

**CARACTERIZAÇÃO ECOLÓGICA DA COMUNIDADE DE NEMATOIDES QUE
HABITA A COPA DE ÁRVORES DO BIOMA MATA ATLÂNTICA**

THAIS DE MORAES FERREIRA

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO - 2025**

CARACTERIZAÇÃO ECOLÓGICA DA COMUNIDADE DE NEMATOIDES QUE
HABITA A COPA DE ÁRVORES DO BIOMA MATA ATLÂNTICA

THAIS DE MORAES FERREIRA

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologia Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como
parte das exigências para obtenção do título de
Doutora em produção vegetal”

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Moreira Souza

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
FEVEREIRO - 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

F383

Ferreira, Thais de Moraes.

Caracterização ecológica da comunidade de nematoides que habita a copa de árvores do bioma Mata Atlântica / Thais de Moraes Ferreira. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2025.

94 f. : il.

Inclui bibliografia.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2025.

Orientador: Ricardo Moreira de Souza.

1. ecologia. 2. índices ecológicos. 3. nematologia. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

CARACTERIZAÇÃO ECOLÓGICA DA COMUNIDADE DE NEMATOIDES QUE
HABITA A COPA DE ÁRVORES DO BIOMA MATA ATLÂNTICA

THAIS DE MORAES FERREIRA

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutora em produção vegetal”

Aprovada em 26 de fevereiro de 2025

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **VICENTE MUSSI DIAS**
Data: 08/06/2026 17:29:00-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Dr. Vicente Mussi Dias (D.Sc. Produção Vegetal - Fitossanidade - UENF)

Dr. Alexandre Macedo Almeida (D.Sc., Produção Vegetal – UENF)

Prof. Dr. Fábio Ramos Alves (D.Sc., Agronomia -fitopatologia - UFES)

Prof. Dr. Ricardo Moreira de Souza (PhD., Patologia/Nematologia – UENF)
Orientador

Dedico a Deus e a minha família!!

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A minha família, que me apoia desde o início e me dá o suporte necessário para concluir essa trajetória.

Ao meu namorado, Rodrigo, pela ajuda com o Excel e principalmente por todo carinho e amor nessa trajetória.

Ao meu orientador Ricardo, por todos esses anos de ensinamento, paciência e parceria.

A minha amiga de laboratório Mariana, por toda cumplicidade de sempre.

Ao meu amigo Alexandre, por toda parceria e participação das coletas.

Ao meu amigo Rafael, por todo suporte na estatística desse trabalho.

Ao Sérgio, por ser nosso motorista e cozinheiro nas viagens de campo.

Ao Cacau, escalador das árvores, por toda parceria de campo.

Ao Ralph, nosso guia na mata de Desengano – RJ.

Ao proprietário rural do Sítio em Domingos Martins – ES, por permitir nosso acesso.

Aos colegas André e prof. Adriana pelo empenho em nos ajudar com as identificações das árvores.

Aos membros da banca, por toda colaboração em tornar esse trabalho ainda melhor.

A UENF, por todo acolhimento durante esses anos.

A Capes, pelo fomento da bolsa.

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	viii
INTRODUÇÃO GERAL.....	11
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
Introdução Geral aos Nematoides.....	13
Nematoides em Áreas Florestais.....	15
A Mata Atlântica como Ecossistema.....	16
Estrutura das copas florestais.....	18
Índices Ecológicos.....	21
ABUNDÂNCIA E RIQUEZA DE NEMATOIDES NA COPA DE ÁRVORES EM TRÊS ÁREAS DA MATA ATLÂNTICA.....	25
¹ Formatado de acordo com as regras de submissão da revista Zoologia.....	25
RESUMO.....	25
INTRODUÇÃO.....	26
MATERIAL E MÉTODOS.....	29
Áreas de amostragem e sua caracterização.....	29
Plano de Amostragem.....	32
Extração e identificação dos nematoides.....	36
Quantificação e identificação taxonômica dos nematoides.....	37
ANÁLISE DE DADOS.....	38
RESULTADOS.....	39
DISCUSSÃO.....	45
REFERÊNCIAS.....	50
APÊNDICE.....	53
ESTRUTURA DA COMUNIDADE DE NEMATOIDES NA COPA DE ÁRVORES DA MATA ATLÂNTICA.....	56
INTRODUÇÃO.....	57
MATERIAL E MÉTODOS.....	59
Caracterização ecológica da comunidade de nematoides.....	59
Amostragem intensiva das três árvores com maior densidade de nematoides	59

Curva de rarefação para amostragem da nematofauna de copa na Mata Atlântica	62
Distribuição espacial da nematofauna de copa na Mata Atlântica	62
ANÁLISE DE DADOS	63
Índices Ecológicos	63
Cálculo do número ideal de amostras simples (curva de rarefação) por árvore da Mata Atlântica	65
Distribuição espacial da nematofauna de copa na Mata Atlântica	66
RESULTADOS	67
DISCUSSÃO	78
CONCLUSÃO	83
REFERÊNCIAS	84
APÊNDICE	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

RESUMO

FERREIRA; Thaís de Moraes; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Fevereiro de 2025; CARACTERIZAÇÃO ECOLÓGICA DA COMUNIDADE DE NEMATOIDES QUE HABITA A COPA DE ÁRVORES DO BIOMA MATA ATLÂNTICA; Orientador: Prof. Dr. Ricardo Moreira Souza.

O filo Nematoda compreende $\frac{4}{5}$ de todos os metazoários do planeta. Essa imensa abundância, combinada à diversidade trófica do filo, confere aos nematoides papéis importantes nos ciclos biogeoquímicos dos ecossistemas terrestres. Em florestas, pouco se sabe sobre a diversidade de nematoides na copa das árvores, pois nematologistas têm focado há décadas nos nematoides presentes no solo. Possivelmente, a biodiversidade e complexidade ecológica da copa de florestas neotropicais inclui uma nematofauna diversa e complexa e, até o momento, pouco conhecida. Portanto, este estudo teve como objetivo ampliar o conhecimento sobre a nematofauna presente na copa de árvores na Mata Atlântica (M.A.), por meio de uma abordagem taxonômica e ecológica. Foram realizadas amostragens em três áreas distintas da M.A., com diferentes altitudes e formações florestais: floresta semidecídua de baixa altitude (12–67 metros acima do nível do mar), floresta ombrófila densa de altitude média (303–638 m) e floresta ombrófila densa de alta altitude (989–1041 m). Em cada área, amostras estratificadas foram coletadas em troncos, ramos e folhas de 10 árvores do estrato superior. A identificação taxonômica dos nematoides foi realizada até o nível de gênero. Comparou-se a nematofauna entre as três áreas amostradas; entre as 10 árvores amostradas em cada área; e entre os habitats tronco, ramos e folhas, em cada área. A caracterização ecológica foi feita com base nos índices de abundância e diversidade de Shannon-Wiener, Simpson, Pielou e Margalef, e dos Índices de Maturidade, de Enriquecimento, de Estrutura e de Canal. A similaridade entre comunidades foi avaliada pelo teste de Bray-Curtis, e a homogeneidade das frequências de gêneros foi testada pelo teste de Qui-quadrado. A influência da matéria orgânica acumulada (líquens, musgo, raízes de epífitas e detritos) sobre os troncos e ramos sobre a abundância de nematoides foi investigada por meio do coeficiente de correlação de Pearson. Os resultados mostram que a comunidade de nematoides na copa das árvores é abundante e diversa, sendo distinta em cada área de M.A., cada árvore, e entre os troncos e ramos da mesma árvore. Aparentemente, a estrutura da nematofauna é influenciada por diferenças regionais ecológicas e climáticas,

características individuais das árvores e variações microambientais entre troncos e ramos. Em conclusão, a variabilidade observada na comunidade de nematoides entre as áreas, árvores e habitats destaca a copa das árvores como um ecossistema altamente complexo, moldado por interações entre fatores abióticos e bióticos. Este trabalho contribui para o entendimento da biodiversidade e das interações ecológicas nas copas de florestas tropicais, evidenciando a importância da Mata Atlântica para a conservação da biodiversidade global.

Palavras-chave: Microhabitats, índices ecológicos e nematologia.

ABSTRACT

FERREIRA; Thaís de Moraes; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. **Fevereiro** 2025; Ecological Characterization of the Nematode Community Inhabiting the Tree Canopy of the Atlantic Forest; Supervisor: Prof. Dr. Ricardo Moreira Souza.

The phylum Nematoda comprises 4/5 of all metazoans on the planet. This immense abundance, combined with the trophic diversity of the phylum, gives nematodes important roles in the biogeochemical cycles of terrestrial ecosystems. In forests, little is known about the diversity of nematodes in the tree canopy, as nematologists have focused on soil-dwelling nematodes for decades. The biodiversity and ecological complexity of the canopy of Neotropical forests likely includes a diverse and complex nematofauna that is, to date, poorly understood. Therefore, this study aimed to expand knowledge about the nematofauna present in the tree canopy of the Atlantic Forest (M.A.), through a taxonomic and ecological approach. Sampling was carried out in three distinct areas of the M.A., with different altitudes and forest formations: low-altitude semideciduous forest (12–67 m above sea level), medium-altitude dense ombrophilous forest (303–638 m) and high-altitude dense ombrophilous forest (989–1041 m). In each area, stratified samples were collected from trunks, branches and leaves of 10 trees in the upper stratum. Taxonomic identification of nematodes was performed to the genus level. The nematofauna was compared among the three sampled areas; among the 10 trees sampled in each area; and among the trunk, branch and leaf habitats in each area. Ecological characterization was based on the Shannon-Wiener, Simpson, Pielou and Margalef abundance and diversity indices, and the Maturity, Enrichment, Structure and Channel Indices. The similarity between communities was assessed by the Bray-Curtis test, and the homogeneity of genera frequencies was tested by the Chi-square test. The influence of accumulated organic matter (lichens, moss, epiphytic roots and detritus) on trunks and branches on nematode abundance was investigated using Pearson's correlation coefficient. The results show that the nematode community in the tree canopy is abundant and diverse, being distinct in each M.A. area, each tree, and between trunks and branches of the same tree. Apparently, the structure of the nematofauna is

influenced by regional ecological and climatic differences, individual tree characteristics and microenvironmental variations between trunks and branches. In conclusion, the variability observed in the nematode community among areas, trees and habitats highlights the tree canopy as a highly complex ecosystem, shaped by interactions between abiotic and biotic factors. This work contributes to the understanding of biodiversity and ecological interactions in the canopy of tropical forests, highlighting the importance of the Atlantic Forest for the conservation of global biodiversity.

Keywords: Micro habitats, ecological indices, nematology

INTRODUÇÃO GERAL

A Organização das Nações Unidas definiu os ecossistemas terrestres como foco do objetivo para o desenvolvimento sustentável do planeta (United Nations, 2024a). Nesse objetivo, dá-se especial atenção às florestas, nas quais vivem mais de 80% de todas as espécies de animais e plantas terrestres do planeta (United Nations, 2024b).

Além de abrigar toda essa riqueza genética, as florestas cumprem serviços ambientais à humanidade, como sequestro de carbono, ciclagem de nutrientes e energia, participação em ciclos climáticos e abastecimento regular de bacias hidrográficas (Brockerhoff et al., 2017). As florestas também provêm serviços sociais e culturais, ao oferecer produtos e herança cultural às comunidades rurais, tradicionais e indígenas, bem como opções de lazer, turismo e espiritualidade às comunidades urbanas (Higuchi et al., 2012).

A despeito desses valores à humanidade, ao longo dos milênios as florestas temperadas e tropicais foram reduzidas a cerca de 50% de suas coberturas originais (Hansen et al., 2018; Yale School of the Environment, 2025). Os países devem priorizar a redução da degradação das florestas tropicais e o manejo apropriado das áreas de preservação. No Brasil, destaca-se a importância do bioma Mata Atlântica (M.A.) (Tabarelli et al., 2004; Fischer e Lindenmayer, 2007).

A M.A. é um *hotspot* para preservação da biodiversidade (Mittermeier et al., 1998; Myers et al., 2000), com grande número de espécies endêmicas de plantas, aves, anfíbios, peixes e mamíferos (Stehmann et al., 2009; MMA, 2018). No entanto, a diversidade e o endemismo de microrganismos, micro e mesofauna ainda são desconhecidos, pois poucos inventários foram realizados para esses grupos (Lambais et al., 2006).

Calcula-se que quatro em cada cinco metazoários do planeta são nematoides (Nielsen et al., 2014). Estima-se também que o filo Nematoda é o segundo em diversidade, atrás apenas de Arthropoda (Hugot et al., 2001). A abundância e diversidade trófica dos nematoides explicam o seu papel marcante nos ciclos biogeoquímicos do planeta (Yeates et al., 1993). De fato,

nematoides micófagos e bacteriófagos atuam sobre a população e o *turn over* de decompositores primários (fungos e bactérias). Nematoides fitófagos reduzem a produção primária das plantas e contribuem de forma significativa na mineralização do nitrogênio. Nas cadeias tróficas de ecossistemas terrestres e aquáticos, nematoides são o elo intermediário entre decompositores e consumidores de níveis superiores (Bardgett et al., 1999).

Até o momento, poucos estudos abordaram a fauna de nematoides (nematofauna) no bioma M.A. Quanto a outras florestas, há dois estudos que realizaram a ecometagenética de nematoides no solo, copa e serapilheira de florestas tropicais na Costa Rica. Esses estudos confirmaram a alta diversidade de nematoides. Apesar dessa diversidade ser distinta entre esses três ambientes e a comunidade presente nos solos ser mais dominante, a comunidade encontrada em copa foi bem relevante, em termos de indicadores ambientais, comportando nematoides micófagos e bacteriófagos, muitos deles de espécies ainda desconhecidas (Porazinska et al., 2010; Porazinska et al., 2012). Amostras de diferentes espécies de árvore nos EUA analisou a distribuição e a densidade dos nematoides o que indica que eles podem ser empregados como indicadores para análise de qualidade de habitats (Mitchell et al., 2009).

Sabendo-se que a copa das florestas guarda uma grande biodiversidade de nematoides e de outros invertebrados (Lowman e Rinker, 2004; Lowman et al., 2013), este estudo teve como objetivo conhecer a comunidade de nematoides na copa das árvores da M.A. Em especial, caracterizou-se a riqueza e a abundância de gêneros e grupos tróficos em diferentes áreas da M.A.; comparou-se a comunidade de nematoides das diferentes áreas, árvores e habitats das árvores; e caracterizou-se a comunidade de nematoides através de vários índices ecológicos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Introdução Geral aos Nematoides

Nematoides são organismos microscópicos extremamente diversificados, encontrados em praticamente todos os ambientes terrestres e aquáticos. Eles pertencem ao filo Nematoda, que inclui tanto espécies de vida livre quanto parasitas de plantas e animais. Estima-se que existam de 500 mil a 10 milhões de espécies de nematoides (Hoogen et al., 2019).

Um aspecto notável é o papel dos nematoides como bioindicadores, uma vez que sua diversidade e estrutura comunitária respondem rapidamente às mudanças ambientais. Por exemplo, alterações na composição do solo, influências antrópicas ou variações climáticas podem impactar diretamente esses organismos, fornecendo informações valiosas sobre a qualidade dos ecossistemas (Bongers e Ferris, 1999). A classificação funcional dos nematoides em guildas tróficas, como bacteriófagos, micófagos, onívoros e predadores, também é amplamente utilizada em estudos ecológicos (Ferris et al., 2001).

Estudos como o de Yeates (2003) revelam que a abundância de nematoides pode ultrapassar centenas de milhares de indivíduos por metro quadrado, sendo eles um dos grupos mais representativos em termos de biomassa no solo.

As interações ecológicas entre as comunidades bióticas do solo são amplamente reconhecidas e têm sido objeto de estudo devido à sua relevância nos ecossistemas terrestres (Wardle et al., 2004). Como parte da biota do solo,

os nematoides destacam-se como modelos ideais para estudos ecológicos (Liu et al., 2019) em razão de sua presença em praticamente todos os ambientes (Bongers e Ferris, 1999), elevada densidade populacional e notável diversidade taxonômica (Hugot et al., 2001).

Com a maioria dos nematoides tendo comprimento variando de 0,5 a 5 mm, eles habitam os poros do solo e desempenham funções cruciais nas cadeias alimentares subterrâneas (Yeates, 2003). Além disso, exercem papel essencial na ciclagem de nutrientes. Nematoides bacteriófagos e micófagos consomem grande quantidade de bactérias e fungos decompositores, o que aumenta a eficiência desses na decomposição da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e formação do húmus, sendo considerados agentes-chave nos fluxos energéticos que estruturam os ecossistemas terrestres (Hugot et al., 2001).

A composição e a riqueza das comunidades de nematoides são fortemente moduladas por fatores abióticos, como o clima e as propriedades do solo. A temperatura média anual e a precipitação, por exemplo, atuam como importantes determinantes da composição taxonômica e da diversidade de nematoides em regiões temperadas (Ciobanu et al., 2015; Shao et al., 2023).

A sazonalidade térmica é associada ao aumento na abundância de nematoides micófagos e fitoparasitas, enquanto o oposto foi observado para bacteriófagos. A seca, por sua vez, tende a reduzir a diversidade taxonômica e funcional dessas comunidades, além de limitar a contribuição dos nematoides nos processos de decomposição (Wardle et al., 2004). De fato, períodos de seca têm efeitos mais prejudiciais aos nematoides micófagos e predadores do que aos bacteriófagos. Além disso, a seca pode alterar a proporção entre nematoides predadores e fitoparasitas, com possíveis consequências negativas para o desempenho das plantas (Ferris, 2010).

A compreensão dos efeitos de fatores abióticos sobre as comunidades de nematoides é fundamental para se prever alterações nas dinâmicas

ecológicas em resposta às mudanças climáticas globais. Além disso, estudos que investigam a interação entre condições ambientais e características funcionais dos nematoides podem fornecer percepções sobre a resiliência e vulnerabilidade dos ecossistemas, contribuindo para estratégias de conservação e manejo sustentável (Ritzinger et al, 2010). A integração de análises taxonômicas e funcionais em diferentes biomas é, portanto, essencial para ampliar o conhecimento sobre a diversidade e os papéis ecológicos desses organismos (Ferris, 2010; Bongers e Ferris, 1999).

Nematoides em Áreas Florestais

As áreas florestais, especialmente a copa de árvores, representam um habitat único para diversas formas de vida, incluindo nematoides. Apesar de serem tradicionalmente menos estudadas do que o solo, a copa de árvores oferece microhabitats distintos que podem influenciar diretamente a composição das comunidades de nematoides (Nadkarni e Matelson, 1989; Ozanne et al., 2003).

Um dos fatores determinantes da copa das árvores é o acúmulo de matéria orgânica, como folhas em decomposição, musgos e líquens, que servem como substratos ricos para o desenvolvimento desses organismos (Stork et al., 1997). A variação de umidade e temperatura nas copas, em comparação com o solo, cria condições microclimáticas específicas que favorecem a presença de espécies adaptadas a essas condições (Ozanne et al., 2003).

Nadkarni e Matelson (1989) destacaram que a copa das árvores pode ser considerada como reservatórios de biodiversidade, desempenhando papel fundamental na conectividade entre diferentes estratos florestais. Esses habitats arbóreos possuem uma complexidade estrutural que favorece interações entre organismos.

Por outro lado, Stork et al. (1997) e Ozanne et al. (2003) sugerem em seus estudos que a composição e abundância de nematoides em áreas florestais estão intimamente ligadas às condições locais, como tipo de vegetação, disponibilidade de nutrientes e qualidade do solo. A fragmentação e degradação das florestas, que afetam diretamente a integridade da copa, também podem impactar negativamente essas comunidades, reduzindo a diversidade funcional e os serviços ecossistêmicos associados aos nematoides.

Compreender a ecologia dos nematoides em áreas florestais é essencial para se ampliar o conhecimento sobre a biodiversidade oculta e os processos ecológicos que ocorrem acima do solo, especialmente em biomas tropicais ameaçados, como a M.A. Apesar dos avanços, o conhecimento sobre a diversidade e as funções ecológicas desses organismos na copa ainda é pouco explorado. Estudos que integrem análises taxonômicas, funcionais e ambientais são cruciais para compreender as dinâmicas dessas comunidades e sua contribuição para os serviços ecossistêmicos. Dado o impacto das mudanças climáticas e das ações antrópicas, a conservação desses habitats deve ser uma prioridade para garantir a integridade ecológica das florestas tropicais. (Van Straalen & Van Gestel, 1994; Mitchell et al., 2009; Porazinska et al., 2012).

A Mata Atlântica como Ecossistema

A M.A. é reconhecida como um dos biomas mais biodiversos do planeta, mas também um dos mais ameaçados (Van der Putten e Hol, 2022). Esse bioma, que se estende ao longo da costa brasileira, destaca-se pela elevada diversidade de espécies e alto grau de endemismo. No entanto, menos de 12% de sua cobertura original permanece preservada, em consequência da intensa exploração agrícola, urbana e industrial. Essas características tornam a M.A. um dos 35 hotspots globais de biodiversidade, regiões que combinam

uma rica diversidade biológica com significativas perdas de habitat (Mittermeier et al., 2005).

A M.A. transformou-se em um mosaico de pequenos fragmentos florestais, cercados por áreas agrícolas, pastagens, florestas plantadas (como eucaliptos ou pinheiros) e zonas urbanas (Joly et al., 2014). Os fragmentos florestais da M.A. geralmente possuem dimensões reduzidas, o que compromete a sobrevivência de diversas espécies. Como consequência, aproximadamente 2.845 espécies da Mata Atlântica estão ameaçadas de extinção, representando cerca de 24,1% das espécies avaliadas nesse bioma (IBGE, 2023). Além disso, 82% das mais de 2.000 espécies de árvores exclusivas da região estão em risco de extinção (Lima et al., 2024).

A situação é similar para a fauna: 380 espécies estão ameaçadas, o que corresponde a 60% da lista oficial de espécies brasileiras em risco. A perda de vertebrados tem sido significativa, com 9% de todas as espécies de vertebrados terrestres do bioma ameaçadas de extinção. Entre os vertebrados endêmicos, uma em cada quatro espécies encontra-se na mesma situação (Brockerhof et al., 2017).

Considerando a alta taxa de endemismo do bioma (Mittermeier et al., 2005), essas projeções sugerem que os impactos futuros podem ser significativos, caso as mudanças climáticas e o desmatamento persistam em um ritmo acelerado (Joly et al., 2014). A perda de habitats naturais e as alterações nas condições ambientais podem afetar drasticamente a biodiversidade (Brockerhoff et al., 2017).

Nesse contexto, é fundamental compreender a dinâmica das comunidades biológicas, especialmente aquelas presentes em microhabitats específicos, como os nematoides. A complexidade estrutural da M.A. oferece uma ampla variedade de microhabitats, incluindo troncos, ramos e camadas de serapilheira, tornando-se um local ideal para o estudo de comunidades de nematoides. A heterogeneidade ambiental desse bioma cria gradientes de condições que favorecem a adaptação de diferentes espécies a nichos específicos, ampliando a diversidade funcional (Mitchell et al., 2009).

Além disso, os nematoides desempenham papéis essenciais na manutenção dos ciclos biogeoquímicos em florestas tropicais. Embora não realizem diretamente a decomposição da matéria orgânica, eles contribuem indiretamente para esse processo ao interagir com microrganismos decompositores, como bactérias e fungos, promovendo a ciclagem de nutrientes e a fertilidade do solo (Porazinska et al., 2010; Porazinska et al., 2012).

A importância da M.A. para a regulação climática também não deve ser subestimada. Sua vegetação desempenha um papel crucial na fixação de carbono, contribuindo para mitigar os efeitos das mudanças climáticas globais. No entanto, a fragmentação florestal e a perda de habitat ameaçam não apenas as espécies que ali vivem, mas também os serviços ecossistêmicos oferecidos por este bioma. Entre esses serviços, destaca-se a manutenção da qualidade dos solos, na qual os nematoides atuam como bioindicadores da saúde do ecossistema, devido à sua sensibilidade a alterações ambientais (Bongers e Ferris, 1999; Ferris et al., 2001).

A relevância da M.A. para estudos ecológicos é amplamente reconhecida, mas desafios como a perda de habitat e as mudanças climáticas ameaçam a integridade de seus ecossistemas. Nesse contexto, pesquisas sobre nematoides podem fornecer *insights* valiosos sobre o *status* ecológico do bioma e subsidiar estratégias de conservação e restauração ambiental.

Estrutura das copas florestais

A arquitetura da copa ajuda a determinar a dinâmica do ecossistema florestal, a diversidade biológica, microclima, processos ecológicos, sucessão e sua história evolutiva ou parte dela. Para a copa das árvores é usado o termo “dossel”, cobertura, ou camada mais alta da vegetação (Richards, 1954).

O dossel florestal é um subecossistema caracterizado por sua complexidade estrutural e relevância ecológica. Ele engloba uma combinação de folhas, galhos, ramos finos, flores, fauna associada, e fatores abióticos intrínsecos, como o ar, e o ambiente circundante. O ambiente nas florestas varia continuamente ao longo do perfil vertical, sendo que o dossel reflete tanto a arquitetura da comunidade vegetal quanto a composição de espécies. Ele desempenha um papel essencial na ciclagem de nutrientes, no fluxo de energia e nas interações entre plantas e animais, conectando o solo à interface entre a floresta e a atmosfera (Moffett, 2000).

Nas últimas décadas, o estudo das copas das florestas tem atraído um número crescente de pesquisadores. Inicialmente, essas expedições foram motivadas tanto pela busca por aventura, com a escalada de árvores, quanto pelo fascínio de descobrir novas espécies. Os primeiros exploradores europeus, por exemplo, recorriam a escaladores e até treinavam macacos para coletar amostras de espécies exóticas que habitavam as alturas dos dosséis (Trichon, 2002).

Ecologistas pioneiros, atuando em florestas antigas do noroeste do Pacífico, adaptaram técnicas de escalada em montanhas para garantir o acesso seguro à copa das árvores altas (Denison, 1973). Posteriormente, essas estratégias foram ajustadas para uso em florestas tropicais, como as da Costa Rica. Desde então, uma ampla gama de ferramentas foi desenvolvida para explorar os dosséis, ampliando as possibilidades de pesquisa científica. Em 2002, já existiam 11 guindastes operando em florestas tropicais e temperadas em todo o mundo, permitindo avanços no estudo das camadas superiores, onde ocorrem significativas trocas de energia e materiais (Ozanne et al., 2003).

Na década de 1980, quando as técnicas de acesso ao dossel estavam em desenvolvimento, os estudos nessa área ainda se encontravam em estágio inicial. A pesquisa era predominantemente descritiva, conduzida por pesquisadores trabalhando de forma isolada, com escassez de métodos padronizados de coleta de dados e protocolos de campo. Apesar dessas limitações, as questões abordadas eram motivadas pela curiosidade científica

(Nadkarni e Parker, 1994). À medida que os métodos de acesso ao dossel evoluíram, pesquisadores de diversas áreas começaram a contribuir para esse campo, incluindo ecologia de ecossistemas e paisagens, meteorologia, zoologia, botânica e biologia da conservação (Lowman, 2013).

No início do século XXI, com o campo mais consolidado, as pesquisas sobre o dossel passaram a envolver colaborações entre vários pesquisadores e grupos interdisciplinares. O número de publicações científicas relacionadas à estrutura e função do dossel cresceu significativamente no campo da biologia (Nadkarni e Parker, 1994).

Os estudos sobre o dossel desempenham um papel central nas discussões sobre a riqueza global de espécies, a perda de biodiversidade e os impactos combinados das mudanças globais e das perturbações nos habitats (Ozanne et al., 2003). As florestas se destacam entre os diferentes tipos de vegetação por serem densas, extensas, altas e perenes. Além disso, os dosséis florestais apresentam uma grande diversidade em termos de formas, tamanhos, complexidade, espécies e estruturas. Apesar dessas variações, eles compartilham características comuns em sua estrutura e função. A complexidade estrutural dos dosséis gera uma ampla gama de microambientes, que abrigam uma biota associada, tanto de forma direta quanto indireta (Parker, 1995).

A temperatura e a umidade relativa nos galhos podem variar significativamente em distâncias curtas (1 a 100 cm), influenciando tanto a distribuição quanto a fenologia das espécies que habitam o dossel (Freiberg, 1996). O dossel também altera fatores como temperatura média, umidade relativa, velocidade do vento, luz, som e turbulência. Essas variações, modificadas pela presença do dossel, são métricas cruciais para se compreender o ambiente ecológico e os processos evolutivos dos organismos. Por meio de interações entre superfícies ativas e passivas, o dossel modifica as condições ao seu redor, criando um ambiente mais protegido contra luz solar direta, ventos fortes e flutuações extremas de temperatura (Parker, 1995).

As plantas que ocupam o dossel desempenham um papel fundamental na diversidade da floresta, fornecendo recursos para uma ampla gama de vertebrados, invertebrados e microrganismos (Stork et al., 1997). Embora os fatores que impulsionam essa diversidade não sejam totalmente compreendidos, grande parte está relacionada à elevada complexidade estrutural e microclimática encontrada na copa. Por exemplo, os galhos de uma única árvore podem apresentar microclimas e características de substrato distintos, variando em formato, tamanho, taxa de renovação e composição química (Longino e Nadkarni, 1990).

Medir a estrutura do dossel é fundamental para compreender diversos aspectos da ecologia florestal. Como os dados ecológicos possuem uma natureza intrinsecamente espacial, grande parte das pesquisas consiste em observar elementos estruturais específicos. No entanto, a complexa e dinâmica estrutura tridimensional das paisagens florestais obriga os pesquisadores a focarem seletivamente em um subconjunto de componentes representativos de toda a floresta (Spies, 1998).

Índices Ecológicos

A avaliação da estrutura e funcionamento das comunidades ecológicas é fundamental para se entender a biodiversidade e as relações entre elas. Índices ecológicos foram desenvolvidos para se quantificar aspectos específicos dessas comunidades, permitindo uma análise detalhada de sua composição e dinâmica. Na nematofauna, índices específicos são amplamente utilizados devido às características ecológicas e funcionais desses organismos.

Os índices de diversidade são ferramentas essenciais para a análise ecológica, permitindo a quantificação da variedade de espécies dentro de uma comunidade e a distribuição equitativa dessas espécies. O Índice de Shannon-Wiener (H'), baseado na teoria da informação, é amplamente utilizado para medir a diversidade das espécies em uma comunidade. Esse índice leva em

consideração tanto a riqueza quanto a equitabilidade das espécies. Ele é calculado pela fórmula:

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \cdot \ln p_i$$

Onde p_i é a proporção de indivíduos da espécie i , e S é o número total de espécies. Valores mais altos de H' indicam maior diversidade. Shannon-Wiener é sensível a mudanças na abundância relativa e destaca a uniformidade da comunidade (Magurran, 2021).

O Índice de Simpson (D) mede a probabilidade de que duas amostras retiradas aleatoriamente da comunidade pertençam à mesma espécie. Este índice é sensível a mudanças na abundância das espécies e é frequentemente utilizado em estudos de ecologia (Magurran, 2021).

$$D = \sum_{i=1}^N \left(\frac{s}{N} \right)^2$$

Quanto menor o valor de D , maior a diversidade. O inverso de Simpson ($1/D$) também é usado para destacar comunidades mais diversificadas. Este índice é menos sensível a espécies raras (Magurran, 2021).

A riqueza e equitabilidade das espécies são componentes críticos da biodiversidade, fornecendo *insights* sobre a complexidade e estabilidade das comunidades ecológicas. O Índice de Margalef (D_{mg}) é utilizado para quantificar a riqueza das espécies em uma comunidade. Este índice é particularmente útil em estudos de biodiversidade marinha, onde a riqueza de espécies pode ser um indicador crucial da saúde do ecossistema.

$$d = \frac{s - 1}{\ln(n)}$$

Onde S é o número de espécies e N é o número total de indivíduos. Ele é frequentemente utilizado para estimar riqueza, sendo sensível ao tamanho da amostra (Magurran, 2021).

O Índice de Equitabilidade de Pielou (J') mede a uniformidade da distribuição das espécies em uma comunidade. Um valor próximo de 1 indica uma distribuição equitativa das espécies, sugerindo uma comunidade bem equilibrada (Magurran, 2021).

$$J = \frac{H'}{\ln(N)}$$

Onde J é o estimador para o índice de equitabilidade de Pielou, H' é o valor estimado para o índice de Shannon-Wiener da referida amostra, e N é a abundância total de indivíduos amostrados (Magurran, 2021).

Os índices específicos para nematoides fornecem uma compreensão detalhada da estrutura e função das comunidades de nematoides, que são indicadores valiosos da saúde do solo. O Índice de Maturidade (MI) avalia a proporção de espécies tolerantes e sensíveis a distúrbios, refletindo a estabilidade e integridade ecológica da comunidade de nematoides.

$$IM = \sum_{i=1}^n v(i).f(i)$$

Onde n é o número de táxons, nesse caso, o número de gêneros; $v(i)$ é o valor C-P atribuído para o i -ésimo gênero, e $f(i)$ é a frequência relativa do respectivo i -ésimo gênero na amostra (Ferris, 2010).

O Enrichment Index (EI) avalia a resposta da comunidade de nematoides à disponibilidade de recursos nutrientes. Este índice é útil para identificar áreas enriquecidas ou empobrecidas em nutrientes, oferecendo insights sobre a produtividade do ecossistema (Ferris et al., 2001).

$$IE = 100. \left[\frac{e}{(e + b)} \right]$$

Também temos, o Channel Index (CI) que avalia a proporção de nematoides bacteriófagos e fungívoros na comunidade, fornecendo

informações sobre os canais de decomposição dominantes no solo. Este índice é crucial para entender os processos de ciclagem de nutrientes no ecossistema (Ferris, 2010).

$$IC = \frac{(0,8 \cdot Fu_2)}{[(0,8 \cdot Fu_2) + (3,2 \cdot Ba_1)]}$$

Os índices ecológicos fornecem uma visão abrangente sobre a estrutura e a funcionalidade das comunidades de nematoides. Eles são essenciais para interpretar a influência das condições ambientais na composição das comunidades, especialmente em ecossistemas florestais complexos, como a copa de árvores na M.A. Trabalhos como Ferris (2010) e Magurran (2021) reforçam a importância do uso combinado de índices para uma análise integrada da biodiversidade.

ABUNDÂNCIA E RIQUEZA DE NEMATOIDES NA COPA DE ÁRVORES EM TRÊS ÁREAS DA MATA ATLÂNTICA

¹ Formatado de acordo com as regras de submissão da revista Zoologia.

RESUMO

O filo Nematoda é altamente diverso e abundante nos ecossistemas terrestres e aquáticos, desempenhando funções ecológicas importantes. Entretanto, a nematofauna da copa de florestas permanece pouco conhecida, especialmente na Mata Atlântica (M.A.), bioma de grande biodiversidade e ameaçado. Este estudo teve como objetivo caracterizar a comunidade de nematoides da copa em três áreas da M.A.: uma floresta semidecídua de baixa altitude (GX), uma floresta ombrófila densa de altitude média (DS) e uma floresta ombrófila densa de alta altitude (DM). A coleta foi realizada em 30 árvores do estrato superior, distribuídas entre as áreas. Cada árvore teve amostras retiradas dos habitats tronco, ramos e folhas. A extração dos nematoides foi realizada por método de centrifugação, seguida de identificação morfológica ao nível de gênero. As análises estatísticas incluíram testes de Qui-quadrado para homogeneidade das frequências dos gêneros e análise de dissimilaridade por distância de Bray-Curtis. Foram identificados 38 gêneros pertencentes a 20 famílias. Não foram encontrados nematoides nas folhas. As áreas diferiram significativamente quanto à composição e abundância da nematofauna, sendo a riqueza maior em

DS (31 gêneros) e menor em GX (9 gêneros). A fauna de GX apresentou menor abundância e diversidade, possivelmente em decorrência do histórico de perturbação antrópica. Houve grande variabilidade entre as árvores dentro de cada área, com cada árvore apresentando uma comunidade distinta. Além disso, diferenças significativas foram encontradas entre os habitats tronco e ramos em DS e DM, mas não em GX. Os resultados indicam que a estrutura da nematofauna de copa é moldada por fatores ecológicos regionais, características individuais da árvore e diferenças microambientais entre troncos e ramos. O estudo evidencia a complexidade do ecossistema copa e destaca a necessidade de novas pesquisas para entender as interações que moldam essas comunidades.

Palavras-chave: Nematofauna, copa de árvores, Microhabitats

INTRODUÇÃO

O filo Nematoda apresenta grande diversidade de espécies, com estimativas do número total de espécies variando de 500 mil a 10 milhões (Hodda, 2022). Nematoides são também o grupo de animais mais abundante da Terra. Por exemplo, em um estudo baseado em 6.759 amostras de solo georreferenciadas de diferentes biomas, estimou-se que $4,4 \pm 0,64 \times 10^{20}$ nematoides habitam a camada superficial do solo em todo o mundo (Van den Hoogen et al., 2019). Nematoides predominam também em sedimentos marinhos e de água doce, chegando a compor mais de 90% da meiofauna bentônica (Danovaro et al., 2014).

Nematoides ocupam diferentes níveis tróficos da cadeia alimentar, e desempenham papel fundamental nos ecossistemas terrestres e aquáticos. Os nematoides são categorizados em grupos tróficos conforme os seus hábitos alimentares (Moens, Yeates e De Ley, 2004). Nematoides micófagos e bacteriófagos alimentam-se de fungos e bactérias, respectivamente (Yeates et al., 1993). Nematoides consumidores de eucariotos unicelulares e predadores são um *link* intermediário importante nas cadeias tróficas, pois são predadores e também presas de outros invertebrados e peixes.

Nematoides participam dos processos biogeoquímicos da Terra ao contribuírem para a disponibilidade de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, os quais são essenciais para a produtividade primária dos ecossistemas terrestres. Essa produtividade primária é, porém, reduzida por nematoides parasitos de plantas, tanto em ecossistemas naturais quanto agrícolas. A interação dos nematoides com microrganismos afeta a estrutura e função dos ecossistemas, evidenciando sua importância ecológica na dinâmica dos nutrientes em ambientes naturais (Yeates et al., 1993).

Em ecossistemas florestais, nematoides do solo são extensivamente estudados por seu papel ecológico importante (Guerra, 2021; Ferris, 2010; Du Preez 2022; Zheng, 2023). Entretanto, a fauna de nematoides (nematofauna) da copa das florestas permanece pouco conhecida. Um estudo de ecometagenética com amostras coletadas do solo, serrapilheira e copa de florestas tropicais na Costa Rica revelou uma alta diversidade de nematoides nesses três ecossistemas (Porazinska et al., 2010; 2012). Na copa, foram observados nematoides micófagos, bacteriófagos, predadores e fitoparasitos. Quanto à biodiversidade, a copa contribuiu significativamente para a diversidade total de espécies, não obstante muitas dessas ainda sejam desconhecidas para a ciência. Em outro estudo, realizado em região temperada com amostras de copa de diferentes espécies de árvore, analisou-se a distribuição e a densidade dos nematoides, sugerindo-se que eles sejam utilizados como indicadores para análise de qualidade do ecossistema florestal (Mitchell et al., 2009).

A nematofauna da copa de florestas é uma área promissora para estudos, uma vez que esse ecossistema é importante para a biodiversidade global (Ozanne et al. 2003). A copa apresenta uma complexa interação entre vegetação, fauna e microorganismos (Nadkarni e Matelson 1989; Stork et al. 1997). Esse ecossistema desempenha papel importante na regulação climática, captura de carbono, ciclagem de nutrientes, manutenção da qualidade da água e integridade ecológica das florestas e, portanto, do planeta como um todo (Parker 1995; Brockerhoff et al., 2017). Em geral, estudos sobre a copa de florestas são conduzidos por ecologistas, climatologistas, zoólogos e entomologistas, dentre outros especialistas (MMA, 2024), mas raramente há nematologistas dedicados a esse ecossistema. A caracterização da

nematofauna da copa de florestas - sua diversidade e estrutura da comunidade - ampliará nosso entendimento sobre esses organismos, e poderá revelar novas interações ecológicas e adaptativas que ocorrem nesse ecossistema.

A Mata Atlântica (M.A.) é um dos biomas mais biodiversos e ameaçados do planeta (Myers et al., 2000). Com uma área total de cerca de 1.309.579 quilômetros quadrados (km²), estende-se da região nordeste à região sul do Brasil, e desde a costa atlântica até aproximadamente 900 Km continente adentro, chegando a áreas da Argentina e Paraguai (MMA, 2024). Tem grande diversidade vegetal e animal, com muitas espécies endêmicas. É composta predominantemente por florestas úmidas, que incluem as formações ombrófila densa, aberta e mista, representando cerca de 70% do bioma. Outros 25% do bioma corresponde às florestas estacionais decíduais e semidecíduas, enquanto os ecossistemas de manguezais, restingas e campos de altitude juntos ocupam aproximadamente 5% da área total (Ribeiro et al., 2009). Cada um desses ecossistemas desempenha papel essencial na manutenção da biodiversidade e na provisão de serviços ecossistêmicos (Stehmann et al., 2009; MMA, 2024).

Sabe-se que a copa das florestas úmidas guarda grande diversidade de invertebrados (Lowman e Rinker, 2004; Lowman et al., 2013), e estudos seminais sugerem grande diversidade de nematoides (Mitchell et al., 2009; Porazinska et al., 2010; 2012). Portanto, objetivou-se neste estudo ampliar o conhecimento da nematofauna da copa de florestas, tendo-se a M.A. como o bioma de escolha.

Para isso, realizou-se levantamento da comunidade de nematoides de copa em três áreas distintas da M.A.: **a)** área de floresta semidecídua de baixa altitude (12 a 67 metros acima do nível do mar); **b)** área de floresta ombrófila densa de altitude média (303 a 638 metros); e **c)** área de floresta ombrófila densa de alta altitude (989 a 1041 metros). Em cada uma dessas áreas, realizou-se amostragens estratificadas em troncos, ramos e folhagem de 10 árvores do estrato superior da floresta, processando-se as amostras para extração dos nematoides. Procedeu-se, então, a identificação taxonômica dos nematoides ao nível de gênero, com auxílio de chaves taxonômicas dicotômicas e pictóricas.

Neste capítulo, relata-se comparações que foram feitas **a)** entre as nematofaunas das três áreas; **b)** entre as nematofaunas das 10 árvores amostradas, em cada área separadamente; e **c)** entre as nematofaunas dos habitats tronco, ramo e folhas, em cada área separadamente. A nematofauna das três áreas foi comparada quanto à homogeneidade das frequências dos gêneros encontrados, empregando-se o teste de Qui-quadrado. A similaridade da nematofauna das 10 árvores amostradas em cada área foi comparada quanto à riqueza de gênero e abundância total de cada gênero, empregando-se o teste de Bray-Curtis. A similaridade da nematofauna dos habitats tronco, ramo e folhas em cada área foi comparada quanto à homogeneidade das frequências dos gêneros encontrados, empregando-se o teste de Qui-quadrado.

Para se testar a hipótese de que a quantidade de matéria orgânica (líquens, musgo, raízes de epífitas e detritos) sobre os troncos e ramos é um dos determinantes da abundância da nematofauna, estimou-se o coeficiente de correlação de Pearson, e a significância do coeficiente via teste t, entre as variáveis abundância total de nematoides e massa (g) da matéria orgânica nas amostras coletadas.

MATERIAL E MÉTODOS

Áreas de amostragem e sua caracterização

Foram amostradas três áreas de M.A. (Figura 1): **a)** na Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba (GX), cujas coordenadas da sede administrativa são **21° 24' 29.977" S e 41° 5' 10.342" W**, no município de São Francisco de Itabapoana, Estado do Rio de Janeiro (RJ); **b)** no Parque Estadual do Desengano (DS), cujas coordenadas da entrada do parque são **21° 54' 17.482" S e 41° 56' 59.539" W**. Esse Parque tem áreas nos municípios de Santa Maria Madalena, São Fidélis e Campos dos Goytacazes (RJ); e **c)** na propriedade rural Sítio Pereira, cujas coordenadas da sua entrada são **20° 11' 17.527" S e 40° 45' 40.46" W**, no município de Domingos Martins, Estado do Espírito Santo (ES) (DM).



Figura 1: Distribuição do bioma Mata Atlântica no Brasil, com indicação das três áreas de amostragem (pontos vermelhos) nos estados do Rio de Janeiro (RJ) e Espírito Santo (ES). Fonte: www.pronaturezaviva.com.br

A área GX com 3.259 ha de extensão, localizando-se a cerca de seis Km do litoral, com altitude entre 12 e 67 metros acima do nível do mar (Figura 2). Essa área apresenta mata de tabuleiro semicaducifólia em processo de regeneração. Previamente à criação da Estação Ecológica de Guaxindiba em 2002, essa área sofreu distúrbios antrópicos - extração de madeira e pastagem ocasional por bovinos (Inea, 2024). O clima é quente e úmido (Aw segundo a classificação de Köppen), sem inverno pronunciado, com influência marinha e estação chuvosa no verão (Inea, 2024).

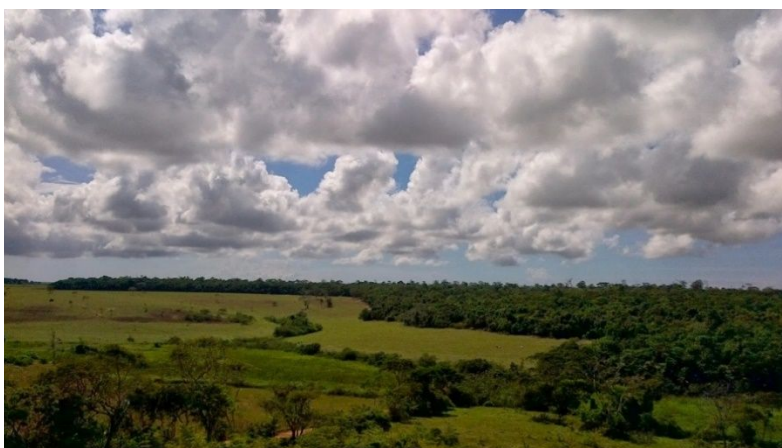


Figura 2: Aspecto da Mata Atlântica na Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba, com área de pastagem em seu entorno. Fonte: www.omeucaminhar.blogspot.com

A área DS tem 21.325 ha, localizando-se a cerca de 50 Km do litoral, com altitude variando entre 300 e 700 metros, com relevo íngreme. Essa área apresenta floresta ombrófila densa de altitude média bem preservada, com vegetação fechada, árvores de grande porte e dossel contínuo, com grande diversidade de plantas e animais. O clima é quente e úmido (Aw), com temperaturas amenas e variações climáticas significativas no inverno (Inea, 2024) (Figura 3).

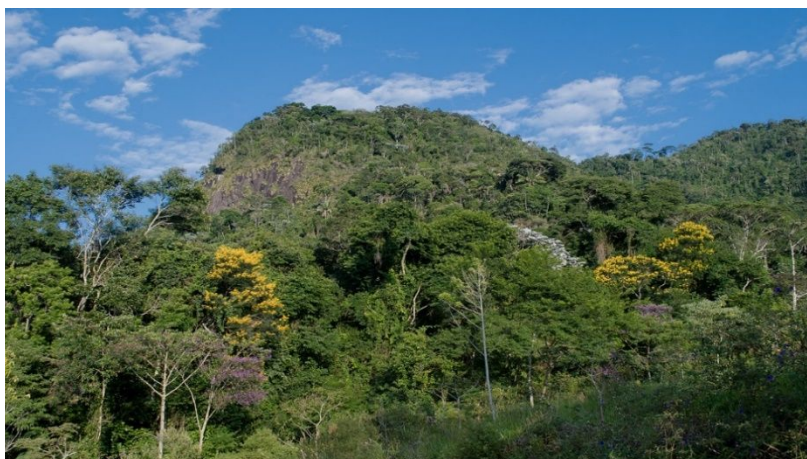


Figura 3: Aspecto da Mata Atlântica no Parque Estadual do Desengano. Fonte: www.flickr.com

A área DM tem 126 ha de extensão, localizando-se a cerca de 260 Km do litoral, com altitude entre 989 e 1041 metros. Essa área apresenta floresta ombrófila densa de alta altitude, com vegetação fechada, árvores de grande porte e dossel contínuo, com grande diversidade de espécies vegetais e animais. O clima é tropical de altitude (Cfb), com temperaturas amenas e umidade elevada. É uma região com pluviosidade bem distribuída ao longo do ano e presença de cursos d'água (Figura 4).



Figura 4: Aspecto da Mata Atlântica na área de Domingos Martins. Fonte: www.vivareal.com.br

Plano de Amostragem

A amostragem das três áreas foi realizada entre os dias 21 e 29 de junho de 2023, no outono, com temperaturas médias diárias amenas e pluviosidade em declínio (Figuras 5-7).

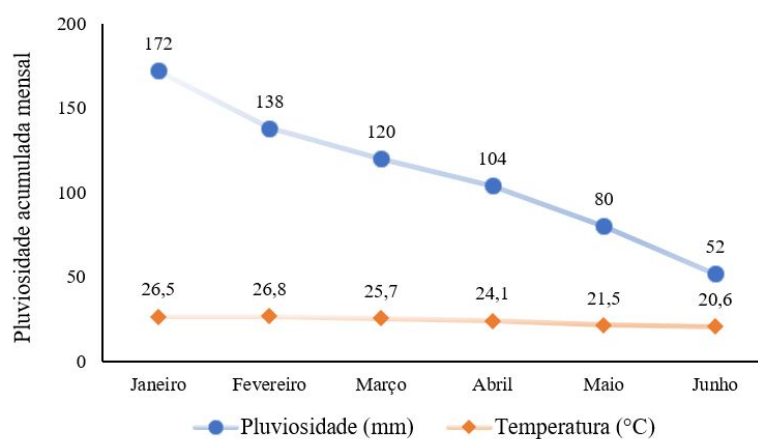


Figura 5: Pluviosidade acumulada mensal e temperatura média diária na Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba, no verão (janeiro a março) e outono (abril a junho) de 2023. Fontes: INMET e Climatempo

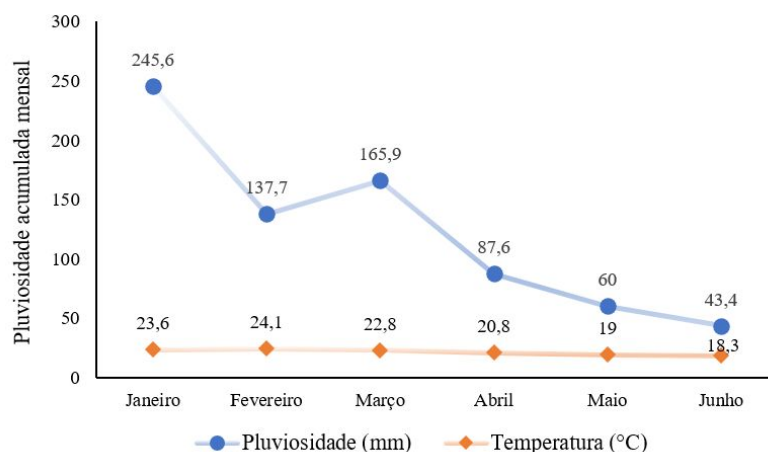


Figura 6: Pluviosidade acumulada mensal e temperatura média diária no Parque Estadual do Desengano, no verão (janeiro a março) e outono (abril a junho) de 2023. Fontes: INMET e Climatempo

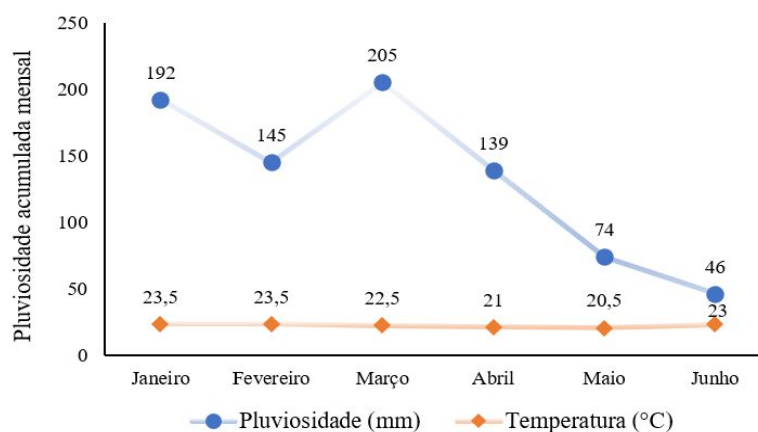
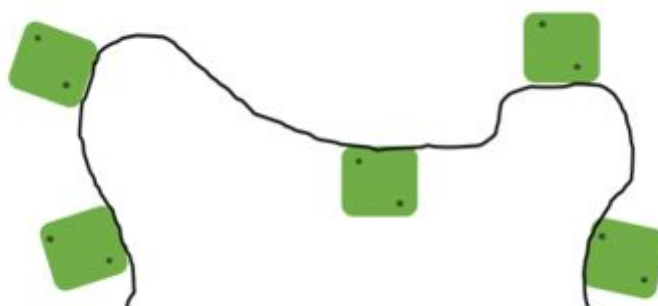


Figura 7: Pluviosidade acumulada mensal e temperatura média diária no município de Domingos Martins (ES), no verão (janeiro a março) e outono (abril a junho) de 2023. Fontes: INMET e Climatempo

O plano de amostragem seguiu as recomendações de Lowman et al. (2012) para estudos voltados a invertebrados que habitam a copa das árvores. Em cada uma das três áreas, foram estabelecidas cinco parcelas de 20 m x 20 m (400 m²) ao longo de trilhas abertas na com facção



M.A.

(Figura 8). O distanciamento entre parcelas foi de ao menos 100 metros. Em cada parcela, foi traçada uma linha imaginária diagonal entre os seus vértices, ao longo da qual duas árvores maduras do dossel superior foram selecionadas. Portanto, foram selecionadas 10 árvores/área. O único critério de seleção das árvores foi a segurança para escalagem, definida pelo escalador profissional. As árvores selecionadas não foram identificadas taxonomicamente devido à ausência de flores e frutos na época da amostragem.

Figura 8: Representação de trilha ao longo da Mata Atlântica (traçado em preto), das parcelas (quadrados verdes), e das duas árvores selecionadas para amostragem em cada parcela (pontos verdes).

Junto a cada árvore selecionada, a equipe preparou o local estendendo uma lona no chão e distribuindo os equipamentos de escalada (Figura 9). Cada membro da equipe desempenhou uma função específica: o escalador subiu na árvore com os equipamentos necessários para a coleta, enquanto outro membro foi responsável pela segurança do escalador. Um terceiro membro documentou o trabalho por meio de fotos e coleta de dados, e acondicionou as amostras coletadas em uma caixa-de-gelo.



Figura 9: Preparando os equipamentos para escalada das árvores e coleta das amostras

Para a amostragem, o ecossistema copa da árvore foi subdividido nos habitats tronco (da base da árvore até a inserção do primeiro ramo lateral); ramos (com circunferência mínima de 30 cm); e folhas. Cada habitat foi amostrado separadamente.

Em cada árvore, o tronco foi visualmente dividido nas sessões 1, 2 e 3 (Figura 10). Os pontos de amostragem foram no encontro das seções 1 e 2, e 2 e 3. O ponto de amostragem entre as seções 1 e 2 esteve sempre a pelo menos três metros do solo. Em cada ponto de amostragem, uma área de 10 × 10 cm (100 cm²) foi selecionada aleatoriamente, e teve a superfície da casca raspada com uma raspadeira metálica para coleta de musgos, algas, líquens e material orgânico aderidos (Figura 11). Esse material foi coletado em um funil feito de garrafa pet e recolhido em saco plástico identificado. O material colhido nos dois pontos do tronco foi unificado, formando uma amostra composta. A cada amostragem, o funil e a raspadeira metálica foram limpos com um pincel e pano.

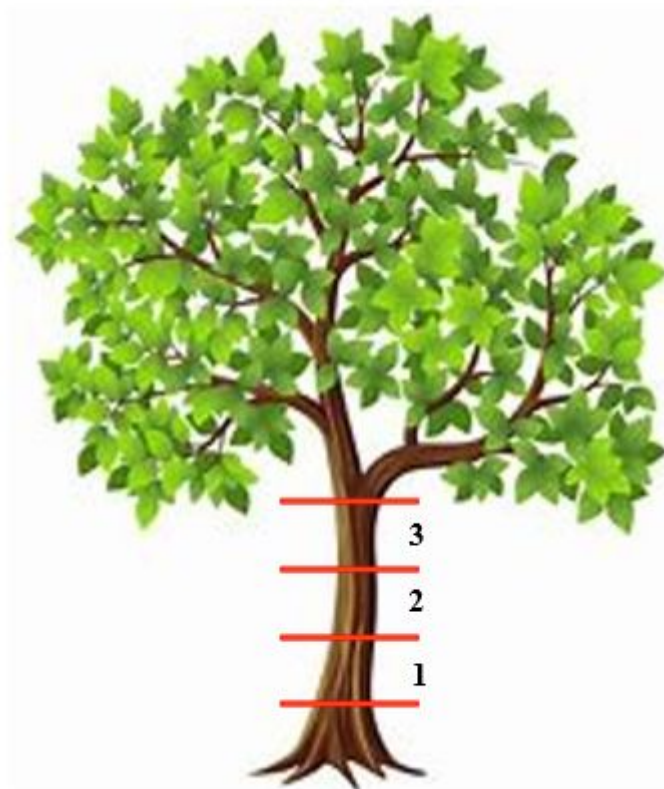


Figura 10: Esquema de um tronco de árvore mostrando a subdivisão nas seções 1, 2 e 3

Em cada árvore, foram selecionados dois ramos, dos quais coletou-se duas amostras simples como descrito acima, formando-se então uma amostra composta. De cada árvore, foram coletadas folhas maduras de um ou mais ramos, totalizando cerca de 100 cm^2 . Portanto, de cada árvore, foram coletadas uma amostra composta de tronco, uma amostra composta de ramos e uma amostra composta de folhas, totalizando 30 amostras compostas/área amostrada.



Figura 11: Escalador profissional coletando musgos, líquens, raízes de epífitas e material orgânico aderido ao tronco. Na foto à direita, o escalador está dentro do círculo vermelho

Extração e identificação dos nematoides

As 90 amostras compostas coletadas nas três áreas foram individualmente homogeneizadas no laboratório e individualmente processadas para extração de nematoides. Utilizou-se o método de Cohen & D'Herde (1972) modificado: todo o material da amostra foi colocado em liquidificador com 100 mL de água filtrada, e triturado em alta velocidade por 20 segundos. A suspensão resultante foi passada em peneira de precisão de 60 *mesh* (aberturas de 0,250 mm) sobreposta à peneira de 500 *mesh* (aberturas de 0,025 mm). O material retido na peneira inferior foi recolhido em tubo e centrifugado em água por cinco minutos a 1.800 rotações por minuto, em centrífuga com distância entre o centro do rotor e o fundo do tubo de 16 cm, resultando em 580 g. Após essa etapa, o sobrenadante foi descartado, e uma solução de sacarose (400 g de açúcar cristal diluído em 750 ml de água, densidade = 1,15) foi adicionada ao tubo e misturada ao pellet com bastão de vidro. A amostra foi novamente centrifugada a 580 g por um minuto. O sobrenadante foi transferido para peneira de 500 *mesh* e lavado em água corrente até se retirar toda a sacarose. Com auxílio de uma pisseta, a suspensão retida foi transferida para tubos de ensaio, e o volume das amostras foi padronizado em 5 ml.

Para preservação dos nematoides, as amostras foram aquecidas em “banho maria” até a temperatura de 65° C. Atingida essa temperatura, procedeu-se imediatamente à fixação dos nematoides com adição de 5 ml de solução aquosa fixadora (formalina a 4%) à temperatura ambiente, e os tubos de ensaio foram lacrados. Após 48 h à temperatura ambiente, as amostras foram transferidas para refrigerador a 12° C até serem observadas para identificação e contagem dos nematoides.

Quantificação e identificação taxonômica dos nematoides

As 90 amostras foram analisadas separadamente. Após homogeneização da amostra por agitação do tubo de ensaio, uma alíquota de 1 ml foi retirada com auxílio de uma pipeta, a qual foi transferida para placa de Petri. Procedeu-se então à contagem e identificação taxonômica de todos os nematoides presentes na alíquota. Para preparação de lâminas temporárias sob microscópio estereoscópico Nikon, adicionou-se a uma lâmina de vidro uma gota de água e duas a três pequenas fibras de vidro para sustentação da lamínula. Em seguida, até três nematoides foram transferidos para a lâmina, e posicionou-se a lamínula.

Para identificação taxonômica dos nematoides ao nível de gênero foram consultadas as seguintes publicações: Jairajpuri e Ahmad (1992), Hunt (1993), De Ley (2003), Eyualem-Abebe et al. (2006), Geraert (2008), Andrassy (2009), Holovachov e Boström (2010), Scholse e Sudhaus (2011), Fonseca e Bezerra (2014), Kanzaki (2014), Smol et al. (2014), Tchesunov (2014), Decremer et al. (2019) e Zullini (2021), bem como as chaves taxonômicas preparadas por K.B. Nguyen (<https://entnemdept.ufl.edu/nguyen/morph/gaster/dipmain.htm>, <https://entnemdept.ufl.edu/nguyen/morph/rhabdi/rhabmain.htm> e <https://entnemdept.ufl.edu/nguyen/morph/cephalob/cephmain.htm>).

ANÁLISE DE DADOS

Não foram encontrados nematoides nas folhas. Portanto, não houve tratamento de dados e análises estatísticas para esse habitat.

Foram computadas a abundância total de nematoides e a riqueza de gêneros do tronco e dos ramos de cada uma das 30 árvores amostradas (Anexo, Tabela 1). A frequência relativa de um gênero foi estimada pela relação entre a abundância de indivíduos desse gênero e a abundância total de nematoides. A frequência relativa dos gêneros foi estimada para cada árvore, somando-se os habitats tronco e ramos, bem como para esses habitats separadamente.

As áreas foram comparadas quanto à homogeneidade das frequências relativas dos gêneros nas 10 árvores (habitats troncos e ramos juntos), via teste de Qui-quadrado ao nível de significância de 5% ($p < 0.05$).

Em cada área, as árvores foram comparadas quanto à riqueza de gêneros e a abundância total e de cada gênero de nematoides (habitats troncos e ramos juntos), via análise de dissimilaridade via distância de Bray-Curtis. A análise de agrupamento considerou o método de ligação média entre grupos (UPGMA). Os coeficientes de correlação cofenética (representatividade do dendrograma) foram testados via teste t ao nível de significância de 1% ($p < 0.01$).

Em cada área, os habitats tronco e ramos foram comparados quanto à homogeneidade das frequências relativas dos gêneros nas 10 árvores, via teste de Qui-quadrado ao nível de significância de 5% ($p < 0.05$).

Estimou-se o coeficiente de correlação de Pearson entre a abundância total de nematoides nas 60 amostras de troncos e ramos das áreas DS, DM e GX e a massa (g) de matéria orgânica obtida nessas 60 amostras. A significância do coeficiente foi testada via teste t, ao nível de significância de 5% ($p < 0.05$).

Todas as análises foram conduzidas com auxílio do programa R, a partir das funções disponíveis nos pacotes ggplot2, factoextra, ecodist e psych.

RESULTADOS

A Figura 12 mostra a abundância total de nematoides nas 20 amostras de troncos e ramos coletadas nas áreas DS, DM e GX. Para cada um dos 38 gêneros encontrados, vê-se a abundância total e a frequência relativa (em % da abundância total) em cada área. Os valores da abundância total dos gêneros podem ser consultados na Tabela 1 do Anexo.

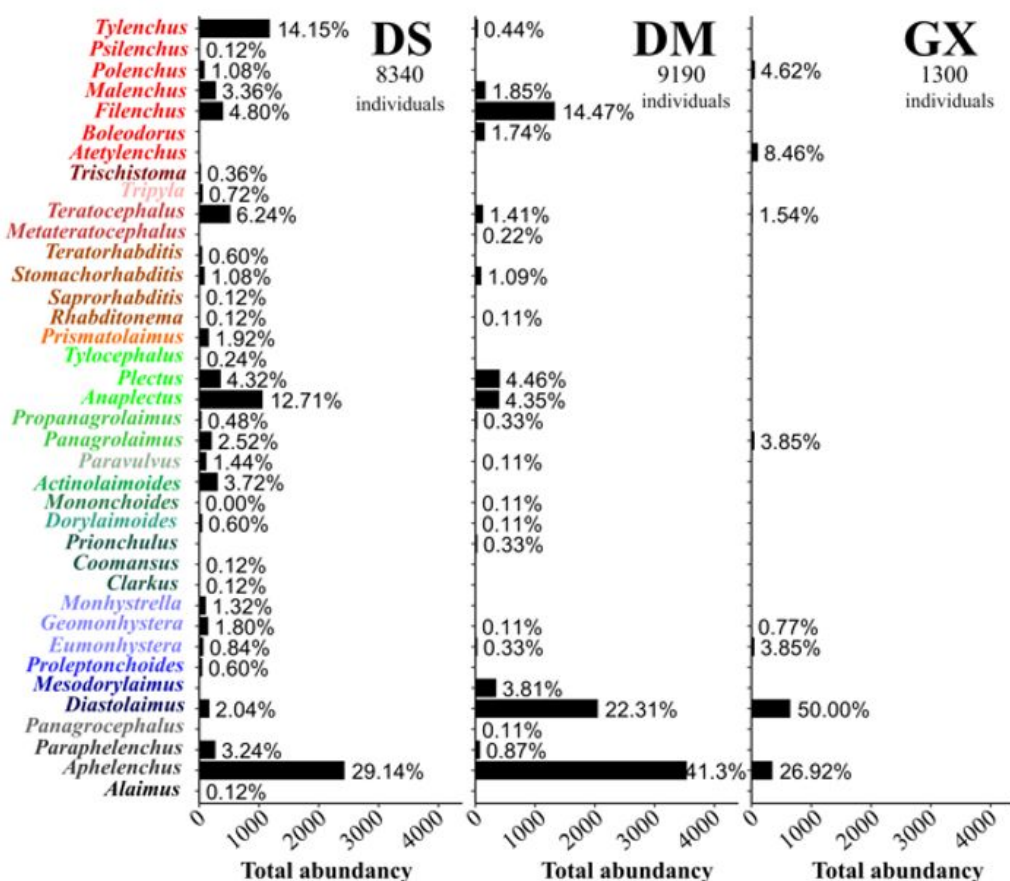


Figura 12: Abundância total de nematoides nas 20 amostras de tronco e ramos coletadas no Parque Estadual do Desengano (DS), na propriedade rural em Domingos Martins (DM) e na Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba (GX). Para cada gênero encontrado, vê-se a abundância total (barra) e a frequência relativa (em % da abundância total na área). Gêneros sem barra e sem percentual não foram encontrados na respectiva área. Gêneros com a mesma cor e tonalidade pertencem à mesma família taxonômica

O teste de Qui-quadrado indicou diferenças significativas ($p < 0.0001$) na frequência relativa dos gêneros encontrados nos troncos e ramos das áreas DM, DS e GX (Tabela 2), indicando que essas áreas têm nematofaunas distintas entre si.

Tabela 2: Teste de Qui-quadrado (X^2) para homogeneidade na frequência relativa de gêneros de nematoides em amostras de troncos e ramos do Parque Estadual do Desengano (DS) - RJ, na propriedade rural em Domingos Martins (DM) - ES e na Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba (GX) – RJ.

Contrast	d.f.¹	X^2	p-valor
DS x DM	35	605.61**	< 0.0001
DS x GX	32	473.63**	< 0.0001
DM x GX	24	261.41**	< 0.0001
DS: trunk x branches	31	242.57**	< 0.0001
DM: trunk x branches	21	157.72**	< 0.0001
GX: trunk x branches	8	10.24 ^{ns}	0.2487

¹ d.f.: graus de liberdade ($n-1$, onde n é o número de gêneros de nematoides que ocorreram em pelo menos um dos elementos do contraste (áreas de amostragem))

** indica estimativas de X^2 estatisticamente significativas ao nível de 5% de significância, indicando que não há homogeneidade entre as frequências relativa dos gêneros na referida comparação

^{ns} indica estimativa de X^2 não significativa ao nível de 5% de significância, indicando que há homogeneidade entre as frequências relativas dos gêneros na referida comparação

A Figura 13 mostra, para cada área, a dissimilaridade (estimada via distância de Bray-Curtis) entre as 10 árvores amostradas, com base na riqueza e abundância total e de cada gênero encontrados nos troncos e ramos. O

coeficiente de correlação cofenética indica o quanto as árvores se diferem entre si nas três áreas amostradas. Os valores percentuais indicam uma ordem decrescente de dissimilaridade entre as árvores, sendo GX, DM e DS.

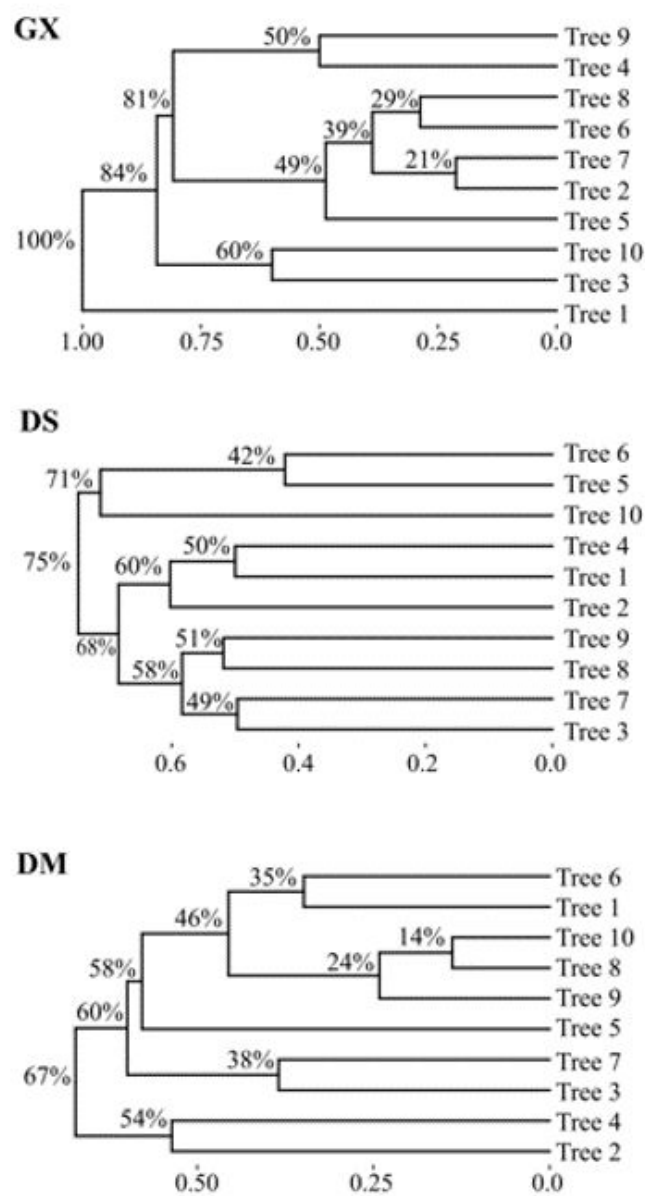


Figura 13: Dissimilaridade estimada via distância de Bray-Curtis, empregando-se o método de ligação média entre grupos (UPGMA), entre as 10 árvores amostradas nas áreas da Estação Ecológica de Guaxindiba (GX), do Parque Estadual do Desengano (DS) e na propriedade rural em Domingos Martins (DM). Percentuais indicam o grau de diferença entre as árvores ou grupos de árvores em relação ao respectivo nó

(junção). Os coeficientes de correlação cofenética foram 0,91, 0,82 e 0,72 para GX, DM e DS, respectivamente, todos diferente de zero, de acordo com o teste t ($p < 1\%$)

A Figura 14 mostra a abundância total de nematoides nas 10 amostras coletadas no habitat tronco e 10 amostras coletadas no habitat ramos, na área DS. Para cada um dos 31 gêneros encontrados, vê-se a abundância total e a frequência relativa (em % da abundância total) em cada habitat. Os valores da abundância total dos gêneros podem ser consultados na Tabela 1 do Anexo.

O teste de Qui-quadrado indicou diferença significativa ($p < 0.0001$) na frequência relativa dos gêneros de nematoides encontrados nos troncos e ramos da área DS (Tabela 2), indicando que a nematofauna desses habitats são distintas.

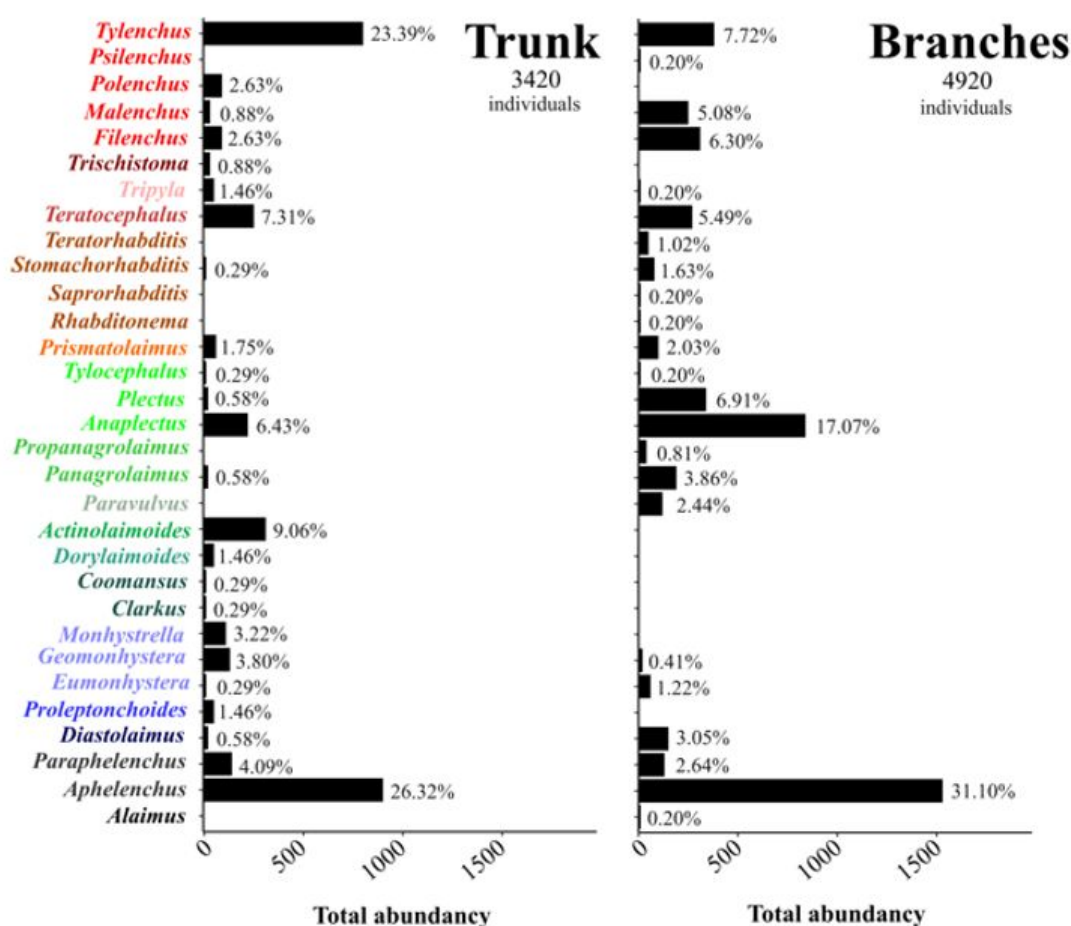


Figura 14: Abundância total de nematoides nas 10 amostras coletadas no habitat tronco e 10 amostras coletadas no habitat ramos na área do Parque Estadual do Desengano. Para cada gênero encontrado, vê-se a abundância total (barra) e a

frequência relativa (em % da abundância total) de cada habitat. Gêneros sem barra e sem percentual não foram encontrados no respectivo habitat. Gêneros com a mesma cor e tonalidade pertencem à mesma família taxonômica

Figura 15 mostra a abundância total de nematoides nas 10 amostras coletadas no habitat tronco e 10 amostras coletadas no habitat ramos, na área DM. Para cada um dos 22 gêneros encontrados, vê-se a abundância total e a frequência relativa (em % da abundância total) em cada habitat. Os valores da abundância total dos gêneros podem ser consultados na Tabela 1 do Anexo.

O teste de Qui-quadrado indicou diferença significativa ($p < 0.0001$) na frequência relativa dos gêneros de nematoides encontrados nos troncos e ramos da área DM (Tabela 2), indicando que a nematofauna desses habitats são distintas.

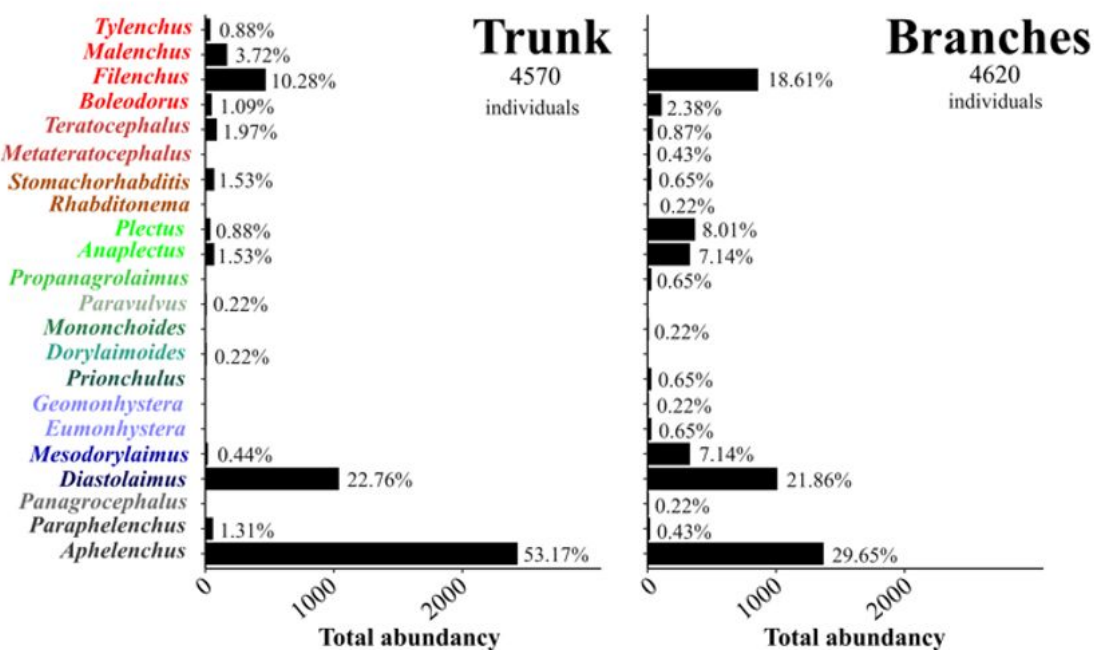


Figura 15: Abundância total de nematoides nas 10 amostras coletadas no habitat tronco e 10 amostras coletadas no habitat ramos na propriedade rural em Domingos Martins. Para cada gênero encontrado, vê-se a abundância total (barra) e frequência relativa (em % da abundância total) de cada habitat. Gêneros sem barra e sem percentual não foram encontrados no respectivo habitat. Gêneros com a mesma cor e tonalidade pertencem à mesma família taxonômica

A Figura 16 mostra a abundância total de nematoides nas 10 amostras coletadas no habitat tronco e 10 amostras coletadas no habitat ramos, na área GX. Para cada um dos 8 gêneros encontrados, vê-se a abundância total e a frequência relativa (em % da abundância total) em cada habitat. Os valores da abundância total dos gêneros podem ser consultados na Tabela 1 do Anexo.

O teste de Qui-quadrado indicou que não há diferença significativa ($p > 0.0001$) na frequência relativa dos gêneros de nematoides encontrados nos troncos e ramos da área GX (Tabela 2), indicando que a nematofauna desses habitats não são distintas.

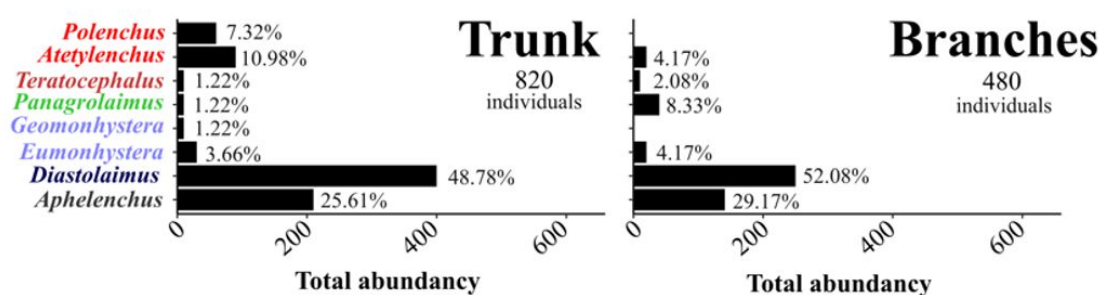


Figura 16: Abundância total de nematoides nas 10 amostras coletadas no habitat tronco e 10 amostras coletadas no habitat ramos na Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba. Para cada gênero encontrado, vê-se a abundância total (barra) e frequência relativa (em % da abundância total) de cada habitat. Gêneros sem barra e sem percentual não foram encontrados no respectivo habitat. Gêneros com a mesma cor e tonalidade pertencem à mesma família taxonômica

A Figura 17 mostra a dispersão e a correlação de Pearson entre a abundância total de nematoides e a massa (g) de matéria orgânica nas 60 amostras de tronco e ramos das três áreas amostradas. O coeficiente r , com valor 0,04, não foi significativo ($p > 0,05$) de acordo com o teste t de Student, indicando não haver correlação significativa entre essas variáveis.

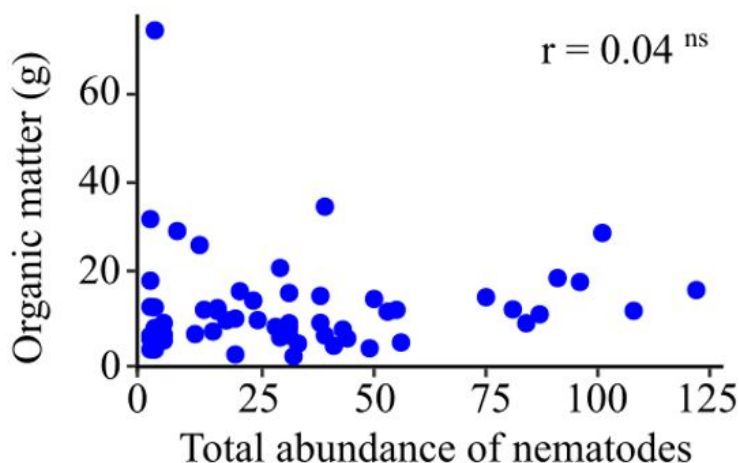


Figura 17: Dispersão e coeficiente de correlação de Pearson (r) entre abundância total de nematoides e massa de matéria orgânica (g) nas 60 amostras coletadas em troncos e ramos nas áreas do Parque Estadual do Desengano, Estação Ecológica de Guaxindiba e propriedade rural em Domingos Martins. ^{ns} indica coeficiente estatisticamente igual a zero, de acordo com o Teste t de Student ao nível de significância de 5%

DISCUSSÃO

Este estudo revelou uma rica nematofauna na copa das árvores da M.A., com 38 gêneros encontrados pertencentes a 20 famílias taxonômicas. A família Aphelenchidae destacou-se pela maior abundância nas três áreas amostradas, e as famílias Chambersillidae e Tylenchidae pela maior abundância nas áreas DM e DS. Ainda mais notável foi a distinção significativa entre a nematofauna das três áreas amostradas; de cada uma das árvores amostradas nas três áreas; e dos habitats tronco e ramos de uma mesma árvore, nas áreas DM e DS.

De fato, as três áreas são distintas entre si ($p < 0,05$) com base na frequência relativa dos gêneros de nematoides encontrados. As áreas distinguem-se também na riqueza de gêneros, que foram 31 em DS, 22 em DM e apenas 8 em GX. Destaca-se também que 50% dos gêneros encontrados (19 de 38) são exclusivos de apenas uma das áreas: 12 gêneros foram encontrados apenas em DS, seis apenas em DM, e um apenas em GX. As

áreas são distintas entre si também ao nível das famílias: Trischistomatidae, Tripylidae, Pristomatolaimidae, Nordiidae e Alaimidae foram encontradas exclusivamente em DS, enquanto que Neodiplogastridae, Dorylaimidae e Cephalobidae foram exclusivas de DM. A área GX apresentou o menor número de famílias.

A distinção entre as nematofaunas das três áreas possivelmente se explica por diferenças climatológicas e florísticas. As áreas DM e DS têm floresta ombrófila densa, com distúrbio antrópico restrito ao acesso ocasional de pessoas por meio de trilhas. Mas DM tem maior altitude e clima tropical de altitude, e DS tem altitude média e clima tropical. Essas distinções possivelmente determinam diferenças na composição florística da floresta, com influência indireta na abundância e riqueza de gêneros da nematofauna.

A nematofauna de GX mostrou-se bem distinta de DM e DS. A área GX apresenta floresta distinta, chamada de tabuleiro semicaducifolia, com espécies florestais adaptadas a períodos de seca de vários meses. Ademais, GX tem vegetação mais esparsa, em processo de regeneração, após distúrbio antrópico ocorrido por décadas antes da criação da Estação. Tais características possivelmente determinam, ainda que indiretamente, a nematofauna de GX, que é menos rica e menos abundante do que DM e DS.

Interessantemente, cada árvore é um ecossistema distinto no que se refere à sua nematofauna. De fato, nas três áreas, houve distinção ($p < 0,01$) entre as nematofaunas de cada uma das árvores, com base na riqueza e abundância total dos gêneros encontrados. Ou seja, mesmo compartilhando as mesmas condições microclimáticas, cada árvore apresenta uma nematofauna particular. Possivelmente, a estrutura da nematofauna é determinada indiretamente pela espécie arbórea; a idade da árvore; compostos químicos presentes na casca da árvore, ou liberados através da casca; e a abundância e estrutura da comunidade de epífitas, líquens, musgos, fungos e bactérias sobre a casca da árvore.

A menor massa de matéria orgânica (líquens, musgo, raízes de epífitas e detritos) e menor abundância de nematoides nas amostras de GX em relação a DM e DS sugeriram que a quantidade de matéria orgânica viva e em decomposição sobre a casca da árvore poderia ser um dos determinantes da nematofauna. Entretanto, essa hipótese foi negada ($r = 0,04$, $p > 0,05$). Sabe-

se que condições microambientais determinam a abundância e a estrutura da nematofauna, por vezes com maior influência do que o teor de matéria orgânica do habitat (Yeates et al., 1993; Wall e Virginia, 1999; Zhang et al., 2015). A presença de antagonistas naturais, como fungos nematófagos, também influencia a nematofauna (Lopez-Núñez et al., 2022). Certamente, diversos fatores atuam nas interações entre a nematofauna e o ecossistema copa da floresta, os quais ainda precisam ser desvendados.

Interessantemente, baseando-se na riqueza de gêneros e abundância total da nematofauna, as árvores de GX são mais distintas entre si do que as árvores de DM, que por sua vez são mais distintas entre si do que as árvores de DS. A maior distinção entre as árvores de GX pode estar relacionada ao distúrbio antrópico. A floresta de GX tinha originalmente cerca de 10 mil ha de extensão, mas a sua maior parte foi cortada para a produção de carvão. Somente em 1999 essa área, conhecida como "Mata do Carvão", foi considerada ambientalmente crítica, iniciando-se então a sua proteção e regeneração (Inea, 2024).

A complexidade do ecossistema copa das árvores mostra-se evidente pela distinção ($p < 0.0001$) entre as nematofaunas dos habitats tronco e ramos, nas áreas DM e DS. Em DM, esses habitats foram distintos também quanto à exclusividade dos gêneros: dos 22 gêneros encontrados, 12 foram exclusivos de apenas um dos habitats – quatro encontrados somente no tronco, e oito somente nos ramos.

Possivelmente, a posição horizontal ou inclinada dos ramos determina maior retenção de umidade em relação ao tronco. A posição mais elevada dos ramos pode determinar maior exposição à luz solar, radiação ultravioleta e ventos, e maior variação térmica e de umidade (diária ou sazonal) do que os troncos. Dependendo da espécie botânica, a casca do tronco pode ser mais espessa e rugosa do que os ramos, retendo mais nutrientes advindos da copa da árvore. Todos esses fatores podem afetar a biota associada à casca da árvore, bem como a sua nematofauna. Em GX não houve distinção ($p = 0.2487$) entre as nematofaunas do tronco e dos ramos. Possivelmente, essa falta de distinção se deve ao pequeno grau de liberdade do teste estatístico, que foi definido pela pequena riqueza de gêneros.

Por fim, a ausência de nematoides nas folhas das árvores é surpreendente, uma vez que nematoides fitoparasitos e de vida-livre podem colonizar o filoplano e o mesófilo foliar de plantas. Possivelmente, nas áreas amostradas, a exposição da copa a ventos e radiação solar não é favorável aos nematoides. É possível que áreas de M.A. com alta pluviosidade, dossel muito denso, e relevo que proporcione pouca exposição a ventos, desenvolva nematofauna nas folhas da copa.

Em conclusão, este estudo sugere que a estrutura da nematofauna de copa na M.A. é influenciada por diferenças ecológicas e/ou climáticas regionais; por características individuais da árvore; e por distinções microambientais entre os habitats tronco e ramos. A variabilidade encontrada entre nematofaunas nesses três níveis sugere que a copa das árvores é um ecossistema altamente complexo, moldado por interações entre fatores abióticos e bióticos que determinam indiretamente a estrutura da nematofauna.

Entretanto, algumas questões permanecem abertas. Há de se investigar-se, e como, a espécie arbórea, idade da árvore, composição química da casca, e estrutura da comunidade de epífitas, líquens, musgos, fungos e bactérias influenciam a estrutura da nematofauna. Adicionalmente, as interações entre nematoides e outros componentes da biota ainda requerem investigação.

Novos estudos devem contemplar amostragens em diferentes biomas florestais, bem como integrar análises temporais para se compreender variações sazonais ou interanuais da nematofauna de copa. O uso de ferramentas moleculares para identificar os nematoides e explorar suas funções ecológicas também poderia trazer *insights* valiosos. Compreender melhor a complexidade e as interações na copa das árvores contribuirão para ampliar o conhecimento sobre o papel dos nematoides na dinâmica dos ecossistemas florestais e em sua conservação.

CONCLUSÃO

A comunidade de nematoides da copa de árvores na Mata Atlântica é altamente diversa e estruturalmente complexa. A composição e a abundância dos gêneros variaram entre áreas, árvores e habitats (troncos e ramos), indicando que fatores regionais, características individuais das árvores e microambientes locais moldam a nematofauna. A ausência de correlação com a massa de matéria orgânica sugere que múltiplos fatores ecológicos influenciam essa comunidade. Estes resultados reforçam a necessidade de mais pesquisas para compreender as interações que determinam a estrutura da nematofauna nas copas das florestas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brockerhoff, E.G., Barbaro, L., Castagneyrol, B., Forrester, D., et al. (2017) Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity and Conservation* 26 p.3005-3035.

Clima tempo. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

Danovaro R, Snelgrove PVR, Tyler P. (2014) Challenging the paradigms of deep-sea ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, p. 465–475 10.1016/j.tree.2014.06.002 PMID: 25001598.

De Frenne, P., et al. (2019) *Global buffering of temperatures under forest canopies*. *Nature Ecology & Evolution*, v.3(5), p.744-749.

Du Preez, G. (2022) Nematode-based indices in soil ecology: application, utility, and future directions. *Soil Biol. Biochem.* v.169, p.108-640.

Ferris, H. (2010) Contribution of nematodes to the structure and function of the soil food web. *J. Nematol.* V. 42, p. 63–67.

Guerra, C.A. et al. (2021) Tracking, targeting, and conserving soil biodiversity. *Science* v.371, p. 239–241.

Hodda M., (2022) Phylum Nematoda: feeding habits for all valid genera using a new, universal scheme encompassing the entire phylum, with descriptions of morphological characteristics of the stoma, a key, and discussion of the

evidence for trophic relationships. Insect & Nematode Biosecurity, National Research Collections Australia, CSIRO, GPO Box 1700 Canberra ACT 2601 Australia. Zootaxa 5114 (1): 318–451.

Hoogen et al. (2019) Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale. *Nature*, v. 572.

Inea. Instituto Estadual do Ambiente. Disponível em: <https://www.inea.rj.gov.br>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

Inmet – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <https://www.gov.br/inmet>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

Lowman, M.D., Devy, S., Ganesh, T. (2013) *Treetops at Risk - Challenges of Global Canopy Ecology and Conservation*. Dordrecht, Springer.

Lowman, M.D., Rinker, H.B. (2004) *Forest canopies*. Elsevier. Burlington, Elsevier Academic Press.

Ministério do Meio Ambiente (2018). *Mata Atlântica*. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/biomas/mataatlantica_emdesenvolvimento.html. Acessado em: 04 outubro 2024.

Mitchell, C.R., Miller, W.R., Davis, B. (2009) Tardigrades of North America: Influence of Substrate on Habitat Selection. *Journal of the Pennsylvania Academy of Science* 83(1): 10-16.

Moens, T., Yeates, G. W.; De Ley, P. (2004) Use of carbon and energy sources by nematodes. *Nematology Monographs and Perspectives*, Leiden, v. 2, p. 529-545.

Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C.G., Fonseca, G. A. B., Kent, J. (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Green College, Oxford University. Nature*, v. 403.

Nadkarni, N.M., Matelson, T.J. (1989) Bird use of epiphyte resource in neotropical trees. *Condor* 69, p.891-907, 1989.

Ozanne, C.M.P., Anhuf, D., Boulter, S.L., Keller, M. Kitching, R.L., Korner, C., Meinzer, F.C., Mitchell, A.W., Nakashizuka, T., Silva Dias, P.L., Stork, N.E., Wright, S.J., and Yoshimura, M. (2003) Biodiversity meets the atmosphere: a Global view of forest canopies. *Science*, v.301, p.183-186.

Parker, G.G. (1995) Structure and microclimate of forest canopies. In “Forest Canopies” (M.D. Lowman and N.M. Nadkarni, Eds.). Academic Press, San Diego. p. 73-106.

Porazinska, D.L., Giblin-Davis, R.M., Powers, T.O., Thomas, W.K. (2012) Nematode Spatial and Ecological Patterns from Tropical and Temperate Rainforests. *PLoS ONE* 7(9): e44641. doi:10.1371/journal.pone.004464.

Porazinska, D.L., Giblin-Davis, R.M., Sung, W., Thomas, W.K. (2010) Ecometagenetics confirms high tropical rainforest nematode diversity. *Molecular Ecology*. 19, 5521–5530. doi: 10.1111/j.1365-294X.2010.04891.x.

Ribeiro, M. C., Metzger, J. P., Martensen, A. C., Ponzoni, F. J., & Hirota, M. M. (2009) The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*, 142(6), 1141–1153.

Stehmann, J.R., Forzza, R.C., Salino, A., Sobral, M., Costa, D.P., Kamino, L.H.Y. (2009) Plants of the Atlantic Forest. = Plantas da Floresta Atlântica. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, p.411.

Stork, N.E., Adis, J.A., Didham, R.K. (Eds). (1997) “Canopy Arthropods.” Chapman and Hall, London.

Yeates GW, Bongers T, De Goede RGM, Freckman DW, Georgieva SS. (1993) Feeding habits in nematode families – an outline for soil ecologists. *Journal of Nematology* v.25, p.315-331.

Zheng, L. et al. (2023) Unraveling the Interaction effects of soil temperature and moisture on soil nematode community: A Laboratory study. *EUR. J. SOIL BIOL.* V.118, P.103-537.

APÊNDICE

Tabela 1A: Riqueza de gêneros e abundância total de nematoides coletados em troncos e ramos de 10 árvores no Parque Estadual do Desengano (DS), 10 árvores na propriedade rural em Domingos Martins (DM) e 10 árvores na Estação Ecológica de Guaxindiba (GX).

Áreas	Habitats					
	Tronco + Ramos		Tronco		Ramos	
	Riqueza	Abundância	Riqueza	Abundância	Riqueza	Abundância
DS	31	8340	24	3420	24	4920
DM	22	9190	14	4570	18	4620
GX	9	1300	8	820	7	480
Áreas e árvores	Tronco + Ramos		Tronco		Ramos	
	Riqueza	Abundância	Riqueza	Abundância	Riqueza	Abundância
DS, 1	14	1250	10	810	11	440
DS, 2	19	770	8	240	15	530

DS, 3	7	710	5	150	5	560
DS, 4	8	670	6	500	4	170
DS, 5	9	770	7	280	5	490
DS, 6	11	440	5	110	7	330
DS, 7	14	720	8	410	8	310
DS, 8	13	1330	8	320	8	1010
DS, 9	12	1370	6	290	9	1080
DS, 10	10	310	10	310	0	0
DM, 11	5	620	4	230	3	390
DM, 12	11	920	1	10	10	910
DM, 13	3	310	0	0	3	310
DM, 14	12	1710	7	870	10	840
DM, 15	8	580	6	380	5	200
DM, 16	7	670	3	120	6	550
DM, 17	7	340	2	30	7	310
DM, 18	7	1250	5	960	5	290
DM, 19	8	1650	4	1220	6	430
DM, 20	7	1140	4	750	5	390
GX, 21	0	0	0	0	0	0
GX, 22	3	140	0	0	3	140
GX, 23	4	40	1	10	3	30

GX, 24	1	10	0	0	1	10
GX, 25	1	100	0	0	1	100
GX, 26	6	340	4	150	5	190
GX, 27	2	190	2	190	0	0
GX, 28	6	390	6	380	1	10
GX, 29	1	30	1	30	0	0
GX, 30	2	60	2	60	0	0
Total (n = 30)	211	18830	29	8810	146	10020

ESTRUTURA DA COMUNIDADE DE NEMATOIDES NA COPA DE ÁRVORES DA MATA ATLÂNTICA

RESUMO

A copa das árvores é um ecossistema vital para a biodiversidade global, mas ainda pouco estudado sob a perspectiva da comunidade de nematoides. Este estudo teve como objetivo caracterizar ecologicamente a comunidade de nematoides na copa de árvores da Mata Atlântica (M.A.), utilizando índices de diversidade, estrutura e funcionalidade. Foram amostradas 30 árvores do estrato superior em três áreas distintas: floresta semidecídua de baixa altitude (GX), floresta ombrófila densa de altitude média (DS) e floresta ombrófila densa de alta altitude (DM). Amostras dos troncos, ramos e folhas foram coletadas e processadas para extração e identificação dos nematoides ao nível de gênero. A comunidade foi analisada por índices de Shannon-Wiener, Simpson, Pielou e Margalef, além dos índices de Maturidade (IM), Canal (IC), Estrutura (IE) e Enriquecimento (IEnr). A comparação das áreas e habitats foi feita por testes de Qui-quadrado e de Bray-Curtis. Adicionalmente, foi realizada uma amostragem intensiva em três árvores selecionadas para estimar a densidade e a distribuição espacial dos nematoides. Os resultados mostraram que DS apresentou a maior diversidade e menor dominância de gêneros, seguido por DM e, por último, GX. As três áreas diferiram significativamente em termos de composição de grupos tróficos, com predominância de micófagos e bacteriófagos em DM e DS, e maior simplicidade trófica em GX. O IM e os índices de estruturação indicaram maior estabilidade ecológica em DS, intermediária em DM, e baixa estabilidade em GX. As árvores, mesmo dentro de uma mesma área, apresentaram comunidades de nematoides distintas. Diferenças significativas também foram observadas entre os habitats tronco e ramos em DS e DM. As estimativas apontaram para uma abundância surpreendentemente alta de nematoides na copa das árvores, variando de 26 a

86 milhões de indivíduos por árvore. A distribuição espacial dos nematoides foi agregada, sugerindo influência da heterogeneidade dos recursos disponíveis no tronco e nos ramos. Estes achados reforçam que a comunidade de nematoides da copa pode ser forte indicadora do status ecológico das florestas.

Palavras-chave: Grupo trófico, estabilidade ecológica, diversidade

INTRODUÇÃO

Nematoides apresentam notável abundância e diversidade em todos os ecossistemas, tanto terrestres quanto aquáticos. Nesses ecossistemas, sua distribuição é heterogênea, ocupando diferentes nichos ecológicos e cumprindo funções ecológicas fundamentais (Danovaro et al., 2014; Van den Hoogen et al., 2019). Em ecossistemas com elevada abundância e diversidade de nematoides há mais interações ecológicas, o que contribui para a complexidade e estabilidade desses ambientes (Bongers e Ferris, 1999).

Em ecossistemas terrestres, a comunidade de nematoides no solo é tipicamente abundante e muito estudada, dado seu papel crucial nas funções ecológicas do solo (Yeates, 2003). Essa comunidade, juntamente com os demais membros da biota do solo, desempenha funções essenciais, como ciclagem de nutrientes, decomposição de poluentes e fluxo de energia (Ferris et al., 2004b; Van der Putten e Hol, 2022). O entendimento das funções da teia alimentar, em relação à presença e abundância de seus organismos, é fundamental para a gestão sustentável do solo (Van Straalen e Van Gestel, 1994; Kennedy e Smith, 1995).

Além do solo, outros ecossistemas terrestres – como a copa de árvores, cavernas e afloramentos rochosos – são pouco estudados, havendo pouco conhecimento taxonômico e funcional dos nematoides. Isso se deve, em parte, ao reduzido número de pesquisadores especializados na taxonomia de nematoides.

Até recentemente, a fauna de nematoides (nematofauna) na copa de árvores foi objeto de apenas três estudos. Em um levantamento focado na caracterização de tardígrados, Mitchell et al. (2009) relatou a presença de nematoides nos troncos e ramos de árvores de um *campus* universitário nos

EUA sem, entretanto, identificá-los. Na Costa Rita, Porazinska et al. (2010; 2012) encontrou uma grande diversidade de espécies de nematoides na copa da floresta, em sua maioria distintas das espécies presentes no solo. Gafta et al. (2024) caracterizaram a composição e diversidade dos taxa de nematoides em relação ao tipo de dossel florestal.

Para a caracterização de comunidades de nematoides é importante utilizar índices ecológicos que expressem a sua diversidade, estrutura e dinâmica. Os índices de Shannon-Wiener, Simpson, Pielou e Margalef expressam a riqueza e a equitatividade dos gêneros ou espécies, oferecendo informações sobre a complexidade e estabilidade das comunidades de nematoides (Magurran, 2021). Os Índices de Maturidade (IM), Estrutura (IE), Enriquecimento (IEnr) e de Canal (IC) auxiliam na análise das condições ambientais e da integridade ecológica do ecossistema (Ferris et al., 2001; Ferris, 2010). Para comparações entre nematofaunas, pode-se aplicar testes estatísticos, como o Qui-Quadrado e de Bray-Curtis. O teste de Qui-quadrado infere sobre diferenças entre ecossistemas com base na frequência relativa das diferentes taxas que ocorrem nesses ecossistemas. Já o teste de Bray-Curtis estima o nível de similaridade (ou diferença) entre ecossistemas considerando tanto a riqueza quanto a abundância das diferentes taxas que ocorrem em pelo menos um dos ecossistemas.

Além dos índices e testes supracitados, nematoides são classificados em diferentes estratégias de vida, de acordo com o valor c-p (*colonizers-persisters*), variando de 1 a 5. Esse valor expressa a capacidade de uma família, gênero ou espécie de nematoide de colonizar e persistir em um determinado ambiente. Nematoides colonizadores (com c-p de 1 ou 2) se reproduzem rapidamente em ambientes perturbados, aproveitando recursos de forma eficiente, e predominam em ecossistemas dinâmicos e instáveis. Nematoides persistentes (c-p 4 ou 5) têm uma reprodução mais lenta e ciclo de vida mais longo, adaptando-se a ambientes estáveis com alta competição. Nematoides com c-p 3 têm características intermediárias. A proporção entre nematoides colonizadores e persistentes em ecossistemas pode fornecer *insights* valiosos sobre a sua estabilidade ecológica (Bongers e Ferris, 1999; Ferris et al., 2001).

A nematofauna presente na copa de árvores oferece um campo promissor para pesquisas, considerando-se que esse é um ecossistema crucial para a biodiversidade global (Ozanne et al. 2003), caracterizado por interações complexas entre a vegetação, a fauna e os microrganismos (Nadkarni e Matelson 1989; Stork et al. 1997).

Nesta tese de doutoramento, realizou-se uma caracterização taxonômica e ecológica da comunidade de nematoides da copa de árvores, tendo-se a Mata Atlântica (M.A.) como o bioma escolhido. No capítulo anterior, procedeu-se à comparação da nematofauna entre as três áreas amostradas; entre as 10 árvores amostradas em cada área; e entre os habitats tronco, ramos e folhagens, com base na abundância total de nematoides, e na abundância e riqueza de gêneros.

Neste capítulo, serão relatadas caracterizações ecológicas das comunidades de nematoides através dos índices de abundância e diversidade de Shannon-Wiener, Simpson, Pielou e Margalef, e dos índices IM, IEnr, IE e IC, que avaliam aspectos específicos da estrutura da comunidade de nematoides. Procedeu-se também à comparação da comunidade quanto à riqueza de gêneros e abundância dos grupos tróficos, entre áreas de amostragem; entre as árvores amostradas em cada área; e entre os habitats tronco e ramos, calculando-se a distância de Bray-Curtis.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização ecológica da comunidade de nematoides

As áreas de estudo e os procedimentos de amostragem e laboratoriais seguiram aqueles descritos no capítulo 1. Brevemente, o estudo foi conduzido em três áreas da M.A.: na Estação Ecológica de Guaxindiba (GX), no Parque Estadual do Desengano (DS) e em propriedade rural em Domingos Martins (DM). Em cada uma dessas áreas, foram coletadas amostras dos habitats troncos, ramos e folhagens de 10 árvores do extrato superior da floresta. As amostras foram processadas para a extração dos nematoides, e a identificação taxonômica desses organismos foi realizada ao nível de gênero.

As análises foram focadas nos índices ecológicos (Shannon-Wiener, Simpson, Pielou e Margalef), e nos índices IM, IC, IEnr e IE, com o objetivo de caracterizar a diversidade, dominância e estabilidade das comunidades de nematoides. Procedeu-se também a comparações entre nematofaunas através do teste de Bray-Curtis. Essas análises foram realizadas utilizando-se o programa R (R Core Team, 2024), conforme detalhado na análise de dados.

Amostragem intensiva das três árvores com maior densidade de nematoides

Para se obter uma estimativa preliminar da abundância total de nematoides em árvores da M.A., foram selecionadas as três árvores com maior densidade de nematoides/100 cm² dentre as 30 amostradas neste estudo (vide capítulo 1). Essas três árvores localizavam-se na área DM; sua localização foi possível utilizando-se um GPS modelo Garmin, com base nos pontos previamente registrados e nos códigos de identificação das árvores. Esta segunda amostragem foi realizada nos dias 8 e 9 de maio de 2024.

Em cada uma das três árvores selecionadas (DM-Q4/A2, DM-Q5/A1 e DM-Q5A2), foram coletadas 25 amostras simples de 100 cm². Os 25 pontos de coleta foram distribuídos ao longo da superfície do tronco e dos ramos, seguindo aproximadamente a superfície total desses habitats (vide estimativa abaixo). As 75 amostras simples foram processadas e preservadas individualmente, e a contagem de nematoides foi realizada em três alíquotas de 1 ml, com anotação do valor médio das três alíquotas.

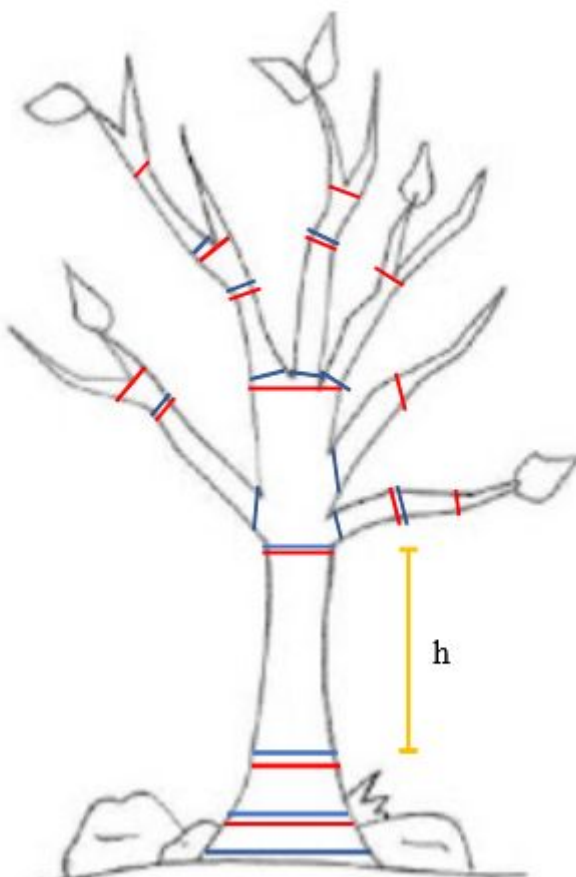
Para maior precisão na estimativa da abundância total de nematoides nas árvores, calculou-se a eficiência de extração (Ee) dos nematoides pela metodologia de Cohen & D'Herde empregada. Assim, para cada uma das três árvores amostradas, selecionou-se aleatoriamente quatro amostras das 25 coletadas. Essas quatro amostras foram individualmente reprocessadas quatro vezes, procedendo-se depois à contagem dos nematoides obtidos dos reprocessamentos. A Ee para cada árvore foi obtida pela fórmula abaixo (Eq.

1), e a densidade média de nematoides/100 cm² de cada árvore foi obtida fazendo-se a correção das contagens de acordo com a Ee obtida.

$$Ee = \bar{x}(Pp_1 + \Sigma R_1 \times 100) + (Pp_2 + \Sigma R_2 \times 100) + (Pp_3 + \Sigma R_3 \times 100) + (Pp_4 + \Sigma R_4 \times 100)$$

(Eq. 1) : Fórmula para se calcular a eficiência de extração (Ee) de nematoides das amostras com a metodologia de Cohen & D'Herde empregada, onde Pp = número de nematoides obtidos através do processamento padrão das amostras 1 a 4; R = número de nematoides obtidos através dos quatro reprocessamentos das amostras 1 a 4; $\bar{x}$ = média; Σ = somatório.

Paralelamente à coleta das amostras, foram realizadas medições para se estimar a superfície total (em cm²) do tronco e ramos das árvores DM-Q4/A2, DM-Q5/A1 e DM-Q5A2. O tronco e todos os ramos com circunferência igual ou superior a 8 cm foram identificados e visualmente subdivididos em cones, dos quais foram medidos a altura (h, em cm), a circunferência proximal (Cp, em cm) e a circunferência distal (Cd, em cm), com o auxílio de uma trena (Figura 1). Ramos com menos de 8 cm de circunferência não foram medidos devido à dificuldade de acesso e risco de queda do escalador profissional. As medições foram aplicadas à fórmula geral de cálculo da superfície de cones obtendo-se estimativa da superfície total de cada uma das árvores.



superfície
(Eq. 2),
se assim a
da
total de
das três

Figura 1: Subdivisão visual do tronco e ramos da árvore em cones, com os pontos de medição da circunferência proximal (linha azul) e distal (linha vermelha), para estimativa da superfície total da árvore. H = altura (em cm). Ramos distais com menos de 8 cm de circunferência não foram considerados

$$A = (\pi \cdot h) \cdot [(c \text{ I} / 2 \pi) + (c \text{ II} / 2 \pi)]$$

(Eq. 2): Fórmula geral de cálculo da superfície de cones, onde A = área; π = pi (3,14); h = altura; c = circunferência.

A estimativa da abundância total de nematoides (A_t) foi obtida pela multiplicação da superfície total estimada da árvore (em cm^2) pela densidade média corrigida de nematoides/100 cm^2 (Eq. 3).

(Eq. 3): Fórmula para estimar a abundância total de nematoides.

$$A_t = \text{área total estimada da árvore (cm}^2\text{)} \times \text{densidade média corrigida de nematoides/100 cm}^2$$

Curva de rarefação para amostragem da nematofauna de copa na Mata Atlântica

Os valores corrigidos de abundância total de nematoides nas 25 amostras coletadas nas árvores DM-Q4/A2, DM-Q5/A1 e DM-Q5A2 foram utilizados também para se calcular o número mínimo ideal de amostras simples que se deve coletar para estudos sobre a nematofauna de copa na M.A. (curva de rarefação em amostragens).

Distribuição espacial da nematofauna de copa na Mata Atlântica

Os valores corrigidos de abundância total de nematoides nas 25 amostras coletadas nas árvores DM-Q4/A2, DM-Q5/A1 e DM-Q5A2 foram plotados em histograma para visualização da distribuição da nematofauna no tronco e ramos das árvores.

ANÁLISE DE DADOS

Índices Ecológicos

A abundância dos gêneros encontrados em cada área de amostragem, em cada árvore, e em cada habitat (tronco e ramos) foram computados em planilhas eletrônicas, sendo utilizados para estimativas dos índices ecológicos de Shannon-Wiener, Simpson, Margalef e Pielou, conforme as fórmulas abaixo:

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \cdot \ln p_i$$

Onde H' é o estimador para o índice de Shannon-Wiener, p_i é a abundância relativa do i -ésimo gênero (estimada pela relação entre o número de indivíduos do gênero e a abundância total de indivíduos na amostra).

$$D = \sum_{i=1}^N \left(\frac{s}{N} \right)^2$$

Onde D é o estimador para o índice de Simpson, s é o número de gêneros na amostra e N é o número total de indivíduos na amostra.

$$d = \frac{s-1}{\ln(n)}$$

Onde d é o estimador para o índice de Margalef, s é o número de gêneros encontrados na área para a qual se deseja estimar o índice, e n é o número total de gêneros encontrados.

$$J = \frac{H'}{\ln(N)}$$

Onde J é o estimador para o índice de equitabilidade de Pielou, H' é o valor estimado para o índice de Shannon-Wiener da referida amostra, e N é a abundância total de indivíduos na amostra.

A frequência relativa de indivíduos de cada grupo trófico foi utilizada para se avaliar a homogeneidade das áreas de amostragem e dos habitats pela aplicação do teste de Qui-quadrado (X^2) ao nível de significância de 5% ($p < 0.05$), para cada par de áreas ou habitats (ramos x tronco).

Para estimativa dos índices ecológicos da comunidade de nematoides em cada uma das áreas adotou-se os valores c-p estabelecidos para cada gênero (Nemaplex, 2025). Foram estimados os valores das guildas basal (b), de enriquecimento (e) e de estruturação (s), de acordo com os pesos descritos por Ferris et al. (2001):

$$b = (0,8.Fu_2) + (3,2.Ba_2)$$

Onde Fu_2 é a abundância de indivíduos pertencentes ao grupo trófico micófagos, com valor c-p igual a 2, e Ba_2 é a abundância de indivíduos pertencentes ao grupo trófico bacteriófagos, com valor c-p igual a 2.

$$e = (0,8.Fu_2) + (3,2.Ba_1)$$

Onde Fu_2 é a abundância de indivíduos pertencentes ao grupo trófico micófagos, com valor c-p igual a 2, e Ba_1 é a abundância de indivíduos pertencentes ao grupo trófico bacteriófagos, com valor c-p igual a 1.

$$s = (0,8 \cdot Pr_2) + [1,8 \cdot (Pr_3 + Fu_3 + Ba_3)] + \dots$$

Onde Pr_2 , Pr_3 , Pr_4 e Pr_5 são as abundâncias de indivíduos pertencentes ao grupo trófico predadores, com valor c-p igual a 2, 3, 4 e 5, respectivamente; Ba_3 , Ba_4 e Ba_5 são as abundâncias de indivíduos pertencentes ao grupo trófico bacteriófagos, com valor c-p igual a 3, 4 e 5, respectivamente; Fu_3 , Fu_4 e Fu_5 são as abundâncias de indivíduos pertencentes ao grupo trófico micófagos, com valor c-p igual a 3, 4 e 5, respectivamente; e Om_4 e Om_5 são as abundâncias de indivíduos pertencentes ao grupo trófico omnívoros, com valor c-p igual a 4 e 5, respectivamente.

A partir dos valores c-p foi estimado também o IM (Bongers, 1990) para cada área:

$$\mathfrak{I} = \sum_{i=1}^n v(i) \cdot f(i)$$

Onde n é o número de taxa (número de gêneros); $v(i)$ é o valor c-p atribuído para o i -ésimo gênero, e $f(i)$ é a frequência relativa do respectivo i -ésimo gênero na amostra.

A partir dos grupos que compõem a guilda basal (b), foi estimado o valor do IC para cada área de amostragem:

$$IC = \frac{(0,8 \cdot Fu_2)}{[(0,8 \cdot Fu_2) + (3,2 \cdot Ba_1)]}$$

Então, estabelecidos os valores para cada uma das guildas nas áreas de amostragem, foram estimados os valores de IE e IS de cada área, conforme as equações:

$$IE = 100 \cdot \left[\frac{e}{(e+b)} \right]$$

$$IS = 100. \left[\frac{s}{(s+b)} \right]$$

A similaridade entre as áreas de amostragem, entre as árvores de cada área, e entre os habitats em cada árvore foi estimada pelo teste de Bray-Curtis, seguido do agrupamento pelo método de ligação média entre grupos (UPGMA). A significância dos coeficientes de correlação cofenética em cada dendrograma foram testados via teste t ao nível de significância de 1% ($p < 0.01$).

Cálculo do número ideal de amostras simples (curva de rarefação) por árvore da Mata Atlântica

A partir da abundância total de nematoides nas 25 amostras coletadas nas árvores DM-Q4/A2, DM-Q5/A1 e DM-Q5A2 foram estimados os valores de coeficiente de variação (CV) amostral para diferentes densidades de amostragem ($n = 2$ a 25 amostras). Para cada n amostral, foram simuladas 1000 amostragens (possibilitando reposição) aleatórias dentre as 25 amostras disponíveis. O CV percentual médio (CV%) para cada n amostral foi obtido e o desvio entre o CV simulado e o real ($n=25$, sem reposição) foi calculado para cada n amostral.

Os desvios do CV% foram plotados em gráficos de dispersão para cada árvore. O intervalo de confiança para o conjunto de médias de CV% foi obtido via teste t ao nível de significância de 5% ($p < 0.05$). O ponto de amostragem mínima para minimizar o viés de amostragem foi definido como o n amostral a partir do qual as estimativas de CV% se encontraram dentro do intervalo de confiança em relação à amostragem $n = 25$.

As análises e construção de gráficos foram conduzidas com auxílio do programa R (R Core Team, 2024) a partir das funções disponíveis nos pacotes *factoextra*, *diversity*, e *ggplot2*.

Distribuição espacial da nematofauna de copa na Mata Atlântica.

A densidade de nematoides/100 cm² nas 25 amostras coletadas nas árvores DM-Q4/A2, DM-Q5/A1 e DM-Q5A2 foi plotada em histogramas, com intervalo de classes de 20 nematoides, para visualização do padrão de distribuição dos nematoides no tronco e ramos das árvores (uniforme ou agregada).

RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta a abundância total, a riqueza de gêneros e os índices de Shannon-Wiener, Simpson, Margalef e Pielou de cada área de amostragem.

Tabela 1: Abundância total, riqueza de gêneros e índices ecológicos da comunidade de nematoides na copa de árvores (tronco e ramos) nas áreas no Parque Estadual do Desengano (DS), em propriedade rural em Domingos Martins (DM) e na Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba (GX), em 10 árvores amostradas por área.

Área	Abundância total	Riqueza de gêneros	Índices ecológicos			
			Shannon-Wiener	Simpson	Margalef	Pielou
DS	8340	31	2.52	0.13	4.31	0.73
DM	9190	22	1.81	0.25	3.08	0.59
GX	1300	9	1.46	0.33	1.44	0.66

A Tabela 2 apresenta a abundância dos diferentes grupos tróficos em cada área de amostragem, e a Figura 1 apresenta a frequência relativa dos grupos tróficos nas três áreas de amostragem.

Tabela 2: Abundância dos diferentes grupos tróficos da comunidade de nematoides na copa das árvores (tronco e ramos) nas áreas no Parque Estadual do Desengano (DS), em propriedade rural em Domingos Martins (DM) e na Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba (GX), em 10 árvores amostradas por área.

Área	Grupos tróficos					
	Bacteriófagos	Micófagos	Fitófagos	Predadores	Onívoros	Ingestores de eucariotos unicelulares
DS	3040	3200	1560	230	310	0
DM	3200	5220	370	390	0	10
GX	780	350	170	0	0	0
Total	7020	8770	2100	620	310	10

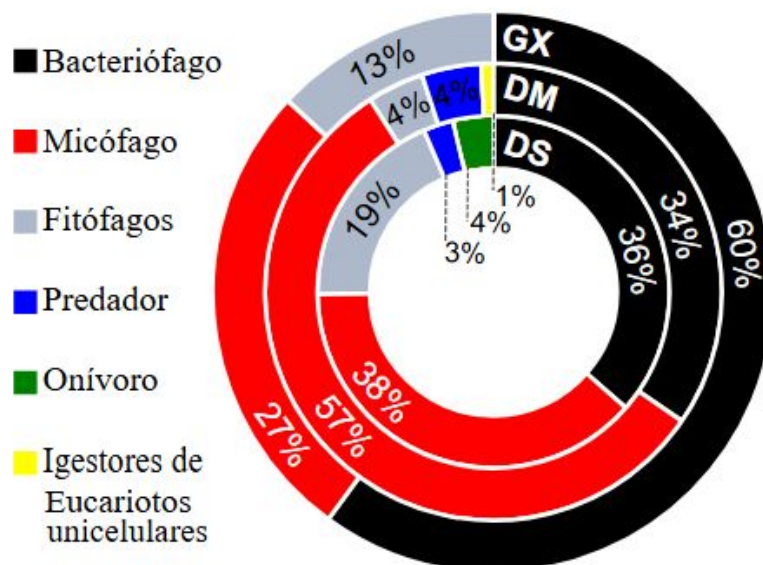


Figura 2: Frequência relativa dos grupos tróficos da comunidade de nematoides na copa das árvores (tronco e ramos) nas áreas na Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba (GX), em propriedade rural em Domingos Martins (DM), e no Parque Estadual do Desengano (DS), em 10 árvores amostradas por área

O teste de Qui-quadrado indicou que as três áreas são distintas entre si ($p < 0,01$) quanto à frequência relativa dos grupos tróficos na copa das árvores (Tabela 3). Essa distinção entre as áreas pode ser visualizada também no dendrograma que mostra a distância de Bray-Curtis (Figura 3).

Tabela 3: Homogeneidade entre áreas no Parque Estadual do Desengano (DS), na propriedade rural em Domingos Martins (DM) e na Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba (GX) quanto à frequência relativa de grupos tróficos de nematoides na copa (troncos e ramos) de árvores, em 10 árvores amostradas por área.

Contraste	d.f	X ²	p-valor
DS vs. DM	5	154.62 **	< 0.0001
DS vs. GX	4	30.14 **	0.0004
DM vs. GX	4	61.96 **	< 0.0001

** indicam valores estatisticamente significativos de acordo com o teste de Qui-quadrado (X²), ao nível de significância de 1% ($p < 0.01$)

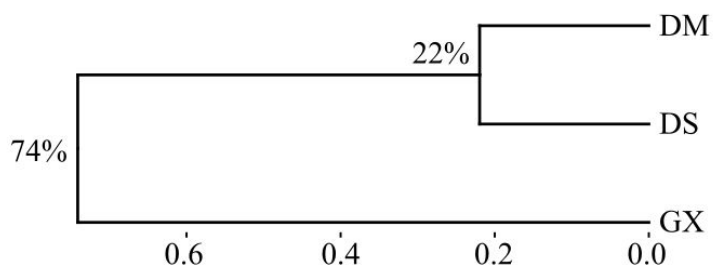


Figura 3:

Dissimilaridade entre as áreas de amostragem em propriedade rural em Domingos Martins (DM), no Parque Estadual do Desengano (DS) e Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba (GX) com base na riqueza de gêneros e abundância dos diferentes grupos tróficos, em 10 árvores amostradas em cada área. O dendrograma considerou a distância de Bray-Curtis e o método de agrupamento de ligação média entre grupos (UPGMA). O coeficiente de correlação cofenética foi 0,99, sendo diferente de zero de acordo com o teste t ao nível de significância de 5%

A Tabela A1 (no Anexo) mostra, para cada área e árvore amostrados, a abundância de nematoides pertencentes aos diferentes grupos tróficos. A Figura 3 mostra a dissimilaridade entre as árvores de cada área de amostrada estimada de acordo com o teste de Bray-Curtis.

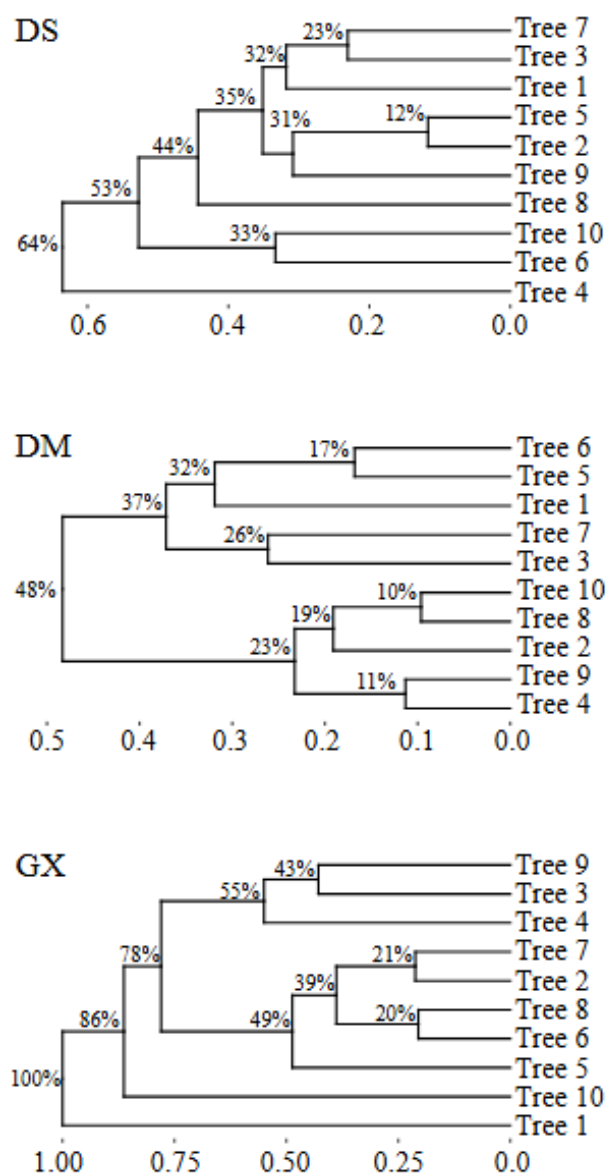


Figura 4:

Dissimilaridade entre árvores amostradas nas áreas do Parque Estadual do Desengano (DS), propriedade rural em Domingos Martins (DM) e Estação Ecológica de Guaxindiba (GX), com base na riqueza e abundância de nematoides dos diferentes grupos tróficos. A dissimilaridade foi estimada de acordo com as distâncias de Bray-Curtis e agrupamentos pelo método de ligação média entre grupos (UPGMA). Os coeficientes de correlação cofenética foram 0,91, 0,82 e 0,76 para GX, DS e DM, respectivamente, todos diferentes de zero de acordo com o Teste t ao nível de significância de 5%

A Tabela 4 mostra a abundância de nematoides pertencentes aos grupos tróficos nos habitats tronco e ramos, nas três áreas de amostragem. O teste de Qui-Quadrado (Tabela 5). indicou que esses habitats são distintos entre si ($p < 0,0001$) nas áreas DS e DM, mas não em GX.

Tabela 4: Abundância de nematoides pertencentes aos diferentes grupos tróficos no habitat tronco e ramos, em 10 árvores coletadas nas áreas do Parque Estadual do Desengano (DS), na propriedade rural em Domingos Martins (DM) e na Estação Ecológica de Guaxindiba (GX).

Área/ habitat	Grupos tróficos					Ingestores de eucariotos unicelulares
	Bacteriófagos	Micófagos	Fitófagos	Predadores	Onívoros	
DS, ramos	2180	1970	640	130	0	0
DS, tronco	860	1230	920	100	310	0
DM, ramos	1890	2250	110	360	0	10
DM, tronco	1310	2970	260	30	0	0
GX, ramos	320	140	20	0	0	0
GX, tronco	460	210	150	0	0	0

Tabela 5: Homogeneidade entre os habitats tronco e ramos quanto à frequência relativa de grupos tróficos de nematoides, em 10 árvores amostradas nas áreas do Parque Estadual do Desengano (DS), em propriedade rural em Domingos Martins (DM) e na Estação Ecológica de Guaxindiba (GX).

	Contraste	Contraste	d.f	X ²	p-valor
DS	Tronco vs ramos		4	86.67 **	< 0.0001
DM	Tronco vs ramos		4	55.42 **	< 0.0001
GX	Tronco vs ramos		2	5.33 ^{ns}	0.0697

** indicam valores estatisticamente significativos de acordo com o teste de Qui-quadrado (X²), ao nível de significância de 1% (p < 0.01). ^{ns} indica valor não significativo pelo teste de X² ao nível de significância de 5%

A distinção entre os habitats em DM e DS pode ser visualizada na Figura 5, que mostra a proporção percentual dos grupos tróficos nos habitats, nas três áreas de amostragem.

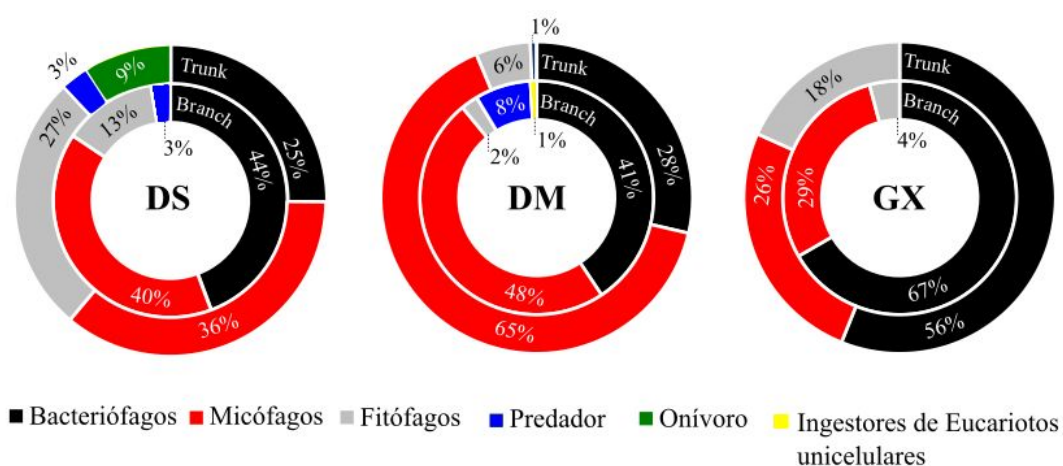


Figura 5: Frequência relativa dos grupos tróficos da comunidade de nematoides nos habitats tronco e ramos em 10 árvores amostradas nas áreas do Parque Estadual do Desengano (DS), em propriedade rural em Domingos Martins (DM) e na Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba (GX)

A Tabela 6 mostra o IM e o IC das comunidades de nematoides na copa das árvores (tronco e ramos) nas três áreas de amostragem.

Tabela 6: Índice de Maturidade e Índice de canal da comunidade de nematoides na copa (tronco e ramos) de 10 árvores amostradas no Parque Estadual do Desengano (DS), em propriedade rural em Domingos Martins (DM) e na Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba (GX).

Área	Índice de Maturidade	Índice de Canal
DS	2.15	51,16 %
DM	2.12	87,27%
GX	1.93	45,01%

A Tabela 7 mostra o IEnr e o IE para a comunidade de nematoides na copa das árvores nas três áreas de amostragem.

Tabela 7: Índice de Enriquecimento e Índice de Estrutura para a comunidade de nematoides na copa (tronco e ramos) de 10 árvores amostradas no Parque Estadual do Desengano (DS), em propriedade rural em Domingos Martins (DM) e na Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba (GX).

Área	Índice de Enriquecimento (%)	Índice de Estrutura (%)
DS	56.27	47.39
DM	42.52	25.40
GX	44.20	4.27

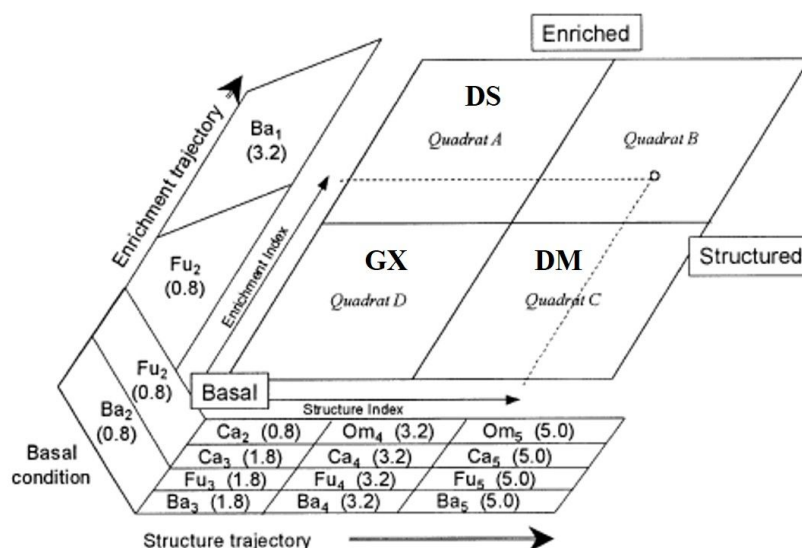


Figura 6: Guildas indicadoras da condição da teia alimentar do solo e por características de história de vida expressa ao longo de uma escala colonizadores-persistentes (cp) para determinação do índice de enriquecimento (IEnr) e índice de Estrutura (IE) (Bongers e Bongers, 1998). Fonte: Ferris et al, 2001.

A Tabela 8 mostra a densidade média de nematoides/100 cm², a superfície total estimada (em cm²) e a abundância total estimada de nematoides nas árvores DM-Q4/A2, DM-Q5/A1 e DM-Q5A2.

Tabela 8: Densidade média de nematoides/100 cm² de 25 amostras coletadas na copa (tronco e ramos) das árvores DM-Q4/A2, DM-Q5/A1 e DM-Q5A2 na propriedade rural em Domingos Martins, e estimativas da superfície total das árvores e da abundância total de nematoides.

Árvores	Densidade média de nematoides/100 cm ²	Superfície total (em cm ²) estimada da árvore	Estimativa da abundância total de nematoides
DM-Q4/A2	7.456,84 ¹	288.391,0 cm ²	86.142.391,7
DM-Q5/A1	7.657,44	85.700,3 cm ²	26.318.562,1
DM-Q5/A2	13.158,74	83.602,5 cm ²	43.991.635,5

¹ A densidade média de nematoides/100 cm² foi corrigida conforme a eficiência de extração do método de processamento.

A Figura 7 mostra as estimativas de coeficiente de variação amostral (C.V.%) para o número de nematoides obtidos de 2 a 25 amostras coletadas das árvores DM-Q4/A2, DM-Q5/A1 e DM-Q5A2 na propriedade rural em Domingos Martins.

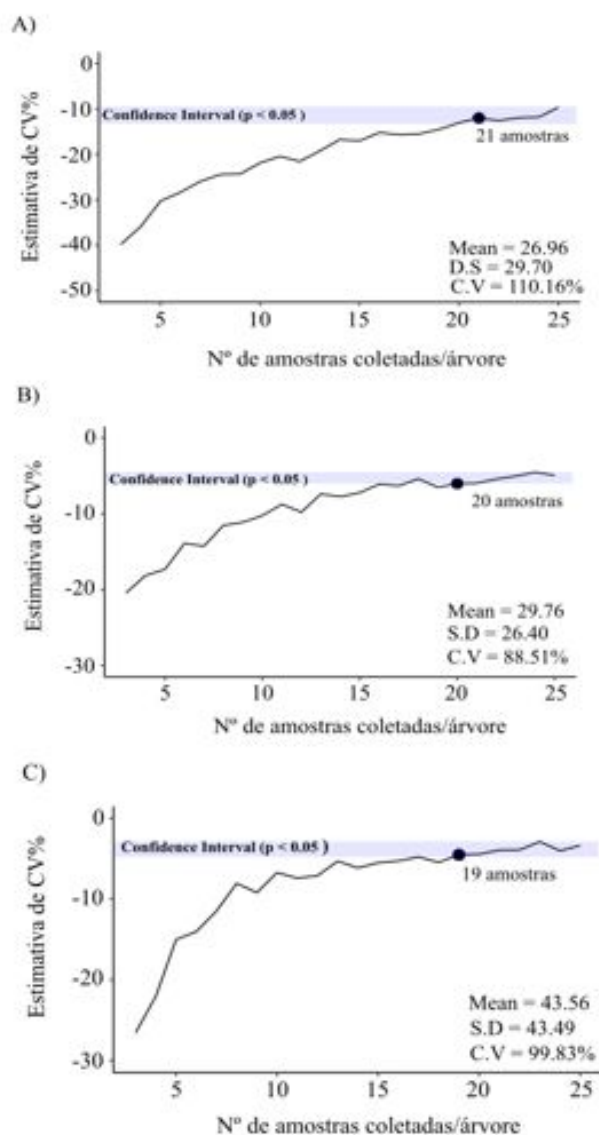


Figura 7: Variação amostral: viés de subestimativa do coeficiente de variação em relação ao coeficiente de variação real (considerando as 25 amostras), nas árvores DM-Q4/A2, DM-Q5/A1 e DM-Q5A2 na propriedade rural em Domingos Martins (gráficos A, B e C, respectivamente). O C.V.% médio para n amostras foi estimado via média de 1000 amostragens (possibilitando repetições). A faixa em azul delimita o intervalo de confiança ao qual os vieses de desvio podem ser considerados estatisticamente semelhantes às amostragens posteriores. O ponto preto indica o n

amostral a partir do qual as estimativas de C.V.% não mais se diferem. S.D. refere-se ao desvio padrão médio das 25 amostras.

As Figuras 8 a 10 mostram o número de amostras que apresentaram diferentes intervalos de densidade de nematoides/100 cm² na copa (tronco e ramos) das árvores DM-Q4/A2, DM-Q5/A1 e DM-Q5A2.

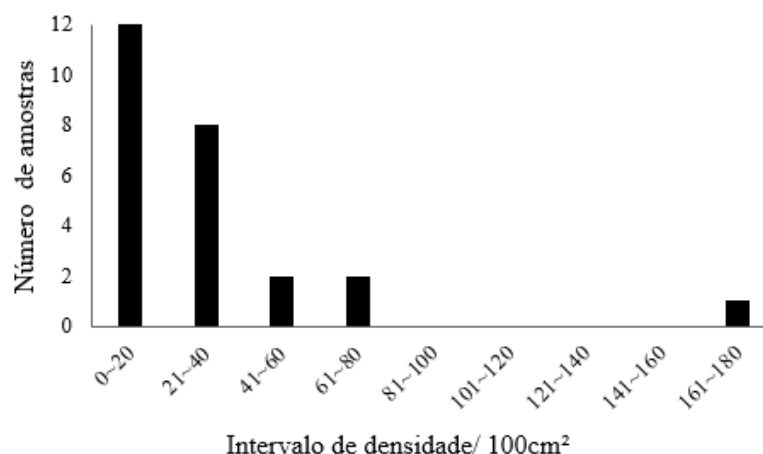


Figura 8: Histograma representando o número de amostras que apresentaram diferentes intervalos de densidade de nematoides/100 cm² na copa (tronco e ramos) da árvore DM-Q4/A2, na área da propriedade rural em Domingos Martins

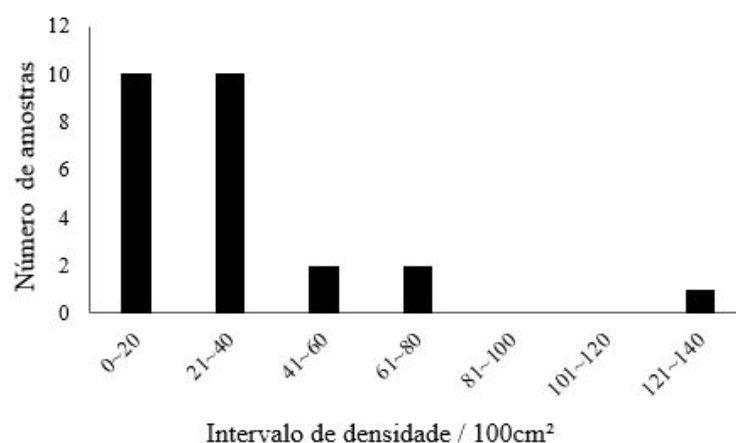


Figura 9: Histograma representando o número de amostras que apresentaram diferentes intervalos de densidade de nematoides/100 cm² na copa (tronco e ramos) da árvore DM-Q5/A1, na área da propriedade rural em Domingos Martins

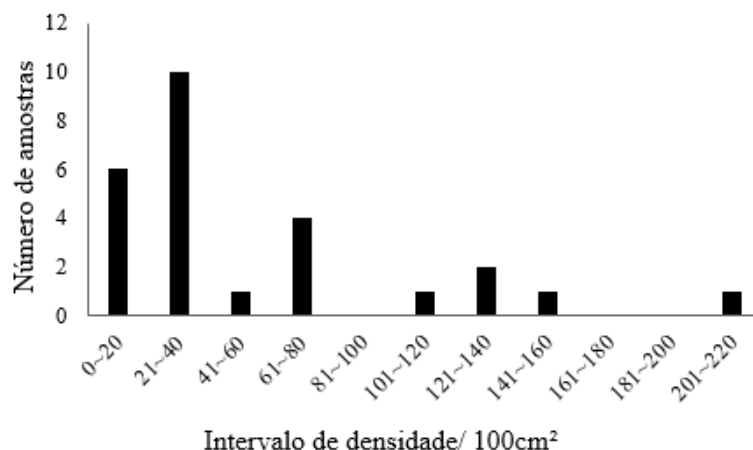


Figura 10: Histograma representando o número de amostras que apresentaram diferentes intervalos de densidade de nematoides/100 cm² na copa (tronco e ramos) da árvore e DM-Q5A2, na área da propriedade rural em Domingos Martins

DISCUSSÃO

No capítulo 1, análises estatísticas indicaram que DS, DM e GX têm nematofaunas distintas entre si. Isso foi confirmado através de índices ecológicos usados no capítulo 2. De fato, os índices de Simpson e Shannon-Wiener indicam que DS tem maior diversidade e menor dominância de gênero, seguido de DM. A área GX tem menor diversidade e maior dominância de gêneros.

Quanto à equitabilidade de gêneros, o índice de Margalef coloca DS com distribuição mais homogênea, seguido de DM e GX. No entanto, o índice de Pielou altera essa sequência, indicando maior equitabilidade em GX do que DM, porque esse índice é mais sensível à ocorrência de gêneros raros nas amostras. Essa diferença entre os índices de Margalef e Pielou reforça a importância de se utilizar múltiplos indicadores ecológicos para se avaliar a dinâmica das comunidades e captar nuances na composição biológica de diferentes habitats que se complementam (Yeates et al., 1993).

As diferenças ecológicas da nematofauna entre as áreas de M.A. possivelmente se explicam por diferenças florísticas e climatológicas, que afetam a disponibilidade de recursos e interações microecológicas e, indiretamente, a comunidade de nematoides (Bongers, 1998). As áreas DM e

DS têm floresta ombrófila densa e pluviosidade elevada, praticamente sem distúrbio antrópico, sendo que DM tem clima tropical de altitude e DS tem clima tropical. Por outro lado, GX tem floresta de tabuleiro semicaducifólia, estação seca bem definida e longa, e distúrbio antrópico acentuado.

As três áreas de M.A. são distintas ($p < 0,01$) também quando se considera a frequência relativa dos grupos tróficos. De fato, DM apresentou seis grupos tróficos, com predomínio de micófagos (57% dos nematoides) e bacteriófagos (34%). A área DS apresentou cinco grupos tróficos, com predomínio de micófagos (38%) e bacteriófagos (36%), mas com presença expressiva de fitófagos (19%). Em GX, a comunidade trófica é mais simples, com apenas três grupos, com predomínio de bacteriófagos (60%) e micófagos (27%). Comparativamente, o teste de Bray-Curtis indicou que DM tem apenas 22% de dissimilaridade com DS, e essas áreas juntas têm 74% de dissimilaridade em relação a GX.

Essas diferenças na proporção dos grupos tróficos entre as três áreas provavelmente refletem diferenças nas características ecológicas e de complexidade das três áreas. A maior diversidade trófica em DS e DM em relação a GX sugere um ecossistema mais equilibrado, com maior teia trófica e maior fluxo de energia entre os níveis tróficos, onde as interações entre diferentes grupos tróficos são mais complexas e funcionais, favorecendo uma maior estabilidade ecológica. (Bongers e Ferris, 1999). Possivelmente GX, com sua menor diversidade de gêneros e ausência de predadores, ingestores de eucariotos unicelulares e onívoros, reflete um ecossistema mais simplificado e menor fluxo energético complexo. A ausência desses grupos pode indicar uma limitação em termos de processos ecológicos que dependem de interações mais complexas entre diferentes grupos tróficos (Ferris, 2010).

Em DM, a predominância de micófagos sobre bacteriófagos (proporção de 1,63:1) possivelmente se deve à abundância de fungos decompositores do grande volume de material vegetal (folhas, galhos, raízes de epífitas etc) que se acumula no tronco e ramos das árvores.

No capítulo 1, as comparações estatísticas indicaram que, em cada área, as árvores representam ecossistemas distintos entre si. Isso foi confirmado pelas diferenças ($p < 0,05$) na frequência dos diferentes grupos tróficos, com GX apresentando maior heterogeneidade entre árvores e DM a

menor heterogeneidade. Os indícios de que cada árvore é um ecossistema distinto quanto à comunidade de nematoides se sustentam mesmo sem a identificação taxonômica das árvores amostradas. De fato, se uma (ou mais) espécies arbóreas foram amostradas mais de uma vez em cada área, isso colaboraria para a uniformidade na comunidade de nematoides entre as árvores. No entanto, nas três áreas, todas as 10 árvores foram distintas entre si.

Os habitats (tronco e ramos) apresentam diferenças significativas ($p < 0,01$) na composição de gêneros e na abundância de grupos tróficos nas áreas DS e DM. Nessas áreas, os resultados indicam que os troncos geralmente possuem maior diversidade funcional, o que pode estar relacionado a condições microambientais específicas, como maior acúmulo de matéria orgânica e umidade, presença de microrganismos e menor exposição a distúrbios ambientais. Esses fatores tornam os troncos habitats mais favoráveis para nematoides micófagos, predadores e outros grupos. Por outro lado, os ramos, mais isolados entre si e expostos ao vento e radiação solar, mostram menor diversidade funcional, com predominância de grupos específicos como bacteriófagos e micófagos. Em contraste, na área GX não houve diferenças entre troncos e ramos, sugerindo condições ambientais uniformes ou um sistema ecológico simplificado, com menor especialização de nichos e recursos estruturais, refletindo uma menor diversidade funcional geral. Essas variações micro espaciais podem indicar que a conectividade com o solo, os fluxos de energia e nutrientes, e a heterogeneidade estrutural são determinantes para a composição e funcionalidade das comunidades (Ferris et al., 2001; Bongers e Ferris, 1999).

De acordo com o IM, GX apresenta-se como um ambiente com maior distúrbio, ao passo que DS e DM são menos perturbados e equivalentes. De acordo com o IC, GX apresenta uma via de decomposição da matéria orgânica predominantemente bacteriana (IC = 45,01%). Por outro lado, DM tem um IC = 87,27%, indicando uma via de decomposição de matéria orgânica predominantemente fúngica. Isso sugere um ecossistema com baixa perturbação, com acúmulo de matéria orgânica de origem vegetal lignificada ou recalcitrante. A área DS, com IC = 51,16, fica em uma posição intermediária, onde micófagos têm ligeiro predomínio sobre bacteriófagos, o que indica que a

decomposição da matéria orgânica nessa área é feita tanto por fungos quanto por bactérias.

Em DS, os valores do IEnr (56,27%) indicam que a área possui um ecossistema enriquecido, com boa disponibilidade de recursos orgânicos, possivelmente resultante de eventos de aporte ou condições microambientais favoráveis. Já o IE (47,39%) posiciona DS no quadrante A do gráfico de funcionalidade do ecossistema (Figura 6) (Ferris et al., 2001), característico de ecossistemas bem estruturados e enriquecidos, com alta atividade biológica.

Em DM, observa-se um IEnr moderado (42,52%), o que indica menor maturidade ecológica. Os valores de IEnr e IE posicionam essa área no quadrante C, caracterizado por baixa estruturação e moderado enriquecimento, sendo um indicativo de que o ecossistema dessa área está em processo de transição.

A área GX apresentou o menor valor de IE (4,27%) e IEnr moderado (44,20). Essas métricas apontam para um ecossistema no quadrante D, característico de áreas degradadas ou com baixa estabilidade e recursos limitados. Essa condição pode ser reflexo de pressões ambientais, como fragmentação de habitat ou alterações antropogênicas.

Essas diferenças nos índices ecológicos, particularmente entre GX e o par DM-DS, sugerem que a comunidade de nematoides na copa de árvores pode servir como indicadora do *status* ecológico da floresta, respondendo a distúrbios antrópicos, fragmentação, esforços de recomposição de florestas etc. Esse potencial da comunidade de nematoides de copa de árvores pode servir como indicador ecológico, mas precisaria, entretanto, ser confirmada por estudos em mais áreas e ecossistemas florestais diversos.

Um outro aspecto da nematofauna de copa que requer mais estudos refere-se ao seu impacto nos processos ecológicos da floresta. De fato, a estimativa da abundância total de nematoide nas árvores DM-Q4/A2, DM-Q5/A1 e DM-Q5/A2 foi de cerca de 86, 26 e 43 milhões de nematoides, respectivamente. Esses valores sugerem que a copa das árvores da M.A. guarda uma imensa nematofauna, cuja relevância ecológica para a floresta como um todo pode ser enorme. A diferença entre as estimativas da abundância total nestas árvores certamente reflete as diferenças na superfície total estimada das árvores, que foram de quase 300 mil, 86 mil e 84 mil cm²,

respectivamente. Possivelmente, a abundância total de nematoides nas árvores varia também em função da espécie arbórea; tipo e textura da casca; compostos químicos liberados através da casca; idade da árvore; e espécies e densidade de epífitas, musgos, líquens, fungos e bactérias que se desenvolvem sobre a casca.

A maior compreensão sobre a comunidade de nematoides na copa das florestas requer que estudos futuros empreguem uma amostragem e processamento de amostras apropriados. A análise do CV% amostral das 25 amostras coletadas nas árvores DM-Q4/A2, DM-Q5/A1 e DM-Q5/A2, sugere que entre 19 e 21 amostras/árvore é uma intensidade suficiente para detecção da abundância de nematoides. Possivelmente, tal intensidade amostral também captaria a diversidade de gêneros e grupos tróficos presentes na árvore, para estudos ecológicos.

Quanto ao processamento das amostras coletadas nos troncos e ramos, o método de Cohen & D'Herde modificado permitiu a extração de 90%, 96,9% e 82,78% da nematofauna nas amostras coletadas nas árvores DM-Q4/A2, DM-Q5/A1 e DM-Q5/A2, respectivamente. Isso indica uma boa eficiência desse método para futuros estudos.

Por fim, o histograma da densidade de nematoides/100 cm² nas 25 amostras coletadas nas árvores DM-Q4/A2, DM-Q5/A1 e DM-Q5/A2 sugere que a distribuição dos nematoides na copa das árvores é agregada (não uniforme), como é tipicamente encontrada em nematofaunas de solos. Possivelmente, essa distribuição agregada reflete a distribuição não uniforme dos recursos que sustentam a comunidade de nematoides, como fungos, bactérias, musgos, líquens, detritos orgânicos e epífitas sobre a casca da árvore. Áreas dos troncos e ramos onde há mais musgos e líquens são também mais úmidas, o que possivelmente favorece o desenvolvimento da comunidade de nematoides. Além disso, fatores (a)bióticos determinam a microdistribuição da nematofauna nos troncos e ramos das árvores é outro tema que requer mais estudos.

CONCLUSÃO

A comunidade de nematoides na copa de árvores da mata atlântica tem elevada diversidade e complexidade ecológica, variando entre áreas, árvores e habitats. As florestas mais conservadas (DS e DM) apresentaram maior diversidade, estruturação e estabilidade ecológica em comparação com a área mais impactada (GX). A abundância de nematoides nas copas indica que esse ecossistema é um importante reservatório de biodiversidade. Os resultados reforçam o potencial dos nematoides de copa como indicadores do status ecológico das florestas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bongers, T. (1990) The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition.

Bongers, T., Bongers, M. (1998) Functional diversity of nematodes. *Applied Soil Ecology*, v.10(3), p. 239-251.

Bongers, T., Ferris, H. (1999) Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring. *Trends in Ecology & Evolution*, v.14(6), p.224-228.

Danovaro R., Snelgrove P.V.R., Tyler P. (2014) Challenging the paradigms of deep-sea ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, p. 465–475
10.1016/j.tree.2014.06.002 PMID: 25001598.

Ferris H., Bongers B., Goede de R.G.M. (2001) A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. *Applied Soil Ecology*. 18, p. 12-29.

Ferris, H. (2010) Contribution of nematodes to the structure and function of the soil food web. *Journal of Nematology*, 42(1), p.63-67.

Ferris, H., Bongers, T., de Goede, R. (2004) nematode faunal analyses to assess food web enrichment and connectance. p503-510 in R.C. Cook and D.J Hunt (eds) *Proceedings of the Fourth International Congress of Nematology. Nematology Monographs and Perspectives 2*. Brill, Netherlands. 866p.

Gafta, D; Ciobanu, M; Stoica, A. (2024) Forest floor 1 nematode communities and associated tree canopies: is there an ecological linkage?. *Soil Biology and Biochemistry. Elsevier Ltd.*, doi: 10.1016/j.soilbio.2024.109592.

Hooggen, Van den. J, et al., (2019) Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale. *Nature*. 572, p. 194-198.

Kennedy A.C., Smith k.L. (1995) Soil microbial diversity and the sustainability of agricultura soils. *Plant and soil*.170, p. 75- 86.

- Magurran, A. E. Measuring Biological Diversity. 2nd ed. Wiley-Blackwell, 2021.
- Mitchell, C.R., Miller, W.R., Davis, B. (2009) Tardigrades of North America: Influence of Substrate on Habitat Selection. Journal of the Pennsylvania Academy of Science, v. 83(1), p. 10-16.
- Nadkarni, N.M., Matelson, T.J. (1989) Bird use of epiphyte resource in neotropical trees. Condor 69, p.891-907.
- Ozanne, C.M.P., Anhuf, D., Boulter, S.L., Keller, M. Kitching, R.L., Korner, C., Meinzer, F.C., Mitchell, A.W., Nakashizuka, T., Silva Dias, P.L., Stork, N.E., Wright, S.J., and Yoshimura, M. (2003) Biodiversity meets the atmosphere: a Global view of forest canopies. Science 301, 183-186.
- Porazinska, D.L., Giblin-Davis, R.M., Powers, T.O., Thomas, W.K. (2012) Nematode Spatial and Ecological Patterns from Tropical and Temperate Rainforests. PLoS ONE 7(9): e44641. doi:10.1371/journal.pone.0044641.
- Porazinska, D.L., Giblin-Davis, R.M., Sung, W., Thomas, W.K. (2010) Ecometagenetics confirms high tropical rainforest nematode diversity. Molecular Ecology. 19, 5521–5530. doi: 10.1111/j.1365-294X.2010.04891.x.
- R Core Team. _R: (2024) A Language and Environment for Statistical Computing_. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Stork, N.E., Adis, J.A., Didham, R.K. (Eds). (1997) “Canopy Arthropods.” Chapman and Hall, London.
- Van der Putten, W. H., & Hol, W. H. G. (2022) Nematodes as indicators of soil health: C-P classification and ecological implications. Ecological Indicators, 137, 108771.

Van Gestel; Van Straalen. (1994) Soil invertebrates and micro-organisms. Ed. p. Calow. Handbook of Ecotoxicology, Blackwell Science Ltd, Oxford. P 251-277.

Yeates G.W. (2003) Nematodes as soil indicators: functional and biodiversity aspects. Biology and fertility of soils. 37, p.199- 201.

Yeates, G. W. et al. (1993) Feeding habits in soil nematode families and genera —An outline for soil ecologists. Journal of Nematology, 25(3), p.315-331.

Ferris, H., Bongers, T., & de Goede, R.G.M. (2001). A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. Applied Soil Ecology, 18(1), 13–29.

APÊNDICE

Tabela 1A: Abundância de nematoides pertencentes a diferentes grupos tróficos na copa (tronco e ramos) de 10 árvores amostradas em áreas no Parque Estadual do Desengano (DS), em propriedade rural em Domingos Martins (DM) e na Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba (GX).

Área	Árvore	Grupos tróficos					
		Bacteriófagos	Micófagos	Fitófagos	Predadores	Onívoros	Ingestores de eucariotos unicelulares
DS	1	270	410	320	20	230	0
DS	2	450	150	130	0	40	0
DS	3	310	350	50	0	0	0
DS	4	50	120	490	0	10	0
DS	5	500	180	70	10	10	0
DS	6	300	50	30	60	0	0
DS	7	220	280	150	70	0	0
DS	8	220	1000	100	10	0	0
DS	9	590	570	210	0	0	0
DS	10	130	90	10	60	20	0
DM	1	280	230	80	30	0	0
DM	2	180	660	10	70	0	0
DM	3	140	170	0	0	0	0
DM	4	780	750	110	70	0	0
DM	5	120	430	10	20	0	0
DM	6	210	380	0	80	0	0
DM	7	170	100	0	70	0	0

DM	8	440	790	10	10	0	0
DM	9	600	870	150	30	0	0
DM	10	280	840	0	10	0	10
GX	1	0	0	0	0	0	0
GX	2	60	70	100	0	0	0
GX	3	20	10	10	0	0	0
GX	4	10	0	0	0	0	0
GX	5	100	0	0	0	0	0
GX	6	250	70	20	0	0	0
GX	7	110	80	0	0	0	0
GX	8	200	110	80	0	0	0
GX	9	30	0	0	0	0	0
GX	10	0	10	50	0	0	0

Tabela 2A: Circunferências proximal (I) e distal (II), altura, e área de superfície dos cones imaginários medidos na árvore DM-Q5/A2 na propriedade rural em Domingos Martins.

Circunferência I (cm)	Circunferência II (cm)	Altura (cm)	Área (cm²)
74	60	375	25125
60	66	465	29295
35	39	39	1443
41	39	160	6400
17	17	99	1683
17	9	100	1300
19	8	150	2025
48	45	38	1767
43	42	90	3825
36	39	40	1500
34	32	50	1650
23	31	35	945
26	27	30	795
27	26	27	715,5
17	25	39	819
26	29	34	935
26	26	130	3380

Tabela 3A: Circunferências proximal (I) e distal (II), altura, e área de superfície dos cones imaginários medidos na árvore DM- Q4/A2 na propriedade rural em Domingos Martins.

Circunferência I (cm)	Circunferência II (cm)	Altura (cm)	Área (cm²)
175	128	100	15150
128	110	800	95200
85	85	112	9520
52	50	130	6630
50	30	465	18600
66,5	67	142	9478,5
67	66	150	9975
60	60	200	12000
30	20	200	5000
30	20	200	5000
25	20	200	4500
25	20	200	4500

76,5	76	270	20587,5
8	15	200	2300
10	15	100	1250
20	36	400	11200
60	30	550	24750
25	15	400	8000
30	25	600	16500
30	25	300	8250

Tabela 4A: Circunferências proximal (I) e distal (II), altura, e área de superfície dos cones imaginários medidos na árvore DM- Q5/A1 na propriedade rural em Domingos Martins.

Circunferência I (cm)	Circunferência II (cm)	Altura (cm)	Área (cm²)
78	72	500	37500
72	65	180	12330
69	65	240	16080
38	33,5	90	3217,5
21	20	100	2050
18	13,5	118	1858,5
82	58,5	122	8570,5
24	13	56	1036
21,5	17,5	77	1501,5
22,5	15	83	1556,25

CONCLUSÕES

A copa das árvores da M.A abriga uma comunidade diversa e abundante de nematoides, com variações significativas entre áreas, árvores e habitats. A composição da nematofauna difere estatisticamente entre as áreas amostradas, com forte influência de fatores ambientais locais. Cada árvore apresentou uma comunidade única, reforçando a influência de características individuais na distribuição dos organismos.

Nos microhabitats, troncos e ramos exibiram diferenças significativas nas áreas DM e DS, enquanto GX, essa distinção não foi observada. Nenhum nematoide foi encontrado nas folhas. Este estudo reforça a complexidade ecológica da copa das árvores e sua importância para a biodiversidade da Mata Atlântica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bardgett RD, Cook R, Yeates GW, Denton CS. (1999). The influence of nematodes on below-ground processes in grassland ecosystems. *Plant and Soil* v.212(1), p.23-33.

Bongers, T. (1990). The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition.

Bongers, T., Bongers, M. (1998). Functional diversity of nematodes. *Applied Soil Ecology*, v.10(3), p. 239-251.

Bongers, T., Ferris, H. (1999). Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring. *Trends in Ecology & Evolution*, v.14(6), p.224-228.

Brockerhoff, E.G., Barbaro, L., Castagneyrol, B., Forrester, D., et al. (2017). Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*, v.26 p.3005-3035.

Ciobanu, M.; Popovici, I.; Vaduva, G.; Stoica, I.-A. (2015). Patterns of relative magnitudes of soil energy channels and their relationships with environmental factors in different ecosystems in Romania. *Scientific Reports*, v. 5, p. 17606.

Clima tempo. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

De Frenne, P., et al. (2019). Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nature Ecology & Evolution*, v.3(5), p.744-749.

Denison, W.C. (1973). Life in tall trees. *Sci. Amer.* v.228, p. 74-80.

Du Preez, G. (2022). Nematode-based indices in soil ecology: application, utility, and future directions. *Soil Biol. Biochem.* v.169, p.108-640.

Ferris H., Bongers B., Goede de R.G.M. (2001). A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. *Applied Soil Ecology*. 18, p. 12-29.

Ferris, H. (2010). Contribution of nematodes to the structure and function of the soil food web. *J. Nematol.* V. 42, p. 63–67.

Ferris, H., Bongers, T., de Goede, R. (2004b). nematode faunal analyses to assess food web enrichment and connectance. p.503-510 in R.C. Cook and D.J Hunt (eds) *Proceedings of the Fourth International Congress of Nematology. Nematology Monographs and Perspectives 2*. Brill, Netherlands. p.866.

Fischer J, Lindenmayer DB. (2007). Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis. *Global ecology and biogeography*, v.16(3), p.265-280.

Freiberg, M. (1996). Phenotypic expression of epiphytic Gesneriaceae under different microclimatic conditions in Costa Rica. *Ecotropica*, v.2, p.49-57.

Gafta, D; Ciobanu, M; Stoica, A. (2024). Forest floor 1 nematode communities and associated tree canopies: is there an ecological linkage?. *Soil Biology and Biochemistry*. Elsevier Ltd., doi: 10.1016/j.soilbio.2024.109592.

Hansen MC, Potapov PV, Moore R, Hancher M, Turubanova SA, Tyukavina A, Thau D, Stehman SV, Goetz SJ, Loveland TR, Kommareddy A, Egorov A, Chini L, Justice CO, Townshend JRG. (2018). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 10.1126/science.1244693.

Higuchi MIG, Azevedo GC, Forsberg SS. A floresta e sociedade: ideias e práticas históricas. In Higuchi MIG, Higuchi N. (eds). (2012). *A floresta amazônica e suas múltiplas dimensões: uma proposta de educação ambiental*, Manaus: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). p.311-330.

Hoogen et al. (2019). Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale. *Nature*, v. 572.

Hugot JP, Baujard P, Morand S. (2001). Biodiversity in helminths and nematodes as a field of study: an overview. *Nematology* 3(3):199-208.

IBGE. (2025). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mata Atlântica tem 2.845 espécies ameaçadas de extinção. Disponível em: <https://jr.jor.br/2023/05/24/mata-atlantica-tem-2-845-especies-ameacadas-de-extincao/>. Acesso em: 22 abr. 2025.

Inea. Instituto Estadual do Ambiente. Disponível em: <https://www.inea.rj.gov.br>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

Inmet – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <https://www.gov.br/inmet>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

Joly, C.A; Metzger, J.P; Tabarelli, M. (2014). Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: ecological findings and conservation initiatives. *New Phytologist*. V. 204, p. 459-473.

Kennedy A.C., Smith k.L. (1995). Soil microbial diversity and the sustainability of agricultura soils. *Plant and soil*.170, p. 75- 86

Lambais MR, Crowley DE, Cury JC, Büll RC, Rodrigues RR. (2006). Bacterial diversity in tree canopies of the Atlantic forest. *Science*, v.312, p.1917-1917.

Liu, B.; Li, Y.; Peay, K. G.; Palm, M. E.; Taylor, J. W.; Wingfield, M. J.; Brennenstuhl, A.; Larkin, D. J.; Smith, S. A.; Kost, M. A. (2019). Global diversity and distribution of fungal endophytes in tree leaves. *New Phytologist*, v. 222, n. 1, p. 123-138.

Lima, L. et al. Mais de 80% das espécies de árvores exclusivas da Mata Atlântica estão ameaçadas de extinção. *Science*. Disponível em:

<https://agencia.fapesp.br/mais-de-80-das-especies-de-arvores-exclusivas-da-mata-atlantica-estao-ameacadas-de-extincao/50617>. 2024. Acesso em: 22 abr. 2025.

Longino, J.; Nadkarni, N.M. (1990). A comparison of ground and canopy leaf litter ants (Hymenoptera Formicidae) in a neotropical montane forest. *Psyche*, v. 97, p.81-94.

Lowman, M.D., Devy, S., Ganesh, T. (2013). *Treetops at Risk - Challenges of Global Canopy Ecology and Conservation*. Dordrecht, Springer.

Lowman, M.D., Rinker, H.B. (2004). *Forest canopies*. Elsevier. Burlington, Elsevier Academic Press.

Magurran, A. E. (2021). *Measuring Biological Diversity*. 2nd ed. Wiley-Blackwell, 2021.

Ministério do Meio Ambiente (2018). *Mata Atlântica*. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/biomas/mataatlantica_emdesenvolvimento.html. Acessado em: 04 outubro 2024.

Mitchell, C.R., Miller, W.R., Davis, B. (2009). Tardigrades of North America: Influence of Substrate on Habitat Selection. *Journal of the Pennsylvania Academy of Science* 83(1): 10-16, 2009.

Mittermeier RA, Myers N, Thomsen JB, Da Fonseca GA, Olivieri S. (2005). Biodiversity hotspots and major tropical wilderness areas: approaches to setting conservation priorities. *Conservation Biology*, p.516-520.

Moens, T., Yeates, G. W.; De Ley, P. (2004). Use of carbon and energy sources by nematodes. *Nematology Monographs and Perspectives*, Leiden, v. 2, p. 529-545.

Moffet, M.W. (2000). "What's up" A critical look at the basic terms of canopy biology. *Biotropica*. v. 32, p. 569-596.

Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, Fonseca GAB, Kent J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, v.403, p.853-858.

Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C.G., Fonseca, G. A. B., Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. Green College, Oxford University. *Nature*, v. 403.

Nadkarni, N.M., Matelson, T.J. (1989). Bird use of epiphyte resource in neotropical trees. *Condor* 69, p.891-907.

Nadkarni, N.M; Parker, G.G. (1994). A profile of forest canopy science and scientists – who we are, what we want to know, and obstacles we face: results of an international survey. *Selbyana*, v. 15, p.38-50.

Nielsen UN, Ayres E, Wall DH, Li G, Bardgett RD, Wu T, Garey JR. (2014). Global-scale patterns of assemblage structure of soil nematodes in relation to climate and ecosystem properties. *Global Ecology and Biogeography* 23(9):968-978.

Ozanne, C.M.P., Anhufo, D., Boulter, S.L., Keller, M. Kitching, R.L., Korner, C., Meinzer, F.C., Mitchell, A.W., Nakashizuka, T., Silva Dias, P.L., Stork, N.E., Wright, S.J., and Yoshimura, M. (2003). Biodiversity meets the atmosphere: a Global view of forest canopies. *Science*, v.301, p.183-186.

Parker, G.G. (1995). Structure and microclimate of forest canopies. In "Forest Canopies" (M.D. Lowman and N.M. Nadkarni, Eds.). Academic Press, San Diego. p. 73-106.

Porazinska, D.L., Giblin-Davis, R.M., Powers, T.O., Thomas, W.K. (2012). Nematode Spatial and Ecological Patterns from Tropical and Temperate Rainforests. PLoS ONE 7(9): e44641. doi:10.1371/journal.pone.004464.

Porazinska, D.L., Giblin-Davis, R.M., Sung, W., Thomas, W.K. (2010). Ecometagenetics confirms high tropical rainforest nematode diversity. Molecular Ecology. 19, 5521–5530. doi: 10.1111/j.1365-294X.2010.04891.

R Core Team. _R (2024). A Language and Environment for Statistical Computing_. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.

Ribeiro, M. C., Metzger, J. P., Martensen, A. C., Ponzoni, F. J., & Hirota, M. M. (2009). The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. Biological Conservation, 142(6), 1141–1153.

Richards, P.W. (1954). The tropical rain forest. Cambridge University Press, Cambridge.

Ritzinger, C.H.S.P; Fancelli, M.; Ritzinger, R. (2010). Nematoides: bioindicadores de sustentabilidade e mudanças edafoclimáticas. Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal - SP, v. 32, n. 4, p. 1289-1296.

Shao, Y.; Wang, Z.; Liu, T.; Kardol, P.; Ma, C.; Hu, Y.; Cui, Y.; Zhao, C.; Zhang, W.; Guo, D.; Fu, S. (2023). Drivers of nematode diversity in forest soils across climatic zones. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 290, n. 1994, p. 20230107.

Spies, T. (1998). Forest structure: a key to the ecosystem. Northwest sci. (Special Issue), v.72, p.34-39.

Stehmann, J.R., Forzza, R.C., Salino, A., Sobral, M., Costa, D.P., Kamino, L.H.Y. (2009). Plants of the Atlantic Forest. = Plantas da Floresta Atlântica. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, p.411.

Stork, N.E., Adis, J.A., Didham, R.K. (Eds). (1997). "Canopy Arthropods." Chapman and Hall, London.

Tabarelli M, Da Silva JMC, Gascon C. (2004). Forest fragmentation, synergisms and the impoverishment of neotropical forests. *Biodiversity & Conservation*, v.13(7), p.1419-1425.

Trichon, V. (2002). Monkeys as canopy collectors. In "Forest Canopy Handbook" (A.W. Mitchell, K. Secoy and T. Jackson, eds.), p. 11-12. Global Canopy programme, Oxford.

United Nations (2020a). Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>. Acessado em 15/12/2024.

United Nations (2020b). United Nations Development Programmes. Disponível em <https://www.undp.org/content/undp/en/home/sustainable-development-goals/goal-15-life-on-land.html>. Acessado em 15/12/2024.

Van der Putten, W. H., & Hol, W. H. G. (2022). *Nematodes as indicators of soil health: C-P classification and ecological implications*. *Ecological Indicators*, v.137.

Van Gestel; Van Straalen. (1994). Soil invertebrates and micro-organisms. Ed. p. Calow. *Handbook of Ecotoxicology*, Blackwell Science Ltd, Oxford. p.251-277.

Wardle, D. A.; Bardgett, R. D.; Klironomos, J. N.; Setälä, H.; Van der Putten, W. H.; Wall, D. H. (2004). Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, v. 304, n. 5677, p. 1629-1633.

Yale School of the Environment (2025). The Global Forest Atlas. Disponível em <https://globalforestatlas.yale.edu/climate-change/climate-change-temperate-forests> Acessado em 10/01/2025.

Yeates G.W. (2003). Nematodes as soil indicators: functional and biodiversity aspects. *Biology and fertility of soils*. v.37, p.199- 201.

Yeates GW, Bongers T, De Goede RGM, Freckman DW, Georgieva SS. (1993). Feeding habits in nematode families – an outline for soil ecologists. *Journal of Nematology* v.25, p.315-331.