



**Universidade de Brasília**  
**Instituto de Ciências Biológicas**  
**Departamento de Fitopatologia**  
**Programa de Pós-Graduação em Fitopatologia**

**IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO ECOLÓGICA EM  
LARGA ESCALA DE FITONEMATOIDES EM CAMPOS DE  
CULTIVO DE MILHO NO ESTADO DE GOIÁS**

**RICARDO GOMES TOMÁZ**

Brasília – DF

2023

**RICARDO GOMES TOMÁZ**

**IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO ECOLÓGICA EM  
LARGA ESCALA DE FITONEMATOIDES EM CAMPOS DE  
CULTIVO DE MILHO NO ESTADO DE GOIÁS**

Dissertação apresentada à Universidade de  
Brasília como requisito para obtenção do título  
de Mestre em Fitopatologia pelo Programa de  
Pós-Graduação em Fitopatologia

**Orientadora:**

Thaís Ribeiro Santiago

Brasília

Distrito Federal – Brasil

2023

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

Tomáz, Ricardo Gomes.

Identificação e caracterização ecológica em larga escala de fitonematoides em campos de cultivo de milho no estado de Goiás / Ricardo Gomes Tomáz.

Brasília, 2023.

74p.

Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Fitopatologia.  
Universidade de Brasília.

1. - Identificação

I. Universidade de Brasília. PPG/FIT.

II. Identificação e caracterização ecológica de fitonematoides na cultura do milho.

Aos meus pais, Valdirene e Ronaldo, por todo amor,  
dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus pela fidelidade, pois até aqui me ajudou o Senhor.

Aos meus pais e irmã pelos ensinamentos, apoio, carinho e compreensão em momentos de ausência. A Laís, por toda ajuda, direta e indireta, motivação e por sempre estar ao meu lado.

Aos meus amigos e companheiros de laboratório pelos momentos e risadas, os quais sempre lembrarei. Em especial a Leila, Thalisson, Camila, Thaís, Gustavo, Francisco, Lucas, Jaine, Lincon, Jefferson, Reneida, Jousy, Bianca e Alex pelo companheirismo e auxílio em diversas etapas da realização do meu trabalho.

À Prof. Thaís Ribeiro Santiago, pela orientação, paciência, amizade e ensinamentos profissionais e pessoais que guardarei por toda minha vida.

Aos professores do Departamento de Fitopatologia da UnB que contribuíram para minha formação. À Universidade de Brasília pela oportunidade.

À banca examinadora, Prof. Andressa Cristina Zamboni Machado, Prof. Cleber Furlanetto e Prof. Juvenil Enrique Cares, por aceitarem este convite.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelos recursos concedidos e pela bolsa de mestrado.

A todos os demais envolvidos que contribuíram para este momento.

Trabalho realizado no Departamento de Fitopatologia do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília, sob orientação da Profa. Thaís Ribeiro Santiago, com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

**IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO ECOLÓGICA EM LARGA ESCALA DE  
FITONEMATOIDES EM CAMPOS DE MILHO NO ESTADO DE GOIÁS**

**RICARDO GOMES TOMÁZ**

DISSERTAÇÃO APROVADA em 27/02/2023 por:

---

Dra. Andressa Cristina Zamboni Machado  
Agronema (Examinador Externo)

---

Prof. Cleber Furlanetto  
Universidade de Brasília (Examinador Interno)

---

Profa. Thaís Ribeiro Santiago  
Universidade de Brasília (Orientadora – Presidente)

Brasília - Distrito Federal  
Brasil  
2023

## SUMÁRIO

ABSTRACT.....	ix
RESUMO.....	x
INTRODUÇÃO.....	16
MATERIAL E MÉTODOS.....	18
Amostragem de solo e raiz.....	19
Extração de nematoides.....	20
Identificação e quantificação dos nematoides.....	21
Propriedades do solo.....	21
Heterogeneidade espacial.....	22
Caracterização da heterogeneidade nos diferentes tratos culturais e tipos de solo.....	23
Probabilidade de ocorrência dos nematoides na cultura do milho.....	24
Probabilidade de limiar de dano dos nematoides infectam a cultura do milho.....	25
RESULTADOS.....	26
DISCUSSÃO.....	36
CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS.....	43
TABELAS E FIGURAS.....	52
SUPLEMENTAR.....	67

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** Categorias de risco de dano para os três grupos morfológicos com potencial dano na cultura do milho a partir das diferentes faixas de abundância média em 100 cm<sup>3</sup> de solo.....52
- Tabela 2** Frequência de grupos morfológicos (gêneros e famílias) de fitonematoides detectados em 354 campos de cultivo amostrados em 26 municípios no estado de Goiás.....52
- Tabela 3** Frequência dos grupos morfológicos identificados no estudo para os três tipos de solos no estado de Goiás.....53
- Tabela 4** Incidência e frequência dos grupos morfológicos que não estiveram presentes em todos os tipos de plantio (direto, mínimo e convencional) e sequências de cultivo (SM e SMO) implementados em campos amostrados no estado de Goiás.....54
- Tabela 5** Heterogeneidade média de incidência na escala logito  $\beta$  e original  $p$ , variância ( $\sigma^2_R$  and  $\sigma^2_M$ ), erro padrão (EP) e p-valor dos efeitos dos grupos aleatórios de mesorregiões e municípios dentro de mesorregiões a partir do Modelo Linear Misto Generalizado (MLMG).....55
- Tabela 6** Variância da heterogeneidade da abundância, erro padrão (EP) e p-valor dos grupos de efeito aleatório de mesorregiões ( $\sigma^2_s$ ), campos dentro de municípios dentro de mesorregiões ( $\sigma^2_c$ ) e municípios dentro de mesorregiões ( $\sigma^2_o$ ), a partir de Modelos Linear Mistos Generalizados (MLMG) de campos de milho do estado de Goiás entre os anos de 2021 e 2022.....55
- Tabela 7** Valores de probabilidade (nível de significância) para Wald  $X^2$  e Teste de Razão de Verossimilhança (TRV), a partir da chance ajustada por modelos regressão logístico binário (MLG) de variáveis exploratórias dos grupos morfológicos mais expressivos em milho no estado de Goiás.....56

<b>Tabela 8</b> Valor de probabilidade (nível de significância) para os testes Wald $X^2$ e Teste de Razão de Verossimilhança (TRV), a partir da chance ajustada por modelo de regressão logística ordinária das variáveis exploratórias aos fitonematoides com maior expressão populacional em milho entre os anos de 2021 e 2022.....	56
<b>Tabela 9</b> Razão de chances para variáveis categóricas (tipo de solo, tipos de plantio e sequências de cultivo), inclinação da regressão para variáveis contínuas (pH, EC, altitude, silte e argila), a partir da regressão logística ordinária proporcional para a associação entre variáveis exploratórias e a abundância dos nematoides mais expressivos.....	57
<b>Tabela S1</b> Abundância, densidade média e máxima abundância de nematoides/100 cm <sup>3</sup> e 1 g de raiz dos grupos identificados no estado de Goiás em campos de cultivo na cultura do milho.....	67
<b>Tabela S2</b> Incidência de nematoides em quatro mesorregiões amostradas do estado de Goiás.....	68
<b>Tabela S3</b> Densidade média de nematoides/100 cm <sup>3</sup> e 1 g de raiz em quatro mesorregiões amostradas no estado de Goiás.....	69

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** Ponto georreferenciado em campos comerciais de milho de 26 municípios amostrados entre os anos de 2021 e 2022 no estado de Goiás.....58
- Figura 2** Distribuição georreferenciada de A) amostras sob os tipos de plantio convencional, direto e mínimo, e sob B) regiões de solo do tipo Argissolo, Cambissolo, Chernossolo, Gleissolo, Latossolo e Neossolo no estado de Goiás na cultura do milho.....59
- Figura 3** Distribuição georreferenciada da incidência (pontos) e densidade média dos principais grupos morfológicos encontrados em municípios do estado de Goiás. A diferença no tamanho dos círculos representa o aumento de densidade média.....60
- Figura 4** Densidade média dos principais grupos morfológicos de fitonematoides detectados em quatro mesorregiões do estado de Goiás em campos de milho.....61
- Figura 5** Densidade média dos gêneros com maior expressão para as faixas entre 280 e a acima de 1000 m de altitude para as 354 amostras coletadas em municípios do estado de Goiás.....61
- Figura 6** Densidade média dos grupos morfológicos expressivos em solos do tipo Argissolo, Cambissolo e Latossolo no estado de Goiás.....62
- Figura 7** Frequência dos grupos morfológicos com maior expressão a nível populacional para (A) sequência de cultivo SM em 302 amostras e SMO em 52 amostras e B) sistemas de plantio convencional, mínimo e direto em 23, 201 e 108 amostras.....62
- Figura 8** Densidade média dos grupos morfológicos identificados em campos com sequências de cultivo milho-soja em 302 amostras e milho-soja-outras culturas em 52

amostras, onde outras culturas representa pastagem, sorgo, tomate e/ou feijão.....63

**Figura 9** Densidade média dos grupos morfológicos identificados no estado de Goiás para os sistemas de plantio convencional, mínimo e direto em campos de milho.....63

**Figura 10** Distribuição da variância média (pontos) para o efeito aleatórios dos grupos A) solo e B) municípios dentro de regiões de solo, a partir dos modelos MLMG ajustado para os grupos mais expressivos em campos de milho amostrados entre os anos de 2021 e 2022, e o intervalo de confiança de 95% (errobar).....64

**Figura 11** Distribuição da variância média (pontos) para o efeito aleatórios dos grupos A) campos dentro de municípios dentro de regiões de solos, B) regiões de solo e C) municípios dentro de regiões de solo, a partir dos modelos MLMG ajustado para os grupos mais expressivos em campos de milho amostrados entre os anos de 2021 e 2022, e o intervalo de confiança de 95% (errobar).....65

**Figura 12** Quantidade de amostras sob as categorias de risco para A) *Helicotylenchus* (0 - Sem risco ; 1 - Risco insignificante e 2 - Moderado a severo risco) e B) *Pratylenchus* (0 - Sem risco ; 1 - Risco insignificante e 2 - Moderado a severo risco) e C) *Criconeematidae* (0 - Sem risco ; 1 - Risco insignificante e 2 - Moderado a severo risco) em solos do tipo Argissolo, Cambissolo e Latossolo no estado de Goiás.....66

**Figura 13** Razão de chance ajustada de nematoides presentes em sequência de cultivo A) Milho-Soja do que em Milho-soja e outras culturas como referência e B) plantio direto/mínimo do que convencional como referência, a partir do Modelo Linear Generalizado (MLG) com distribuição binomial assumida para os grupos mais expressivos, intervalo de confiança de 95% (errobar) e linha vertical do limiar da razão de chance. O valor abaixo da limiar representa que há uma maior chance do nematoide estar presente em A) rotação de culturas e presente no B) sistema convencional de plantio, respectivamente.....66

<b>Figura 14</b> Razão de chances ajustada de nematoides presentes em sequência de cultivo A) Milho-Soja do que em Milho-soja e outras culturas como referência e B) plantio direto/mínimo do que convencional como referência, a partir do Modelo Linear Generalizado (MLG) com distribuição binomial assumida para os grupos mais expressivos, intervalo de confiança de 95% (errobar) e linha vertical do limiar da razão de chance. O valor abaixo da limiar representa que há uma maior chance do nematoide estar presente no latossolo, em comparação aos solos Argissolo e Cambissolo.....	67
<b>Figura S1.</b> Densidade média dos mais expressivos nematoides/100 cm <sup>3</sup> de solo e 1 g de raiz dos mais expressivos nematoides identificados em 354 amostras entre os 26 municípios do estado de Goiás.....	70
<b>Figura S2.</b> Densidade média de nematoides/100 cm <sup>3</sup> de solo e 1 g de raiz dos grupos de menor expressão entre os solos do tipo Argissolo, Cambissolo e Latossolo em 354 amostras entre os 26 municípios do estado de Goiás.....	70
<b>Figura S3.</b> Probabilidade de encontrar os fitonematoides em percentagem de areia em campos a partir dos valores estimados por modelos logísticos binários.....	71
<b>Figura S4.</b> Probabilidade de encontrar os fitonematoides em percentagem de argila em campos a partir dos valores estimados por modelos logísticos binários.....	71
<b>Figura S5.</b> Probabilidade de encontrar os fitonematoides expressivos em Goiás nas faixas 280 a 400, 401 a 600, 601 a 800, 801 a 100 e acima de 1000 m de altitude a partir dos valores estimados por modelos logísticos binários, sendo o ponto azul representando a média e os intervalos o desvio padrão.....	72
<b>Figura S6.</b> Probabilidade de encontrar os fitonematoides nos gradientes de pH de 4 a 8 a partir dos valores estimados por modelos logísticos binários.....	72
<b>Figura S7.</b> Probabilidade dos fitonematoides alcançarem o limiar de dano correspondente aos grupos morfológicos sob a influência da percentagem de areia em campos a partir dos valores estimados por modelos logísticos ordinários.....	73

**Figura S8.** Probabilidade dos fitonematoides alcançarem o limiar de dano correspondente aos grupos morfológicos sob a influência da percentagem de argila em campos a partir dos valores estimados por modelos logísticos ordinários.....73

**Figura S9.** Probabilidade dos fitonematoides alcançarem o limiar de dano correspondente aos grupos morfológicos sob a influência do gradiente de ph em campos a partir dos valores estimados por modelos logísticos ordinários.....74

## ABSTRACT

TOMÁZ, Ricardo Gomes. **Large-scale identification and ecological characterization of plant-nematodes in corn field in the State of Goiás** 2023. 74p. Dissertation (Master's Degree in Plant Pathology) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Corn (*Zea mays* L.) is a cereal of great importance in human and animal nutrition worldwide, but productivity in crop fields could be higher if it were not for the losses caused by plant parasitic nematodes. The control of these organisms is complex and the situation is even worse when little is known about the main morphological groups of plant parasitic nematodes present in a given location and the environmental modulators that positively influence their presence and abundance. The objective of this study was to elucidate the main morphological groups of phytonematodes in the state of Goiás, as well as evaluating their incidence, abundance, average density and quantifying the spatial heterogeneity of these organisms at the level of region, municipalities and field by mixed generalized linear models, a total of 354 commercial corn fields collected in 26 municipalities in the state with different soil types, cultivation sequences, planting systems and altitude ranges. In addition, the influence of physical-chemical soil components and the effect of different cultural practices on the abundance and damage threshold of the main morphological groups of phytonematodes present in the sampled areas are evaluated using logistic models. A total of 21 morphological groups of phytonematodes were detected, with the genera *Aphelenchoides*, *Aphelenchus*, *Helicotylenchus*, *Rotylenchulus* and the Criconematidae family present in all regions and with high abundance. Plant parasitic nematodes of the genus *Helicotylenchus* demonstrate predominance in fields, municipalities and geographic regions evaluated in the state of Goiás. It was possible to observe a greater heterogeneity in the incidence and population density of nematodes at field level, indicating that the variability of these organisms may be directly influenced by the physical-chemical characteristics of the soil and the specific cultural treatment of each area. Soil types, cultivation sequence, planting type and altitude had little influence on the population of the main morphological groups of phytonematodes. The variables pH, sand and clay expressed a greater effect on the incidence and ability of nematodes to reach the damage threshold in the field. This study contributed to the understanding of phytonematodes present in corn fields, the behavior and development of these organisms under the effect of modulating variables in the state of Goiás.

**Keywords:** Random effect, sampling, risk category, mathematical modeling, herbivore nematodes, probability

## RESUMO

TOMÁZ, Ricardo Gomes. **Identificação e caracterização ecológica em larga escala de fitonematoides em campos de cultivo de milho no estado de Goiás.** 2023. 74p. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.

O milho (*Zea mays* L.) é o cereal de grande importância na alimentação humana e animal em todo mundo, contudo a produtividade nos campos de cultivo poderia ser maior se não fosse as perdas causadas por fitonematoides. O controle desses organismos é complexo e a situação se agrava ainda mais quando pouco se conhece sobre os principais grupos morfológicos de fitonematoides presente em um determinado local e os moduladores ambientais que influenciam de forma positiva a sua presença e abundância. Com objetivo de elucidar os principais grupos morfológicos de fitonematoides do estado de Goiás, bem como avaliar sua incidência, abundância, densidade média e quantificar a heterogeneidade espaciais destes organismos a nível de região, municípios e campos por modelos lineares generalizados mistos, foram amostrados um total de 354 campos comerciais de milho coletados em 26 municípios do estado com diferentes tipos de solo, sequências de cultivo, sistemas de plantio e faixas de altitude. Além disso, avaliou-se a influência dos componentes físico-químico do solo e o efeito de diferentes práticas culturais na abundância e limiar de danos dos principais grupos morfológicos de fitonematoides presentes nas áreas amostradas por meio dos modelos logísticos. Um total de 21 grupos morfológicos de fitonematoide foram detectados, sendo os gêneros *Aphelenchoides*, *Aphelenchus*, *Helicotylenchus*, *Rotylenchulus* e família Criconematidae presentes em todas as regiões e com alta abundância. Nematoides do gênero *Helicotylenchus* demonstram predominância em campos, municípios e regiões geográficas avaliadas no estado de Goiás. Foi possível observar uma maior heterogeneidade da incidência e densidade populacional dos nematoides a nível de campo, indicando que a variabilidade desses organismos possa estar diretamente influenciada pelas características físico-químicas do solo e trato culturais específicos de cada área. Os tipos de solos, sequência de cultivo, tipo de plantio e altitude apresentaram pouca influência sobre a população dos principais grupos morfológicos de fitonematoides. As variáveis pH, areia e argila expressaram um maior efeito sobre a incidência e a capacidade dos nematoides atingirem o limiar de dano em campo. Este estudo contribuiu para a compreensão sobre os fitonematoides presentes em campos de milho, o comportamento e desenvolvimento desses organismos sob o efeito de variáveis moduladoras no estado de Goiás.

**Palavra chave:** Efeito aleatório, amostragem, categoria de risco, modelagem matemática, parasita de planta, probabilidade

## INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) destaca-se entre os cereais de maior importância econômica em todo o mundo (Shiferaw et al., 2011). A produção mundial desse cereal alcançou um patamar de 1,15 bilhão de toneladas no ano de 2022, sendo destinado para a fabricação de uma variedade de produtos, como amido, adoçantes, etanol, óleos e, principalmente, a ração animal (Erenstein et al., 2021; USDA, 2023). Os Estados Unidos, China e o Brasil estão entre os maiores produtores. Em relação ao Brasil, a região Centro-Oeste destaca-se com a maior produtividade (6,1 mil t/ha) seguida pela região Sudeste e Sul (5,4 mil t/ha), Norte (4,4 mil t/ha) e Nordeste (2,3 mil t/ha) (CONAB, 2022). O estado de Goiás representa o terceiro maior produtor do grão (7,9 mil t/ha), atrás apenas do estado do Mato Grosso (41 mil t/ha) e Mato Grosso do Sul (11 mil t/ha). A produção poderia ser maior se não fossem os danos causados por fitonematoides (Tylka et al., 2011).

Estima-se que as perdas econômicas ocasionadas por fitonematoides cheguem a 12,3% em todo mundo (Norton, 1983; Singh et al., 2015). No Brasil, as perdas causadas por esses organismos estão em cerca de 65 bilhões de reais (Syngenta, 2022). Dentre os fatores que determinam a maior perda de produtividade em regiões tropicais destacam-se: a ausência de pousio, a falta de emprego da rotação de cultura, a inexistência de mudanças climáticas abruptas, o uso de variedades sem o conhecimento prévio dos organismos presentes na área, uma alta pressão de inóculo para a seguinte safra e uma maior diversidade e abundância de fitonematoides comparado às regiões temperadas (Sikora et al., 2018).

Calcula-se a existência de um total de 120 espécies de nematoides fitopatogênicos associados com a cultura do milho em todo o mundo e estima-se que o estado de Goiás apresente uma densidade média de 260 a 355 fitonematoides/100 cm<sup>3</sup> de solo (Norton, 1983; Hoogen et al., 2019). Apesar disso, um número limitado de trabalhos vem explorando e analisando a influência de fatores abióticos na presença e na densidade populacional de fitonematoides, constantes ou não, bem como sua interação na estruturação, abundância populacional e prevalência dos diferentes gêneros de fitonematoides em determinada região geográfica ou campos de cultivos (Garcia et al., 2018; Nisa et al., 2021). Dentre os modulares ambientais conhecidos e passíveis de influenciar as populações dos nematoides estão as propriedades físico-químicas do solo e as práticas culturais (i.e. plantio direto, mínimo, convencional e rotação ou sucessão de culturas) (Simon et al., 2018a; 2018b). Em complemento, o caráter geográfico, em especial para organismos que apresentam dispersão

limitada como nematoides, pode potencialmente influenciar a distribuição desses organismos a nível de campo, municípios, região e, até mesmo, em nível global.

Prévios levantamentos nematológicos têm demonstrado que solos com diferença no pH, tipo de solo, nutrientes, condutividade elétrica, altitude, bem como conteúdo de silte, argila e areia podem impactar positiva ou negativamente a diversidade e presença de determinados gêneros de fitonematoides. A título de exemplo, Marquez et al. (2021) encontraram uma maior abundância de nematoides dos gêneros *Meloidogyne* e *Heterodera* em solos com pH superior a 5,71 na Geórgia. Um estudo similar realizado por Garcia et al. (2022) relataram uma correlação positiva entre *Meloidogyne*, *Paratylenchus* e nematoides do grupo Tylenchidae em ambientes com a faixa de pH entre 5,72 e 7,89 na Colômbia. O contrário, no entanto, foi descrito por Zhao et al. (2022) que observaram uma redução na abundância de *Helicotylenchus*, *Pararotylenchus*, *Pratylenchus*, *Rotylenchus*, *Aglenchus* e *Boleodorus* com aumento do pH no solo.

Pouco também vem sendo estudado avaliando o comportamento da comunidade de nematoides sob diferentes texturas e propriedades químicas do solo. Nisa et al. (2021) relataram uma redução populacional de espécies do gênero *Meloidogyne* em solos ricos em nitrogênio e fósforo. Por outro lado, os do gênero *Helicotylenchus* tiveram um incremento populacional em solos com pH mais baixos, ricos em matéria orgânica e elevado conteúdo de manganês. Um aumento populacional também foi detectado para o gênero *Pratylenchus* em solos com alta concentração de areia (>74%). Porém, neste caso, a população sofreu um efeito negativo com o aumento de matéria orgânica (Dias-Arieira et al., 2021). A altitude também demonstra ser um fator determinante para a distribuição de fitonematoides. Na China, foi observada uma maior abundância de nematoides em altitudes entre 1000 e 2000 m (Dong et al., 2017). Dentre os fitonematoides identificados, o grupo Criconematidae teve sua maior abundância relativa em 1100 m, entretanto, demonstrou uma abundância inferior em 2940 m de altitude.

Somado às características físico-químicas do solo, os sistemas de cultivos em sucessão ou rotação cultural e sistema de plantio também afetam diretamente a comunidade de nematoides no solo. A rotação de cultura em regiões tropicais demonstra ser importante na redução populacional de nematoides, devido à implementação intercalada de plantas não hospedeiras, desfavorecendo a manutenção populacional dos nematoides fitopatogênicos a determinada cultura de interesse (Silva et al., 2022). Entre os anos de 2006 e 2013, Jordan et al. (2017) implementaram a rotação de milho com amendoim, o que possibilitou uma redução

populacional de espécimes de *Meloidogyne* e *Tylenchorhynchus*. No Brasil, no entanto, o emprego de plantios sucessivos de soja e milho tem crescido entre as regiões produtoras do Brasil e sua implementação em larga escala tem favorecido o aumento em abundância de fitonematoides com hábito alimentar polífago e com ampla distribuição em campos, como as espécies de *Helicotylenchus*, *Pratylenchus* e *Meloidogyne* (Cortada et al., 2018; Jones & Nyarko, 2014). O sistema de cultivo também tem demonstrado um impacto na população de nematoides em campos, entretanto, um efeito variado ao longo dos ambientes e grupos morfológicos identificados. Dentre eles, os fitonematoides dos grupos *Pratylenchus* spp. e *Helicotylenchus* spp. tem expressado uma maior abundância em campos com plantio mínimo e direto na Holanda e Brasil (Bongiorno et al., 2019, Machado et al., 2022). Contudo, os mesmos grupos têm apresentado uma maior abundância em sistema de cultivo convencional em áreas de cultivo na Suíça (Wang et al., 2022). A variabilidade no efeito dessas práticas culturais possivelmente resulta da influência conjunta de outras variáveis constituídas no ambiente, como por exemplo a matéria orgânica disposta em campos de cultivo passíveis de favorecer a atividade metabólica de diversos organismos presentes (Pan et al., 2020).

Atualmente, ainda há escassez de levantamentos em larga escala e da compreensão sobre os efeitos moduladores de variáveis edáficas do solo tais como textura, pH, condutividade elétrica, ecológicas como altitude e práticas culturais isoladas na distribuição de fitonematoides na cultura do milho no estado de Goiás. Diante disso, o estudo tem como objetivos :(i) Identificar os grupos morfológicos presentes nas quatro principais regiões produtoras de milho do estado de Goiás; (ii) Quantificar os indivíduos coletados em áreas com diferentes práticas culturais e tipos de solo; (iii) Caracterizar a heterogeneidade espacial existente nas populações; e (iv) Quantificar a influência direta de diferentes tratos culturais e características físico-química do solo sobre as populações de nematoides.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Os métodos empregados neste estudo foram similares aos empregados nos estudos de Simon et al. (2018a) e (2018b). O intuito do estudo consistiu em realizar o primeiro estudo de identificação em larga escala de fitonematoides, estimar a heterogeneidade espacial e calcular a probabilidade de ocorrer determinados grupos morfológicos em ambientes tropicais com diferentes condições edafoclimáticas e tratos culturais.

## Amostragem e coleta de amostras

As amostras de solo foram coletadas em campos de cultivo comercial de milho nos estádios fenológicos V3 a R3 durante os meses de fevereiro e março nos anos de 2021 e 2022 (**Figura 1**). As coletas foram estratificadas por região geográfica, tipo de solo, tratos culturais (rotação de cultura, plantio direto, mínimo e convencional) e altitude. Ao todo, 26 municípios foram amostrados no estado de Goiás, cinco localizados na mesorregião Sul (Acreúna, Bom Jesus de Goiás, São Miguel do Passo Quatro, Silvânia e Vianópolis), oito na Sudeste (Caiapônia, Doverlândia, Jataí, Mineiros, Montividiu, Portelândia, Rio Verde e Serranópolis), três na Norte (Alto Paraíso de Goiás, Nova Crixás e Porangatu), sete na ala Leste (Abadiânia, Alexânia, Cabeceiras, Cristalina, Formosa, Luziânia e Planaltina) e três na Central (Barra Alto, Ceres e Firminópolis). Dentre as mesorregiões produtoras de milho amostrou-se campos com solo do tipo Latossolo (21 campos), Neossolo (1 campo), Argissolo (3 campos), Cambissolo (7 campos), Chernossolo (2 campos) e Gleissolo (1 campo) e com diferentes históricos de práticas culturais (cultivo soja-milho e soja-milho e pastagem, sorgo, tomate, cenoura ou feijão; plantio direto/mínimo e convencional) realizadas nos últimos cinco anos no estado de Goiás (**Figura 2A e B**). As amostras foram coletadas em uma faixa de altitude entre 200 e 1050 m em campos no estado de Goiás, sendo segmentada em cinco classes. A classe 0 variando de 280 a 400 m de altitude; a 1 de 401 a 600 m; a 2 de 601 a 800 m ; 3 de 801 a 1000 e 4 acima de 1000 m.

Seguiu-se a metodologia de amostragem por campo de cultivo como descrito por Simon et al. (2018a), ou seja, coletou-se de 18 a 20 amostras simples de raízes e solos com uma distância de 2 a 3 cm da planta com um trado do tipo holandês de 2,54 cm de diâmetro (1 polegada) posicionado aproximadamente a 45° e profundidade entre 30 a 50 cm da linha de plantio do milho. A coleta ocorreu em oito linhas de cultivo selecionadas aleatoriamente e percorridas em zig-zag. Ao final da coleta em cada campo, as amostras simples foram misturadas formando uma amostra composta de 400 a 600 cm<sup>3</sup> de solo. Um total entre 10 a 15 talhões aqui representados como campos, foram coletados em cada município do estado.

As amostras compostas foram georreferenciadas e as altitudes obtidas a partir das coordenadas de latitude e longitude de cada campo de cultivo com o auxílio da plataforma Google Earth (Google, 2009). O material foi acondicionado em caixas térmicas para serem transportadas até o Laboratório de Epidemiologia no Departamento de Fitopatologia da

Universidade de Brasília, Brasília-DF e armazenado em câmara fria a 14°C entre 7 a 14 dias até a extração dos nematoides do solo e raiz.

### **Extração de nematoides**

Os nematoides foram extraídos de 100 cm<sup>3</sup> de solo utilizando o método de flutuação-sedimentação-peneiramento e centrifugação (Jenkins, 1964). O solo foi adicionado em um recipiente de 1 L contendo água e, posteriormente, a suspensão foi destorroada, homogeneizada e vertida em peneiras com malha de 42, 150 e 400 mesh. Em seguida, a suspensão contendo os nematoides foi centrifugada em uma primeira etapa com caulim em 1500 rpm por 5 min, o sobrenadante foi então descartado e ressuspenso com sacarose 1,59 kg/m<sup>3</sup> para posterior centrifugação a 3500 rpm por 1 min. Após a centrifugação a suspensão contendo os nematoides foi vertida em uma peneira com malha de 400 mesh e levada ao banho maria à 60°C por 1 min para imobilização dos nematoides. A suspensão foi padronizada para 10 mL e mantida em temperatura ambiente sob a solução de Golden em proporção de 1:1 (Hooper, 1986).

Para a extração, identificação e quantificação de fitonematoides em raiz, um grama de raiz previamente lavada com jatos leves de água foi cortada e adicionada a 250 mL de água em liquidificador (modificado de COOLEN et al., 1972). As raízes foram processadas em baixa rotação por 30 s. O extrato da raiz foi vertido em três peneiras acopladas com porosidade de 45, 150 e 400 mesh para a retenção dos nematoides. O material retido na peneira com abertura de 400 mesh foi recolhido e mantido em tubos falcon de 50 mL. Após a retenção do material, adicionou-se cinco gramas de caulim em cada amostra e realizou-se a centrifugação a 1750 rpm por 1 min. O sobrenadante foi descartado e, em seguida, adicionou-se 40 mL de solução de sacarose 1,59 kg/m<sup>3</sup> ao resíduo da amostra para serem centrifugados a 1750 rpm durante 5 min. O sobrenadante do material centrifugado foi vertido na peneira com malha de 400 mesh para a retenção dos nematoides e eliminação dos resíduos da solução de sacarose. Com o auxílio de jatos de água em uma pisseta, a suspensão de nematoide foi acondicionada em tubos de vidro e mantidos em banho-maria a 60 °C por 1 min. Os nematoides foram fixados adicionando o mesmo volume da solução de Golden a suspensão de nematoides (1:1), para que estes organismos se mantivessem íntegros durante o armazenamento. O material foi mantido em tubos falcon fechados em temperatura ambiente até a identificação e quantificação em nível de família e gênero. As espécimes de cada grupo

morfológico identificadas e quantificadas em amostras de raiz e solo foram integradas em apenas um banco de dados.

### **Identificação e quantificação dos fitonematoides**

Os fitonematoides foram identificados em nível de família e gênero de amostras extraídas de raiz e de solo por meio do microscópio óptico no aumento de 400X (Zeiss Primo Star) e com auxílio da chave dicotômica elaborada por Cares & Huang (2001). As características morfológicas analisadas foram a anelacão da cutícula, tamanho do corpo do nematoide, formato do corpo, curvatura da cauda, região cefálica, posição das glândulas esofagianas, posição da vulva, tamanho do metacampo e tipo de estilete. O volume total da suspensão contendo os nematoides foi centrifugado e reduzido a 20 mL para padronização e o número de grupos morfológicos foi quantificado em 100 cm<sup>3</sup> de solo. As métricas populacionais avaliadas foram a abundância ou densidade populacional, densidade média, incidência e frequência média dos nematoides por campos, municípios, regiões, tipos de solo, diferentes tratos culturais e faixas de altitude. O cálculo das métricas avaliadas encontra-se detalhado abaixo:

Incidência (I) = ausência (0) ou presença (1) de espécimes do mesmo grupo morfológico em uma amostra;

Frequência (N) = Número de amostras no qual o mesmo grupo morfológico estava presente/Número total de amostras quantificadas;

Densidade média (D) = Soma de espécimes de um mesmo grupo morfológico obtidos em todas as amostras / Número de amostras cujo grupo morfológico foi detectado;

Abundância (A) = Quantidade total dos indivíduos do gênero por 100 cm<sup>3</sup> de solo e 1 g de raiz;

### **Propriedades do solo**

#### **pH e condutividade elétrica do solo**

As análises de pH e condutividade elétrica (CE) do solo foram mensuradas utilizando um pHmetro de bancada da marca Kasvi com seu eletrodo submerso na suspensão do solo. A calibração do pHmetro foi realizada com solução tampão (pH: 4,0 ± 0,01 e 7,0 ± 0,01) e a calibração do condutivímetro por meio da solução padrão (1413 μS cm<sup>-1</sup>) ajustada à

temperatura ambiente. O pH e CE da solução do solo avaliada foi preparada misturando o mesmo volume de solo e água Milli-Q por 10 s, com posterior descanso por 30 min. O eletrodo foi lavado com água deionizada e secado após a leitura do pH e CE de cada amostra.

### **Caracterização física e química do solo**

As análises físicas do solo para a obtenção das frações de argila, silte e areia foram realizadas para todos os tipos de solos seguindo o método de Bouyoucos descrito por Teixeira et al. (2017) adaptado sem a lavagem da areia. O método utiliza o hidróxido de sódio (NaOH) como dispersante na agitação mecânica. Inicialmente, 40 g da amostra de solo foi previamente peneirada (2 mm) e seca por 24 h a 105°C. O solo seco foi ressuscitado em uma solução contendo 240 mL de água destilada e 10 mL de NaOH (1M), posteriormente mantido sob uma agitação de 100 rpm/min em um agitador pendular por 16 horas. Após o período de agitação, completou-se o volume da suspensão de cada amostra com água destilada com subsequente agitação por 30 s para estimar a quantidade de argila e silte a 22°C por meio do hidrômetro (Modelo Labimport). Em seguida, as amostras foram mantidas por um período de 8 h a 22°C sem agitação e a fração de argila total presente no solo foi mensurada. A fração de argila, silte e areia presente no solo obtida através os dados da primeira e segunda leitura realizada no hidrômetro corrigidos com a avaliação da amostra em solução de NaOH como descritos abaixo:

$msc$  (massa seca de solo) = 40 g de solo seco por 24 horas a 105°C

$argila$  (%) = leitura corrigida do hidrômetro de 8h /  $msc$  \* 100

$areia$  (%) = ( $msc$  - leitura corrigida 1) /  $msc$  \* 100

$silte$  (%) = 100 - (%argila + %areia)

### **Heterogeneidade espacial**

Após a identificação e quantificação dos grupos morfológicos nas amostras coletadas, a heterogeneidade populacional dos fitonematoides foi analisada em diferentes escalas espaciais considerando a presença e abundância dos fitonematoides por meio dos Modelos Lineares Generalizados Mistos (MLGM) no pacote *glmer* no software RStudio (Gbur et al., 2012; Stroup 2013; RStudio Team, 2021). A probabilidade esperada de um determinado grupo morfológico de fitonematoide estar presente em um campo foi estimada por  $p = Y/n$ , onde Y representa o número de campos amostrados com a presença de um determinado grupo

de nematoide e  $n$  o número total de amostras coletadas por município (Simon et al., 2018a). O valor  $p$  teve sua distribuição de probabilidade assumidamente binomial, no qual o modelo estimou o efeito aleatório da região geográfica ( $S$ ) e municípios da mesma região ( $M$ ). Com isso, o modelo MLGM foi estruturado da seguinte forma:

$$Y_{ij} = \beta + S_i + M(S)_{ij}$$

Onde  $n_{ij}$  é a função de ligação logito,  $\beta$  é o intercepto do modelo que utiliza uma função de ligação log,  $S_i$  é o efeito aleatório  $i$  da região geográfica e  $M(S)_{ij}$  o efeito aleatório  $i$  do tipo de município amostrados dentro das  $j$  mesorregiões.

Os dados de abundância dos nematoides apresentaram uma distribuição de Poisson com média e variância igual à  $\mu$ , levando em consideração a quantidade de fitonematoides estimada em 100 cm<sup>3</sup> de volume de solo. Similar a análise anterior, realizou-se a análise com MLGM para estimar o efeito da aleatoriedade da região geográfica ( $S$ ), municípios dentro da mesma região ( $MS$ ) e campos dentro do município e da mesma região ( $C$ ). O valor da abundância foi ajustado para a função da equação logito ( $Y = \log[\mu]$ ), com o modelo escrito da seguinte forma:

$$Y_{ij} = \beta + S_i + M(S)_{ij} + C(MS)_{ijk}$$

Onde  $n_{ij}$  é a função de ligação logito, sendo que os parâmetros  $\beta$ ,  $S_i$  e  $M(S)_{ij}$  representam os efeitos citados no modelo anterior, sendo  $C(MS)_{ijk}$  o efeito  $i$  tipos de campos dentro de  $k$  municípios dentro de  $j$  regiões geográficas. Em ambos modelos, as variáveis região geográfica, município e campo assumiram distribuição normal e independente com média 0 e variância constante ( $\sigma^2_R, \sigma^2_M, \sigma^2_C$ ).

Um modelo foi ajustado para cada grupo morfológico de nematoides encontrados nos campos de cultivo. O emprego da máxima verossimilhança (maximum likelihood) e pseudo-verossimilhança (pseudo-likelihood) foram usados para estimar os parâmetros de incidência e abundância, respectivamente. Em relação à abundância de nematoides, o teste de pseudo-verossimilhança foi realizado para estimar a significância e intervalo de confiança das variáveis aleatórias.

### **Caracterização da heterogeneidade nos diferentes tratos culturais e tipo de solo**

A chance de um grupo morfológico estar presente foi calculada pela razão da probabilidade de presença dividida pela ausência de um grupo morfológico em determinado

campo. Assim, a chance de encontrar um determinado gênero de forma probabilística foi estimada como:

$$O = \frac{P}{1 - P}$$

Sendo  $O$  a chance,  $p$  a probabilidade de um determinado grupo estar presente e  $1 - p$  representa a probabilidade de um gênero não estar presente em um local.

Neste estudo também avaliou-se a razão (em inglês: *odds ratio*; abreviatura O.R.) da chance de encontrar um determinado grupo morfológico de fitonematoide na rotação milho-soja e outras culturas como sorgo, feijão brachiaria e cenoura, plantio convencional e Latossolo como referência em comparação à sucessão milho-soja, plantio direto/mínimo e outros tipos de solos (Cambissolo e Argissolo), respectivamente. Dessa forma, se a probabilidade de encontrar um específico grupo morfológico em uma prática cultural ou solo for  $O_p$  e esse mesmo grupo morfológico em outra prática cultural ou solo é  $O_q$ , então a razão de chances é:

$$O.R = \frac{O_p}{O_q}$$

A razão da chance com valor igual a 1 indica que os eventos estudados têm a mesma chance de apresentarem os grupos morfológicos nos diferentes solos, tipo de plantio e sequência de culturas. Uma razão superior ou menor que 1 mostra que a chance dos grupos morfológicos estarem presentes na categoria referência (milho-soja-outras, plantio convencional e Latossolo) tem uma menor e maior chance comparado com o sistema de plantio mínimo/direto, soja-milho e Cambissolo/Argissolo, respectivamente. A razão de chance de exceder o limiar de dano entre as práticas culturais e tipos de solos também foi implementada para a abundância dos grupos morfológicos.

### **Probabilidade de ocorrência dos nematoides na cultura do milho**

Similar à quantificação da heterogeneidade nos diferentes práticas culturais e tipos de solos avaliou-se a chance de ocorrência dos grupos morfológicos levando em consideração diferentes variáveis exploratórias por meio da chance de ocorrência [1]. As variáveis exploratórias analisadas foram divididas em categóricas (qualitativas) e contínuas (quantitativas). As variáveis categóricas (prática cultural e sequência de cultivo) foram codificadas como 1 (plantio direto/plantio mínimo e soja-milho = SM) e 2 (plantio

convencional/soja-milho-outras = SMO). Os tipos de solo Argissolo, Cambissolo e Latossolo foram utilizados por demonstrarem quantidades de amostras próximas e foram classificados como 2, 5 e 6, respectivamente. A fração de areia, silte, argila, CE, pH e altitude foram utilizadas como variáveis exploratórias contínuas [2]. Assim, a probabilidade e O.R. foram estimadas por meio da regressão logística binária, sendo  $Y_i$  como variável dependente obtidas por:

$$Y_i - \text{Binomial}(n, p) [1]$$

$$\text{logit}(p_i) = \ln\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \alpha + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} [2]$$

Onde  $\ln\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right)$  representa o logaritmo da chance de encontrar um determinado grupo de nematoides (1 = presente e 0 = ausente) em  $i$  campos,  $p_i$  é a probabilidade de um grupo morfológico ser presente em um  $i$  campo analisado, no qual as variáveis exploratórias ( $x_1, x_2, \dots, x_{ik}$ ) e  $\alpha + \beta_1$  a  $\beta_k$  representam o conjunto de parâmetros do modelo.

O modelo foi ajustado para cada grupo morfológico de nematoide e a estimativa dos parâmetros foi obtida a partir do método de máxima verossimilhança (Simon et al., 2018b).

### **Probabilidade de limiar de dano dos nematoides na cultura do milho**

O modelo de regressão logística ordinária foi empregado para estimar a probabilidade acumulada dos grupos morfológicos de nematoides apresentarem uma densidade maior ao limiar de dano na cultura do milho. As classes de risco foram classificadas como 0 (sem risco), 1 (risco insignificante) e 2 (moderado a severo risco de dano) representando o dano potencial em relação à densidade populacional em 100 cm<sup>3</sup> de solo do grupo morfológico como detalhado na **Tabela 1**. A chance proporcional foi calculada por meio de modelo logístico de regressão associado às diferentes classes de densidade populacional de grupos morfológicos com tipo de solo, práticas culturais e características físico-químicas do solo. O modelo foi estruturado classificando a variável dependente [3] com as classes de risco de nematoides com  $j =$  três níveis (0, 1 e 2), com  $k$  variáveis exploratórias e  $i$  campos analisados [4], sendo descrito como:

$$Y_i \sim \text{Poisson}(\lambda_i) [3]$$

$$\text{logit}(\theta_{i0}) = \ln\left(\frac{p_{i0}}{1-p_{i0}}\right) = \alpha_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} [4]$$

$$\text{logit}(\Theta_{i1}) = \ln \left( \frac{p_{i0} + p_{i1}}{1 - (p_{i0} + p_{i1})} \right) = \alpha_1 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik}$$

Sendo  $\Theta_{ij}$  a função de ligação logito cumulativa de  $Y_i$  representando a probabilidade cumulativa da variável dependente ser maior ou igual à  $j$  sob a influência das variáveis  $k$  exploratórias ( $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}$ ),  $p_{ij}$  representa a probabilidade de  $Y_i = j$  em  $i$  campos estudados. Além disso, os  $\alpha_0, \alpha_1, \beta_1$  à  $\beta_k$  são parâmetros dos modelos que estimam o efeito das variáveis categóricas e exploratórias.

Por fim, a caracterização da incidência e densidade dos diferentes grupos de nematoide sob influência de um conjunto de variáveis exploratórias utilizará o método de seleção de variáveis usando a regressão por stepwise (*backward stepwise*) para selecionar variáveis de significância ( $P < 0,05$ ). Os pacotes *lme4*, *glm* e *clm* do software Rstudio foram utilizados para ajustar os modelos lineares misto generalizado e os modelos de regressão logístico binário e ordinário, respectivamente. Análise de multicolinearidade foi realizada para verificar possíveis correlações entre as variáveis analisadas no estudo, onde variáveis com correlações acima de 4 foram removidas do modelo.

## RESULTADOS

### **Incidência, frequência, densidade média e abundância de nematoides parasitas de plantas**

Um total de 354 campos de cultivo foram amostrados na cultura do milho no estado de Goiás, sendo estes distribuídos em 26 municípios, quatro mesorregiões, seis tipos de solo, duas sequências de cultivo, dois sistemas de plantio e cinco faixas de altitude.

### **Métricas populacionais de fitonematoides por município e mesorregião**

Um total de 21 grupos morfológicos foram identificados no estado de Goiás, sendo detectados 16 gêneros e cinco famílias de fitonematoides. Os gêneros observados foram *Aphelenchus*, *Aphelenchoides*, *Helicotylenchus*, *Hemicycliophora*, *Heterodera*, *Hoplolaimus*, *Meloidogyne*, *Paratrichodorus*, *Paratylenchus*, *Pratylenchus*, *Rotylenchus*, *Rotylenchulus*, *Scutellonema*, *Trichodorus*, *Tylenchorhynchus* e *Xiphinema*. As família detectadas foram a Anguinidae (*Ditylenchus*), Belonolaimidae, Criconematidae (*Criconemoides* e *Mesocriconema*), Longidoridae e Tylenchidae (*Tylenchus* e *Filenchus*), não foi possível separar ou identificar em nível de gênero devido a similaridades ou falta de integridade morfológica entre os nematoides no momento da avaliação.

Os nematoides dos gêneros *Helicotylenchus* e *Aphelenchus* foram observados em todos municípios em 87 e 79,1% dos campos amostrados, respectivamente. Em relação aos demais grupos, *Aphelenchoides* e *Pratylenchus* foram observados em 25 municípios presentes em 57,9% e 65,1% dos campos, seguidos por Anguinidae em 24 municípios e 26% campos; Tylenchidae em 22 municípios e 34,3% dos campos; Criconematidae em 21 municípios e 21% dos campos; *Rotylenchus* em 19 municípios e 25% dos campos; *Tylenchorhynchus* em 17 municípios e 12% dos campos; *Meloidogyne* em 16 municípios e 11% dos campos; *Heterodera* em 13 municípios e 15% dos campos; *Hemicycliophora* em 9 municípios e 5% dos campos; *Paratrichodorus*, *Trichodorus* e *Scutellonema* em 7 municípios e 4, 4 e 3% dos campos, respectivamente; *Rotylenchulus* em 6 municípios e 6% dos campos; *Hoplolaimus* em 3 municípios e 0,8% dos campos e Longidoridae, *Paratylenchus* e *Xiphinema* em 2 municípios e 1, 0,8 e 0,5% dos campos, respectivamente (**Tabela 2**). O grupo Belonolaimidae foi identificado em apenas um campo de cultivo no município de Mineiros.

Uma alta variação na densidade média populacional foi observada entre os grupos morfológicos em campos de cultivo coletados no estado de Goiás. O gênero *Helicotylenchus* teve uma população com maior abundância e densidade média de nematoides em 19 municípios, sendo detectado em um maior número no município de Porangatu e menor em Firminópolis (**Figura 3 e Figura Suplementar 1**). O gênero *Rotylenchulus* teve a maior abundância em Ceres, Cristalina e Vianópolis; a família Criconematidae em Nova Crixás; *Aphelenchus* em Abadiânia; *Pratylenchus* em Cabeceiras, enquanto Silvânia teve abundância próximas de isolados do gênero *Pratylenchus* e Criconematidae. Os valores máximos observados para a abundância foram de 3529 nematoides/ 100 cm<sup>3</sup> para *Helicotylenchus* em um campo de cultivo no município de Porangatu, seguido por 2364, 1638 e 679 nematoides/ 100 cm<sup>3</sup> de solo contendo *Pratylenchus*, *Rotylenchus* e Criconematidae em campos localizados no município de Ceres (**Tabela Suplementar 1**). Em contrapartida, os grupos *Trichodorus*, Belonolaimidae, *Hoplolaimus* e Longidoridae tiveram uma abundância baixa, ranqueada entre 1 a 6 nematoides/ 100 cm<sup>3</sup> de solo. Outros grupos com uma baixa população nos campos de cultivo foram os gêneros *Scutellonema* e *Paratrichodorus*, os quais não apresentaram valores de abundância superiores a 10 nematoides/ 100 cm<sup>3</sup> de solo.

Dentre as mesorregiões do estado de Goiás, a região Leste apresentou uma maior diversidade de gêneros (19), seguido pelas regiões Sul e Sudeste (18) e a Central (13). Os gêneros *Helicotylenchus*, *Rotylenchulus*, *Aphelenchus*, *Pratylenchus*, *Aphelenchoides* e a família Criconematidae foram os grupos morfológicos presentes em todas as regiões e

encontrados em alta densidade populacional no estado de Goiás. Em contrapartida, os dos grupos *Heterodera*, *Hoplolaimus*, Longidoridae, Belonolaimidae, *Paratrichodorus*, *Paratylenchus* e *Trichodorus* não foram detectados em todas as regiões e, usualmente, com baixa densidade populacional média de indivíduos (**Tabela Suplementar 2**). Com exceção da região Central, o gênero *Helicotylenchus* teve as maiores densidades médias entre regiões geográficas do estado de Goiás. Uma alta densidade populacional deste nematoide foi observada em todas as regiões amostradas, com valores variando de 1142 a 2982 nematoides/100 cm<sup>3</sup> de solo (**Figura 4; Tabela Suplementar 3**), com a maior densidade populacional na região Sudeste. O gênero com maior importância na região Central foi *Rotylenchulus* com uma densidade populacional média de 2109 nematoides/100 cm<sup>3</sup> de solo. Os grupos morfológicos *Aphelenchoides*, *Aphelenchus* e *Pratylenchus* tiveram densidades médias expressivas em todas as mesorregiões, com a densidade média variando entre 82 a 1020 nematoides/100 cm<sup>3</sup> de solo entre as regiões (**Tabela Suplementar 3**).

### **Altitude**

A faixa de altitude com maior diversidade de grupos morfológicos de fitonematoides foi entre 801 a 1000 m na classe 4, detectando 20 grupos morfológicos, seguido por 17 grupos na classe 5 (acima de 1000 m), 16 na classe 2 (401 a 600), 15 na classe 3 (601 a 800) e 11 na classe 1 (280 a 400 m). Os grupos Anguinidae, *Aphelenchoides*, *Aphelenchus*, Criconematidae, *Helicotylenchus*, *Meloidogyne*, *Pratylenchus*, *Rotylenchus* e Tylenchidae estiveram presentes em todas as cinco classes de altitude. A classe 1 de altitude não contemplou a presença de *Scutellonema*, *Rotylenchulus*, *Heterodera*, *Trichodorus*, *Paratrichodorus*, *Hemicycliophora*, Longidoridae, *Hoplolaimus*, *Xiphinema*, *Paratylenchus* e Belonolaimidae. Os grupos Longidoridae, *Hoplolaimus*, *Xiphinema*, *Paratylenchus* e Belonolaimidae não estiveram presentes na classe 2. A presença de *Heterodera*, Longidoridae, *Rotylenchulus*, *Scutellonema*, *Tylenchorhynchus* e *Xiphinema* não foi constatada na faixa entre 601 a 800 m de altitude. A classe 4 de 801 a 1000 m de altitude não contemplou a presença de *Xiphinema*, enquanto na classe 5 não foi detectada a presença de nematoides do grupo *Xiphinema*, Longidoridae, Belonolaimidae e *Paratylenchus*. Dentre os principais grupos morfológicos detectados no estado de Goiás é nítido a influência da altitude na densidade média dos indivíduos em alguns gêneros (**Figura 5**). A densidade média de indivíduos do gênero *Helicotylenchus* teve uma diminuição gradativa com o aumento da altitude e um maior nível populacional de isolados do gênero *Pratylenchus* foi detectado nas

altitudes inferiores a 600 m (**Figura 5**). Os isolados do gênero *Rotylenchus* foram encontrados em maiores densidades em ambientes com altitude superior a 800 m e entre 401 a 600 m, mas não observado em altitudes na classe 1. Por outro lado, os grupos *Aphelenchoides*, *Aphelenchus* e Criconematidae não apresentaram uma mudança expressiva na densidade de suas populações ao longo das faixas de altitude (**Figura 5**).

### **Tipos de solo e tratos culturais**

Em decorrência do restrito número de amostra em alguns tipos de solos, realizou-se a correlação entre incidência, abundância e densidade média de nematoide apenas com os solos tipo Latossolo, Argissolo e Cambissolo. Uma maior diversidade de grupos morfológicos foram observados no Latossolo (21), seguido por Cambissolo (20) e Argissolo (14). Os grupos *Anguinidae*, *Aphelenchoides*, *Aphelenchus*, Criconematidae, *Helicotylenchus*, *Heterodera*, *Meloidogyne*, *Paratrichodorus*, *Pratylenchus*, *Rotylenchus*, *Rotylenchulus*, *Scutellonema*, *Trichodorus*, Tylenchidae e *Tylenchorhynchus* estiveram presentes em todos os três solos investigados no estado de Goiás. Dentre os tipos de solo, o grupo Belonolaimidae não esteve presente em Cambissolo e Argissolo e os grupos *Hemicyclophora*, *Hoplolaimus*, *Paratylenchus*, *Rotylenchulus*, Longidoridae e *Xiphinema* não foram constatados em Argissolo. Em contraste, o grupo Belonolaimidae foi detectado apenas em campo de cultivo com solo do tipo Latossolo e com uma frequência de 0,4% e os nematoides dos grupos *Hoplolaimus*, Longidoridae, *Paratylenchus*, *Rotylenchulus* e *Xiphinema* foram identificados com frequência abaixo de 0,7% no Cambissolo e Latossolo (**Tabela 3**). Embora apresente uma densidade alta em todos os tipos de solo, os dos gêneros *Helicotylenchus* tiveram uma densidade populacional média de fitonematoides ao menos três vezes superior em Argissolo (540 nematoides/ 100 cm<sup>3</sup>) comparado com o Cambissolo (132 nematoides/ 100 cm<sup>3</sup>) e Latossolo (86 nematoides/ 100 cm<sup>3</sup>) (**Figura 6**). Uma tendência similar foi observada na densidade média do gênero *Pratylenchus* com um número médio de nematoides de 83 no solo tipo Argissolo comparado com 27 em Latossolo e 25 nematoides/ 100 cm<sup>3</sup> em Cambissolo. Entretanto, todos os tipos de solo apresentam uma densidade média inferior a 100 nematoides em 100 cm<sup>3</sup> de solo. Por outro lado, *Rotylenchulus* e Criconematidae foram encontrados em maior densidade no solo do tipo Latossolo com abundância média de 484 e 64 nematoides/ 100 cm<sup>3</sup>, respectivamente. Não observou-se diferenças significativas na abundância média de Criconematidae em Cambissolo e Argissolo. Os gêneros *Aphelenchus* e *Aphelenchoides* demonstram uma densidade média similar entre os três tipos de solos com valores variando de

7 a 31 nematoides/ 100 cm<sup>3</sup>. Os grupos com menor expressão (*Paratylenchus*, *Meloidogyne*, *Trichodorus*, Belonolaimidae, *Heterodera*) apresentaram uma maior densidade em solos do tipo Latossolo e Cambissolo, embora não alcancem uma densidade média de 40 nematoides/ 100 cm<sup>3</sup> de solo (**Figura Suplementar 2**).

Dentre as sequências de cultivo implementadas no estado de Goiás, a estratégia SM contemplou uma maior diversidade de grupos morfológicos comparado com o sistema SMO, com um total de 21 e 17 grupos, respectivamente. Os grupos *Heterodera*, Longidoridae, Belonolaimidae e *Xiphinema* não foram detectados na abordagem de cultivo SMO. A estratégia de cultivo SM apresentou uma frequência expressiva de nematoides do gênero *Helicotylenchus* em 92% dos campos de cultivos, comparado com 63% na sequência SMO. Os demais grupos morfológicos tiveram uma frequência similar em sequências de cultivos do tipo SM e SMO (**Figura 7A**). De forma geral, a densidade populacional dos fitonematoides foi mais elevada quando realizou-se a sucessão SM (**Figura 8**). Por exemplo, o grupo *Rotylenchulus* exibiu uma redução populacional expressiva quando comparou o sistema de sucessão SM (498 nematoides/100 cm<sup>3</sup>) com o SMO (251 nematoides/100 cm<sup>3</sup>). Um similar padrão foi observado para o grupo morfológico *Paratylenchus* com 43 nematoides/ 100 cm<sup>3</sup> em SM e uma densidade média de 13 nematoides/ 100 cm<sup>3</sup> de solo na sequência SMO. No entanto, o contrário foi observado para as populações de *Hemicycliophora*, onde demonstrou uma densidade média de 10 nematoides/ 100 cm<sup>3</sup> em SM e 33 nematoides/100 cm<sup>3</sup> em SMO.

Com relação ao sistema de plantio, o plantio direto teve o maior número de grupos, seguido pelo plantio mínimo e convencional, com um total de 20, 19 e 16 grupos. Os nematoides do gênero *Hoplolaimus* só não foi observado no sistema de plantio direto; *Heterodera*, *Hoplolaimus*, Longidoridae, Belonolaimidae e *Paratylenchus* no convencional; e Belonolaimidae e *Xiphinema* no cultivo mínimo (**Tabela 4**). Com exceção aos grupos Criconematidae (56%) e *Rotylenchulus* (21%) que tiveram maior frequência em campos onde se implementou o sistema convencional, os demais grupos apresentaram uma maior frequência no sistema de plantio direto (**Figura 7B**). Os dos gêneros *Helicotylenchus* e *Pratylenchus* estavam presentes em todos os campos em que implementaram plantio direto, seguido por *Aphelenchus* em 82% e Criconematidae em 22% das áreas. Estes mesmos grupos morfológicos tiveram uma menor frequência em campos no sistema convencional com *Pratylenchus* e *Aphelenchus* presentes em 73% dos campos, seguidos por *Helicotylenchus* em 65% (**Figura 7B**). A densidade média de nematoide no solo de alguns grupos foi afetada pelo sistema de plantio (**Figura 9**). Um exemplo é o impacto populacional do principal grupo de

fitonematoídes do estado. Por exemplo, a população de *Helicotylenchus* no sistema de plantio direto apresentou uma densidade populacional média de 179 nematoídes/100 cm<sup>3</sup>, comparado com 114 e 97 nematoídes/ 100 cm<sup>3</sup> no sistema convencional e mínimo, respectivamente. A densidade populacional entre os fitonematoídes de menor importância, como *Hoplolaimus*, Longidoridae e *Scutellonema*, não sofreu drásticas mudanças entre os diversos tratamentos culturais.

### **Heterogeneidade espacial de fitonematoídes em campos de milho**

Os grupos *Aphelenchoides*, *Aphelenchus*, Criconematidae, *Helicotylenchus*, *Pratylenchus* e *Rotylenchulus* foram destacados como os mais expressivos nos parâmetros de incidência, frequência e abundância em campos de cultivo do estado de Goiás. Avaliou-se a variação da incidência desses nematoídes nas diferentes mesorregiões e municípios no estado de Goiás. Foi possível observar uma maior heterogeneidade espacial com relação a incidência de fitonematoídes em nível de municípios (0 - 15,25), uma vez que não foi possível observar efeito aleatório das diferentes mesorregiões (**Tabela 5**). A incidência dos nematoídes parasitas de plantas apresentou variação na heterogeneidade entre os grupos de fitonematoídes identificados dentro da variável município. A variação estimada em nível de município ( $\sigma^2_M$ ) para a incidência de nematoídes do gênero *Rotylenchulus* (15,25) foi alta comparada com os da Criconematidae (1,12), *Aphelenchoides* (0,03) e *Aphelenchus* (0,03). Ou seja, o gênero *Rotylenchulus* foi o grupo mais variável entre os municípios (**Figura 10**). Por outro lado, os gêneros *Helicotylenchus* e *Pratylenchus* não tiveram variações em termo de heterogeneidade da incidência de nematoídes em nível municipal.

A heterogeneidade da abundância dos fitonematoídes foi analisada dentro da variável região, município e campos amostrados (**Tabela 6 e Figura 11**). Similar a resposta de heterogeneidade com relação à variável incidência, o menor nível de heterogeneidade para a maioria dos grupos morfológicos avaliados ocorreu entre as mesorregiões com as variâncias significativamente não diferentes de zero. Com relação à variação da abundância a nível de município entre as mesorregiões, o Criconematidae teve a maior heterogeneidade populacional (0,39), seguido por *Helicotylenchus* (0,30), *Aphelenchoides* (0,28), *Aphelenchus* (0,06), *Pratylenchus* (0,01) e *Rotylenchulus* com variância zero. O efeito aleatório de campos dentro do município na mesma mesorregião ( $\sigma^2_C$ ) foi o fator espacial que melhor explicou a variação da densidade populacional dos fitonematoídes com os parâmetros de variância estimados entre 0,09 e 3,38 (**Tabela 6**). A maior variância na densidade populacional em nível

de campos ( $\sigma^2_c$ ) foi observada para o gênero *Rotylenchulus* (3,38), seguido por Criconematidae (1,10), *Helicotylenchus* (1,07), *Aphelenchus* (0,66), *Aphelenchoides* (0,39) e *Pratylenchus* (0,09).

### **Distribuição espacial de populações de fitonematoides parasitas de milho em categorias de risco de dano**

Devido a ausência de pesquisas que determine o nível populacional dos fitonematoides parasitas de plantas que prejudiquem o desenvolvimento e produtividade do milho no estado de Goiás, três categorias de danos ([0] Sem risco, [1] Risco insignificante e [2] Moderado-alto risco) para o nematoide das lesões radiculares, espiralado e, um membro da família Criconematidae proposto por Tylka et al. (2011) e Fleming et al (2016) foram usadas como padrão para estimar o número de campos e municípios que apresentam potencial de perda de produtividade. A distribuição de amostras entre as três categorias de risco apresentou uma diferença de padrão entre os diferentes grupos de nematoides no estado de Goiás (**Figura 12**). Os nematoides do gênero *Helicotylenchus* se apresentaram em mais de 50% dos campos amostrados (166) com populações em nível de dano 2 (**Figura 12A**). O grupo *Helicotylenchus* apresentou a menor proporção de campos amostrados na categoria sem risco de dano (11%). Em complemento, o grupo *Pratylenchus* teve uma proporção de 43% (139) das amostras sob a categoria de risco 2 (**Figura 12B**). A família Criconematidae exibiu uma proporção de 4% (13) dos campos na categoria de risco 2 (**Figura 12C**).

### **Heterogeneidade de fitonematoides em diferentes tratos culturais**

A razão da chance (OR) foi calculada para determinar a probabilidade de encontrar os três principais grupos morfológicos nos diferentes tratos culturais realizados no estado de Goiás. Para efeito de comparação, utilizamos como referência a rotação SMO e o plantio convencional. Em resumo, se o OR for igual a 1 significa que existe a mesma probabilidade de encontrar um determinado grupo morfológico nos sistemas de plantio mínimo/direto do que no convencional ou na sequência de cultivo SM do que na sequência SMO. Caso o valor da OR seja inferior ou superior a 1 significa que a chance de encontrar o nematoide são maiores e menores no sistema de referência (plantio convencional e a rotação SMO). Para todos os grupos morfológicos analisados constatou-se uma  $OR > 1$ , o que significa que os nematoides parasitas de plantas foram mais propensos a serem encontrados no sistema de rotação SM e no sistema de plantio mínimo/direto do que na sequência de cultivo SMO e

plantio convencional (**Figura 13**). No que diz respeito ao sistema de sequência de culturas, espécies do gênero *Helicotylenchus* e *Pratylenchus* têm 5,00 e 3,08 vezes mais chance de estarem presentes em campos com sequência SM comparado com o sistema de rotação SMO. As chances de encontrar os demais grupos morfológicos de fitonematoides (*Aphelenchus*, *Aphelenchoides*, Criconematidae e *Rotylenchulus*) é aproximadamente duas vezes maior (O.R. de 2,05; 1,53; 2,61 e 2,84) em campos com rotação SM. Ou seja, a chance de se encontrar espécies de *Aphelenchus*, *Aphelenchoides*, Criconematidae e *Rotylenchulus* é 105 ([2,05-1] x 100), 53 ([1,53-1] x 100), 161 ([2,61-1] x 100) e 184% ([2,84-1] x 100) respectivamente maior em sistema de rotação SM do que de estarem presentes em campos que se aplica o sistema SMO (**Figura 13A**). Similarmente, um campo que implementou nos últimos cinco anos o sistema de plantio mínimo/direto é 47,59; 7,90; 7,51; 2,50; 1,49 e 1,03 vezes mais propenso encontrar espécies de Criconematidae, *Helicotylenchus*, *Rotylenchulus*, *Aphelenchus*, *Pratylenchus* e *Aphelenchoides* do que no sistema convencional, respectivamente (**Figura 13B**).

#### **Associação entre tipo de solo e presença de fitonematoides**

A chance de um determinado fitonematoide estar presente em Cambissolo e Argissolo foram altos em comparação ao solo referência do tipo Latossolo, com exceção do *Aphelenchoides* e Criconematidae (**Figura 14**). O grupo Criconematidae demonstrou a maior probabilidade de estar presente em Cambissolo do que Latossolo (OR = 5,14), entretanto, teve a menor chance de estar presente em argissolo dentre os demais grupos morfológicos em comparação ao Latossolo (OR = 0,79). Por outro lado, o grupo *Aphelenchus* teve aproximadamente duas vezes mais chance de ser encontrado em Argissolo (OR = 5,23) do que em Cambissolo (OR = 2,08) em comparação ao Latossolo. Os demais grupos morfológicos como *Helicotylenchus*, *Pratylenchus* e *Rotylenchulus* apresentaram valores acima do limiar para ambas as razões, com 1,31; 2,24 e 1,27 vezes mais chances de ser encontrados em Argissolo e 2,80; 2,02 e 3,72 vezes mais em Cambissolo em comparação ao Latossolo. Entretanto, os fitonematoides do grupo *Aphelenchoides* tiveram a maior chance de serem encontrados em Latossolo (OR = 0,90) e Cambissolo (OR = 1,36).

#### **Associação entre práticas culturais, tipos de solos, sequência de cultivo e covariáveis contínuas na incidência dos nematoides**

Observou-se uma variação da população de fitonematoides em função de algumas variáveis exploratórias estudadas. A princípio, em decorrência dos resultados da análise de multicolinearidade, as variáveis silte e EC foram removidas dos modelos logísticos ordinários associados com tipo de plantio, sequência de cultivo, altitude, argila, areia e pH ajustados neste estudo devido à similar resposta dessas várias a percentagem de areia e pH, respectivamente. O ajuste do modelo de regressão logística binária demonstrou pouca influência do trato cultural na heterogeneidade das espécies presente em um campo, não sendo possível detectar a influência da variável tipo de plantio sobre nenhum grupo morfológico e apenas a influência da rotação de cultura no grupo *Helicotylenchus*. Por outro lado, a composição física do solo (percentagem de areia e da argila) foram as variáveis que mais influenciaram a presença ou ausência de grupos de fitonematoides. Por exemplo, não foi possível observar o efeito da percentagem de areia apenas no grupo de indivíduos do gênero *Pratylenchus* e de argila em *Pratylenchus* e *Aphelenchus* (**Tabela 7; Figura Suplementar 3 e 4**). As variáveis pH e tipo de solo afetaram a ocorrência de dois grupos morfológicos cada uma. O efeito altitude apresentou valores significativos apenas para Criconematidae (**Figura Suplementar 5**); pH teve efeito em populações de *Aphelenchoides* e *Pratylenchus* (**Figura Suplementar 6**), enquanto o tipo de solo mostrou influência em Criconematidae e *Helicotylenchus*. Em resumo, a família Criconematidae e os gêneros *Pratylenchus* e *Aphelenchus* foram os grupos mais e menos afetados pelas variáveis analisadas neste trabalho. Quatro variáveis afetaram a família Criconematidae ( $P < 0.05$ ) e uma os grupos *Pratylenchus* e *Aphelenchus* (**Tabela 7**).

### **Influência de práticas culturais, tipos de solos, sequência de cultivo e variáveis contínuas sobre a probabilidade de alcance do limiar de dano**

A probabilidade de um determinado grupo morfológico alcançar uma população capaz de exceder o limite de dano na cultura do milho teve seus valores estimados a partir do ajuste dos modelos de regressão logística ordinais. Os valores de probabilidade representam a influência da variável exploratória sobre a chance dos nematoides alcançarem a categoria de risco 2 (**Tabela 8**). Além disso, os valores estimados dos coeficientes altitude, pH, areia e argila representam o incremento unitário em escala logarítmica da variável exploratória na chance do nematoide exceder o limiar de dano populacional em campo.

Similar aos resultados da associação das variáveis aleatórias sobre a incidência de fitonematoides, as características físicas do solo (areia, silte e tipo de solo) também foram as

variáveis que mais interferiram na ocorrência de fitonematoides. A abundância populacional dos grupos *Helicotylenchus* e da Criconematidae foi afetada por propriedades físicas do solo (**Tabela 8**). Uma relação positiva significativa foi observada entre o log-chance e percentagem de areia e argila do solo para nematoides dos grupos *Pratylenchus* e Criconematidae, onde o aumento de 0,004 - 0,006 e 0,04 - 0,10 unidades de probabilidade logística dos grupos estarem presente por aumento na percentagem de areia e argila para *Pratylenchus* e Criconematidae, respectivamente. (**Tabela 9** e **Figuras Suplementares 7 e 8**).

Além do fator areia e argila, a altitude e tipo de solo também influenciam o nível populacional destes grupos. A altitude demonstrou influenciar significante somente sobre o desenvolvimento populacional de *Helicotylenchus* e Criconematidae ( $P < 0,05$ ). O pH do solo expressou influência significativa sobre a chance do aumento da população de indivíduos do grupo *Helicotylenchus* e *Pratylenchus* a exceder a abundância de risco moderado a severo de dano (**Figura Suplementar 9**). A inclinação de log pH varia entre -0,042, -0,428 e 0,071, ou seja, significa que para cada unidade de aumento do pH haverá uma redução entre 0,042 a 0,428 da população dos nematoides *Helicotylenchus* e *Pratylenchus*, e um aumento de 0,071 para Criconematidae.

A sequência de cultivo interfere diretamente no aumento acentuado da população do grupo *Helicotylenchus* possibilitando estes alcançarem o limiar de dano classificado como moderado a severo risco (**Tabela 8 e 9**). Por outro lado, os grupos *Pratylenchus* e família Criconematidae não tiveram sua população influenciada pela estruturação de culturas em campo. Todavia, os grupos *Helicotylenchus*, *Pratylenchus* e Criconematidae apresentaram 1,29, 1,05 e 3,90 vezes mais probabilidade de atingir o limiar de dano em campos com implementação da sucessão SM em comparação a SMO, respectivamente.

Os sistemas de plantio tiveram efeitos significativos apenas no aumento populacional para o grupo *Pratylenchus* ( $P < 0,05$ ) (**Tabela 8**). A chance de atingir a categoria de risco moderado-severo dos grupos *Helicotylenchus*, *Pratylenchus* e Criconematidae é 1,59; 1,04 e 1298,32 vezes maior quando implementa-se o sistema de plantio mínimo ou direto, respectivamente (**Tabela 9**). Em relação às chances de sucesso desses grupos morfológicos em diferentes tipos de solos, foi possível observar um efeito significativo sobre o limite populacional de dano neste estudo apenas para Criconematidae. O grupo *Helicotylenchus* demonstrou uma maior chance de causar danos em solos do tipo Cambissolo (OR = 1.40) e menor em Argissolo (OR = 0,89) em comparação ao Latossolo. Por outro lado, o *Pratylenchus* demonstrou a maior probabilidade de alcançar o limiar de dano em solos do tipo

Latossolo, apresentando valores abaixo de zero em ambas as comparações (**Tabela 9**). Criconematidae teve a menor probabilidade de exceder o limiar de dano em Latossolo, pois apresentou valores acima de 1 (OR >1) para ambas as razões.

## DISCUSSÃO

O conhecimento dos nematoides parasitas de plantas presentes em campos de cultivo de milho se torna necessário para um manejo adequado. Até o presente momento, a identificação e quantificação em larga escala de fitonematoides foi descrita em um número restrito de campos de soja, café, banana, uva, morango, hortaliças e frutíferas (Dias-Arieira et al., 2010; Divers et al., 2019; Barbosa et al., 2020; Monteiro et al., 2020; Krezanoski et al., 2020; Marquez et al., 2021). O número de estudos é ainda menor quando se analisa a heterogeneidade e o comportamento destes organismos sobre a influências das variáveis físico-químicas do solo e a comparação do comportamento em regiões com clima tropical e temperado. Um estudo similar a este foi realizado por Simon et al (2008a) e (2008b) em campos comerciais de cultivo de milho no estado de Ohio e Illinois, Estados Unidos. Dessa forma, a incidência, frequência, abundância e impacto de fatores físico-químicos e tratos culturais do solo dos grupos morfológicos de fitonematoides foram comparados entre a região tropical do Brasil e temperada dos Estados Unidos para os campos de milho situados em diferentes condições climáticas.

O presente estudo detectou um total de 21 grupos morfológicos em campos de cultivo de milho no estado de Goiás. Resultados similares foram observados em um levantamento de nematoides parasitas de plantas realizado em campos de milho na Nigéria que observou 22 grupos morfológicos de fitonematoides (Jibrin et al., 2014). Por outro lado, Simon et al. (2018a) e Han et al (2021) observaram apenas 10 grupos morfológicos em campos de milho comercial nos Estados Unidos. A maior diversidade de espécies de fitonematoides em áreas de cultivo em regiões tropicais é esperada em decorrência da constante permanência de uma cultura na área de cultivo, alto volume de palhada durante e entre as estações de cultivo e a ausência abrupta de mudanças climáticas que possibilitam a manutenção de populações de nematoides (Sikora et al., 2018). Todos os grupos detectados nos Estados Unidos foram encontrados no estado de Goiás. Os indivíduos do grupo morfológico *Aphelenchoides*, *Aphelenchus*, Criconematidae, *Helicotylenchus*, *Pratylenchus* e *Rotylenchulus* foram os nematoides mais frequentes e abundantes no estado de Goiás. Os grupos *Aphelenchus*, *Aphelenchoides*, Criconematidae, *Hemicycliophora*, *Hoplolaimus*, Longidoridae,

Belonolaimidae, *Tylenchorynchus*, *Xiphinema*, *Trichodorus*, *Paratrichodorus*, *Paratylenchus*, *Scutellonema*, *Rotylenchus* e Tylenchidae ainda não haviam sido relatados em campos de milho no Brasil, mas muito já foram relatados em áreas nativas do Cerrado no Brasil (Huang et al., 1996). Em Ohio, *Helicotylenchus*, Tylenchidae e *Pratylenchus* foram os grupos morfológicos de fitonematoides de maior frequência (Simon et al., 2018a), entretanto, não constataram a presença do grupo *Meloidogyne* spp. como no estado de Goiás. Além disso, os nematoides das espécies *M. incognita*, *M. javanica*, *M. arenaria* e *M. hapla* têm sido associados a cultura do milho (De Waele & Jordaan, 1988; Jordaan et al., 1989; Keetch & Buckley, 1984).

Os nematoides dos gêneros *Helicotylenchus* e *Pratylenchus* foram os mais prevalentes na cultura do milho nos estados de Goiás e Ohio (Simon et al., 2018a). A ampla distribuição de espécies de *Helicotylenchus* tem sido relatada em diferentes culturas, não apenas milho, e diversos locais do mundo como Canadá, México, Peru, Suécia, Islândia e Alemanha (Medina et al., 2017; Schmidt et al., 2017; Del Prado-Vera et al., 2018). A predominância de *Helicotylenchus* spp. em escala mundial pode ser explicada por sua alimentação polífaga e estratégia endo, semi-endo e ectoparasítica, conseqüentemente, sofre uma menor influência do ambiente ao estar no interior da raiz, onde tem sua entrada e multiplicação favorecida por nematoides endoparasitas com maior agressividade. Os nematoides deste gênero estiveram presentes em 86% dos campos de milho amostrados e com uma abundância variando de 180 nematoides/100 cm<sup>3</sup>, sendo 51 % desses campos classificados na classe de risco moderado a severo de dano como proposto por Tylka et al. (2011). Uma alta incidência e ampla distribuição de indivíduos do gênero *Helicotylenchus* também foi observado no estado de Ohio com uma abundância variando de 0 a 990 nematoides/ 100 cm<sup>3</sup>, no entanto, com uma densidade relativamente baixa (90 nematoides/100 cm<sup>3</sup>). Aparentemente, um maior número de amostras foi classificado na classe de moderado a severo risco de dano em campos de milho em regiões tropicais comparado com regiões temperadas (Simon et al., 2018b), possivelmente em decorrência de mudanças climáticas abruptas e a ausência dos cultivos constantes ao longo do ano como no Brasil.

Os nematoides do gênero *Pratylenchus* também apresentaram alta incidência e densidade populacional em comparação aos demais fitonematoides, assim como reportado no estado de Ohio (Simon et al., 2018). A alta abundância de indivíduos do gênero *Pratylenchus* em diferentes campos de cultivo e variada faixa de temperatura pode ser explicada por sua capacidade de colonizar eficientemente a cultura do milho e também as culturas usadas em

rotação, como: soja, pastagem, sorgo, tomate, feijão e trigo, bem como a capacidade de sobreviver em palhada e em estado de anidrobiose (Ribeiro et al., 2020). Dos campos amostrados, 139 campos em 22 municípios apresentam populações em nível de moderado a alto risco de dano deste nematoide no estado de Goiás. Similar porcentagem de campos com risco de dano para esse grupo foi observada em Ohio (Simon et al., 2018b). Este resultado demonstra os benefícios das culturas utilizadas em rotação com o milho para o aumento da população de espécies do gênero *Pratylenchus*. Os nematoides da família Criconematidae se apresentaram em 4% das amostras com populações acima de 600 nematoides/100 cm<sup>3</sup> de solo, entretanto, pouco estudos são direcionados para seus danos em culturas como o milho. Embora o estudo tenha encontrado outros grupos de fitonematoides capazes de infectar raízes de milho, a densidade populacional em todos os campos é pouco expressiva para alcançar o limiar de dano sugerido por Tylka et al. (2011) e Fleming et al. (2016). Por outro lado, *Aphelenchus* e *Aphelenchoides* estavam presentes em um elevado número de campos e em alta abundância, no entanto, trata-se de nematoides micófagos, patogênicos a outras culturas e nem sempre sendo detectados em associação às raízes do milho. A presença de nematoides do gênero *Rotylenchulus* pode ser explicada por serem capazes de infectar plantas daninhas presentes em campos de cultivo e plantas em sucessão com o milho (Ward et al., 2013; Molin et al., 2016).

Quando se analisou a heterogeneidade espacial dos principais grupos de fitonematoides no estado de Goiás em nível de campo, município e mesorregião por modelos lineares generalizados mistos observou-se que a incidência e densidade populacional foram mais variáveis nos níveis mais baixo, ou seja, entre municípios e campos, respectivamente. Este achado é compatível com o resultado obtido por Simon et al. (2018a), logo assumimos que a variabilidade de fitonematoides encontrada em campos de cultivo seja diretamente influenciada pelas características físico-químicas e tratos culturais específicos de cada área, tanto em regiões tropicais quanto em temperadas. Essa variabilidade também foi observada por Gavassoni et al. (2001). De fato, por meio de modelos de regressão logística observou-se que a sequência de rotação, tipo de solo, pH e conteúdo de areia e argila interferem na ocorrência dos fitonematoides.

No que diz respeito aos tratos culturais, o plantio direto/mínimo e a sequência de cultivo SM influenciam diretamente na ocorrência e abundância de importantes fitonematoides detectados em campos de milho. Os nematoides espiralados são mais prováveis de ocorrerem e de chegarem a uma densidade populacional de risco moderado a

severo em sequência de cultivos SM. O grupo *Heterodera* por apresentar uma maior afinidade com a cultura da soja não foi encontrado em campos em rotação com outras culturas como feijão, sorgo, tomate, cenoura e brachiaria, enquanto a sua presença em campos de milho pode ser justificada pela sua capacidade de permanecer em estruturas de resistência como o cisto (Strom et al., 2020). Além disso, embora o sistema de plantio não interfira na presença de espécies de *Pratylenchus*, o sistema de plantio mínimo/direto favorece o aumento populacional destes organismos. O efeito insignificante da sequência de cultivo e tipo de plantio na incidência e densidade populacional dos demais grupos morfológicos reforça um comportamento variado desses diferentes nematoides frente às variáveis ambientais. Além disso, o reduzido tempo de rotação de soja-milho com outras culturas, como sorgo, feijão braquiária e cenoura dos campos amostrados, ou o tamanho amostral reduzido de campos podem explicar essa não significância. Não é nenhuma novidade que o plantio direto/mínimo tenha favorecido o aumento da população de espécies do gênero *Pratylenchus*, que apresenta um alto grau de polifagia, embora estudos para a elucidação deste tipo de questão permaneça escasso (Inomoto et al., 2017). Machado et al. (2022) também constataram um aumento da densidade média de indivíduos do gênero *Pratylenchus* em campos de soja com adoção do plantio direto comparado com campos que implementaram o sistema convencional. A diferença é que o plantio direto não afetou a abundância de outras espécies de fitonematoides com o mesmo grau de polifagia, como os do gênero *Helicotylenchus*. No entanto, embora alto grau de polifagia, hipotetiza-se que *Helicotylenchus* spp. apresentam uma maior preferência e multiplicação na cultura soja (Hodda et al. 2012). Portanto, o nosso estudo dá suporte a este trabalho uma vez que o plantio direto não afeta a densidade populacional de *Helicotylenchus*. Outros resultados mostram uma maior abundância de espécies de *Helicotylenchus* em campos com cultivo exclusivo de milho (Simon et al., 2018a). Contudo, Mashavakure et al. (2018) verificaram que o campos com plantio convencional teve uma maior densidade populacional de espécies de *Pratylenchus* comparado com o sistema mínimo e direto, possivelmente devido a alta resiliência destes organismos a distúrbio no solo. Estudos posteriores deverão ser realizados para avaliar a influência da cultura da soja na população de espécies de *Helicotylenchus* e explorar o efeito da interação das variáveis preparo do solo e rotação de culturas na densidade populacional deste fitonematoide (Machado et al., 2019).

Constatou-se também uma maior chance de ocorrer os fitonematoides de maior importância econômica no milho em solos do tipo Cambissolo e Argissolo comparado com Latossolo. Uma associação positiva foi observada para o tipo de solo e a presença de

nematoide dos grupos morfológicos Criconematidae e *Helicotylenchus*, entretanto, esse fator influenciou apenas a abundância do grupo Criconematidae. Atualmente, o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) diferencia a classe de solos de acordo com as variáveis de cor, textura, porosidade e quantidade de matéria orgânica (Santos et al., 2018). Os solos tipo Latossolo caracterizam-se por serem solos em geral com alto teor de argila, alta acidez, alto teor de alumínio e baixa fertilidade comparado aos Cambissolo e Argissolo. O Argissolo apresenta horizontes superficiais mais arenosos com horizonte B de alta textura argilosa, enquanto que o Cambissolo é um solo com alta atividade de argila e saturação de base, pouco evoluídos e rasos. Estudos sobre a influência de tipos de solos sobre a presença dos três nematoides são necessários, pois *Helicotylenchus* spp. tiveram uma menor chance de exceder o limiar de dano em Argissolo, porém apresentaram uma maior densidade média nesse solo. Em complemento, o grupo Criconematidae teve uma maior densidade em Latossolo, porém, maior frequência em Argissolo. Por outro lado, o grupo *Pratylenchus* demonstrou uma maior afinidade ao solo do tipo Latossolo, demonstrando uma maior chance de alcançar o limiar de dano ao apresentar valores abaixo de zero para ambas as comparações de Cambissolo e Argissolo. A maior especificidade de *Pratylenchus* em campos sob o Latossolo resulta de sua estabilidade em ambientes com solos ácidos e baixa saturação de bases (Silva et al., 2005; Franchini et al., 2018; Al-Ghamdi et al., 2021; Dias-Arieira et al., 2021), pois os demais solos como Argissolo e Cambissolo distróficos apresentam pH mais elevados e saturação de bases maior. A maior densidade do grupo Criconematidae em Latossolo pode ser explicada pelo maior número e tempo de cultivo em campos sob solos do tipo Latossolo em Goiás, enquanto a maior chance de exceder o limiar de dano em Argissolo e Cambissolo a uma maior afinidade em solos com alta saturação de base e alumínio (Wallace et al., 1993). *Helicotylenchus* spp. por apresentarem um maior período de tempo como ectoparasita sofre uma negativa influência da argila que está em maior concentração em Argissolo, enquanto em Cambissolo por ser um solo raso, baixo desenvolvimento pedológico e a distância para encontrar tecidos vegetais são menores em comparação ao Latossolo (Santos et al., 2018).

A interação entre pH e os nematoides identificados em milho também foi significativa e a mudança unitária dessa variável reduziu a probabilidade do nematoide das lesões radiculares e o nematoide espiralado, e influenciou a probabilidade de Criconematidae exceder o limiar populacional. Simon et al. (2018b) e Al-Ghamdi (2021) também constataram uma redução na incidência e abundância de indivíduos do gênero *Pratylenchus* em campos com o aumento de pH no solo. Na China, a população de *Helicotylenchus* e *Pratylenchus*

também teve a abundância correlacionada negativamente com o incremento do pH em solo (Zhao et al., 2022). A influência direta desse fator sobre o comportamento e desenvolvimento populacional desses nematoides pode ser hipotetizada pela alteração na regulação osmótica do nematoide, disponibilidade de nutrientes no solo e conseqüentemente mudanças bioquímicas e físicas na região da rizosfera, sabidamente um ambiente com alta atividade de microrganismos (Korthals et al., 1996; Oka, 2010; Simon et al., 2018b).

As variáveis areia e a argila influenciaram a incidência do maior número de grupos e exerceu efeito somente sobre a capacidade dos nematoides da Criconematidae e *Helicotylenchus* excederem o limiar de dano. *Pratylenchus* foi o único grupo que não teve sua população afetada pelo conteúdo de areia e argila no solo em comparação aos nematoides ectoparasitas, como *Aphelenchoides*, *Aphelenchus*, Criconematidae, *Helicotylenchus*, e o semi-endoparasita *Rotylenchulus*. Um efeito positivo similar da areia sobre a abundância de *Pratylenchus* em soja também foi relatado por Dias-Arieira et al. (2021). A correlação positiva entre a areia e a abundância de *Pratylenchus* tem sido atribuída pela baixa fertilidade de solos arenosos, menor retenção de água e conseqüentemente um maior impacto do nematoide sobre a cultura do milho, resultando em uma maior abundância em comparação a campos com plantas sob uma maior estabilidade de nutrientes (Franchini et al., 2018; Leiva et al., 2020). Entretanto, *Rotylenchulus* possui uma alimentação do tipo semi-endoparasita e mais estudos são necessários para compreender a influência do conteúdo de areia e argila sobre seu desenvolvimento em campo. Além disso, Chen et al. (2012) relataram o efeito negativo da percentagem da areia na abundância de *Pratylenchus* e *Helicotylenchus*, entretanto, o levantamento foi realizado em campos de 21 diferentes espécies de plantas, o que pode ter eventualmente desfavorecido o crescimento populacional de *Pratylenchus* mesmo em solos com maior teor de areia em Minnesota, Estados Unidos. Em complemento, em campos de batata doce não foi observado a influência significativa do conteúdo de argila sobre o desempenho de nematoides como o *Aphelenchoides*, *Aphelenchus*, *Helicotylenchus*, *Pratylenchus* e *Rotylenchulus* (Karuri et al., 2017), e possivelmente outras propriedades possam estar favorecendo o desenvolvimento desses nematoides. Os fitonematoides ectoparasitas migradores dependem de uma movimentação constante para encontrar sítios de alimentação, enquanto os endoparasitas migradores ao encontrar tecidos vegetais permanecem localizados no interior das plantas e eventualmente podem não sofrer influência da distribuição de variáveis ambientais (Ankrom et al., 2020).

O gradiente de altitude dos campos de milho foi significativo para a incidência de Criconematidae e *Rotylenchulus*. Em um levantamento dos diferentes grupos tróficos de nematoides presentes em campos entre 500 a 3000 m de altitude no Japão por Dong et al (2017) foi constatado uma alta diversidade de nematoides entre 1000 a 2000 m. Entretanto, a maior diversidade observada em Goiás mostrou ser entre 800 a 1000 m e altitudes acima de 1000 m foi identificada uma redução populacional desses fitonematoides. Similarmente, Afzal et al. (2021) observaram uma redução na comunidade de nematoides na faixa de altitude entre 1000 a 2500 m, obtendo um valor de inclinação negativo da diversidade com o aumento de altitude. Em ambos estudos acima, uma redução na abundância dos nematoides foi relatada com o aumento no gradiente de altitude. A mudança populacional dos nematoides em campos com aumento desse gradiente ecológico pode ser justificado pela redução na temperatura, mudanças na biomassa vegetal ao longo da elevação e, conseqüentemente, uma condição desfavorável para o desenvolvimento dos fitonematoides (Nisa et al., 2021). Todavia, embora essa condição ecológica possa eventualmente impedir que o nematoide consiga ter um metabolismo integralmente ativo e possa desempenhar sua função trófica no ambiente, seu baixo efeito significativo sobre os nematoides identificados neste estudo sugere que a variável isolada não fornece mudanças significativas em comparação ao pH, areia e argila e análises desse comportamento em campos mais elevados são necessários.

## CONCLUSÃO

Em conclusão, modelos lineares de efeito misto foram utilizados para a quantificação da heterogeneidade de nematoides sob o efeito das escalas espaciais de solo, municípios e campos amostrados, enquanto os modelos logísticos foram ajustados para caracterização da relação entre a presença e abundância dos nematoides e variáveis edáficas do solo e ecológicas. Esse conjunto de modelos possibilitou destacar a variabilidade existente entre diferentes escalas espaciais para os grupos morfológicos identificados, e mensurar o efeito positivo ou negativo exercido de propriedades químicas, físicas e altitude dos campos sobre a chance da presença e alcance do limiar de dano de fitonematoides em diferentes práticas culturais e tipos de solos. Todavia, vários estudos apenas têm implementado comparações simples de grupos ou análise de componentes principais, e conseqüentemente de forma indireta podem estar negligenciando essas importantes informações sobre tais patógenos. Os nematoides dos gêneros *Helicotylenchus* e *Pratylenchus* possuem predominância em campos de cultivo de milho no estado do Goiás. Os campos com cultivo desse cereal sob a sucessão

constante com a soja e o plantio com pouco revolvimento do solo estão favorecendo a multiplicação desses nematoides. A alta variabilidade populacional dos fitonematoides é observada em nível de campo indicando que variáveis edáficas do solo e ecológicas podem estar diretamente ligadas a esta resposta. As práticas culturais e tipos de solos isolados mostraram ser pouco influentes na redução desses nematoides em campo, em comparação às propriedades do solo como pH, areia e argila que exerceram um impacto expressivo no desenvolvimento populacional dos nematoides. Os fitonematoides do gênero *Pratylenchus* demonstraram uma menor sensibilidade às variáveis físicas do solo, esse resultado levanta a hipótese de que os endoparasitas eventualmente sofrem uma menor influência do ambiente em comparação aos semi-endo e ectoparasitas. Portanto, a utilização de modelos de efeito misto e logísticos mostram ser potenciais abordagens para quantificar e caracterizar o comportamento de nematoides em diferentes ambientes.

## REFERÊNCIAS

AFZAL, S., NESAR, H., IMRAN, Z. & AHMAD, W. (2021). Altitudinal gradient affect abundance, diversity and metabolic footprint of soil nematodes in Banihal-Pass of Pir-Panjal mountain range. *Scientific Reports*, 11(1), 16214.

AL-GHAMDI, A. A. M. (2021). Relationship between nematodes and some soil properties in the rhizosphere of banana plants. *International Letters of Natural Sciences*, 82, 1–12.

ANKROM, K. E., FRANCO, A. L. C., FONTE, S. J., GHERARDI, L. A., DE TOMASEL, C. M., ANDRIUZZI, W. S., SHAW, E. A., SALA, O. E. & WALL, D. H. (2020). Ecto- and endoparasitic nematodes respond differently across sites to changes in precipitation. *Oecologia*, 193(3), 761–771.

BARBOSA, D. M. C. DO R., CARDOSO, W. J., FERNANDES, M. DE F. G., ROCHA, F. DA S. & MUNIZ, M. DE F. S. (2020). Plant-parasitic nematodes associated with vegetables in northern Minas Gerais, Brazil. *Brazilian Journal of Development*, 6(9), 65849–65858.

BONGIORNO, G., BODENHAUSEN, N., BÜNEMANN, E. K., BRUSSAARD, L., GEISEN, S., MÄDER, P., QUIST, C. W., WALSER, J. C. & DE GOEDE, R. G. M. (2019). Reduced tillage, but not organic matter input, increased nematode diversity and food web stability in European long-term field experiments. *Molecular Ecology*, 28(22), 4987–5005.

CARES, J. & HUANG, S. P. (2001). Taxonomia de fitonematoides: chave sistemática simplificada para gêneros. *RAPP*, 9, 177-235.

CHEN, S. Y., SHEAFFER, C. C., WYSE, D. L., NICKEL, P. & KANDEL, H. (2012). Plant-parasitic nematode communities and their associations with soil factors in organically farmed fields in minnesota. *Journal of Nematology*, 44(4), 361-369.

COOLEN, W. A.; D'HERDE, C. J. A method for the quantitative extraction of nematodes from plant tissue. Ghent State Agriculture Research Centre, 1972.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileiro – grãos: Levantamento da Safra de Grãos 2022/23. : Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento.

CORTADA, L., DALZELL, J. J., COYNE, D. L., CORTADA, L., DALZELL, J. J., CLAUDIUS-COLE, A. O., HAUKELAND, S., LUAMBANO, N. & TALWANA, H. (2018). Plant-parasitic nematodes and food security in sub-saharan Africa. 56, 381-403.

DEL PRADO-VERA, I. C., FRANCO-NAVARRO, F. & GODINEZ-VIDAL, D. (2018). Plant parasitic nematodes and management strategies of major crops in Mexico. Subbotin, S., Chitambar, J. Plant parasitic nematodes in sustainable agriculture of North America. sustainability in plant and crop protection. Springer, Cham, 1, 31–68.

DE WAELE, D. & JORDAAN, E. M. (1988). Plant-parasitic nematodes on field crops in South Africa. Maize. *Revue de Nématology*, 11(1), 65-74.

DIAS-ARIEIRA, C., FURLANETTO, C., MELO SANTANA, S. DE, ANTONIO OLIVEIRA BARIZÃO, D., CÁSSIA FERREIRA RIBEIRO, R. & MARIA FORMENTINI, H. (2010). Plant parasitic nematodes associated with fruit crops in the northwest of Paraná, Brazil. *Revista Brasileira Fruticultura*, Jaboticabal-SP, 32(4), 1064-1071.

DIAS-ARIEIRA, C. R., CECCATO, F. J., MARINELLI, E. Z., BOREGIO VECCHI, J. L., DE OLIVEIRA ARIEIRA, G. & DE MELO SANTANA-GOMES, S. (2021). Correlations between nematode numbers, chemical and physical soil properties, and soybean yield under different cropping systems. *Rhizosphere*, 19, 100386.

- DIVERS, M., GOMES, C. B., MENEZES-NETTO, A. C., LIMA-MEDINA, I., NONDILLO, A., BELLÉ, C. & ARAÚJO FILHO, J. V. D. (2019). Diversity of plant-parasitic nematodes parasitising grapes in Southern Brazil. *Tropical Plant Pathology*, 44(5), 401–408.
- DONG, K., MOROENYANE, I., TRIPATHI, B., KERFAHI, D., TAKAHASHI, K., YAMAMOTO, N., AN, C., CHO, H., & ADAMS, J. (2017). Soil nematodes show a midelevation diversity maximum and elevational zonation on Mt. Norikura, Japan. *Scientific Reports*, 7(1), 3028.
- ERENSTEIN, O., JALETA, M., SONDER, K., MOTTALEB, K. & PRASANNA, B. M. (2022). Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food Security*, 14, 1295–1319.
- FLEMING, T. R., MCGOWAN, N. E., MAULE, A. G. & FLEMING, C. C. (2016). Prevalence and diversity of plant parasitic nematodes in Northern Ireland grassland and cereals, and the influence of soils and rainfall. *Plant Pathology*, 65(9), 1539–1550.
- FRANCHINI, J.C., DEBIASI, H., DIAS, W.P., RIBAS, L.N., SILVA, J.F.V. & BALBINOT JUNIOR, A.A. (2018). Relationship among soil properties, root-lesion nematode population and soybean growth. *Revista. Ciências Agroveterinárias*. 17(1), 30–35.
- GAVASSONI, W. L., TYLKA, G. L. & MUNKVOLD, G. P. (2001). Relationship between tillage and spatial patterns of *Heterodera glycines*. *Phytopathology*, 91, 534-545.
- GARCIA, N., FOLCHER, L., BIJU-DUVAL, L., MAUPETIT, A., RICCI, B. & GRENIER, E. (2018). Impact of agricultural practices and environmental variables on plant-parasitic nematode communities in fields at a landscape scale. *Nematology*, 20(3), 211–233.
- GARCIA, N., GRENIER, E., BUISSON, A. & FOLCHER, L. (2022). Diversity of plant parasitic nematodes characterized from fields of the French national monitoring programme for the Columbia root-knot nematode. *PLOS ONE*, 17(3), 0265070 .
- GBUR, E. E., STROUP, W. W., MCCARTER, K. S., DURHAM, S., YOUNG, L. J., CHRISTMAN, M., WEST, M. & KRAMER, M. (2012). Analysis of generalized linear mixed models in the agricultural and natural resources sciences. *American Society of Agronomy*,

Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 1, 1–283.

GOOGLE. Google Earth. (2009). website: <<http://earth.google.com/>>. Consultado em: 12/12/2022.

HAN, J., COLGROVE, A. L., BOWMAN, N. D., SCHROEDER, N. E. & KLECZEWSKI, N. M. (2021). A Survey of Plant-Parasitic Nematodes in Illinois Corn Fields, 2018 and 2020. *Plant Health Progress*, 22(4), 560–564.

HODDA, M., BANKS, N. & SINGH, S. (2012). Nematode Threats in the NAQS Region. *CSIRO*, 1, 1-92.

HOOPER D. J. (1986). Handling, fixing, staining and mounting nematodes. J. F. Southey, ed. *Laboratory methods for work with plant and soil nematodes*. London, United Kingdom: MAFF, 59–80.

HUANG, S. P.; FREIRE, H. C. A. & CARES, J. E. (1996). Grupos compositionais e tróficos dos nematoides associados à sucupira branca (*Pterodon pubescens*) em Cerrado nativo. *Fitopatologia Brasileira*, 21, 156-160.

INOMOTO, M. M. (2017). Nematoides das principais culturas do sistema plantio direto e plantas de cobertura. ESALQ/USP. Piracicaba. São Paulo. Disponível em: <<https://nematologia.com.br/files/anais/2017/Nematoides%20das%20principais%20culturas%20do%20sistema%20plantio%20direto%20e%20plantas%20de%20cobertura>>. Consultado em 26/03/2023.

JENKINS, W.R. (1964). A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. *Plant Disease Reporter*, 48(9), 692.

JIBRIN, M. O., LAWAL, H. M. & CHINDO, P. S. (2014). Influence of cover crops and tillage systems on nematode populations in a maize-cover crop intercrop. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 47(6), 703–710.

- JONES, M. G. K. & FOSU-NYARKO, J. (2014). Molecular biology of root lesion nematodes (*Pratylenchus* spp.) and their interaction with host plants. *Annals of Applied Biology*, 164(2), 163–181.
- JORDAN, D. L., CORBETT, T., BOGLE, C., SHEW, B., BRANDENBURG, R. & YE, W. (2017). Effect of previous rotation on plant parasitic nematode population in peanut and crop yield. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 3(1), 1-7.
- JORDAAN, E. M., DE WAELE, D. & VAN ROOYEN, P. J. (1989). Endoparasitic nematodes in maize roots in the western Transvaal as related to soil texture and rainfall. *Journal of Nematology*, 21(3), 356-360.
- KARURI, H. W., OLAGO, D., NEILSON, R., NJERI, E., OPERE, A. & NDEGWA, P. (2017). Plant parasitic nematode assemblages associated with sweet potato in Kenya and their relationship with environmental variables. *Tropical Plant Pathology*, 42(1), 1–12.
- KEETCH, D. P. & BUCKLEY, N. H. (1984). A check-list of the plant-parasitic nematodes of Southern Africa. *Tech. Commn. Department agriculture republic South African*, 195, 213.
- KORTHALS, G. W., ALEXIEV, A. D., LEXMOND, T. M., KAMMENGA, J. E. & BONGERS, T. (1996). Long-term effects of copper and pH on the nematode community in an agroecosystem. *Environ. Toxicol. Chem.* 15, 979-985.
- KREZANOSKI, C. E., HAHN, M. H., MACEDA, A., CASSILHA ZAWADNEAK, M. A., CALEGARIO, R. F. & DA SILVA SILVEIRA DUARTE, H. (2020). Plant-parasitic nematode survey of strawberry in Paraná, Brazil. *Crop Protection*, 138.
- LEIVA, M. P. F., SANTANA-GOMES, S. M., ZABINI, A.V., VEL´AZQU´EZ, L. M. G. & DIAS-ARIEIRA, C. R. (2020). Soil chemical properties and their relationship with phytonematode populations inside and outside patches of soybean fields. *Rhizophere* 14, 100231.
- MEDINA, I. I., BRAVO PORTOCARRERO, R. & AGUILAR-GOMEZ, A.-G. (2017). Densidad poblacional de Nematodos asociados al cultivo de maiz (*Zea mais* L.) en las regiones de Puno y Cusco. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 19(3), 243–254.

MACHADO, A. C. Z., ZAGATTO, M. R. G., NETO, F. S., DA SILVA, S. A. & JÚNIOR, L. A. Z. (2022). Impact of crop management systems on soil nematode communities in south brazil. *Scientia Agricola*, 79(1), 1–7.

MACHADO, A. C. Z., AMARO, P. M. & DA SILVA, S. A. (2019). Two novel potential pathogens for soybean. *PLOS ONE*, 14(8), 0221416.

MARQUEZ, J., SEVERNS, P. M. & HAJIHASSANI, A. (2021). Influence of the environment and vegetable cropping systems on plant-parasitic nematode communities in southern georgia. *Plant Disease*, 105(10), 3181-3191.

MASHAVAKURE, N., MASHINGAIDZE, A. B., MUSUNDIRE, R., GANDIWA, E., MUPOSHI, V. K., THIERFELDER, C., NHAMO, N., BERE, T. & AKHTAR, S. S. (2018). Short-term impacts of tillage and fertilizer treatments on soil and root borne nematodes and maize yield in a fine textured cambisol. *Journal of Nematology*, 50(3), 329–342.

MOLIN, W. T. & STETINA, S. R. (2016). Research/investigación weed hosts and relative weed and cover crop susceptibility to *Rotylenchulus reniformis* in the Mississippi delta. *NEMATROPICA*, 46(2), 121-131.

MONTEIRO, J. D. M. S., SANTOS, J. R. P., CARES, J. E., MARCHÃO, R. L., AMORIM, E. P. & COSTA, D. D. C. (2020). Identification of plant parasitic nematodes in triploid and tetraploid bananas in Brazil. *Revista Caatinga*, 33(4), 865–877.

NISA, R. U., TANTRAY, A. Y., KOUSER, N., ALLIE, K. A., WANI, S. M., ALAMRI, S. A., ALYEMENI, M. N., WIJAYA, L. & SHAH, A. A. (2021). Influence of ecological and edaphic factors on biodiversity of soil nematodes. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(5), 3049–3059.

NORTON, D. C (1983). Maize nematode problems. *Plant Disease*, 67, 253.

OKA, Y. 2010. Mechanisms of nematode suppression by organic soil amendments - A review. *Applied Soil Ecology*, 44(2), 101-115.

PAN, F., HAN, X., LI, N., YAN, J. & XU, Y. (2020). Effect of organic amendment amount on soil nematode community structure and metabolic footprints in soybean phase of a soybean-maize rotation on Mollisols. *Pedosphere*, 30(4), 544–554.

R CORE TEAM (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RIBEIRO, L. M., CAMPOS, H. D., NEVES, D. L., & DIAS-ARIEIRA, C. R. (2020). Survival of *Pratylenchus brachyurus* under dry soil conditions. *Heliyon*, 6(9), 05075.

TYLKA, G. L., TODD, T. C., NIBLACK, T. L., MACGUIDWIN, A. E. & JACKSON, T. (2011). Sampling for plant-parasitic nematodes in corn strip trials comparing nematode management products. *Plant Health Progress*, 12(1), 1-18.

TEIXEIRA, P. C., DONNAGEMA, G. K., FONTANA, A. & TEIXEIRA, W. G. (2018). *Manual de métodos de análise de solo*. 3 ed. Brasília. Embrapa.

SANTOS, H. G., JACOMINE, P. K. T., ANJOS, L. H. C., OLIVEIRA, V. A., LUMBRERAS, J. F., COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A., ARAUJO FILHO, J. C., OLIVEIRA, J. B. & CUNHA, T. J. F. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5 ed. Rio de Janeiro. Embrapa.

SCHAFFRATH, V. R., ANDRADE GONCALVES, A. C., SOUSA, A. J. & TORMENA, C. A. (2015). Correlação espacial entre atributos físicos de solo e de plantas espontâneas em dois sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39(1), 279–288.

SCHMIDT, J. H., BERGKVIST, G., CAMPIGLIA, E., RADICETTI, E., WITTEW, R. A., FINCKH, M. R. & HALLMANN, J. (2017). Effect of tillage, subsidiary crops and fertilisation on plant-parasitic nematodes in a range of agro-environmental conditions within Europe. *Annals of Applied Biology*, 171(3), 477–489.

SINGH, S., SINGH, B. & SINGH, A. P. (2015). Nematodes : A threat to sustainability of agriculture. *Procedia Environmental Sciences*, 29(1), 215–216.

SHIFERAW, B., PRASANNA, B. M., HELLIN, J. & BÄNZIGER, M. (2011). Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security. *Food Security*, 3(3), 307–327.

SIKORA, R. A., COYNEM D., HALLMANN, J. & TIMPER, P. (2018). *Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture*. 3 ed. Boston. CABI.

SILVA, R. G., PACHECO, L. P., ONO, F. B., KAPPES, C., ZANCANARO, L. & DA SILVA, R. A. (2022). Crop succession and rotation with surface liming on nematode management and soybean yield. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 57. 02695.

SILVA, I. R., FERRUFINO, A., SANZONOWICZ, C., SMYTH, T. J., ISRAEL, D. W. & CARTER JÚNIOR, T. E. (2005). Interactions between magnesium, calcium, and aluminum on soybean root elongation. *Revista Brasileira Ciência do Solo*. 29, 747–754.

SIMON, A. C. M., LOPEZ-NICORA, H. D., LINDSEY, L. E., NIBLACK, T. L. & PAUL, P. A. (2018a). Incidence, population density, and spatial heterogeneity of plant-parasitic nematodes in corn fields in Ohio. *Plant Disease*, 102(12), 2453–2464.

SIMON, A. C. M., LOPEZ-NICORA, H. D., NIBLACK, T. L., DAYTON, E. A., TOMASHEFSKI, D. & PAUL, P. A. (2018b). Cropping practices and soil properties associated with plant-parasitic nematodes in corn fields in Ohio. *Plant Disease*, 102(12), 2519–2530.

STROM, N., HU, W., HAARITH, D., CHEN, S. & BUSHLEY, K. (2020). Interactions between soil properties, fungal communities, the soybean cyst nematode, and crop yield under continuous corn and soybean monoculture. *Applied Soil Ecology*, 147, 103388.

STROUP, W. W. 2013. *Generalized Linear Mixed Models: Modern Concepts, Methods and Applications*. Chapman & Hall/CRC Texts in Statistical Science. CRC Press, Boca Raton, FL.

SYNGENTA, Levantamento inédito prevê prejuízo potencial de até R\$ 870 bilhões em menos de 10 anos com danos causados por nematoides. 2023. Disponível em: <<https://www.syngenta.com.br/press-release/institucional/levantamento-inedito-preve-prejuizo-potencial-de-ate-r-870-bilhoes-em>>. Consultado em 01/03/2023.

USDA. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Foreign agricultural service - Commodity explorer: Corn. United States.

VAN DEN HOOGEN, J., GEISEN, S., ROUTH, D., FERRIS, H., TRAUNSPURGER, W., WARDLE, D. A., DE GOEDE, R. G. M., ADAMS, B. J., AHMAD, W., ANDRIUZZI, W. S., BARDGETT, R. D., BONKOWSKI, M., CAMPOS-HERRERA, R., CARES, J. E., CARUSO, T., DE BRITO CAIXETA, L., CHEN, X., COSTA, S. R., CREAMER, R. &

CROWTHER, T. W., et al. (2019). Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale. *Nature*, 572(7768), 194–198.

WALLACE, M. K., RUST, R. H., HAWKINS, D. M. & MACDONALD, D. H. (1993). Correlation of edaphic factors with plant-parasitic nematode population densities in a forage field. *Journal of Nematology*, 25(4), 642-653.

WANG, K. H., WAISEN, P., LESLIE, A. W., PAUDEL, R., MEYER, S. L. F. & HOOKS, C. R. R. (2022). Relationships between soil tillage systems, nematode communities and weed seed predation. *Horticulturae*, 8(5), 425.

WARD, S. M., WEBSTER, T. M., & STECKEL, L. E. (2013). Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*): A Review. *Weed Technology*, 27(1), 12–27.

ZHAO, D., WANG, Y., WEN, L., QU, H., ZHANG, Z., ZHANG, H., JIA, Y., WANG, J., FENG, Y., LI, Y., YANG, F. & PAN, F. (2022). Response of soil nematode community structure and function to monocultures of pumpkin and melon. *Life*, 12(1), 102.

## FIGURAS E TABELAS

**Tabela 1.** Categorias de risco de dano para os três grupos morfológicos com potencial dano na cultura do milho a partir das diferentes faixas de abundância média em 100 cm<sup>3</sup> de solo.

<b>Grupo morfológico</b>	<b>Não detectado</b>	<b>Não significante</b>	<b>Pouco risco</b>	<b>Moderado risco</b>	<b>Severo risco</b>	<b>Muito severo risco</b>
<i>Helicotylenchus</i>	0	1 a 75	75 a 150	151 a 300	301 a 500	> 500
<i>Pratylenchus</i>	0	1 a 10	11 a 40	41 a 75	76 a 100	> 100
Criconematidae	0	1 a 75	75 a 150	151 a 300	301 a 600	>600
<b>Classe</b>	0	1	2	2	2	2

**Tabela 2.** Frequência de grupos morfológicos (gêneros e famílias) de fitonematoides detectados em 354 campos de cultivo amostrados em 26 municípios no estado de Goiás.

<b>Grupo morfológico</b>	<b>Frequência</b>	<b>Incidência</b>
Anguinidae	26%	24
<i>Aphelenchus</i>	79%	26
<i>Aphelenchoides</i>	57%	25
Criconematidae	21%	21
<i>Helicotylenchus</i>	87%	26
<i>Hemicycliophora</i>	5%	9
<i>Heterodera</i>	15%	13
<i>Hoplolaimus</i>	0.8%	3
Longidoridae	1%	2
Belonolaimidae	0.2%	1
<i>Meloidogyne</i>	1%	16
<i>Paratrichodorus</i>	4%	7
<i>Paratylenchus</i>	0.8%	2
<i>Pratylenchus</i>	65%	25
<i>Rotylenchus</i>	25%	19

<i>Rotylenchulus</i>	6%	6
<i>Scutellonema</i>	3%	7
<i>Trichodorus</i>	4%	7
<i>Tylenchorhynchus</i>	12%	17
Tylenchidae	34%	22
<i>Xiphinema</i>	0.5%	2

**Tabela 3.** Frequência dos grupos morfológicos identificados no estudo para os três tipos de solos no estado de Goiás.

<b>Grupo morfológico</b>	<b>Argissolo</b>	<b>Latossolo</b>	<b>Cambissolo</b>
Anguinidae	33%	28%	21%
<i>Aphelenchus</i>	29%	80%	84%
<i>Aphelenchoides</i>	91%	61%	67%
Criconematidae	33%	21%	13%
<i>Helicotylenchus</i>	75%	87%	94%
<i>Hemicycliophora</i>	-	5%	5%
<i>Heterodera</i>	4%	22%	5%
<i>Hoplolaimus</i>	-	0,4%	2%
Longidoridae	-	1%	1%
Belonolaimidae	-	0,4%	-
<i>Meloidogyne</i>	12%	12%	13%
<i>Paratrichodorus</i>	8%	4%	5%
<i>Paratylenchus</i>	-	0,4%	2%
<i>Pratylenchus</i>	62%	65%	72%
<i>Rotylenchus</i>	8%	26%	20%
<i>Rotylenchulus</i>	-	7%	2%

<i>Scutellonema</i>	4%	1%	6%
<i>Trichodorus</i>	8%	4%	4%
<i>Tylenchorhynchus</i>	25%	11%	10%
Tylenchidae	25%	38%	38%
<i>Xiphinema</i>	-	0,4%	1%

**Tabela 4.** Incidência e frequência dos grupos morfológicos que não estiveram presentes em todos os tipos de plantio (direto, mínimo e convencional) e seqüências de cultivo (SM e SMO) implementados em campos amostrados no estado de Goiás.

<b>Grupo morfológico</b>	<b>Seqüência de cultivos<sup>a</sup></b>	<b>Frequência<sup>b</sup></b>	<b>Tipo de plantio<sup>c</sup></b>	<b>Frequência<sup>d</sup></b>
<i>Heterodera</i>	SM	19%	Direto	17%
	SMO	-	Mínimo	17%
			Convencional	-
<i>Hoplolaimus</i>	SM	0,3%	Direto	-
	SMO	3%	Mínimo	1%
			Convencional	-
<i>Aphelenchoides</i>	SM	59%	Direto	48%
	SMO	63%	Mínimo	63%
			Convencional	73%
Longidoridae	SM	1,3%	Direto	0,9%
	SMO	-	Mínimo	1,3%
			Convencional	-
Belonolaimidae	SM	0,3%	Direto	0,9%
	SMO	-	Mínimo	-
			Convencional	-
<i>Paratylenchus</i>	SM	0,6%	Direto	1,8%
	SMO	2%	Mínimo	0,4%
			Convencional	-
<i>Xiphinema</i>	SM	0,6%	Direto	0,9%
	SMO	-	Mínimo	-
			Convencional	4,3%

a = SM representa a sucessão de Soja-Milho e SMO de Soja-Milho-Outras culturas.

b = Frequência de grupos morfológicos entre as seqüências de cultivo SM e SMO.

c = Tipos de plantio implementados no estado de Goiás.

d = Frequência de grupos morfológicos entre os sistemas de plantio direto, mínimo e convencional.

**Tabela 5.** Heterogeneidade média de incidência na escala logito  $\beta$  e original  $p$ , variância ( $\sigma^2_R$  and  $\sigma^2_M$ ), erro padrão (EP) e p-valor dos efeitos dos grupos aleatórios de mesorregiões e municípios dentro de mesorregiões a partir do Modelo Linear Misto Generalizado (MLMG).

Nematoide <sup>a</sup>	$\beta$ (SE)	$p$ (EP)	Mesorregiões <sup>b</sup>		Município <sup>c</sup>	
			$\sigma^2_R$ (EP)	$P$	$\sigma^2_M$ (EP)	$P$
<i>Aphelenchoides</i>	-3,058 (0,09)	0,044 (0,52)	0 (0)	>0,999	0,037 (0,09)	<0,05
<i>Aphelenchus</i>	-2,784 (0,08)	0,058 (0,52)	0 (0)	>0,999	0,032 (0,09)	<0,05
Criconematidae	-4,654 (0,32)	0,009 (0,58)	0 (0)	>0,999	1,122 (0,52)	<0,05
<i>Helicotylenchus</i>	-2,687 (0,06)	0,063 (0,51)	<0...(<0...)	0,94	<0...(<0...)	<0,05
<i>Pratylenchus</i>	-3,007 (0,07)	0,047 (0,51)	0 (0)	>0,999	0 (0)	>0,999
<i>Rotylenchulus</i>	-9,363 (2,64)	0,000008 (0,93)	0 (0)	>0,999	15,25 (1,95)	<0,05

obs:  $\sigma^2 < 0...$  representa valores muito abaixo de zero.

a = Grupos morfológicos com maior expressão no estudo.

b = Efeito aleatório de tipos de solos

c = Efeito aleatório de municípios dentro de tipos de solos

**Tabela 6.** Variância da heterogeneidade da abundância, erro padrão (EP) e p-valor dos grupos de efeito aleatório de mesorregiões ( $\sigma^2_R$ ), campos dentro de municípios dentro de mesorregiões ( $\sigma^2_c$ ) e municípios dentro de mesorregiões ( $\sigma^2_M$ ), a partir de Modelos Linear Mistos Generalizados (MLMG) de campos de milho do estado de Goiás entre os anos de 2021 e 2022.

Nematoide <sup>a</sup>	Mesorregiões <sup>b</sup>		Campos <sup>c</sup>		Municípios <sup>d</sup>	
	$\sigma^2_i$ (SE)	$P$	$\sigma^2_{ij}$ (SE)	$P$	$\sigma^2_{ijg}$ (SE)	$P$
<i>Aphelenchoides</i>	0 (0)	>0,999	0,396 (0,04)	<0,05	0,283 (0,11)	<0,05
<i>Aphelenchus</i>	0,045 (0,10)	<0,05	0,662 (0,05)	<0,05	0,069 (0,05)	<0,05
Criconematidae	0 (0)	>0,999	1,103 (0,13)	<0,05	0,393 (0,15)	<0,05
<i>Helicotylenchus</i>	0,210 (0,22)	<0,05	1,074 (0,06)	<0,05	0,301 (0,11)	<0,05
<i>Pratylenchus</i>	<0...(<0...)	0,54	0,091 (0,06)	<0,05	0,011 (0,07)	<0,05
<i>Rotylenchulus</i>	0 (0)	>0,999	3,383 (0,43)	<0,05	0 (0)	>0,999

obs: the " $< 0...$ " representa valores muito abaixo de zero.

a = Grupos morfológicos com maior expressão no estudo.

b = Efeito aleatório de tipos de solos

c = Efeito aleatório de campos dentro municípios dentro de tipos de solos

d = Efeito aleatório de municípios dentro de tipos de solos

**Tabela 7.** Valores de probabilidade (nível de significância) para Wald  $X^2$  e Teste de Razão de Verossimilhança (TRV), a partir da chance ajustada por modelos regressão logístico binário (MLG) de variáveis exploratórias dos grupos morfológicos mais expressivos em milho no estado de Goiás.

<b>Nematoides parasita de plantas<sup>a</sup></b>						
Variável	<i>Aphelenchus</i>	<i>Aphelenchoides</i>	Criconematidae	<i>Helicotylenchus</i>	<i>Pratylenchus</i>	<i>Rotylenchulus</i>
Sequência de cultivo	ns	ns	ns	<0,05	ns	ns
Tipo de plantio	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Altitude	ns	ns	<0,05	ns	ns	ns
Tipo de solo	ns	ns	<0,05	<0,05	ns	ns
pH	ns	<0,05	ns	ns	<0,05	ns
Areia	0,053	<0,05	<0,05	<0,05	ns	<0,05
Argila	ns	<0,05	<0,05	<0,05	ns	<0,05
TRV <sup>c</sup>	ns	<0,05	<0,05	<0,05	ns	<0,05

a: grupos morfológicos com maior expressão populacional no estudo.

b: variáveis exploratórias, onde tipos de plantio representa direto/mínimo e convencional, regiões de solos são latossolo, argissolo e cambissolo e sequência de cultivo representa as estratégias SM e SMO.

c: teste da razão de verossimilhança para avaliar a significância de variáveis dentro do modelo específico de cada grupo morfológico.

**Tabela 8.** Valor de probabilidade (nível de significância) para os testes Wald  $X^2$  e Teste de Razão de Verossimilhança (TRV), a partir da chance ajustada por modelo de regressão logística ordinária das variáveis exploratórias aos fitonematoides com maior expressão populacional em milho entre os anos de 2021 e 2022.

<b>Nematoides parasitas de plantas<sup>a</sup></b>			
Variável <sup>b</sup>	<i>Helicotylenchus</i>	<i>Pratylenchus</i>	Criconematidae
Sequência de cultivo	<0,05	ns	ns
Tipo de plantio	ns	<0,05	ns
Altitude	ns	ns	<0,05
Tipo de solo	ns	ns	<0,05

pH	<0,05	<0,05	ns
Areia	<0,05	ns	<0,05
Argila	<0,05	ns	<0,05
TRV <sup>c</sup>	<0,05	ns	<0,05

a: grupo morfológicos com maior expressão populacional no estudo.

b: variáveis exploratórias, onde tipos de plantio representa direto/mínimo e convencional, regiões de solos são latossolo, argissolo e cambissolo e sequência de cultivo representa as estratégias SM e SMO.

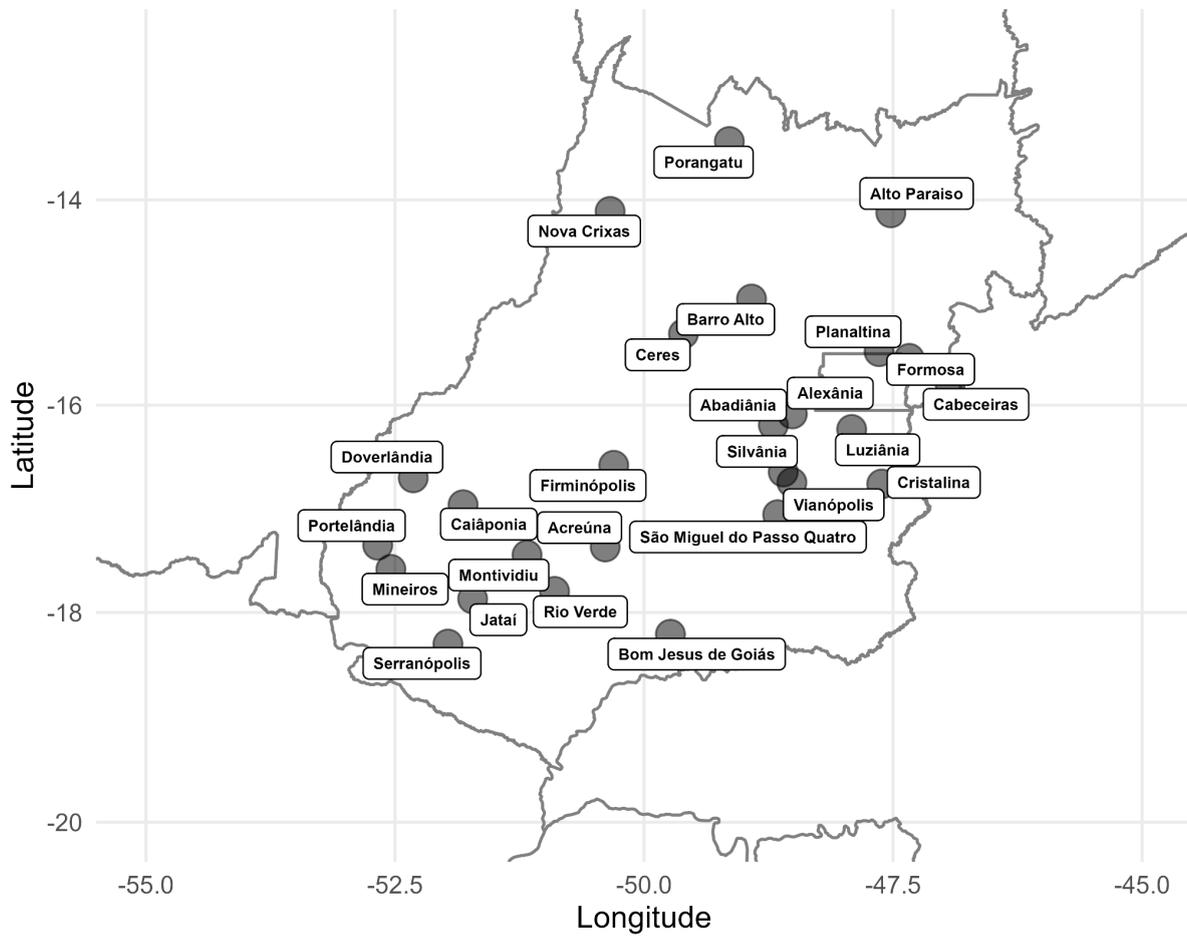
c: teste da razão de verossimilhança para avaliar a significância de variáveis dentro do modelo específico de cada grupo morfológico.

**Tabela 9.** Razão de chances para variáveis categóricas (tipo de solo, tipos de plantio e sequências de cultivo), inclinação da regressão para variáveis contínuas (pH, EC, altitude, silte e argila), a partir da regressão logística ordinária proporcional para a associação entre variáveis exploratórias e a abundância dos nematoides mais expressivos.

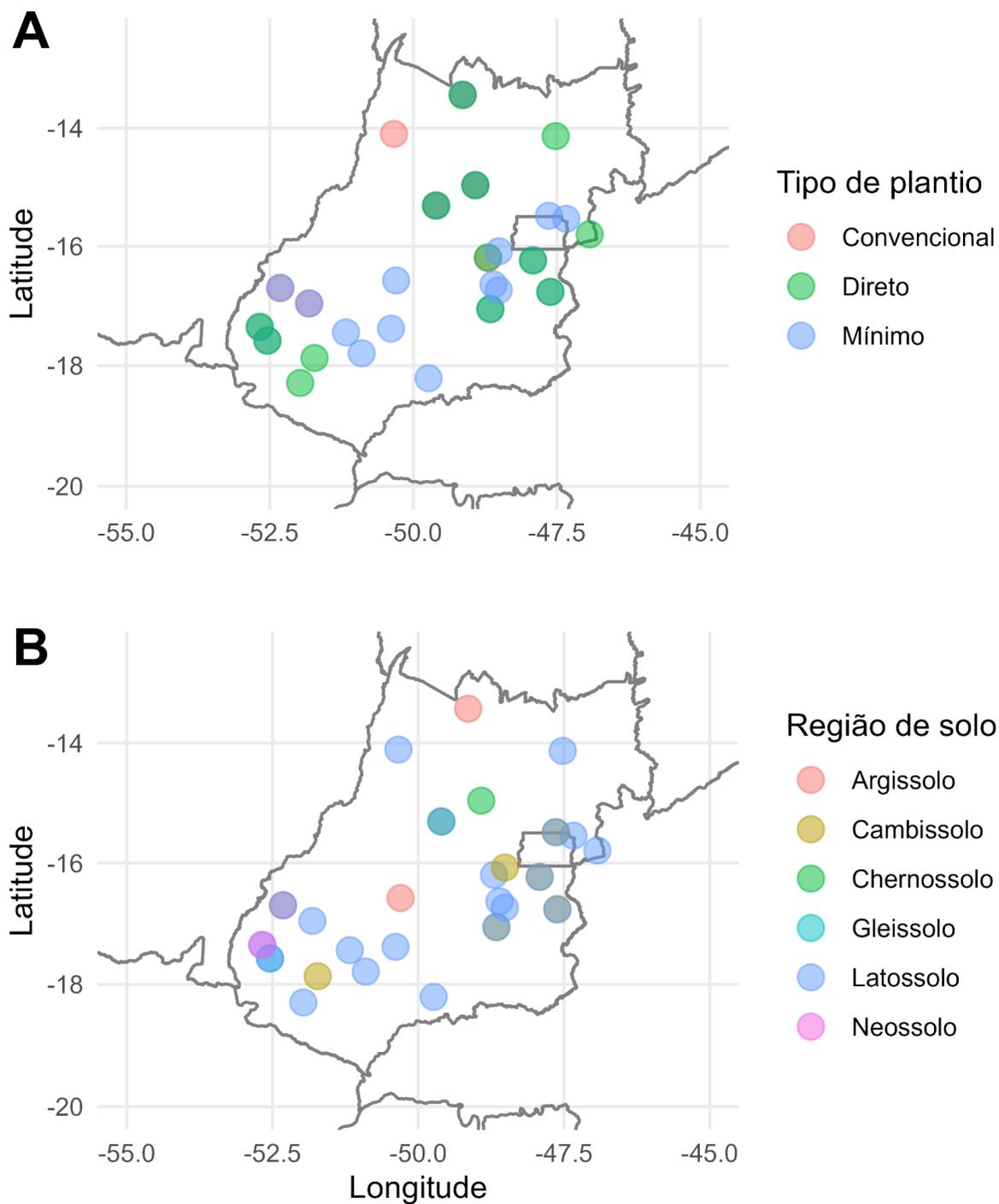
Nematoide	Efeito	Estimado <sup>a</sup>	EP <sup>b</sup>	CL <sub>L</sub>	CL <sub>U</sub>	P
<i>Helicotylenchus</i>	Solo[2x6]	0,899	0,043	0,813	0,985	<0,64
	Solo[5x6]	1,460	0,200	1,066	1,854	<0,05
	Culturas	1,295	0,113	1,073	1,517	<0,05
	Plantio	1,594	0,182	1,237	1,951	<0,05
	pH	-0,428	0,148	-	-	<0,05
	Areia	-0,028	0,013	-	-	<0,05
	Argila	-0,044	0,019	-	-	<0,05
	Altitude	0,0007	0,0008	-	-	<0,05
<i>Pratylenchus</i>	Solo[2x6]	0,911	0,025	0,861	0,961	<0,05
	Solo[5x6]	0,938	0,017	0,904	0,973	<0,05
	Culturas	1,059	0,015	1,028	1,090	<0,05
	Plantio	1,040	0,010	1,018	1,061	<0,05
	pH	-0,422	0,146	-	-	<0,05
	Areia	0,004	0,012	-	-	0,714
	Argila	0,006	0,018	-	-	0,742
	Altitude	0,001	0,0008	-	-	0,178
Criconematidae	Solo[2x6]	1,192	3,770	0,0007	1,931e+03	<0,05
	Solo[5x6]	2,856	0,226	1,831	4,454	<0,05
	Culturas	3,906	1,210	0,364	4,187	<0,05
	Plantio	1298,329	3,982	0,588	2,864e+06	<0,05
	pH	0,071	0,192	-	-	0,07
	Areia	0,049	0,019	-	-	<0,05
	Argila	0,105	0,027	-	-	<0,05
	Altitude	-0,007	0,001	-	-	<0,05

a = Razão de chance entre os solos Argissolo/Latossolo (2x6), Cambissolo/Latossolo (5x6), tipos de plantio direto-mínimo/convencional, sequências de cultivo SM/SMO e o log-odds das variáveis contínuas pH, areia, argila e altitude.

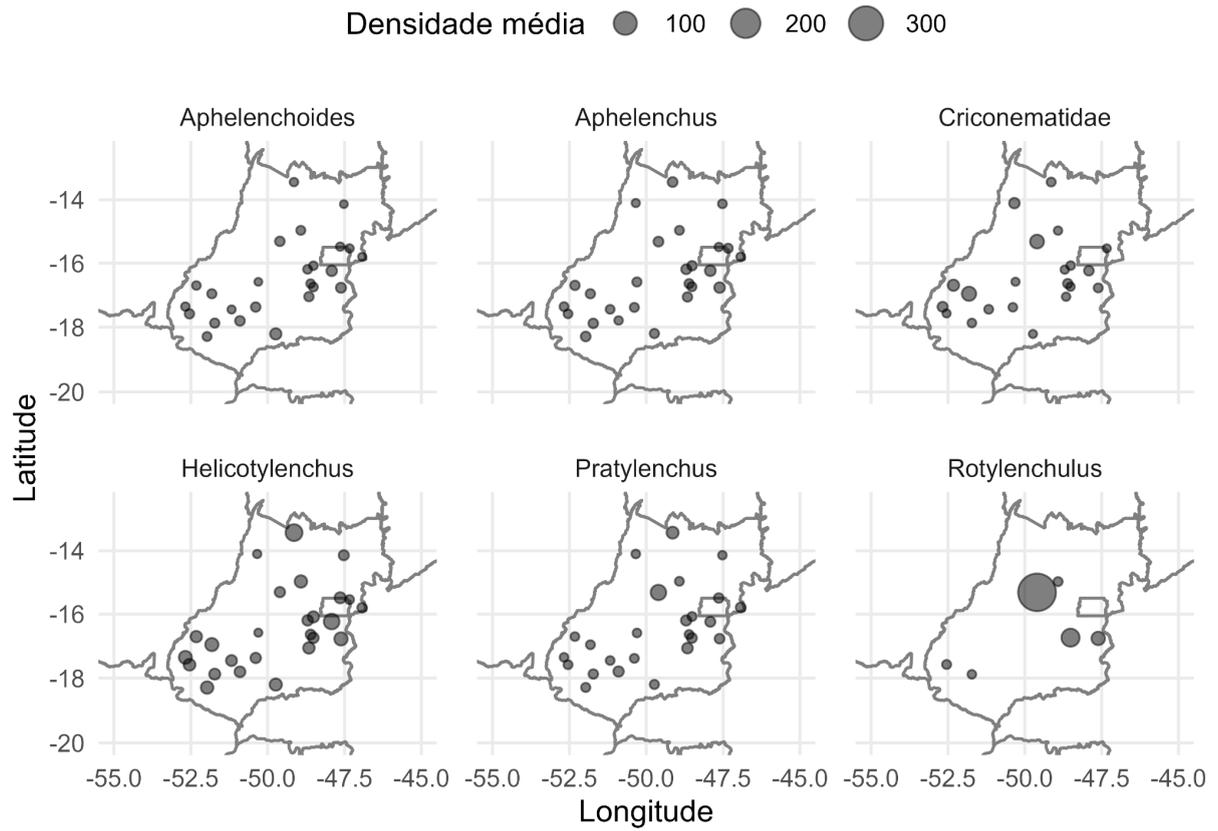
b = Erro padrão das razões (tipos de solos, plantio e sequências de cultivo) e covariáveis contínuas como pH, areia, argila e altitude.  
CL<sub>L</sub> e CL<sub>U</sub> representam o intervalo de confiança inferior e superior a 95%, respectivamente.



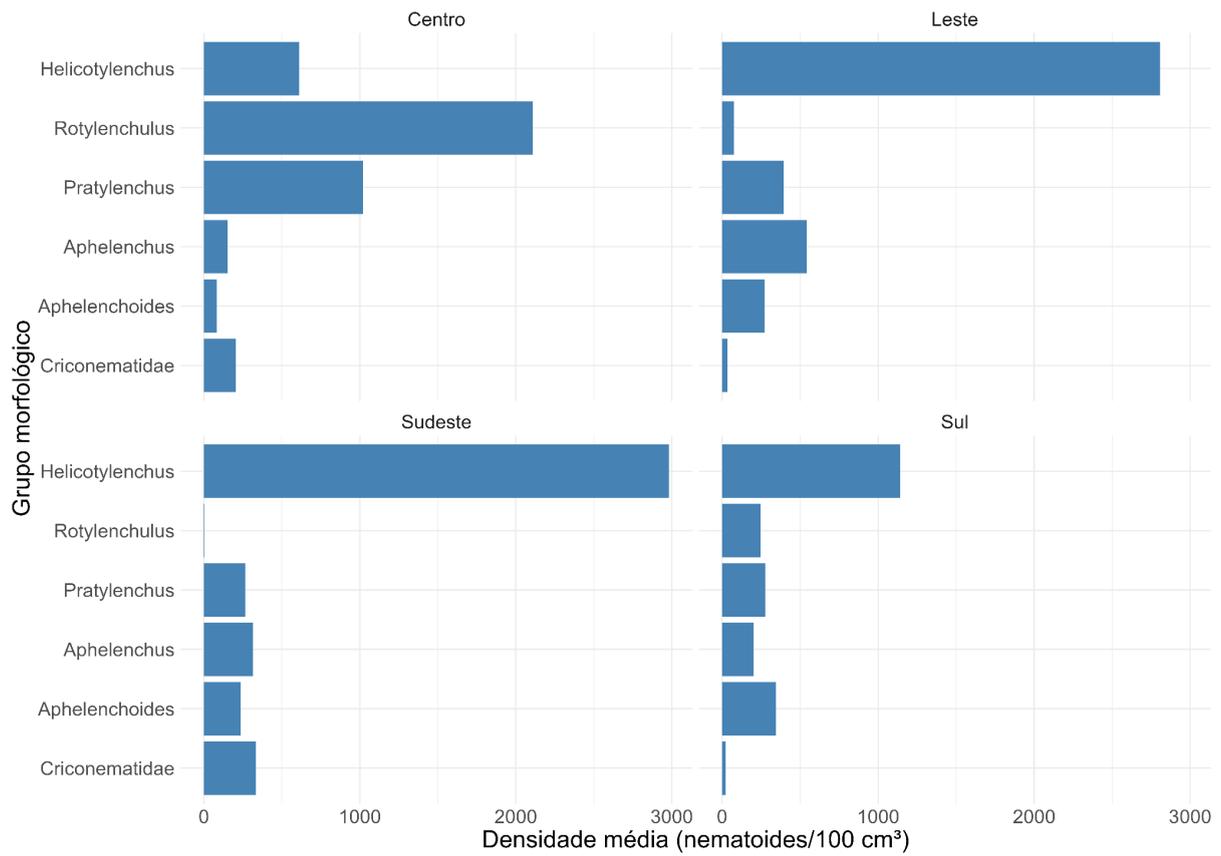
**Figura 1.** Ponto georreferenciado em campos comerciais de milho de 26 municípios amostrados entre os anos de 2021 e 2022 no estado de Goiás.



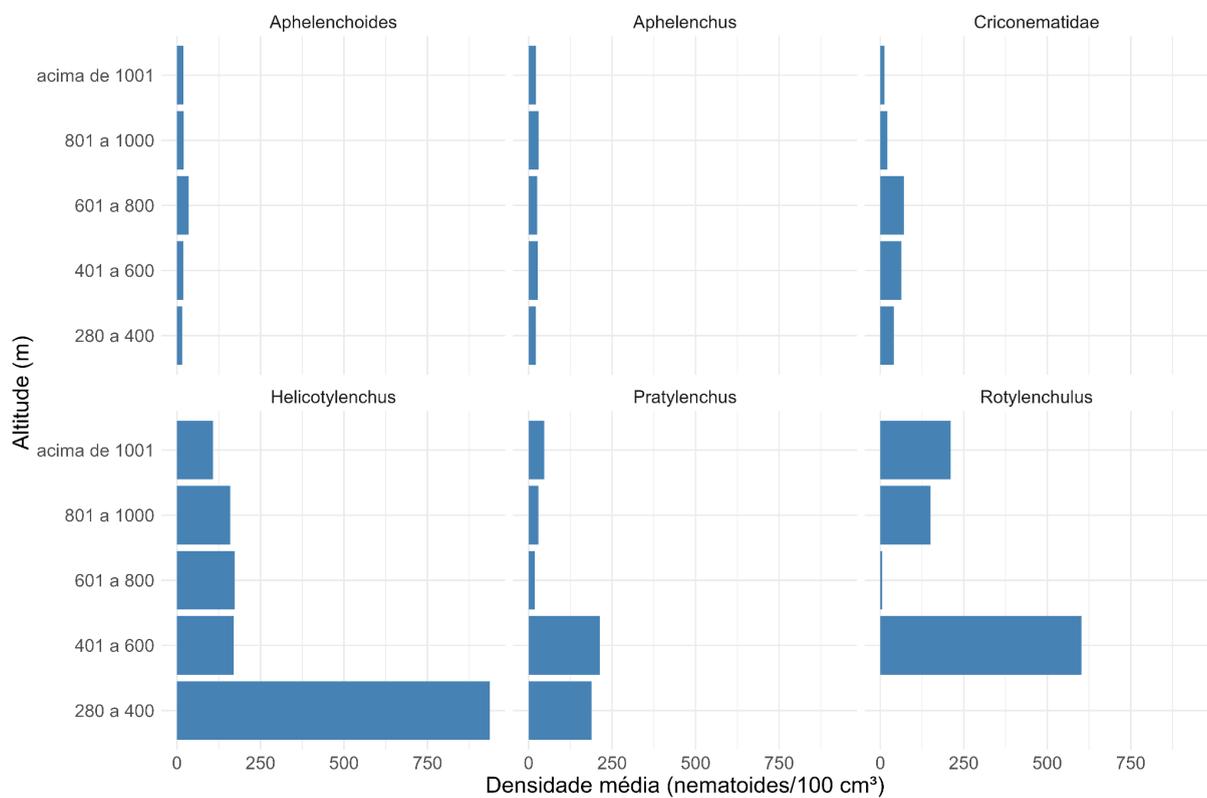
**Figura 2.** Distribuição georreferenciada de A) amostras sob os tipo de plantio convencional, direto e mínimo, e B) regiões de solo do tipo Argissolo, Cambissolo, Chernossolo, Gleissolo, Latossolo e Neossolo no estado de Goiás na cultura do milho.



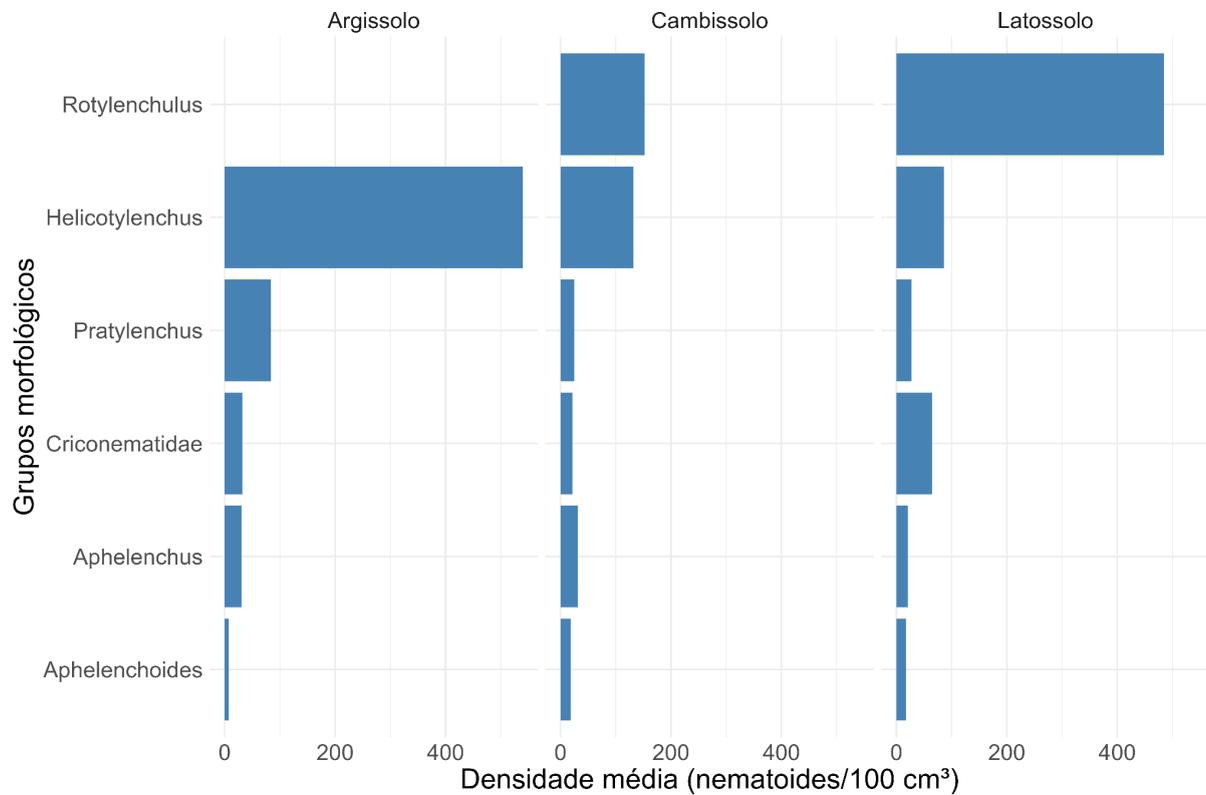
**Figura 3.** Distribuição georreferenciada da incidência (pontos) e densidade média dos principais grupos morfológicos encontrados em municípios do estado de Goiás. A diferença no tamanho dos círculos representa a variação na densidade média.



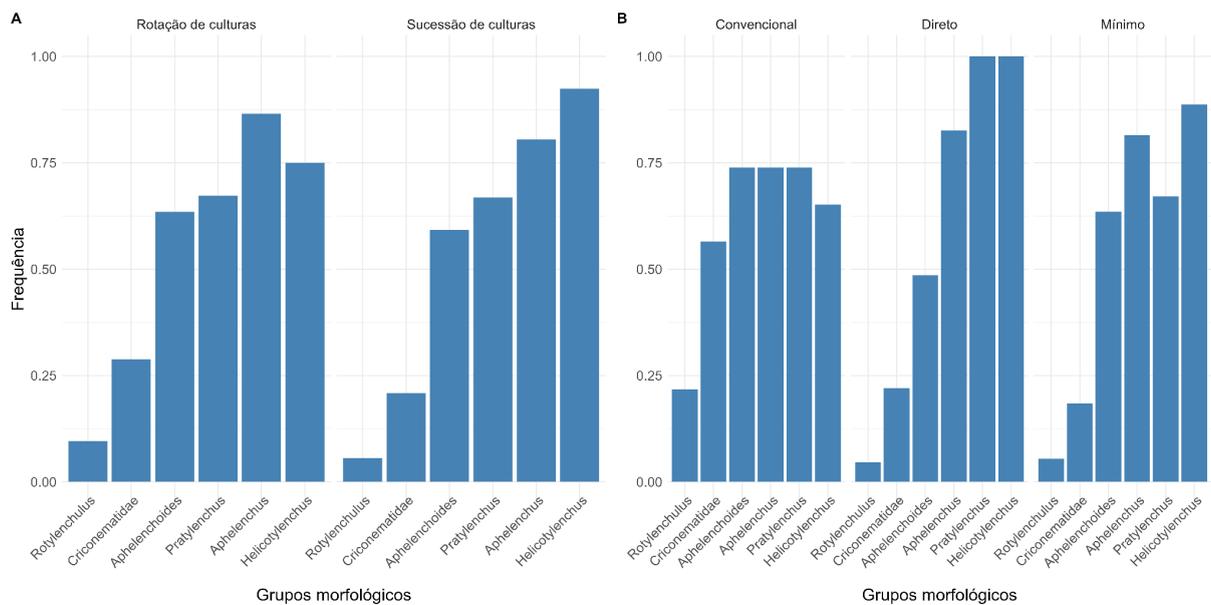
**Figura 4.** Densidade média dos principais grupos morfológicos de fitonematoides detectados em quatro mesorregiões do estado de Goiás em campos de milho.



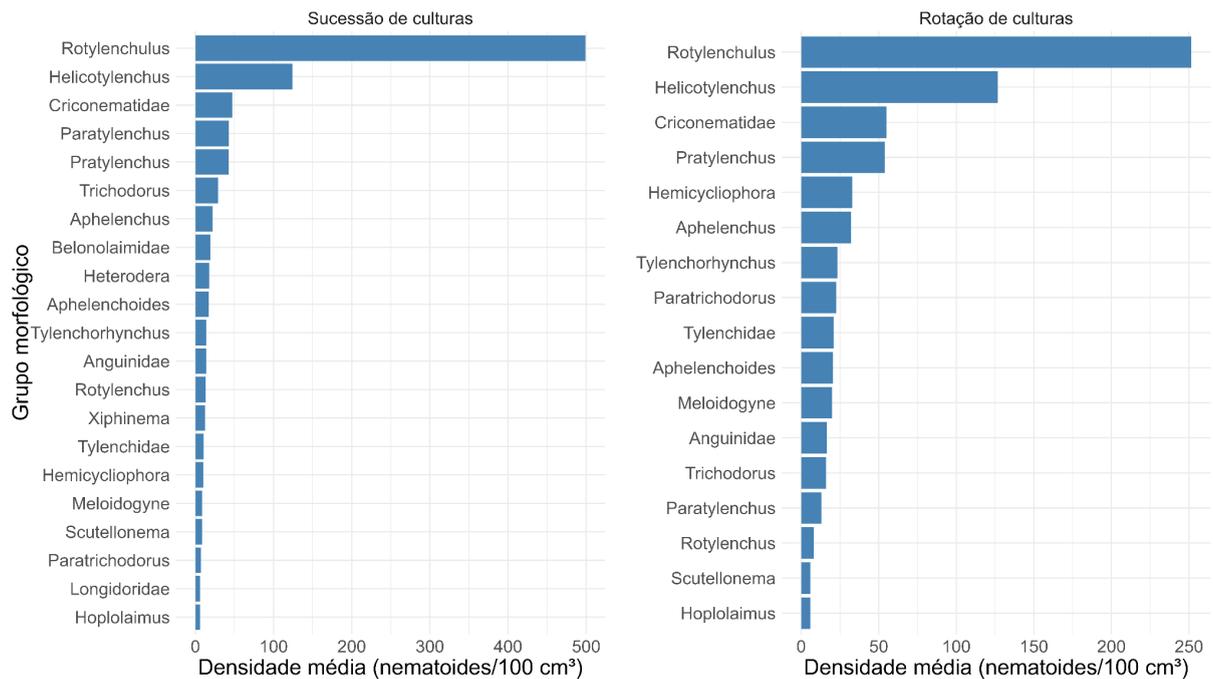
**Figura 5.** Densidade média dos nematoides com maior expressão para as faixas entre 280 e a acima de 1000 m de altitude para as 354 amostras coletadas em municípios do estado de Goiás.



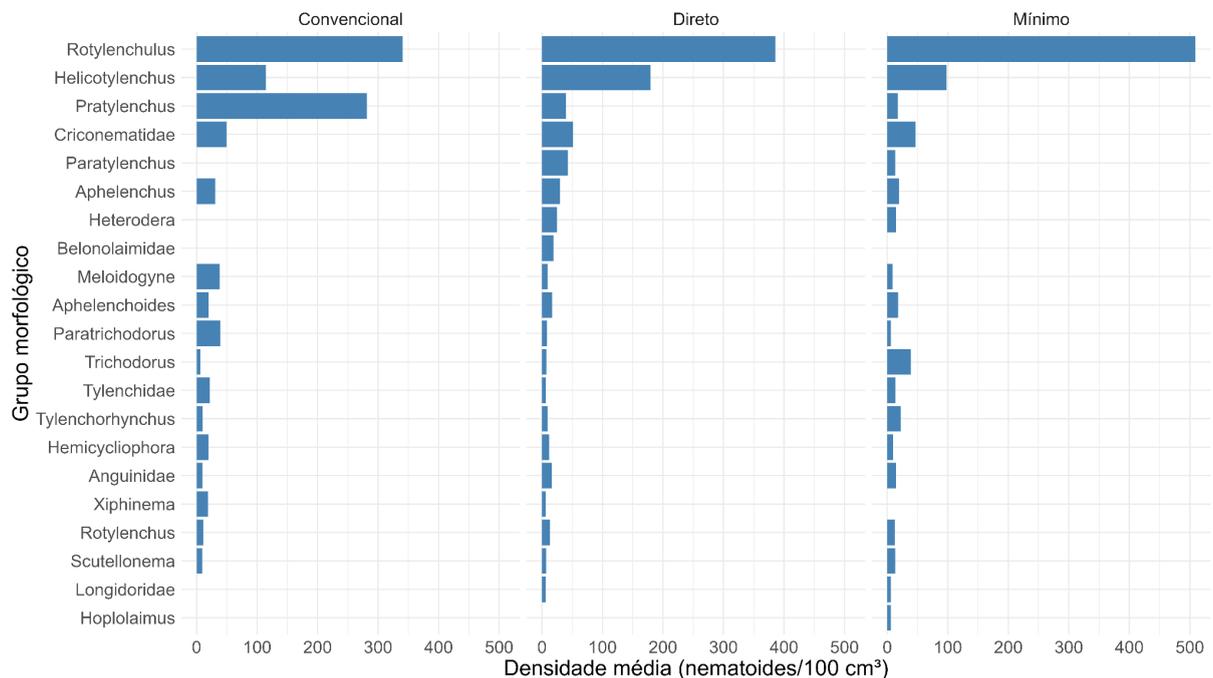
**Figura 6.** Densidade média dos grupos morfológicos expressivos em solos do tipo Argissolo, Cambissolo e Latossolo no estado de Goiás.



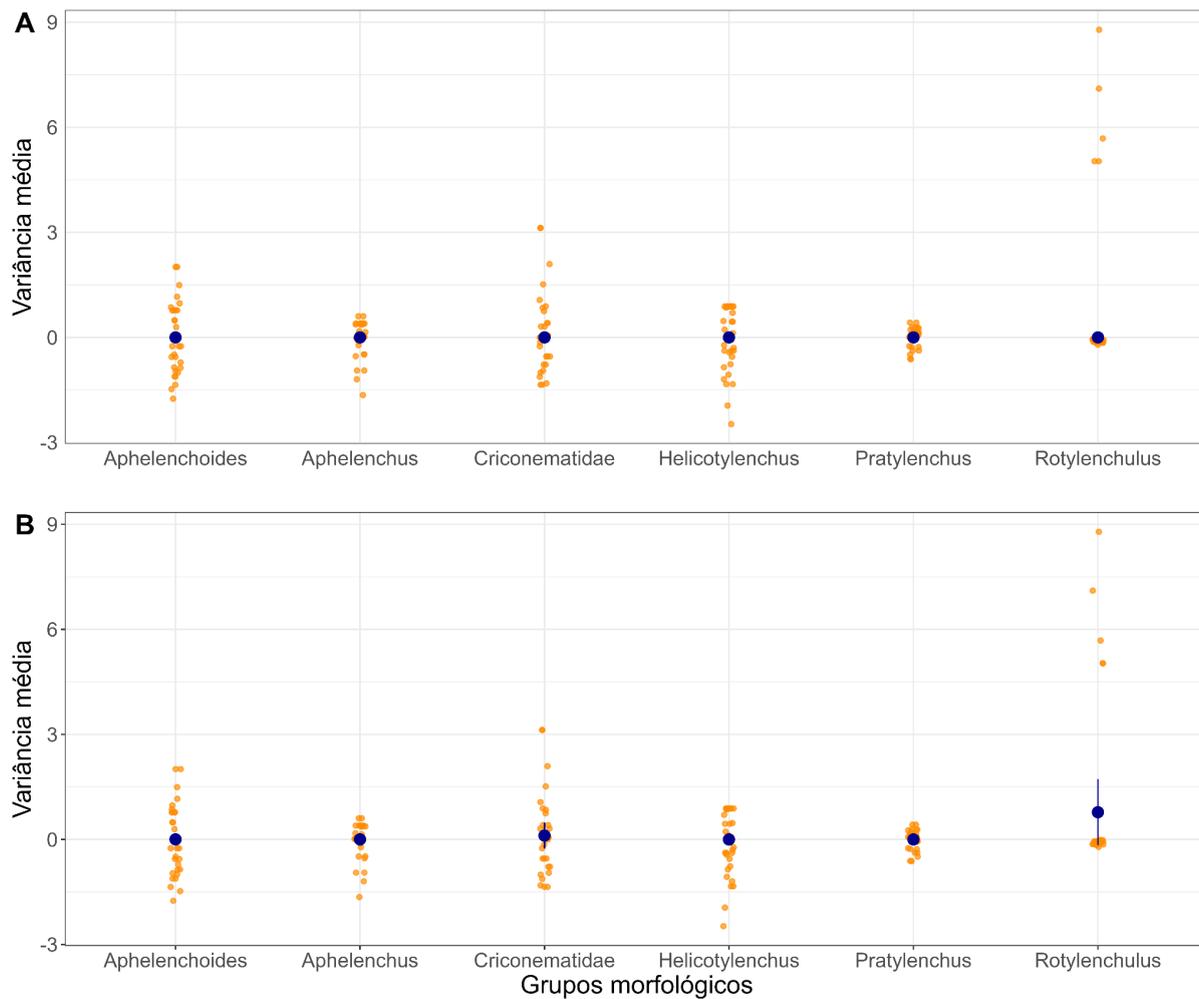
**Figura 7.** Frequência dos grupos morfológicos com maior expressão a nível populacional para (A) sequência de cultivo SM em 302 amostras e SMO em 52 amostras e B) sistemas de plantio convencional, mínimo e direto em 23, 201 e 108 amostras, respectivamente.



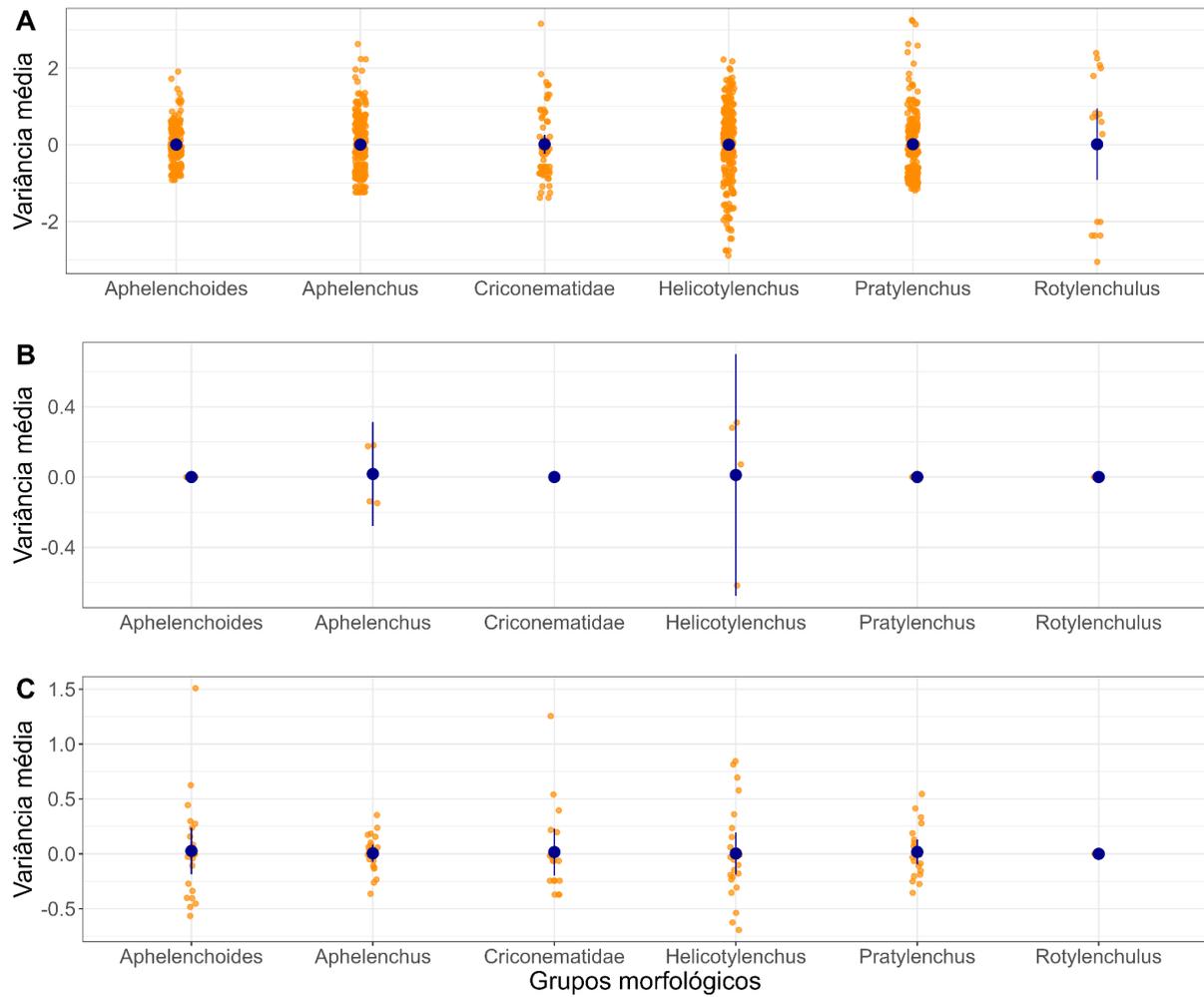
**Figura 8.** Densidade média dos grupos morfológicos identificados em campos com sequências de cultivo milho-soja em 302 amostras e milho-soja-outras culturas em 52 amostras, onde outras culturas representa pastagem, sorgo, tomate e/ou feijão.



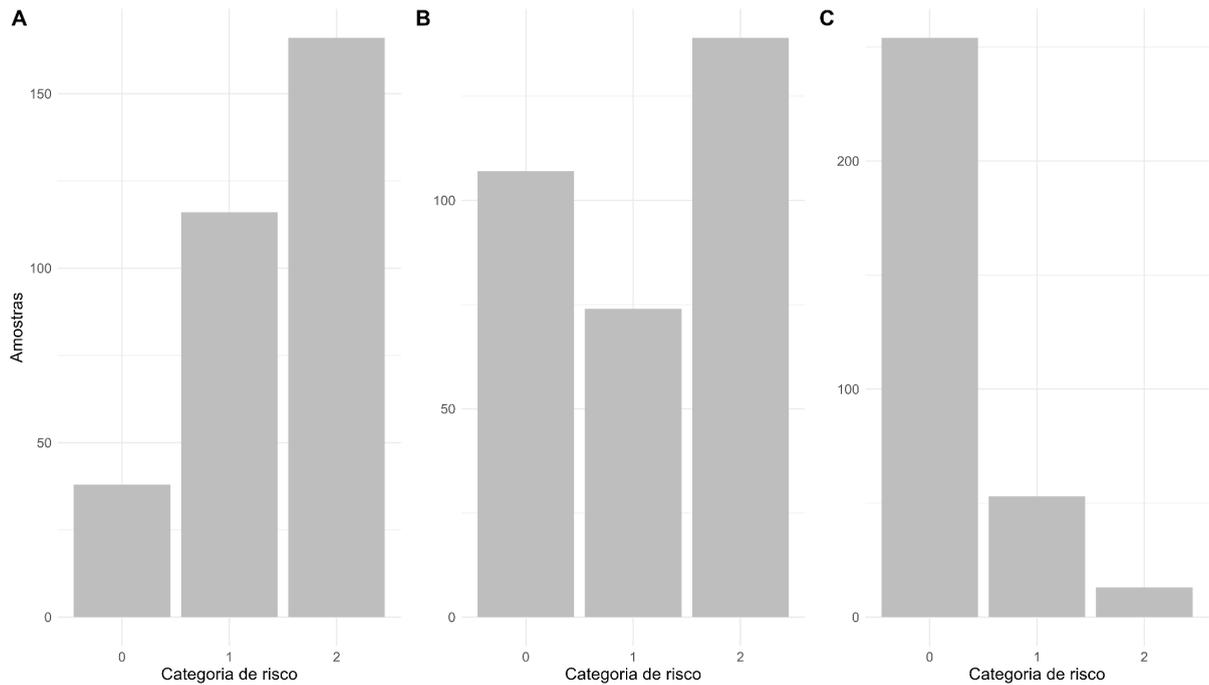
**Figura 9.** Densidade média dos grupos morfológicos identificados no estado de Goiás para os sistemas de plantio convencional, mínimo e direto em campos de milho.



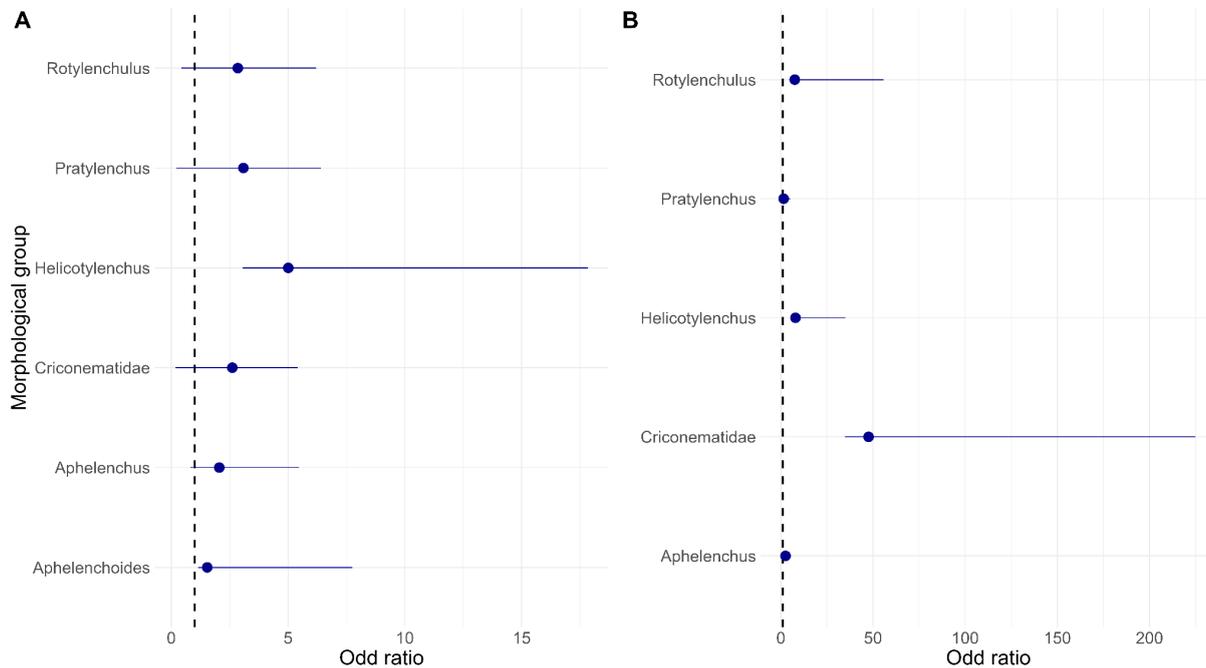
**Figura 10.** Distribuição da variância média (pontos) para o efeito aleatório dos grupos A) solo e B) municípios dentro de regiões de solo, a partir dos modelos MLMG ajustado para os grupos mais expressivos em campos de milho amostrados entre os anos de 2021 e 2022, e o intervalo de confiança de 95% (errobar).



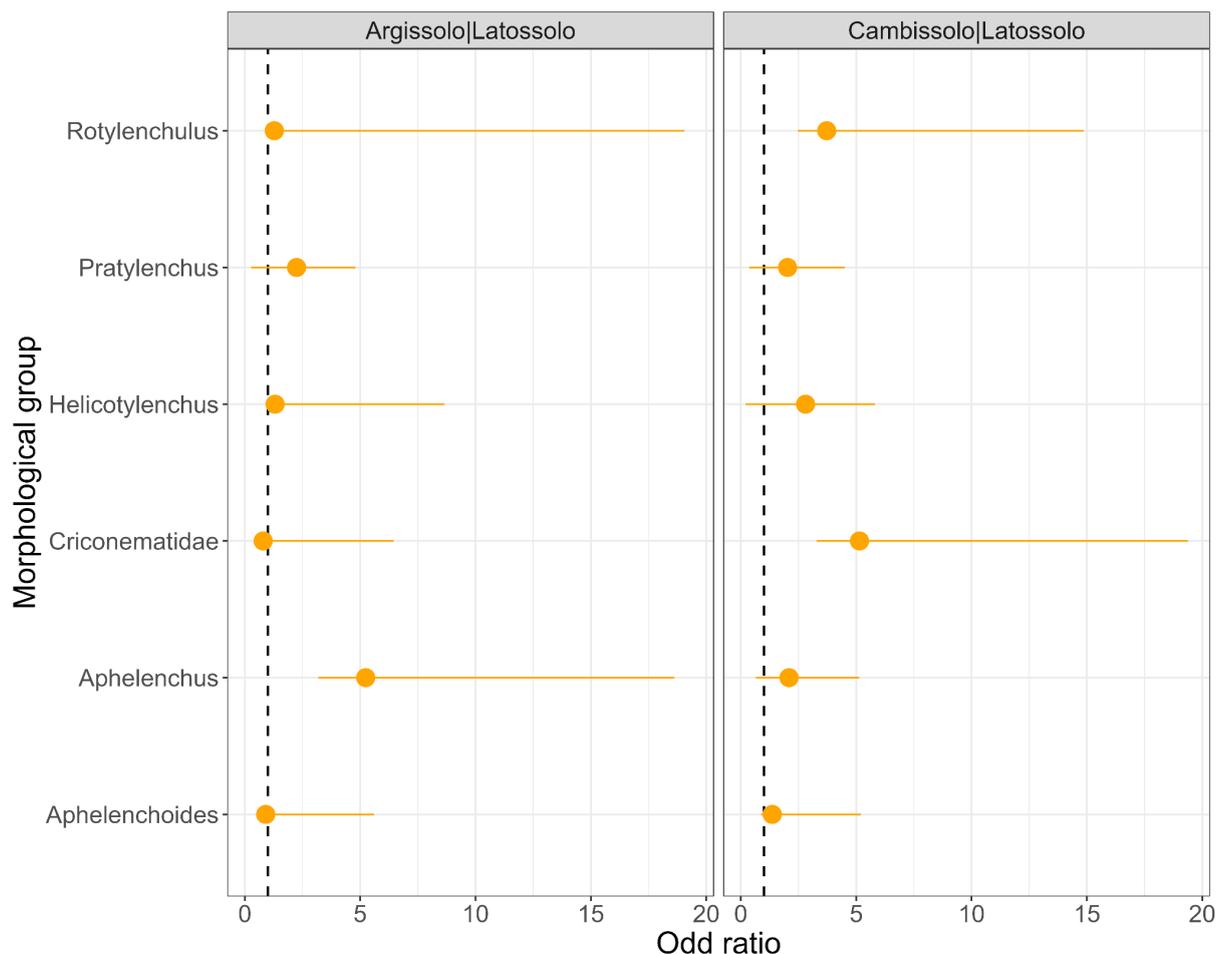
**Fig. 11.** Distribuição da variância média (pontos) para o efeito aleatório dos grupos A) campos dentro de municípios dentro de regiões de solos, B) regiões de solo e C) municípios dentro de regiões de solo, a partir dos modelos MLMG ajustado para os grupos mais expressivos em campos de milho amostrados entre os anos de 2021 e 2022, e o intervalo de confiança de 95% (errobar).



**Figura 12.** Quantidade de amostras sob as categorias de risco para A) *Helicotylenchus* (0 - Sem risco ; 1 - Risco insignificante e 2 - Moderado a severo risco) e B) *Pratylenchus* (0 - Sem risco ; 1 - Risco insignificante e 2 - Moderado a severo risco) e C) Criconematidae (0 - Sem risco ; 1 - Risco insignificante e 2 - Moderado a severo risco) em solos do tipo Argissolo, Cambissolo e Latossolo no estado de Goiás.



**Fig. 13** Razão de chance ajustada de nematoides presentes em sequência de cultivo A) Milho-Soja do que em Milho-soja e outras culturas como referência e B) plantio direto/mínimo do que convencional como referência, a partir do Modelo Linear Generalizado (MLG) com distribuição binomial assumida para os grupos mais expressivos, intervalo de confiança de 95% (errobar) e linha vertical do limiar da razão de chance. O valor abaixo do limiar representa que há uma maior chance do nematoide estar presente em A) rotação de culturas e presente no B) sistema convencional de plantio, respectivamente.



**Fig. 14** Razão de chance ajustada dos nematoides serem presentes em solos do tipo Argissolo e Cambissolo em relação ao Latossolo referência, a partir de Modelo Linear Generalizado com distribuição binomial assumida para os grupos mais expressivos, intervalo de confiança de 95% (errobar) e linha vertical tracejada representa o limiar de razão de chance. O valor abaixo do limiar representa que há uma maior chance do nematoide estar presente no latossolo, em comparação aos solos Argissolo e Cambissolo.

## SUPLEMENTAR

**Tabela Suplementar 1.** Abundância, densidade média e máxima abundância de nematoides/100 cm<sup>3</sup> e 1 g de raiz dos grupos identificados no estado de Goiás em campos de cultivo na cultura do milho.

Grupo morfológico	Incidência <sup>c</sup>	Densidade média (DP) <sup>b</sup>	Máximo <sup>c</sup>	Mínimo <sup>d</sup>	Abundância média (DP) <sup>a</sup>
Anguinidae	97	16	79	6	14 (17)
<i>Aphelenchus</i>	288	27	253	7	23 (28)
<i>Aphelenchoides</i>	211	22	113	6	17 (19)
Criconematidae	78	49	679	6	48 (91)

<i>Helicotylenchus</i>	317	180	3529	1	124 (250)
<i>Hemicycliophora</i>	1	11	33	6	11 (7)
<i>Heterodera</i>	58	18	86	6	17 (19)
<i>Hoplolaimus</i>	3	6	6	6	6 (-)
Longidoridae	4	6	6	6	6 (-)
Belonolaimidae	1	19	19	19	19 (-)
<i>Meloidogyne</i>	43	12	99	6	12 (19)
<i>Paratrichodorus</i>	15	9	39	6	9 (8)
<i>Paratylenchus</i>	3	33	73	13	33 (34)
<i>Pratylenchus</i>	237	57	2364	2	44 (197)
<i>Rotylenchus</i>	93	13	53	6	12 (10)
<i>Rotylenchulus</i>	22	442	1638	6	442 (564)
<i>Scutellonema</i>	11	9	13	6	8 (3)
<i>Trichodorus</i>	17	27	259	6	27 (61)
<i>Tylenchorhynchus</i>	125	16	246	6	12 (38)
Tylenchidae	46	13	113	6	16 (13)
<i>Xiphinema</i>	2	12	19	6	12 (9)

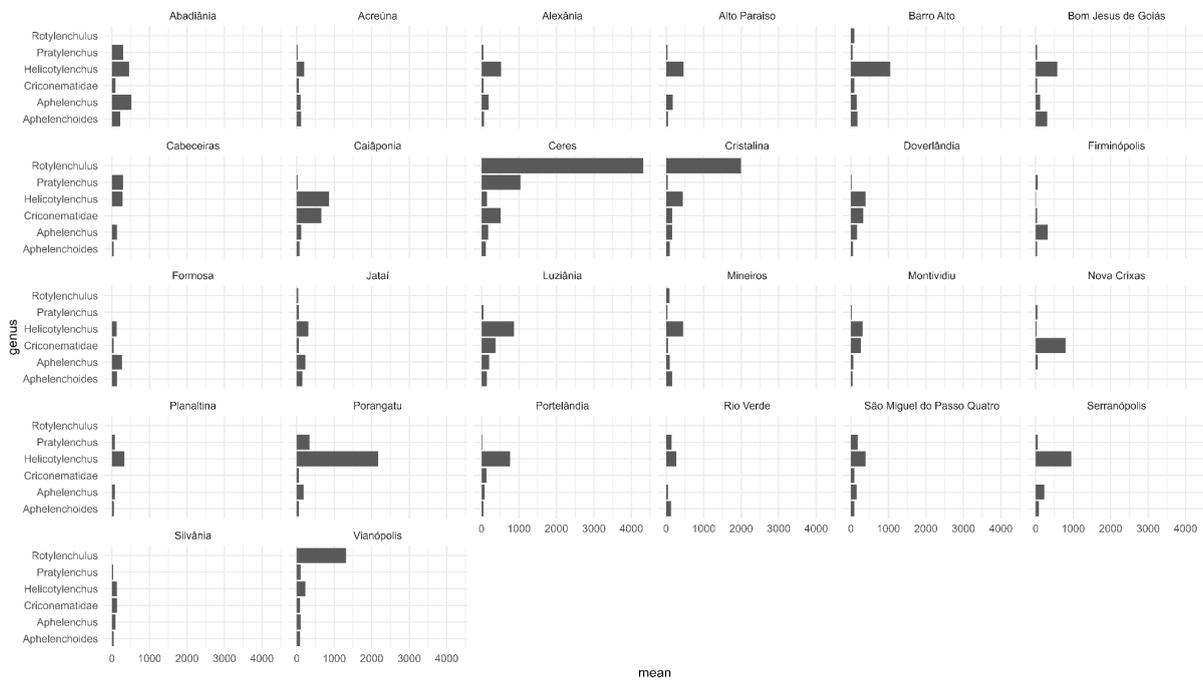
**Tabela Suplementar 02.** Incidência de nematoides em quatro regiões amostradas do estado de Goiás.

<b>Grupos morfológicos</b>	<b>Mesorregiões</b>
<i>Trichodorus</i>	3
<i>Paratrichodorus</i>	3
<i>Heterodera</i>	3
Longidoridae	2
<i>Hoplolaimus</i>	2

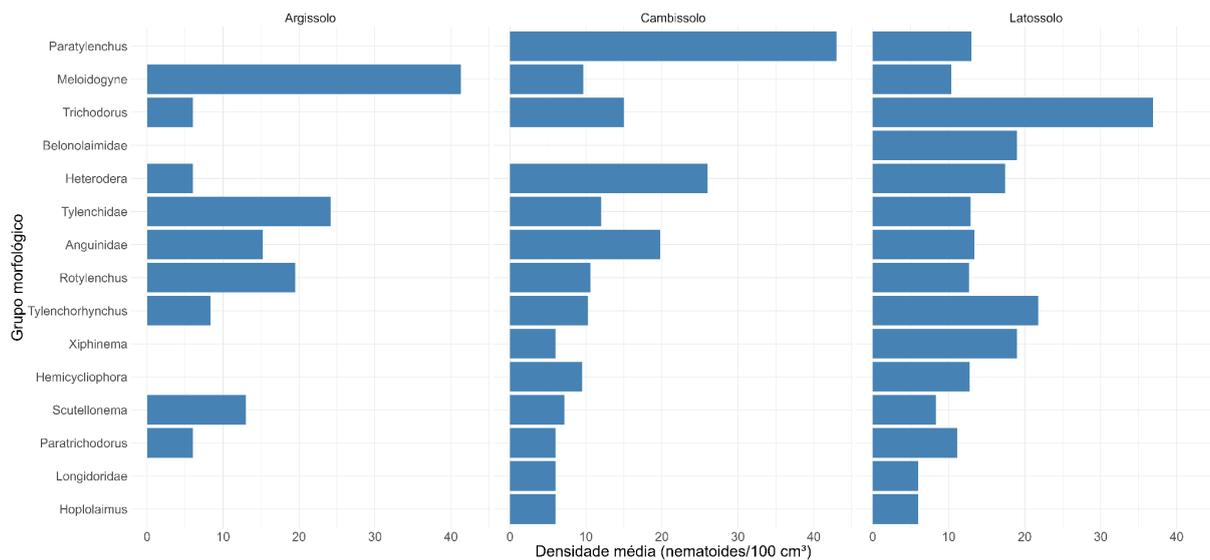
<i>Xiphinema</i>	1
<i>Paratylenchus</i>	1
Belonolaimidae	1

**Tabela Suplementar 3.** Densidade média de nematoides/100 cm<sup>3</sup> de solo e 1 g de raiz em quatro mesorregiões amostradas no estado de Goiás.

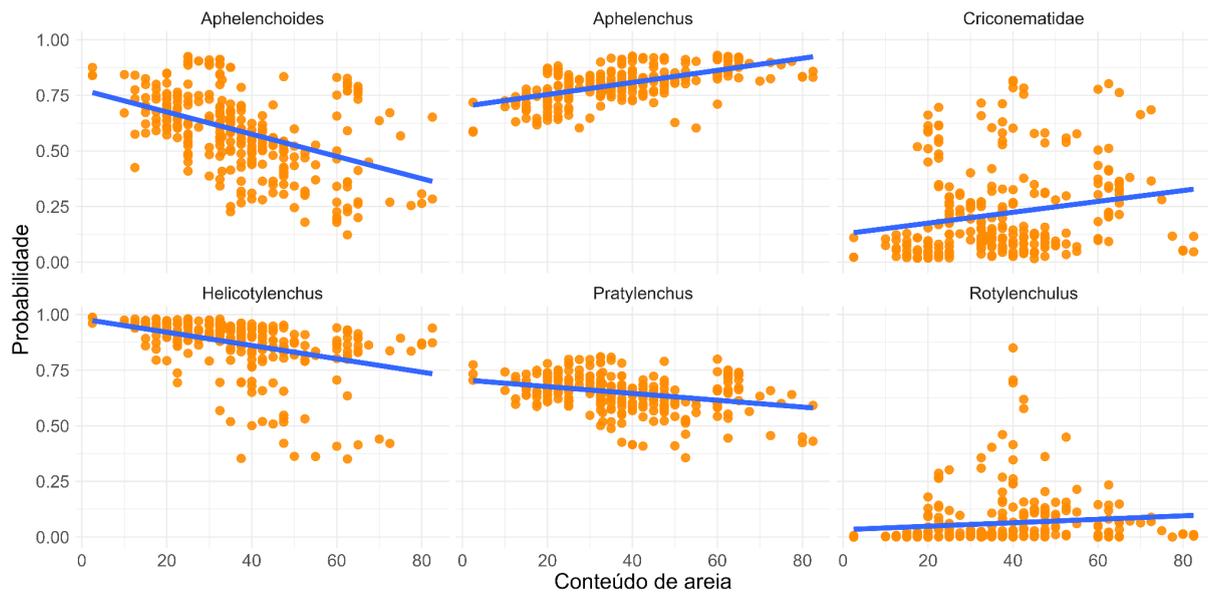
<b>Grupo morfológico</b>	<b>Centro</b>	<b>Leste</b>	<b>Sul</b>	<b>Sudeste</b>
Anguinidae	40	104	17	80
<i>Aphelenchoides</i>	82	271	344	236
<i>Aphelenchus</i>	151	542	202	313
Criconematidae	206	33	22	332
<i>Helicotylenchus</i>	612	2807	1142	2982
<i>Hemicycliophora</i>	4	25	15	8
<i>Heterodera</i>	-	50	107	192
<i>Hoplolaimus</i>	-	6	3	-
Longidoridae	-	3	9	-
<i>Meloidogyne</i>	3	35	26	19
Belonolaimidae	-	-	-	21
<i>Paratrichodorus</i>	-	21	4	20
<i>Paratylenchus</i>	-	99	-	-
<i>Pratylenchus</i>	1020	395	277	265
<i>Rotylenchulus</i>	2109	74	245	4
<i>Rotylenchus</i>	13	60	26	145
<i>Scutellonema</i>	3	3	4	14
<i>Trichodorus</i>	-	14	1	100
<i>Tylenchorhynchus</i>	35	28	5	76
Tylenchidae	28	89	106	16



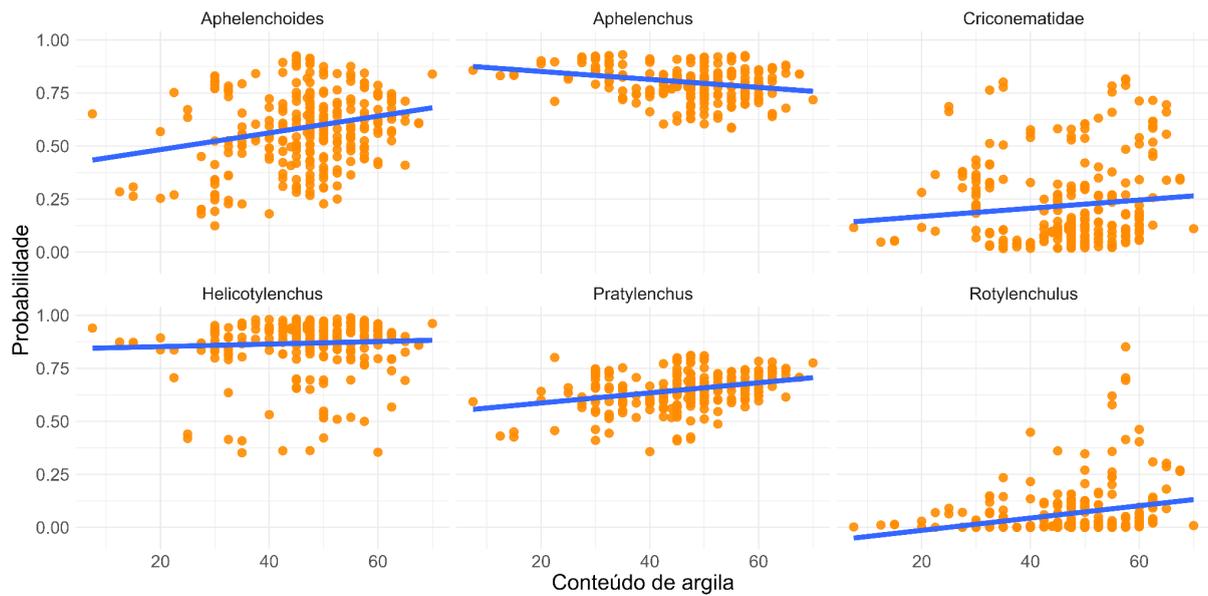
**Figura Suplementar 1.** Densidade média de nematoides/100 cm<sup>3</sup> de solo e 1 g de raiz dos mais expressivos nematoides identificados em 354 amostras entre os 26 municípios do estado de Goiás.



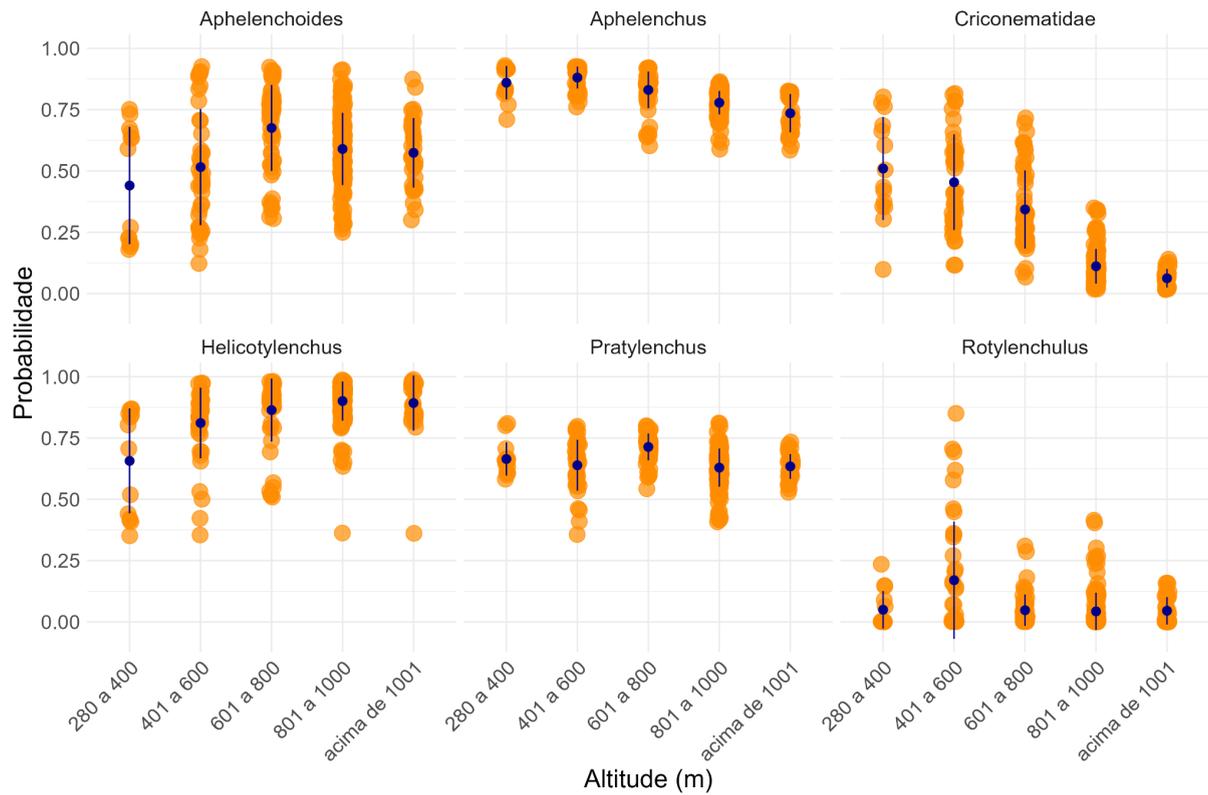
**Figura Suplementar 2.** Densidade média de nematoides/100 cm<sup>3</sup> de solo e 1 g de raiz dos grupos de menor expressão entre os solos do tipo Argissolo, Cambissolo e Latossolo em 354 amostras entre os 26 municípios do estado de Goiás.



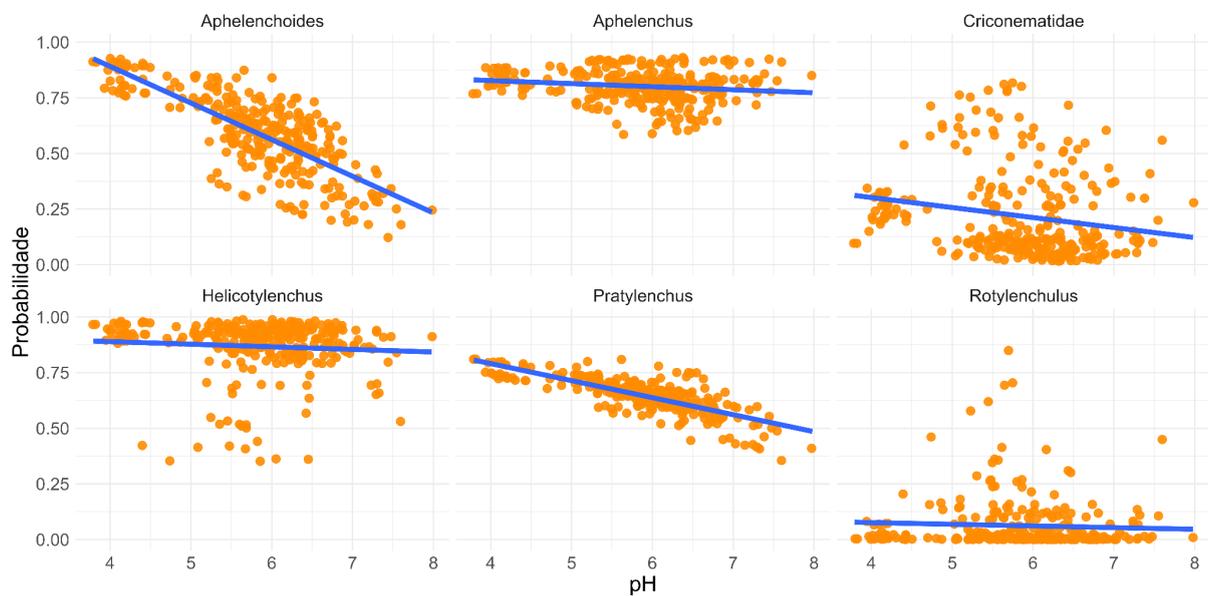
**Figura Suplementar 3.** Probabilidade de encontrar os fitonematoides em percentagem de areia em campos a partir dos valores estimados por modelos logísticos binários.



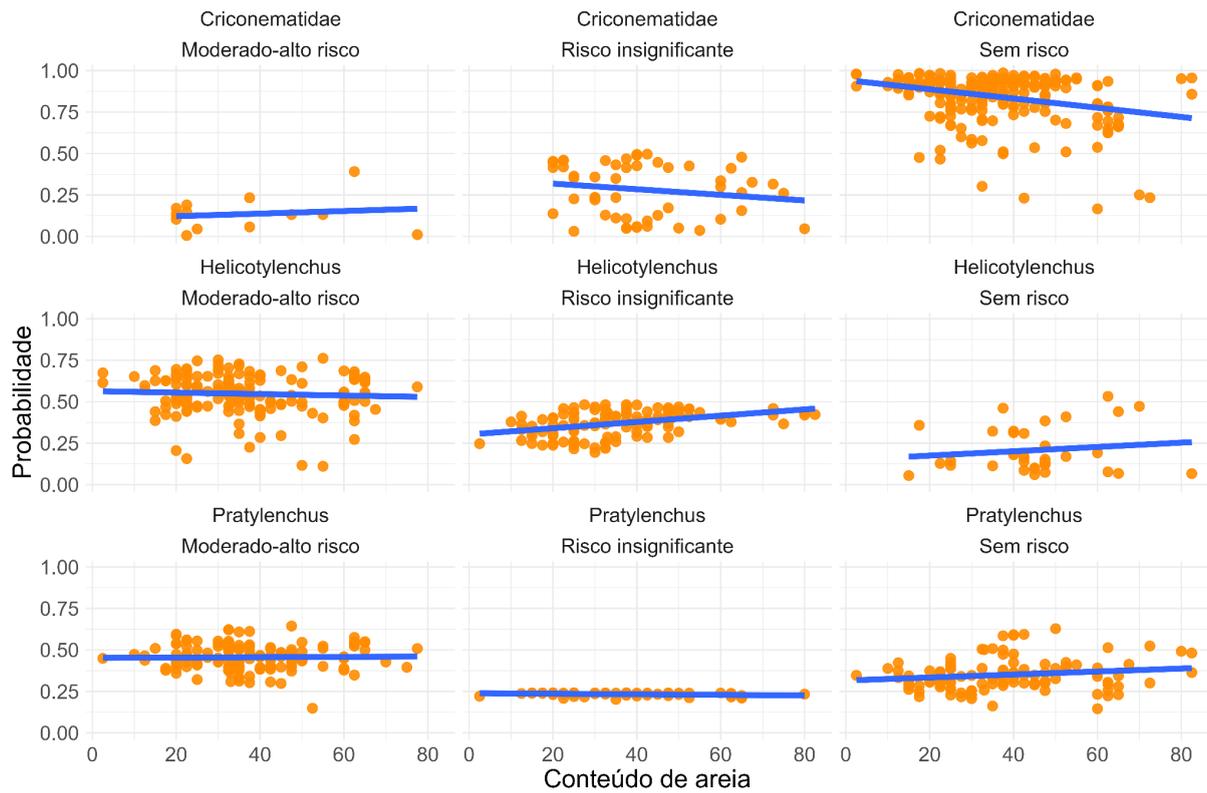
**Figura Suplementar 4.** Probabilidade de encontrar os fitonematoides em percentagem de argila em campos a partir dos valores estimados por modelos logísticos binários.



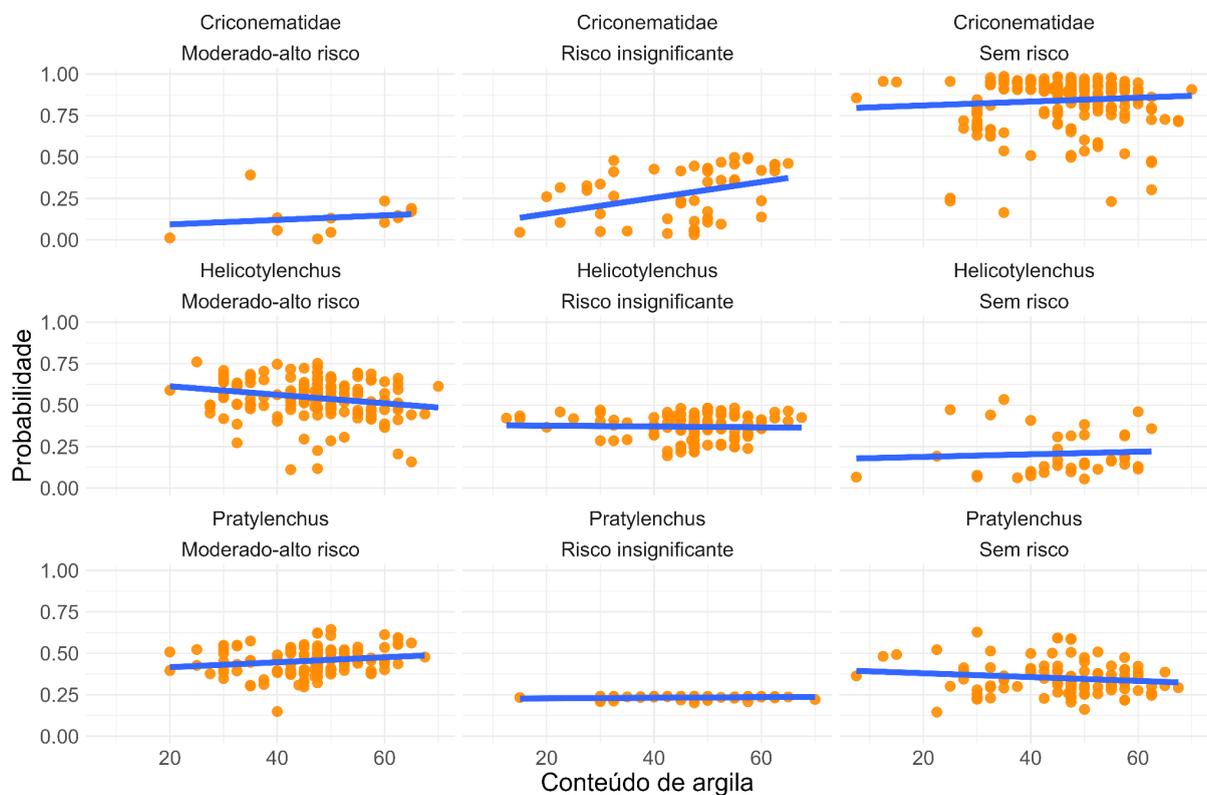
**Figura Suplementar 5.** Probabilidade de encontrar os fitonematoides mais expressivos em Goiás nas faixas 280 a 400, 401 a 600, 601 a 800, 801 a 100 e acima de 1000 m de altitude a partir dos valores estimados por modelos logísticos binários, sendo o ponto azul representando a média e os intervalos o desvio padrão.



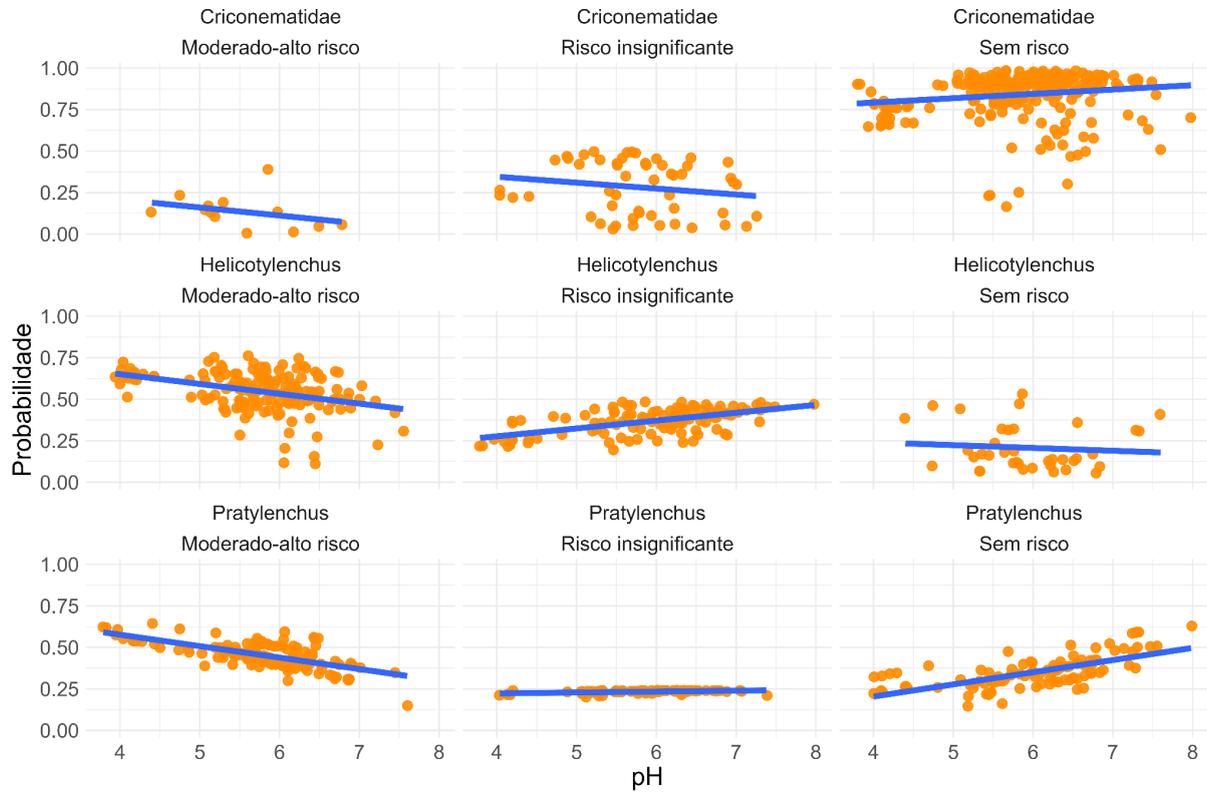
**Figura Suplementar 6.** Probabilidade de encontrar os fitonematoides nos gradientes de pH de 4 a 8 a partir dos valores estimados por modelos logísticos binários.



**Figura Suplementar 7.** Probabilidade dos fitonematoides alcançarem o limiar de dano correspondente aos grupos morfológicos sob a influência da percentagem de areia em campos a partir dos valores estimados por modelos logísticos ordinários.



**Figura Suplementar 8.** Probabilidade dos fitonematoides alcançarem o limiar de dano correspondente aos grupos morfológicos sob a influência da percentagem de argila em campos a partir dos valores estimados por modelos logísticos ordinários.



**Figura Suplementar 9.** Probabilidade dos fitonematoides alcançarem o limiar de dano correspondente aos grupos morfológicos sob a influência do gradiente de pH em campos a partir dos valores estimados por modelos logísticos ordinários.