ANTONIA HELOISA PEIXOTO DOS SANTOS

DE GRÃO EM GRÃO, AS FORMIGAS TRANSFORMAM O CHÃO:

UMA REVISÃO GLOBAL SOBRE O PAPEL DAS FORMIGAS NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS, FÍSICAS E BIOLÓGICAS DO SOLO

LAVRAS - MG

2025

ANTONIA HELOISA PEIXOTO DOS SANTOS

DE GRÃO EM GRÃO, AS FORMIGAS TRANSFORMAM O CHÃO: UMA REVISÃO GLOBAL SOBRE O PAPEL DAS FORMIGAS NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS, FÍSICAS E BIOLÓGICAS DO SOLO.

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Entomologia, área de concentração em Entomologia, linha de pesquisa em Ecologia de Formigas, para obtenção do título de Mestra.

Dra. Carla Rodrigues Ribas

Orientadora

Dra. Luane Karoline Fontenele

Coorientadora

Dr. Chaim José Lasmar

Coorientador

LAVRAS - MG

2025

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Peixoto dos Santos, Antonia Heloisa.
De grão em grão, as formigas transformam o chão : Uma revisão global sobre o papel das formigas nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo / Antonia Heloisa Peixoto dos Santos. - 2025.
49 p.

Orientadora: Carla Rodrigues Ribas
Coorientadora: Luane Karoline Fontenele
Coorientador: Chaim José Lasmar

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2025.
Bibliografia.

1. Ecologia. 2. Interações. 3. Formicidae. I. Rodrigues Ribas, Carla. II. Fontenele, Luane Karoline . III. Lasmar, Chaim José . IV. Universidade Federal de Lavras. V. Título.

ANTONIA HELOISA PEIXOTO DOS SANTOS

DE GRÃO EM GRÃO, AS FORMIGAS TRANSFORMAM O CHÃO: UMA REVISÃO GLOBAL SOBRE O PAPEL DAS FORMIGAS NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS, FÍSICAS E BIOLÓGICAS DO SOLO

GRAIN BY GRAIN, ANTS TRANSFORM THE GROUND: A GLOBAL REVIEW OF THE ROLE OF ANTS IN THE CHEMICAL, PHYSICAL, AND BIOLOGICAL PROPERTIES OF SOIL

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Entomologia, área de concentração em Entomologia, linha de pesquisa em Ecologia de Formigas, para obtenção do título de Mestra.

Aprovada em 30 de setembro de 2025.

Dra. Carla Rodrigues Ribas – UFPE

Dra. Laura Carolina Leal – UFPR

Dr. Leandro de Sousa Souto - UFS

Dra. Carla Rodrigues Ribas

Orientadora

Dra. Luane Karoline Fontenele

Coorientadora

Dr. Chaim José Lasmar

Coorientador

Aos insetos, especialmente as formigas, sem elas eu não estaria aqui.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus e Nossa Senhora, por serem meus guias e por me darem forças para enfrentar novos desafios.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e Universidade Federal de Lavras (UFLA).

A mim, por todo esforço e dedicação ao longo da dissertação.

Aos meus pais Albernice e Ângelo, aos meus irmãos Tarciso (Consigo) e Thomás, que mesmo que eu tenha que atravessar o país para seguir meus sonhos, continuam me apoiando e me dando forças para seguir em frente.

À minha orientadora Carla pela oportunidade de realizar o mestrado sob sua orientação. Sou grata pelos ensinamentos, pela dedicação e por ser uma referência profissional e pessoal. Além de uma excelente orientadora, é uma mulher inspiradora, que cuida de seus alunos não apenas com foco em publicações, mas também com atenção genuína às pessoas que somos, ao nosso crescimento e bem-estar.

À Luane, minha coorientadora, sou imensamente grata pelo convite feito durante o Mirmeco, em Manaus — foi graças a esse momento que me encontrei na pesquisa, (Revisão sistemática). Obrigada por acreditar em mim, pela paciência, pelo olhar atento e, acima de tudo, pelo acolhimento generoso.

Ao Chaim, meu coorientador, por ter topado esse desafio, por compartilhar sua sabedoria, pelas discussões construtivas, pelo acolhimento e amizade, por sua escuta atenta e suas contribuições sempre pertinentes que foram fundamentais para o enriquecimento desta pesquisa.

Ao Regilson, Marcos, Dug e Maya, obrigada por todo o carinho que tiveram comigo, nesses dois anos, sou muito grata a vocês.

Ao LEF e ao grupo de Pessoas e Formigas por toda ajuda e auxílio.

Aos meus amigos de infância, aos amigos da graduação (Poc's) e aos novos amigos da pós-graduação, em especial Larinay e Milena, obrigada pelas risadas, por estarem juntas comigo durante esta jornada, e por fazerem eu não me sentir só.

RESUMO

As formigas desempenham um papel crucial nos ecossistemas por meio da bioturbação e essas atividades impactam diretamente e indiretamente o ambiente. Apesar de sua importância ecológica, ainda não há uma síntese em escala global, que aponte quais os efeitos dessas atividades sobre as propriedades do solo, assim como os padrões mais sólidos nos trabalhos realizados e as lacunas existentes nas pesquisas. Diante disso, este trabalho reúne e analisa informações disponíveis na literatura científica sobre os efeitos das formigas nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, destacando sua atuação como engenheiras ecossistêmicas, a partir de uma revisão de estudos publicados de 1945 a 2024. A maioria das pesquisas utilizou métodos com coletas em campo e laboratório, focando principalmente em florestas tropicais, subtropicais, florestas temperadas e boreais, e em áreas de pastagens. Há destaque para umidade, pH, nitrogênio e biomassa vegetal e biomassa microbiana como os principais parâmetros avaliados. Identificamos lacunas referentes às formigas e plantas, por exemplo se eram nativas ou exóticas da área onde a pesquisa foi feita, além de lacunas na descrição de variáveis ambientais e metodologias, o que limita a comparabilidade dos estudos. Os gêneros *Formica*, *Atta* e *Messor* foram os gêneros que apareceram em todas as bases de dados. Muitos estudos encontraram influências das atividades das formigas em relação ao solo reforçando seu papel ecológico. Sugerimos que exista uma maior padronização de metodologias, por exemplo no método de coleta ou nas profundidades das amostras, assim como em uma melhor descrição dos métodos, para que as pesquisas futuras possam aprofundar o entendimento dessas interações.

Palavras-chaves: Ecologia; Interações; Formicidae.

ABSTRACT

Ants have a crucial role in ecosystems through bioturbation, and such activities exert both direct and indirect impacts on the environment. Despite their ecological importance, a comprehensive global synthesis is still lacking, particularly one that elucidates the effects of these activities on soil properties, identifies the most consistent patterns across studies, and highlights existing research gaps. In this context, the present study compiles and analyzes information available in the scientific literature regarding the effects of ants on the physical, chemical, and biological properties of soils, emphasizing their function as ecosystem engineers, based on a review of studies published between 1945 and 2024. Most investigations employed field and laboratory sampling methods, with a predominant focus on tropical, subtropical, temperate, and boreal forests, as well as pasturelands. Soil moisture, pH, nitrogen content, plant biomass, and microbial biomass emerged as the main parameters assessed. We identified important gaps related to ant–plant interactions, such as whether species were native or exotic to the study areas, in addition to limitations in the description of environmental variables and methodologies, which constrain cross-study comparability. The genera *Formica***,** *Atta***,** and *Messor* were consistently reported across all databases consulted. Numerous studies found positive influences of ant activities on soil, reinforcing their ecological significance. We suggest that there should be greater standardization of methodologies, for example in the sampling method or in the depths of the samples, as well as in a clearer description of the methods, so that future research can deepen the understanding of these interactions.

Keywords: Ecology; interactions; Formicidae.

INDICADORES DE IMPACTO

A pesquisa buscou entender de que forma as formigas, ao construírem seus ninhos, modificam o solo e influenciam as comunidades de organismos que dele dependem. Concluímos que a atividade desses insetos altera características físicas e químicas importantes, como a retenção de água, o teor de carbono orgânico e a distribuição de partículas, refletindo diretamente na diversidade de plantas, microrganismos e outros animais do solo. Do ponto de vista tecnológico e ambiental, o estudo reforça o papel das formigas como engenheiras do ecossistema e mostra que sua atuação contribui naturalmente para a manutenção da fertilidade e do equilíbrio do solo, oferecendo subsídios para práticas de manejo mais sustentáveis e menos dependentes de insumos externos. Embora não tenha foco direto em ganhos econômicos, o trabalho traz informações que podem reduzir custos de manejo e valorizar processos naturais que beneficiam agricultores, técnicos e comunidades ligadas ao uso da terra. Sob a perspectiva social e cultural, a pesquisa amplia a compreensão sobre a importância de organismos pouco valorizados, aproximando ciência e sociedade e fortalecendo a ideia de que até pequenos insetos têm papel essencial na saúde dos ecossistemas. Os impactos alcançam principalmente os ambientes florestais estudados, mas possuem potencial de aplicação em outras áreas tropicais, com benefícios a pesquisadores, profissionais da área ambiental e comunidades locais. O estudo se insere na área temática de “Meio Ambiente” da Política Nacional de Extensão e se alinha aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, em especial a ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) e a ODS 15 (Vida terrestre), mostrando que compreender o papel das formigas no solo é também um caminho para fortalecer práticas de conservação e sustentabilidade em diferentes territórios.

IMPACT INDICATORS

The research sought to understand how ants, by building their nests, modify the soil and influence the communities of organisms that depend on it. We concluded that the activity of these insects alters important physical and chemical characteristics, such as water retention, organic carbon content, and particle distribution, directly affecting the diversity of plants, microorganisms, and other soil animals. From a technological and environmental perspective, the study reinforces the role of ants as ecosystem engineers and shows that their activity naturally contributes to maintaining soil fertility and balance, providing support for more sustainable management practices that are less dependent on external inputs. Although it does not directly focus on economic gains, the work provides information that can reduce management costs and highlight natural processes that benefit farmers, technicians, and communities connected to land use. From a social and cultural perspective, the research broadens the understanding of the importance of often undervalued organisms, bringing science closer to society and strengthening the idea that even small insects play an essential role in ecosystem health. The impacts are most evident in the forest environments studied, but they also hold potential for application in other tropical areas, benefiting researchers, environmental professionals, and local communities. The study is aligned with the thematic area of “Environment” of the National Extension Policy and with the United Nations Sustainable Development Goals, especially SDG 13 (Climate Action) and SDG 15 (Life on Land), showing that understanding the role of ants in the soil is also a way to strengthen conservation and sustainability practices across different territories.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Prisma de informações sobre a coleta de dados utilizada na revisão.....20

Figura 2: Quantidade de artigos publicados ao longo dos anos sobre as Propriedades Químicas (preto), Físicas (rosa) e biológicas (verde) do solo. No eixo X estão representados os anos de publicação, enquanto o eixo Y à esquerda indica o número real de artigos publicados em cada ano (representados pelas barras). O eixo Y à direita mostra o número acumulado de publicações ao longo do tempo (representado pelas linhas), permitindo visualizar tanto a variação anual quanto a tendência geral de crescimento..... 31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados qualitativos obtidos nos artigos analisados sobre os efeitos nas Propriedades Físicas, Químicas e Biológicas do solo. As categorias foram criadas a partir dos principais temas identificados nos estudos..... 26

Tabela 2. Resultados das três bases de dados das Propriedades Físicas (laranja), Químicas (azul) e Biológicas do solo (verde), destacando de 3 a 5 itens com as maiores porcentagens em cada grupo. A tabela evidencia as variáveis mais representativas, facilitando a comparação entre as categorias. 33

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 15
2. OBJETIVOS 16
2.1. Objetivo Geral 16
2.2. Objetivos específicos 16
3. REFERENCIAL TEÓRICO 16
3.1. Fauna edáfica e a bioturbação do solo 16
3.2. Efeito das atividades das formigas nas propriedades químicas, biológicas e físicas do solo 18
4. MÉTODOS 20
4.1. Conjunto de dados 20
4.2. Critérios de exclusão 21
4.3. Revisão qualitativa 22
5. RESULTADOS 31
5.1. Aspectos gerais 31
6. DISCUSSÃO 38
7. CONCLUSÃO 43
8. REFERÊNCIAS 44
9. APÊNDICE 49

1. INTRODUÇÃO

As formigas apresentam uma distribuição geográfica muito ampla sendo encontradas nos mais diversos ecossistemas terrestres (Zhou *et al.,* 2023). São consideradas engenheiras dos ecossistemas em razão de seu papel na bioturbação durante a construção e manutenção dos ninhos, bem como de suas atividades de forrageamento, que influenciam o ambiente edáfico (Yang *et al.,* 2022). Como consequência de suas atividades, as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo são alteradas de diferentes maneiras (Jílková; Matejicek; Frouz, 2011). Estudos demonstram, por exemplo, que o solo presente no interior dos ninhos costuma apresentar maior porosidade, alterações no pH, aumento na concentração de nutrientes como nitrogênio e fósforo, além de uma estrutura mais aerada, quando comparado ao solo adjacente ou de controle (Jakubczyk; Czerwinski; Petal, 1972; Jurgensen et al., 2008). Além disso, os ninhos acabam se tornando micro-habitats altamente favoráveis para o desenvolvimento de diversos outros organismos do solo, como bactérias, fungos, nematóides e microartrópodes, que se beneficiam da maior disponibilidade de nutrientes (Almeida; Queiroz, 2015; Whitford et al., 2012). Esses microrganismos, por sua vez, também contribuem para a dinâmica e funcionalidade do ecossistema edáfico, promovendo processos como a ciclagem de nutrientes, mineralização da matéria orgânica e formação de agregados estáveis (Cardoso; Andreote, 2016). Desse modo, as formigas não apenas afetam diretamente as propriedades do solo por meio de suas atividades, mas também indiretamente, ao criar condições propícias para a amplificação de processos biológicos essenciais à manutenção da fertilidade do solo e da biodiversidade subterrânea.

Portanto, nosso objetivo foi investigar o impacto das atividades das formigas no solo e, por conseguinte, nas comunidades vegetais e (micro) biológicas do solo. Foi feito através de uma revisão sistemática, necessária para compilar e organizar o conhecimento acumulado, identificar lacunas existentes e orientar futuras investigações sobre a relação entre formigas e o funcionamento do solo. Apesar do reconhecimento generalizado da importância ecológica das formigas, os estudos que abordam seus efeitos sobre o solo estão dispersos em diferentes contextos ecológicos, metodologias e escalas espaciais (Cammeraat; Risch, 2008; Lavelle *et al.,* 2006). Além disso, o papel das formigas edáficas, ainda é negligenciado em estudos de pedologia e geomorfologia, especialmente quando comparado aos cupins, que

recebem mais destaque na literatura sobre bioturbação (Nascimento *et al*., 2024). Os estudos sobre a influência das minhocas na estrutura do solo são ainda mais numerosos do que aqueles que abordam o papel de cupins e formigas, cuja representatividade não chega a 5% do total de publicações (Bottinelli *et al*., 2014). Há ainda, uma carência de uma síntese que reúna de forma sistemática os impactos das atividades das formigas sobre as propriedades edáficas, considerando os três principais eixos de modificação: físico, químico e biológico. Essa lacuna dificulta a comparação entre estudos, especialmente diante da diversidade de espécies de formigas, tipos de solo e ambientes estudados. Ou seja, em um contexto de mudanças ambientais globais e crescente degradação dos solos, entender como organismos do solo, especialmente as formigas, modulam propriedades edáficas pode contribuir para estratégias de conservação assim como o manejo sustentável.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Fornecer um panorama global, reunindo e analisando os estudos que avaliaram o papel das formigas nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

2.2. Objetivos específicos

- Analisar o que os estudos têm relatado sobre a presença de ninhos de formigas nas propriedades físicas e químicas do solo.
- Verificar se os estudos investigam a influência da presença de ninhos de formigas sobre a comunidade vegetal.
- Investigar se os estudos abordam o papel da presença de ninhos de formigas sobre a comunidade microbiana do solo.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Fauna edáfica e a bioturbação do solo

O solo é um sistema altamente complexo e dinâmico, essencial para a manutenção da vida nos ecossistemas terrestres. Nele ocorrem interações fundamentais entre a vegetação, os minerais e a fauna edáfica que sustentam uma ampla variedade de processos ecológicos (Lepsch, 2011; Vezzani, 2011). Entre esses

processos, podemos mencionar a formação e manutenção da estrutura do solo (Amador; Gorres, 2007), o acúmulo e proteção de sementes no banco de sementes (Almeida *et al*., 2019), o aumento no teor de matéria orgânica (Bierba; Gutknecht; Michalzik, 2015) e a ciclagem de nutrientes (Sagi; Hawlena, 2021).

Dentre a fauna edáfica, especialmente na macrofauna do solo, encontram-se os chamados “engenheiros do ecossistema” ou “engenheiros do solo” (Souza *et al*., 2015). Esses organismos, como cupins, formigas e minhocas (Márquez; Meloni, 2022), influenciam direta ou indiretamente a disponibilidade de recursos para outras espécies, principalmente por meio da bioturbação (Jones; Lawton; Shachak, 1994). Esse processo consiste no revolvimento e reestruturação do solo causado pela atividade biológica desses organismos, como a escavação de túneis, construção de ninhos e durante a busca por alimento (Rodrigues, 2019; Moura, 2020). Ao alterar a distribuição de partículas e agregados, eles modificam a estrutura física do solo e criam, mantêm ou transformam habitats (Almeida; Queiroz, 2015).

Entre os “engenheiros do solo” estão as formigas, que pertencem à classe Insecta, ordem Hymenoptera e família Formicidae (Silva *et al*., 2022). Existem mais de 14.000 espécies de formigas conhecidas (Bolton, 2019; Viles; Goudie;Goudie, 2021). São amplamente reconhecidas por sua complexa organização social (Costa *et al*., 2025) além de se destacarem pela expressiva abundância em diversos ecossistemas terrestres (Souza *et al*., 2015).

Ao considerar as formigas epigéicas, arborícolas e não-forrageadoras (esta última refere -se principalmente a operárias que não saem do ninho para buscar alimento sendo restritas ao interior do formigueiro, desempenhando funções internas juntas), a população global desses insetos ultrapassa 20 quadrilhões de indivíduos, totalizando aproximadamente 12,3 megatoneladas de carbono seco, excedendo a biomassa de todas as aves e mamíferos selvagens somados, correspondendo ainda a cerca de 20% da biomassa seca humana (Chultheissa *et al*., 2022). Devido a sua elevada diversidade de espécies e ampla variação morfológica, especialmente no tamanho corporal e mandibular, afetam diretamente a quantidade e o tamanho das partículas de solo transportadas (Cammeraat; Risch, 2008). Essa variação determina a forma como esses insetos interagem fisicamente com o solo, pois coletam grãos de areia e mordem fragmentos de agregados com suas mandíbulas, promovendo uma intensa redistribuição do material (Hole, 1981; Dostál, 2005). Essa movimentação ocorre durante suas atividades de escavação como a construção de túneis e galerias,

promovendo uma realocação contínua de partículas do solo entre diferentes profundidades (Cammeraat; Risch, 2008). Tais atividades promovem alterações na agregação do solo, na distribuição do tamanho dos poros, na movimentação de partículas, no aumento dos níveis de nutrientes e nas características estruturais e funcionais das comunidades microbianas (Amador; Gorres, 2007). Ou seja, as formigas possuem uma alta capacidade de alterar o ambiente, e a magnitude de sua influência sobre a estrutura e dinâmica do solo as torna fundamentais na regulação dos processos ecológicos (Bottinelli *et al*., 2014).

3.2. Efeito das atividades das formigas nas propriedades químicas, biológicas e físicas do solo

As atividades de escavação e construção de ninhos realizadas pelas formigas influenciam significativamente as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Wills; Landis, 2018). Isso acontece, por exemplo, pois a coleta de material vegetal, sementes e a movimentação de partículas durante a construção dos ninhos promovem o acúmulo e a redistribuição de matéria orgânica ao longo do perfil edáfico (Ginzburg; Whitford; Steinberger, 2008; Lobry de Bruyn; Conacher, 1990). Essa matéria orgânica, proveniente de restos alimentares e da biomassa das próprias formigas, contribui para a heterogeneidade química do solo (Lafleur; Bradley; Francoeur, 2002), intensificando a liberação de nutrientes por meio da decomposição e favorecendo tanto a fertilidade quanto a ciclagem de nutrientes (Wills; Landis, 2018). Ou seja, a movimentação das partículas do solo, somada ao acúmulo de matéria orgânica nos ninhos de formigas, contribui para o aumento nas concentrações de diversos nutrientes, como nitrogênio, fósforo e potássio (Almeida; Queiroz, 2015). Além disso, há espécies de formigas, como *Formica polyctena* e *Formica lugubris*, que podem tornar solos ácidos a solos com valores de pH mais neutros (Czerwinski; Jakubczyk; Petal, 1969). Essa alteração está associada à escavação e mistura do solo, ao acúmulo de substratos orgânicos nos ninhos e à interação com outros componentes edáficos, como as propriedades físicas e microbiológicas do solo (Frouz; Holec; Kalcik, 2003). Há ainda estudos que mostram as alterações feitas pelas formigas, como *Lasius* spp. e *Myrmica* spp. no aumento dos teores de cátions básicos como Ca^{2+}, K^{+} e Mg^{2+} (Czerwinski; Jakubczyk; Petal, 1969).

Devido a presença de nutrientes no solo dos ninhos de formiga, as atividades microbianas podem ocorrer de maneira mais intensa nesses solos do que no solo ao redor, ou seja, sem a presença de formigas. (Frouz; Santruckova; Kalcik, 1997; Frouz, 2000). O solo dos ninhos de formigas estão associados a colonização de fungos micorrízicos arbusculares, ocorrendo através do transporte dos esporos do fungo para dentro do ninho (Dauber *et al*., 2008). Estando associados a matéria orgânica e aos nutrientes, há uma grande diversidade de organismos presentes no solo dos ninhos das formigas em comparação com o solo ao redor, como de bactérias, fungos, protozoários, nematóides e microartrópodes (Friese; Allen, 1993; Wagner; Jones, 2004). Tanto a abundância quanto a diversidade da biota presente no solo do ninho favorecem altas taxas de decomposição, assim como a mineralização de N (Nitrogênio) e a decomposição da serrapilheira (Wagner; Jones, 2006).

As formigas, ao carregarem matéria orgânica para diferentes camadas do solo melhoram sua estrutura física, o que acaba aumentando a capacidade do solo de absorver e reter água, o que é, por sua vez, essencial para as plantas e a fauna do solo (Folgarait, 1998). A rede de galerias e túneis construídos pelas formigas, além de aumentarem a drenagem da água, aumentam a porosidade do solo, assim como a aeração (Gotwald, 1986). Todas essas mudanças causadas pelas atividades das formigas, acabam por influenciar a vegetação (Folgarait, 1998; O'Grady *et al*., 2013). Por isso, a presença de vegetação com alta diversidade de espécies é comumente observada em ninhos de formigas, em contraste com áreas desocupadas por esses insetos (Holldobler; Wilson, 1990). Isto ocorre, por exemplo, com formigas do gênero *Atta*, que favorecem as plantas próximas, ao absorver mais ^{15}N do que as mais distantes (Frouz; Holec; Kalcik, 2003). Além disso, mudas crescem mais rápido e produzem mais biomassa em solos de ninhos de formigas, como *Formica* e *Solenopsis*, quando comparadas a solos sem atividade de formigas (Lafleur *et al*., 2005). Ou seja, os efeitos das atividades das formigas as tornam importantes moduladoras da fertilidade, assim como no desempenho das plantas ao seu redor.

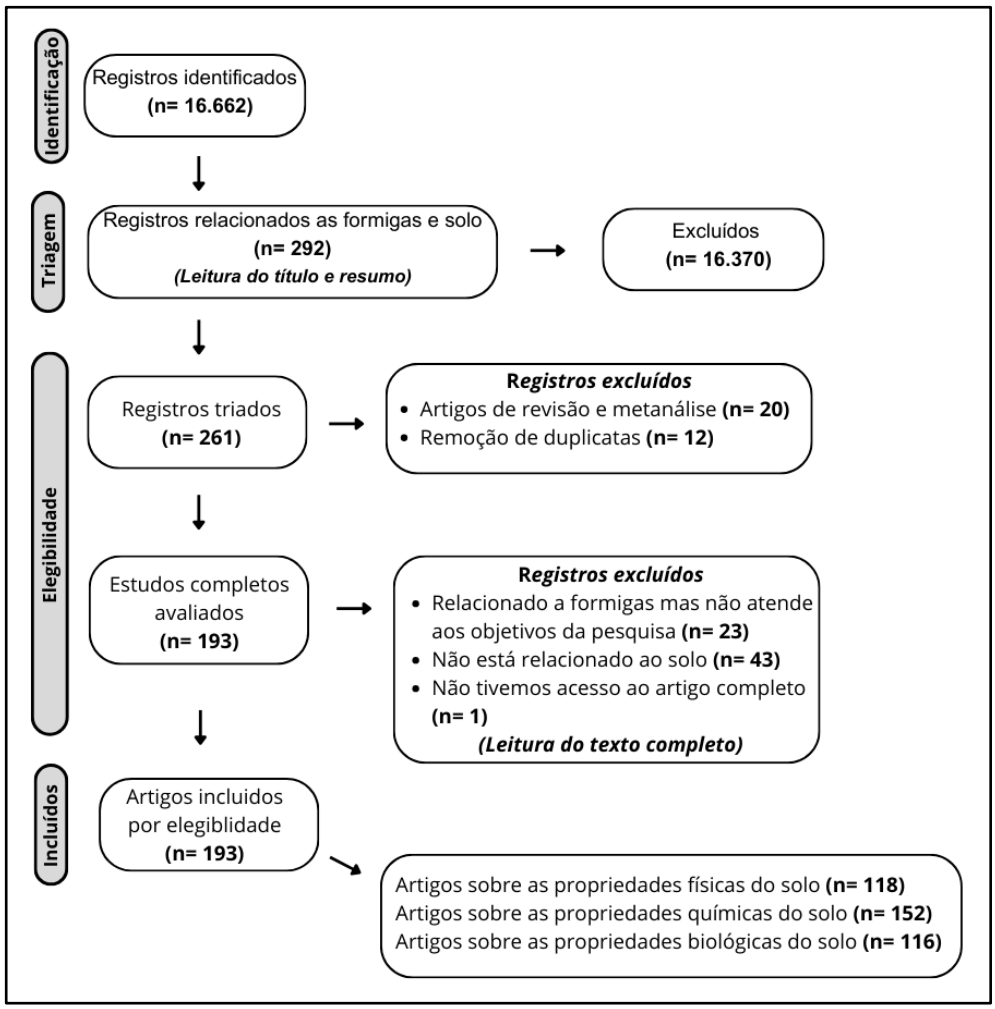
4. MÉTODOS

4.1. Conjunto de dados

Para a realização desta síntese, utilizamos integralmente o conjunto de dados compilados por Fontenele *et al.,* (2023), que reuniram artigos publicados entre 1945 e 2020 sobre funções e serviços ecossistêmicos das formigas em escala global. A metodologia de busca desses autores foi mantida sem alterações, incluindo as bases de dados utilizadas: SCOPUS (www.scopus.com), ISI Web of Science (www.webofknowledge.com) e SciELO (www.scielo.br), bem como as palavras-chave: *"ant" OR "ants" OR "formicidae" AND "ecological role*" OR "service*" OR "function*" OR "ecosystem process*" OR "productivity" OR "ecosystem engineer*" OR "pollination" OR "biological control" OR "decomposition" OR "bioturbation" OR "nutrient" OR "myrmecochory" OR "seed*" OR "diaspore" OR "scaveng*" OR "predation" OR "predator*"*, aplicadas nos campos de título, resumo e palavras-chave dos artigos. Com o objetivo de manter o conjunto de dados atualizado, o mesmo grupo de pesquisa presente em Fontenele *et al*., (2023) realizaram buscas adicionais seguindo exatamente os mesmos critérios metodológicos para o período de 2021 a 2024, utilizando as mesmas bases e palavras-chave do estudo original.

Para fins desta dissertação de mestrado, foi feita a triagem dos títulos e resumos dos artigos reunidos (tanto os do período original quanto os atualizados), com o objetivo de selecionar especificamente aqueles que abordam as interações entre formigas e seu papel sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, critério este que foi definido para a inclusão de artigos neste trabalho.

Figura 1: Prisma de informações sobre a coleta de dados utilizada na revisão.



Fonte: Peixoto, 2025

4.2. Critérios de exclusão

Foram excluídos desta revisão sistemática todos os estudos que não atenderam aos critérios de inclusão que foram previamente definidos. Ou seja, artigos de revisão e meta-análise, uma vez que o foco desta revisão era sobre estudos de caso. Também excluímos trabalhos que, embora tratassem de formigas, não atendiam ao objetivo, assim como foram excluídos aqueles que não abordaram nenhuma propriedade do solo, seja ela física, química ou biológica. Artigos que foram encontrados em diferentes bases de dados, ou seja, artigos duplicados, foram excluídos para evitar redundância nos resultados. Além disso, estudos cujo acesso ao texto completo não foi possível, mesmo após tentativas de contato com os autores correspondentes, também foram desconsiderados.

4.3. Revisão qualitativa

Conduzimos a análise qualitativa dos dados utilizando uma série de informações descritivas que foram coletados dos artigos selecionados (Tabela 1). Para organizar as informações que foram extraídas dos artigos, agrupamos os dados em categorias. Essa categorização teve como objetivo facilitar a síntese dos resultados, agrupando informações semelhantes para permitir comparações entre os estudos e identificar tendências recorrentes ou pontos ainda pouco explorados na literatura.

Adotamos a sigla AI (Ausência de Informação) para indicar casos em que não há dados no artigo sobre determinada variável. Essa ausência ocorreu tanto quando a variável não foi avaliada no estudo (sem coleta ou mensuração), quanto quando foi avaliada, mas os autores não forneceram os resultados ou detalhes necessários para sua consideração na síntese.

Fizemos um recorte nos resultados, visando apresentar as quatro primeiras categorias que apresentaram as maiores quantidades de artigos para verificar as tendências.

País: Local onde o estudo foi feito. Os países foram representados em formato percentual, considerando a quantidade de artigos publicados em relação ao total da amostra.

Quantidade de autores por artigo: número de autores.

Ano de publicação: número de artigos por ano.

Nome do periódico: número de artigos por periódico.

Ambiente de pesquisa: Campo, laboratório, campo e laboratório.

Método de coleta do solo controle: categorização com base nos instrumentos e técnicas usadas.

Medidas do ninho: número de dimensões (variáveis) analisadas por cada estudo. Para entender quais as variáveis são mais comuns entre as medições realizei uma contagem de palavras dentro de cada uma das categorias já mencionadas.

Tipo de solo: número de artigos por tipo de solo.

Propriedades químicas do solo: Devido a grande quantidade de variáveis dentro de cada estudo, o que dificultou a criação das categorias temáticas, método de coleta e afins, optei pela contagem de palavras, que foi realizada para identificar quais as mais recorrentes nos estudos.

Espécies de plantas: número de espécies por estudo. Para “Espécies citadas apenas como número", são para aqueles estudos que utilizaram mais de 5 (cinco) espécies de plantas. Seus nomes científicos não foram mencionados devido a grande extensão de espécies, pois há pesquisas com mais de 70 espécies, por isso houve a necessidade de haver um padrão para esta variável.

Espécies de formigas: mesmo princípio de “Espécies de plantas”, porém aqui fiz o agrupamento por gênero, e mais uma chamada "Múltiplas espécies", onde espécies diferentes foram estudadas em um mesmo artigo.

Medidas das variáveis ambientais: número de vezes que cada uma das variáveis apareceram.

Medidas das propriedades físicas do solo: “Umidade e conteúdo de água", inclui dados relacionados diretamente à presença de água no solo, seja como teor de água e umidade ou como capacidade de retenção de água e conteúdo volumétrico. "Textura e tamanho das partículas", refere-se a distribuição granulométrica do solo, como os percentuais de areia, silte e argila. Foram incluídas também medidas de agregação e estrutura do solo. “Densidade do solo”, medidas que expressam o grau de compactação ou massa por volume do solo. “Movimentação do solo e de objetos”, abrange variáveis relacionadas à bioturbação, incluindo medidas como volume de solo removido, material trazido à superfície, e manipulação de objetos artificiais. “Condutividade elétrica”, os dados que foram reunidos, estão frequentemente associados à salinidade e a presença de íons solúveis.

Formação vegetacional: tipo de vegetação encontrada, que teve como base o Manual Técnico da Vegetação Brasileira do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (IBGE, 2012). “Florestas tropicais e subtropicais", florestas densas com alta biodiversidade, ocorrem em regiões de clima quente, com chuvas

abundantes. “Vegetação árida, semiárida, desértica/ adaptada à seca", composta por plantas resistentes à escassez de água, comuns em regiões com clima seco, solos pobres e altas temperaturas. “Florestas temperadas e Boreais”, florestas de regiões frias a temperadas. “Florestas temperadas”, neste entram estudos que foram feitos em florestas de clima moderado, com estações bem definidas e espécies caducifólias ou coníferas. “Savanas, campos e pradarias”, vegetações abertas com gramíneas, arbustos e poucas árvores. "Campos e pastagens", sendo estes ambientes abertos dominados por gramíneas e ervas, podendo variar do seco ao úmido. “Formações campestres e savânicas”, ambientes abertos com gramíneas, ervas e árvores esparsas, incluindo savanas e campos naturais.

Ambiente antropizado: organizados em categorias com base no tipo de modificação antrópica descrita nos artigos. A categorização foi realizada a partir da leitura descritiva dos ambientes nos textos originais, agrupando ambientes com características semelhantes. “Pastagens”, inclui todas as áreas descritas como pastagem, independentemente do tipo de vegetação (natural ou introduzida) e do animal manejado (gado, ovelhas, coelhos, entre outros). “Uso da terra modificado por plantios”, reuniu os ambientes caracterizados por atividades agrícolas, como monocultivos de café, milho e arroz. “Áreas degradadas sem definição de impacto”, composta por ambientes alterados ou degradados, mas sem uma descrição clara ou específica sobre o tipo ou intensidade do impacto nos próprios estudos. “Áreas impactadas por mineração/petróleo”: regiões degradadas pela extração de minérios ou petróleo, com perda de vegetação. “Florestas secundárias”: áreas que estão em regeneração após desmatamento ou uso humano. “Queimadas e incêndios”: uso intencional do fogo ou fogo acidental/natural.

Local no ninho em que fizeram a pesquisa: agrupamento dos artigos com base na localização física da coleta no ninho ou nos arredores. "Coleta das amostras do solo com profundidade e/ou diâmetro”, inclui todos os registros que mencionam medidas específicas de profundidade, diâmetro ou volume de solo coletado, independentemente do local exato no ninho. "Solo depositado e resíduos na superfície", inclui qualquer coleta feita sobre o solo, que esteja relacionada a depósitos, resíduos ou outro material mobilizado pelas formigas. “Coleta no centro do ninho”, coletas feitas especificamente no centro do ninho, como “centro do disco”,

“centro da colônia” ou “parte central do ninho”. “Coleta na superfície, topo, entrada base e disco do ninho", aqui a coleta foi relacionada a estrutura do ninho. “0-5 cm de profundidade”, inclui os estudos que especificaram claramente que o solo foi coletado até 5 cm de profundidade. E o mesmo princípio foi usado para “Acima de 5 cm de profundidade". “Amostragem com amostrador de solo e amostragem manual", agrupa os estudos que descreveram o método usado para coletar o solo. “Local ou modo de coleta sem definição exata”, refere-se aos estudos em que não houve informação suficiente sobre profundidade, local específico ou método de coleta.

Distância do controle para o ninho: organizada com base nas informações fornecidas pelos artigos sobre a posição espacial das coletas em relação ao ninho, e foi dividida em diferentes intervalos de distâncias, como por exemplo: “Menores que 1 m", “Entre 1 m e 5 m”, entre outros.

Medidas dos parâmetros da planta: as categorias aqui presentes estão relacionadas à vegetação e estão organizadas com base no tipo de medida feita. Ela mostra a diversidade de abordagens usadas para investigar os efeitos das formigas sobre aspectos vegetacionais. A categoria “Biomassa” agrupa estudos que mensuram a quantidade de matéria vegetal presente, seja ela viva ou morta. “Ensaio de emergência de mudas”, experimentos realizados em condições controladas ou semi-controladas a partir da introdução de sementes em solo influenciado e/ou não por formigas. “Densidade de caules com diâmetro de até 10cm; Proporção de caules mortos em ninhos de até 0,5 cm; Abertura do dossel acima das colônias; Número de clareiras pequenas, médias e grandes no dossel da floresta”. “Características funcionais e estratégias ecológicas” é uma categoria que reúne múltiplas variáveis vegetacionais medidas em conjunto, como as taxas de estabelecimento (proporção de plântulas germinadas e estabelecidas), Área foliar específica (AFE), quantidade de ramos, entre outros. “Cobertura vegetal e abundância”, “Crescimento de plântulas e desenvolvimento”, “Análise dos tecidos vegetais”, onde estão inclusos estudos que fizeram análises com nutrientes que foram previamente definidos nas folhas das plantas. “Diversidade, riqueza e composição das espécies”, “Germinação e estabelecimento”, variáveis que medem quantas sementes germinam e quantas plântulas sobreviveram ou se estabeleceram no ambiente após a germinação.

“Nutrientes no tecido vegetal”, avalia a quantidade de nutrientes presentes nos tecidos foliares das plantas.

Medidas das propriedades biológicas do solo: “Abundância, diversidade e riqueza”, referindo-se à quantidade de organismos presentes (abundância), número de espécies (riqueza) e à forma como essas espécies estão distribuídas (diversidade) em comunidades do solo. “Biomassa e/ou atividade biológica”. “CO_2 e respiração do solo”, avalia o fluxo de CO_2 emitido pelo solo, geralmente como resultado da respiração microbiana e de raízes. “Respiração e mineralização”, estão inclusos estudos sobre a liberação de CO_2 através das atividades dos microrganismos e a mineralização refere-se aos estudos em que fizeram análises sobre a transformação de matéria orgânica em formas inorgânicas. “Carbono orgânico”: matéria orgânica presente no solo que serve de alimento para organismos e influencia a fertilidade. “Respiração e atividade microbiana”: processos pelos quais microrganismos consomem matéria orgânica e liberam energia e CO_2.

Tabela 1. Dados qualitativos obtidos nos artigos analisados sobre os efeitos nas Propriedades Físicas, Químicas e Biológicas do solo. As categorias foram criadas a partir dos principais temas identificados nos estudos.

Dados	Descrição dos dados	Categorias - Propriedades do solo		
		Físico	Químico	Biológico
Autores	Nomes dos autores			
Quantidade de autores	Número de autores			
Ano de publicação	Ano em que foi publicado			
DOI	Identificador digital único			
Título	Título do artigo completo			
Periódico	Revista científica			
ISSN	Código			
País	País da pesquisa			
Latitude	Coordenada - Norte-Sul			
Longitude	Coordenada - Leste-Oest			
Ambiente da pesquisa	Local de coleta/extração dos dados	Campo, laboratório, Campo e laboratório	Campo, laboratório, Campo e laboratório	Campo, laboratório, Campo e laboratório
Formação vegetacional	Tipo de vegetação	Savanas, campo e padrarias; Florestas tropicais e subtropcais; Florestas temperadas.	Florestas tropicais e subtropicais; Florestas temperadas e boreais; Campos e pastagens.	Florestas tropicais e subtropicais; Florestas temperadas e Boreais; Formações campestres e Savânicas; Vegetação árida, semiárida e desértica/adaptadas à seca.
Ambiente antropizado	Tipo de modificação antrópica feita no local da pesquisa	Pastagens; áreas degradadas sem definição de impacto; Uso da terra modificado por plantios.	Pastagens; Uso da terra; Florestas secundárias/regeneração natural; Áreas queimadas/Histórico de fogo; Áreas afetadas por mineração ou petróleo.	Pastagens; Uso da terra modificado por plantios; queimadas e incêndios; Mineração; Florestas secundárias/ Regeneração natural.
Medidas das variáveis ambientais	Condições ambientais mensuradas	Temperatura	Temperatura	Temperatura

Tipo de solo	Identificação do tipo de solo	Brown Earth Ranker; Haplic podzol; Ortega sand; Oxisols; Oxisols (Laterite soil in China); Sand loam; Sparta sand.	Inceptisol;Oxisols;Oxisols (Laterite soil in China); Brown Earth Ranker; Haplic podzol.	Oxisols (Laterite soil in China); Aeolian loess; Brown Earth Ranker; Cambisols; Haplic podzol; Inceptisol; Oxisols; Weakly structured sandy loams, and are typical of soils of depressions in arid regions.
Local no ninho em que fizeram as pesquias	Posição no ninho onde os dados foram coletados/analisados	Coleta de amostras de solo com detalhes de profundidadee/ ou diâmetro; Coleta na superfície, topo, entrada da base e disco do ninho; Solo depositado e resíduos na superfície; Coleta no centro do ninho; Não se encaixam em nenhum agrupamento.	Acima de 5cm de profundidade; Local ou modo de coleta sem definição exata; Amostragem com amostrador de solo; 0-5cm de profundidade.	Local ou modo de coleta sem definição exata; Amostragem com amostrador de solo e amostragem manual; Acima de 5cm de profundidade.
Medidas do ninho	Número de dimensões (variáveis analisadas)	Medidas de dimensão única; duas; três; mais de três dimensões.	Medidas de dimensão única; duas; três; mais de três dimensões.	Medidas de dimensão única; duas; três dimensões.
Comparação entre solo do ninho e controle	Se houve análises/coletas em ambos	Sim ou Não	Sim ou Não	Sim ou Não
Método de coleta do solo controle	Procedimento usado para coletar as amostras	Local ou modo de coleta sem definição exata; Acima de 5cm de profundidade; 0-5cm de profundidade; Amostragem com amostrador de solo.	Local ou modo de coleta sem definição exata; Acima de 5cm de profundidade; 0-5cm de profundidade; Amostragem com amostrador de solo.	Acima de 5cm de profundidade; Local ou modo de coleta sem definição exata.

Distância do controle para o ninho	Espaço medido em metros entre os locais de coleta/análise	Entre 1m e 5m; Acima de 7m; Menores que 1m.	Menores que 1m; Acima de 5m; Entre 1m e 5m.	Entre1m e 5m; Entre 10m e 15m; Acima de 20m; Menores que 1m.
Medidas das propriedades físicas do solo	Quantificação de propriedades físicas	Umidade e conteúdo de água no solo; Textura e tamanho de partículas; Densidade do solo; Movimentação do solo e de objetos; Condutividade elétrica.	Umidade e conteúdo de água no solo; Granulometria e textura do solo; Condutividade elétrica.	Umidade e conteúdo de água no solo; Granulometria e Textura do solo; Condutividade elétrica; Solo depositidado/ Solo movimentado.
Medidas das propriedades químicas do solo	Análise dos elementos químicos presentes no solo	pH; Nitrogênio; Matéria Orgânica; Fósforo.	pH; Nitrogênio; Cálcio; Potássio.	pH; Nitrogênio; Carbono; Fósforo.
Medidas dos parâmetros da planta	Avaliação das características morfológicas e fisiológicas das plantas	Biomassa; Cobertura vegetal; Crescimento, abundância; desenvolvimento e riqueza; Ensaio de emrgências de mudas; Densidade de caules com diâmetro de até 10 cm, Proporção de caules mortos em ninhos de até 0,5 cm, Abertura do dossel acima das colônias, Número de clareiras pequenas, médias e grandes no dossel da floresta	Biomassa, crescimento de plantas e desenvolvimento; Cobertura vegetal e abundância.	Biomassa (acima e abaixo do solo); Diversidade, riqueza e composição das espécies; Germinação e estabelecimento; Nutrientes no tecido vegetal.

Espécies de plantas	Identificação taxonômica	Espécies citadas apenas como número; Espécies individuais; Entre 2 e 4 espécies.	Espécies citadas apenas como número; Espécies individuais; Duas espécies; Mais de duas espécies	Espécies citadas apenas como número; Espécies individuais; Duas espécies; Mais de duas espécies.
Plantas nativas ou exó	Ocorrência natural ou introduzida de outra região	Nativas ou exóticas	Nativas ou exóticas	Nativas ou exóticas
Níveis hieráquicos de organização biológica (plantas)	Em escala de população ou comunidade	População ou comunidade	População ou comunidade	População ou comunidade
Medidas das propriedades biológicas do solo	Organismos de solo e/ou suas atividades	Biomassa e/ ou atividade biológica; Carbono orgânico; Co2 e respiração do solo; abunância, diversidade e riqueza.	Biomassa; Abundância; Diversidade e Riqueza; Carbono orgânico; Respiração e mineralização.	Respiração e atividade microbiana; Diversidade, riqueza, abundância, densidade.
Espécies de formigas	Identificação taxonômica	Mútiplas espécies; Gênero Formica; Espécies únicas; Gênero Lasius; Gênero Messor; Espécies citadas apenas como número; Gênero Atta; Gênero Pogonomyrmex.	Múltiplas espécies; Gênero Formica; Gênero Atta; Gênero Lasius; Espécies citadas apenas como número; Espécies únicas; Gênero Messor.	Múltiplas espécies; Gênero Formica; Gênero Atta; Gênero Messor.
Formigas nativas ou e	Ocorrência natural ou introduzida de outra	Nativas ou exóticas	Nativas ou exóticas	Nativas ou exóticas
Níveis hieráquicos de organização biológica (formigas)	Em escala de população ou comunidade	População ou comunidade	População ou comunidade	População ou comunidade
Efeito do ninho em cada uma das propriedades físicas, química e biológicas	Resultado relatado da comparação entre solo do ninho e controle			

Fonte: Peixoto, 2025

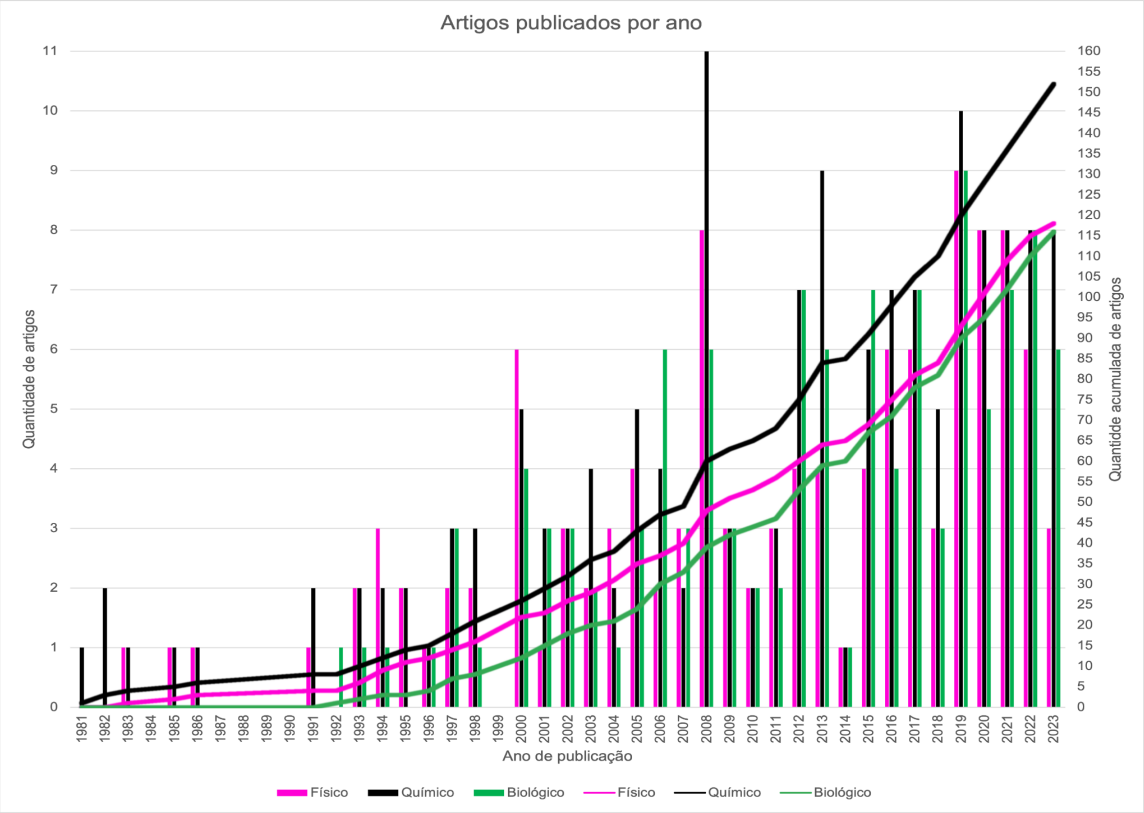
5. RESULTADOS

5.1. Aspectos gerais

Dos 118 artigos relacionados à base de dados de propriedades físicas do solo, 78,81% também realizaram análises químicas, 49,15% abordaram propriedades biológicas e 29,66% incluíram parâmetros relacionados às plantas. Entre os 158 estudos sobre propriedades químicas do solo, 60,53% também analisaram propriedades físicas, 54,61% trataram de aspectos biológicos e 35,53% incluíram medidas de parâmetros das plantas. Por fim, dos 116 artigos voltados às propriedades biológicas do solo, 52,59% também investigaram propriedades físicas, 79,31% realizaram análises químicas e 31,90% incluíram parâmetros vegetais. Em relação aos artigos onde houve análises em apenas uma das propriedades, seja ela apenas física, química ou biológica, tem-se o seguinte resultado: artigos que avaliaram somente propriedades físicas 12,71%, artigos que avaliaram somente a propriedade química 17,10% e para os artigos que fizeram análises somente com propriedades biológicas 5,17%.

Ano de publicação: O primeiro artigo publicado foi sobre propriedades químicas em 1981, seguido pela primeira publicação sobre propriedades físicas em 1983 e em 1992 a primeira sobre propriedades biológicas do solo.

Figura 1. Quantidade de artigos publicados ao longo dos anos sobre as Propriedades Químicas (preto), Físicas (rosa) e biológicas (verde) do solo. No eixo X estão representados os anos de publicação, enquanto o eixo Y à esquerda indica o número real de artigos publicados em cada ano (representados pelas barras). O eixo Y à direita mostra o número acumulado de publicações ao longo do tempo (representado pelas linhas), permitindo visualizar tanto a variação anual quanto a tendência geral de crescimento.



Fonte: Peixoto, 2025

Os periódicos onde os artigos foram publicados concentram-se em áreas ligadas à ecologia do solo e aos processos físicos, químicos e biológicos associados. A grande maioria das pesquisas foram em campo e laboratório. Já para as formações vegetacionais, houve uma predominância em florestas tropicais e subtropicais, e florestas temperadas e boreais. Foi encontrado também que mais de 50% dos artigos não informam se o ambiente é antropizado, mas para os que informaram houve uma maior porcentagem para ambientes de pastagens. Além disso, se tratando das medidas do ninho, as pesquisas tendem a ser feitas utilizando somente um tipo de medida para as propriedades químicas e biológicas, enquanto para as propriedades físicas, medidas de duas dimensões tendem a ser mais analisadas. Identificamos ainda lacunas importantes, como a ausência de informações sobre o tipo de solo em que foi realizada a pesquisa, representando mais de 50% dos estudos. Quanto às propriedades do solo investigadas, observou-se que, no âmbito físico, as variáveis relacionadas ao conteúdo de água foram as mais frequentes; no químico, o pH e o Nitrogênio se destacaram; e, no biológico, a biomassa e a atividade microbiana foram

os parâmetros mais analisados. Para os parâmetros da vegetação observei que em todas as bases de dados houve predominância de análises voltadas para a Biomassa, seja ela acima ou abaixo do solo. E que para as espécies de plantas estudadas, há uma maior frequência de análises com mais de cinco espécies. Mas apesar disso, há uma lacuna muito grande quanto a origem dessas espécies, ou seja, se são nativas ou exóticas, onde menos de 5% de todos os estudos informam esse dado. Quanto aos níveis hierárquicos de organização biológica das plantas, estudos a nível de comunidade, foi o que apresentou uma maior porcentagem em todas as bases. Para as espécies de formigas, houve predominância em até quatro espécies estudadas, sendo esta categoria a mais frequente, o que também pode explicar o nível de organização biológica das formigas, onde observamos uma maior predominância de estudos voltados para população. E se tratando se as espécies de formigas encontradas são nativas ou exóticas, nenhum artigo informou esse dado.

Tabela 2. Resultados das três bases de dados das Propriedades Físicas (laranja), Químicas (azul) e Biológicas do solo (verde), destacando de 3 a 5 itens com as maiores porcentagens em cada grupo. A tabela evidencia as variáveis mais representativas, facilitando a comparação entre as categorias.

Propriedades físicas		Propriedades Químicas		Propriedades Biológicas	
País	**% de artigos**	**País**	**% de artigos**	**País**	**% de artigos**
Estados Unidos	23,73	Estados Unidos	22,37	Estados Unidos	16,38
China	9,32	China	11,84	China	12,93
Alemanha	6,78	República Tcheca	8,55	Brasil	10,34
Austrália, República Tcheca	5,08	Brasil	7,24	República Tcheca	7,76
Argentina, Brasil, Finlândia, Israel	4,24	Alemanha	6,58	Alemanha	6,90
India	3,39	Austrália, Argentina, India, Israel	3,95	Colômbia	4,31
Colombia, França, Irã, Malásia, México	2,54	Colômbia, México	2,63	Costa Rica, Israel	3,45
Costa Rica, Espanha, Irlanda, Panamá	1,69	Irã	1,97	Argentina, Finlândia, India	2,59
Africa do Sul, Arábia, Canadá, Dinamarca, Eslováquia, Guiana Francesa, Geórgia, Países Baixos, Polônia, Suécia, Suíça, Tailândia, Tunísia	0,85	Costa rica, Eslováquia, Dinamarca, Irlanda, Panamá, Polônia	1,32	Africa do Sul, Austrália, França, Irlanda, Polônia, Suíça Canadá, Croácia, Dinamarca, Espanha, Guiana	1,72
		Africa do Sul, Arábia, Canadá, Croácia, Espanha, Inglaterra, Costa do Marfim, Malásia, Nigéria, Países Baixos, Rússia, Suíça, Tailândia, Tunísia, Venezuela	0,66	Francesa, Inglaterra, Irã, Itália, Quénia, Malásia, México, Nigéria, Países Baixos, Panamá, Rússia, Tunísia, Turquia, Venezuela	0,86
		AI - Ausência de Informação	1,31	AI - Ausência de Informação	0,86
Quantidade de autores por artigo	**% de artigos**	**Quantidade de autores por artigo**	**% de artigos**	**Quantidade de autores por artigo**	**% de artigos**
2	23,73	6	3,95	6	5,17
3	22,88	5	3,29	4	3,45
4	18,64	4	2,63	3	2,59
6	11,86	3	1,97	2	1,72
5	11,02	2	1,32		
Nome do periódico	**% de artigos**	**Nome do periódico**	**% de artigos**	**Nome do periódico**	**% de cada**
Applied Soil Ecology	8,47	Applied Soil Ecology	9,87	Soil Biology and Biochemistry	10,34
Pedobiologia	8,47	Pedobiologia	8,55	Applied Soil Ecology	9,48
Soil Biology and Biochemistry	7,63	Soil Biology and Biochemistry	7,89	European Journal of Soil Biology	8,62
Ambiente de pesquisa	**% de artigos**	**Ambiente de pesquisa**	**% de artigos**	**Ambiente de pesquisa**	**% de cada**
Campo e laboratório	89,83	Campo e laboratório	96,05	Campo e laboratório	92,24
Campo	7,63	Laboratório	3,29	Campo	5,17
Laboratório	2,54	Campo	0,66	Laboratório	2,59
Formação vegetacional	**% de artigos**	**Formação vegetacional**	**% de artigos**	**Formação vegetacional**	**% de artigos**
Savanas, Campos e Pradarias (Temperadas ou Tropica	11,86	Florestas tropicais e subtropicais	13,16	Florestas Tropicais e Subtropicais	8,62
Florestas Tropicais e subtropicais	11,02	Florestas Temperadas e Boreais	9,87	Florestas Temperadas e Boreais	8,62
Florestas temperadas	7,63	Campos e pastagens	8,55	Formações Campestres e Savânicas	7,76
AI - Ausência de Informação	57,63	AI - Ausência de Informação	53,29	Vegetação árida, Semiárida, Desértica/ Adaptadas à seca	5,17
				AI - Ausência de Informação	50,86
Ambiente antropizado	**% de artigos**	**Ambiente antropizado**	**% de artigos**	**Ambiente antropizado**	**% de artigos**
Pastagens	25,42	Pastagens	17,11	Pastagens	20,69
Áreas degradadas sem definição de impacto	11,86	Uso de terra modificado por plantios e fazendas	11,84	Uso da terra modificado por plantios	8,62
Uso de terra modificado por plantios	10,17	Florestas secundárias/ Regeneração natural	3,95	Queimadas e Incêndios	4,31
AI - Ausência de Informação	52,54	Áreas queimadas / Histórico de fogo	3,29	Áreas impactadas por mineração	3,45
		Áreas afetadas pela mineração ou Petróleo	2,63	Florestas secundárias e Regeneração natural	2,59
		AI - Ausência de Informação	59,21	AI - Ausência de Informação	57,76

Tipo de solo	% de artigos
Brown Earth Ranker	1,69
Haplic podzol	1,69
Ortega sand	1,69
Oxisols	1,69
Oxisols (laterite soil in China)	1,69
Sandy loam	1,69
Sparta sand	1,69
AI - Ausência de Informação	55,08

Tipo de solo	% de artigos
Inceptisol	1,97
Oxisols	1,97
Oxisols (laterite soil in China)	1,97
Brown Earth Ranker	1,32
Haplic podzol	1,32
AI - Ausência de Informação	61,84

Tipo de solo	% de artigos
Oxisols (laterite soil in China)	2,59
Aeolian loess	1,72
Brown Earth Ranker	1,72
Cambisols	1,72
Haplic podzol	1,72
Inceptisol	1,72
Oxisols	1,72
Weakly structured sandy loams, and are typical of soils of	1,72
AI - Ausência de Informação	55,17

Local no ninho em que fizeram a pesquisa	% de artigos
Coleta de Amostras de Solo com Detalhes de Profundidade	60,17
Coleta na superficie, topo, entrada base e disco do ninho	8,47
Solo depositado e resíduos na superfície	5,08
Coleta no centro do ninho	4,24
Não se encaixam em nenhum agrupamento	3,39
AI - Ausência de Informação	19,49

Local no ninho em que fizeram a pesquisa	% de artigos
Acima de de 5 cm de profundidade	30,92
Local ou modo de coleta sem definição exata	28,29
Amostragem com amostrador de solo e manual	17,11
0–5 cm de profundidade	12,5
AI - Ausência de Informação	11,18

Local no ninho em que fizeram a pesquisa	% de artigos
Local ou modo de coleta sem definição exata	28,45
Amostragem com amostrador de solo e manual	25
Acima de de 5 cm de profundidade	22,41
0–5 cm de profundidade	15,52
AI - Ausência de Informação	8,62

Medidas do ninho	% de artigos
Medidas de Dimensão Única	22,03
Medidas de duas dimensões	25,42
Medidas de três dimensões	7,63
Medidas com mais de três dimensões	12,71
AI - Ausência de Informação	32,2

Medidas do ninho	% de artigos
Medidas de Dimensão Única	28,95
Medidas de duas dimensões	21,05
Medidas de três dimensões	10,53
Medidas com mais de três dimensões	4,61
AI - Ausência de Informação	34,87

Medidas do ninho	% de artigos
Medidas de Dimensão Única	31,9
Medidas de duas dimensões	17,24
Medidas de três dimensões	10,34
AI - Ausência de Informação	37,07

Palavras que mais apareceram em Medidas do ninho	% das palavras
Diâmetro	18,75
Altura	18,75
Porfundidade	13,39
Densidade	11,61
Volume	9,82

Palavras que mais apareceram em Medidas do ninho	% das palavras
Profundidade	14,81
Diâmetro	12,96
Altura	12,96
Volume	12,04
Densidade	10,19

Palavras que mais apareceram em Medidas do ninho	% das palavras
Diâmetro	18,75
Altura	18,75
Profunidade	13,39
Densidade	11,61
Volume	9,82

Comparação entre ninho e controle	% de artigos
Sim	89,83
Não	10,17

Comparação entre ninho e controle	% de artigos
Sim	95,39
Não	4,61

Comparação entre ninho e controle	% de artigos
Sim	93,10
Não	6,90

Método de coleta do solo controle	% de artigos
Local ou modo de coleta sem deifinição exata	21,19
Acima de 5 cm de profundidade	12,71
0–5 cm de profundidade	9,32
Amostragem com amostrador de solo e amostragem manual	8,47
AI - Ausência de Informação	48,31

Método de coleta do solo controle	% de artigos
Local ou modo de coleta sem definição exata	23,03
Acima de de 5 cm de profundidade	17,76
0–5 cm de profundidade	7,89
Amostragem com amostrador de solo e amostragem manual	7,24
AI - Ausência de Informação	44,08

Método de coleta do solo controle	% de artigos
Acima de de 5 cm de profundidade	17,24
Local ou modo de coleta sem definição exata	12,07
Solo de floresta/ Vegetação	10,34
AI - Ausência de Informação	47,41

Distância do controle para o ninho	% de artigos
Entre 1m e 5m	49,15
Acima de 7m	9,32
Menores que 1m	5,08
AI - Ausência de Informação	36,44

Distância do controle para o ninho	% de artigos
Menores que 1m	46,05
Acima de 5 m	12,5
Entre 1m e 5m	10,53
AI - Ausência de Informação	30,92

Distância do controle para o ninho	% de artigos
Entre 1m e 5m	41,38
Entre 10 e 15 m	8,62
Acima de 20	8,62
Menores que 1m	0,86
AI - Ausência de Informação	37,93

Medidas das propriedades físicas	% de artigos
Umidade e conteúdo de água no solo	53,39
Textura e tamanho de partículas	14,41
Densidade do solo	11,02
Movimentação do solo e de objetos	10,17
Condutividade Elétrica	10,17
AI - Ausência de Informação	0,85

Medidas das propriedades físicas	% de artigos
Umidade e conteúdo de água no solo	31,58
Granulometria e Textura do solo	11,84
Condutividade elétrica	8,55
AI - Ausência de Informação	39,47

Medidas das propriedades físicas	% de artigos
Umidade e conteúdo de água no solo	35,34
Granulometria e Textura do solo	7,76
Condutividade elétrica	2,59
Solo depositado / Movimentado	2,59
AI - Ausência de Informação	47,41

Medidas das propriedades químicas	% de artigos
pH	56,78
Nitrogênio	38,14
Matéria Orgânica	36,44
Fósforo	32,2
AI - Ausência de Informação	21,19

Medidas das propriedades químicas	% de artigos
pH	63,16
Nitrogênio	50,66
Cálcio	36,18
Potássio	32,89
AI - Ausência de Informação	0

Medidas das propriedades químcias	% de artigos
pH	56,9
Nitrogênio	62,07
Carbono	41,38
Fósforo	37,07
AI - Ausência de Informação	20,69

Medidas dos parâmetros da vegetação	% de artigos
Biomassa	15,25
Cobertura vegetal	6,78
Crescimento, abundância, desenvolvimento e riqueza	5,93
Ensaios de emergência de mudas	0,85
Densidade de caules com diâmetro de até 10 cm, Proporçã	0,85
AI - Ausência de Informação	70,34

Medidas dos parâmetros da vegetação	% de artigos
Biomassa	11,18
Crescimento de plântulas e Desenvolvimento	7,89
Cobertura vegetal e abundância	7,24
AI - Ausência de Informação	64,47

Medidas dos parâmetros da vegetação	% de artigos
Biomassa (Acima e abaixo do solo)	10,34
Diversidade, Riqueza e composição de espécies	7,76
Germinação e estabelecimento	7,76
Nutrientes no tecido vegetal	3,45
AI - Ausência de Informação	68,10

Espécies de plantas	% de artigos
Espécies citadas apenas como número	11,86
Espécies individuais	6,78
Entre 2 e 4 espécies	5,93
AI - Ausência de Informação	75,42

Espécies de plantas	% de artigos
Espécies citadas apenas como número	13,16
Espécies individuais	10,53
Duas espécies	3,95
Mais de duas espécies	2,63
AI - Ausência de Informação	69,74

Espécies de plantas	% de artigos
Espécies citadas apenas como número	9,48
Espécies individuais	7,76
Duas espécies	6,03
Mais de duas espécies	3,45
AI - Ausência de Informação	73,28

Plantas nativas ou exóticas	% de artigos
AI - Ausência de Informação	100

Plantas nativas ou exóticas	% de artigos
Nativas	1,32
AI - Ausência de Informação	98,69

Plantas nativas ou exóticas	% de artigos
Nativas	2,59
AI - Ausência de Informação	97,41

Níveis hierárquicos de organização biológica (plantas)	% de artigos
População	6,78
Comunidade	21,19
AI - Ausência de Informação	72,03

Níveis hierárquicos de organização biológica (plantas)	% de artigos
População	10,53
Comunidade	23,03
AI - Ausência de Informação	66,45

Níveis hierárquicos de organização biológica (plantas)	% de artigos
População	8,62
Comunidade	21,55
AI - Ausência de Informação	69,83

Efeitos dos atributos biológicos do solo	% de artigos
Biomassa e/ou atividade biológica	15,25
Carbono orgânico	12,71
CO2 e Respiração do solo	9,32
Abundância, diversidade e riqueza	6,78
AI - Ausência de Informação	51

Efeitos dos atributos biológicos do solo	% de artigos
Biomassa , abundância, diversidade e riqueza	15,13
Carbono Orgânico (Diferentes formas)	13,82
Respiração e Mineralização	12,5
AI - Ausência de Informação	66,45

Efeitos dos atributos biológicos do solo	% de artigos
Respiração e Atividade microbiana	19,83
Diversidade, riqueza, abundância, densidade	18,1
Carbono orgânico	16,38
Biomassa microbiana	10,34
AI - Ausência de Informação	15,52

Espécies de formigas	% de artigos
Múltiplas espécies	19,49
Gênero Formica	11,86
Espécies únicas	11,02
Gênero Lasius	10,17
Gênero Messor	9,32
Espécies citadas apenas como números	8,47
Gênero Atta	8,47
Gênero Pogonomyrmex	7,63
AI - Ausência de Informação	5,93

Espécies de formigas	% de artigos
Múltiplas espécies	23,68
Gênero Formica	13,82
Gênero Atta	10,53
Gênero Lasius	8,55
Espécies citadas apenas como número	7,89
Espécies únicas	7,89
Gênero Messor	7,24
AI - Ausência de Informação	5,26

Espécies de formigas	% de artigos
Múltliplas espécies	23,28
Gênero Formica	16,38
Gênero Atta	13,79
Gênero Messor	8,62
AI - Ausência de Informação	6,03

Espécies nativas ou exóticas	% de artigos	Espécies nativas ou exóticas	% de artigos	Espécies nativas ou exóticas	% de artigos
AI - Ausência de Informação	100	AI - Ausência de Informação	100	AI - Ausência de Informação	100
Níveis hierárquicos de organização biológica	**% de artigos**	**Níveis hierárquicos de organização biológica**	**% de artigos**	**Níveis hierárquicos de organização biológica**	**% de artigos**
População	66,1	População	66,1	População	63,79
Comunidade	28,81	Comunidade	28,81	Comunidade	31,03
AI - Ausência de Informação	5,08	AI - Ausência de Informação	4,61	AI - Ausência de Informação	5,17

Fonte: Peixoto, 2025

6. DISCUSSÃO

Este estudo é o primeiro a analisar em escala global, as tendências relacionadas ao papel das atividades das formigas sobre as propriedades do solo. Abrangendo quatro décadas de pesquisas nesse campo, que mesmo após décadas, permanece com alta relevância ecológica, evidenciado pelo crescimento contínuo no número de publicações ao longo dos anos em periódicos de elevado fator de impacto e amplo alcance internacional. Ao longo do trabalho, identificamos as lacunas de conhecimento e sugerimos temas que podem ser abordados em estudos futuros.

Verificamos que em 43 anos de pesquisa, os estudos relatam que as atividades das formigas modificam de forma expressiva as propriedades físicas do solo, especialmente sua estrutura. Estes estudos também analisaram uma grande variedade de elementos químicos, e muito destacam um aumento de nutrientes no solo dos ninhos de formigas, sugerindo que os ninhos de formigas contribuem para a melhoria das condições do solo. Também observamos que apesar da maioria dos estudos não fornecerem informações detalhadas sobre os parâmetros vegetais (cerca de 70% dos estudos), as pesquisas que abordaram o tema, demonstram que os solos dos ninhos podem favorecer o crescimento vegetal. Por fim, verificamos que a maioria dos estudos relatam que a biomassa microbiana é maior nos solos dos ninhos de formigas, indicando que estes ambientes oferecem condições favoráveis para o desenvolvimento de microrganismos.

Em relação aos dados mais gerais dos artigos encontrados, verificamos que os principais países onde os estudos foram realizados foram Estados Unidos e China, e, portanto, estes possuem um importante papel no conhecimento gerado sobre o papel das formigas nas propriedades do solo, o que reflete o papel de destaque desses países no avanço do conhecimento do tema. Os estudos da base de dados das propriedades físicas concentram-se majoritariamente em trabalhos com dois a três autores, representando mais de 40% dos casos, podendo ser um indicativo de metodologias mais consolidadas e de execução mais simples, tornando-se viáveis para grupos menores. Por outro lado, os artigos das bases de dados das propriedades químicas e biológicas, distribuem-se em equipes de 4 a 6 autores, o que sugere que as análises voltadas para essas temáticas exigem um maior esforço colaborativo, envolvendo técnicas laboratoriais mais específicas, além do custo e de abordagens

metodológicas mais complexas. Quanto aos periódicos, observa-se que as publicações se concentram em revistas voltadas para a ecologia do solo, com alto fator de impacto e grande alcance internacional, o que garante ampla disseminação do conhecimento produzido e embora esses periódicos abranjam organismos do solo em geral, suas áreas de interesse estão alinhadas ao papel ecológico das formigas no solo, conforme Bottinelli *et al*., (2014). Também observamos que, em mais de 80% dos estudos, as pesquisas combinaram atividades de campo e de laboratório, contemplando diferentes níveis de análises. Foi encontrado também uma diversidade nos tipos de formação vegetacionais mais estudados, sendo estes: florestas tropicais, subtropicais, temperadas e boreais apresentando uma distribuição significativa dos estudos no mundo, além de estarem em locais de grande biodiversidade, sendo áreas onde os efeitos das formigas sobre o solo e a vegetação podem ser expressivos e detectáveis. Esses resultados são condizentes com os países onde os estudos foram feitos, Estados Unidos e China, e também é importante frisar que análises em diferentes ambientes tornam-se importantes para permitir a identificação de padrões mais amplos nas relações solo-ambiente. Ainda em relação aos dados mais gerais dos artigos analisados, observamos importantes lacunas. Em relação se o ambiente sofreu algum tipo de antropização, mais de 50% dos estudos não informaram este dado, mas para o restante dos estudos que informaram, houve uma predominância para ambientes de pastagem. Este padrão pode estar relacionado à ampla expansão dessas áreas ao longo dos anos e ao impacto significativo que exercem sobre as paisagens e os processos ecológicos. Encontramos uma grande lacuna também nas medidas das variáveis ambientais, sendo que mais de 75% dos estudos, não realizam medidas de variáveis ambientais. Uma vez que estamos no cerne das mudanças climáticas e temos poucas informações para amenizar impactos futuros, sendo extremamente preocupante. Para os que realizaram alguma medida de variável ambiental, a temperatura do solo foi a medida mais frequente, pois pode afetar não somente o metabolismo ou o comportamento das formigas, mas também processos importantes como decomposição da matéria orgânica, mineralização, assim como a dinâmica microbiana. Verificamos ainda uma expressiva lacuna relacionada ao tipo de solo, uma vez que mais de 50% dos estudos não apresentaram informações sobre o tipo de solo do local de estudo, o que pode vir a comprometer não só a comparação com outros estudos, mas também a sua reprodutibilidade.

Quando analisamos os dados relacionados aos solos onde foram avaliados os papéis das formigas, em relação ao local de coleta no solo do ninho, observou-se que, na base de dados sobre propriedades físicas, houve maior detalhamento quanto ao ponto exato da amostragem, como centro, topo ou entrada do ninho. Esta especificidade não foi encontrada nas demais bases, o que pode ser explicado pelo foco das pesquisas: que por se tratar de propriedades físicas, buscou-se compreender as variações que ocorrem em diferentes partes do ninho, já para as bases das demais propriedades do solo, foi encontrado as mesmas categorias, principalmente quanto a profundidade usada para as coletas, o modo como foi coletado, se foi com instrumento ou de maneira manual, e os que não especificaram como coletaram. Quanto às medidas do ninho, observamos que os estudos preferem medições unidimensionais para propriedades químicas e biológicas, como a profundidade e diâmetro respectivamente, este tipo de medida além de facilitar a análise para o pesquisador, já que tais propriedades podem ser caracterizadas de forma linear e frequentemente se distribuem em gradientes, como é o caso do teor de carbono ao longo da profundidade do solo. Já para as propriedades físicas, medidas de duas dimensões como o diâmetro e altura foram as mais analisadas, essas dimensões representam melhor a estrutura e o volume do ninho, sendo fundamentais para compreender sua estabilidade e dinâmica espacial. A grande maioria dos estudos realizam a comparação entre solo do ninho e solo controle, mostrando certa padronização metodológica, além de avaliar a influência das formigas no solo com mais precisão. Apesar de haver essa comparação, grande parte dos estudos não informa como ou onde foram as coletas do solo controle, indicando uma lacuna significativa na descrição dos procedimentos de amostragem do solo, o que pode comprometer a comparabilidade dos estudos. Para os que informam, observamos uma predominância no que diz respeito ao local de coleta, mas sem uma definição exata. No geral, distâncias intermediárias foram as mais utilizadas para a coleta do solo controle em relação ao solo do ninho, sendo 3 m e 5 m as distâncias do solo controle para o ninho mais frequentes. Isso pode ser explicado pelo fato de que, em maiores distâncias, a garantia de que o solo controle esteja longe das influências das atividades das formigas, é maior.

Referente às propriedades físicas, a maioria dos estudos fez medições quanto à umidade e conteúdo de água no solo. Isto pode ter como justificativa sua

importância ecológica, principalmente para fatores como infiltração e estabilidade estrutural, que são influenciados pelas atividades das formigas ao realizarem suas atividades de bioturbação, conforme corroborado por Bétard (2020).

Quanto às análises das propriedades químicas, o pH e o Nitrogênio foram as variáveis mais avaliadas entre os estudos. O pH se torna um importante indicador de alcalinidade ou acidez do solo, sobretudo na comparação entre o solo do ninho e o solo controle. O Nitrogênio também aparece com frequência devido à incorporação de resíduos orgânicos levados pelas formigas para dentro dos ninhos. Sua elevação ou redistribuição pode alterar a disponibilidade desse nutriente para a biota edáfica e, ao mesmo tempo, é essencial para o desenvolvimento das plantas (Cammeraat; Risch, 2008).

Em relação aos parâmetros vegetacionais, constatamos que a biomassa vegetal é a variável mais frequentemente analisada nos estudos, o que evidencia o interesse dos pesquisadores em compreender o papel das atividades das formigas sobre a produção de plantas e sobre o acúmulo de matéria orgânica, tanto na superfície quanto no subsolo. Segundo a metodologia adotada neste trabalho para 'Espécies de plantas', em que a partir de cinco espécies estas passam a ser citadas apenas em número, observamos que somente uma parte dos estudos conduziram suas pesquisas considerando cinco ou mais espécies vegetais, o que pode vir a permitir uma melhor representação da diversidade local. Outro ponto importante é a ausência de informações sobre a vegetação, já que mais de 60% dos estudos não mencionam as espécies de plantas presentes nas áreas analisadas. Essa lacuna pode estar relacionada a diferentes fatores, como o foco principal da pesquisa, a dificuldade na identificação taxonômica ou até mesmo os custos envolvidos em levantamentos florísticos. Esse cenário se conecta aos resultados de “Plantas nativas ou exóticas”, em que apenas uma pequena parcela dos trabalhos (menos de 5%) chegou a indicar o uso de espécies nativas. Quanto ao nível hierárquico de organização biológica das plantas, identificamos um resultado muito expressivo quanto a ausência de informação (mais de 60%), porém para os estudos em que foi informada com quais espécies trabalharam podemos chegar a conclusão se eram com populações ou comunidade, e a maior parte concentra-se em comunidades, o que permite explorar questões como a diversidade de espécies.

Em relação aos atributos biológicos do solo, muitos estudos avaliam a biomassa microbiana, a respiração do solo e a diversidade microbiana, já que esses parâmetros são importantes indicadores da qualidade e do funcionamento do solo, refletindo o interesse crescente dos pesquisadores em compreender melhor esses processos conforme Jurgensen *et al*., (2008).

Quando avaliamos os estudos em relação às formigas, a maioria dos estudos concentra-se em até quatro espécies. No que diz respeito aos níveis hierárquicos de organização biológica das formigas, verificamos que a maioria dos estudos (mais de 60%) se concentra no nível populacional, possivelmente por ser a escala em que os métodos de amostragem possuem maior aplicabilidade. Quanto aos gêneros encontrados, alguns se destacam, como: *Formica*, *Atta* e *Messor*, que aparecem em artigos relacionados às três bases de dados. Estes gêneros são conhecidos por suas influências significativas no solo, seja pela sua importância agrícola (*Atta*), seja pela construção de ninhos volumosos (*Formica*) ou por seu papel na dispersão de sementes (*Messor*). Este último gênero possui relevância em estudos sobre interações formiga-planta, ou até mesmo na sucessão florestal. Em relação à origem das formigas, nativas ou exóticas, observamos uma lacuna significativa: nenhum dos estudos analisados (100%) faz essa distinção, ou seja, essa ausência de informação pode limitar a interpretação dos resultados e a compreensão de seus impactos ecológicos. Espécies nativas ou exóticas podem exercer papéis distintos no ecossistema, visto que enquanto as espécies nativas geralmente fazem parte de redes tróficas e processos ecológicos estabelecidos, espécies exóticas podem causar desequilíbrios, competindo com as espécies nativas.

Após a defesa desta dissertação, os dados serão submetidos a uma meta-análise, para sabermos quais são os efeitos que de fato ocorrem através das atividades de bioturbação das formigas, sendo comparado o solo do ninho das formigas com o solo controle.

7. CONCLUSÃO

Esta pesquisa constitui a primeira síntese global, entre 1945 e 2024, sobre o papel das atividades das formigas nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Contudo, encontramos lacunas, como a ausência de informação sobre o tipo de solo em mais de 50% dos estudos, a não mensuração de variáveis ambientais em cerca de 75% deles e a falta de menção às espécies vegetais presentes em mais de 60%. Também observamos que grande parte dos artigos não informa como ou onde foram feitas as coletas do solo controle, o que limita a comparabilidade entre os estudos. Apesar dessas ausências, encontramos padrões relevantes. As atividades das formigas alteram de forma expressiva as propriedades físicas do solo, especialmente sua estrutura. Nas análises químicas, o pH se destacou como a variável mais estudada, confirmando sua importância como indicador da acidez e alcalinidade do solo. O nitrogênio também apareceu com frequência, geralmente associado à incorporação de resíduos orgânicos levados pelas formigas para os ninhos, influenciando a disponibilidade do nutriente para a biota edáfica e para o crescimento vegetal. Em relação aos aspectos biológicos, a biomassa microbiana é um dos fatores mais estudados e baseado nos relatos dos artigos o solo dos ninhos das formigas oferecem condições favoráveis para o desenvolvimento dos microrganismos. Outro resultado importante foi a realização dos estudos em uma variedade de florestas, sendo elas tropicais, subtropicais, temperadas e boreais. Esse padrão reforça que essas formações vegetacionais concentram alta biodiversidade e condições em que os efeitos das formigas sobre o solo e a vegetação são mais evidentes, atraindo maior interesse científico.

Por fim, nesta revisão evidenciamos a necessidade de estudos futuros que considerem uma caracterização mais detalhada da vegetação, como as espécies analisadas ou quais parâmetros foram avaliados, o tipo de solo que foi estudado, assim como a inclusão de informações sobre espécies nativas e exóticas, mais análises referentes as variáveis ambientais, descrições mais precisas sobre o método de coleta do solo usado, as distâncias usadas da coleta do solo controle para o solo do ninho, para compreender de forma mais ampla e precisa o papel ecológico das formigas nos ecossistemas terrestres.

8. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Fábio Souto; ELIZALDE, Luciana; SILVA, Leticia Maria Souto; QUEIROZ, Jarbas Marçal. The effects of two abundant ant species on soil nutrients and seedling recruitment in Brazilian Atlantic Forest. **Revista Brasileira de Entomologia**, p. 1-6, 2019.

ALMEIDA, Fábio Souto.; QUEIROZ, Jarbas Marçal.. Formigas poneromorfas como engenheiras de ecossistemas: impactos sobre a biologia, estrutura e fertilidade dos solos. In: DELABIE, Jacques H.C.; FEITOSA, Rodrigo M.; SERRÃO, José Eduardo; MARIANO, Cléa S. F.; MAJER, Jonathan D. orgs. As formigas poneromorfas do Brasil [online]. Ilhéus, BA: **Editus**, p. 437- 446, 2015.

AMADOR, A. José; GORRES, Josef H.; Microbiological characterization of the structures built by earthworms and ants in an agricultural field. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 39, p. 2070-2077, 2007.

BÉTARD, F. Insects as zoogeomorphic agents: An extended review. **Earth Surface Processes and Landforms,** v. (46), n. 1, p. 89-109, 2020.

BIERBA, Peggy; GUTKNECHT, Jessica L. M.; MICHALZIK, Beate. Nest-mounds of the yellow meadow ant (Lasius flavus) at the "Alter Gleisberg", Central Germany: Hot or cold spots in nutrient cycling?. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 80, p. 209-217, 2015.

BOLTON, B. AntCat: an online catalog of the ants of the world. 2024. Disponível em: https://antcat.org/. Acesso em: 2 maio 2025.

BOOTS, Bas; CLIPSON, Nicholas. Linking ecosystem modi cation by the yellow meadow ant (*Lasius flavus*) to microbial assemblages in different soil environments. ***European Journal of Soil Biology,*** v. 55, p. 100-106, 2013.

BOTTINELLI, N.; JOUQUET, P.; CAPOWIEZ, Y.; PODWOJEEWSKI, P.; GRIMALDI, M.; PENG, X. Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists?. Soil and Tillage Research, v. 146, p. 118-124, 2014.

BOTTINELLI, N.; JOUQUET, P.; CAPOWIEZ, Y.; PODWOJEWSKI, P.; GRIMALDI, M.; PENG.Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists?. ***Soil & Tillage Research***, v. 146, p.118-124, 2014.

CAMMERAAT, E. L. H.; RISCH, A. C. The impact of ants on mineral soil properties and processes at different spatial scales, **Journal of Applied Entomology**, v. 132, p. 285-294, 2008.

CAMMERAAT, E. L. H.; RISCH, A.C. The impact of ants on mineral soil properties and processes at different spatial scales. **Journal of Applied Entomology**, v. 132, n. 4, p. 285-294, 2008.

CAMMERAAT. E.L.H.; RISCH, A.C. The impact of ants on mineral soil properties and processes at different spatial scales. **Journal of Applied Entomology**, p. 285-294, 2008.

CARDOSO, Elke Jurandy Bran Nogueira; ANDREOTE, Fernando Dini; **Microbiologia do solo.** 2. ed. Piracicaba: ESALQ, 221 p. 2016.

COSTA, A.N.; MACEDO, R.M.; VAZ-SILA, J.; ALVES, K.M.; PACHECO, R.; VIEIRA-NETO, MUNDIM, F.M. Ant assemblages (Hymenoptera: Formicidae) and spatial patterns of diversity along Cerrado remnants in Central-West Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 85, 2025.

CZERWINSKI, Z., H. Jakubczyk; JAKUBCZYK, J. Petal. The influence of ants of the genus *Myrmica* on the physico-chemical and microbiological properties of soil within the compass of anthills in the Strzeleckie meadows. **Polish Journal of Soil Science**, v. 2, p. 51-58.

DAUBER, J.; NIECHOJ, R.; BALTRUSCHAT, H.; WOLTERS, V. Soil engineering ants increase grass root arbuscular mycorrhizal colonization. **Biology and Fertility of Soils**, v. 44 n. 5, p. 791-796, 2008.

DOSTÁL, Petr; BREZNOVÁ, Magdalena; KOZLÍCKOVÁ, Vladimíra, HERBEN, Tomás; KOVÁR, Pavel. Ant-induced soil modification and its effect on plant below-ground biomass. **Pedobiologia**, v. 49, n. 2, p. 127-137, 2005.

FOLGARAIT, Patricia J. Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning: a review. **Biodiversity & Conservation**. v. 7, p. 1221-1244, 1998.

FONTENELE, Luane Karoline. **Dispersão de sementes por formigas no Brasil: uma revisão sistemática e avaliação do impacto das mudanças no uso do solo.** Tese (Doutorado em Ecologia aplicada) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2023.

FRIESE, C.F.; ALLEN, M. F. The interaction of harvester ants and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in a patchy semi-arid environment: the effects of mound structure on fungal dispersion and establishment.**Functional Ecology**, v. 7, p. 13–20, 1993.

FROUZ, J. The effect of nest moisture on daily temperature regime in the nest of Formica polyctena wood ants. **Insectes Sociaux, v** 47, p. 229-235, 2000.

FROUZ, J.; SANTRUCKOVA, H.; KALCIK, J. The effect of wood ants (Formica polyctena FOERST) on the transformation of phosphorus in a spruce plantation. **Pedobiologia**, v. 4, p. 437-447, 1997.

FROUZ, Jan; HOLEC, Michal; KALCIK, Jiri. The effect of *Lasius niger*(Hymenoptera, Formicidae) ant nest on selected soil chemical properties. **Pedobiologia**, v. 47, n. 3, p. 205-2012, 2003.

FROUZ, Jan; JILKOVÁ, Veronika. The effect of ants on soil properties and processes (Hymenoptera: Formicidae). Myrmecological News, v. 11, p. 191-199, 2008.

GINZBURG, Orit; WHITFORD, W.G.; STEINBERGER, Y. Effects of harvester ant (Messor spp.) activity on soil properties and microbial communities in a Negev Desert ecosystem. **Biol Fertil Soils,** v. 45, p. 165-173, 2008.

GOTWALD, W.H. The beneficial Economic Role of Ants. **Economic Impact and Control of Social insects**, p. 290 - 313, 1986.

HOLE, Francis D. Effects of animals on soil. **Geoderma**, v. 25, n. 1-2, p. 75-112, 1981.

HOLLDOBLER, Bert; WILSON, Edward O. The ants. **Harvard University Press,** 1990.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Manual Técnico da Vegetação Brasileira. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

JAKUBCZYK, H.; CZERWINSKI, Z.; PETAL, J. Ants as agents of the soil habitat changes. **Ekologia Polska. Polish Journal of Ecology**, v. 20, p. 153-161, 1972.

JÍLKOVÁ, Veronika; MATEJICEK, Lubos; FROUZ, Jan. Changes in the pH and other soil chemical parameters in soil surrounding wood ant (*Formica polyctena*) nests. **European Journal of Soil Biology**, v. 47, n. 1, p. 72-76, 2011.

JONES, Clive G.; LAWTON, John H.; SHACHAK, Moshe. Organisms as ecosystem engineers. **Oikos**, v. 69, p. 373-386, 1994.

JURGENSEN, M,; FINÉR, L.; DOMISCH, T.; KILPELAINEN, J.; PUNTTILA, P.; OHASHI, M.; NIEMELA, P.; SUNDRSTROM, L.; NEUVONEN, S.; RISCH, A. C. Organic mound-building ants: their impact on soil properties in temperate and boreal forests, ***Journal of Applied Entomology***, v. 132, p. 266-275, 2008.

JURGENSEN, MF.; FINÉR, L.; DOMISCH, T.; KILPELAINEN, J.; PUNTITILA, P.; OHASHI, M.; NIEMELA, P.; SUNDSTROM, L.; NEUVONEN, S.; RISCH, AC. Organic mound-building ants: their impact on soil properties in temperate and boreal forests. **Journal of Applied Entomology**, v. 132, n. 4, p. 266-275, 2008.

LAFLEUR, B.; HOOPER-BUI, L.M.; MUMMA, E.P.; GEAGHAN, J.P. Soil fertility and plant growth in soils from pine forests and plantations: effect of invasive red imported fire ants Solenopsis invicta BUREN. **Pedobiologia**, v. 49, p. 415-423, 2005.

LAFLEUR, Benoit; BRADLEY, Robert L.; FRANCOEUR, André. Soil modifications created by ants along a post-fire chronosequence in lichen-spruce woodland. **Ecoscience**, v. 9, n. 1, p. 63-73, 2002.

LAVELLE, P.; DACAENS, T.; AUBERT, M.; BAROT, S.; BLOUIN, M.; BOREAU, F.; MARGERIE, P.; MORA, P.; ROSSI, J. P. Soil invertebrates and ecosystem services. **Europen Journal of soil biology**, v. 42, 2006.

LEPSCH, Igo F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de textos, 456 p. 2011.

LOBRY DE BRUYN; L. A.; CONACHER, A.J. The role of ants in *Kalmia angustifolia* and balsam fir. Soil Biology and soil modification: A review. **Australian Journal of Soil Research**, v. 28, p. 55-93. 1990.

MÁRQUEZ, Jimmy Morales; MELONI, Fernando. Soil fauna and its potential use in the ecological restoration of dryland ecosystems. **Restoration ecology**, v. 30, n. 6, p. 1-13, 2022.

MOURA, Carlos Alberto Ribeiro de. **Influência das formigas edáficas nas propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo em um gradiente de uso da terra.** Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2020.

MOUTINHO, P.; NEPSTAD, D.C.; DAVIDSON, E.A. Influence of leaf-cutting ant nests on secondary forest growth and soil properties in Amazonia. Ecology, v. 84, p. 1265-1276. 2003

NASCIMENTO, Diego Luciano; CHIAPINI, Mariene; VIDAL-TORRADO, Pablo; PHILIPS, Jonathan D.; LADEIRA, Francisco Sérgio Bernardes; MACHADO, Diego Fernandes Terra; CAMARGO, Roberto da Silva; Valezio, Everton Vinicius. The underestimated role of leaf-cutting ants in soil and geomorphological development in neotropical America. **Earth-Science Reviews**, v. 248, 2024.

O'GRADY, A.; BREEN, J.; HARRINGTON, T.J.; COURTNEY, R. The seed bank in soil from the nests of grassland ants in a unique limestone grassland community in ireland. **Ecological engineering**, v. 61, p. 58-64, 2013.

RODRIGUES, Beatriz Motta. **Bioturbação e distribuição de fitólitos em latossolos da depressão periférica paulista.** Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo, 2019.

SAGI, Nevo; HAWLENA, Dror. Arthropods as the Engine of Nutrient Cycling in Arid Ecosystems. **Insects**, v. 12, p. 1-12, 2021.

SCHULTHEISSA, Patrick; NOOTENA, Sabine S.; WANGA, Runxi; WONGA, Mark K. L.; BRASSARD, François; GUÉNARD, Benoit. The abundance, biomass, and distribution of ants on Earth. **Ecology**, v. 119, n. 40, 2022.

SILVA, M. R. A. C.; SOUSA, A. F. S.; CONCEIÇÃO, C. B.; FRANCO, C. L.; RODRIGUES, J. C.; MARTINS, A. E. S.; GONÇALVES, M. V. P.; COSTA, D.

SILVA, Maria Rebeca de Alencar Costa; SOUSA, SOUSA, Antonio Francisco Soares de; CONCEIÇÃO, Camila Braga; FRANCO, Cleiton Lima; RODRIGUES, Judson Chaves; MARTINS, Alana Ellen de Sousa; GONÇALVES, Márcia Verônica Pereira; COSTA, Daniel da Silva; FORMIGA, Luiza Daiana Araújo da Silva. Composição e riqueza de formigas edáficas (hymenoptera: formicidae) em fitofisionomias de cerrado, no leste maranhense. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.13, n.10, p. 207-222, 2022.

SOUZA, Mayk Henrique; VIEIRA, Bárbara de Cássia Ribeiro; OLIVEIRA, Ana Paula Guedes; AMARAL, Atanásio Alves do. Macrofauna do solo. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11, n. 22, p. 115-131, 2015.

VEZZANI, Fabiane Machado; ZUK, João Múlnic. **O solo como sistema**. 1. ed. Curitiba: Edição dos Autores, 53 p. 2011.

VILES, Heather A.; GOUDIE, Andrew S.; GOUDIE, Alice. Ants as geomorphological agents: a global assessment. **Earth-Science Reviews.** 2021.

WAGNER, D., JONES, J.B. The contribution of harvester ant nests, Pogonomyrmex rugosus (Hymenoptera, Formicidae), to soil nutrient stocks and microbial biomass in the Mojave Desert. **Environmental Entomology**, v. 33, p. 599–607, 2004.

WAGNER, Diane; JONES, Jeremy B. The impact of harvester ants on decomposition, N mineralization, litter quality, and the availability of N to plants in the Mojave Desert. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 38, p. 2593-2601, 2006.

WHITFORD, Walter G.; GINZBURG, Orit; BERG, Naama; STEINBERGER, Yosef. Do long-lived ants affect soil microbial communities? **Biology and fertility of soils**, v. 48, p. 227-233, 2012.

WILLS, B.D.; LANDIS, D.A. The role of ants in north temperate grasslands: a review. **Oecologia**, v. 186, p. 323-338, 2018.

YANG, Guanghong; ZHOU, Wei; QU, Wenjun; YAO, Wu; ZHU, Peng; XU, Jing. A Review of Ant Nests and Their Implications for Architecture. **Buildings**, v. 12, n. 12, 2022.

ZHOU, Wei; ZHAN, Peimin; ZENG, Ming; CHEN, Tian; ZHANG, Xuanrui; YANG, Guanghong; GUO, Yipu. Effects of ant bioturbation and foraging activities on soil mechanical properties and stability. **Global Ecology and Conservation**, v. 46, 2023.

9. APÊNDICE

Planilha contendo todos os artigos referentes às propriedades do solo:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1ICcjwafIVavR2McXA7eVpCCKa8XLGEekEnLKvNVhjQk/edit?usp=sharing