

Victória Maria Guerrero

**Distribuição Espacial de Nematoides  
Entomopatogênicos e sua Relação com Variáveis  
Edáficas em Cafezais sob Manejo Regenerativo**

Monte Carmelo, Minas Gerais

Dezembro, 2025



Victória Maria Guerrero

**Distribuição Espacial de Nematoides Entomopatogênicos e  
sua Relação com Variáveis Edáficas em Cafezais sob  
Manejo Regenerativo**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais- Mestrado, área de concentração em Agricultura e Informações Geoespaciais, para obtenção do título de Mestre.

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Instituto de Ciências Agrárias

Programa Pós-Graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais

Orientador: Dra.Vanessa Andaló Mendes de Carvalho

Coorientador: Dr.George Deroco Martins e Dr.Odair José Marques

Monte Carmelo, Minas Gerais

Dezembro, 2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

G934  
2025 Guerrero, Victória Maria, 1994-  
Distribuição espacial de nematoides entomopatogênicos e sua  
relação com variáveis edáficas em cafezais sob manejo  
regenerativo [recurso eletrônico] / Victória Maria Guerrero. - 2025.

Orientador: Vanessa Andaló Mendes deCarvalho.

Coorientador: George Deroco Martins.

Coorientador: Odair José Marques.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais.

Modo de acesso: Internet.

DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.725>

Inclui bibliografia.

1. Agronomia. I. deCarvalho, Vanessa Andaló Mendes,1977-,  
(Orient.). II. Martins, George Deroco,1987-, (Coorient.). III.  
Marques, Odair José,1973-, (Coorient.). IV. Universidade Federal  
de Uberlândia. Pós-graduação em Agricultura e Informações  
Geoespaciais. V. Título.

CDU: 631

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Informações  
Geoespaciais  
Rodovia LMG 746, Km 01, s/nº, Bloco 1AMC, Sala 1A202, Monte Carmelo-MG, CEP 38.500-000  
Telefone: (34) 3810-1033 - ppgaig@iciag.ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agricultura e Informações Geoespaciais				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico				
Data:	19/12/2025	Hora de início:	8 h	Hora de encerramento:	11h43min
Matrícula do Discente:	32322AIG010				
Nome do Discente:	Victória Maria Guerrero				
Título do Trabalho:	Distribuição espacial de nematoides entomopatogênicos e sua relação com variáveis edáficas em cafezais sob manejo regenerativo				
Área de concentração:	Informações geoespaciais e tecnologias aplicadas à produção agrícola				
Linha de pesquisa:	Sistemas Integrados de Produção Vegetal				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Manejo integrado de pragas a partir de métodos convencionais e geotecnologia				

Reuniu-se em sala virtual a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais, composta pela prof.<sup>a</sup> Dra. Vanessa Andalo Mendes de Carvalho (Universidade Federal de Uberlândia-UFU), orientadora da candidata, Prof. Dr. Enio Tarso de Souza Costa (Universidade Federal de Uberlândia-UFU), e Prof.<sup>a</sup> Dra. Franscinely Aparecida de Assis (Centro Universitário de Goiatuba - UniCerrado).

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dra. Vanessa Andalo Mendes de Carvalho, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir a senhora presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Enio Tarso de Souza Costa, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/12/2025, às 11:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Vanessa Andalo Mendes de Carvalho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/12/2025, às 11:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Franscinely Aparecida de Assis, Usuário Externo**, em 19/12/2025, às 14:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **6954234** e o código CRC **14F13F0C**.

---

*Dedico este trabalho a tudo o que me sustentou durante esta caminhada:  
aos sonhos que me moveram, à coragem que me guiou e  
à esperança que, silenciosa, jamais me deixou desistir.*







# Agradecimentos

Agradeço primeiramente à minha família, base de tudo que sou. Aos meus pais, pelo amor incondicional, apoio constante e por acreditarem em mim em cada etapa desta caminhada. Aos meus irmãos, pela parceria e incentivo, em especial ao meu irmão Dr. Matheus Bartolo Guerrero, cuja contribuição, dedicação e disponibilidade foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa e para meu crescimento profissional e pessoal.

À minha orientadora, Dra. Vanessa Andaló Mendes de Carvalho, expresso minha profunda gratidão pela orientação assertiva, pela paciência, compreensão e solidariedade durante toda a jornada. Sua confiança no meu trabalho e seu apoio foram fundamentais para que este estudo se concretizasse.

Agradeço também a todos que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento desta dissertação. De forma especial, ao técnico Dr. Lucas Silva de Faria, à Sophia Silveira Sales e ao Deyvid da Silva Gallet, pelo suporte, ajuda prática, conhecimento compartilhado e parceria ao longo deste percurso. Aos meus amigos, pela força, pelas palavras de incentivo e por tornarem mais leve e possível cada etapa dessa trajetória.

À Fazenda Santa Bárbara, pela disponibilidade e confiança em permitir a realização desta pesquisa em sua área, oferecendo estrutura e apoio fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPq, pelo auxílio por meio da bolsa, que foi essencial para a minha dedicação e permanência nesta etapa tão importante da minha vida acadêmica.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais, pela oportunidade, conhecimento, estrutura e ambiente que contribuíram profundamente para minha formação.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta caminhada, deixo aqui minha sincera gratidão.



*“Lembre-se:  
a tarefa é difícil, mas não impossível.  
A vitória pertence àqueles que não desistem do caminho.”  
(Chico Xavier, ★1910 - †2002)*



# Resumo

Nematoides entomopatogênicos (NEPs) são aliados promissores no manejo integrado de pragas do cafeeiro, mas sua dinâmica em sistemas regenerativos do Cerrado Mineiro permanece pouco conhecida. Avaliamos a ocorrência de NEPs no solo e sua relação com atributos edáficos em três talhões comerciais de *Coffea arabica* L. sob manejo regenerativo. Os NEPs foram isolados utilizando iscas com larvas de *Tenebrio molitor* L (Coleoptera: Tenebrionidae) e armadilha de White, e a ocorrência foi modelada por regressão logística em duas escalas. A compactação não explicou a presença de NEPs dentro dos talhões; entre talhões, a umidade do solo mostrou associação positiva consistente, enquanto  $\beta$ -glucosidase e compactação não foram determinantes. Os modelos apresentaram boa calibração e discriminação moderada. Concluímos que diferenças entre talhões e maior umidade do solo estão associadas ao aumento da probabilidade de ocorrência de NEPs, sugerindo que o monitoramento e o manejo hídrico devem considerar as zonas mais úmidas como áreas prioritárias para favorecer o controle biológico.

**Palavras-chave:** Controle Biológico. Entomopatógenos. Heterorhabditidae. Solo. Steinernematidae. Sustentabilidade.



# Abstract

Entomopathogenic nematodes (EPNs) are promising allies in the integrated management of coffee pests, but their dynamics in regenerative systems of the Cerrado Mineiro remain poorly understood. We assessed the occurrence of EPNs in the soil and their relationship with edaphic attributes in three commercial plots of *Coffea arabica* L. under regenerative management. EPNs were isolated using *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae) larvae as bait and the White trap method, and occurrence was modeled using logistic regression at two scales. Soil compaction did not explain the presence of EPNs within plots; between plots, soil moisture showed a consistent positive association, whereas  $\beta$ -glucosidase and compaction were not determinant factors. The models showed good calibration and moderate discrimination. We conclude that differences among plots and higher soil moisture are associated with an increased probability of EPN occurrence, suggesting that monitoring and water management should consider wetter zones as priority areas to enhance biological control.

**Key-words:** Biological Control. Entomopathogens. Heterorhabditidae. Soil. Steinernematidae. Sustainability.





# Lista de ilustrações

Figura 1 – Localização da área de estudo. . . . .	31
Figura 2 – Setorização dos talhões e exclusões. . . . .	32
Figura 3 – Pontos amostrais por campanha. . . . .	34
Figura 4 – Distribuição espacial dos pontos amostrais com presença e ausência de nematoides entomopatogênicos (NEPs) nos talhões 2015, 2016 e 2018 da Fazenda Santa Bárbara, Monte Carmelo, MG, no período de outubro de 2024 a abril de 2025. Pontos em destaque indicam amostras com detecção positiva de NEPs. . . . .	40
Figura 5 – Amostras plotadas em modelo de quatro quadrantes que demonstram tendências da matéria orgânica do solo. Quadrante verde escuro: solo saudável (alta qualidade do solo, alta atividade biológica, alto teor de matéria orgânica); quadrante amarelo: solo adoecendo (solo perdendo qualidade, baixa atividade biológica, tendência de perda de matéria orgânica); quadrante vermelho: solo doente (baixa qualidade do solo, baixa atividade biológica, baixo teor de matéria orgânica); quadrante verde claro: solo se recuperando (solo ganhando qualidade, alta atividade biológica, tendência de acúmulo de matéria orgânica). COS: carbono orgânico do solo, AEM: atividade enzimática específica média. . . . .	42



# Lista de tabelas

Tabela 1 – Resumo da amostra e prevalência do desfecho. . . . .	39
Tabela 2 – Indicadores integrados de qualidade do solo com base no modelo de quatro quadrantes (CHAER et al., 2023). . . . .	41
Tabela 3 – Modelo A (dentro do talhão): associação entre compactação (no ponto) e presença de nematoides, ajustado por TALHAO. . . . .	43
Tabela 4 – Modelo B (entre talhões): associação entre umidade (CVA), $\beta$ -glicosidase (log) e compactação com a presença de nematoides. . . . .	43
Tabela 5 – Qualidade de ajuste, discriminação e calibração dos modelos. . . . .	44



# Lista de abreviaturas e siglas

AIC	Critério de Informação
ARS	Arilsulfatase
B-GLU	B-glicosidase
BioAs	Atividade Biológica do Solo
°C	Celsius
CVA	Umidade em Base Volumétrica
GLM	Modelos Lineares Generalizados
ha	Hectares
JIs	Juvenis Infectivos
m	Metros
ml	Mililitro
mm	Milimetro
MIP	Manejo Integrado de Pragas
NEPs	Nematoides Entomopatogênicos
O	Oeste
OR	<i>Odds ratio</i>
pH	Potencial Hidrogeniônico
pNP	p-nitrofenol
S	Sul
VIF	Inflação da Variância



# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	23
2	REFERENCIAL TEÓRICO . . . . .	27
2.1	Cafeicultura Regenerativa . . . . .	27
2.2	Nematoides Entomopatogênicos . . . . .	27
2.3	Atributos Físicos e Químicos do Solo e sua Influência sobre os Nematoides Entomopatogênicos . . . . .	29
2.4	Atividade Enzimática . . . . .	30
2.5	Compactação do Solo . . . . .	30
3	MATERIAL E MÉTODOS . . . . .	31
3.1	Descrição da Área Experimental . . . . .	31
3.1.1	Coleta de Dados . . . . .	33
3.2	Isolamento de Nematoides Entomopatogênicos . . . . .	34
3.3	Atividade Enzimática . . . . .	35
3.4	Compactação do Solo . . . . .	36
3.5	Umidade do Solo . . . . .	36
3.6	Regressão Logística . . . . .	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .	39
4.1	Caracterização das variáveis edáficas . . . . .	40
4.2	Indicadores biológicos integrados de qualidade do solo . . . . .	41
4.3	Modelagem estatística . . . . .	42
4.4	Associação entre atributos do solo e ocorrência de NEPs . . . . .	43
4.4.1	Qualidade do ajuste e desempenho preditivo . . . . .	43
4.5	Diagnósticos essenciais . . . . .	44
4.6	Implicações práticas . . . . .	45
5	CONCLUSÃO . . . . .	47
	REFERÊNCIAS . . . . .	49





# 1 Introdução

A cafeicultura é uma das atividades agrícolas mais relevantes para a economia brasileira, destacando-se pela expressiva produção e pela qualidade diferenciada dos grãos cultivados em diversas regiões do país (ARAÚJO; SILVA; ROCHA, 2023). Nesse contexto, Minas Gerais ocupa posição de destaque quando comparada a outros estados produtores, liderando o ranking nacional de produção de café, seguida por Espírito Santo, São Paulo, Bahia e Rondônia (CONAB, 2023). No estado mineiro, o Cerrado Mineiro destaca-se como importante região produtora, abrangendo municípios como Patrocínio, Monte Carmelo, Araguari, Patos de Minas, Campos Altos, Unaí, Serra do Salitre, São Gotardo, Araxá e Carmo do Paranaíba, sendo reconhecido por sua Denominação de Origem, a qual assegura procedência, rastreabilidade e identidade do produto (CONAB, 2023).

Paralelamente, observa-se a crescente adoção de boas práticas agrícolas nos sistemas cafeeiros, com ênfase na melhoria da qualidade do solo, por meio da manutenção da cobertura vegetal, do uso de plantas de cobertura, do incremento da matéria orgânica, da redução do revolvimento do solo, do manejo conservacionista da fertilidade e do estímulo à atividade biológica edáfica. Essas práticas visam reduzir a dependência de insumos de maior impacto ambiental e favorecer a integração de processos biológicos nos agroecossistemas (EMBRAPA, 2022).

No Brasil, manuais técnicos e diretrizes institucionais voltados à cafeicultura orgânica e sustentável consolidaram princípios que também fundamentam o cultivo regenerativo. O cultivo regenerativo pode ser definido como um conjunto de práticas agrícolas orientadas à restauração e ao fortalecimento das funções ecológicas do solo, promovendo o aumento da matéria orgânica, da biodiversidade, da ciclagem de nutrientes e da resiliência do sistema produtivo, com benefícios ambientais, produtivos e socioeconômicos. Entre essas práticas destacam-se a manutenção da cobertura do solo, a adubação orgânica, o manejo ecológico de pragas e a conservação da biodiversidade funcional (EMBRAPA, 2002a; EMBRAPA, 2004; DINIZ; NETO; VIVIANI, 2019). Tais estratégias visam fortalecer a resiliência do agroecossistema e incrementar fatores ecológicos associados à fertilidade e à sanidade do solo.

Em sistemas agroflorestais e de café sombreado, a maior diversidade de microbiota do solo e a melhoria das condições microclimáticas favorecem a persistência de organismos benéficos, incluindo nematoides entomopatogênicos (NEPs), o que reforça o potencial da cafeicultura regenerativa como estratégia de manejo baseada na natureza (KOUTOULEAS et al., 2022). Evidências obtidas em cafeeiros indicam que estratégias de biocontrole podem simultaneamente reduzir populações de nematoides fitoparasitas e melhorar indicadores de saúde do solo, alinhando-se aos objetivos da abordagem regenerativa (SAIKAI et al., 2023).

Os NEPs são importantes inimigos naturais no controle de pragas agrícolas, pertencentes principalmente às famílias Steinernematidae e Heterorhabditidae. Esses organismos mantêm simbiose com bactérias dos gêneros *Xenorhabdus* (em *Steinernema*) e *Photorhabdus* (em *Heterorhabditis*), responsáveis pela morte (24–48 h) do hospedeiro após a penetração dos juvenis infectantes (JIs) pelas aberturas naturais ou, em certos casos, pela cutícula (ALMENARA et al., 2011; LACEY; GEORGIS, 2012). Estudos recentes detalham essa simbiose sob a perspectiva molecular, destacando os mecanismos genéticos e fisiológicos que sustentam a patogenicidade e a reciclagem dos NEPs no ambiente (TARASCO et al., 2023). Tal modo de ação, aliado à possibilidade de persistência no solo, compatibilidade com inseticidas registrados e viabilidade de produção massal, confere aos NEPs relevância crescente em programas de manejo integrado de pragas (MIP) (ASKARY; ABD-ELGAWAD, 2021; KOPPENHÖFER; SHAPIRO-ILAN; HILTPOLD, 2020; PERIER et al., 2024; DIAS et al., 2024; RAMAKUWELA et al., 2025).

Estudos relatam mortalidade significativa de insetos-praga agrícolas, como *Hypothenemus hampei* (broca-do-café), *Leucoptera coffeella* (bicho-mineiro) e larvas de Coleoptera de solo, mediante o uso de espécies dos gêneros *Heterorhabditis* e *Steinernema*, com impactos reduzidos sobre organismos não alvo quando adequadamente manejados (MENDONÇA, 2021; LACEY; GEORGIS, 2012; LAURENTINO; COSTA, 2004; OLIVEIRA, 2024). A umidade e a estrutura do solo são fatores determinantes para o sucesso do biocontrole, pois influenciam diretamente a mobilidade, a sobrevivência e a infectividade dos JIs (KOPPENHÖFER; SHAPIRO-ILAN; HILTPOLD, 2020; KHUMALO; LEPHOTO; GRAY, 2021); De forma mais ampla, a efetividade dos NEPs em condições de campo é modulada por fatores abióticos, como temperatura, umidade, textura e atributos químicos do solo, bem como por fatores bióticos, incluindo a espécie ou isolado do nematoide, a idade

do inseto hospedeiro e a composição da fauna edáfica, o que demanda uma abordagem ecológica integrada do sistema produtivo (LACEY; GEORGIS, 2012).

A atividade enzimática do solo constitui um indicador sensível da funcionalidade biológica e pode exercer papel fundamental na manutenção de condições favoráveis à ocorrência e à atividade dos NEPs. Enzimas como a  $\beta$ -glicosidase estão diretamente associadas à ciclagem do carbono, promovendo a decomposição de resíduos orgânicos e a liberação de açúcares simples que sustentam a microbiota do solo. A arilsulfatase, por sua vez, está relacionada à ciclagem do enxofre, elemento essencial à atividade microbiana e à síntese de compostos orgânicos. Solos com elevada atividade dessas enzimas tendem a apresentar maior disponibilidade de nutrientes, maior estabilidade estrutural e maior diversidade microbiana, fatores que contribuem para a sobrevivência, mobilidade e persistência dos NEPs no ambiente edáfico (DICK; BREAKWELL; TURCO, 1996; TABATABAI, 2002; EMBRAPA, 2002b). Assim, a atividade enzimática do solo pode ser considerada um componente chave na criação de ambientes biologicamente ativos e favoráveis ao controle biológico natural.

Em sistemas agrícolas regenerativos, espera-se que maior cobertura do solo, maiores níveis de matéria orgânica, menor perturbação do solo, microclima mais estável e maior diversidade biológica edáfica criem condições propícias à ocorrência e à atividade de NEPs. A literatura sustenta a plausibilidade ecológica dessa associação, relacionando guildas de nematoides a processos de ciclagem de nutrientes e à qualidade do solo (UGARTE; ZABORSKI, 2009; LACEY; GEORGIS, 2012; EMBRAPA, 2002a). Contudo, não existem levantamentos sistemáticos em ambientes comerciais de café regenerativo no Cerrado Mineiro que documentem quais NEPs ocorrem, com que frequência e como variáveis de manejo cultural e do solo se associam à sua presença.

Com base no exposto, objetivou-se neste trabalho avaliar a ocorrência de nematoides entomopatogênicos (NEPs) em cafezais (*Coffea arabica* L.) (*Coffea arabica* L.) sob manejo regenerativo e investigar a associação entre sua presença e atributos edáficos, incluindo compactação, umidade e atividade enzimática do solo, em duas escalas espaciais: dentro e entre talhões.



## 2 Referencial Teórico

### 2.1 Cafeicultura Regenerativa

A cafeicultura regenerativa tem sido apresentada como caminho para restaurar funções ecológicas do agroecossistema cafeeiro, reduzindo a dependência de agroquímicos e aumentando a resiliência do sistema. As bases dessa abordagem dialogam com a tradição técnico-científica brasileira em cafeicultura orgânica (manejo do solo, adubação orgânica, cobertura vegetal, MIP e conservação da biodiversidade funcional) (EMBRAPA, 2002a; EMBRAPA, 2004; DINIZ; NETO; VIVIANI, 2019).

Do ponto de vista operacional, práticas regenerativas incluem: (i) manutenção de cobertura permanente do solo (palhada/adubos verdes); (ii) incremento e reciclagem de matéria orgânica via compostagem e insumos orgânicos; (iii) sombreamento planejado/agrossilvicultura; (iv) redução do revolvimento e tráfego; e (v) manejo integrado de pragas e doenças, com enfoque no controle biológico. Em lavouras de *C. arabica* no Cerrado, os atributos dos solos, como a estrutura, níveis de matéria orgânica, atividade enzimática e a microbiota, são beneficiados por essas práticas conservacionistas (CARDUCCI et al., 2024; SOUSA et al., 2024). Evidências recentes mostram que o intercultivo, p. ex., *Urochloa decumbens* (Stapf) (Poales: Poaceae) eleva frações de carbono e atividades enzimáticas (p. ex.,  $\beta$ -glucosidase, fosfatase), indicadores de funcionalidade biológica (SOUSA et al., 2024).

Ao convergir a conservação do solo e do microclima edáfico com o MIP, a abordagem regenerativa cria condições favoráveis à ação de inimigos naturais, incluindo os NEPs, discutidos a seguir (EMBRAPA, 2002a; EMBRAPA, 2004).

### 2.2 Nematoides Entomopatogênicos

Os NEPs (Steinernematidae e Heterorhabditidae) são agentes de biocontrole que combinam letalidade rápida ao hospedeiro e especificidade ecológica, sustentadas por simbiose obrigatória com bactérias entomopatogênicas: *Xenorhabdus* (em *Steinernema*) e *Photorhabdus* (em *Heterorhabditis*). Os JIs penetram em orifícios naturais do inseto ou

pela cutícula quando *Heterorhabditis* spp., pois apresentam estrutura quitinosa (dente) na região anterior que permite a perfuração da cutícula do inseto, e liberam as bactérias no hemocele, levando à morte por septicemia; o cadáver é então utilizado para multiplicação dos nematoides até a liberação de novos JIs (ALMENARA et al., 2011; LACEY; GEORGIS, 2012; UGARTE; ZABORSKI, 2009). Esses atributos, aliados à possibilidade de produção massal e aplicação com equipamentos convencionais, justificam a crescente adoção dos NEPs em programas de MIP (LACEY; GEORGIS, 2012).

A eficácia em campo é condicionada por quatro fatores críticos: umidade do solo, temperatura, patogenicidade ao alvo e estratégia de forrageamento (*ambusher/cruiser*), além da interação com práticas de aplicação/formulação (LACEY; GEORGIS, 2012). No contexto cafeeiro, há evidências aplicadas a pragas-alvo. Em *C. arabica*, espécies do gênero *Heterorhabditis* spp. controlaram a cochonilha-das-raízes, *Dysmicoccus texensis* (Tinsley) (Hemiptera: Pseudococcidae), em ensaios de laboratório e semicampo (ALVES et al., 2009). Para o bicho-mineiro-do-cafeeiro, *Leucoptera coffeella* (Guérin-Méneville & Perrottet) (Lepidoptera: Lyonetiidae), isolados selecionados mostraram patogenicidade; os bioensaios estimaram a CL<sub>50</sub> e a TL<sub>50</sub><sup>1</sup>, além da capacidade reprodutiva no hospedeiro (MENDONÇA, 2021). Em culturas afins, a seletividade/compatibilidade de NEPs a produtos fitossanitários e o desempenho contra insetos edáficos reforçam seu papel em MIP (OLIVEIRA, 2024; LACEY; GEORGIS, 2012).

A persistência e a viabilidade dos JIs tanto em condições de laboratório quanto no ambiente natural dependem da formulação e do substrato utilizado. Em condições controladas, substratos mais porosos (como espumas ou areias) tendem a prolongar a sobrevivência, enquanto materiais como turfa, serragem e vermiculita podem reduzir a viabilidade ao longo do tempo (ANDALÓ et al., 2010; BRIDA, 2015). Esses resultados fornecem subsídios para decisões práticas — por exemplo, na escolha da matriz de formulação ou das condições de estocagem — e ajudam a explicar variações de desempenho após a aplicação *in vivo* (ANDALÓ et al., 2010; BRIDA, 2015). Além disso, interações ecológicas com outros entomopatógenos (como fungos) podem ser aditivas ou sinérgicas, dependendo do organismo-alvo e do momento da aplicação; recomenda-se avaliar a compatibilidade quando os NEPs forem misturados a outros agentes em caldas ou formulações de biocontrole (PŮZA; TARASCO, 2023; OLIVEIRA, 2024).

<sup>1</sup> CL<sub>50</sub>: concentração/dose de JIs necessária para causar 50% de mortalidade; TL<sub>50</sub>: tempo necessário para que 50% da população morra a uma dose fixa.

## 2.3 Atributos Físicos e Químicos do Solo e sua Influência sobre os Nematoides Entomopatogênicos

O solo é um sistema vivo cuja funcionalidade resulta da integração entre fases mineral/orgânicas e biota edáfica. Em sistemas perenes como o cafeeiro, a saúde do solo — capacidade de suportar produtividade, biodiversidade e serviços ecossistêmicos — emerge como variável mestra (CARDUCCI et al., 2024; EMBRAPA, 2002a; SOGLIO; KUBO, 2016). Em Latossolos do Cerrado (pH naturalmente ácido, baixa capacidade de troca de cátions e baixos teores de matéria orgânica), práticas regenerativas são determinantes para construir estoques de carbono no solo, estrutura estável e atividade microbiana (EMBRAPA, 2002a; CARDUCCI et al., 2024).

Como organismos edáficos durante seu estágio infectivo, os NEPs respondem à umidade, à temperatura, à textura/porosidade, ao pH e à química do solo, que controlam mobilidade, persistência e infectividade (MATUSKA-LYŻWA et al., 2024; LACEY; GEORGIS, 2012). Em geral, déficit hídrico e hipóxia prejudicam JIs; por outro lado, porosidade adequada e microclimas estáveis (maior matéria orgânica, cobertura) favorecem a permanência (MATUSKA-LYŻWA et al., 2024). A textura atua de forma não linear: solos muito arenosos tendem a dessecar rapidamente, enquanto argilosos compactados restringem o movimento; condições intermediárias são mais favoráveis. Ensaio com substratos de armazenamento e estudos de campo ajudam a inferir esses efeitos edáficos sobre sobrevivência e desempenho (ANDALÓ et al., 2010; BRIDA, 2015).

A matéria orgânica e a cobertura vegetal modulam o habitat dos NEPs ao melhorar condições de umidade, temperatura e das cadeias tróficas. Em lavouras cafeeiras do Cerrado, o *intercropping* com brachiaria elevou frações de carbono e atividades enzimáticas, sinalizando ambiente mais propício à biota do solo (SOUSA et al., 2024). Em paralelo, a diversidade e o sombreamento de árvores alteram a microbiota do solo (incluindo grupos funcionais relevantes), com implicações indiretas para a persistência de inimigos naturais (KUTOS et al., 2024). Em termos hidrossedimentológicos, práticas regenerativas reduzem perdas de solo e carbono orgânico sob chuva, protegendo o horizonte superficial — onde a maior parte da ação dos NEPs ocorre (SANTANA et al., 2025). Em síntese, solo saudável e manejo conservacionista funcionam como “hábitat funcional” para os NEPs, maximizando sua contribuição ao MIP em sistemas cafeeiros regenerativos. Essa convergência entre



conservação do solo e biocontrole integra produtividade, qualidade e sustentabilidade (EMBRAPA, 2002a; CARDUCCI et al., 2024; LACEY; GEORGIS, 2012).

## 2.4 Atividade Enzimática

A atividade enzimática do solo constitui um dos principais indicadores biológicos de qualidade e funcionalidade dos ecossistemas edáficos, pois reflete a intensidade de processos bioquímicos conduzidos predominantemente por microrganismos (NANNIPIERI; TRASAR-CEPEDA; DICK, 2018). Essas enzimas participam diretamente dos ciclos biogeoquímicos de carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre, regulando a decomposição da matéria orgânica, a mineralização de nutrientes e a formação de agregados estáveis no solo. Dessa forma, a quantificação de atividades enzimáticas permite compreender a dinâmica microbiana e suas interações com atributos químicos e físicos do solo, fornecendo subsídios para avaliar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (CURYŁO; TELESÍŃSKI, 2020; CARDONA et al., 2025).

## 2.5 Compactação do Solo

A compactação do solo é um processo físico caracterizado pela redução da sua porosidade, resultando em maior densidade aparente e maior resistência à penetração radicular. Esse fenômeno limita o crescimento das plantas, restringe o movimento de água e gases e afeta diretamente a dinâmica biológica do solo (HAMZA; ANDERSON, 2005). Em sistemas agrícolas, a compactação é frequentemente associada ao tráfego de máquinas, à ausência de cobertura vegetal e ao manejo intensivo, enquanto práticas regenerativas tendem a mitigar esse efeito por meio do aporte de matéria orgânica e da atuação de raízes profundas que promovem bioporosidade.

No contexto dos NEPs, a compactação assume papel relevante. Solos excessivamente densos podem reduzir a mobilidade dos JIs, dificultando a busca por hospedeiros e comprometendo a eficácia no controle biológico (KAYA; GAUGLER, 1993; BLANCO-PÉREZ; STEVENS; CAMPOS-HERRERA, 2024). Além disso, a menor aeração e a redução da infiltração de água em solos compactados criam microambientes desfavoráveis à sobrevivência desses organismos, sensíveis tanto à desidratação quanto à hipóxia (FATIMAH; ASKARY; ABD-ELGAWAD, 2025).

## 3 Material e Métodos

### 3.1 Descrição da Área Experimental

O estudo foi realizado na Fazenda Santa Bárbara, localizada no município de Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil, nas coordenadas geográficas aproximadas de  $18^{\circ}47'17,52''$  S e  $47^{\circ}33'42,19''$  O. A [Figura 1](#) apresenta a posição da fazenda e a imagem de satélite da área de pesquisa. Inserida na Região do Cerrado Mineiro, reconhecida internacionalmente pela produção de cafés de alta qualidade e identidade própria, a propriedade situa-se a 990 m de altitude média, com condições edafoclimáticas favoráveis ao cultivo de cafés especiais. O clima local é classificado como Aw, segundo o sistema de Köppen–Geiger, correspondente a clima tropical de savana com estação seca no inverno e com verões quentes e úmidos. (VINISQUI; ALMEIDA; JÚNIOR, 2018; Minas Gerais, 2020). O relevo e o solo oferecem suporte adequado à sustentabilidade do sistema produtivo.

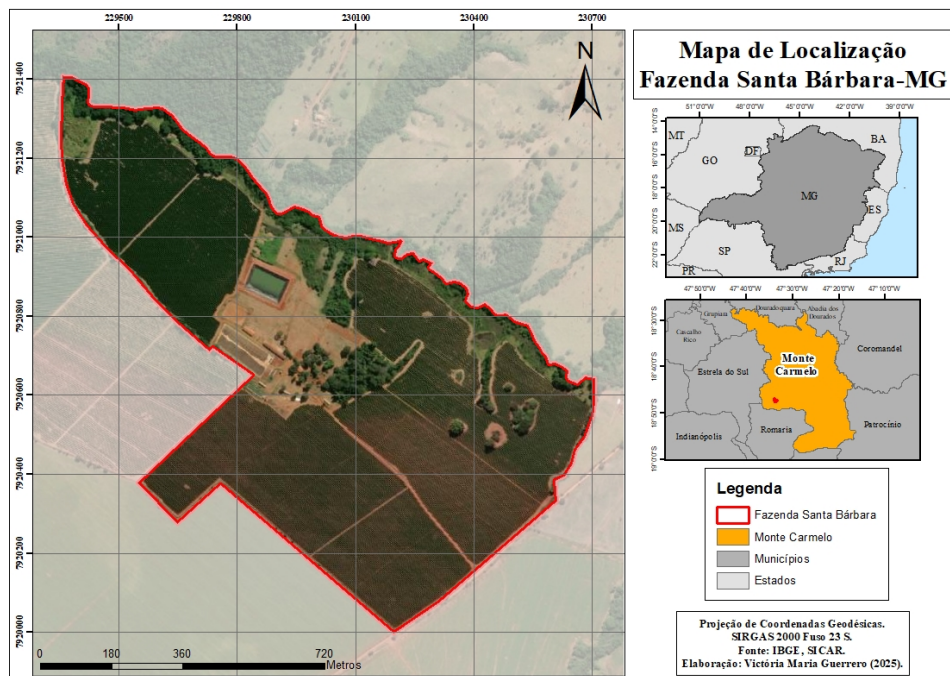


Figura 1 – Localização da área de estudo.

A fazenda possui área total de 88,86 ha, destinada integralmente à cafeicultura sob modelo de cultivo regenerativo, com práticas voltadas à conservação ambiental, sustentabilidade social e promoção da biodiversidade. Na [Figura 2](#) pode-se ver que a área

é composta por quatro talhões, dos quais três (2015, 2016 e 2018) foram considerados neste estudo. O talhão 2017 e o setor S07 do talhão 2018 foram excluídos por integrarem experimentos independentes conduzidos por empresa privada.

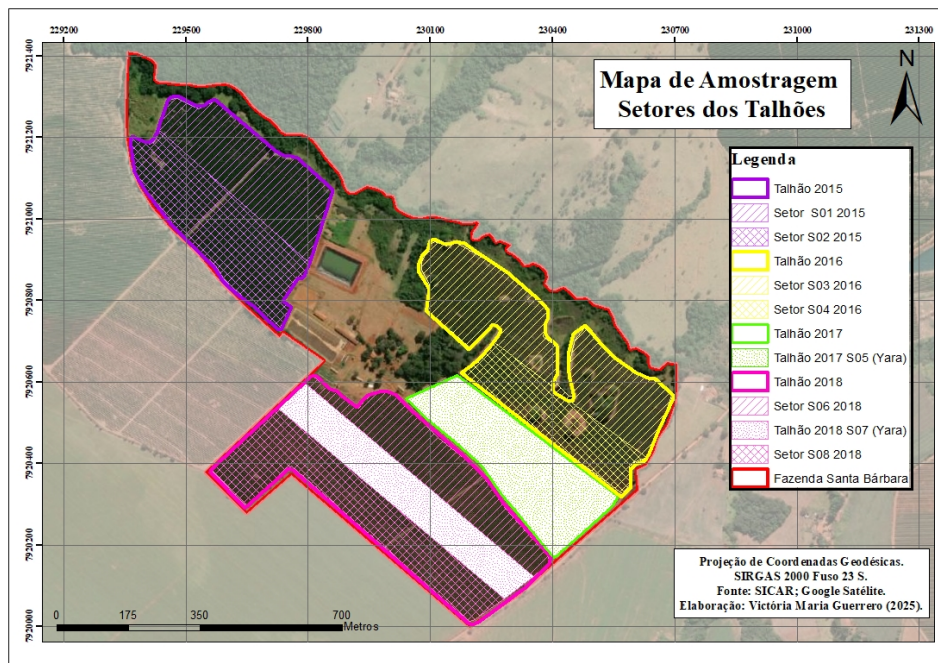


Figura 2 – Setorização dos talhões e exclusões.

O talhão 2015 é ocupado pela cultivar Mundo Novo, subdividida em dois setores: S01 (7,85 ha), manejado com braquiária, *Brachiaria* spp., e milheto, *Pennisetum glaucum* (Poaceae), e S02 (7,96 ha), cultivado com um mix de espécies de cobertura. O talhão 2016 contém a cultivar Topázio MG190, subdividida em S03 (8,26 ha) e S04 (7,89 ha). Essa cultivar é reconhecida pelo elevado potencial produtivo e uniformidade de maturação, embora apresente maior suscetibilidade à broca-do-café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), aspecto relevante no manejo fitossanitário. O talhão 2018 é novamente ocupado pela cultivar Mundo Novo 379/19, subdividida em três setores (S06, S07 e S08, cada um com 7,46 ha).

Todos os talhões avaliados seguem espaçamento de 3,8 m entre linhas e 0,7 m entre plantas, caracterizando sistema de alta densidade de plantio. Entre as linhas do cafeeiro, são cultivadas diferentes espécies de cobertura, como nabo forrageiro, *Raphanus sativus* L. var. *oleiferus* (Brassicaceae), crotalária (*Crotalaria* spp. (Fabaceae)), braquiária (*Brachiaria* spp. (Poaceae)), trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum* (Polygonaceae)), capim coracana (*Eleusine coracana* (Poaceae)) e crambe (*Crambe abyssinica* (Brassicaceae)). Essas espécies

contribuem para o incremento da matéria orgânica do solo, a ciclagem de nutrientes e a promoção da biodiversidade funcional.

O histórico de manejo inclui o uso de insumos químicos e biológicos. Entre os produtos aplicados ao solo destacam-se o fluopyram (nematicida), o flutriafol (fungicida) e o agente biológico *Trichoderma asperellum*. No manejo foliar, utilizou-se o bioinsumo à base de *Beauveria bassiana* (Hypocreales: Cordycipitaceae), importante agente de controle biológico de pragas. A seleção da Fazenda Santa Bárbara como área experimental justifica-se por sua representatividade na cafeicultura regenerativa, pelo compromisso com práticas agrícolas sustentáveis e pela diversidade de cultivares implantadas em diferentes anos. Essas características oferecem condições adequadas para investigar a ocorrência e a dinâmica de NEPs em sistemas cafeeiros conduzidos sob cultivo regenerativo.

A caracterização física do solo, obtida a partir dos laudos laboratoriais referentes aos talhões amostrados, indicou que a área apresenta textura predominantemente argilosa, com variações ajustadas ao histórico de manejo entre talhões. No talhão 2015, o solo apresentou 38% de areia, 10% de silte e 52% de argila, enquanto no talhão 2016 foram observados 30% de areia, 16% de silte e 54% de argila. Já o talhão 2018 apresentou 22% de areia, 8% de silte e 70% de argila, caracterizando-se como o mais argiloso entre os avaliados. Essas diferenças texturais são relevantes para a interpretação dos resultados, uma vez que a proporção de argila influencia a retenção de água, a resistência mecânica do solo, a porosidade e o movimento dos JIs de NEPs. Em solos mais argilosos e coesos, a mobilidade dos NEPs tende a ser mais restrita, ao passo que a maior estabilidade estrutural e maior capacidade de retenção hídrica podem favorecer sua persistência no microambiente edáfico.

### 3.1.1 Coleta de Dados

Ao longo do período de estudo, entre outubro/2024 e abril/2025, foram realizadas 12 campanhas de visitas à Fazenda Santa Bárbara para a coleta das amostras de solo, devidamente identificadas na [Figura 3](#). Em cada visita, coletaram-se 12 amostras por talhão, totalizando 36 amostras por campanha.

Os pontos de coleta foram distribuídos espacialmente de forma aleatória dentro de cada talhão, com base em procedimentos de randomização implementados no software R. Esse planejamento garantiu representatividade espacial das áreas avaliadas e reduziu



vieses de amostragem. Os pontos foram georreferenciados (erro < 5 m) e organizados em ambiente SIG (QGIS), cujos arquivos vetoriais foram posteriormente exportados para o 4Farm e utilizados para navegação em campo.

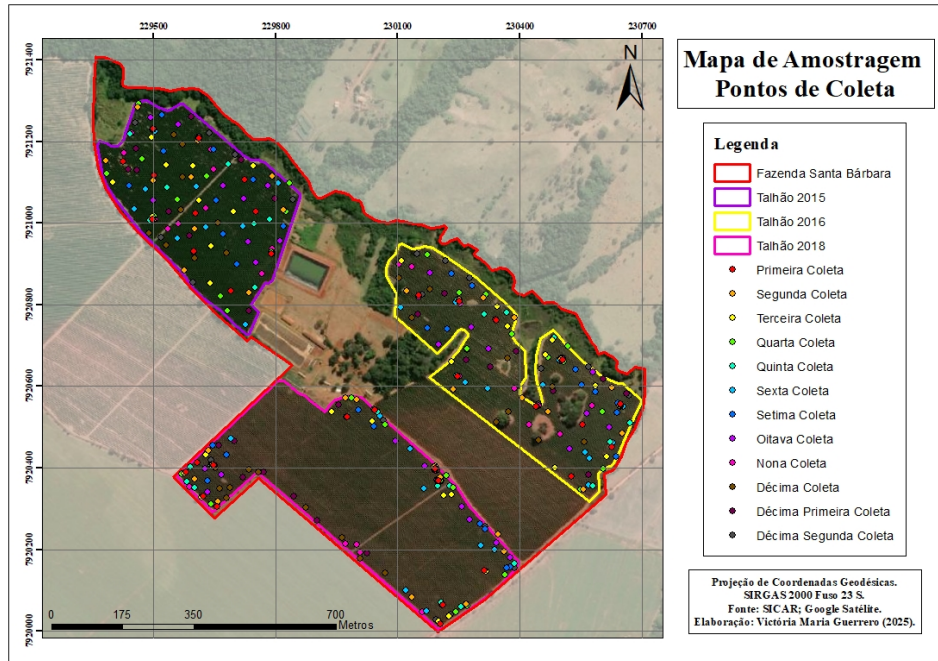


Figura 3 – Pontos amostrais por campanha.

Em cada ponto, removeu-se a serapilheira e a camada superficial de aproximadamente 5 cm sob a projeção da copa, coletando-se solo da camada de 0–10 cm (~500 g). As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, mantidas em caixa térmica e transportadas ao laboratório para processamento.

### 3.2 Isolamento de Nematoides Entomopatogênicos

O isolamento de NEPs foi realizado pelo método de iscas com larvas de *Tenebrio molitor* L (Coleoptera: Tenebrionidae), amplamente utilizado para a prospecção desses organismos em solos agrícolas. Porções de solo foram acondicionadas em recipientes de 500 mL (cerca de dois terços do volume) e dispostas com 10 larvas de *T. molitor*, mantidas em condições controladas de 25 °C e ausência de luz por sete dias (LACEY; GEORGIS, 2012; BRIDA, 2015). As larvas que vieram a óbito foram transferidas para câmaras úmidas por um período adicional de três a cinco dias.

Na ausência de sinais fúngicos externos, procedeu-se à utilização da armadilha de White para captura dos JIs de *Steinernema* e *Heterorhabditis*. O efluente coletado foi examinado em microscópio estereoscópico, e os JIs recuperados foram submetidos a um novo ciclo de inoculação em larvas de *T. molitor*, a fim de confirmar a característica entomopatogênica dos isolados (LACEY; GEORGIS, 2012; BRIDA, 2015; OLIVEIRA, 2024).

Esse protocolo de isolamento apresenta alta sensibilidade para a detecção de NEPs e é considerado referência na literatura especializada. Diversos estudos apontam que fatores como umidade e temperatura do solo, bem como sua textura e porosidade, influenciam diretamente a viabilidade e a infectividade dos juvenis, ressaltando a importância de se considerar o contexto edáfico e o manejo conservacionista no estudo da ocorrência e dinâmica desses organismos (LACEY; GEORGIS, 2012; ANDALÓ et al., 2010; BRIDA, 2015; OLIVEIRA, 2024).

### 3.3 Atividade Enzimática

No presente estudo, a atividade enzimática foi utilizada como indicador do funcionamento biológico do solo em cafezais conduzidos sob cultivo regenerativo. Foram selecionadas a  $\beta$ -glucosidase ( $\beta$ -GLU) e a arilsulfatase (ARS), enzimas reconhecidas como bioindicadores sensíveis de qualidade edáfica. A  $\beta$ -GLU está associada à decomposição de polissacarídeos vegetais, liberando açúcares simples que sustentam a microbiota do solo e integram o fluxo de carbono (CARDONA et al., 2025; SOUSA et al., 2024). A arilsulfatase, por sua vez, participa da mineralização de compostos orgânicos sulfurados, disponibilizando enxofre assimilável às plantas e refletindo o equilíbrio da atividade microbiana (BASTOS et al., 2023). Ambas têm sido amplamente aplicadas em estudos de cafeicultura sob diferentes estratégias de manejo (CURYŁO; TELESÍŃSKI, 2020; SOUSA et al., 2024).

As amostras de solo foram coletadas nos talhões avaliados, nas profundidades de 0–10 cm e 10–20 cm, peneiradas em malha de 2 mm e acondicionadas em recipientes estéreis até a análise laboratorial. A atividade da  $\beta$ -GLU foi determinada pela hidrólise de *p*-nitrofenil- $\beta$ -D-glicosídeo, e a da ARS pela hidrólise de *p*-nitrofenil sulfato. Em ambos os casos, a liberação de *p*-nitrofenol (pNP) foi quantificada em espectrofotômetro, em comprimento de onda específico, conforme protocolo descrito por (CURYŁO; TELESÍŃSKI,

2020). Os resultados foram expressos em  $\mu\text{mol}$  de pNP  $\text{g}^{-1}$  de solo  $\text{h}^{-1}$ .

A avaliação dessas enzimas está diretamente relacionada ao objetivo da pesquisa, uma vez que a atividade microbiana contribui para a criação de microsítios favoráveis à persistência e à infectividade dos nematoides entomopatogênicos (NEPs), ampliando o potencial de integração desses agentes ao manejo integrado de pragas do cafeeiro (BLANCO-PÉREZ; STEVENS; CAMPOS-HERRERA, 2024; FATIMAH; ASKARY; ABD-ELGAWAD, 2025).

### 3.4 Compactação do Solo

A avaliação da compactação nos cafezais da Fazenda Santa Bárbara foi realizada em pontos representativos dos talhões. A resistência à penetração foi determinada com penetrômetro de impacto (PenetroLOG – Falker), em leituras até 30 cm de profundidade. A densidade do solo foi mensurada pelo método do anel volumétrico, utilizando amostras indeformadas coletadas em cilindros metálicos padronizados, secas em estufa a 105 °C até peso constante. Os resultados expressaram a relação entre a massa seca e o volume do cilindro, fornecendo indicadores da estrutura física do solo a serem interpretados em conjunto com as demais variáveis avaliadas.

### 3.5 Umidade do Solo

A umidade do solo é um parâmetro físico fundamental em sistemas agrícolas, pois influencia a disponibilidade de água às plantas, o transporte de nutrientes, a atividade microbiana e a mobilidade de organismos edáficos, incluindo os nematoides entomopatogênicos (NEPs). Esses organismos apresentam maior sobrevivência e infectividade em condições de umidade adequada, enquanto a dessecação ou a saturação hídrica reduzem sua persistência no ambiente (KAYA; GAUGLER, 1993; FATIMAH; ASKARY; ABD-ELGAWAD, 2025).

A determinação da umidade seguiu o método gravimétrico descrito no *Manual de Métodos de Análise de Solo* da Embrapa (EMBRAPA, 2017). As amostras de solo foram pesadas no estado úmido em recipientes metálicos de massa conhecida, secas em estufa a 105 °C até peso constante (aproximadamente 24 h) e, após resfriamento em dessecador, novamente pesadas para obtenção da massa seca. A diferença entre os dois

valores correspondeu à massa de água presente na amostra.

A partir dessas medidas, calculou-se o conteúdo gravimétrico de água (CGA,  $\text{kg kg}^{-1}$ ) e o conteúdo volumétrico de água (CVA,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), este último estimado a partir da densidade do solo determinada pelo método do anel volumétrico.

## 3.6 Regressão Logística

A regressão logística foi empregada para modelar a probabilidade de ocorrência de nematoides entomopatogênicos ( $\text{NEMATOIDE}=1/0$ ) em função de covariáveis medidas no ponto e no nível de talhão. Trata-se de um modelo da família dos Modelos Lineares Generalizados (GLM) com distribuição binomial e função de ligação logito ([MCCULLAGH; NELDER, 1989](#); [AGRESTI, 2015](#); [HOSMER; LEMESHOW; STURDIVANT, 2013](#)). Denotando  $Y_i \in \{0, 1\}$  o desfecho no ponto  $i$  e  $\pi_i = \Pr(Y_i = 1 \mid \mathbf{x}_i)$ , especificamos

$$\text{logito}(\pi_i) = \log\left(\frac{\pi_i}{1 - \pi_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 z_{1i} + \cdots + \beta_p z_{pi},$$

onde  $z_{ji}$  são preditores (contínuos padronizados ou indicadores) e os coeficientes  $\beta_j$  são estimados por máxima verossimilhança ([MCCULLAGH; NELDER, 1989](#)). Para variáveis contínuas, relatamos razões de chances, do inglês *odds ratio* (OR), por 1 desvio-padrão a partir de preditores centralizados e escalonados, facilitando a comparabilidade entre efeitos ([GELMAN, 2008](#)).

**Modelos ajustados:** Para respeitar a escala de medição das covariáveis, adotamos dois modelos complementares. Em um dos modelos (modelo A), TALHAO entra como fator para controlar diferenças médias entre áreas; no outro (modelo B), omitimos TALHAO para evitar colinearidade com variáveis constantes por talhão (CVA, atividade enzimática agregada). A transformação  $\text{LOG\_BG} = \log(1 + \text{B\_GLUCOSIDASE})$  reduz assimetria. Alguns pontos foram amostrados repetidamente; por isso avaliamos a possibilidade de dependência intra-ponto/talhão via modelos mistos logísticos como análise de sensibilidade ([BOLKER et al., 2009](#)). Neste estudo, variáveis como o conteúdo volumétrico de água (CVA) e a atividade enzimática foram mensuradas como valores médios representativos de cada talhão. Portanto, não variam entre pontos dentro de um mesmo talhão, embora variem entre talhões. Esse caráter “constante dentro do talhão” impede sua inclusão simultânea com o fator TALHAO no mesmo modelo, pois ambos explicam a mesma fonte de variação



(diferenças entre áreas). Por isso, ajustamos um modelo separado (Modelo B) no qual TALHAO é removido para evitar colinearidade perfeita.

**Pré-processamento e seleção:** Preditores contínuos foram centrados e escalonados ( $z = (x - \bar{x})/s$ ) para interpretação de OR por 1 DP (GELMAN, 2008). A seleção de termos seguiu critério de informação (AIC) e plausibilidade ecológica, evitando sobreajuste em razão do número de eventos (HARRELL, 2015; STEYERBERG, 2019). Colinearidade foi inspecionada com fatores de inflação da variância (VIF), usando-os como diagnóstico (não como regra rígida) (O'BRIEN, 2007; FOX; WEISBERG, 2019).

**Avaliação do ajuste e desempenho:** Relatamos: (i) bondade de ajuste pelo teste de Hosmer–Lemeshow (HL) (HOSMER; LEMESHOW; STURDIVANT, 2013); (ii) discriminação pela AUC da curva ROC (FAWCETT, 2006; ROBIN et al., 2011); (iii) calibração via intercepto e inclinação (ideal: 0 e 1) e erros de calibração médios/máximos, além do score de Brier para acurácia probabilística (BRIER, 1950; STEYERBERG, 2019). Diagnósticos de influência (distância de Cook) e resíduos (de desvio) foram examinados; linearidade no logito foi verificada com termos flexíveis (p. ex., splines restritos), mantendo-se a forma linear quando não houve ganho substantivo (HARRELL, 2015).

**Software:** As análises foram conduzidas no R (R Core Team, 2025).

## 4 Resultados e Discussões

A pergunta que norteia esta análise é direta: *existe associação entre a compactação do solo, a umidade e as atividades enzimáticas e a presença de nematoides dentro e entre talhões?* Para respeitar a escala de medição das covariáveis, organizamos os resultados em dois níveis complementares: (i) dentro dos talhões (efeito da compactação no ponto, controlando diferenças médias entre talhões) e (ii) entre talhões (efeito de variáveis constantes por talhão, como a umidade, removendo o fator TALHAO para evitar colinearidade).

A base analítica contém 432 observações, com prevalência de nematoides de aproximadamente 17%; veja a [Tabela 1](#). O desfecho é binário (NEMATOIDE=1 presença; 0 ausência). As covariáveis incluem: COMPACTACAO (nível do ponto), CVA (umidade no nível do talhão) e B\_glucosidase (atividade enzimática, analisada como  $\log(1 + x)$ ), além do fator TALHAO. Alguns pontos foram amostrados mais de uma vez.

Tabela 1 – Resumo da amostra e prevalência do desfecho.

	Frequência	Proporção
Ausência de nematoides (0)	359	0,83
Presença de nematoides (1)	73	0,17
<b>Total</b>	<b>432</b>	<b>1,00</b>

A distribuição espacial da ocorrência de nematoides nos talhões avaliados é apresentada na [Figura 4](#). A figura mostra os pontos amostrais com detecção positiva e negativa de NEPs em cada talhão, permitindo visualizar em quais áreas da lavoura a presença desses organismos foi mais frequente ao longo do período de estudo.

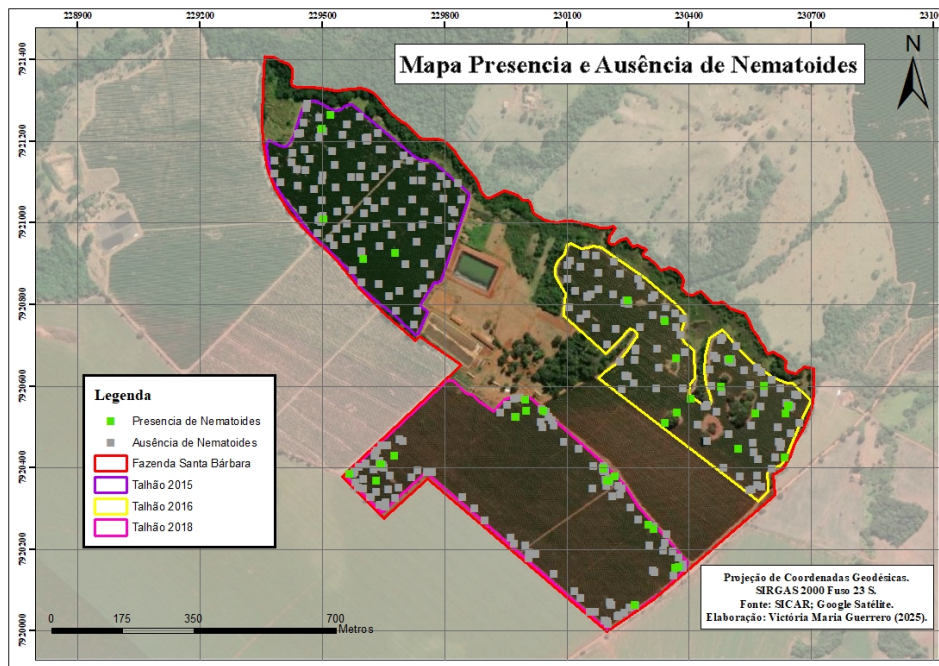


Figura 4 – Distribuição espacial dos pontos amostrais com presença e ausência de nematoides entomopatogênicos (NEPs) nos talhões 2015, 2016 e 2018 da Fazenda Santa Bárbara, Monte Carmelo, MG, no período de outubro de 2024 a abril de 2025. Pontos em destaque indicam amostras com detecção positiva de NEPs.

## 4.1 Caracterização das variáveis edáficas

Antes da modelagem, analisaram-se os níveis médios de umidade e de atividade enzimática nos talhões, visando compreender o contexto físico e biológico do solo.

**Atividade enzimática.** Os valores médios de  $\beta$ -GLU variaram entre 40,42 e 63,34  $\mu\text{mol pNP g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ , enquanto a ARS apresentou variação de 25,32 a 137,71  $\mu\text{mol pNP g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ . Os maiores níveis de ambas as enzimas foram observados em áreas onde o cultivo regenerativo se encontrava mais consolidado, sugerindo que a maior diversidade de plantas de cobertura, o aporte de matéria orgânica e o sombreamento favoreceram a atividade microbiana e, consequentemente, o incremento da atividade enzimática.

**Umidade do solo.** No presente estudo, o CGA variou de 0,27 a 0,28  $\text{kg kg}^{-1}$ , enquanto o CVA oscilou entre 0,35 e 0,37  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  nos diferentes talhões avaliados. Esses valores refletem níveis de umidade adequados às condições do Cerrado Mineiro, sobretudo em áreas sob cultivo regenerativo, onde a presença de cobertura vegetal e o aporte de matéria orgânica favorecem a retenção hídrica.

Essas observações iniciais corroboram a hipótese de que solos com maior equilíbrio

hídrico e biológico tendem a sustentar comunidades microbianas mais ativas, criando condições favoráveis à sobrevivência e dispersão dos JIs de NEPs. Assim, a interação entre umidade, atividade enzimática e estrutura física do solo fornece uma base interpretativa importante para os resultados modelados a seguir.

## 4.2 Indicadores biológicos integrados de qualidade do solo

Para complementar a avaliação das atividades enzimáticas, aplicou-se o modelo de quatro quadrantes proposto por Chaer et al. (2023) para integrar o conteúdo de carbono orgânico do solo (COS) e a atividade enzimática específica média (AEM). O modelo permite distinguir tendências de funcionamento biológico e de acúmulo ou perda de matéria orgânica, classificando cada amostra em quatro estados funcionais: solo saudável (quadrante verde escuro), solo adoecendo (quadrante amarelo), solo doente (quadrante vermelho) e solo em recuperação (quadrante verde claro).

A [Figura 5](#) apresenta a distribuição das amostras dos talhões 2015, 2016 e 2018 no diagrama COS  $\times$  AEM. Observa-se que as amostras de 2016 se posicionam no quadrante de solo saudável, caracterizado por altos valores de COS e elevada atividade biológica — indicando ambiente edáfico funcionalmente equilibrado e com tendência de estabilidade no estoque de matéria orgânica. Em contraste, as amostras de 2015 e 2018 se situam no quadrante solo adoecendo, no qual existe maior armazenamento de matéria orgânica, mas baixa atividade enzimática, sugerindo tendência de perda futura de carbono caso o sistema de manejo não seja ajustado. A [Tabela 2](#) sintetiza a classificação de cada talhão segundo os quatro atributos avaliados: ciclagem de nutrientes (via enzimas), armazenamento de nutrientes (via matéria orgânica), saúde do solo e tendência da matéria orgânica.

Tabela 2 – Indicadores integrados de qualidade do solo com base no modelo de quatro quadrantes ([CHAER et al., 2023](#)).

Talhão	Ciclagem de nutrientes (enzimas)	Armaz. de nutrientes (MO)	Saúde do solo	Tendência da MO
2015	Baixa	Alta	Adoecendo	Perda
2016	Alta	Alta	Saudável	Estável (alta)
2018	Baixa	Alta	Adoecendo	Perda

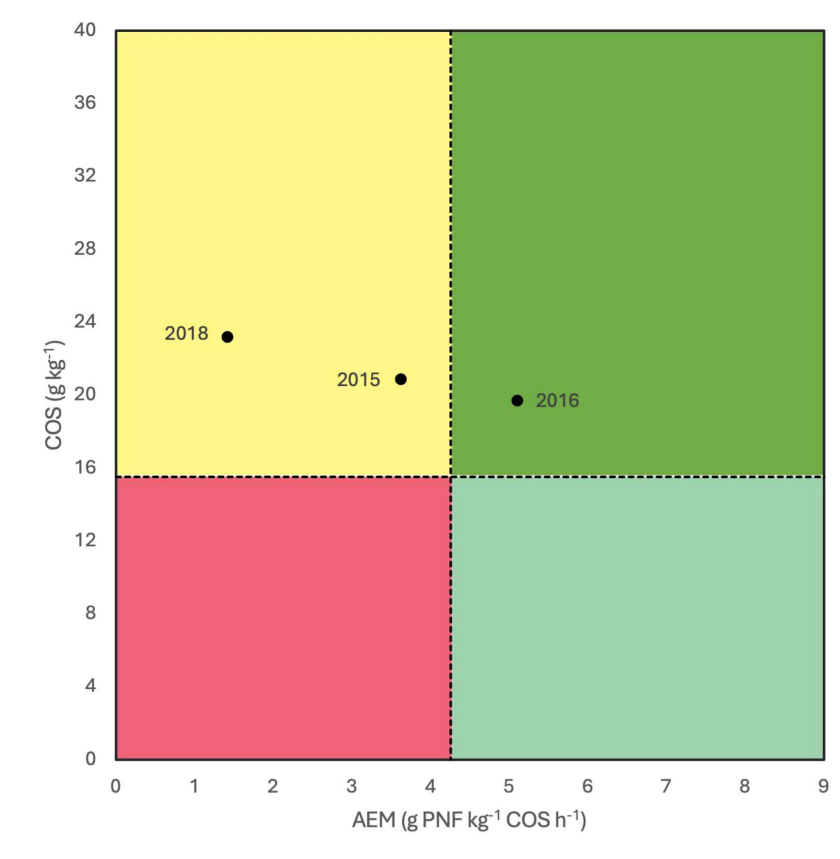


Figura 5 – Amostras plotadas em modelo de quatro quadrantes que demonstram tendências da matéria orgânica do solo. Quadrante verde escuro: solo saudável (alta qualidade do solo, alta atividade biológica, alto teor de matéria orgânica); quadrante amarelo: solo adoecendo (solo perdendo qualidade, baixa atividade biológica, tendência de perda de matéria orgânica); quadrante vermelho: solo doente (baixa qualidade do solo, baixa atividade biológica, baixo teor de matéria orgânica); quadrante verde claro: solo se recuperando (solo ganhando qualidade, alta atividade biológica, tendência de acúmulo de matéria orgânica). COS: carbono orgânico do solo, AEM: atividade enzimática específica média.

### 4.3 Modelagem estatística

A estratégia de modelagem foi ajustar dois modelos logísticos com família binomial:

- (i) **Modelo A (dentro do talhão):**  $NEMATOIDE \sim \text{scale}(\text{COMPACTACAO}) + \text{TALHAO}$ .
- (ii) **Modelo B (entre talhões):**  $NEMATOIDE \sim \text{scale}(\text{CVA}) + \text{scale}(\text{LOG\_BG}) + \text{scale}(\text{COMPACTACAO})$ .

Relembre que as estimativas são apresentadas como OR por 1 desvio-padrão para covariáveis contínuas, com intervalos de 95% de confiança e valores- $p$ .

## 4.4 Associação entre atributos do solo e ocorrência de NEPs

**Dentro dos talhões (Modelo A):** A compactação do solo não apresentou associação estatisticamente significativa com a presença de nematoides. Em contraste, os talhões 2016 e 2018 exibiram maior chance relativa de ocorrência quando comparados a 2015 (referência). O talhão 2015 foi definido como categoria de referência por representar a área mais antiga sob manejo regenerativo e, portanto, servir como base histórica de comparação em relação aos demais talhões, implantados posteriormente sob condições de manejo já aprimoradas. As estimativas completas encontram-se na [Tabela 3](#).

Tabela 3 – Modelo A (dentro do talhão): associação entre compactação (no ponto) e presença de nematoides, ajustado por TALHAO.

Termo	OR	IC95%	p
<i>Compactação (1 DP)</i>	0,91	[0,70; 1,18]	0,494
<i>TALHAO</i>			
2016 vs. 2015	2,52	[1,29; 5,14]	0,009
2018 vs. 2015	2,27	[1,15; 4,64]	0,020

**Nota:** OR para variáveis contínuas interpretado por 1 desvio-padrão (dados padronizados com `scale`). Categoria de referência de TALHAO: 2015.

**Entre talhões (Modelo B):** Ao analisar covariáveis agregadas ao nível do talhão — isto é, variáveis que não variam entre pontos dentro de um mesmo talhão, embora possam variar entre talhões —, a umidade (CVA) mostrou associação positiva e significativa com a presença de nematoides, enquanto  $\beta$ -glucosidase (em escala log) e compactação não apresentaram evidência de associação. Ver a [Tabela 4](#).

Tabela 4 – Modelo B (entre talhões): associação entre umidade (CVA),  $\beta$ -glicosidase (log) e compactação com a presença de nematoides.

Termo	OR	IC95%	p
<i>CVA (1 DP)</i>	1,63	[1,15; 2,35]	0,007
$\log(1 + \beta\text{-glicosidase})$ (1 DP)	1,17	[0,86; 1,59]	0,316
<i>Compactação (1 DP)</i>	0,91	[0,70; 1,18]	0,494

**Nota:** Variáveis contínuas padronizadas (OR por 1 DP). TALHAO é omitido para evitar colinearidade com variáveis constantes por talhão.

### 4.4.1 Qualidade do ajuste e desempenho preditivo

A bondade de ajuste, a discriminação e a calibração foram avaliadas por HL, AUC ROC e score de Brier, além de métricas de calibração (intercepto, inclinação, erro médio e

máximo). A [Tabela 5](#) sintetiza os indicadores para ambos os modelos. Em termos práticos: as probabilidades previstas estão bem calibradas, embora a separação entre classes seja modesta.

Tabela 5 – Qualidade de ajuste, discriminação e calibração dos modelos.

	HL	$p_{\text{HL}}$	AUC	Brier	$\beta_0$	Slope
A	3,66 (8)	0,887	0,605	0,138	$\approx 0$	$\approx 1$
B	3,66 (8)	0,887	0,605	0,138	$\approx 0$	$\approx 1$
Erro médio ( $E_{\text{avg}}$ ) $\approx 0,009$ ; Erro máximo ( $E_{\text{max}}$ ) $\approx 0,028$ .						

**Nota:** HL: teste de Hosmer–Lemeshow. AUC: área sob a curva ROC. Brier: erro quadrático médio das probabilidades previstas.

Observa-se que as métricas globais de ajuste apresentadas na [Tabela 5](#) foram idênticas entre os Modelos A e B. Esse resultado decorre do fato de que as variáveis de nível de talhão (CVA e  $\beta$ -GLU) são constantes dentro de cada área e, portanto, colineares com as dummies de TALHAO. Assim, os dois modelos produzem probabilidades previstas praticamente idênticas, refletindo a mesma estrutura de risco sob diferentes parametrizações. Em termos práticos, os dois modelos chegam às mesmas probabilidades de ocorrência. A diferença está apenas em como essas diferenças entre áreas são representadas: no Modelo A, elas aparecem diretamente pelas categorias do fator TALHAO (2015, 2016, 2018), enquanto no Modelo B, elas são capturadas indiretamente por variáveis que só variam entre talhões (como a umidade média do solo e a  $\beta$ -glucosidase).

## 4.5 Diagnósticos essenciais

Os resíduos de desvio não mostraram padrões sistemáticos em função das probabilidades ajustadas. As distâncias de Cook indicaram poucos pontos com influência acima do limiar heurístico ( $4/n$ ), sem dominar o ajuste. A suposição de linearidade no logito foi considerada adequada; uma checagem suavizada (GAM) sugeriu apenas *senal fraco* de curvatura para COMPACTACAO dentro do talhão. Não houve indícios de colinearidade preocupante nem de superdispersão.

## 4.6 Implicações práticas

**Compactação (ponto, dentro do talhão):** Não encontramos evidência de associação com a presença de nematoides. Implicação: *na escala avaliada*, variações locais de compactação não explicam a ocorrência; priorizar outras frentes de manejo pode ser mais efetivo.

**Umidade (CVA, nível do talhão):** Associação positiva com a presença de nematoides no contraste *entre* talhões. Implicação: talhões mais úmidos demandam vigilância e manejo direcionado (amostragem mais densa, ajustes de irrigação/drenagem), reconhecendo que a umidade pode estar correlacionada a outras condições edáficas e de manejo.

**Atividades enzimáticas:** A  $\beta$ -glucosidase (log) não apresentou efeito detectável no nível analisado. Implicação: como são apenas três talhões, entende-se esse resultado como *descritivo*; medições adicionais (outros talhões, outras enzimas/níveis de profundidade) podem refinar o quadro.

**Síntese ecológica:** Solos com maior equilíbrio hídrico e estrutural oferecem condições propícias à dispersão e à sobrevivência dos JIs, ampliando a eficácia dos NEPs no manejo integrado de pragas do cafeeiro. A interação entre umidade, atividade enzimática e compactação contribui para uma compreensão mais abrangente da qualidade física e biológica do solo em diferentes contextos de manejo.

**Resposta à pergunta orientadora:** Sim, há evidência de associação entre a umidade (CVA) e a presença de nematoides *entre* talhões; não há evidência de associação entre compactação (no ponto) e presença de nematoides *dentro* dos talhões, e as atividades enzimáticas avaliadas não mostraram efeito significativo no nível considerado.





## 5 Conclusão

Este estudo apresentou um levantamento da ocorrência de NEPs em um sistema de cafeicultura regenerativa no Cerrado Mineiro, avaliando sua relação com atributos físicos e biológicos do solo em três talhões comerciais. A partir de um conjunto de 432 amostras distribuídas espacialmente, foi possível integrar informações edáficas, microbiológicas e estatísticas para compreender como a compactação, a umidade e a atividade enzimática se associam à presença desses organismos no ambiente.

Os resultados indicaram que a compactação do solo, medida no nível do ponto, não apresentou associação estatisticamente significativa com a ocorrência de NEPs dentro dos talhões. Esse achado sugere que, nas condições avaliadas, a variabilidade local da estrutura física do solo não foi determinante para explicar a presença dos juvenis infectantes.

Em contraste, a umidade do solo (CVA), medida como variável agregada ao nível do talhão, mostrou associação positiva e consistente com a presença de NEPs. Talhões mais úmidos apresentaram maior probabilidade de detecção, reforçando o papel central da disponibilidade hídrica na mobilidade, sobrevivência e infectividade desses organismos. Já a  $\beta$ -glucosidase não demonstrou efeito significativo no contexto estudado, possivelmente devido ao número reduzido de talhões, ao caráter agregado das medições e à limitada variabilidade entre áreas.

Os modelos logísticos apresentaram boa calibração e discriminação moderada, indicando que, apesar da baixa prevalência de NEPs e das limitações amostrais, a estrutura de risco estimada foi consistente. A congruência entre os Modelos A e B confirmou que as diferenças entre talhões — refletidas tanto no fator TALHÃO quanto nas variáveis constantes por talhão — constituem a principal fonte de variação na ocorrência detectada.

Em síntese, este estudo evidencia que o manejo hídrico e a heterogeneidade edáfica entre talhões desempenham papel importante na ecologia dos NEPs em cafeeiros sob cultivo regenerativo. A integração desses organismos ao manejo integrado de pragas depende do entendimento de suas exigências ambientais, especialmente da umidade e da estabilidade físico-biológica do solo.

Do ponto de vista aplicado, os resultados apontam que zonas mais úmidas da lavoura

devem ser priorizadas para monitoramento, amostragem e estratégias de biocontrole, uma vez que apresentam maior propensão à ocorrência de NEPs. Além disso, a adoção de práticas regenerativas que favoreçam o equilíbrio hídrico e a qualidade estrutural do solo tende a ampliar as condições favoráveis à persistência desses inimigos naturais.

Por fim, este trabalho estabelece uma linha de base para o estudo de NEPs na cafeicultura regenerativa do Cerrado Mineiro e destaca a necessidade de investigações complementares, envolvendo maior número de talhões, identificação taxonômica dos isolados, caracterização molecular e abordagens estatísticas hierárquicas ou espaciais. Tais avanços permitirão compreender com maior precisão os determinantes ecológicos da ocorrência desses organismos, contribuindo para o desenho de estratégias de manejo mais sustentáveis e alinhadas ao potencial do controle biológico no sistema cafeeiro.

## Referências

- AGRESTI, A. *Foundations of Linear and Generalized Linear Models*. Hoboken: Wiley, 2015. ISBN 978-1118730034. Citado na página 37.
- ALMENARA, D. P. et al. Nematoides entomopatogênicos: as duas faces de uma simbiose. *Revista da Biologia*, v. 6, n. 2, p. 1–6, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 28.
- ALVES, V. S. et al. Testes em condições para o controle de *Dysmicoccus texensis* (tinsley) (hemiptera, pseudococcidae) em cafeeiro com nematóides entomopatogênicos do gênero *Heterorhabditis* (rhabditida, heterorhabditidae). *Revista Brasileira de Entomologia*, v. 53, n. 1, p. 139–143, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0085-56262009000100029>>. Citado na página 28.
- ANDALÓ, V. et al. Substrates for storing entomopathogenic nematodes (rhabditida: Steinernematidae, heterorhabditidae). *Scientia Agricola*, v. 67, n. 3, p. 342–347, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000300013>>. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 35.
- ARAÚJO, M. d. R. P.; SILVA, P. L. d.; ROCHA, A. P. S. d. Cafeicultura: evolução do café no brasil, minas gerais e no município de joão pinheiro – mg. *Revista Contemporânea*, v. 3, n. 11, p. 21683–21706, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.56083/RCV3N11-091>>. Citado na página 23.
- ASKARY, T. H.; ABD-ELGAWAD, M. M. M. Opportunities and challenges of entomopathogenic nematodes as biocontrol agents in their tripartite interactions. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, v. 31, p. 42, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s41938-021-00391-9>>. Citado na página 24.
- BASTOS, T. R. S. et al. Response of soil microbial biomass and enzyme activity in coffee-based agroforestry systems in a high-altitude tropical climate region of brazil. *Catena*, v. 230, p. 107270, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107270>>. Citado na página 35.
- BLANCO-PÉREZ, R.; STEVENS, G.; CAMPOS-HERRERA, R. *Population Biology of Entomopathogenic Nematodes: An Ecological and Agronomical Model*. 2024. Acesso em: 15 set. 2025. Disponível em: <<https://www.cabidigitallibrary.org/doi/abs/10.1079/9781800620322.0007>>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 36.
- BOLKER, B. M. et al. Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 24, n. 3, p. 127–135, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.10.008>>. Citado na página 37.
- BRIDA, A. L. d. *Levantamento de nematoides entomopatogênicos em áreas agrícolas e influência da temperatura e do substrato na sobrevivência, multiplicação e armazenamento*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2015. Citado 4 vezes nas páginas 28, 29, 34 e 35.
- BRIER, G. W. Verification of forecasts expressed in terms of probability. *Monthly Weather Review*, v. 78, n. 1, p. 1–3, 1950. Citado na página 38.

- CARDONA, W. A. et al. *Diversification, age, and organic amendments affect microbial and enzymatic activities in soils of Arabica coffee plantations in the tropical lowlands of Colombia*. 2025. Acesso em: 15 set. 2025. Disponível em: <<https://pure.rug.nl/ws/portalfiles/portal/1329957371/1-s2.0-S2352009425000513-main.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 35.
- CARDUCCI, C. E. et al. Soil health under arabica coffee plantations in the cerrado biome. In: MENDES, I. C.; CHERUBIN, M. R. (Ed.). *Soil Health and Sustainable Agriculture in Brazil*. Madison, WI and Hoboken, NJ: ASA, CSSA, SSSA and John Wiley & Sons, Inc., 2024. p. 179–207. Citado 3 vezes nas páginas 27, 29 e 30.
- CHAER, G. M. et al. Evaluating c trends in clayey cerrado oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and  $\beta$ -glucosidase activities. *Applied Soil Ecology*, Elsevier BV, v. 183, p. 104742, 2023. ISSN 0929-1393. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104742>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 41.
- CONAB. *Acompanhamento da safra brasileira de café: safra 2023*. Brasília: CONAB, 2023. Citado na página 23.
- CURYŁO, K.; TELESÍŃSKI, A. Use of phosphatase and dehydrogenase activities in the assessment of calcium peroxide and citric acid effects in soil contaminated with petrol. *Open Life Sciences*, v. 15, p. 12–20, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1515/biol-2020-0002>>. Citado 3 vezes nas páginas 30, 35 e 36.
- DIAS, S. d. C. et al. Compatibility of entomopathogenic nematodes with chemical insecticides for the control of *Drosophila suzukii* (diptera: Drosophilidae). *Plants*, v. 13, n. 5, p. 632, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/plants13050632>>. Citado na página 24.
- DICK, R. P.; BREAKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Ed.). *Methods for Assessing Soil Quality*. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 247–271. Disponível em: <<https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c15>>. Citado na página 25.
- DINIZ, C. V. C.; NETO, F. L. M.; VIVIANI, M. J. *Manual do Café Orgânico*. 2019. Acesso em: 18 ago. 2025. Disponível em: <[https://admin.imaflora.org/public/media/biblioteca/Manual\\_do\\_cafe\\_Organico-2019.pdf](https://admin.imaflora.org/public/media/biblioteca/Manual_do_cafe_Organico-2019.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 27.
- EMBRAPA. *Cultivo Orgânico do Café*. Brasília: Embrapa Café, 2002. Acesso em: 18 ago. 2025. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/622689/cultivo-organico-do-cafe-recomendacoes-tecnicas>>. Citado 5 vezes nas páginas 23, 25, 27, 29 e 30.
- EMBRAPA. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2002. Citado na página 25.
- EMBRAPA. *Cultivo Orgânico do Café*. Brasília: Embrapa Café, 2004. Acesso em: 18 ago. 2025. Disponível em: <[https://ciorganicos.com.br/wp-content/uploads/2017/10/Cafe%CC%81-orga%CC%82nico-Embrapa-SDP02\\_04.pdf](https://ciorganicos.com.br/wp-content/uploads/2017/10/Cafe%CC%81-orga%CC%82nico-Embrapa-SDP02_04.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 27.

- EMBRAPA. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 2017. Acesso em: 15 set. 2025. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1085209/1/ManualdeMetodosdeAnalisedeSolo2017.pdf>>. Citado na página 36.
- EMBRAPA. *Sistemas de Produção: boas práticas agrícolas aplicadas à lavoura cafeeira para o estado de Minas Gerais*. [S.l.], 2022. Acesso em: 23 ago. 2025. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1148365/1/Sistemas-de-Producao-1-Cafe.pdf>>. Citado na página 23.
- FATIMAH, N.; ASKARY, T. H.; ABD-ELGAWAD, M. M. M. *Factors influencing the performance of entomopathogenic nematodes: from laboratory to field conditions*. 2025. Acesso em: 15 set. 2025. Disponível em: <<https://ejbpc.springeropen.com/counter/pdf/10.1186/s41938-025-00864-1.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 36.
- FAWCETT, T. An introduction to roc analysis. *Pattern Recognition Letters*, v. 27, n. 8, p. 861–874, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>>. Citado na página 38.
- FOX, J.; WEISBERG, S. *An R Companion to Applied Regression*. 3. ed. Thousand Oaks: Sage, 2019. ISBN 978-1544336473. Citado na página 38.
- GELMAN, A. Scaling regression inputs by dividing by two standard deviations. *Statistics in Medicine*, v. 27, n. 15, p. 2865–2873, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/sim.3107>>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.
- HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. *Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions*. 2005. Acesso em: 13 set. 2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198704001849?via%3Dihub>>. Citado na página 30.
- HARRELL, F. E. *Regression Modeling Strategies: With applications to linear models, logistic and ordinal regression, and survival analysis*. 2. ed. Cham: Springer, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-3-319-19425-7>>. Citado na página 38.
- HOSMER, D. W.; LEMESHOW, S.; STURDIVANT, R. X. *Applied Logistic Regression*. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2013. ISBN 978-0470582473. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.
- KAYA, H. K.; GAUGLER, R. Entomopathogenic nematodes. *Annual Review of Entomology*, v. 38, p. 181–206, 1993. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev.en.38.010193.001145>>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 36.
- KHUMALO, N. N.; LEPHOTO, T. E.; GRAY, V. M. The effect of organic compost and soil texture on the survival and infectivity of entomopathogenic nematode species. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, v. 54, n. 17-18, p. 1443–1455, 2021. Citado na página 24.
- KOPPENHÖFER, A. M.; SHAPIRO-ILAN, D. I.; HILTPOLD, I. Entomopathogenic nematodes in sustainable food production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 4, p. 125, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00125>>. Citado na página 24.
- KOUTOULEAS, A. et al. Shaded-coffee: A nature-based strategy for coffee production under climate change? a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 6, p. 877476, 2022. Citado na página 24.

KUTOS, S. et al. Farm management and shade tree species influence coffee soil microbiomes in central and south america. *Applied Soil Ecology*, v. 202, p. 105571, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105571>>. Citado na página 29.

LACEY, L. A.; GEORGIS, R. Entomopathogenic nematodes for control of insect pests above and below ground with comments on commercial production. *Journal of Nematology*, v. 44, n. 2, p. 218–225, 2012. Citado 7 vezes nas páginas 24, 25, 28, 29, 30, 34 e 35.

LAURENTINO, E.; COSTA, J. N. M. *Descrição e caracterização biológica da broca-do-café (Hypothenemus hampei Ferrari, 1867) no Estado de Rondônia*. Porto Velho, 2004. 21 p. Acesso em: 23 ago. 2025. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/916028/1/doc90brocadocafe.pdf>>. Citado na página 24.

MATUSKA-ŁYŻWA, J. et al. Impact of abiotic and biotic environmental conditions on the development and infectivity of entomopathogenic nematodes in agricultural soils. *Insects*, v. 15, n. 6, p. 421, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/insects15060421>>. Citado na página 29.

MCCULLAGH, P.; NELDER, J. A. *Generalized Linear Models*. 2. ed. London: Chapman & Hall/CRC, 1989. ISBN 978-0412317606. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-1-4899-3242-6>>. Citado na página 37.

MENDONÇA, T. F. N. d. *Controle de bicho-mineiro com nematoides entomopatogênicos e uso de imagens para detecção de minas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 28.

Minas Gerais. *Mapa climático de Minas Gerais baseado na classificação de Köppen-Geiger*. Belo Horizonte, MG: [s.n.], 2020. Mapa climático do estado de Minas Gerais. Disponível em: <<https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br>>. Citado na página 31.

NANNIPIERI, P.; TRASAR-CEPEDA, C.; DICK, R. P. Soil enzyme activity: a brief history and biochemistry as a basis for appropriate interpretations and meta-analysis. *Biology and Fertility of Soils*, v. 54, n. 1, p. 11–19, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00374-017-1245-6>>. Citado na página 30.

O'BRIEN, R. M. A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Quality & Quantity*, v. 41, p. 673–690, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11135-006-9018-6>>. Citado na página 38.

OLIVEIRA, A. C. d. *Nematoides e fungos entomopatogênicos no controle de Dalbulus maidis (DeLong & Wolcott) e seletividade de produtos fitossanitários registrados para a cultura do milho*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2024. Citado 3 vezes nas páginas 24, 28 e 35.

PERIER, J. D. et al. Persistence of the entomopathogenic nematode *Steinernema feltiae* in a novel capsule formulation. *Biological Control*, v. 200, p. 105684, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105684>>. Citado na página 24.

PŮZA, V.; TARASCO, E. Interactions between entomopathogenic fungi and entomopathogenic nematodes. *Microorganisms*, v. 11, n. 1, p. 163, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/microorganisms11010163>>. Citado na página 28.



- R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria, 2025. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Citado na página 38.
- RAMAKUWELA, T. et al. Entomopathogenic nematodes: Commercial use and future perspectives. *Journal of Invertebrate Pathology*, v. 212, p. 108388, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jip.2025.108388>>. Citado na página 24.
- ROBIN, X. et al. proc: an open-source package for r and s+ to analyze and compare roc curves. *BMC Bioinformatics*, v. 12, p. 77, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/1471-2105-12-77>>. Citado na página 38.
- SAIKAI, K. K. et al. Biocontrol-based strategies for improving soil health and managing plant-parasitic nematodes in coffee production. *Frontiers in Plant Science*, v. 14, p. 1196171, 2023. Citado na página 24.
- SANTANA, D. B. et al. Spatiotemporal dynamics of soil and soil organic carbon losses due to water erosion in a coffee-producing area in brazil. *Sustainability*, v. 17, n. 3, p. 821, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su17030821>>. Citado na página 29.
- SOGLIO, D.; KUBO, R. R. *Desenvolvimento, agricultura e sustentabilidade*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2016. 251 p. Citado na página 29.
- SOUSA, T. R. d. et al. Dynamics of carbon and soil enzyme activities under arabica coffee intercropped with *Brachiaria decumbens* in the brazilian cerrado. *Plants*, v. 13, n. 6, p. 835, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/plants13060835>>. Citado 3 vezes nas páginas 27, 29 e 35.
- STEYERBERG, E. W. *Clinical Prediction Models: A practical approach to development, validation, and updating*. 2. ed. Cham: Springer, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-3-030-16399-0>>. Citado na página 38.
- TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W. et al. (Ed.). *Methods of Soil Analysis: Microbiological and Biochemical Properties*. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 775–833. Disponível em: <<https://doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c37>>. Citado na página 25.
- TARASCO, E. et al. Entomopathogenic nematodes and their symbiotic bacteria: from genes to field uses. *Frontiers in Insect Science*, v. 3, p. 1195254, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/finsc.2023.1195254>>. Citado na página 24.
- UGARTE, C.; ZABORSKI, E. *Nematoides do solo em sistemas de agricultura orgânica*. 2009. Acesso em: 23 ago. 2025. Disponível em: <<https://eorganic.org/node/4495>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 28.
- VINISQUI, A. M.; ALMEIDA, R. H. C.; JÚNIOR, E. F. F. Variabilidade pluviométrica (2002–2017) de monte carmelo, minas gerais. In: *Anais do Simpósio de Ciências Agrárias e Ambientais – SICAA 2018*. Monte Carmelo, MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2018. Disponível em: <<https://doity.com.br/anais/sicaa/trabalho/67332>>. Citado na página 31.