



GILSON ARGOLO DOS SANTOS JÚNIOR

**A INFLUÊNCIA DA COBERTURA DO SOLO PARA
ASSEMBLEIA DE COLLEMBOLOS EM MEIO
SUBTERRÂNEO SUPERFICIAL NEOTROPICAL**

**LAVRAS – MG
2024**

GILSON ARGOLO DOS SANTOS JÚNIOR

**A INFLUÊNCIA DA COBERTURA DO SOLO PARA ASSEMBLEIA DE
COLLEMBOLAS EM MEIO SUBTERRÂNEO SUPERFICIAL NEOTROPICAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada, área de concentração em Ecologia e Conservação de Recursos em Paisagens Fragmentadas e Agrossistemas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Marconi Souza Silva
Orientador

Prof. Dr. Rodrigo Lopes Ferreira
Coorientador

**LAVRAS – MG
2024**

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

Júnior, Gilson Argolo dos Santos.

A influência da cobertura do solo para assembleia de
collembolos em meio subterrâneo superficial neotropical / Gilson
Argolo dos Santos Júnior. - 2022.

64 p. : il.

Orientador(a): Marconi Souza Silva.

Coorientador(a): Rodrigo Lopes Ferreira.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Habitats Subterrâneos Superficiais. 2. cobertura vegetal do
solo. 3. fauna subterrânea. I. Silva, Marconi Souza. II. Ferreira,
Rodrigo Lopes. III. Título.

GILSON ARGOLO DOS SANTOS JÚNIOR

**A INFLUÊNCIA DA COBERTURA DO SOLO PARA ASSEMBLEIA DE
COLLEMBOLAS EM MEIO SUBTERRÂNEO SUPERFICIAL NEOTROPICAL
THE INFLUENCE OF SOIL COVER ON THE COLLEMBOLAN ASSEMBLAGE IN
NEOTROPICAL SUPERFICIAL SUBTERRANEAN ENVIRONMENTS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada, área de concentração em Ecologia e Conservação de Recursos em Paisagens Fragmentadas e Agrossistemas, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 30 de setembro de 2022
Dr. Diego de Medeiros Bento - UFRN
Dr. Paulo dos Santos Pompeu - UFLA

Prof. Dr. Marconi Souza Silva
Orientador

Prof. Dr. Rodrigo Lopes Ferreira
Coorientador

**LAVRAS – MG
2024**

AGRADECIMENTOS

“Biologia e computadores”

-Michael Crichton em Mundo Perdido (Jurassic Park)

Agradeço e dedico este trabalho à minha família, em especial à minha mãe, que sempre acreditou que os estudos eram o caminho que eu deveria seguir e tanto possibilitou como incentivou todas minhas conquistas nesta jornada que escolhi percorrer.

Aos meus irmãos Mateus e Rafael, que sempre me receberam de volta em casa com muitas saudades e perguntas de todos os tipos e sobre todas as coisas. Tentar estar preparado para respondê-las sempre me incentivou muito e me fez aprender um pouquinho sobre vários assuntos. Nunca parem de perguntar.

Aos meus dois pais, que tanto presente quanto ausente, me serviram de inspiração e base.

À minha tia Cidinha, que também incentivou e possibilitou meus estudos.

À Manu, que me acompanhou nos menores detalhes durante todo o tempo deste trabalho, obrigado por me acompanhar, tornar as coisas sempre melhores, e junto comigo sonhar como a vida pode ser (a Nova Zelândia está logo ali).

Ao Cachu, que me acompanha, auxilia e também acolhe com sua cautela e sabedoria, desde os primeiros dias após minha saída de casa. Muito obrigado.

À Marina, que sempre esteve comigo, tanto nas festas quanto nos dramas da vida adulta e acadêmica. Fico feliz que tivemos muito dos dois.

À Bruna, Laís, Leitão, Bidê, Paqueta e todos os meus demais amigos, vocês sempre foram essenciais.

À Luana e Isabela pelo enorme auxílio e companhia durante a fabricação das armadilhas e primeiros campos. Assim como a Ana pela ajuda com as triagens.

Aos meus amigos e colegas do CEBS, Cachelfa, Resta, Perna, Balão, Rayanne, Vaca, Priscila, Leandro, Jesus, Dara, Chiquinha, Alícia e todos demais. Vocês são responsáveis pelos melhores momentos de cafezinho que essa universidade possui. Obrigado também por confiarem o conserto de seus computadores a mim.

Ao Grilão e Sassanha, que me ajudarem enormemente na finalização deste trabalho. E também a Mommy Bear, tenho muito orgulho de ter começado o meu primeiro estágio dentro

da universidade com você. Todos são enormes inspirações profissionais e acadêmicas para mim.

Ao Coelho, uma das pessoas mais importantes para a realização deste projeto, que não só nos recebeu em sua casa todos os meses, durante mais de um ano, mas também fez com que todos esses momentos fossem muito divertidos. Gostaria que soubesse que também lhe tenho como um professor.

Agradeço aos meus orientadores Marconi e Rodrigo, que com muita paciência e disposição me auxiliaram durante toda a construção de minha formação e também me acompanharam em todos, os muitos, trabalhos de campo deste projeto. Vocês são responsáveis por iluminarem meu caminho pela biologia subterrânea (e por possibilitarem eu a usar esta frase clichê, porém repleta de verdades).

Ao programa de pós-graduação em ecologia aplicada por todas as disciplinas e ajuda ofertada.

Ao ICMBIO pelo financiamento através do TCCE N° 3/2018

À Universidade Federal de Lavras, e ao ensino superior gratuito de qualidade deste país. Que além de me permitir estudar, especializar e trabalhar na área dos meus sonhos, transformou muito minha vida. Voto e torço para que continue transformando a vida de muitas outras pessoas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar se a cobertura vegetal nativa altera padrões físico-químicos do solo de meios subterrâneos superficiais (MSS), assim como verificar se este parâmetro exerce alguma influência na fauna de colêmbolos associados a estes ambientes (riqueza, composição e distinção taxonômica). Aliado a isto, também foi verificado se esta fauna (riqueza, composição e diversidade beta) é influenciada de algum modo pelas estações seca e chuvosa e se difere entre diferentes meses do ano. Foi avaliado também se estes padrões afetam diferentemente a fauna de fragmentos florestais e áreas antropizadas, bem como se as variações na temperatura interferem nesta dinâmica. Amostrou-se, durante 13 meses consecutivos, a fauna de colêmbolos associados ao MSS no carste do município de Pains-MG, no sudeste brasileiro. Em seis estações amostrais (três situadas em encostas de fragmentos florestais e três em encostas adjacentes a plantações ou pastagem) foram avaliados diversos parâmetros do solo (temperatura, textura, porosidade, pH, concentração de matéria orgânica e de micronutrientes) em diferentes estratos do solo (de 5 até 95cm de profundidade). A assembleia de colêmbolos foi influenciada tanto por parâmetros do solo (matéria orgânica, pH, micro porosidade e textura) como pelo tipo de ambiente, este com a maior influência sobre a composição de colêmbolos troglomórficos. No entanto, com exceção da temperatura média do MSS, os parâmetros físico-químicos não apresentaram diferenças entre os ambientes de fragmento florestal e antropizado. As estações seca e chuvosa influenciaram na composição e riqueza de colêmbolos de áreas antropizadas, assim como na riqueza de estratos mais superficiais. Todos os ambientes e estratos avaliados apresentaram diferenças mensais, enquanto apenas a composição dos estratos superficiais e profundos apresentaram diferenças entre alguns meses não consecutivos. Em relação à beta diversidade, o estrato mais profundo apresentou padrão de substituição de espécies no ápice da estação seca e começo da chuvosa, que foi alternado para diferença de riqueza após o período chuvoso mais intenso. A temperatura mensal dos estratos do MSS influenciou negativamente a riqueza das profundidades e ambientes avaliados. Com os resultados obtidos no estudo, é possível inferir que os MSSs possuem importância para conservação da biodiversidade, tendo em vista que regiões mais profundas apresentam maior estabilidade e pode ser utilizada como abrigo em momentos de estresse. Nesse sentido, também é possível inferir que a conservação da vegetação nativa adjacente a estes ambientes tem grande importância, principalmente para atenuação de efeitos climáticos externos.

Palavras-chave: Habitats Subterrâneos Superficiais. Cobertura de solo. Fauna subterrânea. Armadilhas para coleta subterrânea

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate whether native vegetation cover alters the physicochemical patterns of soil in Mesovoid Shallow Substratum (MSS), as well as to verify if this parameter has any influence on the collembolan fauna associated with these environments (richness, composition, and taxonomic distinction). In addition, it was also verified whether this fauna (richness, composition, and beta diversity) is influenced in any way by the dry and rainy seasons and if it differs between different months of the year. It was also evaluated whether these patterns differently affect the fauna of forest fragments and anthropized areas, as well as whether variations in temperature interfere with these dynamics. Over a period of 13 consecutive months, the collembolan fauna associated with SUEs in the karst region of the municipality of Pains-MG in southeastern Brazil was sampled. Various soil parameters (temperature, texture, porosity, pH, organic matter concentration, and micronutrient concentration) were evaluated in different soil strata (from 5 to 95 cm depth) at six sampling stations (three located on slopes of forest fragments and three on slopes adjacent to plantations or pastures). The collembolan assemblage was influenced by both soil parameters (organic matter, pH, microporosity, and texture) and the type of environment, with the latter having the greatest influence on the composition of troglomorphic collembolans. However, except for the average temperature of the MSS, the physicochemical parameters did not differ between the forest fragment and anthropized environments. The dry and rainy seasons influenced the composition and richness of collembolans in anthropized areas, as well as the richness of shallower strata. All evaluated environments and strata showed monthly differences, while only the composition of the shallow and deep strata showed differences between some non-consecutive months. Regarding beta diversity, the deepest stratum showed a species turnover pattern at the peak of the dry season and the beginning of the rainy season, which shifted to richness difference after the most intense rainy period. The monthly temperature of the MSS strata negatively influenced the richness of the evaluated depths and environments. Based on the results obtained in the study, it is possible to infer that MSSs are important for biodiversity conservation, considering that deeper regions exhibit greater stability and can be used as shelter during stressful periods. In this sense, it is also possible to infer that the conservation of native vegetation adjacent to these environments is of great importance, particularly for attenuating external climatic effects.

Keywords: Superficial Subterranean Habitats. Soil cover. Subterranean fauna. Subterranean sampling devices.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE.....	9
INTRODUÇÃO GERAL.....	10
REFERÊNCIAS	13
SEGUNDA PARTE.....	15
ARTIGO 1.....	16
A AUSÊNCIA DA VEGETAÇÃO FLORESTAL PODE AFETAR CARACTERÍSTICAS DOS MEIOS SUBTERRÂNEOS SUPERFICIAIS E SUA FAUNA ASSOCIADA?.....	16
RESUMO	17
ABSTRACT	18
INTRODUÇÃO	19
METODOLOGIA	20
ÁREA DE ESTUDO	20
DESENHO AMOSTRAL	21
ANÁLISE DE DADOS	23
RESULTADOS.....	24
CARACTERIZAÇÃO DO MSS	24
DIVERSIDADE DE COLÊMBOLOS	27
MODELOS SOBRE A ESTRUTURAÇÃO DA COMUNIDADE	29
DISCUSSÃO.....	30
REFERÊNCIAS	33
MATERIAL SUPLEMENTAR	36
ARTIGO 2.....	39
A VEGETAÇÃO FLORESTAL PODE ATENUAR EFEITOS SAZONAIS EM FAUNA ASSOCIADA A MEIOS SUBTERRÂNEOS SUPERFICIAIS?	39
RESUMO	40
ABSTRACT	41
INTRODUÇÃO	42
METODOLOGIA	44
ÁREA DE ESTUDO	44
DESENHO AMOSTRAL	45
ANÁLISE DE DADOS	46
RESULTADOS.....	47
DISCUSSÃO.....	52
MATERIAL SUPLEMENTAR	59

PRIMEIRA PARTE

INTRODUÇÃO GERAL

Ambientes subterrâneos possuem diferenças quando comparados com qualquer ambiente de superfície, sendo as principais: escuridão permanente, estabilidade térmica em regiões mais profundas e baixo aporte trófico devido à ausência de produção primária por fotossíntese (Juberthie 1983). Neste sentido, é comum associarmos estes ambientes apenas com as extensas galerias formadas no interior de rochas, as cavernas. Entretanto, existem ambientes subterrâneos que se diferem das cavernas em suas formações, características e fauna associada, como os Habitats Subterrâneos Superficiais (HSS) (Culver and Pipan 2009).

O termo HSS foi contextualizado por Culver e Pipan (2009), e tais ambientes possuem como características: estarem situados entre a superfície e a rocha matriz, escuridão permanente em grande parte de sua extensão, variações térmicas menores quando comparadas com o ambiente externo, mas não tão estáveis quanto cavernas, dependência do aporte trófico epígeo, assim como presença tanto de fauna de ambientes superficiais como subterrâneos. Exemplos destes habitats são as serrapilheiras, tubos de lavas, espaços superficiais e preenchidos por água em rochas carbonáticas (epicarste), assim como ambientes compostos por uma série de espaços vazios e heterogêneos em fissuras e entre fragmentos rochosos chamados de meios subterrâneos superficiais (MSS) (Culver and Pipan 2009; Mammola et al. 2016).

Os MSSs foram descritos por Juberthie (1983) e, de modo geral, situam-se entre os horizontes profundos do solo e a rocha matriz, além de poderem possuir alguma conexão com grandes cavidades subterrâneas. Contudo, esses ambientes possuem diferentes formações e características, que influenciam diretamente na fauna que pode ser encontrada associada a eles. Atualmente os MSSs mais comuns e estudados são o coluvial, o aluvial e o MSS de rocha matriz. O MSS coluvial é encontrado em encostas montanhosas e composto por espaços em fragmentos rochoso, que se desprendem da rocha matriz por crioclastismo e formam depósitos de talus (Gers 1998; Culver and Pipan 2009; Giachino and Vailati 2010; Rendoš et al. 2012; Ledesma et al. 2020), podendo ser encobertos por uma estreita camada de solo ou não (Mammola et al. 2016). O MSS aluvial é composto pelos espaços entre cascalhos e outros sedimentos rochosos em cursos de rios e riachos intermitentes, que podem ser colonizados por invertebrados terrestres em períodos de seca (Ortuño et al. 2013). Já o MSS de rocha matriz é composto tanto por espaços em fissuras na rocha como pelos espaços entre clastos rochosos do solo, sendo formados pela erosão da rocha matriz e frequentemente isolados da superfície pela formação dos horizontes edáficos (Culver and Pipan 2009). Embora os MSS de rocha matriz

possam ser encontrados em diversas litologias, frequentemente estão associados a rochas mais solúveis e de fácil erosão (Mammola et al. 2016).

De forma geral, esses ambientes possuem em comum um regime de temperatura que é menos acentuado em comparação com a superfície, mas não tão estável quando comparado com outros ambientes subterrâneos como as cavernas (Pipan et al. 2011). Isto ocorre devido ao isolamento provido pelo solo, de modo que MSSs mais profundos sejam menos influenciados por mudanças na temperatura da superfície, embora ainda apresentem média da temperatura anual próxima da encontrada no meio epígeo (Pipan et al. 2011; Rendoš et al. 2016; Mammola et al. 2016). Outra característica comum destes ambientes é o acentuado gradiente trófico encontrado, de modo que regiões superficiais apresentem maiores concentrações de recursos orgânicos, o que diminui com o aumento da profundidade (Gers 1998; Rendoš et al. 2016). Tal gradiente advém da decomposição da matéria vegetal presente na superfície que adentra através da percolação da água das chuvas ou transportado por raízes e invertebrados (Gers 1992).

Estes padrões foram encontrados simultaneamente na França, por Juberthie (1983), e por Uéno (1980), no Japão (Mammola et al. 2016). Até o momento, a maior parte dos trabalhos encontrados com esses ambientes e sua fauna associada foi realizada em regiões temperadas e possuem, em sua maioria, foco em avaliações de regimes térmicos ao longo do ano, avaliações do fluxo trófico do sistema e a descrição de padrões ecológicos e da fauna associada a estes ambientes, especialmente a estritamente subterrânea (Pipan et al. 2011; Mammola et al. 2016).

Esses estudos demonstram que a fauna do MSS é dinâmica, variando tanto ao longo do ano como em profundidade, além de ser composta em grande parte por invertebrados como anelídeos, moluscos e principalmente artrópodes (Culver and Pipan 2009; Mammola et al. 2016). Com isso, o MSS foi inicialmente considerado como um intermédio entre o ambiente superficial e subterrâneo, de modo que a fauna o utilizasse principalmente para transitar entre ambos. No entanto, estudos recentes mostram que algumas espécies, inclusive troglóbias, têm esses ambientes como habitat preferencial (Juberthie and Decu 2006; Laška et al. 2011; Ledesma et al. 2020).

Dentre os artrópodes que são encontrados associados aos MSS, os colêmbolos estão entre os mais diversos e abundantes (Gers 1998). Diversos estudos apontam que este grupo possui contribuição para processos do solo como decomposição de matéria orgânica, mineralização de Nitrogênio e aeração, uma vez que se alimentam de matéria orgânica de diversas fontes e auxiliam na manutenção de pequenos espaços dentre as partículas do solo (Filser 2002; Chauvat et al. 2007; Winck et al. 2017). Estes animais também são sensíveis a mudanças em parâmetros ambientais como altitude, temperatura, umidade, acumulação de

serrapilheira, e mudanças na composição da comunidade de plantas. Neste contexto, os colêmbolos podem ser considerados como bons bioindicadores para avaliar mudanças no uso do solo (Lauga-Reyrel and Deconchat 1999) e, por consequência, impactos em parâmetros ambientais que afetem os MSS.

Dessa forma, destaca-se a relevância dos meios subterrâneos superficiais no panorama de conservação da biodiversidade. Como são utilizados como trânsito por muitos invertebrados, podem servir como abrigo e conexão tanto para a fauna de superfície quanto para fauna subterrânea, em vista de algum impacto em seus respectivos habitats, além de serem também o habitat de preferência de espécies exclusivas (Laška et al. 2011; Ledesma et al. 2020). Considerando a importância desses ambientes e as lacunas de conhecimento que os envolvem, este trabalho visa compreender melhor quais são os fatores estruturantes para a assembleia de colêmbolos que habitam o MSS, tendo assim como principais objetivos: caracterizar o MSS de uma região neotropical quanto a parâmetros biológicos e físico-químicos do solo e avaliar se o uso do solo sobre tais ambientes interfere nestes parâmetros. Ainda, verificar como a estruturação da comunidade de colêmbolos neste estrato se altera conforme a sazonalidade local.

REFERÊNCIAS

- Chauvat M, Wolters V, Dauber J (2007) **Response of collembolan communities to land-use change and grassland succession**. *Ecography* 30:183–192. <https://doi.org/10.1111/j.2007.0906-7590.04888.x>
- Culver DC, Pipan T (2009) **The Biology of Caves and Other Subterranean Habitats**
- Filser J (2002) **The role of Collembola in carbon and nitrogen cycling in soil**
- Gers C (1992) **Ecologie et biologie des arthropodes terrestres du Milieu Souterrain Superficiel: fonctionnement et écologie évolutive**
- Gers C (1998) **Diversity of energy fluxes and interactions between arthropod communities: from Soil to Cave**
- Giachino P, Vailati D (2010) **Subterranean Environments: Hypogean Life, Concepts and Collecting Techniques**
- Juberthie C (1983) **Le milieu souterrain: étendue et composition**. *Mémoires de biospéologie* 10:17–65
- Juberthie C, Decu V (2006) **Interstitial Habitat (terrestrial)**. In: Gunn J (ed) *Encyclopedia of caves and karst science*
- Laška V, Kopecký O, Růžička V, et al (2011) Vertical distribution of spiders in soil. *J Arachnol* 39:393–398
- Lauga-Reyrel F, Deconchat M (1999) **Diversity within the Collembola community in fragmented coppice forests in south-western France**. *Eur J Soil Biol* 35:177–187. [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(10\)70004-2](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(10)70004-2)
- Ledesma E, Jiménez-Valverde A, Baquero E, et al (2020) **Arthropod biodiversity patterns point to the Mesovoid Shallow Substratum (MSS) as a climate refugium**. *Zoology* 141:. <https://doi.org/10.1016/j.zool.2020.125771>
- Mammola S, Giachino PM, Piano E, et al (2016) **Ecology and sampling techniques of an understudied subterranean habitat: the Milieu Souterrain Superficiel (MSS)**. *Naturwissenschaften* 103:88
- Ortuño VM, Gilgado JD, Jiménez-Valverde A, et al (2013) **The “Alluvial Mesovoid Shallow Substratum”, a New Subterranean Habitat**. *PLoS One* 8:. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0076311>
- Pipan T, López H, Oromí P, et al (2011) **Temperature variation and the presence of troglobionts in terrestrial shallow subterranean habitats**. *J Nat Hist* 45:253–273. <https://doi.org/10.1080/00222933.2010.523797>
- Rendoš M, Mock A, Jászay T (2012) **Spatial and temporal dynamics of invertebrates dwelling karstic mesovoid shallow substratum of Sivec National Nature Reserve (Slovakia), with emphasis on Coleoptera**. *Biologia (Poland)* 67:1143–1151. <https://doi.org/10.2478/s11756-012-0113-y>
- Rendoš M, Raschmanová N, Kováč L, et al (2016) **Organic carbon content and temperature as substantial factors affecting diversity and vertical distribution of Collembola on forested scree slopes**. *Eur J Soil Biol* 75:180–187. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2016.06.001>

Uéno S (1980) **The anophthalmic trechine beetles of the group of *Trechiana ohshimai***. Bull Nat Sci Mus Tokio Serie A 6:195–274

Winck BR, Saccol de Sá EL, Rigotti VM, Chauvat M (2017) **Relationship between land-use types and functional diversity of epigeic Collembola in Southern Brazil**. Applied Soil Ecology 109:49–59. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.09.021>

SEGUNDA PARTE

ARTIGOS

ARTIGO 1

**A AUSÊNCIA DA VEGETAÇÃO FLORESTAL PODE AFETAR
CARACTERÍSTICAS DOS MEIOS SUBTERRÂNEOS SUPERFICIAIS E SUA
FAUNA ASSOCIADA?**

Artigo redigido conforme normas da revista Journal of Insect Conservation

RESUMO

O objetivo geral deste estudo foi caracterizar e avaliar os parâmetros físico-químicos e biológicos do meio subterrâneo superficial (MSS) no município de Pains, Minas Gerais, Brasil. Para isso, foi avaliada a influência da antropização causada por mudanças no uso do solo em parâmetros do MSS e na fauna de colêmbolos, pequenos artrópodes frequentemente encontrados em ambientes subterrâneos. Foram selecionadas seis estações de amostragem, sendo três em ambientes de fragmentos florestais com cobertura vegetal nativa e três em áreas limítrofes a áreas antropizadas com pastagens ou plantações. Foram instaladas armadilhas adaptadas de Schlik-Steiner e Steiner em diferentes profundidades do MSS. Amostras de solo foram coletadas e analisadas quanto a parâmetros físico-químicos, como porosidade, granulometria, pH, concentração de matéria orgânica e micronutrientes. Os resultados mostraram diferenças nos parâmetros físico-químicos do solo entre os ambientes conservados e antropizados, assim como ao longo do gradiente de profundidade do MSS. As análises de componentes principais revelaram efeitos dos micronutrientes do solo nos diferentes ambientes. Observou-se que os ambientes antropizados apresentaram composição de fauna distinta e menos diversa em comparação com os fragmentos florestais. A falta de cobertura vegetal nativa foi identificada como um fator preponderante para as diferenças nas assembleias de colêmbolos troglomórficos. O estudo contribui para o conhecimento sobre os ambientes subterrâneos superficiais na região neotropical, que ainda são pouco estudados. Os resultados destacam a importância da conservação da cobertura vegetal nativa e dos habitats subterrâneos para preservar a biodiversidade e a estabilidade dos ecossistemas. Além disso, os colêmbolos podem servir como potenciais bioindicadores de alterações antrópicas nos MSSs. Essa pesquisa expande o conhecimento sobre os ambientes subterrâneos e fornece informações relevantes para a conservação e manejo desses ecossistemas. No entanto, são necessários mais estudos para compreender melhor as características e os processos que influenciam as comunidades associadas aos habitats subterrâneos na região neotropical.

Palavras-chave: Habitats subterrâneos superficiais. Áreas antropizadas. Diversidade de colêmbolos.

ABSTRACT

The overall aim of this study was to characterize and assess the physicochemical and biological parameters of the Mesovoid Shallow Subterranean (MSS) in the municipality of Pains, Minas Gerais, Brazil. To achieve this, the influence of anthropization caused by changes in land use on MSS parameters and the collembolan fauna, small arthropods frequently found in subterranean environments, was evaluated. Six sampling stations were selected, three in forest fragment environments with native vegetation cover and three in areas adjacent to anthropized areas with pastures or plantations. Schlik-Steiner and Steiner traps were installed at different depths of the MSS. Soil samples were collected and analyzed for physicochemical parameters such as porosity, particle size distribution, pH, organic matter concentration, and micronutrients. The results showed differences in soil physicochemical parameters between preserved and anthropized environments, as well as along the depth gradient of the MSS. Principal component analyses revealed the effects of soil micronutrients in different environments. It was observed that anthropized environments exhibited distinct and less diverse fauna composition compared to forest fragments. The absence of native vegetation cover was identified as a predominant factor in the differences in troglomorphic collembolan assemblages. The study contributes to the knowledge of subterranean surface habitats in the neotropical region, which are still poorly studied. The results highlight the importance of conserving native vegetation cover and subterranean habitats to preserve biodiversity and ecosystem stability. Additionally, collembolans can serve as potential bioindicators of anthropogenic changes in MSS. This research expands understanding of subterranean habitats and provides relevant information for the conservation and management of these ecosystems. However, further studies are needed to better understand the characteristics and processes that influence the communities associated with subterranean habitats in the neotropical region.

Keywords: Subterranean Superficial Habitats. Anthropized areas. Collembola diversity.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por recursos, aliada a práticas não sustentáveis de uso do solo, tem sido responsável por mudanças na paisagem ao redor de todo o mundo, de modo que áreas cobertas por vegetação nativa vêm sendo substituídas por pastagens e extensivas monoculturas, entre outras atividades antrópicas que reduzem a heterogeneidade dos habitats naturais (Grecchi et al. 2014; Winck et al. 2017). É conhecido que a redução destas áreas tem efeito negativo direto sobre a biodiversidade, impactando em parâmetros da comunidade como riqueza de espécies, abundância das populações, distribuição e diversidade genética (Fahrig 2003). Neste contexto, ambientes subterrâneos podem ser utilizados como bons modelos para avaliar a influência que a paisagem tem na biodiversidade, uma vez que as comunidades que habitam estes ambientes dependem do aporte trófico que advém, em grande parte, do meio externo (Pellegrini et al. 2016).

Existem diversas categorias de ambientes subterrâneos, e dentre elas estão os habitats subterrâneos superficiais (HSS), que podem incluir: tubos de lava, serrapilheira, epicarste (espaços na superfície de rochas carbonáticas preenchidos por água) e o meio subterrâneo superficial (MSS) (Mammola et al. 2016). Tais habitats foram descritos por Juberthie (2000) como um ecótono entre o subterrâneo e a superfície, situados no contato dos horizontes profundos do solo e a rocha matriz. Tal ambiente, quando comparado com meio epígeo, compartilha características com as cavernas, tais como a ausência de luz, o baixo *input* energético e a relativa estabilidade climática, além de possuir também fauna estritamente subterrânea associada (Pipan et al. 2011). Diversos estudos mostram que o MSS pode possuir diferentes formações e características (Culver and Pipan 2009; Ortuño et al. 2013; Mammola et al. 2016; Zeppelini et al. 2022). O tipo mais comum denomina-se *rocha matriz*, onde a erosão da rocha resulta em uma camada de solo próxima da superfície e clastos maiores nas regiões profundas, formando espaços heterogêneos habitados principalmente por invertebrados (Culver and Pipan 2009; Pipan et al. 2011; Mammola et al. 2016). Esses ambientes podem então servir como refúgio e um meio de conexão subterrâneo para a fauna, ou até mesmo ser o habitat preferencial para muitas espécies (Laška et al. 2011; Pipan et al. 2011; Rendoš et al. 2012; Růžička and Dolanský 2016; Mammola et al. 2016; Ledesma et al. 2020).

Dentre os artrópodes encontrados em habitats subterrâneos, os colêmbolos estão entre os grupos com maior diversidade e abundância (Gers 1998). Existem diversos estudos que apontam que tais organismos são sensíveis e respondem rapidamente a mudanças no tipo de uso e cobertura do solo (Gers 1998; Chauvat et al. 2003, 2007; Winck et al. 2017; Menezes-

Oliveira et al. 2021), podendo ser utilizados como bioindicadores quanto a alterações antrópicas em superfície.

Os estudos existentes sobre MSS concentram-se na Europa e Japão, entretanto há trabalhos na Austrália, China, Israel, Rússia, Turquia, Taiwan, Estados Unidos e Nova Zelândia (Mammola et al. 2016). Atualmente, fora de regiões temperadas, os poucos estudos sobre esses ambientes tratam majoritariamente sobre descrições taxonômicas de novas espécies (Brescovit et al. 2022; Zeppelini et al. 2022). Pouco se sabe sobre características destes ambientes ou quais parâmetros ambientais influenciam as comunidades associadas na região neotropical (Pipan et al. 2011).

Nessa perspectiva, o presente estudo tem como objetivo caracterizar o MSS quanto a parâmetros físico-químicos e biológicos, assim como avaliar se a antropização causada por mudanças no uso do solo exerce influência sobre estes parâmetros. De forma específica, avaliou-se: i) os parâmetros físico-químicos do solo em ambientes conservados e antropizados, assim como ao longo do gradiente de profundidade do MSS; ii) a influência dos parâmetros do solo sobre a fauna de colêmbolos conforme usos do solo e profundidade; e iii) dentre os parâmetros avaliados, qual é o de maior influência para a fauna estritamente subterrânea. Espera-se que ambientes antropizados apresentem valores de parâmetros físico-químicos distintos dos fragmentos florestais, devido à falta de cobertura vegetal nativa. Regiões profundas serão distintas de superficiais nestes mesmos parâmetros. O que será refletido no comportamento da fauna, de modo que ambientes antropizados apresentarão composição distinta e menos diversa quando comparados com fragmentos florestais. A ausência da cobertura vegetal nativa será preponderante para dissimilaridades entre assembleias de colêmbolos troglomórficos do estudo.

METODOLOGIA

Área de Estudo

A área de estudo localiza-se no município de Pains (20° 22' 14" S; 45° 39' 41" W), Minas Gerais, Brasil (Figura 1). A região é caracterizada pela ocorrência de rochas carbonáticas e silto-argilosas, e apresenta paisagem constituída de maciços isolados, relevo aplainado com presença de dolinas, uvalas, sumidouros e surgências (Zampaulo 2010). Até o momento, foram cadastradas na base de dados do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) mais de 1600 cavernas no município, valor que representa aproximadamente 7% das cavidades encontradas no País (CECAV 2022). Quanto à fitofisionomia, apresenta predomínio de florestas estacionais semidecíduas e decíduas nas regiões de afloramentos calcáreos, dada a

transição entre os biomas Cerrado e Mata Atlântica (Melo et al. 2013). Possui clima definido como *Cwa* na classificação de Köppen (Kottek et al. 2006), com temperatura média e precipitação anual em 23°C e 1372 mm, respectivamente (Kottek et al. 2006). A região apresenta histórico de atividades agropecuárias e minerárias, o que resultou em uma paisagem fragmentada com elevado índice de desmatamento (Menegasse et al. 2002).

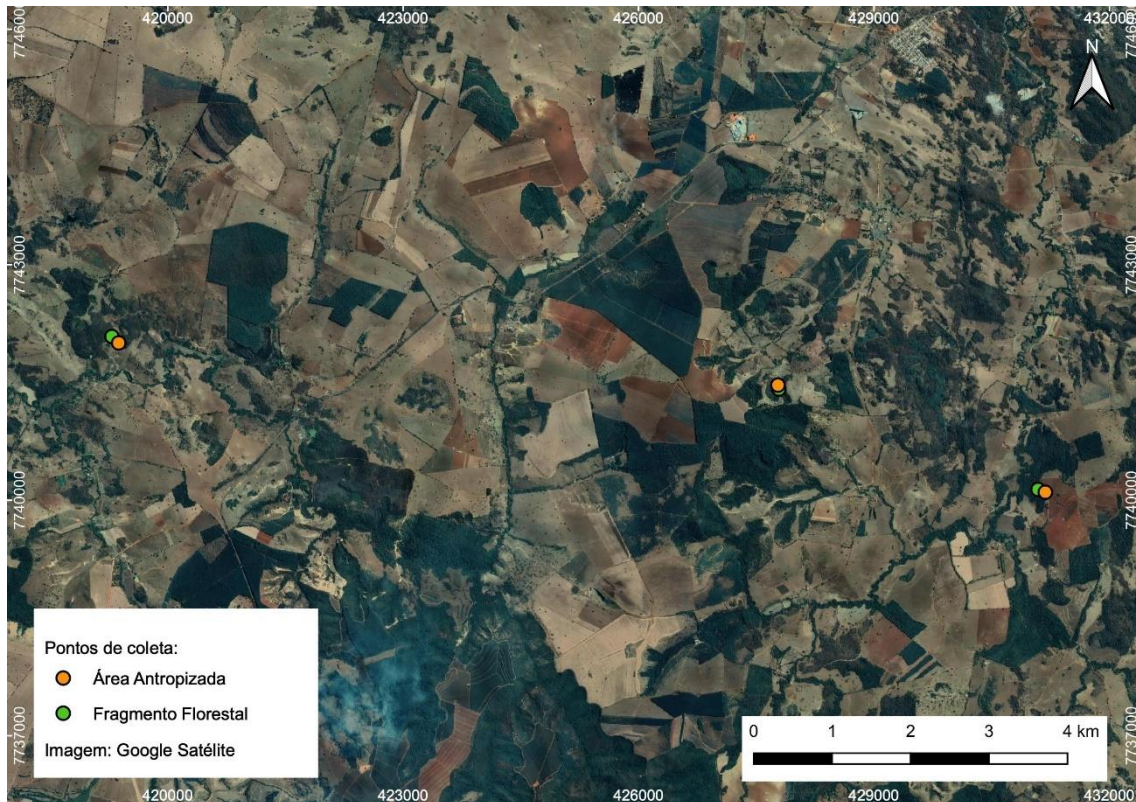


Figura 1: Localização das estações de amostragem conforme tipo de uso do solo na região do estudo, município de Pains/MG.

Desenho amostral

Para avaliar a influência da cobertura vegetal sobre a assembleia de colêmbolos no habitat subterrâneo superficial foram utilizadas seis estações de amostragem, sendo três em ambientes de fragmentos florestais (FF) com cobertura vegetal nativa, e três em ambientes limítrofes a áreas antropizadas com pastagens e/ou plantações (AA). Cada estação de amostragem compreende trincheiras com 1,5 m (comprimento) x 0,5 m (largura) x 1,10 m (profundidade). Em cada trincheira, três conjuntos de armadilhas foram instalados, totalizando deste modo 18 armadilhas utilizadas no estudo. Cada conjunto compreende de armadilhas adaptadas de Schlik-Steiner and Steiner (2000), elaboradas em cilindro de PVC (110 cm, Ø 10 cm) com furos (Ø 8mm) intercalados a cada 10 cm para acesso da fauna. Internamente uma série de 10 recipientes cônicos (12 cm, Ø 10 cm), conectados por um eixo metálico central, composto por varões roscados e porcas, possibilita a amostragem da fauna residente e transiente

em profundidades distintas do MSS (5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85 e 95cm) (Figura 2). Solução de formaldeído a 4% foi utilizada para preservação dos invertebrados coletados, gotas de detergente foram adicionadas para quebrar a tensão superficial e fazer com que os espécimes coletados afundassem, deste modo evitando perda de material por possíveis derramamentos.

Durante a escavação, cada estrato do solo foi reservado em uma lona plástica de modo que o perfil estratigráfico fosse conservado para posteriormente ser devolvido na mesma ordem para a trincheira. Porções do solo foram retiradas, embaladas em plástico filme, embebidas em parafina, e enviadas para o Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, para realização das análises de porosidade (volume total de poros, macro e micro porosidade), granulometria (concentração de areia, silte e argila), pH, concentração de matéria orgânica e concentração de micronutrientes do solo (N, K, P, Ca, Mg, Al e Fósforo remanescente). *Data loggers* (Thermodata iButton DS 1921G#F50 Maxim Dallas, USA) foram fixados nos recipientes em seis profundidades distintas (5, 15, 35, 55, 75 e 95cm), para mensurar continuamente a temperatura em intervalos de 4 horas (Rendoš et al. 2016).

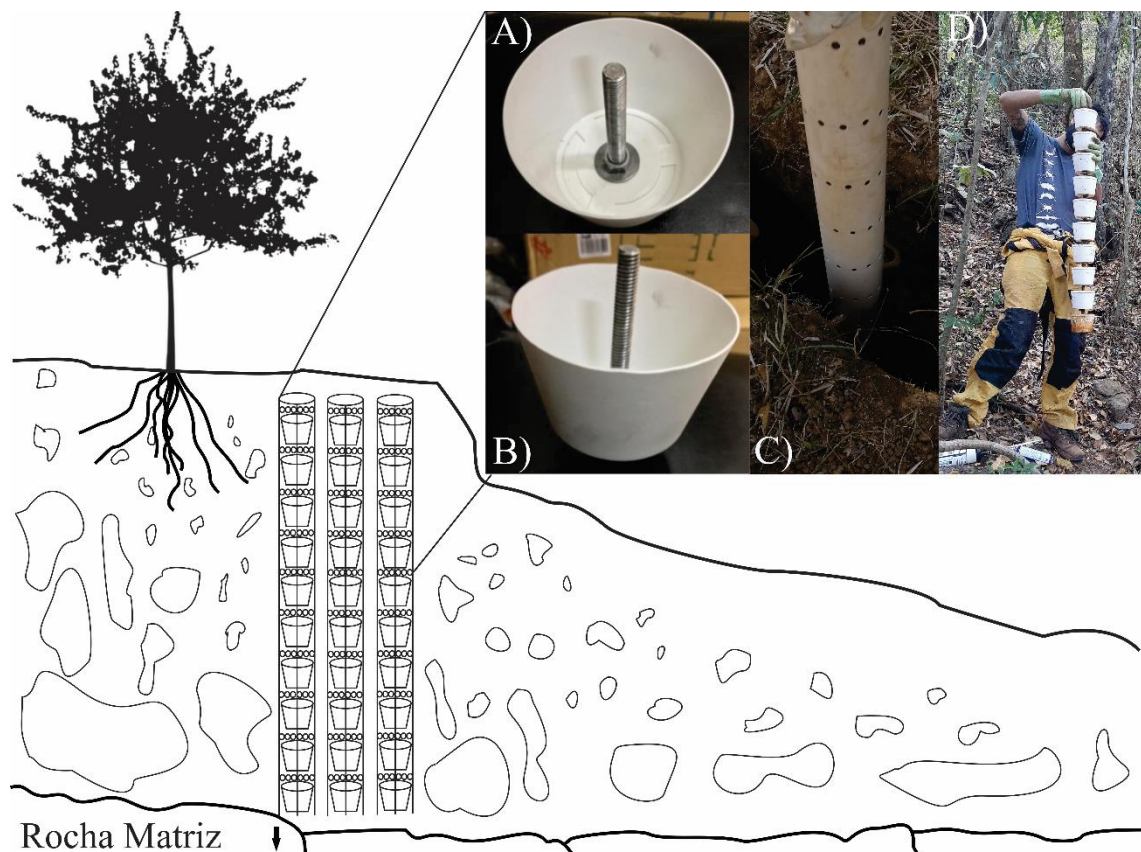


Figura 2: Esquema ilustrando uma estação amostral no MSS. Copos de amostragem (A), vergalhão roscado de conexão (B), cano PVC com furos para entrada da fauna (C) e série de copos de amostragem (D) conectados, são inseridos no cano de PVC de modo que a borda de cada copo esteja nivelada com a linha de furos.

As coletas foram iniciadas 2 meses após a instalação das armadilhas, no intuito de evitar viés amostral pelo revolvimento do solo. As estações de amostragem foram visitadas mensalmente entre agosto/2020 a agosto/2021 para retirada das amostras. Em cada coleta, as amostras eram inseridas em potes plásticos e transportadas ao Centro de Biologia Subterrânea da Universidade Federal de Lavras (CEBS-UFLA) para triagem. Os colêmbolos foram então morfotipados (Oliver et al. 1996) e encaminhados a especialista (Dr. Bruno Cavalcante Bellini, na Universidade Federal do Rio Grande do Norte) para identificação em menor nível taxonômico possível. A presença de características troglomórficas foi utilizada para considerar uma espécie como troglóbia (Howarth and Moldovan 2018). Tais características (ex. redução ou ausência ocular, dentição do *unguis*) foram distinguidas e validadas pelo especialista responsável pela identificação das espécies. Os exemplares amostrados foram fixados em álcool 70% e depositados na Coleção de Invertebrados Subterrâneos de Lavras (ISLA-UFLA) e na Coleção de Collembola do Centro de Biociências da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (CC-UFRN).

Análise de dados

Para avaliar a estabilidade térmica durante o período do estudo, foi utilizada a média anual e desvio padrão dos valores de temperatura dos estratos medidos de cada ponto (05, 15, 35, 55, 75, 95cm). Com intuito de definir as variáveis preditoras ambientais utilizadas no estudo, foi realizada no software R Studio (RStudio Team 2022) a correlação de Spearman e consideradas independentes aquelas com $\rho < 0.700$ (Figura suplementar A1). Para caracterizar os diferentes ambientes e profundidades do MSS quanto aos parâmetros físico-químicos do solo, foi realizado um modelo linear misto e generalizado (GLMM) no software RStudio, utilizando a função *glmer* do pacote *lme4* (Bates et al. 2014) sendo os pontos de amostragem fixados como variável aleatória. Para sumarizar os efeitos dos micronutrientes do solo, foi realizada uma análise de componentes principais (PCA), de modo que os eixos (MDS1 e MDS2) foram utilizados como um *proxy* dos efeitos destes elementos. Com o intuito de verificar se este parâmetro apresenta diferença entre os ambientes antropizados e fragmentos florestais, foi realizada análise de variância (one-way ANOVA). Ambas as análises foram realizadas no software RStudio.

Para avaliar se a riqueza geral e de colêmbolos troglomórficos é influenciada pelo tipo de ambiente e pelo gradiente de profundidade, foi realizado GLMM utilizando os pontos de amostragem fixados como variável aleatória. Já para avaliar a influência destes habitats na composição geral e de troglomórficos, foi realizado PERMANOVA no software PRIMER 6,

com 999 permutações e índice de dissimilaridade de Bray Curtis (Anderson et al. 2008). Com intuito de verificar quais variáveis físico-químicas influenciam nos parâmetros da assembleia, foi feito GLMM utilizando os pontos de amostragem como variável aleatória. A composição geral de espécies e de troglomórficos foram comparadas entre as estações de amostragem através da Análise de Coordenadas Principais (PCoA), empregando índice de dissimilaridade de Bray-Curtis. Para modelos subsequentes, os dois primeiros eixos do PCoA (MDS1 e MDS2) foram considerados *proxies* da composição de espécies e de troglomórficos, sendo aplicados como variáveis de resposta (Figura 2, Apêndice A1). Para verificar similaridade entre os diferentes estratos do solo quanto a parâmetros biológicos e físico-químicos, foi realizada análise de contraste utilizando o pacote “*emmeans*” e ajuste Tukey, no software RStudio. Para verificar qual entres os preditores avaliados exerce maior influência na composição de espécies troglomórficas, foi avaliado o valor de r^2 ajustado obtido com modelo linear baseado em distância (DistLM), utilizando índice de dissimilaridade de Bray Curtis e método “*Forward step-wise*” no PRIMER 6 (Anderson et al. 2008).

RESULTADOS

Caracterização do MSS

Dentre os parâmetros físico-químicos avaliados, apenas a temperatura média anual apresenta diferença significativa entre os diferentes ambientes, tendo valores mais elevados em áreas antropizadas (Figura 3A). Os demais parâmetros avaliados não diferem em função do uso do solo ($p > 0.05$).

Dentre as 18 variáveis preditoras mensuradas (Tabela 1 – Apêndice A3), 14 foram selecionadas para os modelos lineares generalizados mistos (GLMM), por não apresentarem autocorrelação, sendo: profundidade, temperatura média anual, desvio padrão da temperatura, pH, volume total de poros e micro porosidade do solo, concentração de matéria orgânica e de micronutrientes (N, P, Ca, Mg, Al) assim como a porcentagem de areia e argila do solo (Figura 1 – Apêndice A1). Apesar da forte e negativa correlação entre profundidade e concentração de matéria orgânica do solo ($r = -0,76$), optou-se por manter ambos os parâmetros. Enquanto a concentração de matéria orgânica é um proxy para quantidade de recurso alimentar disponível para a fauna de colêmbolos, o gradiente de profundidade pode representar uma barreira física a estes organismos (Culver and Pipan 2009).

Com relação às profundidades, os estratos profundos (55 – 95 cm) são termicamente mais estáveis do que aqueles superficiais (5 – 15cm), apresentando menor desvio padrão da temperatura ao longo do ano (Figura 3B). Entretanto, estratos superficiais apresentam maior

disponibilidade de matéria orgânica e microporos quando comparados aos demais (Figura 3, C - D). Já quanto à granulometria do solo, enquanto o percentual de areia reduz em estratos profundos, aumenta-se a presença de argila (Figura 3, E e F). Ainda, os micronutrientes do solo concentram-se em superfície (5 – 25 cm), principalmente nitrogênio e magnésio (Figura 4), diferindo significativamente entre os estratos avaliados ($F = 9.120$, $p = 0.004$).

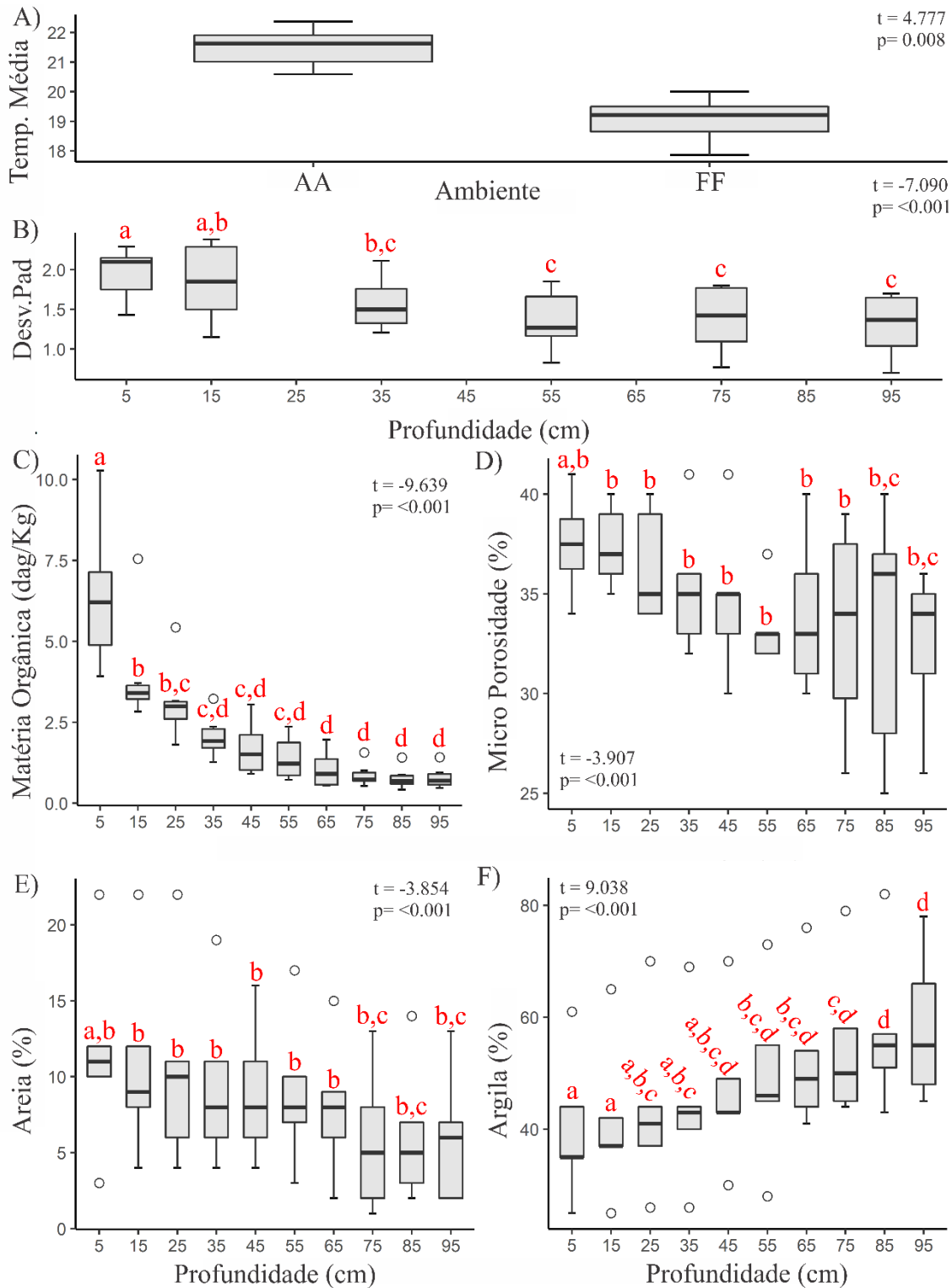


Figura 3: A) Temperatura média anual em ambientes antropizados (AA) e fragmentos florestais (FF). B) Desvio Padrão da temperatura ao longo do gradiente de profundidade. C) Concentração de matéria orgânica no solo ao longo do gradiente de profundidade. D) Porcentagem de micro poros do solo ao longo do gradiente de profundidade. E) Porcentagem de areia do solo ao longo do gradiente de profundidade. F) Porcentagem de argila do solo ao longo do gradiente de profundidade. Letras em vermelho representam a similaridade entre os grupos formados pela análise de contraste utilizando teste Tukey.

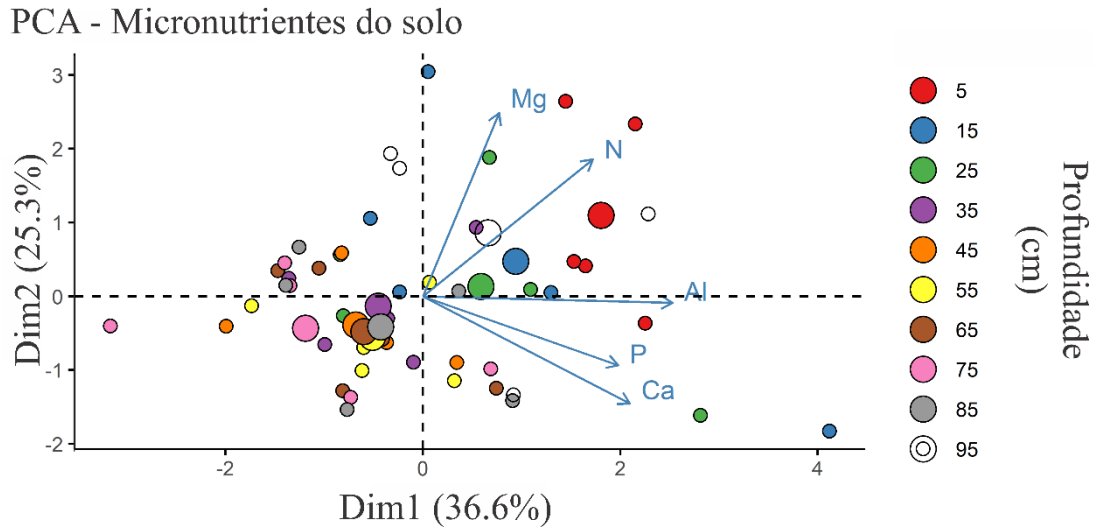


Figura 4: Biplot dos micronutrientes do solo ao longo do gradiente de profundidade.

Diversidade de colêmbolos

Foram amostrados 30.071 indivíduos de colêmbolos pertencentes a três ordens, 11 famílias e 45 morfoespécies (Tabela 2 suplementar A4). Destas morfoespécies, 10 foram consideradas troglóbias. A riqueza de espécies e de troglomórficos permanecem similares entre os distintos usos do solo avaliados ($p > 0.05$). Ainda, não há diferenças significativas no número de troglomórficos conforme a profundidade amostrada ($p > 0.05$). Entretanto, a riqueza de espécies é influenciada pela profundidade, sendo elevada próximo à superfície (5 cm) e similar entre os demais estratos (Figura 5A).

Quanto à composição, espécies distintas de colêmbolos foram amostradas conforme tipo de ambiente (Figura 5B) e profundidade (Tabela 1). De forma específica, a composição de espécies em superfície (5cm) difere daquela amostrada nos estratos medianos e profundos (Tabela 1). Em relação aos troglomórficos, fragmentos florestais abrigam espécies subterrâneas distintas daquelas que ocorrem em locais antropizadas (Figura 5C).

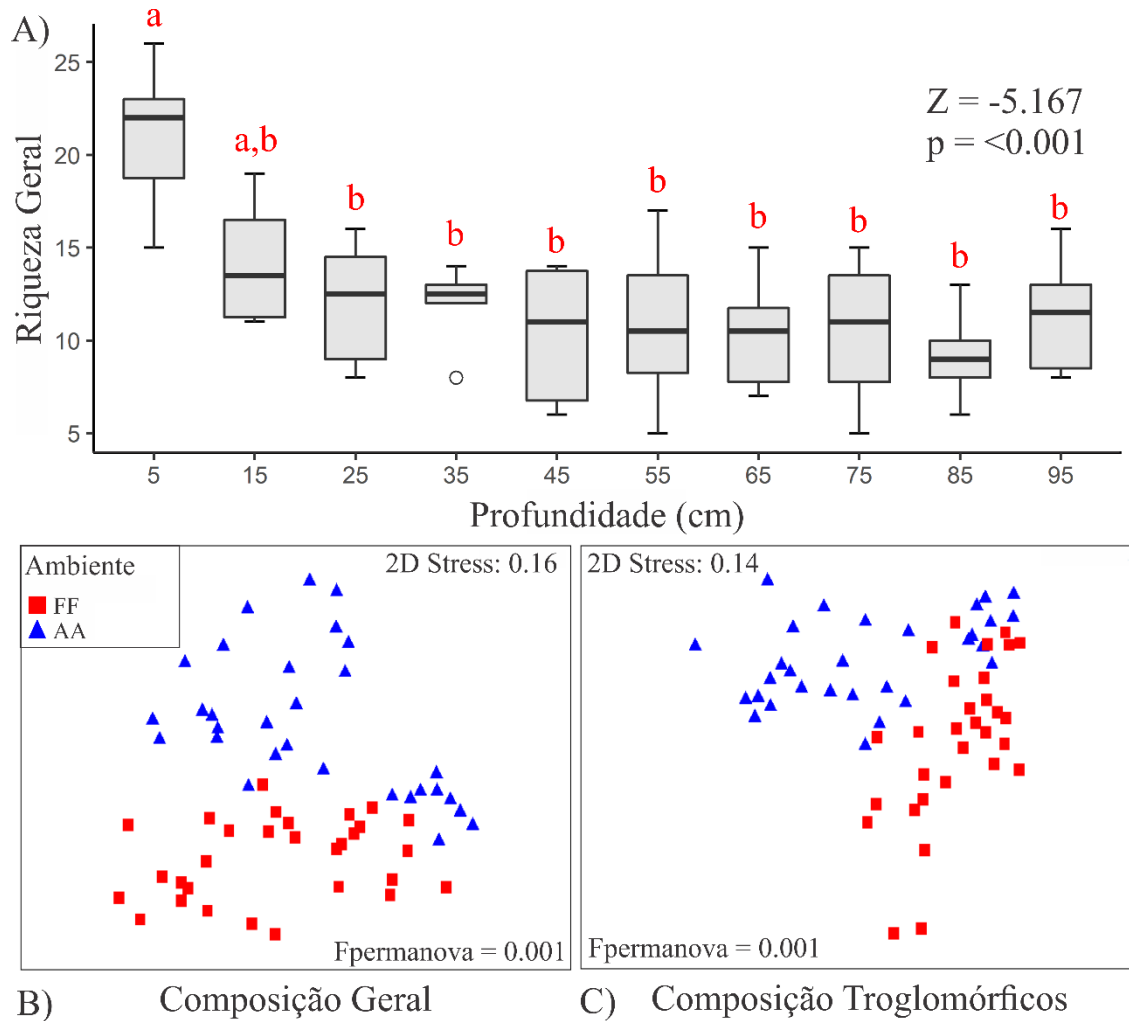


Figure 5: A) Boxplot da riqueza geral de colêmbolos entre as diferentes profundidades (letras em vermelho representam a similaridade entre os grupos). B) Diferença na composição geral de colêmbolos em fragmentos florestais (FF) e ambientes antropizados (AA). C) Diferença na composição de colêmbolos troglomórficos em fragmentos florestais (FF) e ambientes antropizados (AA).

Tabela 1: Valores da PERMANOVA que representam a diferença significativa da comunidade geral de colêmbolos nas diferentes profundidades.

Profundidade (cm)	t	F _{PERMANOVA}
5, 45	1.732	0.031
5, 55	2.140	0.011
5, 65	1.732	0.028
5, 75	1.872	0.017
5, 85	1.822	0.020
5, 95	2.096	0.002

Modelos sobre a estruturação da comunidade

A riqueza de espécies de colêmbolos foi influenciada positivamente pelas concentrações de matéria orgânica nos pontos (Tabela 2). Já a presença de troglomórficos depende do aumento do pH no solo. A composição de espécies altera conforme profundidade, disponibilidade de micronutrientes, porcentagem de areia e micro porosidade dos locais amostrados. A composição distinta de espécies troglomórficas entre as unidades amostrais resulta de diferenças quanto a temperatura média anual, micro porosidade, disponibilidade de matéria orgânica e o tipo de uso do solo.

Tabela 2: Valores significativos do GLMM entre parâmetros biológicos e parâmetros físico-químicos avaliados

Variável Resposta	Método	Variáveis Preditoras	Erro Padrão	t/z	p
Riqueza Geral de colêmbolos	GLMM	Intercept	0.478	0.463	4.091
		Matéria Orgânica	0.732	0.070	<0.001*
Riqueza de troglomórficos	GLMM	Intercept	0.634	-0.804	0.421
		pH	0.093	3.195	0.001***
Composição Geral (Bray)	MDS1	Intercept	0.256	-2.593	0.036 *
		Profundidade	0.001	6.138	<0.001*
	LME	Micronutrientes solo	0.031	-3.500	0.001**
		Areia (%)	0.009	2.807	0.007***
	MDS2	Intercept	0.328	3.112	0.005 **
		Micro porosidade	0.007	-3.144	0.003 **
Composição de Troglomórficos (Bray)	MDS1	Intercept	1.608	2.955	0.006***
		Temp. Média	0.070	-2.314	0.029
		Micro porosidade	0.014	-2.125	0.045*
	LME	Matéria Orgânica	0.028	-3.774	0.001**
		Intercept	0.304	-1.812	0.102
		MDS2	Desv. Padrão Temp	0.142	5.229
		Tipo de Ambiente	0.346	-3.298	0.026*

Por fim, o tipo de ambiente é o principal fator para ocorrência de troglomórficos distintos entre as unidades amostrais (Tabela 3). Ou seja, o uso alternativo do solo para agropecuária promove mudanças na fauna troglomórfica presente no MSS. De forma complementar, a disponibilidade de matéria orgânica, temperatura (desvio padrão e média) e microporosidade do solo contribuem para alterações na composição de troglóbios entre as unidades amostrais.

Tabela 3: Valores de explicação dos parâmetros ambientais sobre a comunidade de colêmbolos troglomórficos.

Parâmetros Ambientais	r^2		p
	Ajustado (cumulativo)	PseudoF	
Tipo de Ambiente	0.225	9.162	0.001
Matéria Orgânica	0.334	5.397	0.005
Desvio Padrão Temperatura (σ °C)	0.439	5.896	0.002
Temperatura Média Anual (°C)	0.488	3.396	0.046
Micro porosidade	0.493	1.207	0.312

DISCUSSÃO

Diferentemente do esperado, os parâmetros físico-químicos do solo, com exceção da temperatura, não exibiram diferenças significativas entre os ambientes antropizados e fragmentos florestais, assim como a riqueza destes ambientes apresentou diversidade similar. No entanto, a composição de colêmbolos do MSS foi distinta entre os ambientes estudados, sendo este o parâmetro mais relevante para a fauna troglomórfica. Conforme esperado, os parâmetros físico-químicos e biológicos foram distintos entre as profundidades do MSS.

O aumento significativo da porcentagem de argila com o gradiente de profundidade pode ser explicado devido ao fato de partículas mais finas serem mais facilmente carregadas até maiores profundidades, principalmente pela ação da água, assim como regiões do solo mais próximas da rocha mãe comumente são erodidas mais lentamente, formando assim sedimentos mais finos como a argila (Gipson 1966).

Em contrapartida, os parâmetros de matéria orgânica, micronutrientes, micro porosidade e porcentagem de areia foram significativamente mais elevados em estratos mais superficiais do MSS. O que pode ser explicado tanto pelo fato de que grande parte do aporte orgânico desses ambientes advém da decomposição de matéria orgânica vegetal da superfície, quanto pelo fato do horizonte B do solo servir como uma espécie de filtro para partículas minerais e orgânicas (Gers 1998; Rendoš et al. 2016; Ledesma et al. 2020).

Deste modo, estes estratos superficiais com maior quantidade de recursos tróficos podem abrigar maior diversidade de invertebrados, o que explica a maior riqueza geral de colêmbolos encontrada, assim como a distinta composição de espécies entre as regiões mais

superficiais e profundas. Adicionalmente, a presença e interação da fauna com a matéria orgânica nestes estratos pode influenciar a quantidade de poros do solo, uma vez que este parâmetro se relaciona com a decomposição da matéria orgânica e formação do humus (Gers 1998; Kay and Vandenbygaart 2002; Ponge et al. 2002; Esmailzadeh and Ahangar 2014; Salmon et al. 2014; Rendoš et al. 2016).

Grande parte dos parâmetros físico-químicos avaliados não apresentou diferenças conforme o tipo de ambiente. No entanto, os resultados deste estudo demonstram que a presença da vegetação nativa tem influência para a conservação da fauna do MSS, sobretudo a troglomórfica, uma vez que tanto a composição geral quanto de troglomórficos foram distintas entre os ambientes analisados. Além disso, as médias de temperatura do MSS nos ambientes antropizados foram superiores, o que pode ser explicado pela maior insolação que estes recebem, de modo que a temperatura, principalmente dos estratos mais superficiais, seja mais elevada em comparação com a de áreas que são sombreadas pelo dossel arbóreo (Winck et al. 2017).

Nesse contexto, a composição de colêmbolos troglomórficos foi o único dentre os parâmetros biológicos analisados que teve influência da temperatura média anual, do desvio padrão destes valores e do tipo de ambiente. Aliado ao resultado que dentre os parâmetros ambientais avaliados, o tipo de cobertura vegetal do solo foi o que apresentou maior influência para a composição destes indivíduos. É possível inferir que a presença da vegetação, e sua influência nos parâmetros de temperatura, é relevante para a manutenção de ambientes favoráveis à presença de espécies troglóbias, uma vez que estudos mostram que estes organismos são mais sensíveis a significantes variações na temperatura (Novak et al. 2014; Raschmanová et al. 2018; Mammola et al. 2019). Assim, ambientes mais antropizados geralmente são habitados por espécies generalistas, enquanto ambientes com melhores índices de conservação permitem também a presença de espécies mais sensíveis, como as troglóbias (Lauga-Reyrel and Deconchat 1999; Chauvat et al. 2003, 2007; Winck et al. 2017).

O atual cenário de perda da biodiversidade tem como principais causas os elevados índices de desmatamento, para ampliação de áreas destinadas a agricultura e pecuária, e o aumento das temperaturas ao redor do globo causado por grandes emissões de dióxido de carbono (Harvey et al. 2020; Ledesma et al. 2020). Assim, é de grande relevância para a manutenção da biodiversidade subterrânea, sobretudo a troglomórfica, que a vegetação nativa de áreas cársticas seja conservada. Isso é reforçado pelos resultados deste estudo, que mostram a importância que esta vegetação pode ter para a manutenção de características dos meios subterrâneos superficiais. Ademais, tais ambientes possuem potencial importância como abrigo

e refúgio para a fauna em situações climáticas extremas (Pipan et al. 2011; Mammola et al. 2016, 2019; Ledesma et al. 2020).

REFERÊNCIAS

- Anderson M, Gorley, Ray N, Clarke RK (2008) **Permanova+ for primer: Guide to software and statistical methods**. Primer-E Limited
- Bates D, Mächler M, Bolker BM, Walker SC (2014) **Fitting Linear Mixed-Effects Models using lme4**. J Stat Softw 67:. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1406.5823>
- Brescovit A, Zampaulo R, Cizauks I, Pedroso L (2022) **Three new subterranean species of the genus Speocera (Araneae, Ochyroceratidae) from caves of the Carajás area in the state of Pará, Brazil**
- CECAV (2022) **ICMBio - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas - CECav**. https://www.icmbio.gov.br/cecav/index.php?option=com_icmbio_canie&controller=relatorioestatistico&itemPesq=true. Accessed 22 Sep 2022
- Chauvat M, Wolters V, Dauber J (2007) **Response of collembolan communities to land-use change and grassland succession**. Ecography 30:183–192. <https://doi.org/10.1111/j.2007.0906-7590.04888.x>
- Chauvat M, Zaitsev AS, Wolters V (2003) **Successional changes of Collembola and soil microbiota during forest rotation**. Oecologia 137:269–276. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1310-8>
- Culver DC, Pipan T (2009) **The Biology of Caves and Other Subterranean Habitats**
- Esmaeilzadeh J, Ahangar AG (2014) **INFLUENCE OF SOIL ORGANIC MATTER CONTENT ON SOIL PHYSICAL, CHEMICAL AND BIOLOGICAL PROPERTIES**
- Fahrig L (2003) **Effects of Habitat Fragmentation on Biodiversity**. Annu Rev Ecol Evol Syst 34:487–515
- Gers C (1998) **Diversity of energy fluxes and interactions between arthropod communities: from Soil to Cave**
- Gipson M (1966) **A Study of the Relations of Depth, Porosity and Clay Mineral Orientation in Pennsylvanian Shales**
- Grecchi R, Gwyn Q, Bénié G, et al (2014) **Land use and land cover changes in the Brazilian Cerrado: A multidisciplinary approach to assess the impacts of agricultural expansion**. Elsevier 300–312
- Harvey JA, Heinen R, Armbrecht I, et al (2020) **International scientists formulate a roadmap for insect conservation and recovery**. Nat Ecol Evol 4:174–176
- Howarth FG, Moldovan OT (2018) **The Ecological Classification of Cave Animals and Their Adaptations**. 41–67. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98852-8_4
- Kay BD, Vandenbygaart AJ (2002) **Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter**

- Kottek M, Grieser J, Beck C, et al (2006) **World map of the Köppen-Geiger climate classification updated**. Meteorologische Zeitschrift 15:259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Laška V, Kopecký O, Růžička V, et al (2011) **Vertical distribution of spiders in soil**. J Arachnol 39:393–398
- Lauga-Reyrel F, Deconchat M (1999) **Diversity within the Collembola community in fragmented coppice forests in south-western France**. Eur J Soil Biol 35:177–187. [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(10\)70004-2](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(10)70004-2)
- Ledesma E, Jiménez-Valverde A, Baquero E, et al (2020) **Arthropod biodiversity patterns point to the Mesovoid Shallow Substratum (MSS) as a climate refugium**. Zoology 141:1. <https://doi.org/10.1016/j.zool.2020.125771>
- Mammola S, Cardoso P, Culver DC, et al (2019) **Scientists' Warning on the Conservation of Subterranean Ecosystems**. Bioscience 69:641–650. <https://doi.org/10.1093/BIOSCI/BIZ064>
- Mammola S, Giachino PM, Piano E, et al (2016) **Ecology and sampling techniques of an understudied subterranean habitat: the Milieu Souterrain Superficiel (MSS)**. Naturwissenschaften 103:88
- Melo PHA, Lombardi JA, Salino A, Carvalho DA (2013) **Composição florística de angiospermas no carste do Alto São Francisco**. Rodriguésia 64:29–36
- Menegasse LN, Jomir J, Gonçalves M, et al (2002) **DISPONIBILIDADES HÍDRICAS NA PROVÍNCIA CÁRSTICA DE ARCOS-PAINS-DORESÓPOLIS, ALTO SÃO FRANCISCO, MINAS GERAIS, BRASIL**
- Menezes-Oliveira VB, Bianchi MO, Espíndola ELG (2021) **Changes in soil mesofauna structure due to different land use systems in south Minas Gerais, Brazil**. Environ Monit Assess 193:1. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09214-8>
- Novak T, Šajna N, Antolinc E, et al (2014) **Cold tolerance in terrestrial invertebrates inhabiting subterranean habitats**. Int J Speleol 43:265–272. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.43.3.3>
- Oliver I, Beattie AJ, Beattie OB (1996) **Invertebrate Morphospecies as Surrogates for Species: A Case Study Morphospecies as Surrogates for Species**
- Ortuño VM, Gilgado JD, Jiménez-Valverde A, et al (2013) **The “Alluvial Mesovoid Shallow Substratum”, a New Subterranean Habitat**. PLoS One 8:1. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0076311>
- Pellegrini TG, Sales LP, Aguiar P, Ferreira RL (2016) **Linking spatial scale dependence of land-use descriptors and invertebrate cave community composition**. Subterr Biol 18:17–38
- Pipan T, López H, Oromí P, et al (2011) **Temperature variation and the presence of troglobionts in terrestrial shallow subterranean habitats**. J Nat Hist 45:253–273. <https://doi.org/10.1080/00222933.2010.523797>
- Ponge J-F, Chevalier R, Loussot P (2002) **Humus Index**. Soil Science Society of America Journal 66:1996–2001. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2002.1996>

Raschmanová N, Šustr V, Kováč L, et al (2018) **Testing the climatic variability hypothesis in edaphic and subterranean Collembola (Hexapoda)**. *J Therm Biol* 78:391–400. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.11.004>

Rendoš M, Mock A, Jászay T (2012) **Spatial and temporal dynamics of invertebrates dwelling karstic mesovoid shallow substratum of Sivec National Nature Reserve (Slovakia), with emphasis on Coleoptera**. *Biologia (Poland)* 67:1143–1151. <https://doi.org/10.2478/s11756-012-0113-y>

Rendoš M, Raschmanová N, Kováč L, et al (2016) **Organic carbon content and temperature as substantial factors affecting diversity and vertical distribution of Collembola on forested scree slopes**. *Eur J Soil Biol* 75:180–187. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2016.06.001>

RStudio Team (2022) **RStudio: Integrated Development Environment for R**

Růžička V, Dolanský J (2016) **Catching of spiders in shallow subterranean habitats in the Czech Republic**. *Arachnol Mitt* 2016:43–48. <https://doi.org/10.5431/aramit5106>

Salmon S, Ponge JF, Gachet S, et al (2014) **Linking species, traits and habitat characteristics of Collembola at European scale**. *Soil Biol Biochem* 75:73–85. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.04.002>

Schlik-Steiner, Steiner (2000) **Schlik-Steiner&Steiner2000_subteranne.pasce. Eine neue Subterrannfalle und Fänge aus Kärnten 475–482**

Winck BR, Saccol de Sá EL, Rigotti VM, Chauvat M (2017) **Relationship between land-use types and functional diversity of epigeic Collembola in Southern Brazil**. *Applied Soil Ecology* 109:49–59. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.09.021>

Zampaulo R (2010) **DIVERSIDADE DE INVERTEBRADOS CAVERNÍCOLAS NA PROVÍNCIA ESPELEOLÓGICA DE ARCOS, PAINS E DORESÓPOLIS (MG): SUBSÍDIOS PARA A DETERMINAÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA CONSERVAÇÃO**

Zeppelini D, Oliveira JVL, de Lima ECA, et al (2022) **Hotspot in ferruginous rock may have serious implications in Brazilian conservation policy**. *Sci Rep* 12:. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18798-1>

MATERIAL SUPLEMENTAR

A REMOÇÃO DA VEGETAÇÃO FLORESTAL PODE AFETAR CARACTERÍSTICAS DOS MEIOS SUBTERRÂNEOS SUPERFICIAIS E SUA FAUNA ASSOCIADA?

Apêndice A1. Figura Suplementar 1

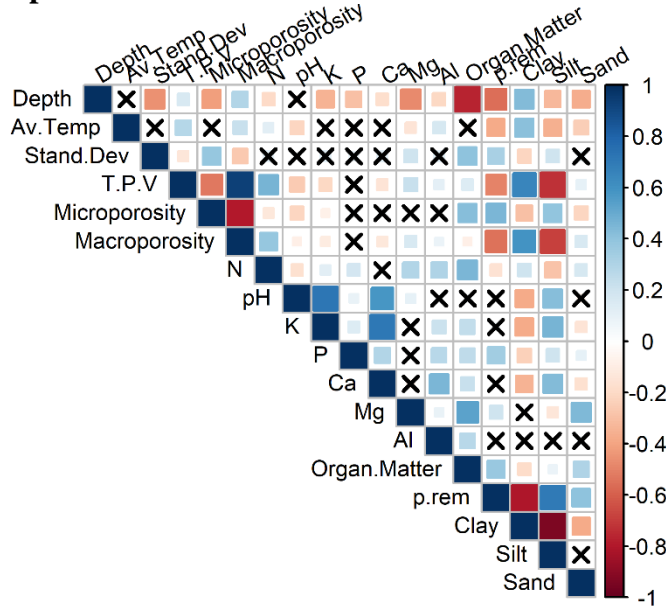


Figura 1: Correlação de Spearman entre preditores ambientais. Caixas marcadas com “X” representam variáveis não correlacionadas ($p < 0.05$). Gradiente de cor representa o valor “rho” de modo que: intensidade da cor vermelha representa correlações negativas (-1), enquanto intensidade da cor azul representa correlações positivas (1).

Figura Suplementar 2

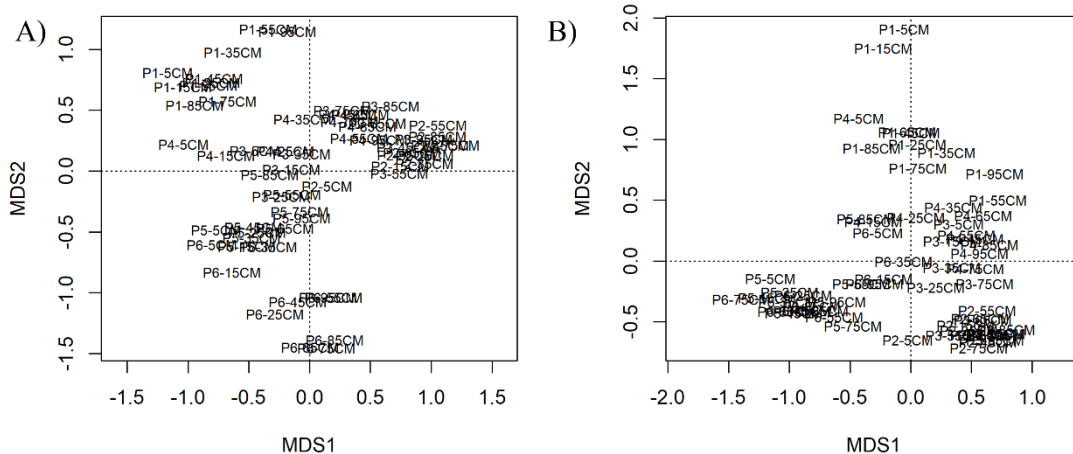


Figura 2: A) MDS 1 e MDS 2 resultantes da PCoA referente a distribuição da abundância geral de colêmbolos. B) MDS1 e MDS2 resultantes da PCoA referente a distribuição da abundância de colêmbolos troglomórficos.

Apêndice A3. Tabela Suplementar

Tabela 1: Valores preditores ambientais mensurados. Est.am = Estação Amostal. RiqGeral = Riqueza Geral de colêmbolos. RiqTrogló = Riqueza de morfótipos troglomórficos. Temp M = Temperatura média. Desvpad = Desvio Padrão. V.T.Poros =

ARTIGO 2

**A VEGETAÇÃO FLORESTAL PODE ATENUAR EFEITOS SAZONAIS EM FAUNA
ASSOCIADA A MEIOS SUBTERRÂNEOS SUPERFICIAIS?**

Artigo redigido conforme normas da revista Journal of Insect Conservation

RESUMO

O objetivo do presente estudo consistiu em avaliar as alterações temporais na estrutura da assembleia de colêmbolos em meios subterrâneos superficiais (MSS) em resposta a modificações no uso do solo e à profundidade. A pesquisa foi conduzida em uma região de transição entre o bioma do Cerrado e a Mata Atlântica, situada no município de Pains, no sudeste do Brasil. Foram selecionadas seis estações de coleta, sendo três em áreas de fragmentos florestais e três em áreas afetadas por atividades antrópicas, como pastagens e plantações. Em cada estação, foram instaladas armadilhas para capturar mensalmente os colêmbolos ao longo de um período de 13 meses. Também foram registradas as temperaturas em diferentes profundidades dos MSS. Os resultados obtidos foram analisados em relação à sazonalidade e à variação entre os períodos chuvoso e seco. Verificou-se que a riqueza de espécies de colêmbolos presentes na camada mais superficial e no ambiente antropizado foi distinta entre as estações de seca e chuva, assim como a composição de espécies. Além disso, observou-se que a temperatura exerce influência nos parâmetros biológicos dos colêmbolos, de forma que valores mais elevados podem afetar negativamente a riqueza desses organismos. Essa constatação pode ser explicada pela sensibilidade dessas espécies às mudanças ambientais. Em relação a diversidade beta, as mudanças mensais nas comunidades foram determinadas majoritariamente por substituição de espécies. Entretanto, em estratos profundos, após período chuvoso o padrão passa a ser pela diferença de espécies. De modo que espécies distintas acessam habitats profundos durante a estação seca e, nos meses seguintes, a composição da comunidade se altera devido à contínua redução na riqueza de espécie neste estrato. De maneira geral, destaca-se a importância dos meios subterrâneos superficiais na conservação da biodiversidade, bem como a necessidade de considerar fatores como uso do solo, sazonalidade e temperatura ao avaliar as mudanças na estrutura da comunidade de colêmbolos. Esses organismos desempenham papéis essenciais nos ecossistemas subterrâneos, tais como a ciclagem de nutrientes, aeração do solo e circulação de água, e podem ser utilizados como bioindicadores da qualidade desses habitats. Os resultados deste estudo contribuem para o entendimento dos efeitos das alterações ambientais sobre a biodiversidade dos MSSs.

Palavras-chave: Habitats subterrâneos superficiais. Padrões temporais. Fauna de colêmbolos.

ABSTRACT

The objective of the present study was to assess the temporal changes in the structure of the collembolan assemblage in Mesovoid Shallow Substratum (MSS) in response to modifications in land use and depth. The research was conducted in a transition region between the Cerrado and Atlantic Forest biomes, located in the municipality of Pains, southeastern Brazil. Six sampling stations were selected, three in forest fragment areas and three in areas affected by anthropogenic activities such as pastures and plantations. Traps were installed at each station to capture collembolans on a monthly basis over a 13-month period. Additionally, temperatures at different depths within the MSS were recorded. The obtained results were analyzed in relation to seasonality and variation between the rainy and dry seasons. It was observed that the species richness of collembolans in the superficial layer and anthropized environment differed between the dry and rainy seasons, as did the species composition. Furthermore, it was noted that temperature influences the biological parameters of collembolans, with higher values potentially negatively affecting species richness. This finding can be explained by the sensitivity of these species to environmental changes. Regarding beta diversity, monthly changes in the communities were predominantly determined by species turnover. However, in deep strata, after the rainy season, the pattern shifted to species differentiation. This means that distinct species access deep habitats during the dry season, and in the subsequent months, the community composition changes due to the continuous reduction in species richness in this stratum. In general, the importance of superficial subterranean environments in biodiversity conservation is highlighted, as well as the need to consider factors such as land use, seasonality, and temperature when assessing changes in collembolan community structure. These organisms play essential roles in subterranean ecosystems, such as nutrient cycling, soil aeration, and water circulation, and can be used as bioindicators of habitat quality. The results of this study contribute to the understanding of the effects of environmental changes on MSS biodiversity.

Keywords: Subterranean superficial habitats. Temporal patterns. Collembolan fauna.

INTRODUÇÃO

A diversidade biológica encontra-se em um momento crítico, principalmente pelo fato que, na atualidade, as alterações ambientais têm origem, extensão e magnitude diferentes daquelas que aconteceram em períodos geológicos pretéritos (Hiltpold et al. 2017). As mudanças ambientais oriundas de atividades humanas vêm ocorrendo em intensidade e velocidade que não permitem que muitas espécies consigam se adaptar ou migrar (Mammola et al. 2019). Um dos fatores que tem afetado a biodiversidade é a acelerada destruição de habitat. Quando um habitat é reduzido a pequenas manchas, os organismos que dependem dele estarão em maior risco de extinção (Lewinsohn et al. 2005; Cardoso et al. 2011). Não diferente dos ecossistemas de superfície, os habitats subterrâneos superficiais (HSS), ambientes intermediários entre a superfície do solo e a locais mais profundos, vêm sofrendo inúmeras pressões antrópicas oriundas do desenvolvimento de atividades humanas que têm colocado em riscos não só as características abióticas prístinas, mas também a biodiversidade peculiar destes habitats (Zeppelini et al. 2022).

Os habitats subterrâneos superficiais são ecossistemas que fornecem abrigo para espécies de invertebrados responsáveis por serviços ambientais, tais como ciclagem de nutrientes, aeração e circulação de água (Kay and Vandenbygaart 2002; Esmailzadeh and Ahangar 2014). Ademais, por vezes apresentam elevada diversidade de espécies subterrâneas obrigatórias e endêmicas, com morfologia, fisiologia e comportamento adaptados a esses habitats (Laška et al. 2011; Pipan et al. 2011). Exemplos destes habitats são as serrapilheiras, tubos de lavas, espaços superficiais e preenchidos por água em rochas carbonáticas (epicarste), assim como ambientes como os meios subterrâneos superficiais (MSS) (Culver and Pipan 2009; Mammola et al. 2016).

Os MSSs localizam-se entre os estratos profundos do solo e a rocha matriz. É composto principalmente por espaços heterogêneos e fissuras entre as rochas, que podem ser acessados e colonizados, principalmente por invertebrados (Gers 1992). Dentre suas principais características estão: ausência de luz já nos primeiros centímetros de profundidade, acentuado gradiente trófico, presença tanto de fauna epígea quanto hipógea, além de poderem possuir conexões com outros ambientes subterrâneos como grandes cavidades naturais (Culver and Pipan 2009; Pipan et al. 2011; Nitzu et al. 2014).

Outra importante característica destes ambientes é a relativa estabilidade climática de regiões mais profundas do solo, quando comparadas com a superfície. Tal fato incita migrações

verticais por alguns grupos de invertebrados, em busca de microclima favorável, principalmente durante as estações mais secas do ano (Crouau-Roy et al. 1992; Nitzu et al. 2007, 2014).

A cobertura vegetal do solo é de grande importância para características físicas e bióticas do MSS, tendo em vista que grande parte do aporte trófico do sistema advém da decomposição de matéria orgânica da superfície, carregada por ação hídrica pluvial ou por invertebrados (Gers 1998; Rendoš et al. 2016; Ledesma et al. 2020). Ambientes de vegetação arborícola podem possuir maiores níveis de concentração de matéria orgânica do solo, o que pode influenciar diretamente a comunidade de invertebrados que habitam esses ambientes (Cortet and Poinso-Balaguer 1998).

Dentre os organismos que habitam os solos, os colêmbolos se destacam pelo elevado número de espécies e abundância, além disso são sensíveis a mudanças em parâmetros ambientais como temperatura, umidade, acúmulo de serrapilheira e composição vegetal da área em que habitam (Lauga-Reyrel and Deconchat 1999). Tais fatores ressaltam que este grupo pode ser considerado bioindicador adequado para avaliar a qualidade dos habitats subterrâneos frente às mudanças nos usos do solo (Winck et al. 2017).

As atividades e ações relacionadas à conservação de invertebrados têm mudado o foco em espécies ameaçadas para uma abordagem mais abrangente, a nível de estrutura de comunidades e processos ecossistêmicos (Harvey et al. 2020). Estudos comparativos de organismos do solo, sob diferentes condições ou regimes, oferecem oportunidades para avaliar os efeitos de alterações ambientais na riqueza ou composição de espécies sobre distintas condições ambientais (Drummond et al. 2009).

Deste modo, o objetivo do presente estudo é avaliar mudanças temporais na estruturação da assembleia de colêmbolos frente a mudanças no uso do solo e conforme a profundidade no MSS. Para isto, será avaliado: i) se a riqueza e composição de espécies se alteram sazonalmente e mensalmente nos MSSs sobre usos distintos do solo e em diferentes profundidades; ii) verificar qual componente da diversidade beta exerce influência em possíveis alterações na assembleia; e iii) avaliar se a temperatura atua em eventuais mudanças nos parâmetros biológicos ao longo do ano. Neste contexto, espera-se que os períodos mais secos sejam os de maior influência para os parâmetros da assembleia de colêmbolos. Tendo em vista que estes invertebrados dependem da umidade, meses mais secos deverão afetar negativamente a riqueza, principalmente das regiões superficiais e ambientes antropizados, de modo que as comunidades sejam diferentes entre as estações. Mudanças na composição de espécies em ambientes profundos e fragmentos florestais provavelmente ocorrerão devido à substituição de espécies nos períodos mais secos, tendo em vista que os colêmbolos estarão em busca de ambientes com

maior umidade. De modo similar, altas temperaturas afetarão negativamente os parâmetros da fauna de colêmbolos, uma vez que são animais sensíveis a mudanças em parâmetros ambientais.

METODOLOGIA

Área de Estudo

A região de estudo situa-se no sudeste brasileiro, no carste do município de Pains-MG (20° 22' 14" S; 45° 39' 41" W), uma área de transição entre o bioma cerrado e Mata Atlântica com predomínio de floresta decídua e semidecídua nos afloramentos calcáreos (Melo et al. 2013) (Figura 1). A precipitação média na região durante o período seco (abril a setembro) é 14,43mm, enquanto no período chuvoso (outubro-março) é de 111,56 mm (INMET 2022). Na classificação de Koppen, o clima da área pode ser definido como *Cwa* (subtropical úmido com inverno seco e verões quentes) (Kottek et al. 2006).



Figura 1: Localização das estações de amostragem conforme tipo de uso do solo na região do estudo, município de Pains/MG.

A província espeleológica Arcos-Pains-Doresópolis se destaca pela maior concentração de cavernas cadastradas no Brasil (> 1600) (CECAV 2022) e grande diversidade de espécies estritamente cavernícolas (Zampaulo 2010). Entretanto, tal região lida com histórico de desmatamento e fragmentação da vegetação nativa como consequência de atividades econômicas relacionadas à mineração de calcário, indústria de cimento e atividades agropecuárias (Menegasse et al. 2002).

Desenho amostral

Para avaliar a distribuição temporal de espécies de colêmbolos do MSS, foram feitas coletas mensais durante 13 meses entre agosto de 2020 e agosto de 2021, em seis estações amostrais. Destas, três estavam situadas em ambientes de fragmentos florestais com predomínio de vegetação arborícola, em encostas de paredões calcáreos. As outras três estavam situadas em encostas de paredões adjacentes a áreas com algum nível de influência antrópica, como pastagens e plantações com predomínio de vegetação rasteira.

As estações de amostragem são compostas por trincheiras de 1,5 m (comprimento) x 0,5 m (largura) x 1,10 m (profundidade), de modo que fossem acomodados três conjuntos de armadilhas em cada estação, totalizando 18 instalados no estudo.

Os conjuntos compreendem de armadilhas adaptadas de Schlik-Steiner and Steiner (2000), estas compostas por um cilindro de PVC (110 cm, Ø 10 cm) com dez linhas de furos (Ø 8mm) espaçadas por 10cm, por onde os invertebrados adentram na armadilha. Uma série composta por dez copos plásticos com volume de 300ml ligados por um eixo metálico central é inserida no cilindro de PVC, de modo que a abertura do copo se alinhe à linha de furos do cano (Figura 2). Foi utilizada solução de formaldeído 4%, com gotas de detergente, para preservação dos invertebrados coletados (Rendoš et al. 2016).



Figura 2: Esquema ilustrando uma estação amostral no MSS. Copos de amostragem (A), vergalhão roscado de conexão (B), Cano PVC com furos para entrada da fauna (C) e série de copos de amostragem

(D) conectados, são inseridos no cano de PVC de modo que a borda de cada copo esteja de encontro esteja nivelada com a linha de furos.

Para medições da temperatura do MSS ao longo do ano, foram instalados *data loggers* (Thermodata iButton DS 1921G#F50 Maxim Dallas, USA) na armadilha central de cada estação de amostragem e as medidas foram feitas em intervalos contínuos de 4 horas durante todo o período do estudo. O equipamento foi posicionado na porção inferior dos copos de amostragem, e os estratos escolhidos para medição foram respectivamente: 5cm, 15cm, 35cm, 55cm, 75cm e 95cm (Rendoš et al. 2012).

Com o intuito de evitar viés amostral, os estratos retirados do solo, no momento da escavação, foram preservados em lona plástica de modo que pudessem ser devolvidos na mesma ordem após a instalação das armadilhas. Assim como só foram analisadas no estudo amostras biológicas coletadas dois meses após a instalação delas, de modo que houvesse tempo para o solo e as comunidades nele presente se adaptarem aos locais com as armadilhas voltando ao estado mais parecido com o natural possível. O material coletado foi então acondicionado em potes plásticos e levados a laboratório para triagem e morfotipagem dos colêmbolos (Oliver et al. 1996), que foram realizadas com auxílio de estereomicroscópio Zeiss Stemi 508, e os indivíduos armazenados em álcool 70%. Os morfótipos foram então encaminhados para identificação até menor nível taxonômico acessível por especialista, e estão depositados na coleção de invertebrados subterrâneos de lavras ISLA-UFLA e na Coleção de Collembola do Centro de Biociências, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte CC/UFRN.

Análise de dados

A riqueza e abundância dos colêmbolos coletados foram obtidas por meio da contagem do número de indivíduos e morfótipos encontrados em cada estrato de cada mês do estudo. Com o intuito de sumarizar quais destes estratos do solo avaliados representam a região superficial (5cm – 45cm) e profunda (55cm – 95cm), foi elaborada uma análise de componentes principais – PCA para cada um destes ambientes, utilizando os valores de riqueza de cada uma das profundidades, de modo que o eixo com maior valor de componente foi escolhido para representar o ambiente.

Para definir as estações de seca e chuva na região, foram utilizados dados pluviométricos retirados do INMET, os meses com precipitação acima de 50mm foram considerados como estação chuvosa, já os meses com precipitação inferior a este valor, considerados como seca (Pinheiro et al. 2002). Para avaliar a oscilação da temperatura ao longo do ano, foi realizada a média dos valores mensais obtidos de cada profundidade em cada um dos pontos. Já para avaliar

a estabilidade térmica dos estratos ao longo do mês, foi calculado o desvio padrão dos valores mensais de temperatura.

Para avaliar mudanças nos padrões de riqueza entre as estações seca e chuvosa, e entre os meses separadamente, foram realizados modelos lineares mistos generalizados (GLMM) no software RStudio (RStudio Team 2022), utilizando a função `glmer` do pacote `lme4` (Bates et al. 2014). Os pontos de amostragem foram considerados como variáveis aleatórias no modelo. Para avaliar diferenças na riqueza entre os meses de coleta, foi realizada uma análise de contraste utilizando a função `emmeans`, com o ajuste de Tukey, também no software RStudio.

Para avaliar diferenças na composição de espécies entre fragmentos florestais e ambientes antropizados, bem como entre regiões superficiais e profundas, foi realizada uma análise de permutação da variância (PERMANOVA) com 999 permutações, utilizando o índice de dissimilaridade de Bray Curtis no software PRIMER 6 (Anderson et al. 2008). A beta diversidade de cada ambiente e região ao longo do período de estudo foi obtida através do pacote BAT, também no software RStudio (Cardoso et al. 2015). A beta diversidade total foi dividida em substituição de espécies (Brep) e diferenças na riqueza (Brich). A substituição de espécies está relacionada à mudança nos morfótipos da composição, enquanto as diferenças na riqueza (Brep) estão relacionadas à perda de espécies entre os meses de estudo, representando uma subamostra das composições de espécies encontradas (Cardoso et al. 2014, 2015).

Com o objetivo de verificar se a temperatura e o desvio padrão (estabilidade térmica) ao longo do ano exercem influência nas variações de riqueza e composição de espécies, foram utilizados modelos lineares generalizados mistos (GLMM), enquanto para a beta diversidade foi utilizado um modelo linear generalizado (GLM), ambos no software RStudio. Para obter os valores de composição utilizados no modelo linear, foi realizada uma análise de componente principal (PcoA) utilizando o índice de dissimilaridade de Bray Curtis, também no software RStudio, utilizando os dois primeiros eixos (MDS1 e MDS2) como proxies da composição.

RESULTADOS

Durante o período do estudo foram coletados 30.071 indivíduos de colêmbolos, distribuídos em três ordens, 11 famílias e 52 morfótipos. Destes espécimes, 71% foram encontrados na estação chuvosa, 52% em áreas de fragmento florestal e 61% no ambiente superficial (05 cm – 45 cm) (tabela apêndice A1).

A análise de componentes principais (PCA) selecionou os estratos de 5cm e 95cm como representantes de regiões superficiais e profundas, respectivamente (Tabela 1). Os parâmetros

biológicos mensurados nessas profundidades foram aplicados como *proxies* nos modelos consequentes referentes à estruturação das comunidades.

Tabela 1: Valores componentes da PCA referentes a riqueza de colêmbolos pela profundidade, para definição de ambientes superficiais e profundos. O asterisco aponta a profundidade que melhor representou a riqueza do ambiente. *PA* é o valor da proporção acumulada no eixo componente.

Ambiente	Profundidade	Componente 1
Superficial	5	0.47*
	15	0.42
	25	0.46
	35	0.41
	45	0.45
	<i>PA</i>	0.71
Profundo	55	0.44
	65	0.44
	75	0.39
	85	0.46
	95	0.48*
	<i>PA</i>	0.62

A riqueza de colêmbolos difere entre as estações (seca e chuvosa) somente em regiões superficiais e nos ambientes antropizados (Figura 2). Apesar do uso do solo ou profundidade, os dados mensais demonstram maior riqueza no final do período seco (agosto-novembro) e redução nos meses de maior precipitação (dezembro-fevereiro) (Figura 2).

Regiões superficiais e ambientes antropizados possuem maiores variâncias nos valores de riqueza ao longo do período de estudo, com os meses mais chuvosos diferindo significativamente dos demais (Figura 2, A e C). Habitats mais profundos e fragmentos florestais atenuam os efeitos sazonais sobre a riqueza de espécies, sendo observado menor variações nestes valores (Figura 2, B e D).

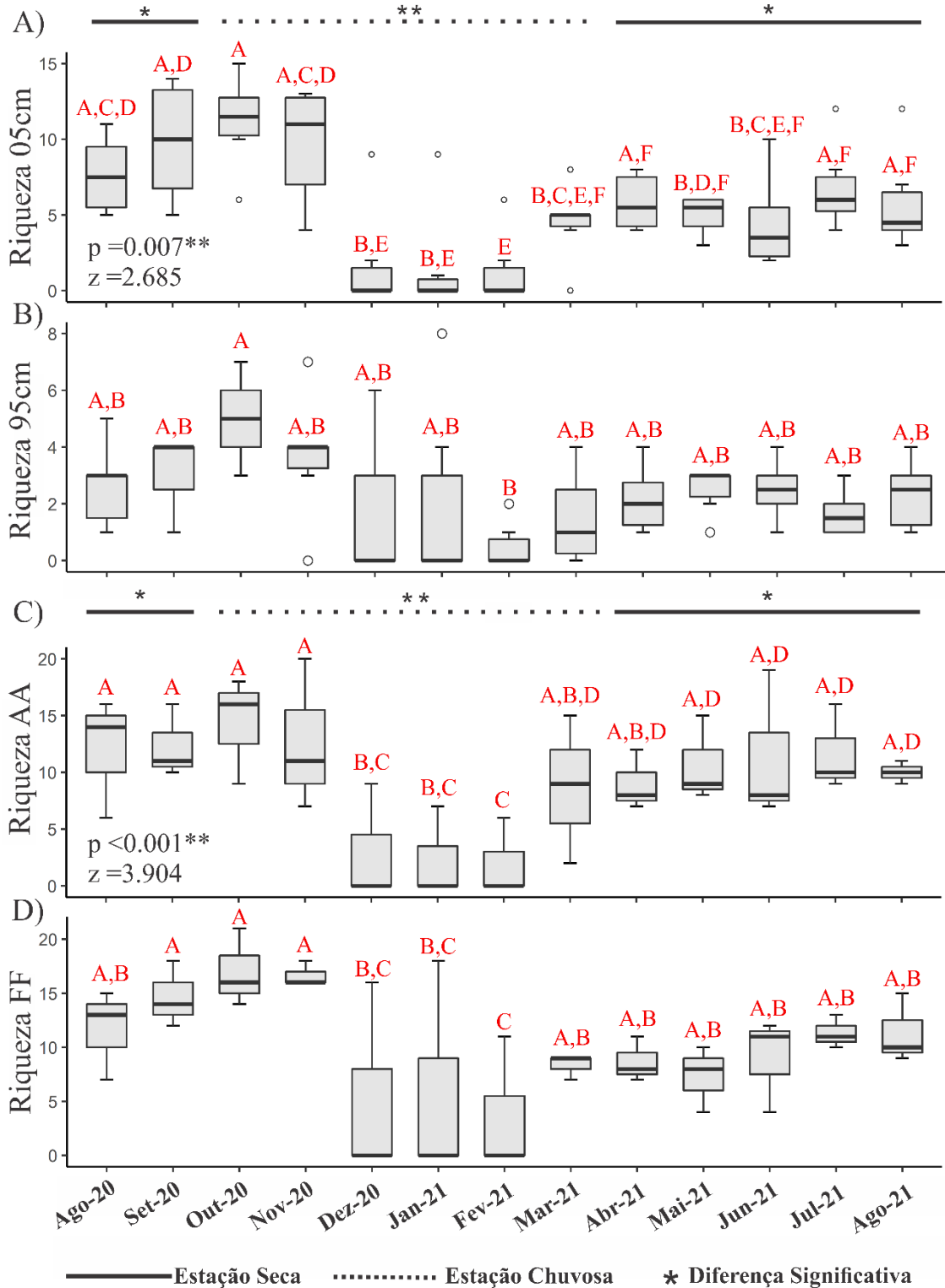


Figura 3: Variações na riqueza de colêmbolos ao longo dos 13 meses de coleta nas profundidades, ambientes antropizados (AA) e fragmentos florestais (FF). Letras em vermelho representam os grupos de meses com riqueza significativamente distintos ao longo do ano. Linhas contínuas, tracejadas e asteriscos indicam ambientes e profundidades que apresentaram diferenças significativas na riqueza entre estações secas e chuvosa, com respectivos valores de p/z.

Em relação à composição de colêmbolos no MSS, somente ambientes antropizados apresentaram comunidades dissimilares entre as estações seca e chuvosa (Figura 3). Para os demais tratamentos (fragmentos florestais, regiões superficiais e profundas), não foram

observadas diferenças sazonais significativas na composição de espécies ($p > 0.05$). Ao longo dos meses, as regiões superficiais e profundas apresentaram diferenças significativas na composição (Tabela 2). De todas as combinações mensais possíveis (78), 12 tiveram diferença significativa para regiões superficiais e duas para as profundas (Tabela 2).

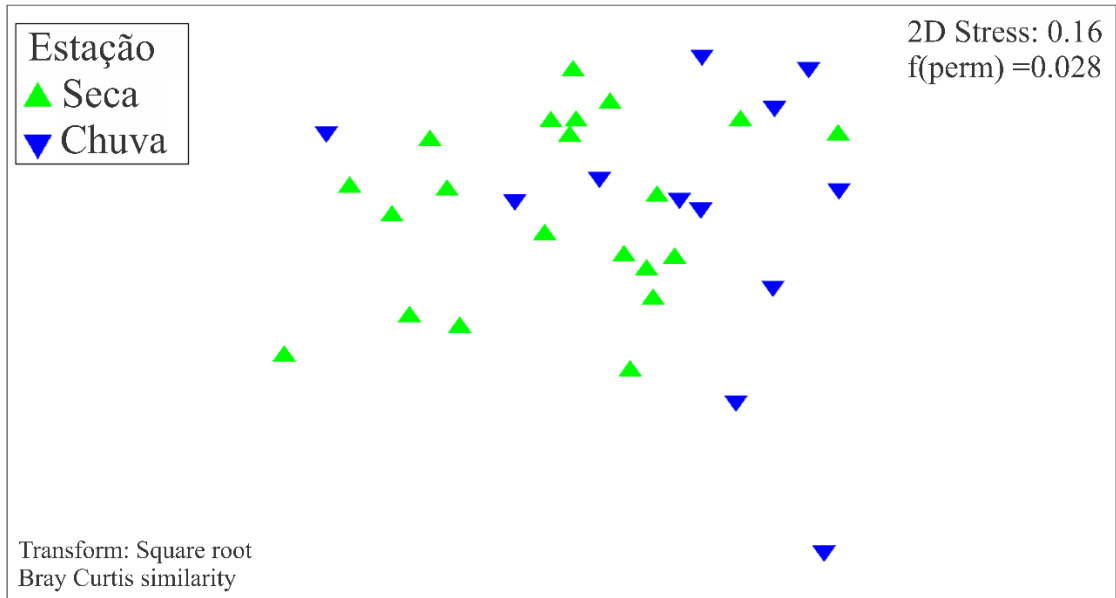


Figura 4: MDS mostrando similaridade na composição de espécies de colêmbolos nos ambientes antropizados na estação seca e chuvosa.

Tabela 2: Meses de amostragem que mostraram diferenças significativas na composição de colêmbolos no MSS.

Profundidade	Meses	t	F PERMANOVA
5cm	Ago-20 vs. Mar-21	1.796	0.012
	Ago-20 vs. Abr-21	1.705	0.022
	Set-20 vs. Mar-21	1.519	0.036
	Set-20 vs. Mar-21	1.501	0.028
	Out-20 vs. Dez-20	1.842	0.034
	Out-20 vs. Jan-21	1.797	0.035
	Out-20 vs. Fev-21	2.037	0.035
	Out-20 vs. Mar-21	1.956	0.012
	Out-20 vs. Abr-21	2.048	0.007
	Nov-21 vs. Abr-21	1.474	0.036
	Mar-21 vs. Ago-21	1.673	0.017
	Abr-21 vs. Ago-21	1.902	0.012
95cm	Out-20 vs. Mar-21	1.747	0.015
	Mar-21 vs. Ago-21	1.626	0.037

As mudanças mensais nas comunidades são determinadas majoritariamente pela substituição de espécies (Figura 4). Entretanto, em estratos profundos, após período chuvoso (jan/21-abr/21) o padrão passa a ser pela diferença de espécies (Figura 4B). Ou seja, espécies distintas acessam habitats profundos durante a estação seca e, nos meses seguintes, a

composição da comunidade se altera devido à contínua redução na riqueza de espécie neste estrato.

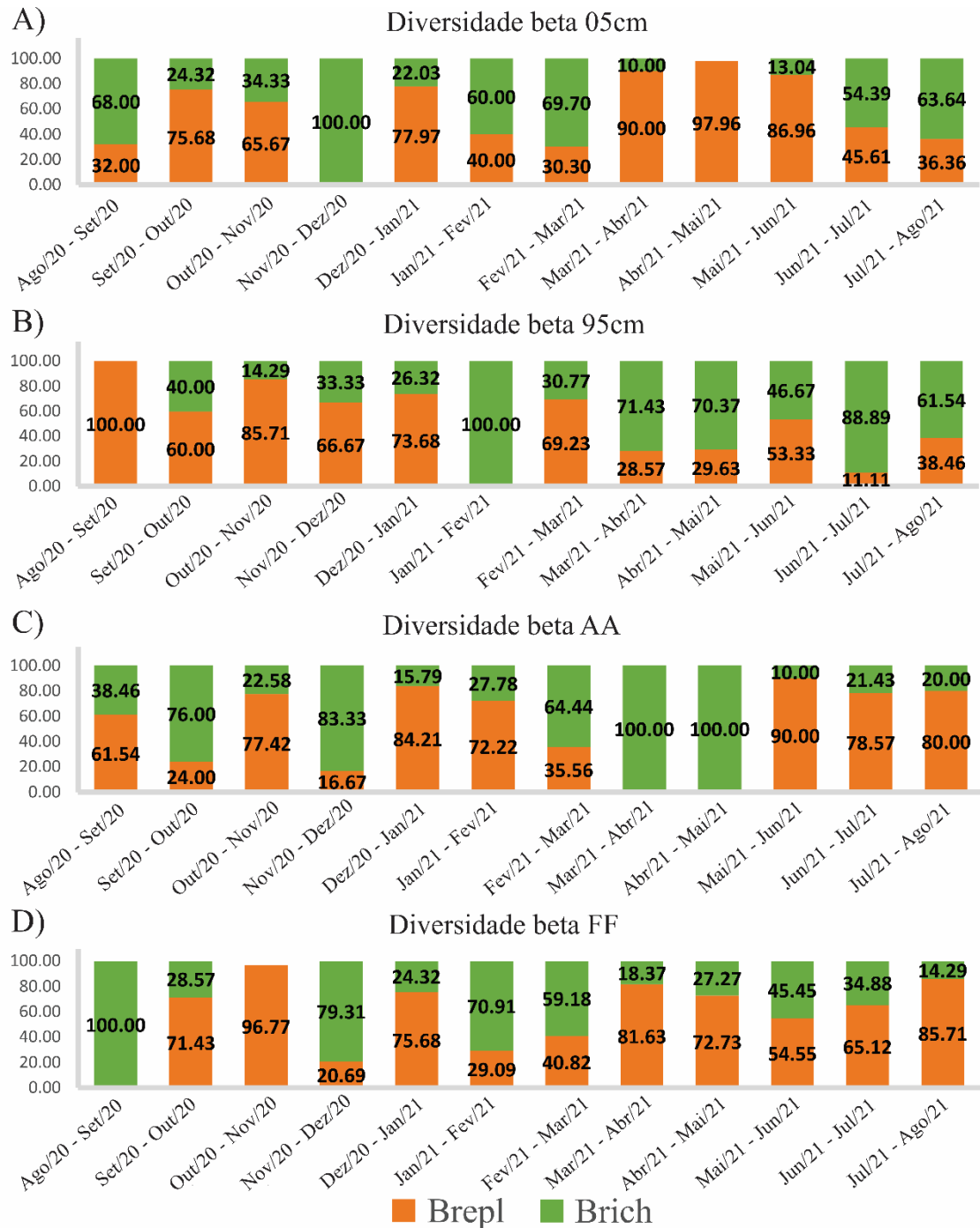


Figura 4: Porcentagens de partição da beta diversidade representados por substituição de espécies (β_{repl}) e diferença de riqueza (β_{rich}) entre os meses estudados.

Dentre os parâmetros sobre a estruturação da comunidade, somente riqueza de espécies apresenta influência da temperatura (média e desvio padrão) (Tabela 3). De forma específica, o aumento da temperatura reduz a diversidade de colêmbolos nos diferentes usos do solo e profundidades (Tabela 3). Já o desvio padrão da temperatura influencia positivamente a riqueza

de colêmbolos em ambos os tipos de cobertura vegetal e nos habitats superficiais. Assim, mais espécies foram amostradas nos meses com maior oscilação climática.

Tabela 2: Influência da temperatura do MSS na riqueza de espécies de colêmbolos em regiões superficiais (05cm), profundas(95cm), ambientes antropizados (AA) e fragmentos florestais (FF).

Variáveis predictoras	Variável resposta	Profundidade / Ambiente	Método de análise	Erro Padrão	z	p
Intercept	Riqueza de colêmbolos	05cm	GLMM	0.542	6.336	<0.001
Temperatura (Média)				0.025	-4.396	<0.001
Temperatura (desv.pad)				0.160	4.984	<0.001
Intercept	Riqueza de colêmbolos	95cm	GLMM	1.025	3.341	<0.001
Temperatura (Média)				0.051	-2.446	0.014
Intercept	Riqueza de colêmbolos	AA	GLMM	0.801	5.585	<0.001
Temperatura (Média)				0.036	-3.586	<0.001
Temperatura (desv.pad)				0.177	3.331	<0.001
Intercept	Riqueza de colêmbolos	FF	GLMM	0.582	6.728	<0.001
Temperatura (Média)				0.027	-3.654	<0.001
Temperatura (desv.pad)				0.199	2.028	0.042

DISCUSSÃO

Diferentemente do esperado, o menor valor de riqueza observado no estudo ocorreu durante a estação seca. No entanto, os ambientes antropizados e estratos superficiais foram, como esperado, os habitats mais afetados por mudanças sazonais e apresentaram diferenças significativas na riqueza entre estas estações, sendo a composição dos ambientes antropizados a única distinta entre os períodos seco e chuvoso. Apenas a região profunda apresentou padrão de beta diversidade marcado por substituição de espécies durante a estação seca.

A acentuada redução na riqueza de espécies no período chuvoso (dez/20 – fev/21) resulta da elevada precipitação nesta época do ano, promovendo saturação hídrica no MSS. Nessa condição os espaços subsuperficiais tornam-se indisponíveis ao trânsito da fauna devido ao volume de água. Ademais, possivelmente promove mudanças em diversos parâmetros físico-químicos, de modo que menos espécies resistem a essas condições.

Com relação à profundidade, a fauna de Collembola responde de forma similar às mudanças temporais (considerado riqueza e composição) nos habitats superficiais e profundos, porém as alterações são atenuadas nesse último. Esse padrão reflete o isolamento climático do estrato amostrado, dada espessa camada de solo que isola o ambiente das variações de superfície (Pipan et al. 2011). Deste modo, as alterações causadas por mudanças sazonais dissipam com o aumento do gradiente profundidade, o que por sua vez influencia as menores variações mensais de riqueza e composição em habitats mais profundos. De forma complementar, o

aporte trófico no MSS atinge maiores profundidades quando o transporte da matéria orgânica ocorre pelas águas das chuvas (Crouau-Roy et al. 1992; Rendoš et al. 2016; Mammola et al. 2016; Ledesma et al. 2020). Assim, em períodos de elevada precipitação, ambientes mais profundos não saturados pela água, podem tanto apresentar maior disponibilidade de matéria orgânica quanto estarem sobre menor influência do clima externo quando comparado aos estratos superficiais.

Quanto ao uso do solo, a menor variância nos valores de riqueza nos fragmentos florestais indica que a cobertura vegetal também atenua os efeitos das mudanças climáticas sazonais. Ademais, mudança na composição de espécies de colêmbolos entre as estações foi significativa apenas nos ambientes antropizados. De fato, alterações no tipo de uso do solo ou na estrutura da vegetação exercem influência sobre parâmetros bióticos e abióticos do solo (Winck et al. 2017). As alterações microclimáticas compreendem mudanças na incidência de radiação solar, umidade, temperatura e padrões de vento (Ranta et al. 1998). Além de alterar as condições do habitat, atuam negativamente sobre importantes recursos para a fauna residente, como disponibilidade de abrigo e matéria orgânica (Dombos 2001; Sousa et al. 2004; Chauvat et al. 2007; Winck et al. 2017). Portanto, a remoção da cobertura vegetal expõe as comunidades do MSS a maiores oscilações nas condições ambientais e a um habitat simplificado, impossibilitando que muitas espécies prosperem.

A constante substituição de espécies no período seco nos estratos profundos indica provável migração vertical das espécies de colêmbolos, advindos de estratos superficiais em busca de micro habitats úmidos e climaticamente estáveis, conforme já destacado para outros invertebrados (Crouau-Roy et al. 1992; Nitzu et al. 2010; Pipan et al. 2011; Rendoš et al. 2016; Ledesma et al. 2020). Tal situação é corroborada pela mudança na composição de espécies por diferença na riqueza nos meses consecutivos, demonstrando que a fauna presente corresponde a uma subamostra dos períodos anteriores.

O efeito negativo do aumento da temperatura sobre a riqueza de colêmbolos pode estar relacionada a limitações fisiológicas desses animais. A resistência à dessecação é um mecanismo determinante para padrões de distribuição dos artrópodes de solo (Hassall et al. 2010; David and Handa 2010; De Smedt et al. 2018). Entretanto, colêmbolos apresentam tamanho diminuto e cutícula fina, estando mais susceptíveis ao estresse hídrico promovido pelas mudanças climáticas (Novak et al. 2014; Raschmanová et al. 2018). Já o aumento da diversidade em períodos de menor estabilidade térmica (maior desvio padrão da temperatura) relaciona-se à hipótese do distúrbio intermediário (Connell 1978), a qual prevê uma maior riqueza de uma comunidade quando submetida a distúrbios em níveis e frequência moderada.

A estabilidade temporal em riqueza e composição de colêmbolos nos ambientes florestais e habitats profundos do MSS ressaltam a relevância desses para a conservação de invertebrados. Esse componente da paisagem atua como abrigo para fauna, ou até mesmo como refúgio climático temporário, durante eventos estacionais, possibilitando a permanência local das espécies (Rendoš et al. 2012; Nitzu et al. 2014; Nae and Băncilă 2017; Ledesma et al. 2020). Neste contexto, o MSS pode ter influência na conservação não só para a fauna de superfície, mas também para fauna estritamente subterrânea, uma vez que atuam como conexão entre o meio epígeo e hipógeo (Culver and Pipan 2009). Em ocasiões de eventos climáticos extremos (ex. inundações, secas prolongadas) ou impactos antrópicos sobre o meio subterrâneo, o MSS pode realizar um importante papel para recolonização desses ecossistemas pós distúrbios (Růžička and Dolanský 2016; Ledesma et al. 2019, 2020; Zeppelini et al. 2022).

O presente estudo traz novas perspectivas à conservação dos ambientes cársticos. Destaca-se a importância da cobertura vegetal ligada a esses ambientes para manutenção das espécies que utilizam ou habitam o MSS, uma vez que esta vegetação atenua as condições climáticas que incidem sobre a superfície. Ainda, a integridade dos solos e rocha matriz são essenciais para sustentar comunidades em estratos profundos, onde a fauna epígea e hipógea pode persistir frente às mudanças climáticas ou antrópicas. Por fim, espera-se que o uso antrópico de regiões cársticas sejam pautadas por medidas conservacionistas que considerem os MSSs, favorecendo tomadas de decisão que abrangem toda paisagem.

REFERÊNCIAS

- Anderson M, Gorley, Ray N, Clarke RK (2008) **Permanova+ for primer: Guide to software and statistical methods**. Primer-E Limited
- Bates D, Mächler M, Bolker BM, Walker SC (2014) **Fitting Linear Mixed-Effects Models using lme4**. J Stat Softw 67:. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1406.5823>
- Cardoso P, Erwin TL, Borges PAV, New TR (2011) **The seven impediments in invertebrate conservation and how to overcome them**. Biol Conserv 144:2647–2655. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCON.2011.07.024>
- Cardoso P, Rigal F, Carvalho JC (2015) **BAT – Biodiversity Assessment Tools, an R package for the measurement and estimation of alpha and beta taxon, phylogenetic and functional diversity**. Methods Ecol Evol 6:232–236. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12310>
- Cardoso P, Rigal F, Carvalho JC, et al (2014) **Partitioning taxon, phylogenetic and functional beta diversity into replacement and richness difference components**. J Biogeogr 41:749–761. <https://doi.org/10.1111/JBI.12239>
- CECAV (2022) **ICMBio - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas - CECav**. https://www.icmbio.gov.br/cecav/index.php?option=com_icmbio_canie&controller=relatorioestatistico&itemPesq=true. Accessed 22 Sep 2022
- Chauvat M, Wolters V, Dauber J (2007) **Response of collembolan communities to land-use change and grassland succession**. Ecography 30:183–192. <https://doi.org/10.1111/j.2007.0906-7590.04888.x>
- Connell JH (1978) **Diversity in Tropical Rain Forests and Coral Reefs**. Science (1979) 199:1302–1310. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.199.4335.1302>
- Cortet J, Poinso-Balaguer N (1998) **Collembola populations under sclerophyllous coppices in Provence (France): comparison between two types of vegetation, Quercus ilex L. and Quercus coccifera L.**
- Crouau-Roy B, Crouau Y, Ferre C (1992) **Dynamic and temporal structure of the troglobitic beetle Speonomus hydrophilus (Coleoptera: Bathysciinae)**
- Culver DC, Pipan T (2009) **The Biology of Caves and Other Subterranean Habitats**
- David JF, Handa IT (2010) **The ecology of saprophagous macroarthropods (millipedes, woodlice) in the context of global change**. Biological Reviews 85:881–895. <https://doi.org/10.1111/J.1469-185X.2010.00138.X>
- de Smedt P, Baeten L, Berg MP, et al (2018) **Desiccation resistance determines distribution of woodlice along forest edge-to-interior gradients**. Eur J Soil Biol 85:1–3. <https://doi.org/10.1016/J.EJSOBI.2017.12.002>
- Dombos MÂ (2001) **Collembola of loess grassland: effects of grazing and landscape on community composition**

Drummond GM, Martins CS, Greco MB, Vieira F (2009) **Biota Minas: Diagnostico do conhecimento sobre a biodiversidade no Estado de Minas Gerais - subsidio ao Programa Biota Minas.** 624–624

Esmaeilzadeh J, Ahangar AG (2014) **INFLUENCE OF SOIL ORGANIC MATTER CONTENT ON SOIL PHYSICAL, CHEMICAL AND BIOLOGICAL PROPERTIES**

Gers C (1992) **Ecologie et biologie des arthropodes terrestres du Milieu Souterrain Superficiel: fonctionnement et écologie évolutive**

Gers C (1998) **Diversity of energy fluxes and interactions between arthropod communities: from Soil to Cave**

Harvey JA, Heinen R, Armbrecht I, et al (2020) **International scientists formulate a roadmap for insect conservation and recovery.** *Nat Ecol Evol* 4:174–176

Hassall M, Edwards DP, Carmenta R, et al (2010) **Predicting the effect of climate change on aggregation behaviour in four species of terrestrial isopods.** *Behaviour* 147:151–164. <https://doi.org/10.1163/000579509X12512861455834>

Hiltbold I, Johnson SN, le Bayon R-C, Nielsen UN (2017) **Climate Change in the Underworld: Impacts for Soil-Dwelling Invertebrates**

INMET (2022) **Banco de Dados Meteorológicos do INMET.** <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Accessed 22 Sep 2022

Kay BD, Vandenbygaart AJ (2002) **Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter**

Kottek M, Grieser J, Beck C, et al (2006) **World map of the Köppen-Geiger climate classification updated.** *Meteorologische Zeitschrift* 15:259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>

Laška V, Kopecký O, Růžička V, et al (2011) **Vertical distribution of spiders in soil.** *J Arachnol* 39:393–398

Lauga-Reyrel F, Deconchat M (1999) **Diversity within the Collembola community in fragmented coppice forests in south-western France.** *Eur J Soil Biol* 35:177–187. [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(10\)70004-2](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(10)70004-2)

Ledesma E, Jiménez-Valverde A, Baquero E, et al (2020) **Arthropod biodiversity patterns point to the Mesovoid Shallow Substratum (MSS) as a climate refugium.** *Zoology* 141:. <https://doi.org/10.1016/j.zool.2020.125771>

Ledesma E, Jiménez-Valverde A, de Castro A, et al (2019) **The study of hidden habitats sheds light on poorly known taxa: Spiders of the Mesovoid Shallow substratum.** *Zookeys* 2019:39–59. <https://doi.org/10.3897/zookeys.841.33271>

Lewinsohn T, Freitas A, Prado PI (2005) **Conservação de invertebrados terrestres e seus habitats no Brasil.** *MEGADIVERSIDADE* 1:63–69

Mammola S, Cardoso P, Culver DC, et al (2019) **Scientists' Warning on the Conservation of Subterranean Ecosystems.** *Bioscience* 69:641–650. <https://doi.org/10.1093/BIOSCI/BIZ064>

Mammola S, Giachino PM, Piano E, et al (2016) **Ecology and sampling techniques of an understudied subterranean habitat: the Milieu Souterrain Superficiel (MSS).** *Naturwissenschaften* 103:88

Melo PHA, Lombardi JA, Salino A, Carvalho DA (2013) **Composição florística de angiospermas no carste do Alto São Francisco.** *Rodriguésia* 64:29–36

Menegasse LN, Jomir ;, Gonçalves M, et al (2002) **DISPONIBILIDADES HÍDRICAS NA PROVÍNCIA CÁRSTICA DE ARCOS-PAINS-DORESÓPOLIS, ALTO SÃO FRANCISCO, MINAS GERAIS, BRASIL**

Nae I, Băncilă RI (2017) **Mesovoid shallow substratum as a biodiversity hotspot for conservation priorities: Analysis of oribatid mite (Acari: Oribatida) fauna.** *Acarologia* 57:855–868. <https://doi.org/10.24349/acarologia/20174202>

Nitzu E, Nae A, Băncilă R, et al (2014) **Scree habitats: Ecological function, species conservation and spatial-temporal variation in the arthropod community.** *Syst Biodivers* 12:65–75. <https://doi.org/10.1080/14772000.2013.878766>

Nitzu E, Nae A, Giurginca A, Popa I (2010) **INVERTEBRATE COMMUNITIES FROM THE MESOVOID SHALLOW SUBSTRATUM OF THE CARPATHO-EUXINIC AREA: ECO-FAUNISTIC AND ZOOGEOGRAPHIC ANALYSIS**

Nitzu E, Nae A, Popa I (2007) **Eco-faunistic study on the invertebrate fauna (Araneae, Collembola and Coleoptera) from the Vârghiș Gorge Natural Reserve (Eastern Carpathians, Romania), with special note on the micro-refugial role of the subterranean habitats.**

Novak T, Šajna N, Antolinc E, et al (2014) **Cold tolerance in terrestrial invertebrates inhabiting subterranean habitats.** *Int J Speleol* 43:265–272. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.43.3.3>

Oliver I, Beattie AJ, Beattie OB (1996) **Invertebrate Morphospecies as Surrogates for Species: A Case Study Morphospecies as Surrogates for Species**

Pinheiro F, Diniz IR, Coelho D, Bandeira MPS (2002) **Seasonal pattern of insect abundance in the Brazilian cerrado.** *Austral Ecol* 27:132–136. <https://doi.org/10.1046/J.1442-9993.2002.01165.X>

Pipan T, López H, Oromí P, et al (2011) **Temperature variation and the presence of troglobionts in terrestrial shallow subterranean habitats.** *J Nat Hist* 45:253–273. <https://doi.org/10.1080/00222933.2010.523797>

Ranta P, Blom T, Niemelä J, et al (1998) **The fragmented Atlantic rain forest of Brazil: size, shape and distribution of forest fragments.** *Biodiversity & Conservation* 1998 7:3 7:385–403. <https://doi.org/10.1023/A:1008885813543>

Raschmanová N, Šustr V, Kováč L, et al (2018) **Testing the climatic variability hypothesis in edaphic and subterranean Collembola (Hexapoda).** *J Therm Biol* 78:391–400. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.11.004>

Rendoš M, Mock A, Jászay T (2012) **Spatial and temporal dynamics of invertebrates dwelling karstic mesovoid shallow substratum of Sivec National Nature Reserve**

(Slovakia), with emphasis on Coleoptera. *Biologia (Poland)* 67:1143–1151.
<https://doi.org/10.2478/s11756-012-0113-y>

Rendoš M, Raschmanová N, Kováč L, et al (2016) **Organic carbon content and temperature as substantial factors affecting diversity and vertical distribution of Collembola on forested scree slopes.** *Eur J Soil Biol* 75:180–187.
<https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2016.06.001>

RStudio Team (2022) **RStudio: Integrated Development Environment for R**

Růžička V, Dolanský J (2016) **Catching of spiders in shallow subterranean habitats in the Czech Republic.** *Arachnol Mitt* 2016:43–48. <https://doi.org/10.5431/aramit5106>

Schlik-Steiner, Steiner (2000) **Schlik-Steiner&Steiner2000_subteranne.pasce. Eine neue Subterranfalle und Fänge aus Kärnten 475–482**

Sousa JP, da Gama MM, Pinto C, et al (2004) **Effects of land-use on Collembola diversity patterns in a Mediterranean landscape.** In: *Pedobiologia*. Elsevier GmbH, pp 609–622

Winck BR, Saccol de Sá EL, Rigotti VM, Chauvat M (2017) **Relationship between land-use types and functional diversity of epigeic Collembola in Southern Brazil.** *Applied Soil Ecology* 109:49–59.

Zampaulo R (2010) **DIVERSIDADE DE INVERTEBRADOS CAVERNÍCOLAS NA PROVÍNCIA ESPELEOLÓGICA DE ARCOS, PAINS E DORESÓPOLIS (MG): SUBSÍDIOS PARA A DETERMINAÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA CONSERVAÇÃO**

Zeppelini D, Oliveira JVL, de Lima ECA, et al (2022) **Hotspot in ferruginous rock may have serious implications in Brazilian conservation policy.** *Sci Rep* 12:.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-18798-1>

MATERIAL SUPLEMENTAR
INFLUÊNCIA DAS ESTAÇÕES SECA E CHUVOSA SOBRE ASSEMBLEIA DE
COLÊMBOLOS EM MEIO SUBTERRÂNEO SUPERFICIAL NEOTROPICAL

Apêndice 1

Dataset A1. Listagem da abundância dos morfótipos de Collembola encontrados em cada estrato das estações amostrais ao longo do estudo.



DATASET_A1.xlsx

Apêndice 2

Tabela 3: Valores de temperatura média mensal (temp_med) e desvio padrão (desvpad) obtidos. AA = Ambiente Antropizado. FF = Fragmento Florestal.

Estação Amostragem	Ambiente	Profundidade	Data	Estação	temp_med	desvpad
1	AA	5	ago-20	seca	20.3	NA
2	FF	5	ago-20	seca	15.2	0.43
3	AA	5	ago-20	seca	19.7	0.56
6	AA	5	ago-20	seca	19.4	0.92
5	FF	5	ago-20	seca	16.6	0.4
6	FF	5	ago-20	seca	16.4	0.74
1	AA	5	set-20	seca	NA	NA
2	FF	5	set-20	seca	15.3	0.49
3	AA	5	set-20	seca	20.7	1.02
4	AA	5	set-20	seca	19.2	1.41
5	FF	5	set-20	seca	16.4	0.54
6	FF	5	set-20	seca	17.4	0.97
1	AA	5	out-20	chuva	23.2	1.13
2	FF	5	out-20	chuva	17.3	1.14
3	AA	5	out-20	chuva	23.1	1.05
4	AA	5	out-20	chuva	21.6	1.41
5	FF	5	out-20	chuva	18.3	1.01
6	FF	5	out-20	chuva	20.4	1.4
1	AA	5	nov-20	chuva	23.1	0.62
2	FF	5	nov-20	chuva	19.6	0.32
3	AA	5	nov-20	chuva	23.2	1.13
4	AA	5	nov-20	chuva	21.8	1.16
5	FF	5	nov-20	chuva	20	0.28
6	FF	5	nov-20	chuva	21.2	0.64
1	AA	5	dez-20	chuva	23.3	0.59
2	FF	5	dez-20	chuva	20.2	0.3
3	AA	5	dez-20	chuva	22.8	0.45
4	AA	5	dez-20	chuva	21.6	0.47
5	FF	5	dez-20	chuva	21.3	0.25
6	FF	5	dez-20	chuva	21.5	0.36
1	AA	5	jan-21	chuva	23.1	0.6

Estação Amostragem	Ambiente	Profundidade	Data	Estação	temp_med	desvpad
2	FF	5	jan-21	chuva	20.8	0.33
3	AA	5	jan-21	chuva	23	0.57
4	AA	5	jan-21	chuva	21.7	0.59
5	FF	5	jan-21	chuva	21.4	0.34
6	FF	5	jan-21	chuva	22.1	0.43
1	AA	5	fev-21	chuva	23.3	0.97
2	FF	5	fev-21	chuva	20.8	0.45
3	AA	5	fev-21	chuva	23.2	0.53
4	AA	5	fev-21	chuva	21.8	0.57
5	FF	5	fev-21	chuva	21.4	0.33
6	FF	5	fev-21	chuva	21.6	0.53
1	AA	5	mar-21	chuva	NA	NA
4	FF	5	mar-21	chuva	20.8	0.4
3	AA	5	mar-21	chuva	22.5	1.05
4	AA	5	mar-21	chuva	21.3	0.66
5	FF	5	mar-21	chuva	20.9	0.36
6	FF	5	mar-21	chuva	21.8	0.42
1	AA	5	abr-21	seca	20.7	0.75
2	FF	5	abr-21	seca	20.3	0.86
3	AA	5	abr-21	seca	23.9	0.68
4	AA	5	abr-21	seca	21.2	0.52
5	FF	5	abr-21	seca	20.8	0.36
6	FF	5	abr-21	seca	21	1.1
1	AA	5	mai-21	seca	20.6	0.53
2	FF	5	mai-21	seca	17.8	0.55
3	AA	5	mai-21	seca	22.4	0.54
4	AA	5	mai-21	seca	19.5	0.81
5	FF	5	mai-21	seca	18.7	0.45
2	FF	5	mai-21	seca	18.7	0.58
1	AA	5	jun-21	seca	19.1	1.06
2	FF	5	jun-21	seca	17.1	0.52
3	AA	5	jun-21	seca	21.4	0.57
4	AA	5	jun-21	seca	19.2	0.78
5	FF	5	jun-21	seca	18.1	0.48
6	FF	5	jun-21	seca	17.9	0.58
1	AA	5	jul-21	seca	17.8	0.86
2	FF	5	jul-21	seca	NA	NA
3	AA	5	jul-21	seca	19.8	0.86
4	AA	5	jul-21	seca	19.2	0.62
5	FF	5	jul-21	seca	16.9	0.95
6	FF	5	jul-21	seca	15.5	NA
1	AA	5	ago-21	seca	20.9	1.53
2	FF	5	ago-21	seca	NA	NA
3	AA	5	ago-21	seca	19.1	0.75
4	AA	5	ago-21	seca	NA	NA

Estação Amostragem	Ambiente	Profundidade	Data	Estação	temp_med	desvpad
5	FF	5	ago-21	seca	15.3	0.44
6	FF	5	ago-21	seca	NA	NA
1	AA	95	ago-20	seca	18.5	0.12
2	FF	95	ago-20	seca	16.8	0.25
3	AA	95	ago-20	seca	20	0
4	AA	95	ago-20	seca	19.9	0.17
5	FF	95	ago-20	seca	18	0
2	FF	95	ago-20	seca	18.5	0.14
1	AA	95	set-20	seca	18.3	0.25
2	FF	95	set-20	seca	16.5	0
3	AA	95	set-20	seca	20.1	0.23
4	AA	95	set-20	seca	19.9	0.26
5	FF	95	set-20	seca	17.9	0.19
6	FF	95	set-20	seca	18.3	0.24
1	AA	95	out-20	chuva	19.2	0.48
2	FF	95	out-20	chuva	16.9	0.38
3	AA	95	out-20	chuva	21	0.31
4	AA	95	out-20	chuva	20.5	0.37
5	FF	95	out-20	chuva	18.3	0.48
6	FF	95	out-20	chuva	19.4	0.52
1	AA	95	nov-20	chuva	20.8	0.29
2	FF	95	nov-20	chuva	18.4	0.39
3	AA	95	nov-20	chuva	21.9	0.16
4	AA	95	nov-20	chuva	21.5	0.09
5	FF	95	nov-20	chuva	19.4	0.32
2	FF	95	nov-20	chuva	20.9	0.21
1	AA	95	dez-20	chuva	21	0.14
2	FF	95	dez-20	chuva	19.2	0.27
3	AA	95	dez-20	chuva	22	0.11
4	AA	95	dez-20	chuva	21.4	0.15
5	FF	95	dez-20	chuva	20	0.2
6	FF	95	dez-20	chuva	21.1	0.22
1	AA	95	jan-21	chuva	21.8	0.25
4	FF	95	jan-21	chuva	19.9	0.25
3	AA	95	jan-21	chuva	22.2	0.25
4	AA	95	jan-21	chuva	21.6	0.21
5	FF	95	jan-21	chuva	20.5	0.18
6	FF	95	jan-21	chuva	21.9	0.21
1	AA	95	fev-21	chuva	22	1.67
2	FF	95	fev-21	chuva	20	0.05
3	AA	95	fev-21	chuva	22.6	0.99
4	AA	95	fev-21	chuva	21.7	0.26
5	FF	95	fev-21	chuva	20.7	0.28
6	FF	95	fev-21	chuva	21.6	1.88
1	AA	95	mar-21	chuva	21.8	1.57

Estação Amostragem	Ambiente	Profundidade	Data	Estação	temp_med	desvpad
2	FF	95	mar-21	chuva	20.2	0.28
3	AA	95	mar-21	chuva	22.2	0.25
6	AA	95	mar-21	chuva	21.5	0.12
5	FF	95	mar-21	chuva	20.6	0.21
6	FF	95	mar-21	chuva	21.6	1.1
1	AA	95	abr-21	seca	23	0.15
2	FF	95	abr-21	seca	20.1	0.4
3	AA	95	abr-21	seca	22.5	0.07
4	AA	95	abr-21	seca	21.5	0.04
5	FF	95	abr-21	seca	20.5	0.04
6	FF	95	abr-21	seca	21.3	0.31
1	AA	95	mai-21	seca	22	0.27
2	FF	95	mai-21	seca	18.9	0.38
3	AA	95	mai-21	seca	22.1	0.26
4	AA	95	mai-21	seca	21.1	0.52
5	FF	95	mai-21	seca	20.1	0.33
6	FF	95	mai-21	seca	20	0.37
1	AA	95	jun-21	seca	21.5	0.15
4	FF	95	jun-21	seca	18.3	0.25
3	AA	95	jun-21	seca	21.3	0.25
4	AA	95	jun-21	seca	20.5	0.04
5	FF	95	jun-21	seca	19.6	0.91
6	FF	95	jun-21	seca	19.1	0.24
1	AA	95	jul-21	seca	21.3	0.25
2	FF	95	jul-21	seca	16.8	0.98
3	AA	95	jul-21	seca	20.7	0.41
4	AA	95	jul-21	seca	20.5	0
5	FF	95	jul-21	seca	19.2	0.34
6	FF	95	jul-21	seca	17.9	0.53
1	AA	95	ago-21	seca	NA	NA
2	FF	95	ago-21	seca	15.7	0.29
3	AA	95	ago-21	seca	19.8	0.26
4	AA	95	ago-21	seca	NA	NA
5	FF	95	ago-21	seca	18.1	0.22
6	FF	95	ago-21	seca	16.9	0.17