da produtividade agrícola (Vosátka et al., 2013).

Com os avanços em propagação in vitro e formulação de inoculantes específicos para diferentes culturas e solos, a pesquisa tem se voltado para melhorar a sobrevivência e

eficácia dos FMA em campo, buscando otimizar sua aplicação na agricultura sustentável (Gianinazzi et al., 2010).

O cluster secundário laranja teve como principais termos: *secondary metabolites, antioxidant activity, essential oil, flavonoids, tannins*. Essa subárea explora a influência dos FMA na produção de metabólitos secundários em plantas, incluindo compostos como flavonóides, taninos e óleos essenciais. Pesquisas indicam que a simbiose com FMA pode modular a biossíntese desses compostos, resultando em melhoria da resistência das plantas a estresses ambientais e no aumento da produção de metabólitos bioativos em plantas medicinais e aromáticas (Begum et al., 2019). Esses achados são particularmente relevantes para a agricultura orgânica e produção sustentável de bioativos, como óleos essenciais e antioxidantes de interesse farmacêutico e alimentar.

O cluster secundário azul claro obteve os termos mais recorrentes, tais quais: *rhizobium, bacterial communities, microbial interactions, mycorrhization*. Esse cluster aborda as interações entre FMA e outros microrganismos do solo, como bactérias fixadoras de nitrogênio (*Rhizobium*) e bactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPB). Pesquisas demonstram que essas interações podem potencializar os benefícios dos FMA, melhorando a nutrição mineral das plantas e promovendo resistência ao estresse ambiental (Tedersoo et al., 2020).

A combinação entre FFM e outras comunidades microbianas do solo tem sido investigada como uma estratégia para otimizar o uso de biofertilizantes e melhorar a produtividade agrícola sem impactos ambientais negativos.

A segunda imagem gerada pelo VOSviewer apresenta um mapa de colaboração científica baseado em publicações sobre FFM nas universidades e grupos de pesquisa no Brasil. Os nós representam instituições de pesquisa, e as conexões entre elas indicam colaborações e coautoria. Quanto maior o nó, mais publicações associadas à instituição; e quanto mais espessa a conexão, mais forte é a colaboração entre as universidades.

Tabela 1 - Universidades Brasileiras e suas respectivas áreas de pesquisa relacionadas à FFM.

Universidade	Áreas de Pesquisa Relacionadas a FFM
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)	Ecologia do solo, diversidade de FMA, biotecnologia agrícola, microbiologia do solo
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)	Manejo sustentável, inoculantes biológicos, adaptação de plantas a estresses abióticos
Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF)	Recuperação de áreas degradadas, fitorremediação, resistência à seca e salinidade
Universidade de São Paulo (USP)	Microbiologia agrícola, interações micorrízicas, uso

	de FMA na agricultura sustentável
Universidade Federal de Lavras (UFLA)	Biotecnologia de FMA, bioinoculantes, fertilidade do solo e nutrição de plantas
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)	Ecologia de FMA, interação solo-planta, sustentabilidade agrícola
Universidade Estadual de Londrina (UEL)	Taxonomia e biodiversidade de FMA, microbiota do solo.
Universidade Federal do Ceará (UFC)	Fungos micorrízicos em solos salinos e áridos, biofertilizantes
Universidade Federal da Bahia (UFBA)	Ecologia microbiana, diversidade funcional de FMA
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)	Fitorremediação, interações entre FMA e metais pesados
Embrapa Agrobiologia	Desenvolvimento de bioinoculantes, aplicações agrícolas de FMA, simbiose planta-microrganismo

Fonte: Autora (2025).

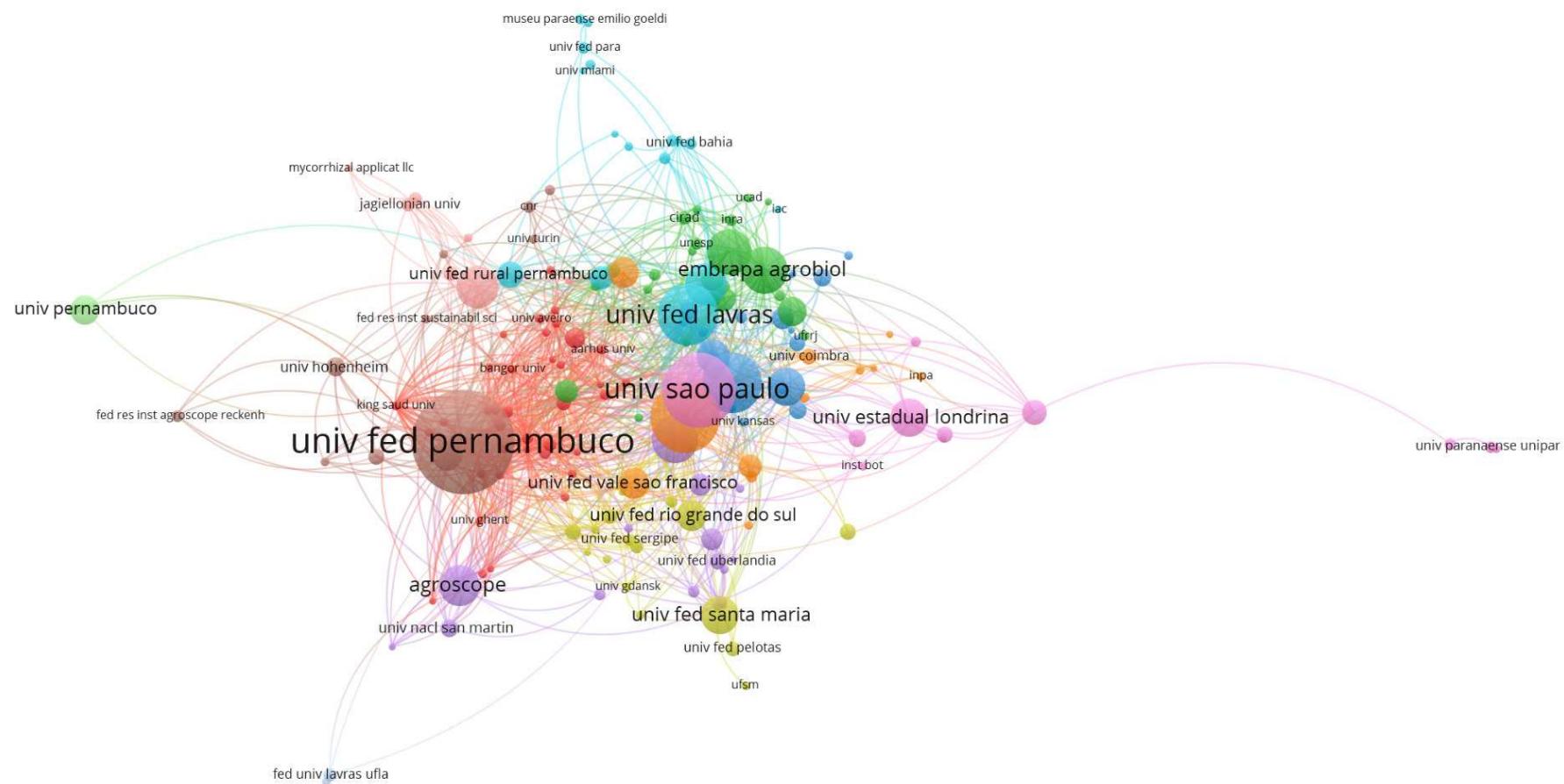
A tabela 1 evidencia o panorama da pesquisa sobre FMA no Brasil, destacando as principais instituições acadêmicas e seus focos de investigação. Essa distribuição reflete a diversidade de abordagens científicas adotadas para o estudo dos fungos micorrízicos, que vão desde pesquisas voltadas para a biotecnologia agrícola e microbiologia do solo até aplicações em manejo sustentável, recuperação ambiental e fitorremediação.

A análise da tabela permite identificar um padrão geográfico na especialização das pesquisas. Nas Universidades da região Nordeste (UFPE, UFRPE, UNIVASF, UFC, UFBA), o maior foco está em manejo sustentável, resistência ao estresse abiótico, recuperação de solos degradados e biofertilizantes. Isso está alinhado com os desafios da Caatinga e de outros ecossistemas semiáridos, onde a adaptação das plantas a solos pobres e à escassez hídrica é um fator crítico para a agricultura.

Já a região Sudeste (USP, UFLA), dá ênfase em biotecnologia agrícola, bioinoculantes e nutrição de plantas, o que reflete o forte desenvolvimento da agricultura de precisão e do uso de microrganismos para otimizar a produtividade agrícola.

A região Sul (UFSM, UFRGS, UEL), possui estudos voltados para ecologia de FMA, sustentabilidade agrícola, taxonomia e interações com metais pesados, refletindo um interesse na aplicação de FMA para a remediação de solos contaminados e na conservação da biodiversidade microbiana em solos temperados. Instituição Nacional de Pesquisa (Embrapa Agrobiologia), como um centro de pesquisa voltado para o desenvolvimento de tecnologias aplicadas à agropecuária, a Embrapa se destaca na produção de bioinoculantes e no estudo da

Figura 2 - Rede bibliométrica de instituições de pesquisa mais atuantes no Brasil.



Fonte: Dados - Web of Science. Rede bibliométrica: VOSViewer (2025).

simbiose planta-microrganismo, promovendo soluções práticas para a agricultura sustentável no Brasil.

A partir da figura 2, pode-se ver que dentre as universidades brasileiras, a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) aparece como a instituição com o maior volume de publicações sobre FMA. Seu papel de liderança na pesquisa está refletido no tamanho do nó no mapa de co-autoria, indicando um alto número de estudos e colaborações com outras instituições. A Universidade de São Paulo (USP) também se destaca como um polo importante, especialmente em pesquisas voltadas para ecologia do solo, microbiologia e aplicações biotecnológicas dos FMA na agricultura.

Outro centro de grande relevância é a Universidade Federal de Lavras (UFLA), conhecida por sua forte atuação em biotecnologia agrícola e microbiologia do solo, além de contribuir para o desenvolvimento de bioinoculantes baseados em FMA. A Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e a Universidade Estadual de Londrina (UEL) também aparecem como instituições de referência, com pesquisas voltadas para a agricultura sustentável, taxonomia e biodiversidade dos FMA.

A presença da Embrapa Agrobiologia reforça a conexão entre pesquisa acadêmica e aplicações práticas na agricultura. Como instituição referência na área, a Embrapa tem colaborado com diversas universidades no desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, como o uso de FMA na melhoria da fertilidade do solo e no aumento da resistência das plantas a estresses ambientais.

Os padrões de colaboração observados no mapa revelam uma forte interação entre universidades do sudeste e sul do Brasil, com maior concentração de publicações e parcerias nessas regiões. No entanto, algumas instituições aparecem de forma mais isolada, o que indica oportunidades para o fortalecimento da cooperação científica em nível nacional.

Algumas tendências podem ser avaliadas correlacionando a Figura 2 e a Tabela 1, como a incorporação de pesquisas em biotecnologia e aplicações agrícolas com a USP, UFLA e Embrapa liderando pesquisas voltadas para o uso de bioinoculantes, o que tem impacto direto na redução da dependência de fertilizantes químicos e no aumento da produtividade agrícola.

Instituições como UFPE, UFBA e UEL se concentram na diversidade funcional e taxonômica dos FMA, contribuindo para o entendimento de como esses fungos interagem com diferentes solos e plantas em ecossistemas brasileiros.

Já as Universidades como UNIVASF e UFRGS destacam-se no estudo dos FMA em solos contaminados e sob estresses como seca e salinidade, investigando o potencial desses fungos para restauração ambiental e melhoria da qualidade do solo.

Enquanto a UFC e a UFRPE desenvolvem pesquisas voltadas para solos áridos e salinos, abordando o papel dos FMA na resistência das plantas ao estresse hídrico e na adaptação a solos degradados.

De maneira geral, a pesquisa brasileira sobre FMA tem sido conduzida principalmente por universidades públicas e centros de pesquisa voltados para a agricultura, biotecnologia e conservação ambiental. O fortalecimento das redes de colaboração e a ampliação do financiamento para essa área podem contribuir ainda mais para o desenvolvimento de tecnologias inovadoras e sustentáveis baseadas no uso dos FMA.

4.3 Análise da produção científica sobre FFM na Caatinga

Dentro da pesquisa do WoS, foram encontrados cerca de 92 trabalhos indexados utilizando os termos: “mycorrhizal”, “caatinga” (usando a ferramenta de inclusão, pesquisa dentro do tópico), “semiarid Climate” (pesquisa dentro do tópico); e BRAZIL (usando a ferramenta de Countries/Regions).

A partir dos dados do WoS, a análise bibliométrica do VOSviewer gerou uma imagem (figura 3) contendo 5 clusters, que demonstram as áreas de pesquisa específicas dentro do estudo de FFM no Brasil, com destaque para a Caatinga e o clima semiárido.

O primeiro grupo de pesquisas, representado pelo cluster verde na figura 3, concentrou-se na taxonomia, filogenia e diversidade dos FMA. Esse cluster abrange estudos sobre a diversidade e classificação dos FMAs, com ênfase na variação da composição dessas comunidades em solos semiáridos. Incluindo a caracterização de novas espécies dentro do filo Glomeromycota, que é predominante nos solos da Caatinga. Termos como *taxonomy*, *phylogeny*, *genera* e *spores* sugerem um forte interesse na descrição e compreensão da distribuição dos FMA em diferentes condições ambientais.

Silva et al. (2014) investigaram a distribuição dos FMAs ao longo de um gradiente ambiental no semiárido brasileiro, demonstrando que fatores como tipo de solo, disponibilidade hídrica e vegetação associada influenciam significativamente a riqueza e a estrutura das comunidades fúngicas. Os resultados indicam que espécies pertencentes ao filo Glomeromycota apresentam padrões distintos de ocorrência conforme as condições edáficas e climáticas, destacando a importância dessas interações para a resiliência das plantas e a sustentabilidade dos ecossistemas secos. Esse conhecimento é essencial para estratégias de

manejo da fertilidade do solo e conservação da biodiversidade microbiana em regiões áridas e semiáridas.

Além disso, esse cluster também se conecta a estudos que investigam a interação dos fungos com diferentes tipos de solo e vegetação, indicando que a composição das comunidades micorrízicas pode variar conforme fatores como tipo de bioma, disponibilidade de nutrientes e regime hídrico. Essa linha de pesquisa é essencial para compreender como os FMA se adaptam a ambientes áridos e quais espécies desempenham papéis-chave na manutenção da estabilidade ecológica desses ecossistemas.

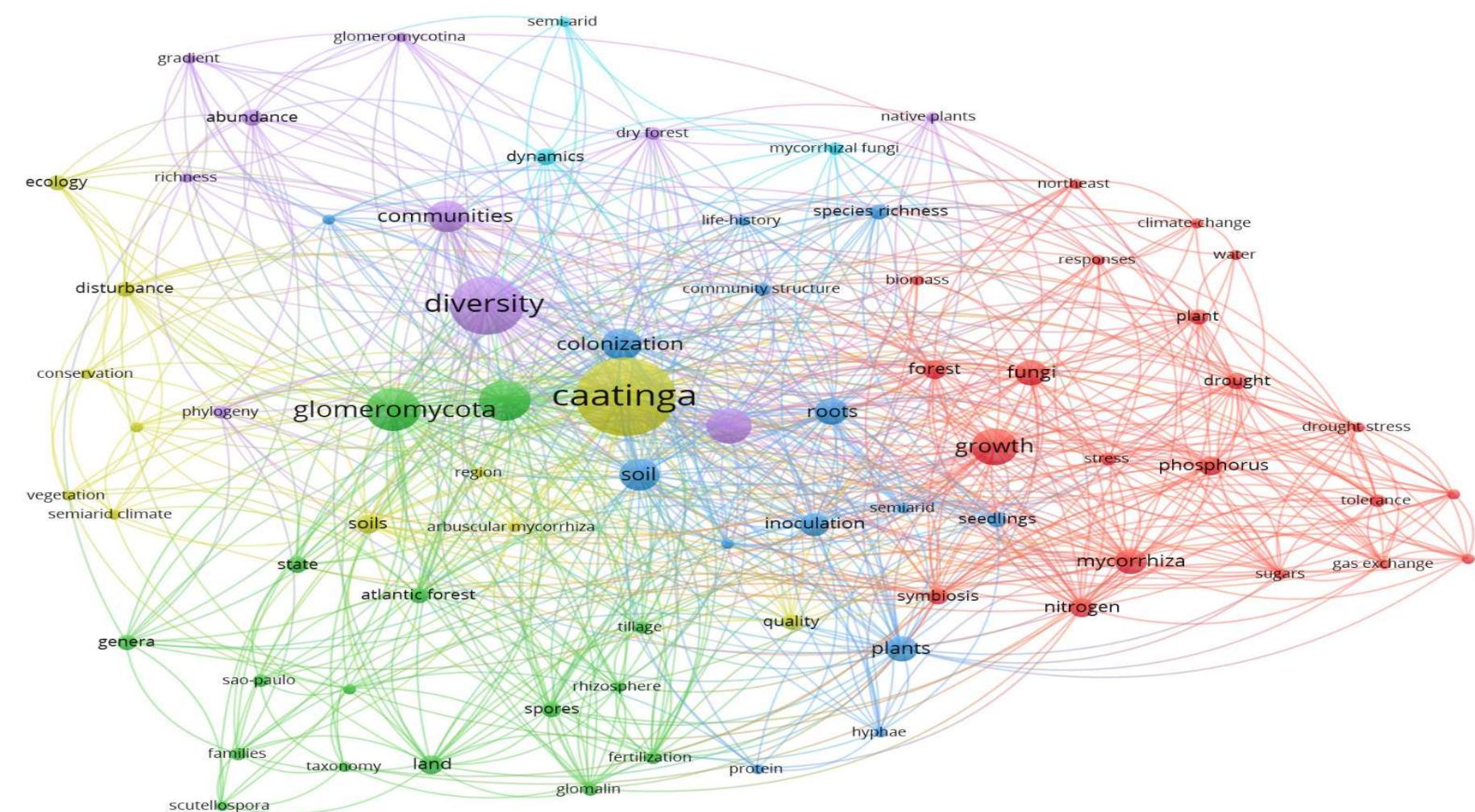
Outro grande eixo de pesquisa é representado pelo cluster azul, que aborda as funções ecológicas dos FMA na Caatinga e outros ecossistemas semiáridos. Esse grupo de estudos investiga como os fungos micorrízicos influenciam processos como ciclo de nutrientes, estrutura das comunidades vegetais e sucessão ecológica em solos degradados.

Termos como *soil, colonization, communities e dynamics* reforçam a ideia de que a pesquisa nessa área busca entender como as micorrizas afetam a resiliência das plantas e a regeneração de ecossistemas impactados por perturbações ambientais, como desmatamento e desertificação. Estudos como Brundrett (2009) relatam que fatores ambientais e implícitos ao hospedeiro simbionte são capazes de influenciar a ecologia das comunidades micorrízicas. Assim como as propriedades de solo também afetam a diversidade de FMA (Lekberg et al., 2007). Estudos evidenciando essas informações são essenciais para a compreensão da função ecológica dos FMAs e sua aplicação no manejo sustentável de solos tropicais e semiáridos.

O cluster vermelho concentra pesquisas que relacionam os FMA ao crescimento vegetal e à tolerância a estresses ambientais, como seca e baixa fertilidade do solo. Esse grupo de estudos está fortemente conectado a temas como *growth, drought, phosphorus e tolerance*, indicando que os pesquisadores buscam entender como a simbiose micorrízica pode melhorar a eficiência no uso da água e nutrientes pelas plantas, promovendo sua adaptação a condições adversas.

Dentro desse cluster, destacam-se também estudos sobre a capacidade das micorrizas de aumentar a absorção de P — um nutriente essencial para o desenvolvimento das plantas, mas frequentemente limitado nos solos da Caatinga (Moreira; Siqueira, 2020). Além disso, pesquisas recentes vêm explorando a produção de metabólitos secundários induzidos pelos FMA, que podem aumentar a resistência das plantas ao estresse térmico e hídrico, o que é particularmente relevante diante das mudanças climáticas.

Figura 3 - Rede bibliométrica de palavras-chaves em coocorrência para Caatinga.



Fonte: Dados - Web of Science. Rede bibliométrica: VOSViewer (2025).

A presença de palavras-chave como *drought*, *phosphorus*, *stress* e *tolerance* indica uma forte conexão com pesquisas voltadas para a adaptação de culturas agrícolas e espécies nativas à aridez, uma preocupação central no manejo sustentável da Caatinga e de outras áreas semiáridas (Begum et al., 2019).

O cluster roxo aborda a relação entre fungos micorrízicos e biodiversidade, destacando sua importância para a manutenção dos ecossistemas semiáridos. Estudos nesse grupo avaliam como os FMA interagem com diferentes espécies vegetais e como essa interação pode afetar a composição da vegetação ao longo do tempo.

A presença de termos como *abundance*, *richness* e *conservation* reforça a ideia de que as pesquisas desse cluster estão voltadas para a avaliação dos impactos das atividades humanas na microbiota do solo e na consequente perda de biodiversidade em áreas afetadas por práticas como a agricultura intensiva e a urbanização (Jansson; Hofmockel, 2019). Assim, esse eixo temático contribui para o desenvolvimento de estratégias voltadas à conservação dos solos e à sustentabilidade dos ecossistemas naturais e agrícolas.

Por fim, dentro dos clusters principais, o amarelo está relacionado à interação entre os FMAs e fatores ambientais, incluindo a conservação da biodiversidade, o impacto das mudanças climáticas e a qualidade do solo. Termos como *conservation*, *semiarid climate*, *soil* e *disturbance* refletem pesquisas que analisam como a variação climática influencia os FMAs e sua capacidade de adaptação em solos secos e arenosos.

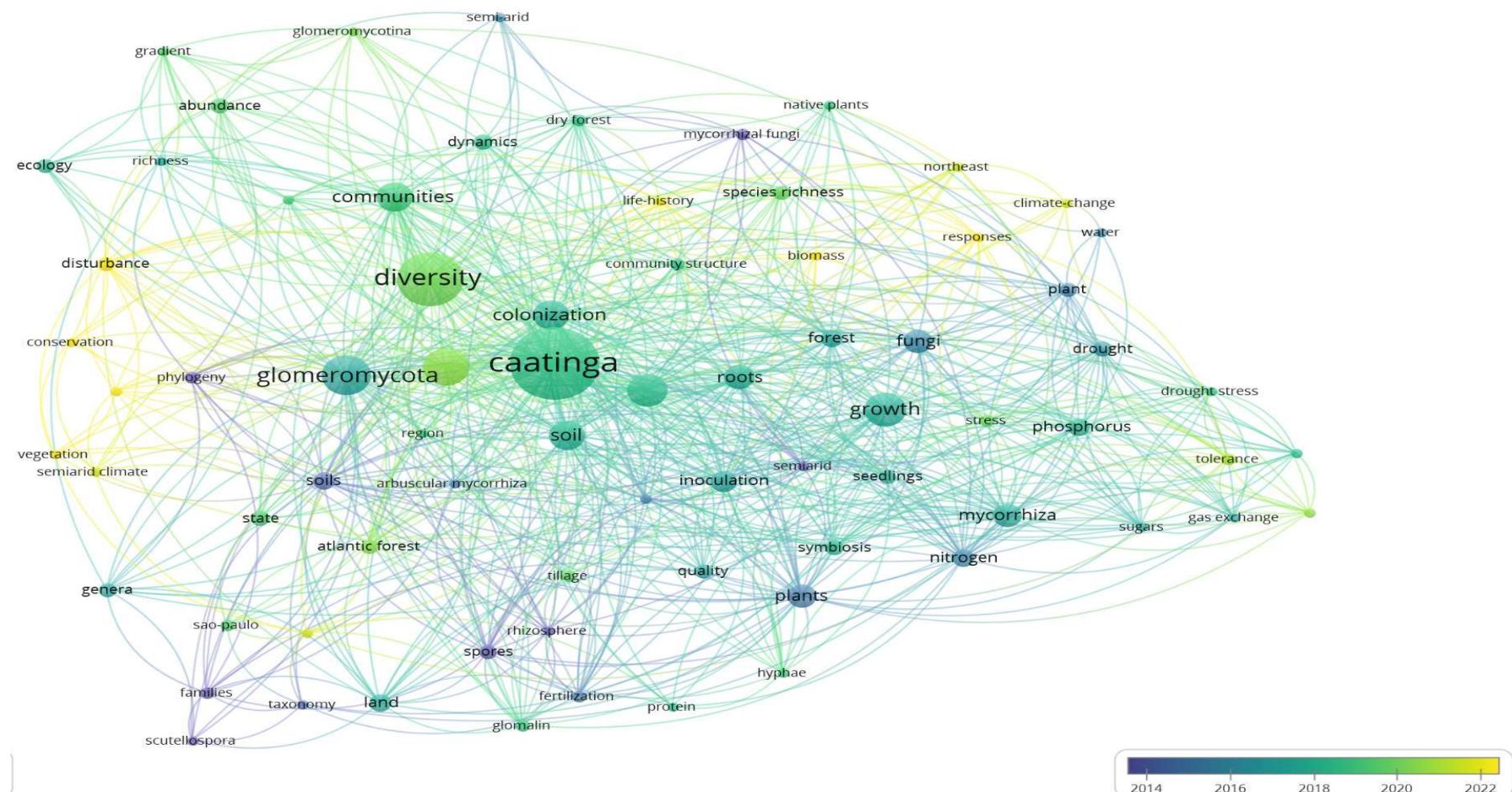
A presença dos FMAs tem sido associada à estabilização do solo e ao aumento da capacidade de retenção de água, sendo considerada uma estratégia natural para mitigar os impactos das mudanças climáticas em ecossistemas áridos e semiáridos (Jansson; Hofmockel, 2019).

Além do mapa dos principais clusters de palavras, pode-se gerar o mapeamento de clusters em correlação com os anos de publicação (figura 4), esse mapa foi fundamental para traçar a evolução de pesquisa de interação entre FFM e ecossistemas semiáridos.

Diferente dos outros mapas que apenas agrupam temas, este visualiza a evolução temporal dos estudos sobre FFM na Caatinga e em climas semiáridos do Brasil. A coloração dos nós reflete os anos de publicação, conforme a escala de cores no canto inferior direito (de 2014 a 2022).

O mapa mostra como os temas de pesquisa evoluíram ao longo do tempo, com clusters que se comunicam entre si, mas apresentam uma progressão cronológica. No cluster de tons roxos e azulados, aborda-se as primeiras pesquisas (2014-2016), nesse período, o foco era a descrição das comunidades fúngicas e sua relação com diferentes tipos de solos e vegetação.

Figura 4 - Rede bibliométrica de palavras-chaves para a Caatinga ao decorrer dos anos de pesquisa.



Fonte: Dados - Web of Science. Rede bibliométrica: VOSViewer (2025).

Estudos como o de Silva et al. (2014) contribuíram para mapear a diversidade dos FFM ao longo de gradientes ambientais. A partir de 2017, abordado pelo cluster de tons esverdeados, as pesquisas sugerem um aumento no interesse pelos efeitos dos FFM na fertilidade do solo e no crescimento das plantas, ampliando os estudos para contextos aplicados, como a agricultura sustentável e a recuperação de ecossistemas degradados.

O cluster representado por tons amarelados e esverdeados claros, inferem estudos recentes (2020-2022). Os FMA podem melhorar a eficiência hídrica e a absorção de nutrientes em ambientes áridos, o que pode ser essencial para a Caatinga e outros biomas afetados por mudanças climáticas.

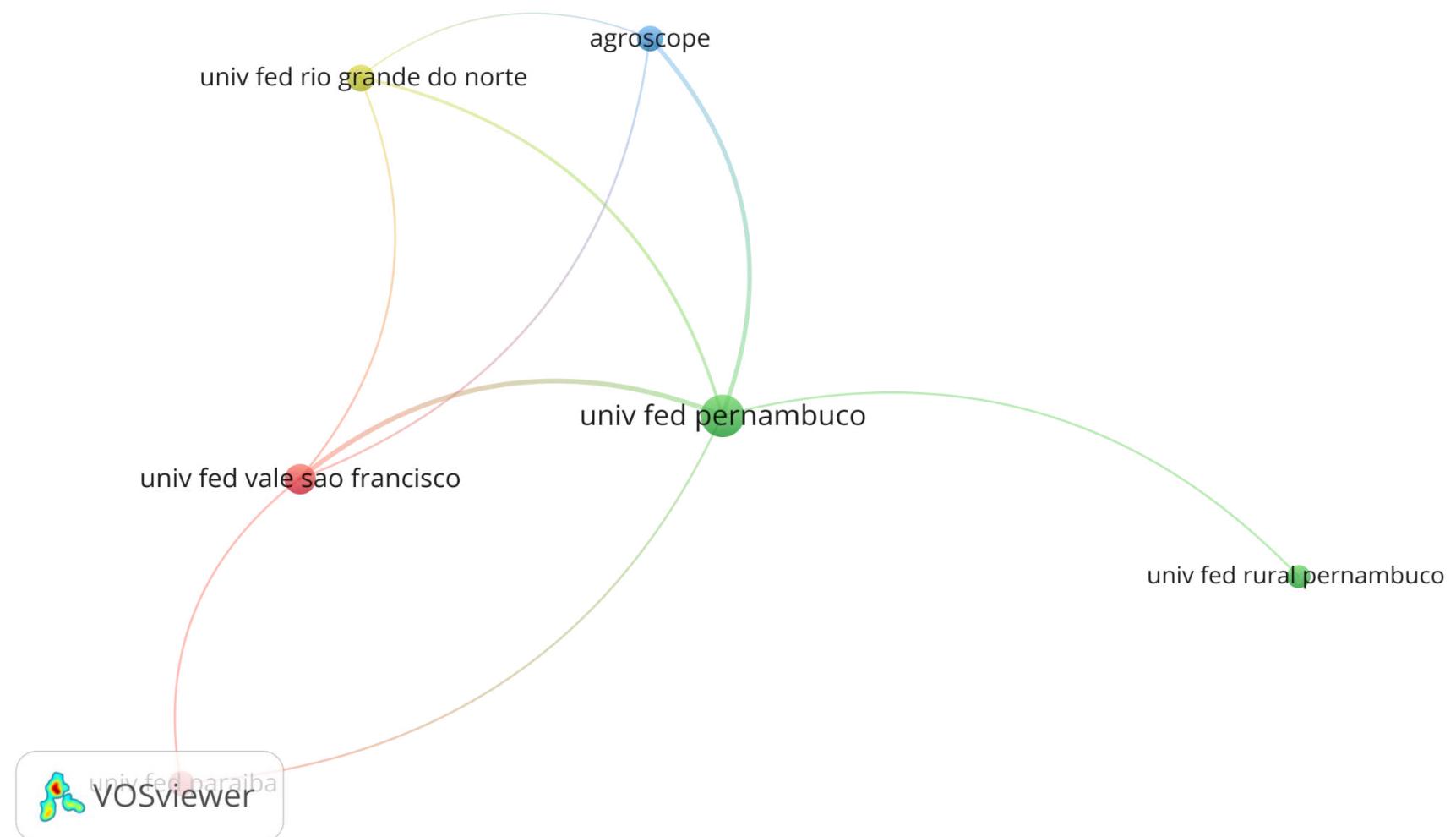
Embora haja essa progressão cronológica, os temas continuam interconectados, por exemplo, a taxonomia e a diversidade dos FFM (2014-2016) serviram como base para estudos posteriores sobre ecologia e interações planta-solo (2017-2019). Outro ponto importante é como o conhecimento sobre como os FFM impactam a fertilidade do solo foi essencial para a pesquisa aplicada sobre mudanças climáticas e adaptação ao estresse ambiental (2020-2022). Não obstante, novas pesquisas exploram como os FFM podem ser usados para a restauração de ecossistemas degradados e para aumentar a resiliência da agricultura em cenários de seca e degradação do solo.

A terceira imagem gerada pelo VOSviewer apresenta um mapa de colaboração científica baseado em publicações sobre FFM nas universidades e grupos de pesquisa no bioma Caatinga e semiárido. Os nós representam instituições de pesquisa, e as conexões entre elas indicam colaborações e coautoria. Quanto maior o nó, mais publicações associadas à instituição; e quanto mais espessa a conexão, mais forte é a colaboração entre as universidades.

A análise desse mapeamento permite identificar tanto os principais centros de produção científica quanto possíveis lacunas na colaboração interinstitucional, especialmente no que se refere a instituições que não aparecem no gráfico, mas que tradicionalmente possuem um histórico relevante de pesquisa sobre o bioma semiárido brasileiro.

Dentre as instituições presentes no mapa, algumas possuem maior centralidade e conectividade dentro da rede. A UFPE aparece como o principal nó da rede, indicando que é uma das instituições mais influentes na pesquisa sobre a Caatinga. Seu papel central sugere uma forte participação em colaborações científicas. A UFRPE, apesar de não possuir tantas conexões quanto a UFPE, está integrada à rede, o que demonstra sua atuação no campo. A UFRPE tem tradição na pesquisa agropecuária e ecológica, incluindo estudos sobre solos, biodiversidade e microbiologia do semiárido.

Figura 5 - Rede bibliométrica de instituições mais relevantes na Caatinga.



Fonte: Dados - Web of Science. Rede bibliométrica: VOSViewer (2025),

A UNIVASF sua presença no mapa indica que a instituição tem colaborado ativamente em estudos sobre a Caatinga. Localizada em uma área estratégica do bioma, a UNIVASF tem se consolidado como um polo importante para pesquisas sobre ecossistemas semiáridos.

A UFPB aparece conectada a outras instituições nordestinas, o que evidencia sua participação na pesquisa da região.

Agora em relação a Agroscope, a presença desta instituição estrangeira, localizada na Suíça, chama a atenção. Sua conexão na rede sugere que há um intercâmbio internacional relevante na pesquisa sobre a Caatinga, possivelmente em temas como ecologia microbiana e uso sustentável dos solos.

Embora o mapa revele colaborações importantes, algumas instituições tradicionalmente envolvidas na pesquisa sobre a Caatinga não aparecem na rede. Isso pode indicar uma menor participação em publicações conjuntas ou uma limitação no conjunto de dados analisados. Entre as universidades ausentes, destacam-se a UFC, que tem uma longa tradição em estudos sobre ecossistemas semiáridos, especialmente na área de microbiologia do solo e conservação ambiental. Sua ausência pode sugerir que suas colaborações estão voltadas para outros grupos ou que há menor interação com as instituições representadas no mapa.

A UFPI, localizada em uma região de transição entre a Caatinga e outros biomas, a UFPI tem produzido pesquisas relevantes sobre solos e micorrizas. Sua ausência no mapa pode indicar que seus pesquisadores estão publicando mais em colaborações restritas a grupos locais ou em periódicos não contemplados na análise.

A Universidade Estadual do Ceará (UECE) e a Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), ambas possuem grupos de pesquisa atuantes na conservação da Caatinga, mas não aparecem no mapa, sugerindo uma menor integração com as universidades federais da região.

A Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) e a Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) são instituições que têm avançado em pesquisas sobre agroecologia e biodiversidade no semiárido, mas sua ausência sugere que há uma fragmentação no compartilhamento de conhecimento entre pesquisadores dessas universidades e os grupos representados no mapa.

Por fim, a Universidade Federal de Sergipe (UFS) possui pesquisas voltadas para a microbiologia do solo e o impacto das mudanças climáticas na Caatinga. Sua não inclusão pode ser um indicativo de que suas colaborações estão voltadas para outros grupos não representados na rede analisada.

A ausência de certas universidades na rede pode ter diversas explicações, tais quais, a falta de publicações conjuntas, ou seja, algumas universidades podem estar produzindo pesquisas relevantes sobre a Caatinga, mas sem colaborações diretas com as instituições representadas no mapa. Isso pode ser um reflexo de redes de colaboração mais isoladas ou de linhas de pesquisa que não convergem diretamente com os temas analisados.

Outro fator importante são as limitações da base de dados utilizada, por exemplo, o mapa pode ter sido gerado a partir de um conjunto específico de artigos indexados em bases como WoS, o que pode excluir pesquisas publicadas em revistas nacionais ou em outras bases acadêmicas.

O foco de pesquisas é divergente, pode ocorrer devido a algumas universidades podem estar voltando suas pesquisas para em aspectos da Caatinga que não envolvem diretamente a microbiota do solo, como conservação da fauna, impactos climáticos ou etnobotânica.

Ou pode acontecer uma menor participação em colaborações internacionais, pois a presença de uma instituição estrangeira na rede indica que há uma troca global de conhecimento. Universidades que não possuem parcerias internacionais podem acabar menos representadas nesses mapeamentos.

Embora o mapa tenha gerado esse resultado, a análise da rede evidencia que há um potencial para fortalecer e expandir as colaborações acadêmicas na pesquisa sobre a Caatinga. Pode-se ampliar a integração de universidades nordestinas. Instituições como UFC, UFPI e UFS poderiam estabelecer colaborações mais próximas com as universidades que já aparecem no mapa, fortalecendo a rede de pesquisa sobre a Caatinga.

Concentrar forças para cooptar incentivos e colaborações interinstitucionais, com projetos multicêntricos envolvendo diferentes universidades podem aumentar a conectividade na rede, a partir de editais de fomento, como os da CAPES e do CNPq, que podem impulsionar essa integração. A presença do Agroscope na rede indica que há interesse global na pesquisa sobre a Caatinga. Logo, pode-se tentar estabelecer novas colaborações internacionais a fim de ampliar a visibilidade e impacto das pesquisas conduzidas no Brasil.

Outra forma de fomentar a pesquisa no Nordeste seria ampliar a divulgação em periódicos indexados, pois algumas universidades podem estar publicando em revistas que não foram contempladas na base de dados usada para a construção do mapa. A busca por publicações em periódicos de maior impacto pode aumentar a representatividade dessas instituições na rede.

Além de motivar a interdisciplinaridade de temas, tendo em vista que a Caatinga é um ecossistema complexo, que demanda estudos envolvendo diferentes áreas do conhecimento. Pode ser viável o fortalecimento de colaborações entre pesquisadores de ecologia, microbiologia, geociências e ciências agrárias pode gerar um entendimento mais amplo do bioma e suas interações.

5 CONCLUSÃO

A pesquisa evidenciou o crescimento da produção científica sobre Fungos Formadores de Micorrizas (FFM), especialmente em biomas semiáridos como a Caatinga. Houve um aumento significativo nas publicações, refletindo o reconhecimento dos FFM para sustentabilidade agrícola, restauração ecológica e mitigação das mudanças climáticas.

A distribuição geográfica das pesquisas mostrou predominância de países desenvolvidos, como EUA, China e Alemanha, enquanto países emergentes, como Brasil, Índia e México, têm ampliado suas contribuições, com destaque para universidades federais e a Embrapa no Brasil, consolidando-o como um pólo emergente na recuperação de solos degradados e redução do uso de fertilizantes químicos.

A análise das redes de colaboração acadêmica revelou desigualdade nas parcerias, com maior concentração entre algumas instituições e menor participação de universidades do Nordeste, como UFC, UFPI e UFS, sugerindo a necessidade de fortalecer colaborações interinstitucionais.

A pesquisa evoluiu de um enfoque taxonômico para abordagens mais aplicadas, com foco em produtividade agrícola, eficiência hídrica e regeneração de ecossistemas degradados. O uso de bioinformática, inteligência artificial e metagenômica tem ampliado a compreensão sobre a diversidade e funcionalidade dos FFM, permitindo avanços na produção de bioinoculantes para diferentes solos e culturas.

Por fim, este estudo contribui para a compreensão da dinâmica da produção científica sobre FFM e suas aplicações, destacando sua importância para o manejo sustentável, conservação do solo e segurança alimentar em regiões semiáridas.

REFERÊNCIAS

- Averill, C., Hawkes, C. V. . Ectomycorrhizal fungi slow soil carbon cycling. *Ecology Letters*, 19(8), 937-947, 2016.
- Bardgett, R. D.; Van Der Putten, W. H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, v. 515, n. 7528, p. 505–511, 2014.
- Barea, J. M., Pozo, M. J., Azcón, R., & Azcón-Aguilar, C. *Microbial co-operation in the rhizosphere*. Journal of Experimental Botany, 56(417), 1761-1778, 2005.
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ahmed, N., Zhang, L. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1068, 2019.
- Berbara, R. L. L.; Souza, F. A.; Fonseca, H. M. A. C. Fungos micorrízicos arbusculares: muito além da nutrição. Seropédica: UFRRJ, 2006.
- Bonfim, J. A.; Vasconcellos, R. L. F.; Stürmer, S. L.; Cardoso, E. J. B. N. *Arbuscular mycorrhizal fungi in the Brazilian Atlantic Forest: A gradient of environmental restoration*. Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 119, n. 1–2, p. 206–213, 2013.
- Brundrett M. C. Diversity and classification of mycorrhizal associations. *Biological Reviews*, 79(3):473-495., 2004.
- Brundrett, M. C. *Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants: understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis*. *Plant and Soil*, v. 320, n. 1–2, p. 37–77, 2009.
- Cairney, J.W.G. and Meharg, A. A. Ericoid mycorrhiza: a partnership that exploits harsh edaphic conditions. *European Journal of Soil Science*, 54: 735-740, 2003.
- Caravaca, F.; Alguacil, M. M.; Azcon, R.; Roldan, A. Formation of stable aggregate in rhizosphere soil of Juniperus oxycedrus: Effect of AM fungi and organic amendments. *Applied Soil Ecology*, v. 33, p. 30-81, 2006.
- Chen, K. Z., Flaherty, K., Zhang, Y. China: Recent developments in public agricultural research, ASTI country notes 127591, International Food Policy Research Institute (IFPRI), 2012.
- Devi, S. H., Bhupenchandra, I., Sinyorita, S., Chongtham, SK, & Lamalakshmi Devi, E. *Fungos Micorrízicos e Agricultura Sustentável*, 2021.
- Evelin, H.; Kapoor, R.; Giri, B. Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: A review. *Annals of Botany*, v. 104, n. 7, p. 1263–1280, 2009.
- Genre, A., Lanfranco, L., Perotto, S., & Bonfante, P. Unique and common traits in mycorrhizal symbioses. *Nature Reviews Microbiology*, 18(11), 649-660, 2020.
- Gianinazzi S., Gollotte A., Binet M. N., van Tuinen D., Redecker D., Wipf D. Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza*, 2010.

- Jansson, J. K., & Hofmockel, K. S. Corrigendum to “The soil microbiome—from metagenomics to metagenomics” [Curr Opin Microbiol 43 (2018) 162–168]. *Current Opinion in Microbiology*, 49, 104, 2019.
- Jeffries, P., Gianinazzi, S.; Perotto, S.; Turnau, K.; Barea, J. M.. The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. *Biology and Fertility of Soils*, v. 37, n. 1, p. 1–16, 2003.
- Junior, O., Silva, E. Micorriza Arbuscular – Papel, Funcionamento e Aplicação da Simbiose. 2006.
- Lekberg, Y., Koide, R.T., Rohr, J.R., Aldrich-Wolfe, L. And Morton, J.B. Role of niche restrictions and dispersal in the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Journal of Ecology*, 95: 95-105, 2007.
- Moreira, F. M. S., & Siqueira, J. O. *Microbiologia e bioquímica do solo* (3^a ed.). Editora UFLA, 2020.
- Nalimov, V. V.; Mulchenko, Z. M. *Naukometriya: Izuchenie razvitiya nauki kak informatsionnogo protsessa*. Moscow: Nauka, 1969.
- Opik M, Vanatoa A, Vanatoa E, Moora M, Davison J, Kalwij JM, Reier U, Zobel M. The online database MaarjAM reveals global and ecosystemic distribution patterns in arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *New Phytol*, 2010.
- Orwin, K. H., Kirschbaum, M. U. F., St John, M. G., & Dickie, I. A. Organic nutrient uptake by mycorrhizal fungi enhances ecosystem carbon storage: A model-based assessment. *Ecology Letters*, 14(5), 493-502, 2011.
- Pace, R., Schiano Di Cola, V., Monti, M., Affinito, A., Cuomo, S., Loreto, F., & Ruocco, M. Artificial intelligence in soil microbiome analysis: a potential application in predicting and enhancing soil health—a review. *Discover Applied Sciences*, 2025.
- Plassard, C.; Dell, B. Phosphorus nutrition of mycorrhizal trees. *Tree Physiology*, v. 30, n. 9, p. 1129–1139, 2010.
- Rasmussen, H.N. and Rasmussen, F.N. Orchid mycorrhiza: implications of a mycophagous life style. *Oikos*, 118: 334-345, 2009.
- Redecker, D., Morton, J. B., Bruns, T. D. *Ancestral lineages of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota) reveal a close relationship with the earliest land plants*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 97, n. 8, p. 4133–4137, 2000.
- Rillig, M.C., Arbuscular mycorrhizae and terrestrial ecosystem processes. *Ecology Letters*, 7: 740-754, 2004.
- Rillig, M.C., Lehmann, A., Lehmann, J., Camenzind, T., Rauh, C. Soil Biodiversity Effects from Field to Fork. *Trends Plant Sci*, 2018.
- Rillig, M. C.; Mummey, D. L. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*, v. 171, p. 41–53, 2006.

- Ruiz-Lozano, J. M., Aroca, R., Zamarreño, Á. M., Molina, S., Andreo-Jiménez, B., Porcel, R., García-Mina, J. M., Ruyter-Spira, C., & López-Ráez, J. A. Arbuscular mycorrhizal symbiosis induces strigolactone biosynthesis under drought and improves drought tolerance in lettuce and tomato. *Plant, Cell & Environment*, 39(2), 441-452, 2016.
- Sampaio, E. V. B. Overview of the Brazilian caatinga. Seasonally Dry Tropical Forests, p. 35–63, 1995.
- Schüßler, A.; Walker, C. The Glomeromycota: A species list with new families and genera. *Mycological Research*, v. 114, p. 168–169, 2010.
- Smith, S. E.; Read, D. J. *Mycorrhizal Symbiosis*. 3. ed. London: Academic Press, 2008.
- Silva, I. R., Mello, C. M. A., Ferreira Neto, R. A., Silva, D. K. A., Melo, A. L., Oehl, F., & Maia, L. C. *Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi along an environmental gradient in the Brazilian semiarid*. Applied Soil Ecology, 84, 166-175, 2014.
- Singh, B. K., Trivedi, P., Egidi, E., Macdonald, C. A., & Delgado-Baquerizo, M. Crop microbiome and sustainable agriculture. *Nature Reviews Microbiology*, 601-612, 2020.
- Spinak, E. *Indicadores cienciométricos*. Caracas: UNESCO, 1996.
- Tedersoo, L., Bahram, M., Põlme, S., Kõljalg, U., Yorou, N. S., Wijesundera, R., Villarreal-Ruiz, L., Vasco-Palacios, A. M., Pham, Q. T., Suija, A., Smith, M. E., Sharp, C., Saluveer, E., Saitta, A., Rosas, M., Riit, T., Ratkowsky, D., Pritsch, K., Põldmaa, K., & Abarenkov, K.. Global diversity and geography of soil fungi. *Science*, 2014.
- Tedersoo L, Bahram M, Zobel M. How mycorrhizal associations drive plant population and community biology. *Science*, 2020.
- Van der Heijden, Marcel & Martin, Francis & Selosse, Marc & Sanders, Ian. Mycorrhizal Ecology and Evolution: The past, the present and the future. *New Phytologist*. 205. 1406–1423. 10.1111/nph.13288, 2015.
- Van Eck, N. J.; Waltman, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, v. 84, n. 2, p. 523–538, 2010.
- Vosátka, M., Látr, A., Gianinazzi, S., & Albrechtová, J. Development of arbuscular mycorrhizal biotechnology and industry: Current achievements and bottlenecks. *Symbiosis*, 58, 29-37, 2013.
- Wahab, A., Muhammad, M., Munir, A., Abdi, G., Zaman, W., Ayaz, A., Khizar, C., Reddy SPP. Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Regulating Growth, Enhancing Productivity, and Potentially Influencing Ecosystems under Abiotic and Biotic Stresses. *Plants (Basel)*, 2023.
- Wang, X., Pan, Q., Chen, F., Yan, X., Liao, H. Effects of co-inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia on soybean growth as related to root architecture and availability of N and P. *Mycorrhiza*. 21. 173-81. 10.1007/s00572-010-0319-1, 2011.
- Wang, Z. G., Bi, Y. L., Jiang, B. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance soil carbon sequestration in the coalfields, northwest China. *Sci Rep* 6, 34336, 2016.

Ward, E. B., Duguid, M. C., Kuebbing, S. E., Lendemer, J. C., & Bradford, M. A. The functional role of ericoid mycorrhizal plants and fungi on carbon and nitrogen dynamics in forests. *New Phytologist*, 235(5), 1701-1718., 2022.

Wright, S., Upadhyaya, A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 198, 97–107, 1998.