UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA E BIODIVERSIDADE

O MEIO SUBTERRÂNEO SUPERFICIAL E A CONECTIVIDADE BIOLÓGICA NO SISTEMA FERRÍFERO DE CARAJÁS

DANIEL REIS MAIOLINO DE MENDONÇA

Orientador: Dr. Fernando Pacheco Rodrigues

Colaborador: Dr. Rodrigo Lopes Ferreira

Tese de doutorado

Brasília, 2023

MENDONÇA, Daniel Reis Maiolino.

O meio subterrâneo superficial e a conectividade biológica no sistema ferrífero de Carajás/ Daniel Reis Maiolino de Mendonça.

Brasília, 2023.

163 p.: il.

Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação e Biotecnoogia e Biodiversidade. Universidade de Brasília, Brasília.

1. estrutura da comunidade; 2. Meio Subterrâneo Superficial; 3. filogeografia de espécies troglóbias; 4. conservação da fauna subterrânea.

I. Universidade de Brasília.

II. Título.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Tese e emprestar ou vender tais cópias, somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta Tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

_____

Daniel Reis Maiolino de Mendonça

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA E BIODIVERSIDADE

O meio subterrâneo superficial e a conectividade biológica no sistema ferrífero de Carajás

Daniel Reis Maiolino de Mendonça

Tese de doutoramento submetida ao Programa de Pós-graduação em Biotecnologia e Biodiversidade da Universidade de Brasília, para banca de defesa, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de Grau de Doutor em Biotecnologia e Biodiversidade.

Aprovado por:

_____

Fernando Pacheco Rodrigues, Doutor (Programa de Pós-graduação em Biotecnologia e Biodiversidade/UnB)
(Orientador)

_____

Renato Caparroz, Doutor (Departamento de Genética e Morfologia/UnB)
(Examinador Interno)

_____

Luiz Iniesta, Doutor (Universidade Federal do Maranhão)
(Examinador Externo)

_____

Marcus Paulo Oliveira, Doutor (CEO da Bioespeleo/Colaborador do CEBS/UFLA)
(Examinador Externo)

Brasília – DF, 20 de novembro de 2023.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha família, Taína, Tomás e Raquel, que está para chegar, as pessoas mais importantes na minha vida, fontes inesgotáveis de inspiração que me deram força e desejo de continuar, já que o caminho do desconhecido não é fácil de se percorrer sozinho. Aos meus pais e irmão, que reconhecem o esforço do eterno aprendizado. A todos que ajudam a conservação ambiental do patrimônio espeleológico brasileiro, seguimos com a convicção de que a sustentabilidade é o único caminho.

À equipe de pesquisadores e analistas ambientais do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade pelo auxílio durante as pesquisas em campo, em especial Tiago Silva, que me ajudou na primeira coleta e análises estatísticas iniciais, e Diego Bento, que praticamente atuou como um terceiro orientador nas análises moleculares necessárias. À sempre prestativa equipe do NGI Carajás, que vem coordenando e desenvolvendo projetos de pesquisa na região. Grande abraço para André Vieira, Paulo Faiad e Manoel Delvo.

Agradeço ao Sr. Airton Barata pelo acesso às áreas de pesquisa durante o campo e toda a equipe da empresa Vale S.A. pela disponibilização da área e dos auxiliares de campo, e pelo financiamento por meio do Termo de Compensação Espeleológica – TCCE 01/2018.

Agradeço ao orientador desta pesquisa, Dr. Fernando Pacheco Rodrigues, da UnB, pelo apoio na organização do trabalho e disponibilização dos laboratórios vinculados ao Programa de Biotecnologia e Biodiversidade. Ao Prof. Dr. Renato Caparroz pelas disciplinas ministradas, que me inseriram no mundo das análises moleculares.

Ao Dr. Rodrigo Lopes Ferreira e Dr. Marconi Souza Silva, vinculados à Universidade Federal de Lavras e coordenadores do CEBS, responsáveis pela colaboração e disponibilização de mais de 25 especialistas em espeleologia para participação nas atividades de campo, bem como laboratórios de análises ecológicas e taxonômicas de grupos específicos, sem os quais a realização deste trabalho seria impossível.

Deixo meus agradecimentos à equipe da Universidade Federal Rural da Amazônia pela disponibilização de laboratório para triagem primária das amostras biológicas. Ao Dr. Guilherme Oliveira, Dr. Santelmo e Dr. Angélico Ansejo do Instituto de Tecnológico

Vale, em especial pela disponibilização de dados moleculares complementares, e aos técnicos Jamily e João, responsáveis pelos ensinamentos dos procedimentos laboratoriais de extração do material molecular de *Pseudoporatia* sp.

Meus agradecimentos ao Dr. Bruno Belini da Universidade Federal do Rio Grande do Norte em especial pela disponibilização de laboratório para continuação das atividades de triagem das amostras da estação chuvosa. Agradeço também em especial ao Dr. Douglas Zepellini e Dr. Roniere Brito vinculados à Universidade Estadual da Paraíba, pelo pareamento dos morfótipos junto à coleção de referência de Collembola.

Registo agradecimento ao Dr. Luis Iniesta à época, vinculado ao Instituto Butantã, especialista em Diplopoda, auxiliando na determinação do morfótipo encontrado na região estudada.

RESUMO GERAL

Baseado na amostragem da fauna subterrânea de artrópodes que ocupa os vazios da matriz rochosa que envolve as cavernas, o chamado Meio Subterrâneo Superficial (MSS), este trabalho teve como objetivo geral descrever o papel do MSS na dispersão da fauna subterrânea na formação ferrífera de Carajás. Para descrever a estrutura da comunidade e os padrões de distribuição de artrópodes do MSS de acordo com o tipo de isca utilizado, a profundidade e a sazonalidade climática na Formação Ferrífera de Carajás, a metodologia aplicada baseou-se na instalação de armadilhas em furos de sondagem a fim de amostrar os animais que estão transitando pelas descontinuidades do MSS de acordo com tipo de isca utilizada, profundidade e sazonalidade climática. A amostragem total de artrópodes subterrâneos resultou na coleta de 63 táxons. O tipo de isca influenciou significativamente a comunidade de aranha e ácaros, a profundidade apresentou relação significativa com a riqueza da fauna total, bem como outros grupos como Arane e Colembolla. Por sua vez, a sazonalidade climática afetou significativamente, ácaros, dípteras e coleópteras, devido à variação nos índices pluviométricos, mas principalmente à variação na proporção da zona vadosa e zona saturada no maciço. A riqueza e composição de espécies foram afetadas significativamente pelas três variáveis analisadas. As médias da riqueza e composição de espécies das amostras entre os furos de sondagem não evidenciaram a formação de agrupamentos, indicando uma ausência de estruturação da comunidade de artrópodes do platô analisado. A fim de analisar a estruturação genética entre diferentes cavernas na Formação Ferrífera Carajás foram coletadas amostras de *Pseudoporatia sp.* (Diplopoda: Pyrgodesmidae) encontradas comumente em cavernas ao longo da paisagem. Seu material genético foi extraído e hierarquizado, a fim de observar a existências de populações estruturadas ou até espécies crípticas. A análise filogenética de *Pseudoporatia* sp. foi realizada com base em 198 sequências do gene mitocondrial Cictocromo Oxidase I - COI. Baseado no mapa de haplótipos e no número de mutações observadas entre as populações foi possível verificar que o morfótipo estudado apresenta pouca ou nenhuma estruturação genética populacional dentro de um mesmo platô ou serra, contudo, de forma contrária, foi possível observar que as populações de áreas disjuntas podem ser compostas por um pool de espécies crípticas morfologicamente relacionadas, mas geneticamente diferentes. Estes resultados sugerem a conectividade biológica subterrânea em platôs contínuos e demonstram a necessidade de considerar o MSS nos levantamentos faunísticos na compatibilização da conservação da fauna subterrânea e o desenvolvimento de atividades minerárias na Floresta Nacional de Carajás a fim de evitar a perda liquida de espécies.

Palavras-chave: Estrutura da comunidade; Meio Subterrâneo Superficial; Filogeografia de espécies troglóbias; conservação da fauna subterrânea; genética da conservação.

GENERAL ABSTRACT

Based on sampling the subterranean fauna of arthropods that occupy the voids in the rock matrix that surrounds the caves, the so-called Superficial Subterranean Environment (MSS), this work had the general objective of describing the role of the MSS in the dispersion of subterranean fauna in the Carajás iron formation. To describe the community structure and distribution patterns of MSS arthropods according to the type of bait used, depth and climatic seasonality in the Carajás Iron Formation, the methodology applied based on the installation of traps in drilling holes at in order to sample animals that are transiting through the MSS discontinuities according to the type of bait used, depth and climatic seasonality. A total sampling of arthropods selected from the collection of 63 *taxa*. The kind of bait significantly influenced the Aachnida and Acari community, the depth showed a significant relationship with the richness of the total fauna, as well as other groups such as Arane and Colembolla. In turn, climatic seasonality significantly affected mites, diptera and coleoptera, due to the variation in rainfall rates, but mainly to the variation in the proportion of the vada zone and saturated zone in the massif. Species richness and composition were significantly affected by the three variations observed. The species richness and composition media of the samples between the drilling holes did not show the formation of clusters, reducing the lack of structure in the arthropod community on the consolidated plateau. In order to analyze the genetic structure between *Pseudoporatia* sp. from different caves in the Carajás Iron Formation, samples of Pseudoporatia sp. (Diplopoda: Pyrgodesmidae) commonly found in caves throughout the landscape. Its genetic material was extracted and hierarchized, in order to observe the existence of structured populations or even cryptic species. The phylogenetic analysis of *Pseudoporatia* sp. was carried out based on 198 sequences of mitochondrial gene Cyclochrome Oxidase I - COI. Based on the haplotype map and the number of mutations observed among populations, We notice the studied morphotype presents a poor population genetic structure in the same plateau or mountain range. However, on the other way, it was possible to observe that populations in separeted areas may be composed of a pool of morphologically related but genetically different cryptic species. These results corroborate the underground biological connectivity in continuous plateaus and demonstrate the need to consider the MSS in faunal surveys to make the conservation of underground fauna compatible with the development of mining activities in the Carajás National Forest in order to avoid the loss of species.

Keywords: Community structure; Surface underground habitat; Troglobites; underground connectivity; Conservation of underground fauna; Genetic of conservation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Geosistemas ferruginosos do Brasil (SOUZA e CARMO, 2015).

Figura 2: Testemunho de furo de sondagem de canga em Carajás evidenciando os canalículos e demais falhas presentes no subsolo interceptadas pelos furos de sondagem. Fonte: arquivo pessoal.

Figura 3. Localização da FLONA Carajás (em amarelo), PARNA Campos Ferruginosos (em verde), respectivas Serras (círculos em laranja) e sede dos municípios (círculos brancos). Fonte elaboração própria, adaptado de Zappi et al. (2022).

Figura 4: A. Matriz florestal nas áreas onde não ocorre a formação ferrífera; B. Vista geral do topo de um platô na região de Carajás; C. Lagoas; D. e E. Campos rupestres; F. Canga, evidenciando sua porosidade, e G. Formação savânica típica de topo de platô durante a estação seca. Fonte: arquivo CECAV.

Figura 5: Zona de quebra do relevo entre o topo do platô em formação ferrífera e a formação florestal na vertente apresentando cavidades (arquivo pessoal).

Figura :6 a) Meio subterrâneo superficial, caracterizado por descontinuidades na rocha com alta permeabilidade a fauna e presença de raízes com baixa profundidade. Fonte: Culver e Pipan (2014). b) Formação Ferrífera no oeste australiano evidenciando a carapaça laterítica com cavernas pequenas (CLARK et al., 2021). c) Formação ferrífera na Amazônia brasileira, evidenciando a ocorrência de grandes cavernas no contato entre a canga (carapaça laterítica) e o minério de ferro (arquivo pessoal).

Figura 7: Caverna oclusa interceptada durante operações na mina do platô N4 na Formação Ferrífera Carajas em Janeiro de 2023 (arquivo ICMBio)

Figura 8: Método de busca ativa por invertebrados para coleta em cavernas. Fotos: Arquivo Cecav.

Figura 9: Método de levantamento passivo por meio de armadilhas instaladas manualmente em MSS em formação calcária em Minas Gerais (ARGOLO, 2022).

Figura 10: Tipos de feições geomorfológicas que favorecem a permeabilidade à fauna entre as macrocavidades estudadas: A) formação em Jaspilito apresentando falhas por dobramentos encontrados na Cav 0030; B) fendas e blocos de abatimento estrutural encontrados na Cav ST0003; C) conjunto de pequenos poros adensados encontrados na

Cav ST0003, e D) poro ou mesocavidade não acessível pelo ser humano encontrado na Cav ST0041. Fonte: arquivo pessoal.

Figura 11: Localização dos platôs da FLONA Carajás, incluindo N3. Fonte: ICMBio, 2018.

Figura 12: Desenho amostral da distribuição das armadilhas. A isca padrão é composta apenas por folhiço local esterilizado e a isca enriquecida corresponde a este folhiço acrescido de fígado moído.

Figura 13: Localização dos pontos de coleta em N3 de acordo com o tratamento utilizado. Pontos em vermelho representam os furos que continham isca enriquecida. Os pontos em verde representam os furos com iscas padrão, em amarelo são as cavernas e em laranja, as cavernas com alta riqueza de espécies.

Figura 14: Interceptação das descontinuidades do MSS pelos furos de sondagem.

Figura 15: Equipamento de amostragem da troglofauna nos levantamentos faunísticos em formação ferrífera no oeste australiano: (A) modelo da armadilha e (B) ilustração da introdução da armadilha. Fonte: Halse e Pearson (2014).

Figura 16: Método de levantamento passivo por meio de armadilhas de furo de sondagem com iscas.

Figura 17: Ocorrência dos táxons mais abundantes amostrados por armadilhas no platô N3 na estação seca em Carajás/PA.

Figura 18: Boxplot da riqueza de aranhas de acordo com o tipo de isca. (R^2= 3.399, ***P value*** 0.000677).

Figura 19: Boxplot da riqueza de ácaros de acordo com o tipo de isca utilizado, independentemente da estação do ano (R^2= -3.014, ***P value*** 0.00258).

Figura 20: Boxplot da relação entre a riqueza total de morfótipos que utilizam o habitat subterrâneo em relação às profundidades estudadas (R^2= 0.07078, *P-value* <0.001*).

Figura 21: GLMM da relação entre a riqueza de espécies de aranhas e a profundidae (R^2= -2.584, ***P value*** = 0.009777).

Figura 22: GLMM da relação entre a riqueza de espécies de Collembola e a profundidade (R^2= -2.866, ***P value*** 0.00416).

Figura 23: Localização dos furos de sondagem utilizados para o monitoramento do nível da água estocada no maciço no platô N3.

FIGURA 24: Os dados obtidos em estudos realizados na Serra Norte ao longo do tempo mostram uma ampla variação pluviométrica entre as estações climáticas.

Figura 25: Boxplot da riqueza de ácaros de acordo com a estação climática (R^2= 2.427, ***P value*** 0.01522).

Figura 26: Boxplot da relação entre a riqueza de morfótipos de dípteras de acordo com a estação. (R^2= -2.615, ***P value*** 0.008921).

Figura 27: Boxplot da relação entre a riqueza de morfótipos de coleópteras de acordo com a estação (R^2= -2.362 ***P value*** 0.0182).

Figura 28: Agrupamento multidimensional da dissimilaridade na composição da fauna entre os furos utilizando-se o Indice de diversidade de Jaccard. De acordo com o valor de *R* (0,1564), foi observada uma baixa diversidade (*p*: 0,0001) entre os 24 furos, em que percebe-se pouca diferenciação entre as amostras. Os polígonos representam os furos e os pontos representam as armadilhas.

Figura 29: *Turnover* foi o componente da beta diversidade que explicou a variação encontrada nas armadilhas de acordo com os fatores analisados, uma vez que apresentou os índices de dissimilaridade de Sorensen mais elevados.

Figura 30: Curva de rarefação de espécies de acordo com os diversos índices e com base na metodologia utilizada.

Figura 31: espécies encontradas com alguma característica troglomórfica

Figura 32. Espécies ainda não descritas, coletadas neste trabalho, avaliadas por especialista no grupo.

Figura 33: Mapa da ocorrência de táxons novos e troglomórficos encontrados na área de estudo.

Figura 34: (A) Paisagem durante a estação seca e (B) paisagem durante a estação chuvosa, evidenciando alguns dos pontos de coleta abaixo do nível da água, o que deve ser um dos fatores que provavelmente influenciam na composição da fauna entre as estações.

Figura 35: Diplópodes encontrados em cavernas no Brasil. A) Spirostreptida: *Pseudonannolene ambuatinga*; B) Siphonophorida; C) Polyxenida; D) Polydesmida:

Pyrgodesmidae; E) Polydesmidae: Chelodesmidae F) Glomeridesmida: *Glomeridesmus spelaeus*. Fonte: Iniesta, et al. (2022).

Figura 36: Desenho esquemático representando ambiente subterrâneo por meio de uma caverna, contudo as variações de luz, recursos tróficos e variáveis climática são semelhantes ao que ocorre em outros microhabitats do meio subterrâneo. Fonte: elaboração própria, adaptado de Mammola, (2018).

Figura 37: Evolução da paisagem ferrífera em Carajás, evidenciando sua origem há cerca de 70 milhões de anos, bem com o isolamento dos platôs da formação ferrífera, há pelo menos 30 milhões de anos. Fonte: Zappi, 2017.

Figura 38: Exemplar de *Pseudoporatia sp* (Diplopoda: Polydesmida) sobre piso de cavidade. Adaptado de Bioespeleo (2018).

Figura 39: etapas de preparação das amostras, extração e sequenciamento de DNA.

Figura 40: Estruturas gonopodais de *Pseudopratia* sp. Fonte: Iniesta, L. (comunicação pessoal).

Figura 41: Mapa das cavidades amostradas em N3.

Figura 42: Mapa das cavidades amostradas no platô Serra Leste.

Figura 43: Mapa das cavidades amostradas no platô Serra da Bocaina.

Figura 44: Localização das amostras de *Pseudoporatia* sp. obtidas a partir de dados secundários.

Figura 45: distância entre o platô N3 em relação à N4 e N5, que apresentam uma continuidade na paisagem.

Figura 46: Reconstrução filogenética – máxima verossimilhança. É possível notar a proximidade entre as amostras de cavernas em Serra Norte (polígono verde), bem como notar a divergência entre cavernas de diferentes serras.

Figura 47: Rede de haplótipos amostrados em populações de Pseudoporatia sp. na formação ferrífera de Carajás. Em verde os haplotipos de N3, em tons amarelos, N4 e N5. Em rosa, Serra Leste e em verde escuro Serra da Bocaina. Fonte: elaboração própria.

Figura 48: Paisagem e rede de haplótipos entre aas serras de acordo com os resultados obtidos a partir das análises moleculares. Fonte: elaboração própria.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distâncias geográficas entre as áreas amostrais.

Tabela 2. Coordenadas geográficas dos furos de sondagem onde as armadilhas foram inseridas.

Tabela 3: Lista de táxons amostrados no MSS no platô N3 (Serra Norte).

Tabela 4: Riquezas da fauna total amostradas nos furos de sondagem.

Tabela 5 Relação da média de riqueza de espécies encontrada em cada profundidade a partir dos furos de sondagem que continuam todas as armadilhas.

Tabela 6: Variação da cota do nível d'água em relação à estação climática.

Tabela 7. Relação da riqueza e composição das variáveis estudadas de acordo com o método de análise.

Tabela 8. Índices de Shannon de cada armadilha.

Tabela 9: Áreas amostradas e quantitativo de amostras coletadas e analisadas.

Tabela 10: Parâmetros analisados nas populações de cada cavidades amostradas.

Tabela 11: Estimativas médias das distâncias genéticas com base nos pares de sequências dentro de cada caverna.

Tabela 12: estimativas das divergências evolutivas com base nos pares de sequências entre as cavernas amostradas.

Tabela 13: Ordenamento das populações amostradas.

Tabela 14: comparação par a par do Fst entre populações.

Tabela 15: Matriz de significância dos valores P de Fst a partir de 110 permutações e nível de significância de 0,05.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL vi
GENERAL ABSTRACT vii
LISTA DE FIGURAS viii
LISTA DE TABELAS xii
INTRODUÇÃO GERAL 1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 10
CAPÍTULO 1 13
1. Introdução 15
1.1. Diversidade de sistemas subterrâneos além das cavidades 15
1.2. Amostragem da fauna subterrâea 20
1.3. Dinâmica ecológica do ambiente subterrâneo em formação ferrífera 24
2. Objetivos 29
2.1. Objetivo principal: 29
2.2. Objetivos específicos: 29
3. Metodologia 29
3.1. Caracterização ecológica da comunidade de artrópodes encontrada no MSS 30
3.2. Efeito das variáveis ambientais sobre a riqueza e composição de espécies da comunidade de artrópodes do MSS 35
3.3. Betadiversidade da comunidade de artrópodes do habitat subterrâneo 36
4. Resultados 36
4.1. Caracterização ecológica da comunidade de artrópodes encontrada no MSS 36
4.2. Efeito das variáveis ambientais sobre a riqueza e composição de espécies observadas 38
4.3. Betadiversidade da comunidade de artrópodes do habitat subterrâneo. 47
5. Discussão 51
6. Conclusões 57
7. Referências bibliográficas 59
CAPÍTULO 2 68
1.Introdução 70
1.1. A Classe Diplopoda e a Família Pyrgodesmidae (SILVESTRI, 1896) 70
1.2. Aspectos ecológicos do meio subterrâneo 73
1.3. Abordagem molecular 80
1.4. Estratégias de Conservação de espécies da fauna subterrânea 84
2. Objetivos 85

2.1. Objetivo Principal: ... 85

2.2. Objetivos específicos: ... 85

3. Metodologia ... 85

3.1. Área de trabalho ... 85

3.2. Seleção e coleta da espécie modelo em cavernas selecionadas ... 85

3.3. Análise da estruturação genética em populações de *Pseudoporatia* sp., com base na sequência do marcador mitocondrial COI ... 89

3.4. Construção da rede de haplótipos ... 91

4. Resultados ... 91

4.1. Seleção e coleta da espécie modelo em cavernas selecionadas ... 91

4.2. Análise da estruturação genética em populações de *Pseudoporatia* sp., com base na sequência do marcador mitocondrial COI ... 94

4.3. Construção de rede de haplótipos ... 103

5. Discussão ... 104

6. Conclusões ... 106

7. Referências bibliográficas ... 108

CONCLUSÕES GERAIS ... 115

ANEXO 1 - Autorização SISBIO ... 117

ANEXO 2 – Resumo 35º CBE ... 118

ANEXO 3 – Artigo RBEsp ... 132

ANEXO 4 – Resumo 37º CBE ... 152

ANEXO 5 – Resumo 1º CGBio ... 162

INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil, existem seis áreas com formação ferrífera, localizadas nos estados de Minas Gerais (Quadrilátero Ferrífero, Vale do Peixe Bravo e bacia do rio Santo Antônio), Pará (Formação Carajás), Mato Grosso do Sul (Formação Urucum) e Bahia (Caitité) (CARMO, 2010; CARMO e KAMINO, 2015; RASTEIRO et al, 2015), sendo as áreas do Quadrilátero Ferrífero e a Serra de Carajás as duas áreas mais importantes em termos de produção de minério de ferro e número de cavernas[1] (FIGURA 1).

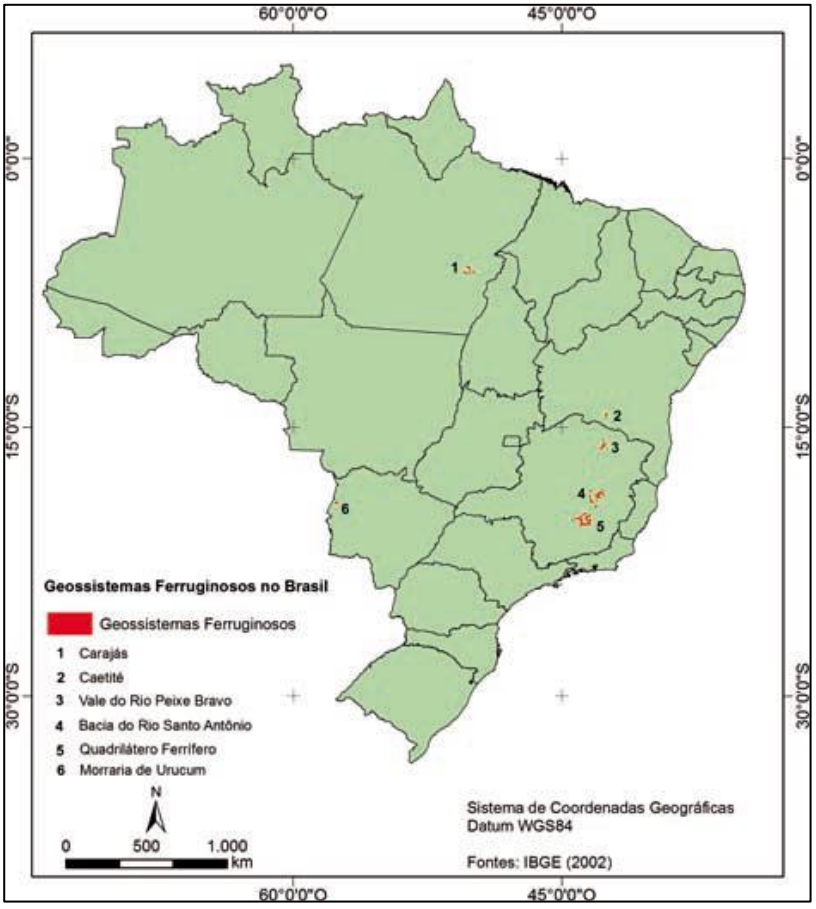


Figura 1: Geosistemas ferruginosos do Brasil (SOUZA e CARMO, 2015).

As formações ferruginosas são áreas com grandes depósitos de minério de ferro e são consideradas de importância econômica e de uso conflitivo. Desde a utilização do

[1] Caverna, gruta, lapa, toca, abismo, furna ou buracos são denominações populares dadas às cavidades naturais subterrâneas e correspondem ao espaço subterrâneo acessível pelo ser humano, com ou sem abertura identificada, incluídos o seu ambiente, o conteúdo mineral e hídrico, a fauna e a flora presentes e o corpo rochoso onde se inserem, desde que tenham sido formados por processos naturais, independentemente de suas dimensões ou tipo de rocha encaixante (BRASIL, 2022).

ferro em larga escala já se sabe que a extração do minério leva à perda ou degradação de elementos como relevo, a paisagem, a capacidade de recarga dos aquíferos e a biodiversidade, ou seja, altera o equilíbrio ecológico deste ambiente.

Ferreira (2005) descreveu a presença de canalículos como uma extensa rede de espaços consolidados e conectados às cavernas, originado por descontinuidades da própria rocha (FIGURA 2). A presença destas conexões subterrâneas seria uma característica marcante nos sistemas subterrâneos ferruginosos (SOUZA SILVA et al., 2011). Alguns pesquisadores relataram a ocorrência de artrópodes no interior de canalículos (ANDRADE e SABACK, 2015; SOARES et al., 2016), contudo, são poucas as publicações sobre o tema.

Figura 2: Testemunho de furo de sondagem de canga em Carajás evidenciando os canalículos e demais falhas presentes no subsolo interceptadas pelos furos de sondagem. Fonte: arquivo pessoal.

Pesquisas focadas em padrões ecológicos que tragam uma compreensão mais ampla sobre a distribuição das espécies no sistema subterrâneo ferruginoso e que contribuam para a interface entre conservação e mineração ainda são escassas. Nesta perspectiva, estes estudos contribuem também para o licenciamento ambiental, na medida em que podem aprimorar o instrumento denominado Área de Influência de caverna,

estabelecido pela Resolução CONAMA 347/2004. Em outras palavras, são necessárias abordagens metodológicas para entender os habitats subterrâneos como um todo, não apenas as cavernas, considerando o conjunto de elementos bióticos e abióticos.

Estudos recentes apontam a necessidade de entendimento das variáveis que interferem na conectividade subterrânea nas áreas com cavidades a serem impactadas a fim de elucidar os fatores que determinam a dispersão de espécies troglóbias[2] (ZEPELLINI, 2022). O uso de ferramentas moleculares na identificação de estruturas populacionais pode auxiliar tanto no entendimento da distribuição destas espécies como na identificação taxonômica de espécies crípticas, definindo espécies distintas, restritas a uma determinada localidade (BENTO, 2021).

Tendo em vista que a possibilidade de conectividade subterrânea na paisagem ferrífera representa um dos fatores críticos quando se pensa no uso/supressão de uma cavidade (FERREIRA et. al. 2015) este trabalho abordou a conservação do ecossistema de campos ferruginosos na Amazônia com base na utilização de técnicas de amostragem e análise de dados ecológicos e genéticos para a proposição de modelos de conservação da paisagem. Desta forma, esta tese foi parte dos requisitos para obtenção de título de doutor no Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia e Biodiversidade pela Universidade de Brasília por meio do desenvolvimento de um projeto na linha de pesquisa bioeconomia e conservação dos recursos naturais.

Área de estudo

Para o desenvolvimento desta tese, optou-se como área de estudo a Formação Ferrífera de Carajás, no Estado do Pará, no bioma Amazônico. As atividades de campo ocorreram na Serra Norte e Serra Sul, localizadas dentro da Floresta Nacional (FLONA) de Carajás; Serra da Bocaina, dentro do Parque Nacional (PARNA) dos Campos Ferruginosos, e Serra Leste, localizada fora de unidade de conservação (FIGURA 3).

[2] Espécies restritas ao ambiente subterrâneo (RACOVITZA, 1907).

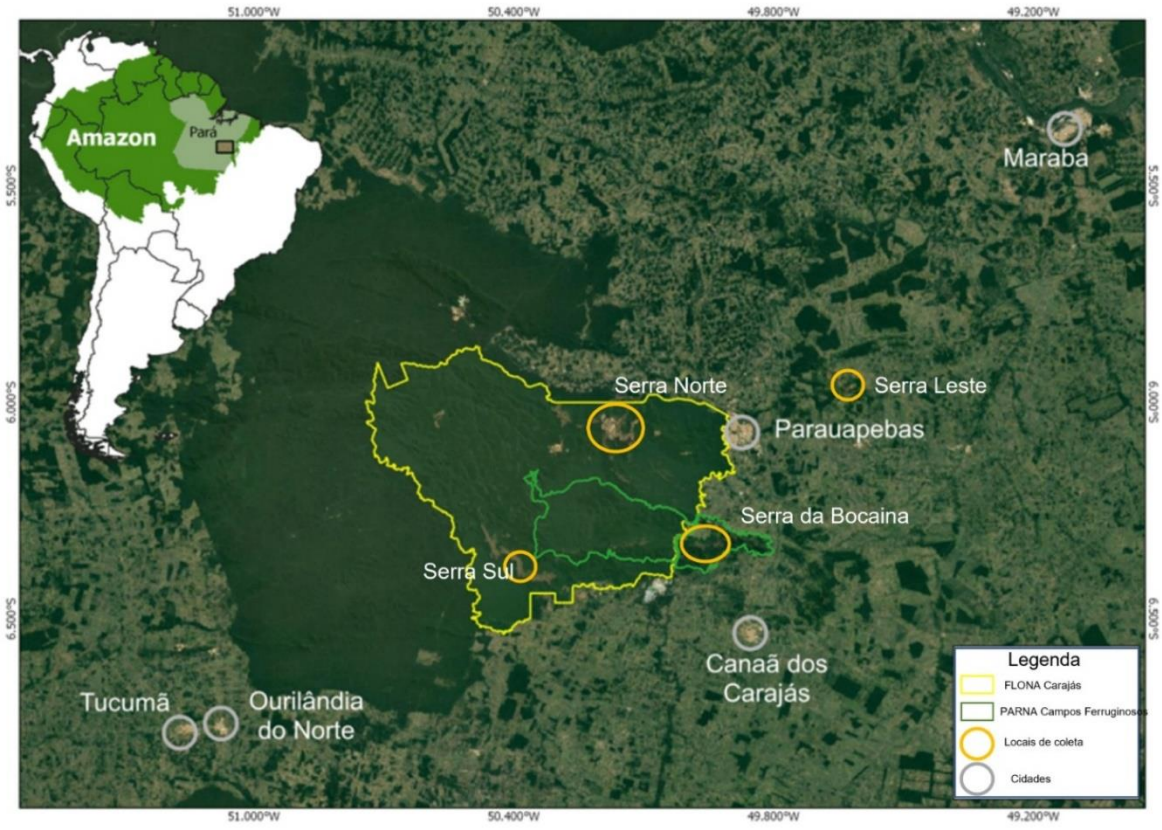


Figura 3. Localização da FLONA Carajás (em amarelo), PARNA Campos Ferruginosos (em verde), respectivas Serras (círculos em laranja) e sede dos municípios (círculos brancos). Fonte: elaboração própria, adaptado de Zappi et al. (2022).

Serra Norte abriga diversas cavernas registradas (CAMPOS, 2012; CARSTE, 2014), ocorrendo em áreas disjuntas denominadas platôs. Este trabalho foi desenvolvido nos platôs N3, N4 e N5.

Outra área amostrada foi a Serra Leste, distante cerca de 60 km a leste de Serra Norte, constituindo uma formação geograficamente independente apesar de pertencer à mesma província geológica. Em Serra Leste são conhecidas 252 cavernas (CARSTE, 2011, 2013; ECOSSISTEMA, 2013). Bioespeleo (2018) obteve dados que indicam a existência de cavernas em Serra Leste com desenvolvimento linear e área médias de 20,9m e 77,9m², respectivamente, 1.435 morfoespécies, sendo 97,5% invertebrados e 2,5% vertebrados. Dentre as espécies amostradas, 60 apresentaram características morfológicas que indicam restrição ao ambiente subterrâneo e foram consideradas como troglomórficas.

Por sua vez, a Serra da Bocaina possui cerca de 270 cavernas registradas. Esta Serra se localiza dentro do PARNA dos Campos Ferruginosos de Carajás, criado para o cumprimento da condicionante determinada pelo IBAMA[3]/ICMBio[4] à mineradora Vale/SA como compensação ambiental pela instalação do Projeto de Mineração Ferro Carajás S11D (ICMBio, 2017) que afeta as áreas de conservação de Carajás.

Por último, as atividades de campo foram realizadas em Serra Sul, em seu platô S11C. Nesta Serra há registro de 1000 cavernas.

Na tabela 1 são mostradas as distâncias geográficas entre as áreas amostrais (Serra Norte, Serra Sul, Serra Leste e Serra da Bocaina).

Tabela 1: Distâncias geográficas entre as áreas amostrais.

	Serra Norte	Serra da Bocaina	Serra Leste	Serra Sul
Serra Norte	0	42	65	42
Serra da Bocaina	42	0	50	52
Serra Leste	65	50	0	95
Serra Sul	42	52	95	0

Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados georreferenciados.

No que se refere ao desenvolvimento da paisagem, a Formação Ferrífera de Carajás apresenta um padrão de relevo marcado pela presença de serras de topos aplainados, denominados de Planaltos Residuais do Sul da Amazônia (VALENTIM e OLIVITO, 2011) e destaca-se pelo compartimento de topo das serras acima de 700 m, sustentado pela formação ferrífera e pelas coberturas de canga, caracterizado pela vegetação com fisionomia típica do bioma Cerrado (PILÓ et al., 2015). Além da superfície de topo, merecem destaque as bordas dos platôs, onde a paisagem está sendo erodida pelo intemperismo, revelando cavidades anteriormente oclusas (PILÓ et al, 2015).

Nesta área, a evolução da paisagem ferrífera promoveu o desenvolvimento de unidades da paisagem com base na sua fitofisionomia (FIGURA 4).

[3] Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, autarquia federal vinculado do Ministério do Meio Ambiente (Lei nº 7.735, de 22 de fevereiro de 1989).
[4] Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, autarquia federal vinculada ao Ministério do Meio Ambiente (Lei nº 11.516, de 28 de agosto de 2007).

Figura 4: A. Matriz florestal nas áreas onde não ocorre a formação ferrífera; B. Vista geral do topo de um platô na região de Carajás; C. Lagoas; D. e E. Campos rupestres; F. Canga, evidenciando sua porosidade, e G. Formação savânica típica de topo de platô durante a estação seca. Fonte: arquivo CECAV.

Segundo Piló e Auler (2005; 2009), as cavernas encontram-se, de um modo geral, inseridas na base de pequenas escarpas rochosas (FIGURA 5).

Figura 5: Zona de quebra do relevo entre o topo do platô em formação ferrífera e a formação florestal na vertente apresentando cavidades (arquivo pessoal).

A Formação Ferrífera de Carajás apresenta umidade relativa e taxas de precipitação suficientes para manter a floresta equatorial úmida que originalmente a cobria (GOLDER, 2005). O clima é de tipo montano ou serrano amazônico, com temperaturas médias anuais em torno de 21 a 22ºC, em contraste com 25 a 26ºC das áreas entre Marabá e Parauapebas. A amplitude térmica anual entre o mês mais quente e o mês mais frio não passa de 3 graus centígrados (GOLDER, 2005).

A estação chuvosa concentra entre 75% e 80% do total anual de precipitação pluviométrica durante os meses de novembro a abril, com média de precipitação pluviométrica de 229 mm (COSTA, 2014). Por sua vez, a estação seca ocorre de junho a setembro, correspondendo a 14,5% do total das precipitações anuais e uma média de 34 mm de precipitação no período. Foram também identificados dois períodos de transição, um de chuvoso para seco, em maio, e outro de seco para chuvoso, em outubro, podendo se estender até novembro. A síntese dos dados de precipitação, traduzidos em totais mensais, confirma a sazonalidade na ocorrência de chuvas, assim como os períodos de transição de época seca para chuvosa (COSTA, 2014).

Em média, as chuvas mais intensas no verão (dezembro a março) ocorrem concomitantes ao aumento da nebulosidade e à diminuição da insolação (número de horas de exposição à luz solar). Em contrapartida, os meses secos (junho, julho e agosto) apresentam baixa nebulosidade, o que ocasiona maior incidência dos raios solares na região. As variações médias anuais de temperatura estão entre 1,0°C e 1,8°C, sendo influenciadas pela densidade da rede hidrográfica e da massa florestal, pela diferenciação de altitude, dos ciclos climáticos, diferenciação dos tipos de superfícies (canga ferruginosa, ambiente florestal, entre outros) (GOLDER, 2005, 2009).

Apesar de pouca amplitude, os meses de temperaturas mais amenas correspondem ao período de janeiro a março, coincidindo com os maiores índices pluviométricos e a presença de maior nebulosidade. Em contrapartida, as maiores temperaturas são registradas nos meses de junho a agosto, coincidindo com os menores volumes de precipitação. Isso significa que nos quatro meses mencionados, ocorre uma alta taxa de evaporação média mensal e uma baixa precipitação pluviométrica, ocasionando um déficit de água em toda a região de abrangência da estação climatológica (GOLDER, 2009; PILÓ e AULER, 2009; VALENTIM e OLIVITO, 2011).

Um dos principais fatores para escolha das áreas para desenvolvimento das atividades de campo foi o fato de serem regiões logisticamente bem-posicionadas e fora de áreas de mina. Isto facilitou os deslocamentos diários em curta distância sem a necessidade de transitar em áreas de lavra em operação, onde a logística e a segurança dificultam o acesso. O fato de localizar-se dentro de unidades de conservação federal, gerida pelo ICMBio, também atua como um fator facilitador.

Estrutura da tese

A tese foi estruturada em dois capítulos. No capítulo um é apresentado o primeiro registro da fauna de artrópodes que ocupa o ambiente subterrâneo além das cavernas, o chamado Meio Subterrâneo Superficial (MSS). Também é apresentada a relação entre a riqueza e a composição de espécies com variáveis ambientais que estruturam comunidade, a fim de examinar o padrão de distribuição espacial das espécies ao longo do perfil de profundidade e sazonalidade climática, de acordo com a isca utilizada.

No segundo capitulo são realizadas análises de estruturação genética populacional do morfótipo *Pseudoporatia* sp. (Diplopoda Pyrgodesmidae), associado às cavernas na

região. Trata-se de uma espécie ainda não descrita, comumente encontrada em cavernas e com possibilidade de ser caracterizada como troglóbias, devido a sua associação com o meio subterrâneo.

Os objetivos específicos, o refinamento da área de estudo e a metodologia específica de cada capítulo serão descritos adiante. O trabalho finaliza com as considerações finais e anexos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, R.; SABACK, L. Levantamento da fauna troglomórfica em meso e micro cavidades no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In**: I Simpósio Brasileiro de Biologia Subterrânea,** 2015, Lavras. SBBS – Resumos. Lavras, v. 1, 2015.

BIOESPELEO. Consultoria Ambiental. **Revisão da análise de relevância Serra Leste**. 2018.

BENTO, D. M. Filogeografia de artrópodes troglóbios do Oeste da formação Jandaíra, Nordeste do Brasil: evolução e conectividade biológica em ambientes subterrâneos como base para ações de conservação. **Tese.** Doutorado em Sistemática e Evolução do Centro de Biociências da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2021.

BRASIL. Decreto nº 10935, de 12 de janeiro de 2022. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. 2022.

CARMO, F. F. Importância ambiental e estado de conservação dos ecossistemas de cangas no Quadrilátero Ferrífero e proposta de Áreas-Alvo para a Investigação e Proteção da Biodiversidade em Minas Gerais. **Dissertação de Mestrado**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Biológicas. 90 p, 2010.

CARMO F.F.; KAMINO L. H. **Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais** / organizado por Flávio Fonseca do Carmo e Luciana Hiromi Yoshino Kamino. — Belo Horizonte: 3iEditora, 2015.

CARSTE Consultores Associados. **Serra Leste – Espeleologia: Diagnóstico espeleológico, diagnóstico bioespeleológico e análise de relevância.** Belo Horizonte, Minas Gerais. 549p. 2011.

CARSTE. Consultores Associados. **Pareamento de espécies troglómórficas**. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2013.

CARSTE. Consultores Associados. **Estudos Espeleológicos do Projeto Serra Norte Geoespeleologia, Bioespeleologia,** Análise de Relevância. Belo Horizonte. 301pp. 2014.

COSTA, M. F. Proposta de metodologia para avaliação da qualidade das águas na área de influência de minas a céu aberto: caso da mina N5sul em Carajás-PA. **Tese.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS, 2014.

ECOSSISTEMA. **Reavaliação das espécies troglomórficas de Serra Leste 1, N5 Morro 1 e 2 a partir do levantamento de comunidades epígeas de Serra Leste 1 e Morro 2**. Curitiba, Paraná. 231p. 2013.

FERREIRA, R. L. A vida subterrânea nos campos ferruginosos. **O Carste** (Belo Horizonte), v. 3, p. 106-115. 2005.

FERREIRA, R. L.; OLIVEIRA, M. P. A.; SOUZA-SILVA, M. Biodiversidade subterrânea em geossistemas ferruginosos. IN: **Geossistemas Ferruginosos do Brasil:**

áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais / organizado por Flávio Fonseca do Carmo e Luciana Hiromi Yoshino Kamino. Belo Horizonte: 3i Editora, 2015.

GOLDER ASSOCIATES BRASIL CONSULTORIA E PROJETOS LTDA. **Relatório de Controle Ambiental. Projeto Serra Norte 100 Mtpa**. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2005.

GOLDER ASSOCIATES BRASIL CONSULTORIA E PROJETOS LTDA**. Relatório de Análise de Similaridade das Paisagens de Savana Metalófila: Projeto Área Mínima de Canga – 2ª Aproximação**. Belo Horizonte, 2009.

ICMBIO. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Plano de pesquisa geossistemas ferruginosos da Floresta Nacional de Carajás** Brasília. 82pp. 2017.

PILÓ, L. B.; AULER, A. S. Geoespeleologia das cavernas em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. In: **30º CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 30, 2009. Montes Claros. Anais.** SBE. p. 181-186, 2009.

PILÓ, L. B.; COELHO, A. E REINO, J. C. R. Espeleologia em rochas ferríferas: Cenário atual e conservação. 126-149 pp. In: Ruchkys U. A. Travassos, L. E. P. Rasteriro, M. A. Faria, L. E. (Eds.). **Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas: propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. Campinas/SP, Sociedade Brasileira de Espeleologia, 351 p, 2015.

PILÓ, L. B.; RIBEIRO, A.A., REINO, J. C. R.; CRUZ J. B.; MENDONÇA, D. R. M. Espeleologia na Flona Carajás - cenários para conservação e mineração. In: **Projeto cenários: conservação de campos ferruginosos diante da mineração em Carajás** / Frederico Drumond Martins, Luciana Hiromi Yoshino Kamino e Katia Torres Ribeiro (organizadores). – 1. ed. – Tubarão (SC): Copiart, 2018.

RACOVITZA, E. G. Essai sur les problèmes biospéologiques. Archives de Zoologie Expérimentale et Générale, 4ª ser., v.6, p371-488 Edición Facsímil. In: BELLÉS, X, (Ed.). 2004. **Assaig sobre els problemes bioespeleològics**. Institut d´Estudis Catalans, Barcelona. 1907.

RASTEIRO, M.A.; SALLUN FILHO, W. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33, 2015. Eldorado. ***Anais...*** Campinas: SBE, 2015. p.87-97. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_087-097.pdf>. 2015.

SOARES, G.; ANDRADE, R.; PERRONI, G. Troglomorphic fauna sampling methods in canga formations, Minas Gerais State, Brazil. In: **International Conference on Subterranean Biology**, Fayetteville. ICSB -Abstracts. 2016. v.1. p.96, 2016.

SOUZA, F. C. R.; CARMO, F. F. Geossistemas Ferruginosos do Brasil IN: **Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais** / organizado por Flávio Fonseca do Carmo e Luciana Hiromi Yoshino Kamino. Belo Horizonte : 3i Editora, 2015.

SOUZA-SILVA, M.; MARTINS, R. P.; FERREIRA, R. L. Cave lithology determining the structure of the invertebrate communities in the Brazilian Atlantic Rain Forest. **Biodiversity and Conservation** 8(20):1713-1729, 2011.

VALENTIM, R. F.; OLIVITO, J. P. R. Unidade espeleológica Carajás: delimitação dos enfoques regional e local, conforme metodologia da in-02/2009 MMA**. Espeleotema**, V. 22, n. 1, p. 41-60, 2011.

ZAPPI, D. C.; LOVO, J.; HIURA, A.; ANDRINO, C. O.; BARBOSA-SILVA, R. G.; MARTELLO, F.; GADELHA-SILVA, L.; VIANA, P. L.; GIANNINI, T. C. Telling the Wood from the Trees: Ranking a Tree Species List to Aid Urban Afforestation in the Amazon. **Sustainability**. pp. 1-16. 2022.

ZEPPELINI, D., OLIVEIRA, J. V. L. C., DE LIMA, E. C. A. et al. Hotspot in ferruginous rock may have serious implications in Brazilian conservation policy. **Sci Rep** 12, 14871. 2022.

CAPÍTULO 1

A comunidade de artrópodes associada ao Meio Subterrâneo Superficial (MSS) no sistema ferrífero de Carajás e a influência de fatores ecológicos estruturantes

Resumo

Alguns estudos realizados em formações ferríferas no Brasil apontam para a existência de uma fauna subterrânea diversificada. A exploração do sistema subterrâneo normalmente é restrita às cavernas, contudo, a evolução de estudos e o surgimento de ameaças à conservação destes ambientes geram a necessidade de aprimoramento nas técnicas e abordagens mais amplas, além do ambiente cavernícola. Desta forma este trabalho buscou analisar a influência da profundidade e da sazonalidade climática na estrutura da comunidade de artrópodes que ocupam o Meio Subterrâneo Superficial (MSS) da formação ferrífera de Carajás/PA. O método de coleta foi testado quanto a eficiência de diferentes tipos de isca. A metodologia aplicada baseou-se na instalação de armadilhas em furos de sondagem a fim de amostrar os invertebrados que transitam pelas descontinuidades do MSS testando sua distribuição espacial de acordo com profundidade, sazonalidade climática e tipo de isca utilizado. Foram inseridas 5 armadilhas em 24 furos de sondagem previamente perfurados totalizando 120 armadilhas em cada estação. Os dados obtidos foram relacionados com variáveis como profundidade, tipo de isca e sazonalidade. A amostragem total de artrópodes subterrâneos resultou na coleta de 63 táxons, distribuídos em 5 Classes e 13 Ordens. Ácaros, colembolos e coleópteras foram os grupos mais diversos, além de mais bem distribuídos na amostragem. A profundidade apresentou relação negativa significativa com a riqueza da fauna total, bem como para grupos específicos como Araneae e a Collembola. O tipo de isca influenciou significativamente na coleta de espécies de aranhas e ácaros. A sazonalidade por sua vez afetou significativamente a presença de ácaros, dípteras e coleópteras. A composição de espécies demonstrou-se afetada significativamente pelas três variáveis analisadas, evidenciando sua influência na estruturação da comunidade. Foi possível observar que, de acordo com a similaridade com base na riqueza e composição de espécies, amostras de um mesmo furo se mostraram mais similares do que amostras de furos diferentes. Contudo este agrupamento mostra uma estruturação muito fraca, evidenciando que não existe barreiras que levem a uma comunidade de artrópodes do platô analisado.

Palavras-chave: Habitat subterrâneo superficial; Conservação; Cavernas; Fatores estruturantes e Ecologia de comunidades

Abstract

Some studies carried out in iron formations in Brazil point to the existence of a diversified underground fauna. The exploration of the underground system normally accessed via caves underground environment beyond the cavities penetrable by humans, however, the evolution of studies and the emergence of threats to the conservation of these environments generates the need for improvement in techniques and broader approaches, in addition to the cave environment. Thus, this work sought to analyze the influence of depth, climatic seasonality and different types of bait as structuring factors of the arthropod community that occupy the Milieu Souterrain Superficiel (MSS) of the Carajás iron formation. The applied methodology was based on the installation of traps in boreholes in order to sample the animals that are transiting through the discontinuities of the MSS, testing their spatial distribution according to depth, climatic seasonality and type of bait used. There was an inherent difficulty in the applicability of the methodology since it depends on the partnership between the research and the drilling of boreholes, which without which the cost makes the execution of projects unfeasible, in addition to the high loss of traps due to silting. The total sampling of subterranean arthropods resulted in the collection of 63 taxa, distributed in 5 Classes and 13 Orders. Mites and springtails were the most diverse groups, in addition to being better distributed in the sample. The depth showed a significant relationship with the richness of the total fauna, as well as other groups such as Arane and Colembolla. The type of bait significantly influenced the spider and mite community. seasonality, in turn, significantly affected mites, dipterans and coleoptera. Species composition was significantly affected by the three analyzed variables, evidencing its influence on community structure. It was possible to observe that according to the similarity and clustering data, the samples from the same hole were closer than samples from different holes, when taking into account the species richness and composition. However, the grouping shows a very weak structure between the holes, showing close averages showing that there are no barriers that lead to a community of arthropods on the analyzed plateau.

Keywords: Shalow souterrain habitat; Conservation; Caves; Structuring factors and community ecology

1. Introdução

1.1. Diversidade de sistemas subterrâneos além das cavidades

O atual conhecimento dos sistemas subterrâneos foi adquirido ao longo da exploração dos ambientes cársticos, em especial as cavernas. Pesquisas biológicas demonstraram que exintem espécies troglomórficas em ambiente subterrâneos não acessíveis ao ser humano. Após a descoberta de espécies da fauna subterrânea ao longo das margens de um rio no Japão, Shun-Ichi Uéno (1972) estudou os Habitats Subterrâneos Superficiais (HSS) denominando-o de Upper Hypogean Zone (UHZ).

O meio subterrâneo superficial (MSS) foi descrito por Juberthie e colaboradores em 1981 em sua publicação "*Sur l'existence du milieu souterrain superficiel en zone calcaire*" (*Sobre a existência do ambiente subterrâneo superficial em zonas calcárias*) ao observar formações de *talus* (ambientes subterrâneos formados por grandes blocos abatidos) nos Pirineus (JUBERTHIE e DECOU, 1994). Estas duas descrições, independentes de HSS desenvolvidas tanto por Uéno quanto por Juberthie, implicaram indiretamente na hipótese de que as espécies troglóbias não habitam exclusivamente cavernas, mas também ocupam naturalmente a rede de fissuras, pedregulhos, rachaduras, cujo tamanho não é proporcional à escala humana (MAMMOLA, 2016).

Juberthie e colaboradores (1981), ao estudarem os HSS desenvolveram um método de coleta que consistia em cavar um buraco, colocar uma armadilha de tubo de PVC previamente perfurado e instalá-la cobrindo-a com o solo removido. A partir desse trabalho, vários outros pesquisadores passaram a adotar este modelo de armadilha obtendo bons resultados como Gers (1992) na França, Giachino e Vailati (2010) na Itália, e López e Oromí (2010), Gilgado et al., (2015) e Ortuño et al., (2014) na Espanha. Em 1990, Medina e Oromí realizaram estudos de levantamento da fauna subterrânea em áreas erodidas em terrenos de origem vulcânica nas Ilhas Canárias, encontrando cerca de 120 espécies ocupantes deste habitat. Por sua vez, outras pesquisas indicaram que a amplitude dos HSS onde foram observados artrópodes troglomórficos é maior do que o descoberto inicialmente por Juberthie et al. (1981) (RŮŽIČKA, 1999; ZEPPELINI, 2014).

Quando é possível a identificação da fauna ao nível de espécie, pode-se observar que as amostras diferem enormemente de região para região, por fenômenos de isolamento e especiação. Notavelmente, no entanto, as comunidades de animais que vivem nos HSS na mesma região parecem ser muito semelhantes, como encontrado por

Pipan e colaboradores (2011). Segundo Mammola (2016), a maioria dos invertebrados encontrados em HSS são artrópodes e gastrópodes. Entre os artrópodes, os grupos mais representados são Entognatha (Collembola), Insecta (Coleoptera, Diptera, Hymenoptera), Arachnida (Araneae, Opiliones, Acari), Myriapoda e Isopoda.

A partir de um olhar mais amplo sobre os sistemas subterrâneos, Culver e Pipan (2014) identificaram diferentes HSS, onde é possível encontrar organismos característicos do ambiente subterrâneo em microhabitats além das cavernas. Estes autores descrevem sete subcategorias no HSS: i) o ambiente hipotelminoreico, ii) o epicarste, iii) os aquíferos em calcário, iv) os ambientes aquáticos intersticial (hiporeico), v) o solo, vi) os tubos de lava, e vii) o meio subterrâneo superficial (MSS), apresentados a seguir.

Os ambientes hipotelminorreicos, descritos inicialmente por Mestrov (1962), correspondem às coleções hídricas em locais onde a água subterrânea está próxima à superfície ou pequenas drenagens sub-superficiais que não estão conectadas ao lençol freático. Normalmente são encontrados em montanhas, formado por solo úmido que permite a passagem de água.

O epicarste, na concepção de Bakalowicz (2004), corresponde à camada mais superficial do carste, representando um afloramento de calcário. É um ambiente quase sempre saturado, armazenando um considerável volume de água e servindo de abrigo para diversas espécies.

Os aquíferos em formação calcária são locais de acúmulo de água onde os poros do calcário são cimentados por material fino ou cascalho, diminuindo a percolação da água. Em algumas regiões da Austrália estas formações abrigam aquíferos rasos.

Os aquíferos intersticiais ou hiporreicos são formados pela porção saturada do solo e sedimentos inconsolidados como encontrado em nascentes rasas, pequenos riachos, pequenos afluentes e está em contato direto com o lençol freático

O solo, por sua vez, corresponde a uma fina camada entre a superfície da Terra, agindo como uma interface entre a atmosfera e a litosfera. É formado por material mineral, raízes, água, gases e matéria orgânica e compreende camadas de até um metro de profundidade, capaz de abrigar diversos organismos.

Os tubos de lava, formado a partir de cavidades em formações vulcânicas, são originados por gases e pelo resfriamento gradual do material magmático. São

relativamente próximos à superfície, apresentam raízes de plantas e uma teia trófica mais diversificada (STONE et al., 2012).

Por fim, destas categorias, a que mais se assemelha às formações ferríferas é o MSS. Este corresponde a uma camada de fragmentos de rocha de diversos tamanhos, recobertos com uma camada de folhiço que mantem a umidade e permite a entrada de organismos por meio de diversos pontos de fratura do material encontrado entre a superfície e a rocha sã (FIGURA 6a). O MSS é frequentemente conectado tanto com o domínio hipógeo profundo, como cavernas e rachaduras profundas na rocha, quanto com o horizonte superficial do solo. Ademais, compartilham várias características ecológicas com cavernas, como ausência de luz, baixo fluxo de energia e uma relativa estabilidade microclimática (MAMMOLA, 2016).

Este mesmo conceito de MSS passou a ser aplicado em outras litologias além do ambiente cárstico, inclusive em rochas vulcânicas (MEDINA e OROMÍ, 1990; OROMÍ, 2010), relativamente semelhante ao ambiente subterrâneo encontrado também em cavernas em formações ferríferas (HALSE e PEARSON, 2014). Em um estudo mais atual na mesma região, López e Oromí (2010) utilizam a definição de MSS como "*Mesovoid Shallow Substratum*" algo como, *substrato superficial de pequenos espaços*.

Nas formações ferríferas australianas também se utilizam das mesmas definições sobre o ambiente subterrâneo além de cavernas. O habitat ocupado pela troglofauna em platôs nas regiões no oeste australiano pode ser considerado como semelhantes com o *Milieu Souterrain Superficial* (MSS), especialmente nas encostas dos vales. No entanto, difere quanto à profundidade utilizada para a amostragem da troglofauna.

A estratigrafia típica das serras consiste em uma camada dura intemperizada (FIGURA 6b), análoga à canga brasileira (FIGURA 6c), que apresenta uma espessa camada de MSS, com seus canalículos e descontinuidades. Por meio de processos de lixiviação das águas subterrâneas surgiram vazios na matriz rochosa e alguns deles combinaram-se gradualmente para formar espaços maiores, resultando numa conectividade de espaços em toda o maciço, ligando-se, inclusive, com cavernas oclusas, ou seja, sem abertura identificada (FIGURA 7). A maioria desses espaços subterrâneos acima do lençol freático é colonizada pela troglofauna (MAMMOLA, 2016).

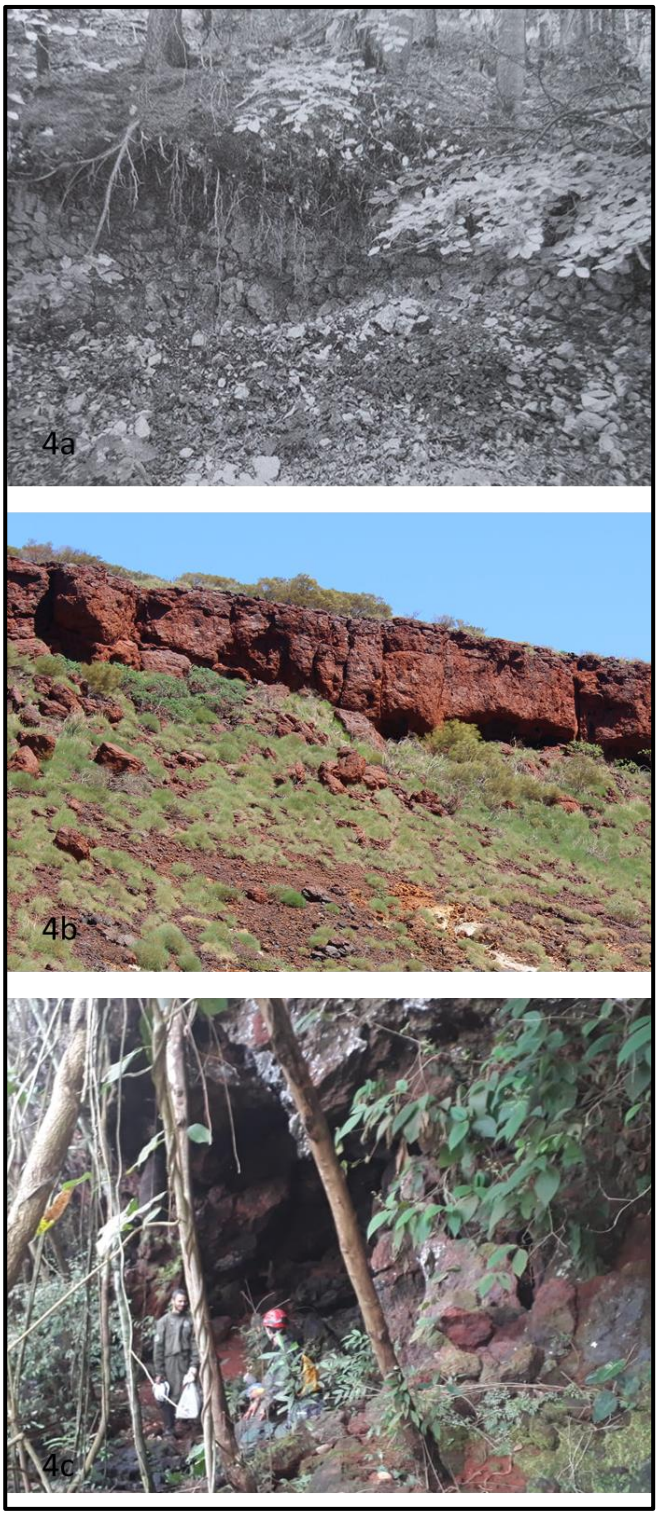


Figura :6 a) Meio subterrâneo superficial, caracterizado por descontinuidades na rocha com alta permeabilidade a fauna e presença de raízes com baixa profundidade. Fonte: Culver e Pipan (2014). b) Formação Ferrífera no oeste australiano evidenciando a carapaça laterítica com cavernas pequenas (CLARK et al., 2021). c) Formação ferrífera na Amazônia brasileira, evidenciando a ocorrência de grandes cavernas no contato entre a canga (carapaça laterítica) e o minério de ferro (arquivo pessoal).

Figura 7: Caverna oclusa interceptada durante operações na mina do platô N4 na Formação Ferrífera Carajas em Janeiro de 2023 (arquivo ICMBio)

Apesar de ser comum o termo MSS nas formações ferríferas australianas, no Brasil ainda não houve uma ampla discussão sobre a nomenclatura mais adequada para se definir estes ambientes nas diferentes litologias existentes no país, muito disso motivado pela baixa quantidade de pesquisas nesse campo.

A profundidade de amostragem para o MSS foi objeto de discussão de diversos autores: Juberthie e colaboradores (1980a, b) estabeleceram profundidade entre 0,4 a 5,0 metros; Gers (1992), entre 1 a 4 metros; Ueno (1987), entre 0,1 a 0,2 metros; Nitzu e colaboradores (2014) de 0,6 a 6 metros, e Giachino e Vailati (2010) também entre 0,1 a 0,2 metros. Culver e Pipan (2014) sugeriram um limite arbitrário de até 10 metros. Contudo, de acordo com Juberthie e Decu (2006), a profundidade de amostragem está relacionada diretamente às características geomorfológicas da área. Contudo, Brito (2019) realizou coleta de Collembola em profundidades superiores a 40 metros em um sistema ferrífero no sudeste do Brasil, indicando a ocorrência de espécies em maior profundidade.

Na última década, os trabalhos de prospecção intensa resultaram na identificação de milhares de cavidades associadas à litologia ferrífera no Brasil, principalmente em Minas Gerais e em Carajás/PA (PILÓ e AULER, 2009). Desde então aumentou-se o número de estudos realizados por empresas de consultoria e, consequentemente, o volume de informações sobre biologia, geologia, geomorfologia, arqueologia e outros. Todavia, poucos trabalhos foram publicados até o momento em periódicos ou apresentados em

encontros científicos sobre o tema, estando, a maioria, descritos apenas em relatórios técnicos. São também reduzidos o número de trabalhos que descreveram novas espécies (ZAMPAULO, 2015; SOUZA-SILVA et al. 2011; FERREIRA, 2005).

Uma das diferenças marcantes entre as diversas litologias existentes é a potencial conectividade existente entre as macrocavernas[5]. Essa permeabilidade da rocha, especialmente nas carapaças de canga, indica a possibilidade do trânsito da fauna no meio subterrâneo em sistemas ferruginosos (FERREIRA, 2005; SOUZA-SILVA et al, 2011; FERREIRA, 2015; PILÓ et al., 2015). Estes autores observaram que conexões subterrâneas por meio de descontinuidades estruturais permitem que diversas espécies, especialmente as troglóbias, possam apresentar distribuições mais amplas, chegando a ocupar serras inteiras ou até mesmo diferentes unidades geomorfológicas (FERREIRA, 2015).

1.2. Amostragem da fauna subterrâea

Os levantamentos de fauna devem ser projetados para permitir que as áreas de estudo sejam representativas da gama de ambientes locais e o desenho amostral deve ser replicável. Ademais outro ponto importante é a aplicação do esforço de pesquisa comparável em cada local. Estes fatores são determinantes para que a pesquisa como um todo possa ser repetida por outros pesquisadores (BAMFORD et al., 2013).

Na Austrália, por exemplo, a fauna subterrânea é reconhecida globalmente devido à sua alta riqueza de espécies e altos níveis de endemismo, apesar dos poucos registros de cavernas na região de Western Australia (EPA, 2016). Biota (2006) descreve uma metodologia de coleta de fauna subterrânea ocupante do sistema de descontinuidades na rocha. Esta metodologia é baseada em armadilhas de PVC suspensas em furos de sondagem que interceptam estas descontinuidades em áreas ferríferas no oeste australiano. Apesar de utilizar uma abordagem metodológica diferente dos procedimentos de coleta propostos por Juberthie e colaboradores (1981), principalmente relacionada ao desenho das armadilhas, apresenta o objetivo comum de coleta de fauna ocupante de diferentes camadas do solo. Na metodologia, quatro armadilhas foram uniformemente

[5] Cavernas penetráveis pelo ser humano (CULVER e PIPAN, 2014).

distribuídas em cada furo de sondagem de acordo com a profundidade, de forma diferente ao proposto nos levantamentos em MSS realizados na Europa (BICHUETTE et al., 2015).

Mais recentemente, Brito (2019), ao desenvolver sua tese sobre a variação da taxocenose de colêmbolos no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, realizou associações entre as espécies e o MSS em formação ferrífera. Os resultados obtidos mostram que o MSS tem a umidade como variável estruturante da comunidade. O autor registrou abundância 10 vezes maior e a metade da riqueza, quando comparado com as cavernas. Com estes resultados foi possível determinar que o MSS associados à formação ferrífera tanto mantém populações quanto condições favoráveis a conduzir o processo evolutivo de espécies troglóbias.

A ampla distribuição observada em algumas espécies troglóbias na região de Carajás ocorre em casos de existência de conexões subterrâneas superficiais unindo amplas áreas associadas a hábitos alimentares generalistas e eventual resistência a prolongados períodos de escassez alimentar que permitiriam migrações entre áreas (FERREIRA et al., 2015; BICHUETTE et al., 2015).

As cavernas ferruginosas acumulam relativamente uma maior quantidade de recursos orgânicos, uma vez que potencialmente podem conectar-se ao MSS e à superfície, tornando-as atrativas à fauna (BRITO, 2019). Assim, parte das condições que favoreceram a permanência e evolução de espécies troglóbias no meio subterrâneo também favoreceu o estabelecimento e permanência atual de várias outras espécies, inclusive as que não dependem deste meio (FERREIRA, 2005).

A realização de sondagens para mapeamento geológico em empreendimentos minerários dá a oportunidade de acesso a este sistema subterrâneo complementando o levantamento faunístico realizado nas macrocavidades, mas existe a dificuldade de se compatibilizar estas pesquisas em áreas com interesse econômico (POLAK, 1997). De maneira similar ao trabalho de Halse e Pearson (2014), que utilizaram os furos de sondagem perfurados em depósitos de minério de ferro para coletar fauna subterrânea, a utilização de metodologias complementares que consigam amostrar a fauna subterrânea presente no MSS é essencial para o conhecimento e entendimento destes habitats, bem como para a real compreensão de como estas comunidades são estruturadas (FERREIRA et al., 2015).

Atualmente, o método de busca ativa é amplamente utilizado em levantamentos de fauna subterrânea (FIGURA 8). É realizado por meio de coleta manual dos espécimes terrestres aquáticos com auxílio de potes plásticos, pinças, pincéis, com as amostras de artrópodes preservadas em frascos contendo álcool 70%. Contudo esta metodologia, apesar de ser eficiente, apresenta algumas dificuldades, sendo aplicável apenas em cavernas que permitam o acesso ao ser humano. Assim, mesmo em áreas onde a geologia seja propícia a espeleogênese, caso não haja cavidades, este método não é aplicável.

Figura 8: Método de busca ativa por invertebrados para coleta em cavernas. Fotos: Arquivo Cecav.

Além disso, outros fatores contribuem para dificuldade de aplicação deste método, como a demanda de tempo de procura, necessitando de uma atividade de campo com maior duração bem como uma equipe numerosa. O nível de experiência prévia da equipe, tanto em identificar os microhabitats (substratos) de ocorrência dos grupos faunísticos também é limitante. Tais fatores influenciam na eficiência de captura dos animais. Esta metodologia é amplamente difundida e pode ser utilizada com diversas variações com base na delimitação de tempo ou área amostrada por caverna (SOUZA-SILVA et al., 2011; PELLEGRINI e FERREIRA, 2012; TRAJANO, et al.,, 2012 OLIVEIRA, 2020).

A maioria das amostragens da fauna subterrânea em cavernas é realizada por meio da busca ativa de animais, que muitas vezes apresentam tamanho corporal relativamente grande, minimamente visíveis a olho nú em baixa iluminação em uma superfície coberta

por detritos e outros animais. A aplicação de armadilhas em furos de sondagem e outras técnicas empregadas para invertebrados terrestres que ocupam outros habitats subterrâneos, como o MSS, também podem ser usadas para aumentar o esforço de amostragem da fauna subterrânea que ocorrem além das cavernas (SCHNEIDER e CULVER, 2004).

Os métodos passivos de coleta da fauna subterrânea implicam na utilização de dispositivos (pitfalls, dispositivos enterrados para fauna de MSS, extratores winkler, etc.) que capturem animais representantes desta fauna. É um método que não depende de experiência de campo do pesquisador, bem como não demanda grandes períodos em atividades nem de uma equipe numerosa de coletores, havendo apenas a necessidade da implantação das armadilhas de acordo com o objetivo da pesquisa. Uma das grandes vantagens da utilização destes métodos é a realização de amostragens em ambientes inacessíveis ao ser humano, podendo ser aplicada em qualquer outro ambiente cárstico além das cavidades penetráveis, como canalículos, fendas e demais descontinuidades da rocha (POLAK, 1997).

Um dos trabalhos pioneiros na utilização de métodos passivos em levantamentos de fauna subterrânea em cavernas foi o trabalho desenvolvido por Poulson e Culver (1968) em pesquisas relacionadas à diversidade da comunidade terrestre subterrânea em Mammoth Cave National Park, nos Estados Unidos. Os pesquisadores utilizaram tanto métodos de busca ativa por meio da coleta manual quanto métodos passivos, por meio do uso de armadilhas de queda (pitfall) (GERS, 1998; RUIZ-POTERO et al., 2002; LEWIS et al., 2003). Em alguns casos a armadilha continham iscas de fígado para busca de organismos detritívoros (POULSON e CULVER, 1968; PECK e THAYER, 2003).

As metodologias mais utilizadas no levantamento da fauna presente nos MSS compreendem a perfuração de furos rasos, de até 1 metro de profundidade, que atuam em camadas mais superficiais, onde, de fato, está a maioria dos representantes da fauna (FIGURA 9). Contudo, estes métodos não se extendem até profundidades maiores, onde também ocorre parte da fauna subterrânea.

Figura 9: Método de levantamento passivo por meio de armadilhas instaladas manualmente em MSS em formação calcária em Minas Gerais (ARGOLO, 2022).

1.3. Dinâmica ecológica do ambiente subterrâneo em formação ferrífera

De forma geral, estas conexões compreendem estruturas como canalículos, fraturas, acamamento, dobras e falhas, poros, fissuras, fendas e cavernas com entradas identificadas ou oclusas (CULVER et al., 1995; CULVER e PIPAN, 2009) (FIGURA 10) e constituem descontinuidades importantes, pois atuam como condicionantes na circulação de fluídos no interior do maciço rochoso, além de intervirem direta ou indiretamente no processo de formação e desenvolvimento das cavidades.

Figura 10: Tipos de feições geomorfológicas que favorecem a permeabilidade à fauna entre as macrocavidades estudadas: A) formação em Jaspilito apresentando falhas por dobramentos encontrados na Cav 0030; B) fendas e blocos de abatimento estrutural encontrados na Cav ST0003; C) conjunto de pequenos poros adensados encontrados na Cav ST0003, e D) poro ou mesocavidade não acessível pelo ser humano encontrado na Cav ST0041. Fonte: arquivo pessoal.

A partir da observação de conexões entre os espaços maiores (cavernas) nas rochas ferríferas, a descrição de Howarth (1983) para ambiente subterrâneo em rochas carbonáticas com cavidades conectadas no interior da rocha cabe também para o encontrado em formações ferríferas, uma vez que possibilita a dispersão de animais por estes conjuntos de falhas e descontinuidades deste tipo de rocha (TRAJANO e BESSI, 2017, AUGUST, 1983).

Desta maneira, o sistema de falhas na rocha em formação ferrífera possibilitaria o trânsito de invertebrados de hábitos terrestres e aquáticos, uma vez que os canalículos podem conectar-se a ambientes epígeos, como serapilheira, lapidícola e endógeno

(FERREIRA, 2005; BICHUETTE et. al. 2015). Outro aspecto relevante dos ambientes subterrâneos é a heterogeneidade ambiental dentre os diversos micro habitats, que acentuam as variações na composição de espécies da comunidades. Assim, uma maior variedade de habitats e de condições ambientais promovem maior variação na composição de espécies (MCINTYRE *et al*., 2001; BUCKLEY e JETZ, 2008; JANKOWSKI *et al*., 2009).

Desta maneira, assemelham-se ao MSS (CULVER e PIPAN, 2014; BRITO, 2019), bem como sua ocupação aparenta ser influenciada pela sazonalidade ou pela disposição do pacote litológico, incrementando a heterogeneidade espacial (LI, et al, 1994; TEWS, et al., 2004).

Muitas vezes tais estruturas condicionam a forma das cavernas, além de potencializarem processos de abatimentos nas paredes e teto. Em conjunto, estas estruturas funcionam como "esponjas" de captação e recarga hídrica, atuando como micro e mesocavidades[6] proporcionando abrigo e vias de locomoção para a fauna subterrânea (CARMO, 2010).

A migração pode ocorrer entre o MSS e as camadas superficiais do solo. Assim, esta comunidade pode naturalmente conter espécies epígeas, tornando a composição faunística deste ambiente dinâmica, variando tanto sazonalmente quanto com relação à profundidade (JUBERTHIE et al., 1981; GERS, 1998; BAZZAZ, 1975).

A presença massiva de espécies epígeas no MSS é, de fato, uma característica constante nos estudos realizados até o momento, ocorrendo também na zona de entrada das cavernas (PROUS et al., 2004). Isto resulta em um número maior de espécies em camadas do solo próximas à superfície (RENDOŠ et al. 2012), bem como uma prevalência mais alta de espécies troglomórficas em profundidades maiores (RŮŽIČKA et al. 2013). Por outro lado, a abundância total de indivíduos e a riqueza de espécies geralmente diminuem com o aumento da profundidade.

O ambiente subterrâneo é marcado por uma baixa amplitude de variáveis abióticas, como pouca amplitude térmica, ausência de luminosidade e escassez de recursos tróficos que acabam por limitar a riqueza e diversidade de espécies que dependem deste ambiente. Desta forma, a estrutura de uma comunidade é resultado da

[6]Cavidades e canalículos de tamanhos reduzidos, permeáveis à fauna.

interação de muitos fatores, tanto abióticos quanto bióticos (LEGENDRE, et al, 1998). Ela pode ser descrita por sua riqueza e diversidade específicas e é influenciada por fatores ambientais, incluindo fatores abióticos, interações entre as espécies, nível de distúrbio e eventos aleatórios (RIBEIRO e MARINHO-FILHO, 2005).

Os artrópodes são considerados bons indicadores dos níveis de impacto relacionado a variações no meio ambiente, devido à grande variedade de espécies e habitats ocupados (HALFFTER et al, 1991; THOMAZINI e THOMAZINI, 2002; WARREN e ZOU, 2002; FRANKLIN et al, 2005; GONZÁLES-MEGÍAS, et al, 2007). Ferreira (2005) descreveu a singularidade da estrutura das comunidades e a funcionalidade trófica dos ambientes de cavernas ferruginosas com base nas cavernas do Quadrilátero Ferrífero e Tocantins. No ambiente subterrâneo ferrífero, as comunidades associadas possuem uma dominância de espécies de hábitos intersticiais, que preferem abrigar-se em fendas, espaços sob rochas ou outros espaços intersticiais. O elevado número de espécies em cavernas ferruginosas pode ser uma influência direta do aumento da disponibilidade de área e de micro-habitats, onde os canalículos podem promover uma extensão aos habitats presentes nas macrocavernas para os artrópodes (MARTÍNEZ, et al., 1984; HOLSINGER et al, 1998; SOUZA-SILVA et al. 2011).

Estes ambientes subterrâneos são utilizados por inúmeros organismos que transitam desde a superfície até regiões mais profundas do solo, inclusive em cavernas (DURÃES, et al, 2005; FERREIRA, 1997). Nestes habitats, as relações tróficas são sustentadas pela presença de raízes oriundas de árvores na superfície, depósitos de guano e de matéria orgânica vegetal carreada. Desta forma, uma maior disponibilidade de microhabitats e de recursos alimentares favorecem a ocupação de espécies nestes ambientes, elevando a diversidade nas macrocavernas ferruginosas (FERREIRA, 2001; 2004; 2005).

Um fator ainda pouco estudado que afeta a distribuição da fauna subterrânea é a flutuação da proporção da zona vadosa e a zona saturada no maciço ferrífero, sendo este um reflexo do ciclo pluviométrico. As cavernas em formação ferríferas no Brasil não ficam submersas em nenhuma época do ano, tendo em vista que ocorrem acima do nível d'água ou nas bordas do sistema. Contudo, em levantamentos da fauna no MSS no oeste australiano são considerados tanto a fauna da zona vadosa, acima do nível da água acumulada no maciço, ocupada por espécies troglóbias (fauna subterrânea terrestre) e a zona saturada, abaixo desta, ocupada por espécies estigóbias (fauna subterrânea aquática)

(HALSE e PEARSON, 2014). A proporção destas zonas pode flutuar de acordo com a variação sazonal na pluviosidade.

Outro processo importante que ocorre de forma pronunciada nas cavernas ferríferas é a sucessão (*turnover*) de espécies gerada pelas variações ambientais sazonais que determinam a porcentagem de substituição de espécies em um dado sistema ao longo do tempo ou do espaço. Está relacionado à tendência da natureza em instaurar um novo desenvolvimento em uma determinada área, relacionando-se ao clima e ao estado dos solos locais quando uma comunidade altera o ambiente, dando condições para que uma comunidade diferente possa ali se formar.

Assim, percebe-se que as cavernas presentes tanto na região de Carajás/PA quanto no Quadrilátero Ferrífero/MG tendem a apresentar-se ecologicamente "mutáveis" ao longo do tempo, especialmente aquelas de reduzido tamanho, ou seja, são regiões que compreendem sistemas de baixa estabilidade ecológica, sendo continuamente acessadas por inúmeras espécies provenientes do meio epígeo. Percebe-se que cavernas com mais espécies troglóbias são justamente aquelas com menores valores de *turnover*, que tendem a ser consideradas as mais ecologicamente "estáveis" (FERREIRA et al, 2015). Outro fator ambiental importante quando se trata de MSS é a profundidade, que engloba mudanças na temperatura em ciclos diários e umidade, em ciclos sazonais (HALSE e PEARSON, 2014).

Muitas espécies conhecidas relacionadas ao meio subterrâneo encontram-se com algum grau de ameaça de extinção. Muito disto devido ao alto índice de endemismo ou raridade de algumas espécies. Deste modo, é possível entender que as espécies da troglofauna ocupantes do MSS na Formação Ferrífera de Carajás devem apresentar uma distribuição espacial sem estruturação na paisagem devido à falta de evidência de barreiras que dificultem a dispersão destas espécies no interior do maciço, sob influência da profundidade e da sazonalidade climática, além de outras variáveis ecológicas menos evidentes.

2. Objetivos

2.1. Objetivo principal:

Descrever a estrutura da comunidade de artrópodes do MSS de acordo com variáveis ambientais e analisar a similaridade de espécies subterrâneas em um platô na Formação Ferrífera de Carajás.

2.2. Objetivos específicos:

- Testar o efeito do tipo de isca utilizado sobre a riqueza e composição observadas;

- Testar o efeito da profundidade sobre a riqueza e composição de espécies observadas;

- Testar o efeito da sazonalidade climática sobre a riqueza e composição observadas;

- Analisar a similaridade da comunidade do MSS ao longo da paisagem estudada.

3. Metodologia

A atividade de campo deste capítulo foi desenvolvida na FLONA Carajás, no platô da Serra Norte denominado N3 (FIGURA 11).

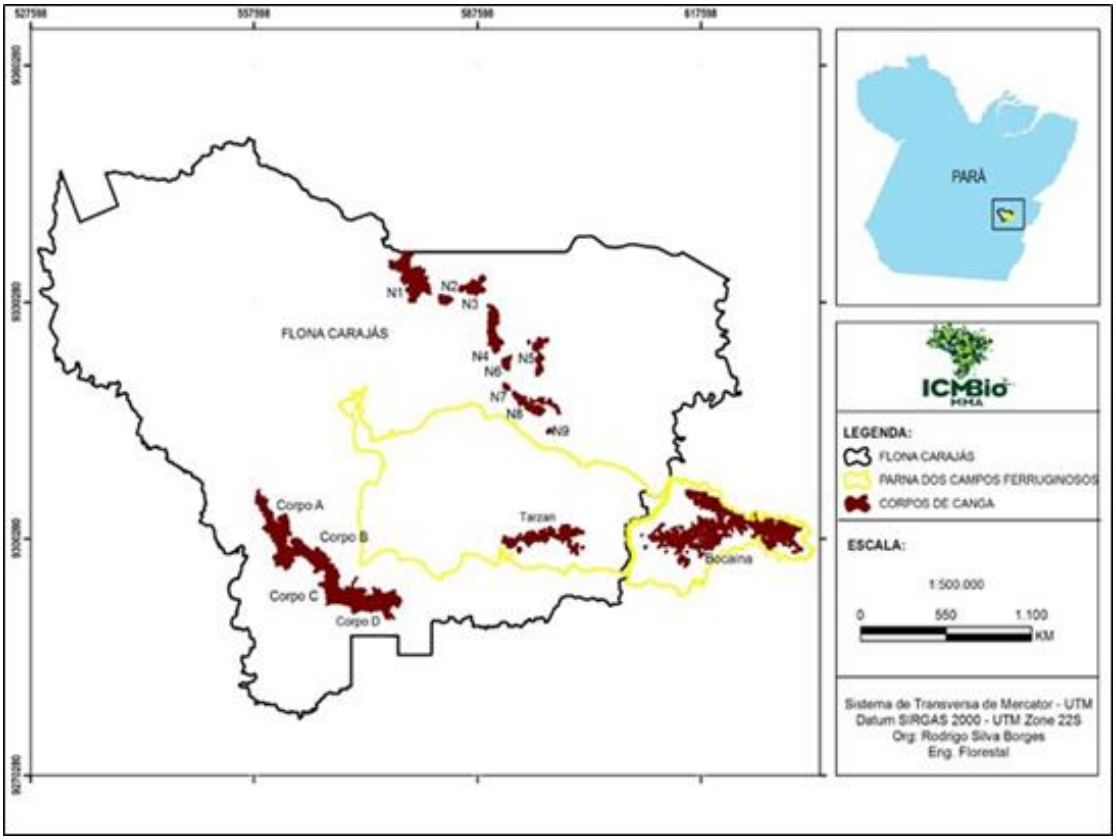


Figura 11: Localização dos platôs da FLONA Carajás, incluindo N3. Fonte: ICMBio, 2018.

3.1. Caracterização ecológica da comunidade de artrópodes encontrada no MSS

Os dados secundários obtidos por meio dos estudos de impacto ambientais de projetos minerários no local auxiliaram no levantamento de dados de ocorrência de espécies nas cavidades naturais da área de estudo, otimizando as análises de riqueza da fauna subterrânea total e troglomórfica.

Armadilhas de colonização com diferentes tipos de isca foram instaladas em furos de sondagem a fim de amostrar a fauna subterrânea que não ocupa apenas as cavernas, mas também o MSS. O desenho amostral está ilustrado na figura 12.

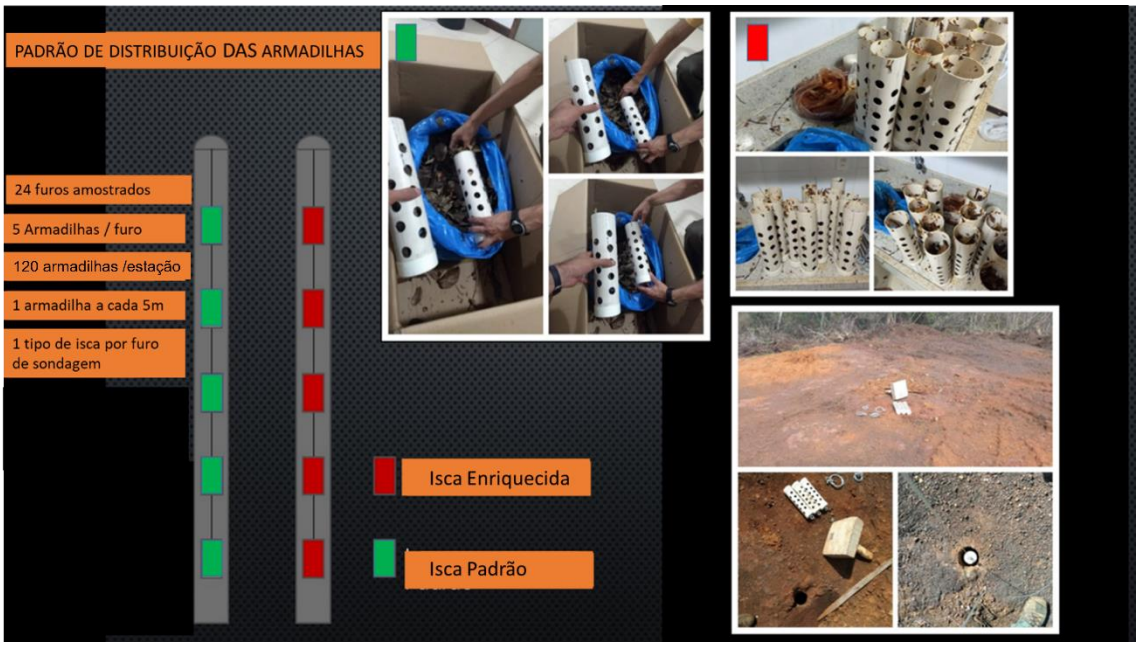


Figura 12: Desenho amostral da distribuição das armadilhas. A isca padrão é composta apenas por folhiço local esterilizado e a isca enriquecida corresponde a este folhiço acrescido de fígado moído.

Para os pontos de coleta, optou-se por utilizar furos de sondagem já existentes ao longo do platô N3, uma vez que foram criados para a realização de pesquisas para verificação do potencial minerário do local, formando uma malha de furos cada vez mais próximas. Estes furos encontram-se permanentemente fechados de maneira a diminuir a variação dos elementos abióticos (temperatura e umidade), bem como dificultar o contato

de espécies da superfície. Os furos utilizados na pesquisa foram perfurados semanas antes da colocação das armadilhas e encontravam-se em bom estado de conservação, diminuindo os custos do projeto. A localização dos furos de sondagem onde foram inseridas as armadilhas está representada na figura 13 e as respectivas coordenadas, na tabela 2.

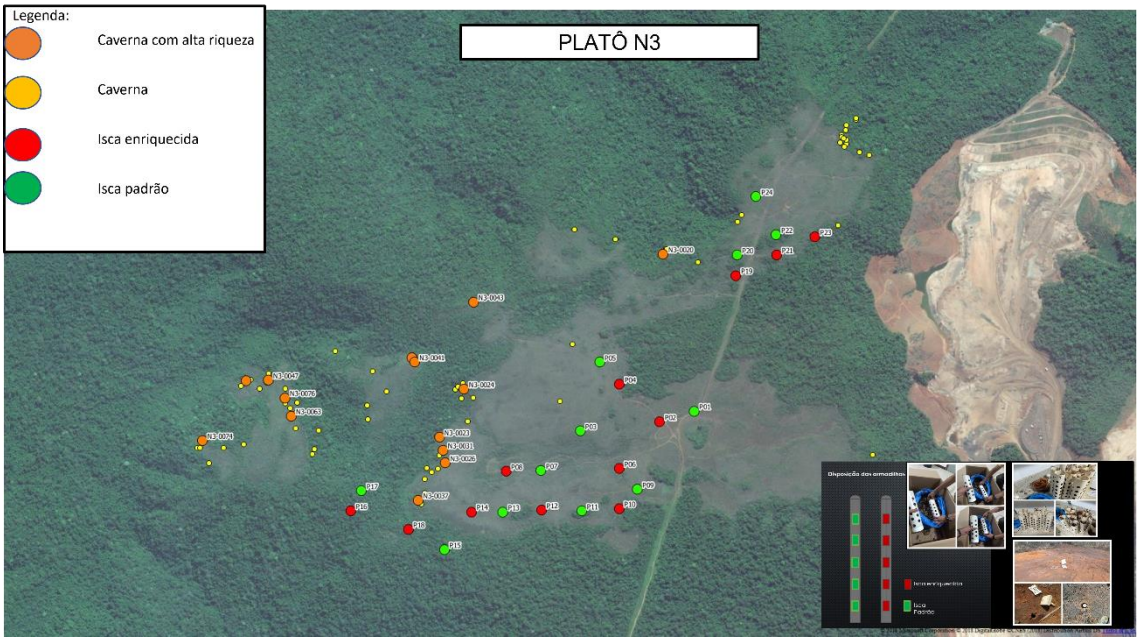


Figura 13: Localização dos pontos de coleta em N3 de acordo com o tratamento utilizado. Pontos em vermelho representam os furos que continham isca enriquecida. Os pontos em verde representam os furos com iscas padrão, em amarelo são as cavernas e em laranja, as cavernas com alta riqueza de espécies.

Tabela 2. Coordenadas geográficas dos furos de sondagem onde as armadilhas foram inseridas.

Furo	Latitude	Longitude	UTM X	UTM Y	fuso
F1	6° 2'31.71"S	50°12'29.21"O	587633-58121099	93320732-498501	22
F2	6° 2'33.49"S	50°12'34.96"O	587456-73519565	93320188-446001	22
F3	6° 2'34.99"S	50°12'48.18"O	587050-25966571	93319733-697812	22
F4	6° 2'27.30"S	50°12'41.64"O	587251-65407470	93322092-315781	22
F5	6° 2'23.68"S	50°12'44.97"O	587149-44377198	9332320-5465494	22
F6	6° 2'41.20"S	50°12'41.68"O	587249-80600636	9331782-3772901	22
F7	6° 2'41.53"S	50°12'54.70"O	586849-53258087	9331772-822013	22
F8	6° 2'41.66"S	50°13'0.49"O	586671-53169740	9331769-0863391	22
F9	6° 2'44.63"S	50°12'38.66"O	587342-49360623	9331676-9105389	22
F10	6° 2'47.79"S	50°12'41.72"O	587248-28302169	9331580-0062825	22
F11	6° 2'48.21"S	50°12'47.92"O	587057-66553294	9331567-3844623	22
F12	6° 2'48.04"S	50°12'54.62"O	586851-70349071	9331572-9025699	22
F13	6° 2'48.01"S	50°13'1.01"O	586655-26524418	9331574-1069832	22
F14	6° 2'48.33"S	50°13'6.24"O	586494-47199971	9331564-5113602	22
F15	6° 2'54.56"S	50°13'10.42"O	586365-69715893	9331373-3787112	22
F16	6° 2'48.16"S	50°13'26.33"O	585876-87918356	9331570-6162637	22
F17	6° 2'48.11"S	50°13'17.14"O	586158-64618744	9331570-6162635	22
F18	6° 2'51.21"S	50°13'17.16"O	586158-64618746	9331476-5509231	22
F19	6° 2'9.35"S	50°12'22.27"O	587847-93188567	9332759-5946538	22
F20	6° 2'5.99"S	50°12'22.11"O	587849-92675206	9332862-7745456	22
F21	6° 2'5.95"S	50°12'15.51"O	588055-90299441	9332863-7025054	22
F22	6° 2'2.64"S	50°12'15.60"O	588053-28457816	9332965-3537105	22
F23	6° 2'2.98"S	50°12'9.15"O	588251-55855934	9332954-6228004	22
F24	6° 1'56.36"S	50°12'18.93"O	587951-19319480	9333158-3562569	22

Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados georreferenciados.

A figura 14 evidencia a interceptação das descontinuidades do MSS pelos furos de sondagem.

Figura 14: Interceptação das descontinuidades do MSS pelos furos de sondagem.

A coleta das amostras de invertebrados do solo ocorreu com base na metodologia utilizada em Halse e Pearson (2014) (FIGURA 15). As armadilhas foram confeccionadas a partir de tubo de policloreto de vinila (PVC) de 75mm de diâmetros e 30 cm de comprimento, perfurados em sua lateral (20mm) para acesso dos espécimes. Estas armadilhas são inseridas em furos de sondagem já existentes, dispostos entre as cavidades a serem estudadas. Então, acrescenta-se isca em seu interior e fecha-se ambas as extremidades com tela. As armadilhas são dispostas nos furos de forma a alinhar com fissuras e vazios no habitat circundante (BIOTA, 2005).

A disposição das armadilhas pode ser orientada pelos registros de perfuração para identificar uma altura de furo apropriada na qual colocar a armadilha, embora o uso de vídeo tem o potencial de melhorar o posicionamento.

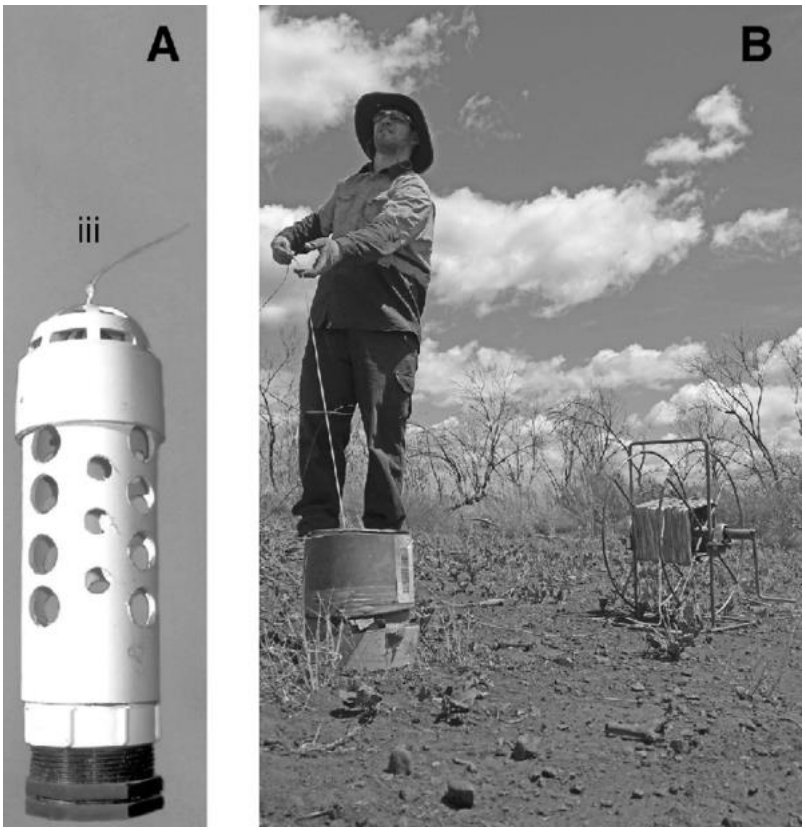


Figura 15: Equipamento de amostragem da troglofauna nos levantamentos faunísticos em formação ferrífera no oeste australiano: (A) modelo da armadilha e (B) ilustração da introdução da armadilha. Fonte: Halse e Pearson (2014).

Para a presente tese, foram utilizadas 120 armadilhas, inseridas nos períodos chuvoso e no seco, totalizando, portanto, 240. As armadilhas foram dispostas em grupos de 5 por furo, distantes 5 metros entre si, espacialmente distribuídas em 24 furos de sondagem selecionados (FIGURA 16). As iscas utilizadas consistiam de a) gramíneas e folhiço do próprio local (isca padrão) que, após recolhido e picado, passou por um processo de esterilização em estufa para garantir que as amostras coletadas sejam realmente dos furos de sondagem, e b) gramíneas e folhiço esterilizados acrescido de fígado moído (risca enriquecida).

Figura 16: Método de levantamento passivo por meio de armadilhas de furo de sondagem com iscas.

As armadilhas permaneceram nos furos de sondagem por 8 semanas, respeitando a literatura existente que sugere de 6 a 8 para que as taxas de captura sejam maiores (HALSE e PEARSON, 2014). Durante as coletas, o mateial resultante foi conservado em álcool absoluto para análises taxônomicas e ecológicas posteriores.

Com a utilização destas armadilhas e a partir do desenho amostral proposto, a riqueza e composição de espécies podem ser correlacionados ao nível de armadilha ou

furos de sondagem considerando-se os tipos de isca, as estações climáticas e a profundidade das amostras.

Os indivíduos capturados nas armadilhas foram conservados em Etanol 70% e identificados no Laboratório de Entomologia da Universidade Federal Rural da Amazônia, por meio do uso de microscópios estereoscópicos de aumento de até 40x. Para a identificação das amostras foram convidados pesquisadores do Centro de Estudos em Biologia Subterrânea, vinculado à Universidade de Lavras, Minas Geais (CEBS/UFLA). As amostras obtidas estão depositadas na Coleção de Invertebrados Subterrâneos (ISLA), do CEBS.

3.2. Efeito das variáveis ambientais sobre a riqueza e composição de espécies da comunidade de artrópodes do MSS

Para testar o efeito das variáveis na amostragem da comunidade de artrópodes do MSS foram utilizados os dados de presença/ausência e composição de espécies encontrados no habitat, levando em consideração os diferentes tratamentos (isca padrão e isca enriquecida). As análises levaram em conta a relação entre cada armadilha de um mesmo furo, bem como entre furos diferentes.

Foi utilizada a função glmer da família *Poisson*, adequada para esse tipo de dado, onde temos a riqueza em função da variável analisada (tipo de isca, profundidade e sazonalidade) em cada armadilha a fim de verificar o quanto da flutuação da variável resposta (riqueza) é devida aos efeitos aleatórios destas variáveis. Foi calculado o modelo de cada uma das armadilhas, bem como do efeito fixo. Desta maneira, as análises das variáveis foram realizadas por meio de análises de GLMM no programa *R* versão 3.6.1 (2019). Assim, cada armadilha foi definida como um efeito aleatório e a riqueza, uma variável quantitativa.

Para verificar a influência da variação na proporção entre a zona vadosa (ambiente terrestre) e a zona saturada (ambiente aquático) na riqueza e na composição de espécies do MSS de acordo com a estação do ano (estação seca ou estação chuvosa) foram obtidos dados de estações meteorológicas em platôs da Serra Norte (N4E, N4WN, N4WS, N5W e N5E), próximos ao platô N3, bem como dados de poços de monitoramento do nível da água no solo no platô N3.

3.3. Betadiversidade da comunidade de artrópodes do habitat subterrâneo.

A diferença na riqueza e na composição de espécies foi testada através de uma análise de escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS), baseada na presença e ausência de espécies em cada furo de acordo com as variáveis. Estas análises levaram em conta o tipo de isca, a estação climática e a profundidade. Todas as análises foram realizadas no programa *R* versão 3.6.1 (2019) e cada furo foi considerado como unidade amostral, desconsiderando assim as profundidades amostradas.

A análise de similaridade (ANOSIM) foi realizada utilizando o índice de Jaccard como medida de distância, com base na matriz de presença e ausência na composição de espécies entre os furos para avaliar as possíveis diferenças da composição de espécies entre as armadilhas de acordo com as variáveis. As análises foram realizadas com o auxílio do software *PAST* (HAMMER et al., 2001). O esforço amostral foi avaliado por meio das curvas de rarefação de espécies, conduzidas no mesmo software.

O *turnover* de espécies foi calculado utilizando presença e ausência de espécies pelo índice de dissimilaridade de Sorensen (1948), comparando-se as amostras de cada armadilha de forma pareada entre as estações climáticas (estação seca e estação chuvosa).

4. Resultados

4.1. Caracterização ecológica da comunidade de artrópodes encontrada no MSS

Foram coletados organismos pertencentes a diversos táxons como oligochaetas, gastropoda e turbelária, contudo, foram analisados apenas artrópodes. A amostragem total de artrópodes subterrâneos resultou na coleta de 63 táxons, distribuídos em 5 Classes e 13 Ordens. As Classes de artrópodes coletados foram: Arachnida, Entognatha, Insecta, Crustacea e Miryapoda. Arachnida foi marcada pela alta riqueza de espécies de ácaros (20 morfotipos), seguida de Araneae (quatro morfotipos) e Opiliones (um morfotipo).

A Classe Entognatha foi representada exclusivamente por Collembola (11 morfótipos). A Classe Insecta foi representada por sete Ordens: Blatodea (três morfótipos); Coleoptera (13 morfótipos); Diptera (cinco morfótipos); Hemiptera (um morfótipos); Hymenoptera (um morfótipo) e Isoptera (um morfótipo). Na Classe Miryapoda ocorreu apenas um táxon, na Classe Crustacea, dois. Os táxons coletados são apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Lista de táxons amostrados no MSS no platô N3 (Serra Norte).

Táxon		OCORRÊNCIA	SAZONALIDADE		PROFUNDIDADE (TOTAL)					ISCA (TOTAL)	
ORDEM	MORFÓTIPO	TOTAL	CHUVOSA	SECA	5M	10M	15M	20M	25M	ENRIQUECIDA	PADRÃO
Acari	*Lasioseius sp.1*	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0
Acari	*Acaridae sp.1*	30	11	19	10	6	7	5	2	20	10
Acari	*Amblyomma sp.1*	3	0	3	0	0	1	1	1	0	3
Acari	*Macrocheles sp.2*	8	8	0	2	3	2	1	0	8	0
Acari	*Scutacaridae sp.1*	8	1	8	1	3	4	1	0	6	3
Acari	*Glycyphagidae sp.1*	7	7	0	1	3	3	0	0	5	2
Acari	*Laelapidae sp.1*	7	7	0	3	1	1	1	1	1	6
Acari	*Macrocheles sp.1*	61	8	53	17	14	11	10	9	33	28
Acari	*Phthiracaridae sp.1*	3	3	0	1	2	0	0	0	0	3
Acari	*Cunaxidae sp.1*	3	3	0	2	1	0	0	0	1	2
Acari	*Uropodina sp.1*	6	6	0	2	1	1	2	0	5	1
Acari	*Uropodina sp.2*	2	2	0	0	1	1	0	0	2	0
Acari	*Parasitengona (larva) sp.1.*	3	3	0	0	0	1	1	1	2	1
Acari	*Digamaselidae sp.1*	3	3	0	1	0	1	1	0	2	1
Acari	Acaridae sp.2	30	1	29	7	7	7	5	4	17	13
Acari	*Proctolaelaps sp.1*	1	0	2	1	0	0	0	0	0	1
Acari	Cunaxidae sp.3	13	6	7	8	2	2	0	1	5	8
Acari	Acaridae sp.3	3	0	3	0	1	1	0	1	2	1
Acari	Histiostomatidae sp.1	4	1	3	2	0	1	0	1	0	4
Acari	Cunaxidae sp.2	2	0	2	1	0	0	0	1	1	1
Arane	ARANAE_SP3	4	0	4	2	1	0	0	1	1	3
Arane	ARANAE_SP2	40	14	26	15	11	7	5	2	7	33
Arane	ARANAE_SP4	5	3	2	2	2	0	1	0	0	5
Arane	ARANAE_SP5	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0
Blatodea	BLATODEA_SP1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1
Blatodea	BLATODEA_SP2	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1
Blatodea	BLATODEA_SP3	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1
Coleoptera	Pitiliidae	5	1	4	2	2	0	1	0	5	0
Coleoptera	Hidrophilidae	6	4	1	2	2	2	0	0	2	4
Coleoptera	Noteridae - gen. nov. 1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0
Coleoptera	Scolitynae	3	3	0	1	1	0	1	0	1	2
Coleoptera	*Copelatus sp.n.*	5	5	1	2	0	2	1	0	2	3
Coleoptera	Staphilinidae Aleocharinae sp1	8	0	8	2	1	1	3	1	2	6
Coleoptera	Staphilinidae Aleocharinae Sp2	4	0	4	2	0	0	2	0	2	2
Coleoptera	Staphilinidae gen. nov.	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0
Coleoptera	Juvenil sp1	7	6	1	5	1	0	1	0	3	4
Coleoptera	Juvenil sp2	12	12	0	3	2	3	2	2	3	9
Coleoptera	*Lutrochidae Lutrochus sp*	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0
Coleoptera	Juvenil sp3	2	0	2	1	0	1	0	0	0	2
Coleoptera	*Copelatus sp1*	6	6	0	1	1	2	1	1	4	2
Collembola	*Cyphoderus sp*	11	2	9	3	3	2	2	1	10	1
Collembola	*Artesia sp*	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1
Collembola	*Isotomiella sp*	6	6	0	3	2	1	0	0	0	6
Collembola	*Stenognathellus sp.1*	8	8	0	2	2	2	2	0	4	4
Collembola	*Brachystomella sp*	2	2	0	0	0	1	1	0	0	2
Collembola	*Stenognathellus sp.2*	4	0	4	2	1	0	1	0	1	3
Collembola	*Lepdorcytus sp*	78	24	54	28	18	14	9	9	33	45
Collembola	*Folsomides sp*	10	8	2	4	4	2	0	0	2	8
Collembola	Neelidae sp	6	4	2	3	2	0	1	0	2	4
Collembola	*Troglolaphysa sp*	4	3	1	3	1	0	0	0	1	3
Collembola	*Pseudocerates sp*	3	3	0	1	0	2	0	0	1	2
Cyclopoida	Copepoda sp.1	37	35	3	12	9	6	7	3	19	18
Diptera	Ceratopogonidae sp.1	32	24	7	11	7	6	4	4	9	23
Diptera	Phoridae sp.1	18	15	3	9	4	3	1	1	17	1
Diptera	Psychodidae sp.1	8	0	8	3	2	3	0	0	6	2
Diptera	Diptera sp.1	9	2	7	2	1	2	2	2	5	4
Diptera	Diptera sp.2	2	1	1	0	0	1	0	1	1	1
Hemiptera	Reduviidae sp.1	3	2	1	2	0	1	0	0	1	2
Hymenoptera	Formicidae sp.1	5	2	3	2	0	2	0	1	2	3
Isopoda	*Circoniscus sp1*	2	2	0	1	1	0	0	0	0	2
Isoptera	*Nasutitermes sp.1*	9	2	7	0	3	3	1	2	0	9
Opiliones	*Opiliones sp.1*	4	0	4	2	1	1	0	0	1	3
Polydesmida	*Pseudoporatia sp.1*	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1
TOTAL		575	273	304	198	133	114	77	54	262	314

Fonte: Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados amostrados

O Colêmbola *Lepdorcytus* sp e ácaro *Machrocheles* sp1 foram as espécies mais ocorrentes, independentemente do tipo de isca utilizado, profundidade ou estação climática (FIGURA 17).

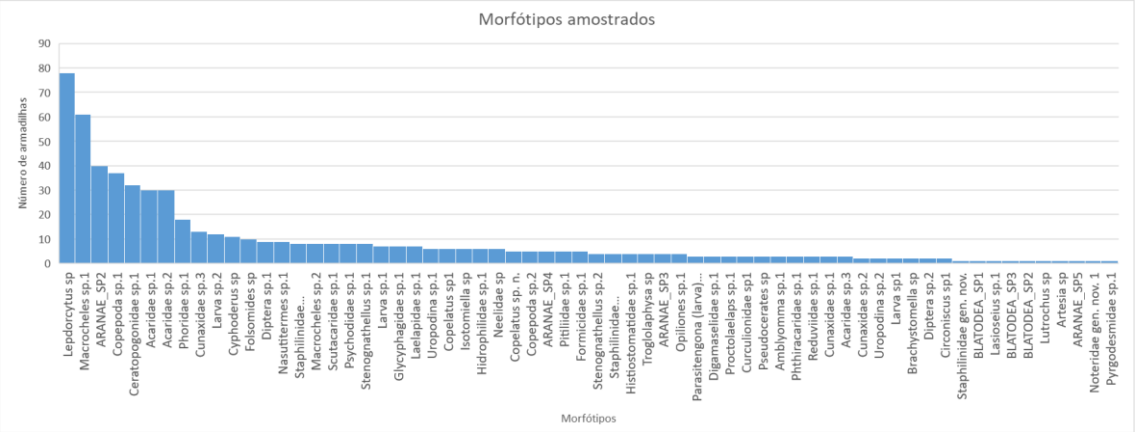


Figura 17: Ocorrência dos táxons mais abundantes amostrados por armadilhas no platô N3 na estação seca em Carajás/PA.

4.2. Efeito das variáveis ambientais sobre a riqueza e composição de espécies observadas

De forma geral, a riqueza total não apresentou relação significativa com o tipo de isca utilizada. Contudo, alguns grupos específicos que tiveram grande riqueza e ampla distribuição entre as armadilhas de acordo com as variáveis analisadas, como os ácaros, colembolos, dípteras e coleópteras também foram analisados de maneira isolada.

A amostragem de aranhas também foi influenciada pelo tipo de isca utilizado, uma vez que a riqueza foi maior nas armadilhas que continham isca padrão. (R^2= 3.399, ***P value*** 0.000677) (FIGURA 18).

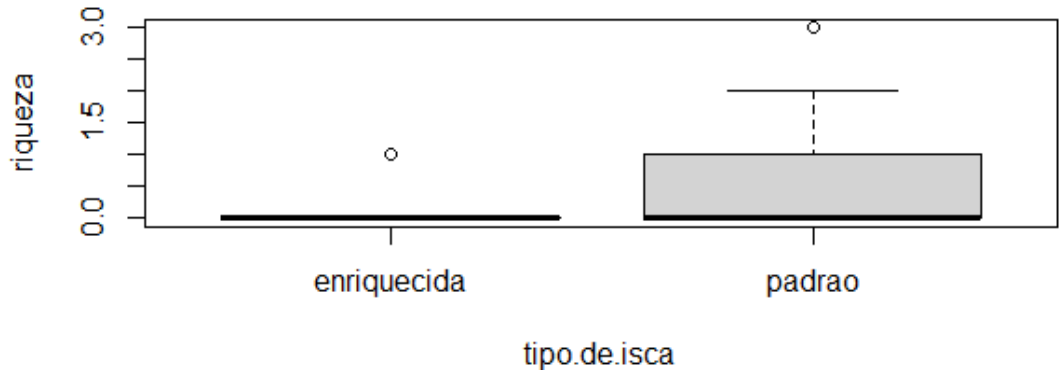


Figura 18: Boxplot da riqueza de aranhas de acordo com o tipo de isca. (R^2= 3.399, ***P value*** 0.000677).

Os ácaros, por sua vez, apresentaram influência na sua distribuição de acordo com o tipo de isca utilizado na coleta, ocorrendo mais espécies nas armadilhas com isca enriquecida. Isso decorre do fato deste grupo apresentar uma alimentação muito diversificada entre os grupos, com espécies predadoras de fungos e bactérias, o que ocorreu de forma abundante nas armadilhas contendo isca enriquecida (R^2= -3.014, ***P value*** 0.00258) (FIGURA 19).

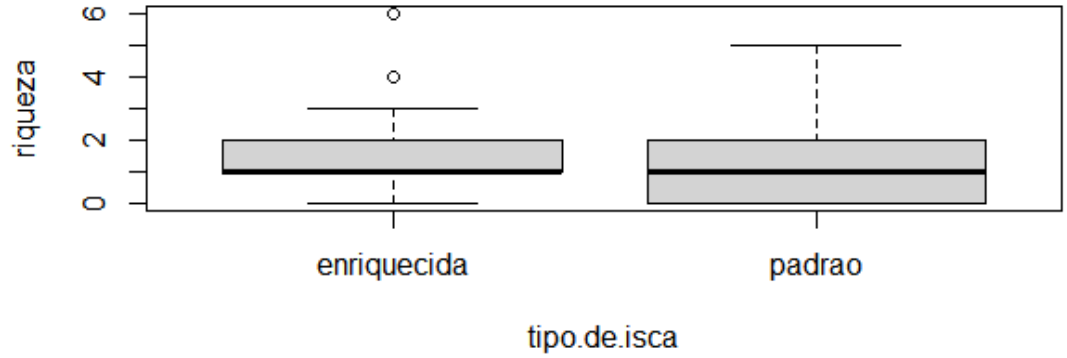


Figura 19: Boxplot da riqueza de ácaros de acordo com o tipo de isca utilizado, independentemente da estação do ano (R^2= -3.014, ***P value*** 0.00258).

Como visto anteriormente, o número de armadilhas recuperadas de acordo com a profundidade foi diferente. Ao se comparar o conjunto de dados total e um subconjunto dos dados onde todas as armadilhas foram recuperadas de forma igual em todas as profundidades foi observado que não houve diferença significativa entre os conjuntos de dados (***P***-value 0,07613). Desta forma, as análises foram realizadas com o conjunto total de armadilhas.

Ao se observar a distribuição vertical das espécies coletadas em todas as amostras foi possível perceber uma riqueza decrescente a partir da superfície, evidenciando que as armadilhas superficiais, independentemente do tipo de isca utilizada, apresentam uma maior riqueza de espécies do que as armadilhas dispostas em extratos mais profundos (TABELA 4).

Tabela 4: Riquezas da fauna total amostradas nos furos de sondagem.

PROFUNDIDADE	MÉDIA RIQUEZA DADOS TOTAIS	DESVIO PADRÃO	MÉDIA RIQUEZA ISCA ENRIQUECIDA	DESVIO PADRÃO	MÉDIA RIQUEZA ISCA PADRÃO	DESVIO PADRÃO	MÉDIA RIQUEZA ESTAÇÃO SECA	DESVIO PADRÃO	MÉDIA RIQUEZA ESTAÇÃO CHUVOSA	DESVIO PADRÃO
5	**4,62**	2,35	**4,33**	2,24	**4,91**	2,4	**4,31**	1,86	**5,01**	2,75
10	**3,59**	2,13	**3,58**	2,06	**3,42**	2,15	**3,2**	1,28	**3,83**	2,72
15	**3,67**	1,74	**3,61**	1,61	**3,57**	1,86	**3,3**	1,61	**3,92**	1,89
20	**3,12**	1,62	**3,27**	1,61	**2,92**	1,73	**3,11**	1,89	**3,09**	1,37
25	**2,63**	1,51	**2,51**	1,52	**2,75**	1,61	**2,91**	1,56	**2,95**	1,48

Fonte: Fonte: Elaborada pelo autor com base nos dados totais amostrados

Na tabela 4 é possível observar que existe uma tendência de queda na riqueza de espécies de acordo com o aumento da profundidade, o que ocorreu da mesma maneira com os dados parciais mostrados na tabela 5.

Desta forma são também apresentados na tabela 5 os dados com o grupo de amostras em furo de sondagem que continham armadilhas em todas as profundidade. Os furos 02, 03, 04, 05, 07, 09, 12, 13, 14, 15, 16, 20, 21, 22, 23 e 24 apresentaram amostras em todas as profundidades em pelo menos algumas das estações.

Tabela 5 Relação da média de riqueza de espécies encontrada em cada profundidade a partir dos furos de sondagem que continuam todas as armadilhas.

PROFUNDIDADE	MÉDIA RIQUEZA DADOS TOTAIS	DESVIO PADRÃO	MÉDIA RIQUEZA ISCA ENRIQUECIDA	DESVIO PADRÃO	MÉDIA RIQUEZA ISCA PADRÃO	DESVIO PADRÃO	MÉDIA RIQUEZA ESTAÇÃO SECA	DESVIO PADRÃO	MÉDIA RIQUEZA ESTAÇÃO CHUVOSA	DESVIO PADRÃO
5	**5,42**	2,01	**5,51**	2,26	**5,36**	1,91	**5,18**	1,66	**5,75**	2,49
10	**3,52**	2,14	**4,12**	2,47	**3,09**	1,86	**2,91**	1,22	**4,37**	2,87
15	**4,11**	1,94	**3,75**	2,19	**4,36**	2,05	**3,81**	1,66	**4,71**	2,31
20	**3,47**	1,61	**3,62**	1,68	**3,36**	1,71	**3,45**	1,86	**3,57**	1,31
25	**2,68**	1,56	**2,5**	1,51	**2,81**	1,66	**3,01**	1,61	**2,25**	1,48

Fonte: Fonte: Elaborada pelo autor com base nos dados parciais amostrados

Uma vez que não houve diferença significativa entre os dados totais e parciais quanto à distribuição da riqueza em relação à profundidade, as análises subsequentes foram realizadas com base nos dados totais, não sendo verificadas diferenças significativas entre os dados (p-value 0,07613).

Os resultados dos testes de GLMM mostraram que considerando-se a fauna total, a profundidade é um fator estruturante da comunidade de artrópodes do habitat subterrâneo. Foram analisados os efeitos da profundidade evidenciando uma influência negativa sobre a riqueza total de artrópodes subterrâneos (R^2= 0.07078, *P-value* <0.001*). Este resultado se justifica uma vez que dos 63 taxons coletados, apenas três apresentaram troglomorfismo aparente. Desta forma a maioria das espécies que ocorrem no MSS faz parte da fauna epígea, portanto, com pouca adaptação ao habitat subterrâneo (FIGURA 20).

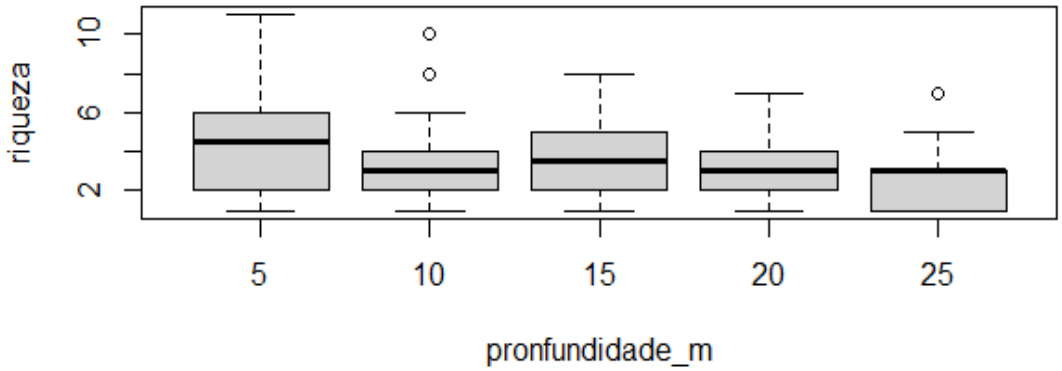


Figura 20: Boxplot da relação entre a riqueza total de morfótipos que utilizam o habitat subterrâneo em relação às profundidades estudadas (R^2= 0.07078, *P-value* <0.001*).

Alguns grupos específicos como as aranhas, apresentaram seus morfótipos influenciados pela profundidade, uma vez que a riqueza foi maior em profundidades menores (R^2= -2.584, ***P value*** = 0.009777) (FIGURA 21).

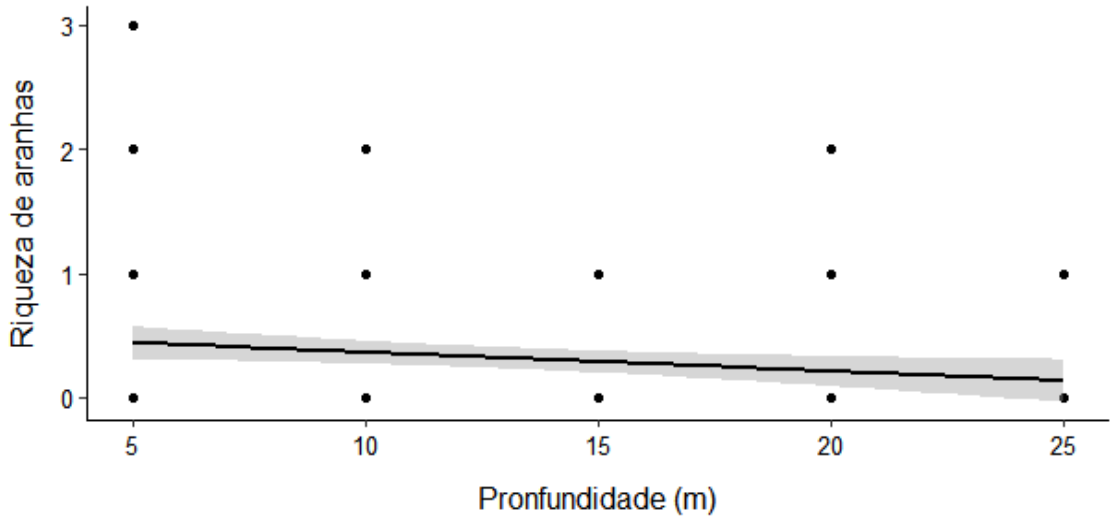


Figura 21: GLMM da relação entre a riqueza de espécies de aranhas e a profundidae (R^2= -2.584, ***P value*** = 0.009777).

No grupo faunístico dos Collembola também foi possível encontrar uma relação negativa entre a riqueza e a profundidade da amostragem. Assim quanto mais profunda

for a amostra, menor a quantidade de espécies encontradas (R^2= -2.866, ***P value*** 0.00416). (FIGURA 22).

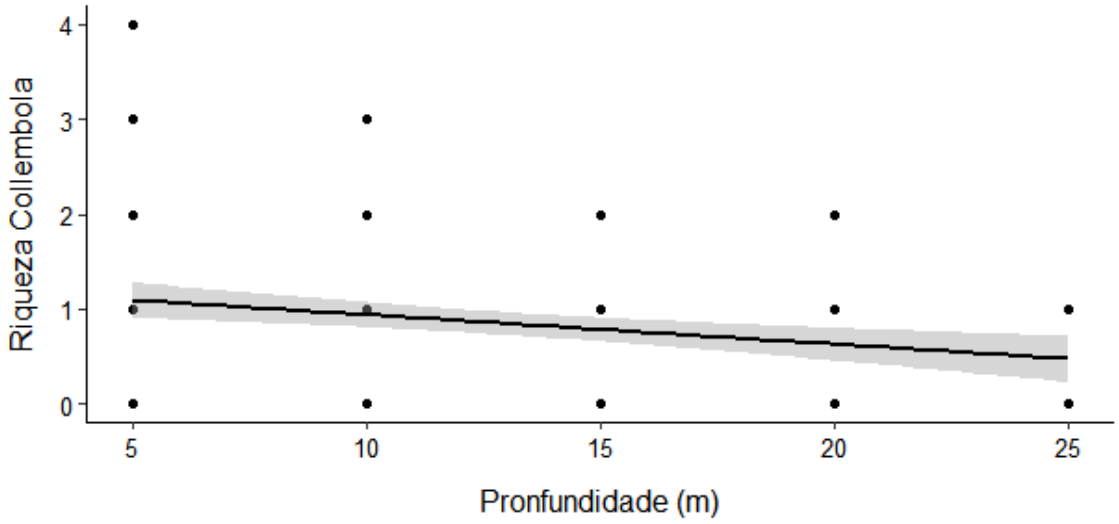


Figura 22: GLMM da relação entre a riqueza de espécies de Collembola e a profundidade (R^2= -2.866, ***P value*** 0.00416).

A sazonalidade climática de uma região é marcada pela amplitude da flutuação de variáveis ambientais e influenciam a estruturação de uma comunidade pela alteração da disponibilidade de recursos. Em uma região tropical, espera-se que para todas as espécies um dos principais fatores da sazonalidade climática seria influenciado pela variação do índice pluviométrico. Contudo, a comunidade que habita o MSS na Formação Ferrífera de Carajás de acordo com a profundidade estudada foi muito influenciada pela variação no nível da água no maciço.

O monitoramento da variação do nível da água estocada no maciço foi realizado em alguns furos de sondagem (FIGURA 23).

Figura 23: Localização dos furos de sondagem utilizados para o monitoramento do nível da água estocada no maciço no platô N3.

Um dos efeitos da flutuação do índice pluviométrico em Serra Norte, como exemplificado pelos dados pluviométricos coletados entre 2005 e 2012 apresentados na Figura 24, foi a alteração da proporção entre a zona vadosa e a zona saturada no perfil da formação geológica (TABELA 6), impossibilitando animais terrestres de permanecerem em profundidades maiores durante a estação chuvosa

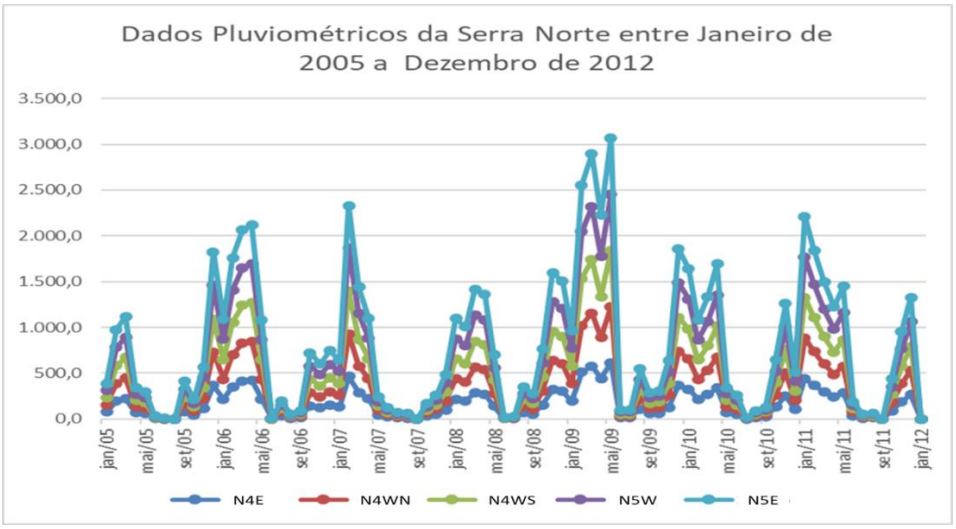


FIGURA 24: Os dados obtidos em estudos realizados na Serra Norte ao longo do tempo mostram uma ampla variação pluviométrica entre as estações climáticas.

A tabela 6 mostra a variação na cota do nível d'água de acordo com a estação climática. Percebe-se um aumento do nível atingindo maiores cotas durante a estação chuvosa e cotas mais baixas durante a estação seca.

Tabela 6: Variação da cota do nível d'água em relação à estação climática.

ANÁLISE	Piezômetro 1	Estação	Piezômetro 2	Estação	Piezômetro 3	Estação	Piezômetro 4	Estação
Cota furo (m)	688		687		670		663	
Cota máxima (m)	678,16	chuvosa	629,50	chuvosa	642,45	chuvosa	629,38	chuvosa
Nivel máximo da Z saturada (m)	9,18	chuvosa	40,26	chuvosa	17,3	chuvosa	33,48	chuvosa
Cota mínima (m)	664,84	seca	609,93	seca	604,58	seca	614,06	seca
Nível minimo da Z saturada (m)	22,5	seca	59,83	seca	55,17	seca	48,8	seca
Variação média anual (m)	14,86		53,67		34,27		43,51	
Variação máxima (m)	13,32		19,57		37,87		15,32	
Variação média entre os pontos (m)	**21,52**							

Fonte: Elaborada pelo autor com base nos dados dos piezômetros instalados previamente

A fauna total não apresentou uma tendência única para a variação climática, o que já era esperado, uma vez que os diversos grupos estudados apresentam diferentes nichos e, com isso, toleram alterações sazonais em diferentes amplitudes. Contudo, quando analisamos alguns grupos dominantes como os ácaros, dípteras e coleópteras observamos algumas tendências. Os morfótipos de ácaro tiveram sua riqueza influenciada pela sazonalidade climática (R^2= 2.427, ***P value*** 0.01522), tendo, estatisticamente, mais morfótipos coletados na estação seca (FIGURA 25).

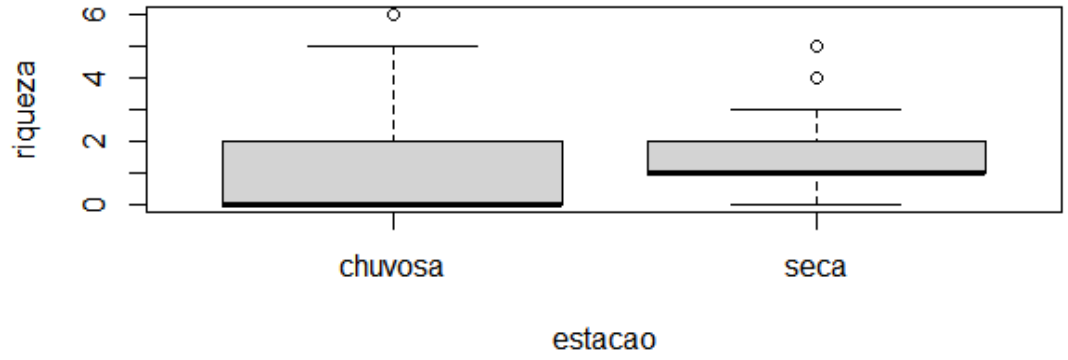


Figura 25: Boxplot da riqueza de ácaros de acordo com a estação climática (R^2= 2.427, ***P value*** 0.01522).

O grupo dos dípteras teve suas distribuições influenciadas pela variação na estação climática, sendo mais diversa na estação chuvosa (R^2= -2.615, ***P value*** 0.008921) (FIGURA 26).

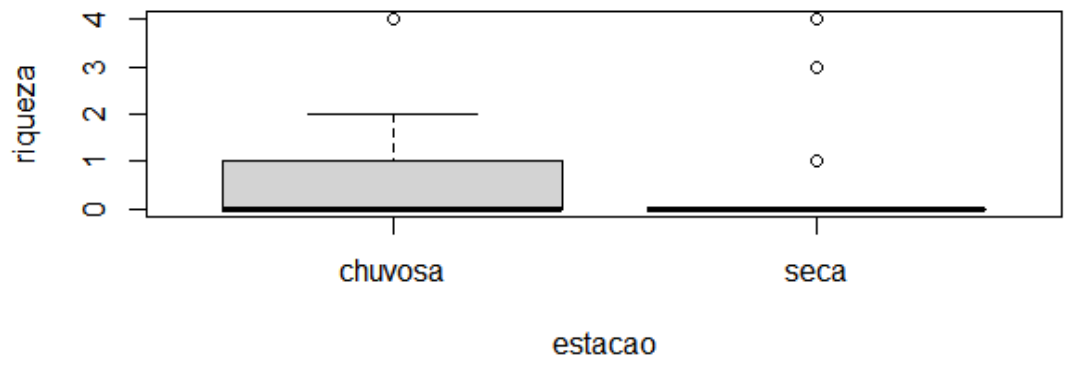


Figura 26: Boxplot da relação entre a riqueza de morfótipos de dípteras de acordo com a estação. (R^2= -2.615, ***P value*** 0.008921).

Os coleópteras tiveram sua riqueza influenciada pela sazonalidade das amostras. A presença de diversas espécies aquáticas, bem adaptadas ao meio subterrâneo, favoreceu uma maior riqueza de espécies na estação chuvosa (R^2= -2.362 ***P value*** 0.0182) (FIGURA 27).

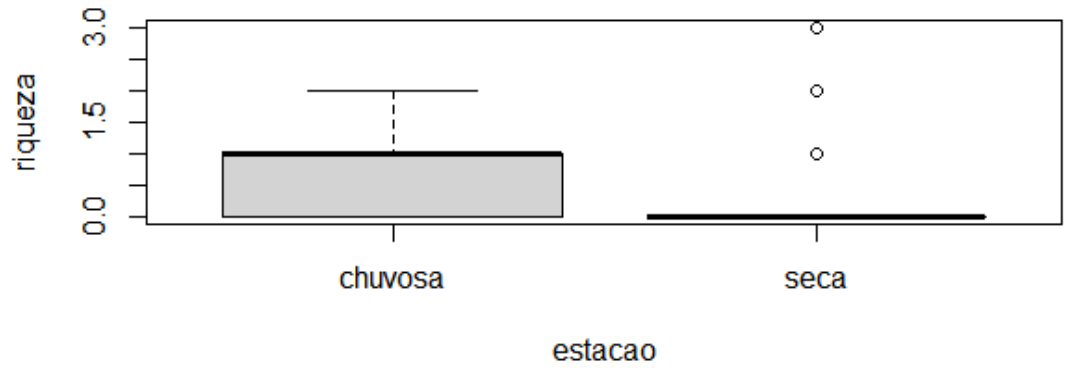


Figura 27: Boxplot da relação entre a riqueza de morfótipos de coleópteras de acordo com a estação (R^2= -2.362 ***P value*** 0.0182).

Uma vez que as espécies da superfície encontradas também no MSS apresentam sua distribuição espacial afetada por fatores epígeos, estas mesmas correlações entre as variáveis foram realizadas com o grupo de espécies troglomórficas encontradas.

Entretanto, os dados de ocorrência foram insuficientes para verificar alguma relação ecológica entre estas espécies e as variáveis.

Além das relações entre riqueza, a composição de espécies também foi influenciada pelos fatores mensurados. Após realizar análises de LME foi possível observar os valores obtidos com relação às variáveis observadas: sobre a profundidade, foi encontrada uma relação negativa significativa evidenciando uma diminuição da diversidade quanto maior for a profundidade (R^2 = -3.171, ***P value*** 0.00187). O tipo de isca apresentou uma relação positiva significativa com a isca padrão (R^2 = 2.132, ***P value*** 0.04287). Por sua vez, a sazonalidade climática apresentou uma relação negativa significativa com a estação chuvosa, apresentando maior diversidade na estação seca (R^2 = -4.285, ***P value*** <0.001) podendo estar relacionado ao aumento do nível da água no sistema, interferindo na possibilidade de ocupação deste espaço por organismos da superfície, que respiram ar atmosférico. Isto corrobora com os resultados obtidos analisando-se apenas a riqueza (análise de GLMM).

Em resumo, a tabela 7 mostra a variável resposta, neste caso, representada pela riqueza dos táxons analisados e sua relação com a variável preditora, representada pelo tipo de isca, profundidade e sazonalidade climática. Em destaque, as variáveis que tiveram relação significativa.

Tabela 7. Relação da riqueza e composição de espécies de acordo com o método de análise.

Variáveis resposta		Método	Variáveis preditoras	Erro padrão	t/z-value	p-value
Fauna Total richness		GLMM	Intercept	0.091008	17.640	<0.001*
			Profundidade	0.732	0.07078	<0.001*
Arane richness		GLMM	Intercept	0.40605	-3.262	0.001107
			Profundidade	0.02316	-2.584	0.009777
			isca	0.36896	3.399	0.000677
Acari richness		GLMM	Intercept	0.1559	1.258	0.20848
			Tipo de Isca	0.1495	-3.014	0.00258
			Estação	0.1556	2.427	0.01522
Collembola richness		GLMM	Intercept	0.17812	1.719	0.08562
			Profundidade	0.01361	-2.866	0.00416
Coleoptera richness		GLMM	Intercept	0.2538	-3.895	<0.001*
			Estação	0.3131	-2.362	0.0182
Diptera richness		GLMM	Intercept	0.1543	-3.402	0.000668
			Estação	0.2467	-2.615	0.008921
General composition	Mds1	LME	Intercept	0.147452	-2.601	0.0125
			Estação	0.078376	14.060	<0.001*
	Mds2		Intercept	0.180236	1.600	0.11595
			Profundidade	0.007148	-3.171	0.00187
			Isca	0.204161	2.132	0.04287
			Estação	0.100842	-4.285	<0.001*

Fonte: Elaborada pelo autor com base nos dados ecológicos

Podemos observar que a riqueza total, com base no método GLMM, foi influenciada pela profundidade e que a riqueza de aranhas foi influenciada tanto pela profundidade quanto pelo tipo de isca. Da mesma maneira, a riqueza de ácaros foi influenciada pelo tipo de isca e pela sazonalidade climática. A riqueza de Colembolos, por sua vez, foi influenciada apenas pela profundidade. Os coleópteras foram mais abundantes na estação chuvosa, da mesma maneira que os dípteras, também influenciados apenas pela sazonalidade climática.

Desta forma, a variável tipo de isca influenciou a distribuição de aranhas, mais comuns em armadilhas com isca padrão, e de ácaros, que de forma contrária foram mais comuns em armadilhas com isca enriquecida. A variável profundidade foi a única que influenciou a fauna total analisada, apresentando uma diminuição da riqueza de espécies ao longo do gradiente altimétrico, ou seja, quanto mais profundo, menor a riqueza de espécies. Esta característica está relacionada com a capacidade de adaptação às camadas mais internas do MSS, de forma similar ao que ocorre nas cavernas, priorizando a permanência de espécies mais adaptadas ao meio subterrâneo.

A variável sazonalidade climática influenciou a riqueza de espécies de ácaros, que foi maior na estação seca. Por outro lado, tanto a riqueza de dípteras quanto de coleópteras também foi influenciada pela sazonalidade, contudo apresentando maior número na estação chuvosa.

4.3. Betadiversidade da comunidade de artrópodes do habitat subterrâneo.

A partir de uma análise de similaridade da riqueza e composição com base em eixos principais foi possível verificar a baixa heterogeneidade na composição das amostras tanto entre as armadilhas do mesmo furo, quanto entre armadilhas de furos diferentes, sem relação direta com a distância, uma vez que houve uma fraca evidência de grupos distintos (FIGURA28).

Foram realizadas análises de NMDS para verificar a similaridade entre as amostras obtidas a partir das 158 armadilhas agrupadas entre os 24 furos de sondagem, utilizando-se o Indice de diversidade de Jaccard. Tendo em vista que quanto mais próximos os pontos mais similares eles são, este resultado indica que não há uma estruturação espacial que leve a uma diferenciação na composição de espécies de cada um dos 24 furos amostrados no platô N3.

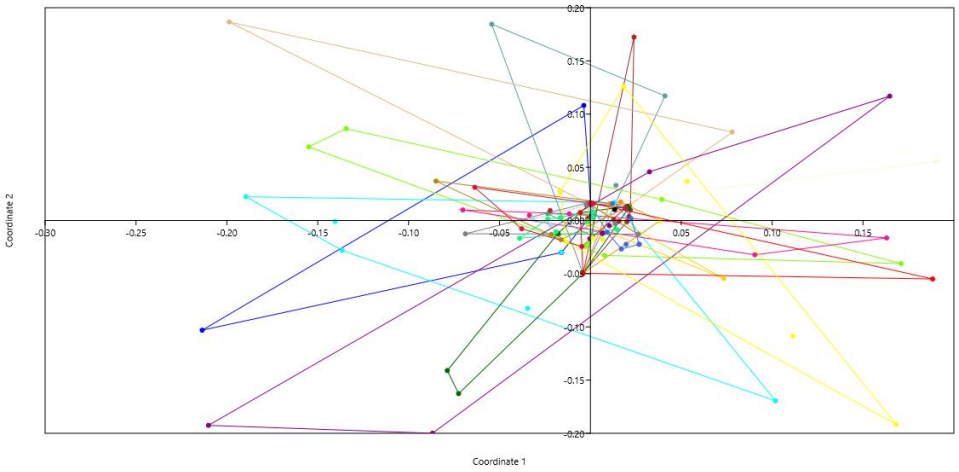


Figura 28: Agrupamento multidimensional da dissimilaridade na composição da fauna entre os furos utilizando-se o Indice de diversidade de Jaccard. De acordo com o valor de *R* (0,1564), foi observada uma baixa diversidade (*p*: 0,0001) entre os 24 furos, em que percebe-se pouca diferenciação entre as amostras. Os polígonos representam os furos e os pontos representam as armadilhas.

A partir dos resultados das análise de similaridade das amostras obtidas foi possível observar que, apesar de haver diferenças significativas da riqueza e composição de espécies, evidenciados pelas análises do efeito das variáveis estudadas, existe uma baixa diversidade entre as amostras. De forma complementar podemos inferir que as espécies encontradas em um platô contínuo da Formação Ferrífera de Carajás não encontram barreiras ou outras dificuldades na sua dispersão no MSS.

Para mensurar a diversidade alfa para cada armadilha foi obtido o Índice de Shannon levando em consideração a riqueza das espécies, tendo como base as armadilhas como unidade amostral (TABELA 8).

Tabela 8. Índices de Shannon de cada armadilha.

Aramdilha	I. Shannon	Aramdilha	I. Shannon	Aramdilha	I. Shannon	Aramdilha	I. Shannon
F10-018-05MC	1,792	**F24-R15-20MC**	1,386	**F16-058-20MS**	1,792	**F7-016-25MS**	1,792
F10-032-10MC	1,386	**F24-R16-25MC**	1,099	**F16-059-15MS**	1,386	**F7-049-15MS**	1,609
F10-050-15MC	1,099	**F3-028-05MC**	1,946	**F16-063-25MS**	0,6931	**F7-050-10MS**	1,099
F11-R05-5MC	1,609	**F3-048-10MC**	1,792	**F18-053-05MS**	0,6931	**F7-103-20MS**	1,748
F11-R06-10MC	1,099	**F3-069-15MC**	1,792	**F18-SN1-10MS**	1,099	**F8-088-15MS**	1,386
F11-R07-15MC	1,386	**F3-097-20MC**	1,386	**F18-SN2-15MS**	1,099	**F8-095-05MS**	0,6931
F11-R08-20MC	0	**F3-100-25MC**	0	**F19-035-10MS**	1,386	**F8-098-10MS**	1,099
F12-053-05MC	1,099	**F4-022-05MC**	1,386	**F19-055-05MS**	1,386	**F9-006-15MS**	0
F12-063-10MC	0	**F4-052-10MC**	1,386	**F20-008-25MS**	0,6931	**F9-030-10MS**	1,386
F12-R11-20MC	0	**F4-056-15MC**	0,6931	**F20-032-05MS**	1,946	**F9-110-05MS**	1,609
F13-025-05MC	2,398	**F4-080-20MC**	1,609	**F20-034-15MS**	0,6931		
F13-079-10MC	2,079	**F4-096-25MC**	1,609	**F20-037-10MS**	0,6931		
F13-094-15MC	1,099	**F5-047-05MC**	1,946	**F20-071-20MS**	1,099		
F14-035-05MC	1,946	**F5-092-10MC**	2,079	**F2-100-05MS**	1,386		
F14-072-10MC	1,099	**F7-SN1-05MC**	0,6931	**F21-013-10MS**	1,099		
F14-081-15MC	1,099	**F7-SN2-10MC**	1,386	**F21-060-25MS**	1,386		
F14-089-20MC	1,099	**F7-SN3-15MC**	0,6931	**F21-065-20MS**	1,386		
F14-095-25MC	0	**F9-005-05MC**	0,6931	**F21-068-15MS**	1,386		
F15-074-05MC	1,609	**F9-033-10MC**	0	**F21-083-05MS**	1,099		
F15-091-10MC	0	**F9-065-15MC**	0	**F22-022-15MS**	1,386		
F16-026-05MC	0	**F9-067-10MC**	0	**F22-029-05MS**	1,792		
F18-011-05MC	1,099	**F9-103-25MC**	0	**F22-036-25MS**	0,6931		
F18-013-10MC	0,6931	**F05-027-15MS**	0	**F22-039-20MS**	1,099		
F18-030-15MC	1,099	**F05-048-05MS**	0	**F22-042-10MS**	0		
F18-057-20MC	1,099	**F10-089-05MS**	0,6931	**F23-024-10MS**	1,386		
F19-042-05MC	1,946	**F10-092-10MS**	0	**F23-031-05MS**	1,386		
F20-003-05MC	1,609	**F11-005-15MS**	0,6931	**F23-033-15MS**	1,386		
F20-054-10MC	1,792	**F11-010-25MS**	0,6931	**F23-096-20MS**	1,099		
F20-075-15MC	1,792	**F11-015-05MS**	0,6931	**F24-023-15MS**	1,099		
F20-102-20MC	1,099	**F11-025-20MS**	0,6931	**F24-038-05MS**	1,609		
F20-109-25MC	1,099	**F11-028-10MS**	1,099	**F24-044-10MS**	1,386		
F2-031-10MC	0,6931	**F12-082-20MS**	0	**F3-008-15MS**	1,609		
F2-043-05MC	1,386	**F12-084-15MS**	0,6931	**F3-020-25MS**	1,099		
F2-058-15MC	1,609	**F12-085-05MS**	1,792	**F3-102-05MS**	1,792		
F2-059-20MC	1,099	**F12-091-25MS**	0	**F3-103-10MS**	1,609		
F2-083-25MC	1,099	**F12-094-10MS**	1,099	**F3-107-20MS**	1,386		
F21-015-05MC	0,6931	**F13-003-05MS**	1,386	**F4-062-10MS**	1,386		
F22-034-20MC	0,6931	**F13-014-25MS**	1,609	**F4-069-20MS**	0,6931		
F22-037-15MC	1,386	**F13-017-10MS**	1,099	**F4-074-15MS**	0,6931		
F22-076-10MC	0,6931	**F13-040-15MS**	1,609	**F4-076-25MS**	1,099		
F22-085-05MC	0,6931	**F13-047-20MS**	1,386	**F4-079-05MS**	1,386		
F23-010-05MC	2,303	**F14-078-05MS**	1,386	**F5-009-10MS**	0		
F23-036-10MC	2,303	**F15-002-05MS**	1,792	**F5-018-25MS**	0		
F23-049-15MC	2,079	**F15-011-15MS**	1,946	**F5-046-20MS**	0		
F23-088-20MC	1,609	**F15-019-20MS**	1,099	**F5-048-05MS**	0,6931		
F23-096-25MC	0	**F15-032-10MS**	1,099	**F5-27-15MS**	0,6931		
F24-017-05MC	1,946	**F15-043-25MS**	1,386	**F6-067-10MS**	1,792		
F24-024-10MC	1,099	**F16-052-05MS**	1,792	**F6-071-05MS**	1,946		
F24-055-15MC	1,609	**F16-054-10MS**	1,386	**F7-004-05MS**	1,946		

Fonte: Autor com base nos dados ecológicos amostrados

Ao se analisar de forma pareada o conjunto de armadilhas foi obtido um índice de Betadiversidade de Sorensen de 0,9863121, demonstrando que as amostras foram

dissimilares quando comparadas par a par, levando-se em conta a sazonalidade. Contudo, a riqueza e a composição das amostras do platô analisado tenderam a formar grupos fracamente hierarquizados uma vez que a maior parte da amostra é da fauna de superfície e não existem barreiras para sua dispersão. A variação na composição se deu por *turnover* de espécies (Dissimilaridade de simpson 0,9784233). O aninhamento, por sua vez, explica pouco a variação na composição por perda de espécies (FIGURA 29).

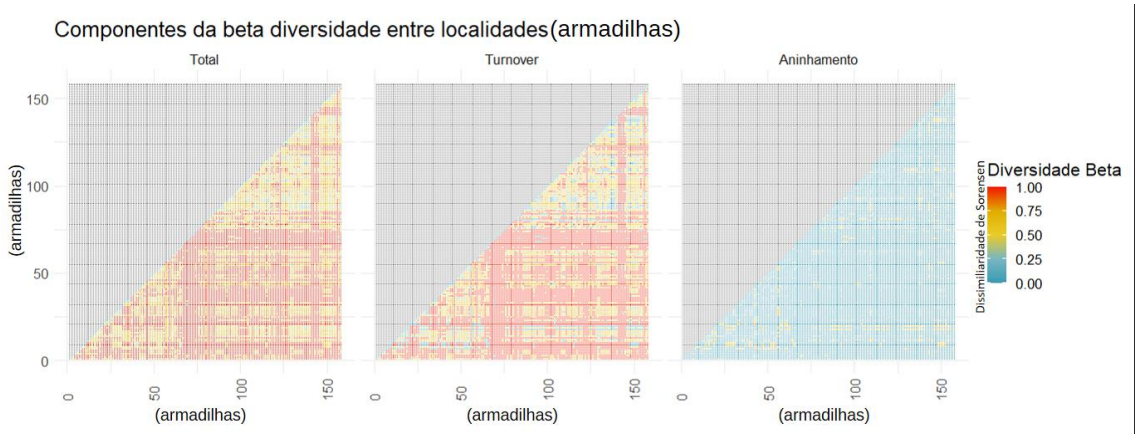


Figura 29: *Turnover* foi o componente da beta diversidade que explicou a variação encontrada nas armadilhas de acordo com os fatores analisados, uma vez que apresentou os índices de dissimilaridade de Sorensen mais elevados.

Outro dado que mostra um dado que mostra o bom desempenho do desenho amostral foi o resultado da análise da curva de rarefação, de acordo com os índices de diversidade. A figura 30 registra o número cumulativo de espécies de organismos detectados no MSS como uma função do esforço cumulativo gasto na busca de acordo com a metodologia adotada.

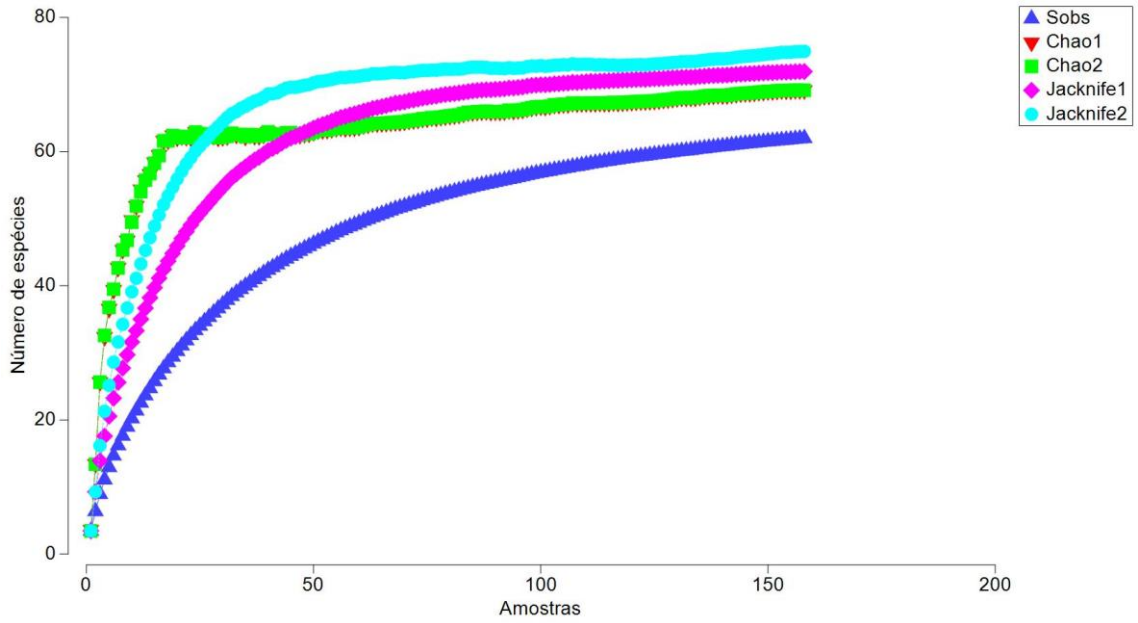


Figura 30: Curva de rarefação de espécies de acordo com os diversos índices e com base na metodologia utilizada.

Foi observada uma tendência à estabilização da curva gerada, mesmo utilizando-se vários índices de riqueza, o que indica que o esforço amostral utilizado foi capaz de amostrar de forma satisfatória a diversidade de artrópodes do MSS.

5. Discussão

Uma vez que os custos para a realização de furos de sondagem apenas para fins de pesquisa biológica inviabilizam a aplicação desta metodologia em ampla escala, faz-se necessário acesso às áreas com exploração mineral instaladas ou previstas, para aproveitamento dos furos já existentes. Desta forma, o livre acesso ao local de pesquisa representa uma das grandes barreiras para a realização de levantamentos de fauna do habitat subterrâneo.

Além disso, é importante haver uma coincidência da realização das perfurações com a instalação de aparatos de vedação necessários para manutenção dos fatores bióticos e abióticos. Desta forma, o fato de os furos terem sido perfurados dias antes da colocação das armadilhas minimizou a interferência de organismos superficiais.

A partir dos resultados foi visto que o desenho amostral foi positivo no que tange às iscas utilizadas: devido à profundidade das coletas (até 25m), o fato das armadilhas

não utilizarem líquidos conservantes e sim material vegetal estéril como meio de colonização foi de suma importância para a obtenção dos dados, principalmente na estação chuvosa, tanto devido às chuvas e enxurradas, quanto ao aumento do nível da água no solo.

Todavia, também foi possível notar a necessidade de aprofundamento em algumas questões como a selagem dos furos de sondagem de maneira mais eficaz, mantendo a qualidade dos parâmetros bióticos e abióticos, a fim de evitar perda de umidade durante a estação seca e excesso de água de forma direta durante a estação chuvosa.

Dentre os levantamentos faunísticos realizados utilizando-se furos de sondagem no Brasil, este foi um dos primeiros trabalhos que utilizou profundidades maiores que o delimitado por outros autores. Outro fator único foi o levantamento da fauna total de artrópodes, representando assim, um dos trabalhos mais abrangentes envolvendo MSS.

Durante a estação seca foram recuperadas 87 armadilhas das 120 colocadas, pois algumas ficaram presas nos furos de sondagem e durante a estação chuvosa foram recuperadas 71 armadilhas. Com isto, 33 armadilhas não foram analisadas na estação seca e 49 não puderam ser recuperadas na estação chuvosa. Desta forma, considerando a somatória de 240 armadilhas dispostas inicialmente, 158 foram analisadas.

O platô N3 corresponde a uma área em processo de licenciamento ambiental para exploração mineral e o acesso a estas áreas é muito restrito, dificultando a realização desse tipo de estudo, uma vez que é necessária a realização da instalação das armadilhas imediatamente na perfuração dos furos de sondagem. Como estes estudos não estão previstos nos processos normativos de licenciamento houve certa resistência do empreendedor em aceitar a realização da pesquisa. No presente caso, os furos de sondagem desta tese foram perfurados semanas antes do período de amostragem.

De maneira geral, foi observado o trânsito de espécies da fauna de artrópodes total, contendo diversos grupos que, de alguma forma, utilizam esse ambiente, bem como o registro de espécies troglomórficas, ocupando uma área maior que a caverna ou conjunto de cavernas.

Das espécies encontradas com alguma característica troglomórfica foram coletados três táxons. O Collembola *Cyphoderus* sp1, encontrado em onze armadilhas, o besouro *Copelatus* sp.1, encontrado em três, e o Miryapoda Pyrgodesmidae sp1, encontrado em apenas uma (FIGURA 31).

Figura 31: espécies encontradas com alguma característica troglomórfica

Após análises realizadas por especialistas nos grupos, foi possível detectar espécies ainda não descritas coletadas neste trabalho. Posteriormente, estudos taxonômicos mais aprofundados permitirão a descrição formal destes morfótipos (FIGURA 32).

Figura 32. Espécies ainda não descritas, coletadas neste trabalho, avaliadas por especialista no grupo.

De acordo com a metodologia adotada, a fauna encontrada é pouco diversa e com alguns poucos grupos mais bem distribuídos ao longo do perfil do meio subterrâneo como Acari, Collembola, Coleoptera, Araneae e Diptera, além da presença de espécies troglomórficas.

Quando são plotadas as espécies novas ou troglomórficas no mapa da área de estudo podemos notar uma distribuição ampla, principalmente em *Copelatus* spn e *Cyphoderus* sp, ambos os táxons com características troglomórficas (FIGURA 33).

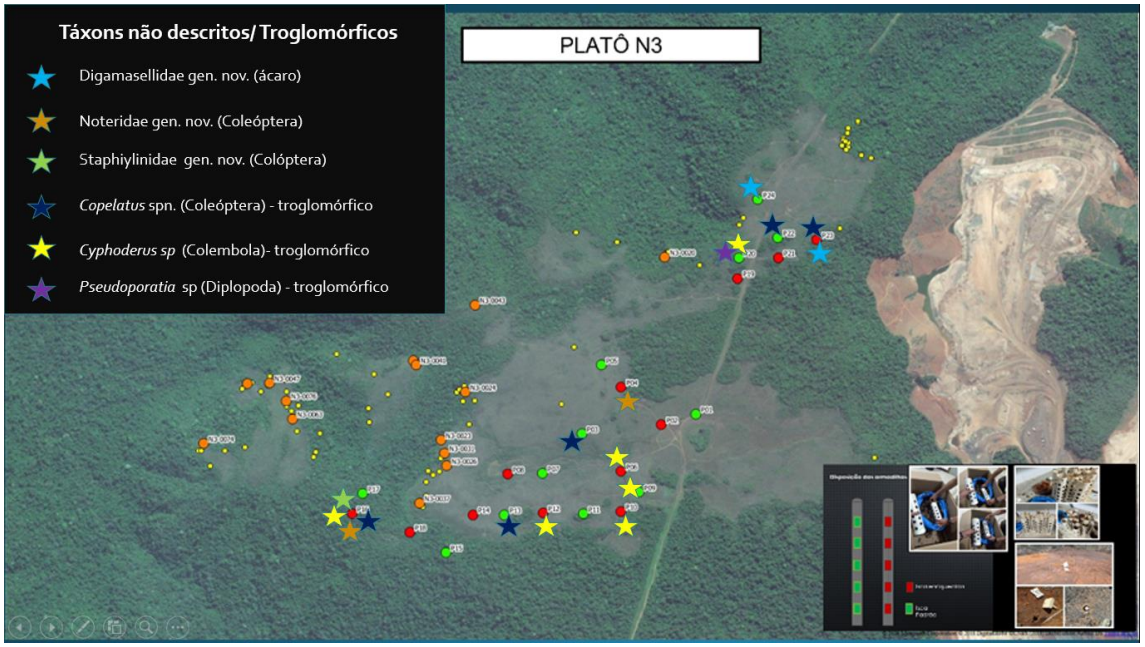


Figura 33: Mapa da ocorrência de táxons novos e troglomórficos encontrados na área de estudo.

Bioespeleo (2020), em um levantamento de coleópteros aquáticos em cavernas da Formação Ferrífera de Carajás encontrou indivíduos de *Copelatus* sp em apenas uma cavidade do platô N3. O levantamento da fauna do MSS encontrou duas espécies de *Copelatus*, uma delas sendo uma nova espécie, com seis indivíduos ocorrendo em cinco furos diferentes e outra espécie com seis indivíduos em quatro furos diferentes. Além disso outros táxons novos e troglomórficos foram encontrados.

A partir destes resultados foi possível observar uma maior eficiência de coleta da isca padrão em relação à isca enriquecida. Contudo, quanto à composição de espécies existe uma complementaridade resultando no levantamento total de artrópodes do MSS em Carajás. Este resultado evidencia a complexidade deste ambiente ainda pouco estudado, sendo este um dos poucos trabalhos a utilizar furos de sondagem em área de mineração para levantamento indireto da fauna subterrânea presente o MSS. Trata-se de um trabalho exploratório, contudo foi possível comprovar que alguns grupos ocorreram mais nas armadilhas com isca padrão, como no caso de espécies das aranhas e ácaros amostrados.

Em relação à fauna total de artrópodes estudada, foi possível observar uma grande variedade de grupos taxonômicos mais adaptados ao meio subterrâneo mais profundos como os ácaros e colembolos, bem como a ocorrência de grupos menos adaptados, mais restritos às menores profundidades, como os dípteras.

Com relação à influência da profunidade sobre a riqueza da fauna do MSS foi possível perceber uma riqueza decrescente a partir da superfície, evidenciando que as armadilhas superficiais, independentemente do tipo de isca utilizada, apresentam uma maior riqueza de espécies do que as armadilhas dispostas em extratos mais profundos.

A riqueza total foi afetada uniformemente pela profundidade. O mesmo ocorreu com alguns grupos que apresentaram uma diminuição da riqueza desde a superfície até as camadas mais profundas, como no caso das aranhas e colembolas.

Estes grupos apresentam uma grande diversidade de espécies e, portanto, apresentam nichos específicos que levam a diferentes adaptações ao meio subterrâneo que vai desde espécies que responde aos estímulos encontrados na superfície e outras adaptadas aos fatores ecológicos que dirigem as espécies subterrâneas. As alterações sazonais promoveram mudanças observadas nas diversidades alfa e beta ao longo do ciclo anual, sendo possível observar o efeito de substituição das espécies (*turnover*). Este resultado corrobora com Bioespeleo (2020), que demonstrou que as cavernas do platô N3 apresentam entre 14,33% (±22,07) e 19,39% (±22,30) de similaridade na composição de espécies troglóbias entre si, não sendo observada autocorrelação espacial para a composição de espécies, ou seja, a proximidade não foi um fator determinante para a similaridade entre cavernas.

Como vimos anteriomente, a sazonalidade foi o fator que afetou a distribuição da riqueza da maior parte dos grupos faunísticos analisados. Um dos fatores observados em campo que deve influenciar na estrutura da comunidade de artrópodes do habitat subterrâneo é a variação do nível d'água no maciço, influenciando diretamente na proporção entre a zona vadosa e zona saturada, determinando a distribuição de espécies terrestres e adaptadas ao ambiente aquático.

Existe a possibilidade de a variável sazonalidade estar relacionada com a influência da variação do nível da água no solo, uma vez que foi possível observar o afloramento de lençol freático na superfície do platô durante a estação chuvosa. Esta variação do nível da água sobre a comunidade de artrópodes do ambiente subterrâneo em

grandes profundidades pode ser um importante fator estruturante desta comunidade, uma vez que a zona vadosa favorece animais terrestres e a zona saturada favorece animais aquáticos. Este efeito deve favorecer uma amostragem mais rica e diversa no MSS durante a estação seca e de forma contrária, mais rica e diversa nas cavernas ao longo a estação chuvosa, uma vez que a saturação do MSS força os animais terrestres para o interior das cavernas.

A variação do ciclo pluviométrico anual acarretou uma grande mudança na comunidade de artrópodes, uma vez que a flutuação do nível da água no solo alterou a proporção entre o ambiente vadoso, onde ocorrem espécies terrestres, e o ambiente saturado, que favorece espécies adaptadas ao meio aquático (FIGURA 34). Este efeito deve favorecer uma amostragem mais rica e diversa no MSS durante a estação seca e de forma contrária, mais rica e diversa nas cavernas ao longo a estação chuvosa, uma vez que a saturação do MSS força os animais terrestres para o interior das cavernas.

Figura 34: (A) Paisagem durante a estação seca e (B) paisagem durante a estação chuvosa, evidenciando alguns dos pontos de coleta abaixo do nível da água, o que deve ser um dos fatores que provavelmente influenciam na composição da fauna entre as estações.

Desta forma, essa água estocada no interior do platô funciona como uma caixa d'água que lentamente abastece o lençol freático localizado em cotas mais baixas. Existe a possibilidade desta água estocada representar uma fonte de umidade e dessedentação para espécies subterrâneas durante os períodos de estiagem, que adotariam uma estratégia de ocupar mais o MSS do que o interior da caverna em períodos de seca. Por outro lado,

durante os períodos chuvosos e consequentemente do aumento do nível da água no maciço, ocorre a diminuição da zona vadosa o que impede ou dificulta a permanência de espécies troglóbias, dando espaços a espécies estigóbias, que habitam a zona saturada. Isto indicaria um fator importante a ser considerado na manutenção do MSS em estratégias de conservação de espécies subterrâneas.

Com relação à similaridade das amostras, os dados de um mesmo furo se mostraram mais próximos quando se leva em consideração a riqueza e a composição de espécies, quando comparado aos dados de furos diferentes. Contudo, este agrupamento mostra uma estruturação fraca entre os furos, evidenciando médias próximas mostrando que não foram observados indícios de barreiras que influenciem a distribuição da fauna ocupante do MSS, independentemente da profundidade ou sazonalidade no platô analisado.

Para finalizar, os resultados aqui apresentados corroboram com o trabalho de Zeppelini, Brito e Lima (2018), ao apontarem que a legislação brasileira tem foco antropocêntrico, pois considera apenas a possibilidade de levantamento da fauna subterrânea em locais acessíveis ao ser humano, reduzindo as oportunidades de estudos do meio subterrâneo como um todo. Assim, os planos de conservação de invertebrados devem incluir a proteção do MSS. (KAGEYAMA, et al., 1994; Nitzu et al. 2014; PILÓ, et al, 2018),

6. Conclusões

Este trabalha traz à luz a discussão sobre o papel do meio subterrâneo superficial na dispersão da fauna que o ocupa, incluindo espécies troglóbias que podem ocupar diferentes cavernas devido à conectividade biológica que o conjunto de descontinuidades proporciona.

A ocorrência de táxons ainda não descritos nos furos de sondagem demonstra a que a manutenção de áreas de MSS que promovam a heterogeneidade destes micro hábitats é tão importante quanto a manutenção de cavernas quando se abordam estratégias de conservação da fauna subterrânea. Desta forma a amostragem de espécies em apenas uma parte do ambiente subterrâneo (cavernas), principalmente para licenciamento ambiental de atividades que ameaçam o Patrimônio Espeleológico, não evita a perda líquida de espécies e deve ser aprimorada.

Diante dos resultados obtidos é possível concluir que o Meio Subterrâneo Superficial representa um ecótono entre a superfície e o ambiente cárstico (cavernas), permitindo o acesso de espécies epígeas por meio de suas falhas e descontinuidades, favorecendo a distribuição de espécies pré-adaptadas.

Como esperado, a fauna subterrânea presente no MSS na Formação Ferrífera de Carajás responde de maneiras diferentes às variações ambientais relacionadas a profundidade e sazonalidade climática. Isto ocorre devido às diferentes estratégias ecológicas adotadas pelas espécies desta comunidade, sendo difícil o estabelecimento de um padrão para um grupo com diferentes origens evolutivas. Assim, quando a análise passa a ser em nível de grupos taxonômicos mais específicos é possível observar padrões mais claros de resposta às variáveis analisadas, entretanto cada espécie vai responder de acordo seu nicho ecológico.

Este trabalho apresentou algumas evidências sobre a influência da profundidade e da sazonalidade climática, principalmente sobre a flutuação da proporção entre a camada saturada e a camada vadosa do MSS na distribuição de espécies tanto ao longo do perfil de profundidade quanto ao longo do tempo (estações).

Apesar disso, outros fatores podem desempenhar um importante papel nesta distribuição, como a heterogeneidade da paisagem, disposição das estruturas geológicas, presença de corpos hídricos, entre outros que não foram levantados no presente trabalho, representando ainda lacunas no conhecimento.

7. Referências bibliográficas

AUGUST, P. V. The role of habitat complexity and heterogeneity in structuring tropical mammal communities. **Ecology** 64: 1495-1507, 1983.

ARGOLO, G. S. J. A influência da cobertura do solo para assembleia de collembolos em meio subterraneo superficial neotropical. **Tese**. Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada da Universidade Federal de Lavras, Lavras/MG, 2022.

BAKALOWICZ, M. The epikast, the skin of kasrt. In: JONES, W. K.; CULVER, D. C.; HERMAN, J. S. eds. **Epikasrt. Proceedings of the symposium** held October 1 through 4, 2003, Shepherdstown, West Virginia, pp. 16-22. Karst water institute, Charles Town, West Virginia. 2004.

BAMFORD, M., DUNLOP, N., GAMBLIN, T. AND BAMFORD, A. **Fauna sampling manual. Guide to sampling techniques for wildlife research in Western Australia.** Conservation Council of WA, Perth. 2013.

BAZZAZ, F. A. Plant species diversity in old-field successional ecosystems in southern Illinois. Ecology 56: 485-488, 1975.

BICHUETTE, E.; FONSECA-FERREIRA, R. E; GALLÃO J. E. Biota subterrânea associadas a cavernas em formações ferríferas IN: **Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais** / organizado por Flávio Fonseca do Carmo e Luciana Hiromi Yoshino Kamino. Belo Horizonte: 3i Editora, 2015.

BIOESPELEO. Consultoria Ambiental. **Besouros aquáticos associados a cavidades de serra norte: avaliação do status ecológico-evolutivo e distribuição geográfica**. 2020.

BIOTA. **Technical Appendix C5: Subterranean fauna. Gorgon Project, Public Environmental Review.** Biota Environmental Services & RPS Bowman Bishaw Goreham, Leederville and Subiaco. 2005.

BIOTA. **Mesa A and Robe Valley mesas troglobitic fauna survey**. Biota Environmental Sciences, Leederville, 2006.

BRITO, R. A. Variação espaço-temporal da taxocenose de colêmbolos (Hexapoda: Collembola) em ambientes cavernícolas interligados pelo Habtat Subterrâneo Superficial (HSS), no Quadrilátero Ferrífero (rocha ferruginosa), MG - Brasil / **Tese** Roniere Andrade de Brito. - João Pessoa, 2019.

BUCKLEY, L.B. & W. JETZ. Linking global turnover of species and environments. **Proceedings of The National Academy of Sciences of the USA**, 105:17836-17841. 2008.

CAMPOS, J. C.; CASTILHO, A. F. Uma visão geográfica da região da Flona de Carajás. In: MARTINS, F. D. et al. (org.) **Fauna da Floresta Nacional de Carajás: estudos sobre vertebrados terrestres.** São Paulo: Nitro Images, p.16-63, 2012.

CARMO, F. F. Importância ambiental e estado de conservação dos ecossistemas de cangas no Quadrilátero Ferrífero e proposta de Áreas-Alvo para a Investigação e Proteção da Biodiversidade em Minas Gerais. **Dissertação de Mestrado**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Biológicas. 90 p, 2010.

CLARK, H. L.; BUZATTO, B. A.; HALSE, S. A. A hotspot of arid zone subterranean biodiversity: The robe valley in western australia. **Diversity**, 13(10), [482]. https://doi.org/10.3390/d13100482. 2021.

CULVER, D. C.; KANE, T. C., FONG, D. W. Adaptation and Natural Selection in Caves. The Evolution of Gammarus Minus. Cambridge: **Harvard University Press**, 1995.

CULVER, D. C.; PIPAN, T. The Biology of Caves and Other Subterranean Habitats. Oxford: Oxford University Press. 2009.

CULVER, D. C.; PIPAN, T. S**hallow Subterranean Habitats. Ecology, Evolution and Conservation.** Oxford University Press, 1st Impression, pp. 258, 2014.

DURÃES, R.; MARTINS, W. P.; VAZ-DE-MELLO, F. Z. Dung beetle (Coleoptera: Scarabaeidae) assemblages across a natural forestcerrado ecotone in Minas Gerais, Brazil. **Neotrop Entomol** 34: 721-731, 2005.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTCTION AUTHORITY. **Guidance for the Assessment of Environmental Factors - Draft Guidance Statement no. 54ª: Sampling Methods and Survey Considerations for Subterranean Fauna in Western Australia**. Disponível em: www.epa.wa.gov.au. 2016.

FERREIRA, R. L.; MARTINS, R. P. Cavernas em risco de "extinção". **Ciência Hoje,** 29: 20-28. 2001.

FERREIRA, R. L. A medida da complexidade biológica e suas aplicações na Conservação e Manejo de sistemas subterrâneos. **Tese de Doutorado**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Biológicas. 161p, 2004.

FERREIRA, R. L. A vida subterrânea nos campos ferruginosos. **O Carste** (Belo Horizonte), v. 3, p. 106-115. 2005.

FERREIRA, R. L.; OLIVEIRA, M. P. A.; SOUZA-SILVA, M. Biodiversidade subterrânea em geossistemas ferruginosos. IN: **Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais** / organizado por Flávio Fonseca do Carmo e Luciana Hiromi Yoshino Kamino. Belo Horizonte : 3i Editora, 2015.

FERREIRA, R. L.; POMPEU, P. S. Riqueza e diversidade da fauna associada a depósitos de guano na gruta Taboa, Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil. **O Carste**, 9(2): 30-33. 1997.

FRANKLIN, E.; MAGNUSSON, W. E.; LUIZÃO, F. J. Relative effects of biotic and abiotic factors on the composition. **Appl Soil Ecol** 29: 259-273, 2005.

GERS, C. Écologie et biologie des arthropodes terrestres du Milieu Souterrain Superficiel: fonctionnement et écologie évolutive. **Thèse** d'état, Univ Toulouse III, France, pp 402. 1992.

GERS, C. Diversity of energy fluxes and interactions between arthropod communities: from Soil to Cave. Acta Oecol 19(3):205-213. 1998.

GIACHINO, P. M.; VAILATI, D. **The subterranean environment. Hypogean life, concepts and collecting techniques**. 130 pags, 2010.

GILGADO, J. D.; ORTUÑO, V. M. Intra- and inter-population polymorphism in Coletinia maggii (Grassi, 1887) (Zygentoma: Nicoletiidae), an inhabitant of soil, mesovoid shallow substratum (MSS) and caves—a challenge for the strict classification of subterranean fauna. **Zootaxa** 3920(1):085–100. 2015.

GONZÁLES-MEGÍAS, A.; GÓMEZ, J. A.; SÁNCHEZ-PIÑERO, F. Diversity-habitat heterogeneity relationship at different spatial and temporal scales. **Ecography** 30: 31 41, 2007.

HALFFTER, G. Historical and ecological factors determining the geographical distribution of beetles (Coleoptera: Scarabaeidade: Scarabaeinae). **Folia Entomol** Mex 82: 195-238, 1991.

HALSE, S. A.; PEARSON, G. B. Troglofauna in the vadose zone: Comparison of scraping and trapping results and sampling adequacy. **Subterranean Biology**, 13, 17–34. 2014.

HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. **Palaeontologia Electronica**, 4, 9 p. 2001.

HOWARTH, F, G. **Ecology of cave arthropods**. Annu Rev Entomol 28(1):365-389. doi: 10.1146/annurev.en.28.010183.002053. 1983.

HOLSINGER, R.; CULVER, D. C. The invertebrate cave fauna of Virginia and a part of eastern Tenessee: zoogeography and ecology. **Brimleyana** 14: 1-162, 1998.

JANKOWSKI, J.E.; A.L. CIECKA; N.Y. MEYER & K.N. RABENOLD. Beta diversity along environmental gradients: implications of habitat specialization in tropical montane landscapes. **Journal of Animal Ecology**, 78:315-327. 2009.

JUBERTHIE, C.; DELAY, B.; BOUILLON, M. Extension du milieu souterrainen zone non-calcaire: description d'un nouveau milieu et de son peuplement par les coleopterestroglobies. **Mémoires de Biospéologie**, v. 7, p. 19-52. 1980a.

JUBERTHIE C, DELAY B, BOUILLON M. Sur l'existence du milieu souterrain superficiel en zone calcaire. In: Les entrees d'energie dans le karst et communications libres. **Mem Biospeol.** 8:77-93. 1980b.

JUBERTHIE, C.; DECOU, V. Structure et diversité du domaine souterrain: particularités des habitats et adaptations des espéces. In: (Ed.). Encyclopaedia Biospeleologica. Tome I. Moulis-Bucarest: **Société de Biospeologie**, p. 5-22. 1994.

JUBERTHIE, C.; DECOU, V. Interstitial habitat (terrestrial). In: Gunn J (ed) **Encyclopedia of caves and karst science**. Taylor and Francis Group, New York, pp 984–987. 2006.

JUBERTHIE, C.; DELAY, B.; BOUILLON, M. Sur l'existence du milieu souterrain superficiel en zone calcaire. In: Les entrees d'energie dans le karst et communications libres. **Mem Biospeol** 8:77-93. 1981.

KAGEYAMA, P. Y.; REIS, A. Areas de vegetación secundaria em el valle de Itajaí, Santa Catarina, Brasil: perspectivas para su ordenación y conservación. **Recursos Genéticos Forestales**, n. 21, p. 37-39, 1994.

LASSAU, S. A.; HOCHULI, D. F. Effects of habitat complexity on ant assemblages. **Ecography** 27: 157-164, 2004.

LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. **Numerical ecology**. 2nd English Edition, Elsevier, Amsterdam, 1998.

LEWIS, J. J.; MOSS, P.; TECIC, D.; NELSON, M. E. A conservation focused inventory of subterranean invertebrates of the southwestern Illinois karst. **Journal of Cave and Karst Studies** 659-21. 2003.

LI, H.; REYNOLDS, J. L. A simulation experiment to quantify spatial heterogeneity in categorical maps. **Ecology** 74: 2446- 2455, 1994.

LÓPEZ, H.; OROMÍ, P. A pitfall trap for sampling the mesovoid shallow substratum (MSS) fauna. **Speleobiology**. Notes 2:7–11, 2010.

MAMMOLA, S.; GIACHINO, P. M.; PIANO, E. Ecology and sampling techniques of an understudied subterranean habitat: the Milieu Souterrain Superficiel (MSS). **Sci Nat** 103, 88, 2016.

MARTÍNEZ, M. I.; MONTES DE OCA, E. Observaciones sobre algunos factores microambientales y el ciclo biológico de los espécies de escarabajos rodadores (Coleoptera, Scarabaeidae, Canthon). **Folia Entomol** Mex 91: 47- 59, 1984.

MCINTYRE, N.E.; J. RANGO; W.F. FAGAN & S.H. FAETH. 2001. Ground arthropod community structure in a heterogeneous urban environment. Landscape and Urban Planning, 52:257-274.

MEDINA, A. L.; OROMÍ, P. First data on the superficial underground compartment in La Gornera (Canary Islands). **Mém. Biospéol**. 17:87-91, 1990.

MESTROV, M. Un nouveau milieu aquatique souterrain: le biotope hypotelminorheique. Compt Rendus **Academie des Science**, Paris, 254. 2677-2679. 1962.

NITZU, E.; NAE, A.; BĂNCILĂ, R.; POPA, I.; GIURGINCA, A.; PLĂIAȘU, R. Scree habitats: ecological function, species conservation and vertical-temporal variation in the arthropod community. **Systematics and Biodiversity** 12: 65–75. 2014.

OROMÍ, P. La fauna subterránea de Canarias; Um viaje desde las lavas hasta las cuevas. In: CARRILLO, J. A. **Volcanes, mensajeros del fuego, dreadores de via, forjadores del paisaje.** Puerto de la Cruz: Instituto de Estudos Hispanicos de Canárias. P. 63-98. 2010.

OLIVEIRA, M. P. A. Conservation strategies for Amazon iron ore caves: linking invertebrate communities by subterranean and surface compartments of landscape. **Tese.** Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada da Universidade Federal de Lavras, Lavras/MG. 2020.

ORTUÑO, V. M.; CUESTA, E.; GILGADO, J. D.; LEDESMA, E. A. New hypogean Trechus Clairville (Coleoptera, Carabidae, Trechini) discovered in a non-calcareous Superficial Subterranean Habitat of the Iberian System (Central Spain). **Zootaxa** 3802(3):359–372. 2014.

PECK, S. B.; THAYER, M. K. The Cave-inhabiting rove beetles of the United States (Coleoptera; Staphylinidae; excluding Aleocharinae and Pselaphinae): Diversity and distributions. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 65, n. 1, p. 3-8, 2003.

PELLEGRINI, T. G.; FERREIRA, R. L. Metodologias diferenciadas aumentam a eficiência de inventários faunísticos em cavernas? **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG**, Belo Horizonte, v. 21, n. 1, p. 111-121, 2012.

PILÓ, L. B.; AULER, A. S. Cavernas em minério de ferro e canga de Capão Xavier, /Quadrilátero Ferrífero, MG. **O Carste** 17: 92-105, 2005.

PILÓ, L. B.; AULER, A. S. Geoespeleologia das cavernas em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. In: 30º CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 2009. Montes Claros. **Anais**. SBE. p. 181-186, 2009.

PILÓ, L. B.; COELHO, A. E.; REINO, J. C. R. Espeleologia em rochas ferríferas: Cenário atual e conservação. 126-149 pp. In: RUCHKYS, U. A.; TRAVASSOS, L. E. P;. RASTEIRO, M. A.; FARIA, L. E. (Eds.). **Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas: propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. Campinas/SP, Sociedade Brasileira de Espeleologia, 351 p, 2015.

PIPAN, T.; LÓPEZ, H.; OROMÍ, P.; POLAK, S.; CULVER, D. C. Temperature variation and the presence of troglobionts in terrestrial shallow subterranean habitats. **J Nat Hist** 45:257-273. 2011.

POLAK, S. Prispevek k poznavanju podzemeljske favne nekaterih jamskih objektov Matarskega podolja, jugozahodna Slovenija. In: Bedjanič, M. (ur.): Raziskovalni tabor študentov **biologije Podgrad**. 1997.

POULSON T. L.; CULVER D. C. Diversity in Terrestrial Cave Communities Source: **Ecology**, Vol. 50, No. 1, pp. 153-158 1968.

PROUS, X.; FERREIRA, R. L.; MARTINS, R. P. Ecotone delimitation: epigean hypogean transition in cave ecosystems. **Austral Ecology**, 29: 374 382. 2004.

RENDOŠ, M.; MOCK, A.; JÁSZAY, T. Spatial and temporal dynamics of invertebrates dwelling karstic mesovoid shallow substratum of Sivec National Nature Reserve (Slovakia), with emphasis on Coleoptera. **Biologia** 67(6):1143–1151. 2012.

RIBEIRO, R.; MARINHO-FILHO, J. Estrutura da comunidade de pequenos mamíferos (Mammalia, Rodentia) da Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, Distrito Federa, Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 22, n. 4, p. 898-907, 2005.

RUIZ-PORTERO, C.; BARRANCO, P.; FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; TINAUT, A.; CALAFORRA, J. M. Aproximación al conocimiento de la entomofauna de la Cueva Del Yeso (Sorbas, Almería). **Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst**, Boletín nº3 Sedeck: 16-25, 2002.

RŮŽIČKA, V. The first steps in subterranean evolution of spiders (Araneae) in Central Europe. **J Nat Hist** 33:255–265. 1999.

RŮŽIČKA, V.; ŠMILAUER, P.; MLEJNEK, R. Colonization of subterranean habitats by spiders in Central Europe. **Int J Speleol** 42:133–140. 2013.

SCHNEIDER, K.; CULVER, D. C. Estimating subterranean species richness using intensive sampling and rarefaction curves in a high-density cave region in West Virginia. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 66, no. 2, p. 39-45. 2004.

SORENSEN, T. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species and its application to analyses of the vegetation on Danish commons". **Kongelige Danske Videnskabernes Selskab**. 5 (4): 1–34, 1948.

SOUZA-SILVA, M.; MARTINS, R. P.; FERREIRA, R. L. Cave lithology determining the structure of the invertebrate communities in the Brazilian Atlantic Rain Forest. **Biodiversity and Conservation** 8(20):1713-1729, 2011.

STONE, F. D.; HOWARTH, F. G.; HOCH, H.; ASCHE, M. Root communities in lava tube. In WB White and DC Culver, eds**. Encyclopedia of caves, second edition**, pp. 649-654. Elsevier/ Academic Press. Amsterdam, The Netherlands. 2012.

TRAJANO, E.; BESSI, R. A classificação schiner-racovitza dos organismos subterrâneos: uma análise crítica, dificuldades para aplicação e implicações para conservação. **Espeleo-Tema**. v.28, n.1. SBE – Campinas, SP, 2017.

TEWS, J.; BROSE, U.; GRIMM, V.; TIELBORGER, K.; WICHMANN, M. C.; SCHWAGER, M.; JELTSCH, F. Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: the importance of keystone structures. **J Biogeogr** 31: 79-92, 2004.

THOMAZINI, M. J.; THOMAZINI, A. P. de B. W. Levantamento de insetos e análise entomofaunística em floresta, capoeira e pastagem no Sudeste Acreano. Rio Branco: **Embrapa, Circular Técnica,** 35. 41p, 2002.

TRAJANO, E.; BICHUETTE, M. E.; BATALHA, M. A. Environmental studies in caves: the problems of sampling, identification, inclusion, and indices. **EspeleoTema** 23: 13-22. 2012.

UÉNO, S. I. A new endogean Trechiana (Coleoptera, Trechinae) found in an old mine of the Izu Peninsula, Central Japan. **Annot Zool** Jap 45:111–117. 1972.

WARREN, M. W.; ZOU, X. Soil macrofauna and litter nutrients in three tropical tree plantations on a disturbed site in Puerto Rico. **Forest Ecology and Management,** Amsterdã, n. 1-3, v. 170, p. 161-171, out. 2002.

WHITE, W. B.; CULVER, D. C.; PIPAN, T. **Encyclopedia of caves**, 3rd edn. Academic press, 2019.

ZAMPAULO, R. A. Diversidade de espécies troglóbias em cavidades ferríferas do Parque Estadual da Serra do Rola Moça (PESRM), Minas Gerias. In: RASTEIRO, M.A.; SALLUN FILHO, W. (orgs.) **33º CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 2015. Eldorado.** ***Anais*...** Campinas: SBE, 2015. p.87-97. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_087-097.pdf>. 2015.

ZEPPELINI, D.; SILVA, D.; VARGAS, J. P. A new species of Troglobius (Collembola, Paronellidae, Cyphoderinae) from a Brazilian iron cave. Subterranean **Biology**, v. 14, p. 1-13, 2014.

ZEPPELINI, D.; BRITO, R. A.; LIMA, E. C. A. Three new species of Collembola (Arthropoda: Hexapoda) from Central Brazilian shallow caves: side effects of long term application of environmental law on conservation. **Zootaxa** 4500 (1), pp. 59-81. 2018.

CAPÍTULO 2

Análise da estrutura genética de populações de *Pseudoporatia sp.* (Diplopoda: Pyrgodesmidae) na Formação Ferrífera de Carajás como indicativo de conectividade do habitat subterrâneo

Resumo

A capacidade de uma determinada espécie de manter uma ampla distribuição espacial aumenta a chance dela se manter ao longo do tempo. Esta premissa também influencia a longevidade de uma espécie que depende do meio subterrâneo. As formações ferríferas, como por exemplo a Formação Carajás, apresentam características geológicas que resultam em um conjunto de serras e platôs independentes na paisagem contendo em seu subsolo fissuras, descontinuidades e canais diminutos, que define o Meio Subterrâneo Superficial (MSS). Este fato explicaria, especialmente para a litologia ferrífera, casos de ampla distribuição espacial de espécies troglóbias, ou seja, que vivem exclusivamente no ambiente subterrâneo, incapazes de apresentar populações viáveis na superfície. Neste contexto, a utilização de uma abordagem molecular em populações de espécies com estas características contribui para esclarecer a funcionalidade ecológica destas conectividades analisando a diversidade genética encontrada em populações em nível local e regional, uma vez que a paisagem, composta por platôs ferríferos disjuntos, seria suficiente para impedir a observação de estruturação genética nas populações amostradas. Após a coleta e morfotipagem das amostras de *Pseudoporatia sp.* (Diplopoda: Pyrgodesmidae) encontradas em cavernas ao longo da paisagem, seu material genético foi extraído e hierarquizado, a fim de observar a existências de populações estruturadas ou espécies crípticas por meio de análises utilizando-se o *DNA Barcode*. A análise filogenética de *Pseudoporatia* sp. foi realizada com base nos grupos de sequências do gene mitocondrial Cictocromo Oxidase I - COI, bastante utilizado em estudos iniciais de espécies não-modelo. Após o processamento de 198 amostras foi possível comparar as linhagens por meio de análises filogeográficas tanto em populações amostradas em cavidades de uma mesma serra quanto entre cavernas de serras diferentes. Baseado no número de mutações observadas foi possível verificar que o morfótipo estudado apresenta pouca ou nenhuma estruturação genética populacional dentro de um mesmo platô ou serra. De forma contrária, foi possível observar que as populações de outras serras podem ser compostas por espécies crípticas morfologicamente relacionadas, mas geneticamente diferentes. As informações obtidas podem ser utilizadas para a definição taxonômicas das espécies de *Pseudoporatia* sp que existem nas diferentes localidades estudadas. O aumento no entendimento do MSS de áreas que envolvam a conservação e a compatibilização com atividades minerárias que ocorrem na Floresta Nacional de Carajás pode definir de uma melhor maneira as necessidades das espécies troglóbias durante a definição de áreas necessárias para sua conservação, a fim de evitar a perda líquida de espécies.

Palavras-chave: Troglóbios; estruturação genética, Conservação da fauna subterrânea; formação ferrífera.

Abstract

Phylogeographic analysis of *Pseudoporatia sp.* (Diplopoda: Polidesmida) in Carajás Iron Formation as surrogate for a subterranean habitat connectivity

The ability of a specie to maintain a wide spatial distribution increases its chance of maintaining itself over time. This premise also influences the longevity of a species that depends on the subterranean environment. Iron formations, such as the Carajás Formation, present geological characteristics that result in a set of independent mountain ranges and plateaus in the landscape containing cracks, discontinuities and small channels in their subsoil, which defines the Surface Underground Environment (MSS). This fact would explain, especially for iron lithologies, cases of wide spatial distribution of troglobite species, that is, those that live exclusively in the subterranean environment, unable to present viable populations on the surface. In this context, the use of a molecular approach in populations of species with these characteristics helps to clarify the ecological functionality of these connectivities by analyzing the genetic diversity found in populations at the local and regional level, since the landscape, composed of disjointed iron plateaus, would be enough to impede the gene flow of the sampled populations. After collecting and morphotyping samples of *Pseudoporatia* sp. (Diplopoda: Pyrgodesmidae) found in caves along the landscape, their genetic material was extracted and ranked in order to observe the existence of structured populations or cryptic species through the definition of the DNA Barcode. The phylogenetic analysis of *Pseudoporatia* sp. was carried out based on groups of mitochondrial DNA sequences of the gene Cyctochrome Oxidase I - COI, widely used in initial studies of non-model species. After processing 198 samples, it was possible to compare the lineages by means of phylogeographical analyzes both in populations sampled in cavities in the same mountain range and between caves in different mountain ranges. Based on the number of observed mutations, it was possible to verify that the studied morphotype presents little or no population genetic structure within the same plateau or mountain range. Conversely, it was possible to observe that the populations of other mountain ranges may be composed of a pool of morphologically related, but genetically different, cryptic species. The information obtained can be used for the taxonomic definition of the species of *Pseudoporatia* sp that exist in the different locations studied. The increase in MSS understanding of areas involving conservation and compatibility with mining activities that occur in the Carajás National Forest, better defining the needs of troglobite species during the definition of necessary areas in order to avoid the net loss of species.

Keywords: Troglobites; Genetic structure; Conservation of underground fauna; iron formation.

1.Introdução

1.1. A Classe Diplopoda e a Família Pyrgodesmidae (SILVESTRI, 1896)

Os Diplopodas atualmente compreendem 131 famílias, 1.800 gêneros e 12.000 espécies distribuídas mundialmente. Estes animais representam uma das maiores classes, não somente dentre os Myriapoda, mas também dentre o reino animal. Eles aparentemente são o terceiro maior grupo de Arthropoda terrestre após os Insecta e os Arachnida (ENGHOFF et al., 2015). Dezesseis famílias, 55 a 60 gêneros e 250 espécies descritas ocorrem na Amazônia (ADIS, 2002). Na área de Floresta Amazônica da Reserva Ducke, no Amazonas, 13 famílias, 18 gêneros descritos, 14 espécies descritas e 19 morfoespécies de diplópodes foram determinadas até 2009 (ADIS et al. 2009).

Ocorrem em praticamente todos os continentes e ocupam uma grande variedade de ambientes. A maioria das espécies da ordem Polydesmida vive associada ao solo e às camadas de serapilheira, podendo apresentar espécies arborícolas e cavernícolas (GOLOVATCH et al., 1995, 2009). No Brasil, algumas espécies são registradas em cavernas (FIGURA 35).

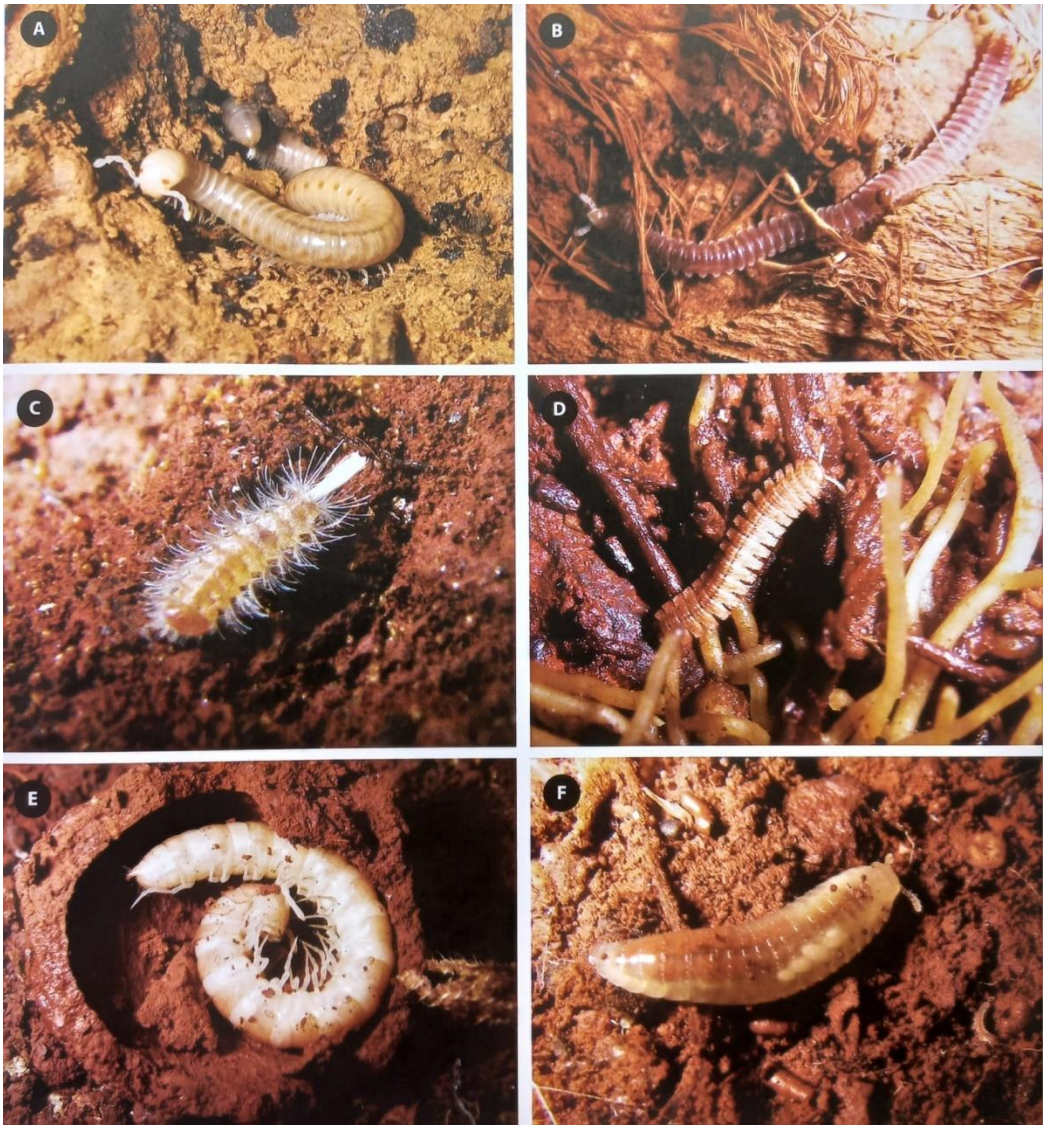


Figura 35: Diplópodes encontrados em cavernas no Brasil. A) Spirostreptida: *Pseudonannolene ambuatinga*; B) Siphonophorida; C) Polyxenida; D) Polydesmida: Pyrgodesmidae; E) Polydesmidae: Chelodesmidae F) Glomeridesmida: *Glomeridesmus spelaeus*. Fonte: Iniesta, et al. (2022).

Na Amazônia, os milípedes ocorrem principalmente em hábitats florestais, basicamente no chão da floresta. Eles habitam principalmente serrapilheira e madeira apodrecida. As diferentes estratégias de desenvolvimento, fenologia, fisiologia (preferência alimentar em particular), interferem evolutivamente no tamanho e forma corporal. Desta maneira, os milípedes menores de corpo achatado (como pyrgodesmídeos, glomeridesmídeos) tendem a ocorrer tanto na interface entre o solo e a serapilheira quanto nas camadas finas de húmus, nas camadas superiores do solo, em

madeira apodrecida ou sobre cascas. Por sua vez, os milípedes maiores tendem a viver na superfície. Bons escaladores ocorrem entre vários grupos de diplópodos, tanto pequenos (como Polyxenidae) quanto maiores (como alguns Platyrhacidae ou Chelodesmidae).

Diferentes estágios de desenvolvimento da mesma espécie frequentemente mostram diferenças na preferência quanto ao microhabitat. Os juvenis estão confinados às camadas superiores do solo. Os estágios intermediários até os estágios mais avançados estão restritos à serrapilheira. Os adultos caminham acima da serrapilheira ou sobre a vegetação (ADIS, 2002).

Hábitos fossoriais, redução ou ausência de estruturas oculares e tegumentares, maior capacidade de percepção química (receptores) ou físicas (membros alongados) representam diferenças na morfologia e comportamento que conferem a estes organismos pré-adaptações permitindo a ocupação dos ambientes subterrâneos (SHEAR, 1973).

Pyrgodesmidae representa um dos maiores e mais conhecidos grupos dentre os Diplópodes, contendo aproximadamente 400 espécies e 170 gêneros (JORGENSEN e SIERWALD, 2010), encontrados principalmente na região Pantropical. As espécies em geral são caracterizadas pelo pequeno tamanho corporal (3-15 mm) e pela presença de collum ampliado, o qual oculta completamente a cabeça em vista dorsal (HOFFMAN, 1982).

Existem diversos registros de morfótipos troglomórficos em cavernas brasileiras, todavia a despigmentação e ausência de estruturas oculares são recorrentes na família o que dificulta a determinação de espécies realmente troglóbias (GOLOVATCH et al., 2006). Exemplares de Pyrgodesmidae com características troglomórficas já foram registrados em cavernas em Carajás (CARSTE, 2011).

Os espécimes apresentam despigmentação do tegumento, descalcificação da cutícula e alongamento de antenas, carenas e apêndices locomotores. Contudo, a determinação de troglomorfismo é uma tarefa difícil, pois existem variações morfológicas de diferentes estruturas que pode evidenciar esta relação com o ambiente subterrâneo em determinados grupos, mas não para outros. É importante destacar que, embora tais características demonstrem alguma associação ao ambiente subterrâneo, não são determinantes de uma condição troglóbia[7].

[7] Fauna adaptada e restrita ao ambiente subterrâneo.

Refinamentos taxonômicos, análises moleculares e levantamentos ecológicos no ambiente epígeo são recomendados para confirmar o status ecológico-evolutivo da espécie.

Segundo Bioespeleo (2018), em um levantamento na Serra Leste, espécimes desta família que apresentam características troglomórficas foram registradas em 24 cavidades. No Brasil, há registro de pelo menos uma espécie diplópode troglóbia (*Yporangiella stygius*) com características que levam a acreditar que são exclusivos do meio subterrâneo. (TRAJANO e BICHUETTE, 2010; GALLÃO e BICHUETTE, 2018).

1.2. Aspectos ecológicos do meio subterrâneo

Uma das principais características do meio subterrâneo é a ausência permanente de luz, o que gera uma forte pressão ambiental em seus componentes bióticos e limita a presença de seres fotossintetizantes (POULSON, 1972) sendo, portanto, os recursos tróficos de origem alóctone (GNASPINI-NETTO, 1989; FERREIRA e MARTINS, 1998, FERREIRA et al., 2000). Nos sistemas subterrâneos ferruginosos, além do aporte energético dos morcegos (FERREIRA e MARTINS, 1999), pode ocorrer a presença de raízes de plantas da vegetação adjacente, as quais se desenvolvem por meio das descontinuidades da rocha e alcançam os salões das cavernas (FERREIRA, 2005). Concomitantemente, a água de percolação ou o vento podem também ser os responsáveis pela importação de matéria orgânica particulada.

As regiões mais internas das cavernas geralmente apresentam parâmetros ambientais estáveis, especialmente a temperatura, correspondente à média anual observada nas áreas adjacentes (CULVER e PIPAN, 2009). Nas regiões mais distais, onde há menor incidência climática do ambiente epígeo adjacente, a umidade é geralmente elevada, tendendo à saturação (RUSSELL e MACLEAN, 2008). Essas condições particulares fazem com que exista uma grande diversidade de organismos com características distintas associados a este sistema. Esses táxons possuem um variado grau de dependência do habitat subterrâneo, variando desde espécies totalmente dependentes do meio subterrâneo até espécies oportunistas ou acidentais (CULVER et al., 1995).

As características ambientais encontradas nas descontinuidades da rocha que compõem o MSS podem ser descritas como semelhantes às encontradas nas cavernas, marcadas por uma baixa amplitude das variáveis ambientais. No entanto, embora

climaticamente estáveis, o habitat subterrâneo como um todo apresenta uma grande variedade de micro hábitats, com características específicas, principalmente relacionadas à umidade e temperatura (LASSAU, et al., 2004). Tais ambientes frequentemente possuem condições extremas, como zonas permanentemente afóticas e com baixo aporte de recursos tróficos, sendo quase sempre dependentes de fontes externas de alimentos (FIGURA 36) (CULVER, 1982; FERREIRA, 2005; MAMMOLA, 2018).

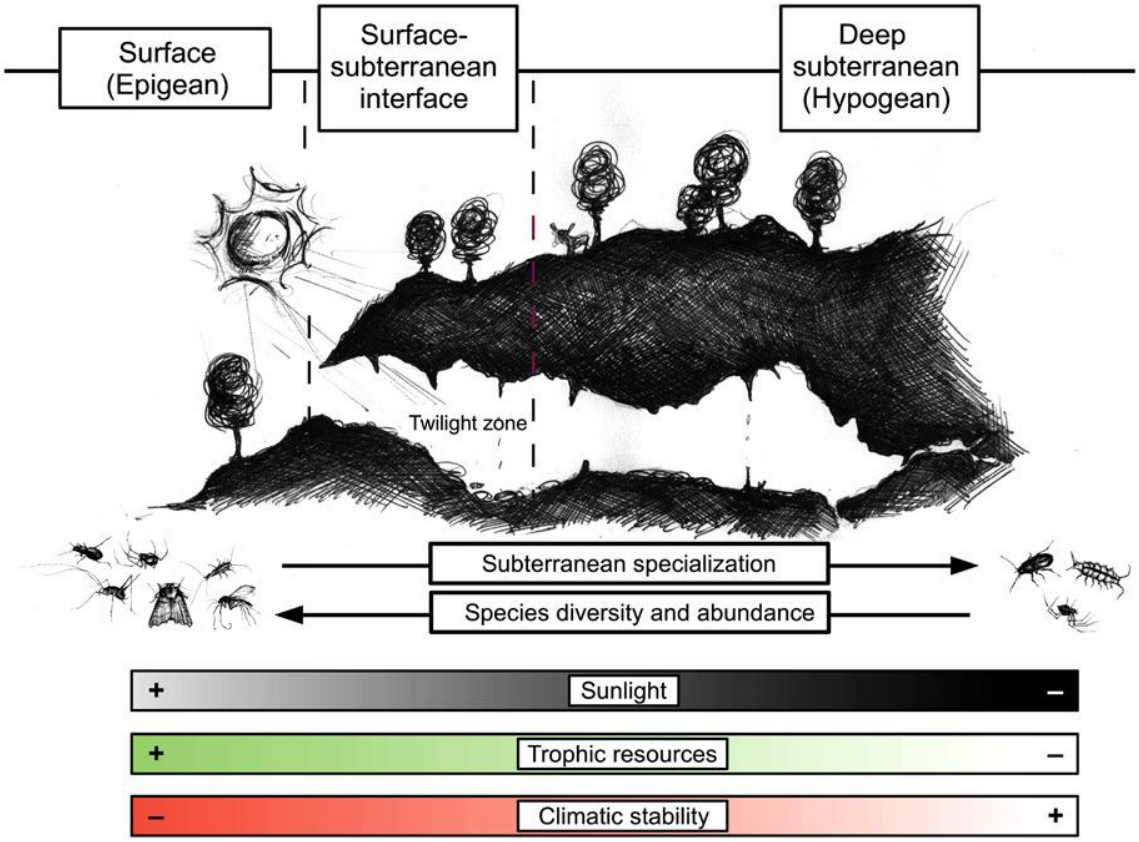


Figura 36: Desenho esquemático representando ambiente subterrâneo por meio de uma caverna, contudo as variações de luz, recursos tróficos e variáveis climática são semelhantes ao que ocorre em outros microhabitats do meio subterrâneo. Fonte: elaboração própria, adaptado de Mammola, (2018).

Neste contexto, a influência sobre a riqueza de espécies está ligada à amplitude das variações ambientais. Zonas que sofrem variações ou estão sob condições extremas podem influenciar fortemente o número de espécies de uma comunidade. De forma geral, áreas muito frias ou muito quentes são ambientes adversos e levam a uma diminuição do número de organismos, já que muitas espécies não seriam capazes de sobreviver em tais condições. As espécies que se encontram nesses ambientes possuem morfologia e/ou

fisiologia muito particulares, tornando-as altamente especializadas em relação às outras espécies correlatas.

A composição da fauna, em especial de espécies invertebradas encontradas nestes ambientes, é representada em parte pelos organismos encontrados nos ambientes epígeos adjacentes. Ou seja, grande parte dos organismos encontrados em cavernas tem a capacidade de utilizar os dois ambientes, embora a recíproca não seja verdadeira. Variações na diversidade subterrânea podem ocorre sazonalmente, de acordo com o efeito da variação nas características ambientais (CULVER, 1982; FERREIRA e MARTINS, 1999; GNASPINI-NETO, 1989; BENTO et al., 2016).

Schiner-Racovitza (RACOVITZA, 1907) definiram três categorias para classificar o nível de adaptação das espécies ao ambiente subterrâneo: troglóbios, troglófilos e trogloxenos. Troglóbios foram definidos como animais encontrados unicamente em cavernas, sendo organismos morfologicamente e fisiologicamente adaptados às condições subterrâneas. Por sua vez, troglófilos podem viver e completar seu ciclo de vida tanto em cavernas quanto no meio epígeo (superficial). Já os trogloxenos são encontrados regularmente no meio subterrâneo, mas obrigatoriamente devem sair periodicamente ao meio epígeo para completar o ciclo de vida. Ao longo do tempo, a definição de troglóbios praticamente não mudou, ao contrário da definição de troglófilos, que permaneceu imprecisa até a década de 1960 (TRAJANO e BESSI, 2017). Contudo, uma possível abordagem imprecisa gera a noção de que é fácil e imediato enquadrar organismos encontrados em cavernas em alguma dessas três categorias. O mais grave acontece quando classificações enviesadas são incluídas em estudos ambientais que servem como base para determinação de graus de relevância de cavernas para fins de análises de relevância de cavidades (TRAJANO e BESSI, 2017).

Os troglóbios apresentam profundas modificações morfológicas evolutivas como anoftalmia, ausência ou redução na pigmentação e o alongamento dos membros, bem como fisiológicas, reprodutivas e comportamentais visando a adaptação ao meio subterrâneo que os impedem de sobreviver no ambiente externo. Tais especializações podem levar também a uma perda na capacidade dispersiva, favorecendo o isolamento de linhagens e a especiação. Assim, os troglóbios frequentemente apresentam distribuição restrita e elevados níveis de endemismos, independente da escala de avaliação (GILBERT e DEHARVENG, 2002; MAMMOLA et al., 2015).

Segundo White et al. (2019), importantes eventos paleoclimáticos têm sido apontados como os principais responsáveis pelo isolamento de linhagens ancestrais no ambiente subterrâneo e origem de espécies troglóbias, por serem capazes de alterar drasticamente a paisagem, tais como as glaciações ocorridas no hemisfério Norte, no Plioceno e Pleistoceno, e o simultâneo estabelecimento de climas áridos em regiões tropicais, como a Austrália (HUMPREYS, 2019). Outros processos importantes foram os avanços e regressões marinhas, que promoveram alteração na zona costeira em diferentes períodos e têm sido apontados como responsáveis pela origem de diversas linhagens de troglóbios, muitos dos quais considerados relictos oceânicos (FISĚR et al., 2013; SOUZA et al., 2018).

Na maioria dos modelos de evolução subterrânea é proposta a origem de troglóbios a partir de populações troglófilas isoladas no meio subterrâneo. O entendimento das especializações dos troglóbios parte dos estados apomórficos de caracteres que só se modificaram após o isolamento genético de populações no meio subterrâneo e que podem ser relacionados ao novo modo de vida (TRAJANO e BESSI, 2017).

Além de fatores genéticos intrínsecos aos diferentes grupos, fatores ecológicos, como o tamanho das populações, podem influenciar as taxas de evolução dos caracteres, uma vez que populações pequenas tendem a se modificar mais rapidamente que populações grandes.

O sistema subterrâneo em formação ferrífera é marcado pela forte conectividade, tanto entre cavernas quanto entre cavernas e a superfície, seja ela por meio de descontinuidades na rocha, fissuras, fraturas ou canalículos, formando o MSS (FERREIRA, 2005), como vimos no capítulo 1. Estes fatores influenciam diretamente a possibilidade de estruturação genética nas populações de espécies troglóbias, uma vez que estes animais não são capazes de formar populações viáveis na superfície.

A história geológica do relevo da Serra dos Carajás começa a partir do final do período geológico conhecido como Cretáceo, que durou pelo menos 70 milhões de anos. A altitude da região aumentou devagar, num processo que se chama ascensão tectônica lenta. Camadas de terra foram impulsionadas para cima devido à movimentação dos continentes. Esse ganho de altitude favoreceu a formação da paisagem que vemos hoje. Ao longo desse intervalo de tempo, esse processo gerou uma complexa formação de depósitos de detritos que se solidificaram e cobriram a superfície dos terrenos. Neste

contexto, o ferro, como um elemento químico abundante que está disponível na região, é o principal provocador do endurecimento (AB'SÁBER, 1986).

Dessa forma, os detritos formam agregados rígidos, semelhantes a uma rocha dura e de difícil penetração, chamada couraça laterítica ou canga. Porém, existem partes do terreno que não sofreram esse processo de formação de crosta laterítica. Desse modo chegou-se à paisagem formada por planaltos e depressões no sudeste do Pará (ZAPPI, 2017) (FIGURA 37).

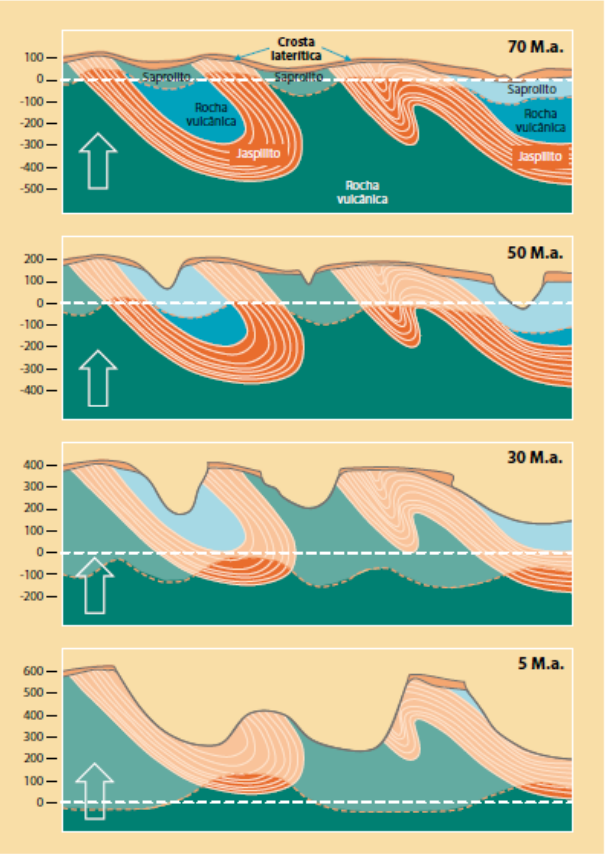


Figura 37: Evolução da paisagem ferrífera em Carajás, evidenciando sua origem há cerca de 70 milhões de anos, bem com o isolamento dos platôs da formação ferrífera, há pelo menos 30 milhões de anos. Fonte: Zappi, 2017.

Clareiras de vegetação rala sobre um substrato de canga evidenciam o quanto é antigo esse ambiente, que vem passando por variações climáticas desde o período Cretáceo (AB'SÁBER, 1986). As savanas predominavam na vasta extensão da planície onde havia um paleoclima predominantemente árido. Hoje em dia a vegetação encontrada nas clareiras das superfícies dos platôs provém ao menos em parte desse paleoambiente,

onde o clima árido reinante sobre a couraça de canga determinou sua adaptação a um regime de estresse, seja por insolação extrema abaixo da linha do Equador ou por ausência de solo, resultando em pouca retenção das águas superficiais nos vãos e fendas das rochas expostas (ROSS, 2013).

Trendall et al., (1998) determinaram a idade mínima da Formação Ferrífera de Carajás, datada de 2,7 a 8 Ma. A geografia atual da Formação auxilia o isolamento entre populações de espécies troglóbias, uma vez que é formada por platôs ferríferos isolados inseridos em uma paisagem de matriz florestal que impede a conexão física entre as formações ferríferas, impossibilitando assim a passagem subterrânea utilizada obrigatoriamente por estes animais. Desta forma é esperada uma forte estruturação genética entre as populações de espécies troglóbias encontradas em diferentes platôs.

Embora haja poucos estudos específicos sobre conectividade subterrânea em formações ferríferas, Hoch e Ferreira (2013) apontam que para formações em calcário no nordeste brasileiro com sistemas de fraturas semelhantes possivelmente exista conectividade no ambiente terrestre entre cavernas na região, que seria mantida por um sistema de descontinuidades que possibilitaria a migração entre as populações, apenas em escala local, como observado em outras regiões do mundo (MAMMOLA et al., 2016, 2020; PIPAN e CULVER, 2017; BENTO, 2021).

Como vimos, o habitat subterrâneo é marcado pela ausência permanente de luz e escassez alimentar, que resulta em condições restritivas quando comparado ao ambiente superficial, dificultando a colonização por organismos epígeos de maneira a formar populações bem estabelecidas nas zonas mais profundas das cavernas. Por sua vez, animais epígeos com atividade noturna ou de hábitos fossoriais, que não são estritamente dependentes da visão para orientação para encontrar alimento ou mesmo parceiros para reprodução, apresentam maior probabilidade de colonizar com sucesso o meio hipógeo (subterrâneo). A partir deste filtro ambiental apenas uma parcela das espécies vivem neste ambiente, onde as comunidades subterrâneas representam uma sub-amostra das epígeas adjacentes (TRAJANO e BICHUETTE, 2006).

Existem várias maneiras de se isolar uma população troglófila no meio hipógeo. A mais comum e melhor documentada é o isolamento devido à extinção das populações epígeas na mesma região. Isto pode acontecer, por exemplo, como consequência de mudanças climáticas, como os conhecidos ciclos glaciais do Quaternário. Eventos

geológicos mais antigos podem ser evocados para explicar a origem de espécies troglóbias com relações filogenéticas antigas (TRAJANO, 2006).

De um modo geral, os troglóbios provêm de linhagens que ocorrem no meio epígeo principalmente nas épocas úmidas dos ciclos paleoclimáticos, colonizando então o meio hipógeo. Em épocas secas subsequentes, o meio superficial torna-se mais adverso à vida desses organismos que, então, desaparecem, podendo extinguir-se apenas localmente ou por completo. Por sua vez, as cavernas retêm alguma umidade, de modo a possibilitar a sobrevivência de populações que não dependam da saída ao exterior (troglófilas). Também populações subterrâneas aquáticas podem ficar isoladas nas épocas secas devido à interrupção da drenagem que antes conectava os meios epígeo e hipógeo (BARR e HOLSINGER, 1985).

Outros processos também podem levar ao isolamento. Populações subterrâneas podem ser fragmentadas pela presença de barreiras intransponíveis pelos organismos em questão, separando geograficamente populações hipógeas das epígeas. Caso haja interrupção do contato entre essas populações devido ao isolamento geográfico, as populações subterrâneas tendem a divergir de seus parentes até atingir um grau de diferenciação tal que impeça sua sobrevivência na superfície, mesmo que o ambiente se torne novamente propício. Nota-se que a definição de espécie troglóbia baseia-se essencialmente na sua não ocorrência no meio epígeo. No entanto, não é logicamente possível provar uma ausência; assim, tal condição é raramente atingida. Na prática, troglóbios em geral são reconhecidos após ter ocorrido diferenciação resultando no aparecimento dos troglomorfismos clássicos (TRAJANO e BICHUETTE, 2006, 2009).

De um lado, no modelo alopátrico (diferenciação em isolamento geográfico), o qual responderia pela grande maioria dos casos de especiação, existe um lapso de tempo entre esse isolamento, que equivale à restrição ao meio subterrâneo definindo troglóbios, e o aparecimento de troglomorfismos. Neste intervalo, teríamos troglóbios não troglomórficos, cuja detecção dependeria exclusivamente de levantamentos faunísticos epígeos extensivos. Por outro lado, há táxons que já apresentam, no meio epígeo, caracteres considerados troglomórficos. Por exemplo, os diplópodes da grande ordem Polydesmida, a mais diversificada do grupo, são desprovidos de olhos, portanto, apenas a despigmentação poderia ser considerada um troglomorfismo indicador do status de troglóbio. Pequenos artrópodos de solo, tais como dipluros Campodeidae, sínfilos, palpígrados, isópodes terrestres do gênero Trichorhina, são despigmentados e sem olhos,

de modo que a possível condição de troglóbios é difícil de ser estabelecida, dependendo de estudos comparativos no mesmo grupo taxonômico para verificar a presença de outros troglomorfismos, além de levantamentos no meio epígeo.

Em resumo, o uso de troglomorfismos para se deduzir o status de troglóbio é útil, frequentemente o único disponível, mas não constitui um critério absoluto e definitivo, devendo haver cautela e ser realizado somente com o apoio de especialistas. Outro aspecto a se considerar é que podem existir espécies exclusivamente subterrâneas, portanto, legitimamente troglóbias, que não apresentam os troglomorfismos clássicos.

Os organismos troglóbios frequentemente apresentam distribuição muito restrita ou até elevados níveis de endemismo ocorrendo apenas em uma caverna ou pequeno conjunto de cavernas em uma formação geológica cárstica (JUAN et al., 2010), independente da escala de avaliação (GILBERT e DEHARVENG, 2002; MAMMOLA et al., 2015).

O elevado nível de especialização ao ambiente subterrâneo, bem como a distribuição geográfica restrita, faz com que as espécies troglóbias sejam consideradas extremamente vulneráveis aos processos de extinção decorrentes dos impactos ambientais de origem antrópica (CULVER, 1982).

1.3. Abordagem molecular

A diversidade genética dentro e entre as populações é o resultado de processos complexos que resulta diretamente da interação de elementos evolutivos, responsáveis por alterar o equilíbrio genético populacional, envolvendo mutação, migração, deriva genética e seleção natural. Essa diversidade é essencial para garantir a viabilidade e a contínua evolução das populações (BERTHIER et al., 2005). Desta forma a estrutura genética é definia pelo pool genético e demográfico das populações, de acordo com o contexto ecológico (CABALLERO et al., 2010).

Os fatores ecológicos limitantes encontrados no sistema subterrâneo determinam padrões únicos na área de ocupação de espécies troglóbias, normalmente marcada pela distribuição geográfica restrita e altos níveis de endemismo, muitas vezes ocorrendo em apenas uma ou poucas cavidades (GILBERT e DEHARVENG, 2002).

Uma vez que as espécies troglóbias encontram-se isoladas diminui-se o efeito de homogeneização das frequências alélicas na população. Assim, tanto o tamanho efetivo quanto a diversidade genética de cada população se tornarão menores ao longo de sua evolução alterando a capacidade das populações de suportar condições ambientais diferentes e promovendo uma diferenciação genética entre elas (SPIELMAN et al., 2004; COSTA et al., 2013). A migração, portanto, é um processo central que possibilita o fluxo gênico e afeta a dinâmica e a evolução das populações, tendo um papel significativo na formação da estrutura genética e demográfica destas (HANSKI, 1998).

As análises moleculares com uso de DNA têm sido utilizadas para examinar a história evolutiva de espécies e eventos de especiação. Os genes que são frequentemente usados para identificar as espécies e verificar sua posição filogenética são os genes mitocondriais Citocromo Oxidase subunidade 1 (CO1), RNA ribossomal 16s (16S) e RNA ribossomal 12s (12s). O gene do RNA ribossomal nuclear 18S, de evolução mais lenta, geralmente fornece informações sobre relações taxonômicas mais altas (ALBERTS et al., 2017).

Mais especificamente, o DNA *Barcode* tem sido aplicado com sucesso em vários grupos de animais apresentando resultados satisfatórios na identificação de espécies crípticas (HEBERT et al., 2003a, b) de híbridos (CARVALHO et al., 2008) ou espécies que divergiram recentemente que apresentam baixa divergência (MORITZ e CICERO, 2004; STOECKLE et al., 2005).

Não existe uma quantidade absoluta de diferença na sequência genética entre dois animais que determine que eles pertençam à diferentes espécies, mas o uso da sequência para identificar espécies baseia-se no fato de que as diferenças se acumulam entre linhagens reprodutivamente isoladas como resultado de mutações. Hebert e colaboradores (2003a, b) demonstram que as divergências nas sequências de COI permitem a discriminação regular de espécies proximamente relacionadas em todos os filos (Annelida, Chordata, Echinodermata, Nematoda, Platelminto, Artrópoda, Mollusca), com exceção de cnidários. Estes autores encontraram uma média de 11,3% de diferença nas sequencias do gene CO1 entre espécies estreitamente relacionadas, embora a gama de diferenças tenha sido considerável (4% a 32%). Os primeiros estudos realizados com essa ferramenta foram extremamente satisfatórios com um grau de resolução taxonômica maior que 95%.

Parâmetros da diversidade genética podem ser determinados ao se estudar uma espécie, espécies diferentes, e grupos de espécies, e correspondem ao acúmulo de variação do material genético entre estes grupos, tendo suas características transmitidas entre as gerações. É amplamente aplicada em estudos de filogeografia e genética de populações, descrevendo eventos demográficos importantes (WHITLOCK e MCCAULEY, 1990).

Nos estudos de genética de populações é uma prática comum testar se as frequências genotípicas observadas estão de acordo com as esperadas na hipótese de Equilibrio de Hardy-Weinberg, onde a expectativa de equilíbrio geralmente é atendida (RODRIGUES et al., 2006).

A estatística F (WRIGHT, 1951) constitui outra base para quantificação da diferenciação genética entre populações, possibilitando estimar a diferenciação populacional a partir da variância das frequências alélicas (HOLSINGER, 2009).

Basicamente são definidos três níveis de análise baseado no coeficiente de endocruzamento. O F*is*, que relaciona o pool genético dos indivíduos em relação a sua população, o Fit que relaciona o pool genético dos indivíduos de cada população com o pool regional, ou seja, entre as populações estudadas e o F*st*, que determina a variação entre cada população em relação as demais. Desta forma, quanto mais as populações compartilham as mesmas frequências alélicas, menos apresentam diferenciação genética e o valor de Fst será próximo a zero. Por outro lado, este valor fica mais próximo de 1 quando as populações apresentam frequências alélicas divergentes (WRIGHT, 1965; HOLSINGER e WEIR, 2009).

A construção de redes genealógicas de haplótipos é uma ferramenta capaz de representar as relações intraespecíficas e incorporar as predições genéticas. Desta forma a rede de haplótipos é amplamente utilizada em estudos filogeográficos (MARSKE, 2016).

De forma semelhante à estatística F, a Análise da variância molecular – AMOVA considera três níveis hierárquicos, sendo capaz de analisar a diferenciação entre grupos (Fct), que, neste caso específico, é representado pelas características entre as serras estudadas. Entre populações de um mesmo grupo (Fst), representada pelas cavidades de um determinado platô e por último, dentro de cada população (Fsc), representada por cada cavidade estudada (EXCOFFIER e LISCHER , 2010).

Um dos usos valiosos das análises moleculares nos trabalhos abordando a fauna subterrânea inclui a correspondência de juvenis ou fêmeas com indivíduos adultos da mesma espécie, de modo que uma distribuição de espécies consiga ser totalmente descrita, mesmo que a maioria dos animais recolhidos sejam juvenis e não identificáveis por meios morfológicos.

Outra maneira de se aplicar as técnicas moleculares é identificar espécies crípticas representadas por um grupo de animais em uma determinada área com pouca variação morfológica para identificar caracteres que separam as espécies. A variação de sequência fornece um guia muito útil, embora não infalível, para determinação da espécie.

Um terceiro uso do DNA é examinar a história evolutiva de espécies e eventos de especiação. Genes que são frequentemente usados para examinar espécies são os genes mitocondriais (HEBERT *et al*. 2003a).

Em espécies animais existem duas fontes possíveis de DNA, nuclear e miticondrial que, segundo Nabholz e colaboradores (2008), apesar de o genoma mitocondrial ser restrito do ponto de vista seletivo por um processo tão importante como a respiração celular, o mtDNA animal apresenta altas taxas de substituição nucleotídica em relação ao genoma nuclear. Este fato revela uma grande variação na sequência de nucleotídeos na maioria das espécies animais, o que é um pré-requisito importante para estudos evolutivos intraespecíficos (AVISE, 2009).

O mtDNA é menor, sendo de mais fácil obtenção, e apresenta transmissão materna - a maior parte do citoplasma do zigoto é herdada do óvulo e somente uma pequena parte, senão nenhuma, das mitocôndrias paternas é herdada (GRIFFITHS et al., 2006). Portanto, segundo Hare (2001), o mtDNA tem herança uniparental e suas moléculas raramente podem sofrer recombinação entre si, representando um sistema haplóide e assexual. Desta forma, uma vez que normalmente as espécies apresentam algum nível de estruturação populacional traduzidos em termos geográficos e cronológicos é possível interpretar estes componentes evolutivos na estruturação populacional (BEHEREGARAY, 2008).

Os marcadores mitocondriais são muito utilizados em estudos de filogenia animal e, a partir deles, foram inicialmente estabelecidos os princípios filogenéticos. Os marcadores de sequência molecular mitocondrial possuem as vantagens de apresentarem taxas de mutação mais elevadas que marcadores nucleares, não sofrem recombinação e,

em função do tempo de coalescência, são mais sensíveis a efeitos demográficos (PROVAN, 2001).

Espécies recentemente separadas e espécies em grupos com taxas de mutação lentas, mostram níveis mais baixos de diferença. A obtenção de polimorfismos baseados em sequências dos genomas mitocondriais envolve a extração, amplificação, sequenciamento e alinhamento das sequências de cada indivíduo amostrado, resultando em um alinhamento final, podendo ser ajustado de maneira adequada para entrada em programas específicos (SANGER et al, 1977)

Desta maneira, abordagens moleculares populacionais com base em mtDNA podem ser aplicadas tanto para verificação de espécies crípticas quanto de estrutura populacional de uma espécie em uma determinada paisagem cárstica (considerando elementos epígeos e hipógeos) onde os troglóbios muitas vezes encontram-se restritos (endêmicos) a sistemas cársticos, serras, platôs ou até mesmo a uma única caverna.

1.4. Estratégias de Conservação de espécies da fauna subterrânea

A Serra de Carajás, área de estudo deste trabalho, embora esteja parcialmente dentro de unidade de conservação federal, possui cavidades localizadas em regiões de exploração mineral, atividade prevista dentro da UC. Isto pode acarretar constante risco de serem totalmente suprimidas ou terem sua área de influência afetadas pela atividade de exploração mineral. Desta forma estudos que abordem a distribuição de espécies com ocorrência extremamente restrita, muitas vezes endêmicas com ocorrência em apenas uma cavidade, auxiliam na gestão do patrimônio espeleológico na região (ICMBio, 2018).

A investigação da utilização da rede de descontinuidades na rocha por meio de ferramentas moleculares aparece como uma nova abordagem, capaz de caracterizar melhor este ambiente e detalhar de forma mais ampla a importância desta conectividade para a conservação da fauna subterrânea, bem como da paisagem.

Com o contínuo avanço nos estudos a respeito da distribuição da fauna subterrânea, cada vez mais surge a necessidade de novas abordagem no entendimento da conectividade de populações troglóbias, tanto do ponto de vista ecológico, como abordado no capitulo um, quanto por meio de ferramentas moleculares, abordado no presente capítulo.

2. Objetivos

2.1. Objetivo Principal:

Analisar a estruturação genética entre as linhagens de *Pseudoporatia* sp. (DIPLOPODA) de diferentes cavernas na formação ferrífera de Carajás

2.2. Objetivos específicos:

- Analisar a estruturação genética das linhagens de *Pseudoporatia sp.* entre cavernas de uma mesma serra e entre cavernas das diferentes serras na Formação Carajás.

- Gerar informações moleculares para auxiliar a descrição morfológica como subsídio para futuras revisões taxonômicas e verificação de possíveis espécies crípticas de *Pseudoporatia sp.*

- Analisar a distribuição dos haplótipos das amostras de *Pseudoporatia sp* na paisagem e inferir a conectividade biológica do meio subterrâneo.

3. Metodologia

3.1. Área de trabalho

As atividades de campo referente a este capítulo foram realizadas na Serra Norte, Serra Leste, Serra Sul e Serra da Bocaina. Desta forma a área de amostragem compreende quatro serras da Formação Ferrífera de Carajás que apresentam descontinuidade na paisagem ferrífera entre si. (FIGURA 3, Capítulo 1).

3.2. Seleção e coleta da espécie modelo em cavernas selecionadas

A espécie selecionada corresponde a um diplópoda da família Pyrgodesmidae pertencente ao gênero *Pseudoporatia* sp., que devido a sua ampla distribuição na área de estudo deve se tratar de *P. kananciue* (INIESTA, *et al.*2023) encontrada nas cavernas de Carajás. Apesar da dificuldade de determinação específica dos táxons, estes animais apresentam características troglomórficas como palidez tegumentar, anoftalmia (ausência de olhos) e alongamento de apêndices. Contudo, ainda não teve seu status ecológico-evolutivo definido como troglóbio, mesmo estando intimamente associado às cavernas da

Formação Ferrífera de Carajás. Bioespeleo (2018) apontou a família Pyrgodesmidae (*Pseudoporatia* sp.) como táxon considerado troglómorfico, mas ainda não formalmente descrito, presentes nas cavernas do platô Serra Leste.

As cavernas foram pré-selecionadas para realização das coletas com base nos critérios de ocorrência do táxon selecionado bem como na ocorrência de outras espécies troblóbias a partir de dados secundários (CARSTE, 2014; BIOESPELEO, 2018).

Assim, foi possível analisar as amostras coletadas em sete cavernas no platô N3, cinco no platô N4, três no platô N5, totalizando 15 cavernas em Serra Norte. Também foram analisadas amostras provenientes de uma caverna em Serra Sul (S11C), uma na Serra da Bocaina e uma no platô Serra Leste. Após a escolha das cavernas, foram realizadas coletas por busca ativa.

Desta maneira, a seleção de *Pseudoporatia sp*. como espécie modelo para a realização deste estudo se justifica pela facilidade de identificação visual e coleta, e ampla ocorrência nas cavernas locais. Foi realizada a identificação a nível de gênero previamente aos estudos moleculares e realização de pareamento de todos os indivíduos morfotipados para determinação de uma unidade taxonômica operacional, determinado como o morfótipo de referência (FIGURA 38). Exemplares da espécie-modelo coletados ao longo de licenciamento de empreendimentos minerários na região auxiliaram na identificação, uma vez que encontram-se depositados na Coleção de Invertebrados do Instituto Butantã. Assim, foi determinado a existência de apenas um morfótipo com ampla distribuição nas cavernas de toda a região ferrífera de Carajás. Outras espécies desta família apresentam ocorrência raras e não foram coletadas no presente estudo.

Figura 38: Exemplar de *Pseudoporatia sp* (Diplopoda: Polydesmida) sobre piso de cavidade. Adaptado de Bioespeleo (2018).

As amostras coletadas em campo foram armazenadas e refrigeradas de forma individual em etanol 100%. Cada amostra foi individualizada e, devido ao tamanho corporal, foi necessário macerar integralmente para obtenção de material molecular suficiente.

Os procedimentos de extração do material genético das amostras foram realizados nas instalações do Instituto Tecnológico Vale - ITV, sob supervisão do Dr. Guilherme Oliveira e do Dr. Santelmo Vasconcelos, bem como auxílio de técnicos durante os procedimentos laboratoriais. O sequenciamento das amostras de *Pseudoporatia sp.* foi obtido após extração e amplificação das sequências parciais do gene Citocromo C Oxidase subunidade I (COI), amplificadas por reação em cadeia da polimerase (PCR). Foram utilizados kits específicos para amplificação do COI, posteriormente verificada em gel de agarose. A partir desta etapa o material resultante de cada amostra foi sequenciado em sequenciador automático utilizando a metodologia do tipo SANGER (FIGURA 39).

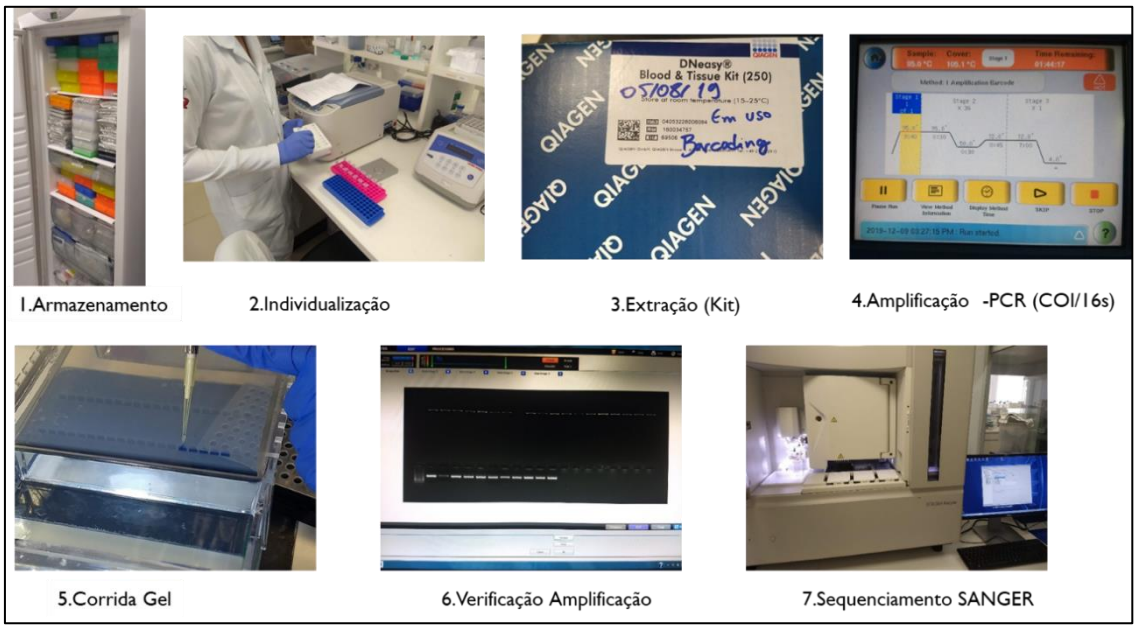


Figura 39: etapas de preparação das amostras, extração e sequenciamento de DNA.

Para a extração/amplificação de DNA foi utilizado o kit DNAeasy Blood & Tissue fornecido pela QIAGEN. Primeiramente as amostras foram individualmente identificadas e colocadas em *eppendorffs* de 2ml contendo álcool absoluto, tendo seu excesso removido posteriormente através de secagem no miVac (vácuo) durante 15 minutos à uma temperatura de 25ºC.

Após esta etapa foram adicionados em cada tubo 2 *beads* de 3 milímetros, sendo adicionado 200μL de 1XBPS. As amostras, então, foram levadas ao TisseuLyser por 1 minuto à uma frequência de 30 hertz para que o tecido do animal fosse inteiramente macerado, checando para ver se não houve ruptura de algum *eppendorff*.

Após a maceração das amostras, foi adicionado 200μL de solução tampão e 20μL de Proteinase K, observando a ocorrência de tubos quebrados e posterior substituição se necessário. Após esta etapa o material foi centrifugado a 3000 rpm durante 1 minuto.

As amostras foram incubadas em *thermo shakers* a 56ºC a 1500 rpm durante duas horas. Após isso, foi adicionado 200μL de etanol 100% e as amostras passaram por vórtex para misturar os reagentes durante 4 segundos a 3000 rpm, sendo posteriormente transferidas para outros tubos. Foram novamente centrifugadas. O conteúdo foi transferido para outro tubo coletor e adicionado mais 500μL de solução tampão (AW2) e centrifugado novamente para posterior reação de amplificação do material genético por meio de PCR.

As reações de PCR foram realizadas de acordo com os seguintes volumes para cada amostra: 5 µL de tampão (5x), 2,4 µL de $MgCl_2$ (25 mM), 2µL dNTP (2 mM), 0,5 µL de cada primer (10 mM), 0,2 µL Taq (PROMEGA), aproximadamente 100ng de DNA e água ultrapura até completar 25 µL. Os ciclos de reação no termociclador consistiram em: 94°C por 2 min; 35 ciclos de 94 °C por 45 seg, 48 °C por 1 min, 72 °C por 1 min; 72 °C por 7 min. Os primers universais utilizados para amplificação de parte do COI foram: HCOI e LCOI (HEBERT, et al., 2003b).

A amplificação de banda única (aproximadamente 500 pb) em todas as amostras foi confirmada por eletroforese em gel de agarose. Posteriormente, todas as PCRs foram purificadas de acordo com o seguinte protocolo: adicionou-se 100 µL de isopropanol 65% e, após 15 min, as amostras foram centrifugadas à 10°C, 4000 rpm, por 40 min. Após a retirada do excesso de isopropanol virando a placa de amostras de cabeça para baixo, adicionou-se 125 uL de Etanol 70% gelado, seguido de centrifugação à 10 °C, 4000 rpm por 10 min. Novamente, o excesso de etanol foi retirado virando a placa de cabeça para baixo e centrifugando-a dessa maneira brevemente. Em seguida, a placa de amostras foi deixada aberta por 30-60 min para que houvesse total evaporação do álcool. Para a eluição final, 20 µL de água ultrapura foi adicionado à cada amostra, sendo posteriormente guardadas à -20 °C.

Para cada PCR purificada foram realizadas duas reações de sequenciamento, uma para cada primer (LCOI e HCOI) de acordo com os seguintes volumes: 2 µL de Tampão de sequenciamento (5x), 4,5 µL de água ultrapura, 0,5 µL do primer, 1 µL de Big Dye, 2 µL da PCR purificada. Os ciclos de reação no termociclador consistiram em: 96 °C por 1min, 40 ciclos de 96 °C por 15 s, 50 °C por 15 s, 60 °C por 4 min. As reações de sequenciamento foram purificadas, evitando exposição à luz, de acordo com o seguinte protocolo: adicionou-se 1 µL de EDTA 125 mM (pH 8.0), 1 µL de acetato de sódio 3M (pH 5.2) e 25 µL de etanol 100% a cada amostra.

Em seguida, a placa de amostras foi submetida à centrifugação a 4 °C, 4000 rpm, por 40 min. O excesso de solução foi retirado centrifugando-se a placa de cabeça para baixo brevemente. Posteriormente, adicionou-se 35 µL de 70% etanol gelado à cada amostra e elas foram centrifugadas novamente a 4 °C, 4000 rpm, por 10 min. A placa de amostras foi então centrifugada invertida duas vezes para remoção do excesso de álcool, e em seguida foi colocada na estufa por 30-60 s até que todo o álcool tivesse evaporado. O DNA marcado de cada amostra foi ressuspendido em 10 µL de Formamida Hi-Di. As amostras foram então desnaturadas à 95 °C por 3 min e em seguida colocadas imediatamente em 4 °C. As reações de sequenciamento foram realizadas em um ABI 3730 DNA Analyzer (ThermoFisher Scientific).

3.3. Análise da estruturação genética em populações de *Pseudoporatia* sp., com base na sequência do marcador mitocondrial COI

O alinhamento das sequências de 198 indivíduos de *Pseusoporatia* sp. obtidas foi realizado com o programa de alinhamento múltiplo MEGA X utilizando a função Clustal W (STECHER, et al., 2020).

A preparação dos dados para a determinação dos parâmetros de diversidade genética ocorreu no programam DnaSP (DNA Sequence Polymorphism) (Referência). Após esta etapa inicial os indivíduos foram agrupados em populações previamente estabelecidas onde, ao longo de um mesmo platô, foram representadas por cada caverna estudada ou pelo conjunto de cavernas quando as análises levaram em conta os diferentes platôs.

Após a definição das populações, as análises se deram no programa Arlequin (Referência) para realização do cálculo dos índices de diversidade, determinando as

características dos marcadores que estão sendo utilizados (sequências de DNAmt), bem como a variação destes na espécie estudada. Foram determinados parâmetros como tamanho do alinhamento, número de sítios variáveis, conteúdo C/G e A/T e número de haplótipos.

As análises filogenéticas realizadas no escopo deste trabalho levaram em conta aspectos locais, onde foram analisadas as relações entre as populações de cada cavidade em um mesmo platô, bem como aspectos regionais, levando em consideração todo o conjunto de amostras. Para tanto, após a definição dos parâmetros populacionais, foram realizadas as análises descritas a seguir.

As distâncias genéticas observadas para *Pseudoporatia sp*1 provavelmente indicam a existência de diferentes linhagens. Para verificar isso, foi realizada a reconstrução filogenética utilizando o software MEGA X, por meio de filogenias com base na máxima verossimilhança, sendo esta a metodologia mais usada e que fornece resultados robustos. A árvore foi realizada por meio de *Maximum Likelihood*, em seguida foram realizadas 100 repetições (*Bootstrap Replications*). De acordo com a análise de modelo evolutivo, foi escolhido o modelo "*Tamura 3-parameter model*". Foram apresentados os valores de suporte (no caso, *bootstrap*), sendo o comprimento dos ramos proporcional à divergência genética.

Para análise da estatística F foi utilizado o parâmetro F*st*, que reflete a diferenciação das populações. Se duas populações apresentam frequências alélicas idênticas, elas não serão geneticamente diferenciadas (F*st* igual a zero). Por outro lado, se estas populações possuírem frequências alélicas completamente diferentes o valor de F*st* vai ser próximo de 1.

As análises de variância nas frequências haplotípicas foram desenvolvidas no programa Arlequin, utilizando-se os dados obtidos a partir dos indivíduos das populações em um determinado platô admitindo que cada caverna, à priori, é uma população e que a amostra regional é determinada entre platôs da formação Carajás. As análises da variância molecular - AMOVA foram realizadas utilizando-se os dados das sequências e o programa DnaSP.

3.4. Construção da rede de haplótipos

A construção da rede de haplótipos foi realizada utilizando-se o método *Median-Joining Network*. As análises foram realizadas no programa NETWORK (referência), uma vez que este aplicativo permite a criação de redes com base em dados de sequenciamento de material genético, possibilitando o uso das sequências obtidas de COI.

Inicialmente, as sequências alinhadas no programa MEGA X foram utilizadas para criar o arquivo de entrada no programa DnaSP para posteriormente serem processadas no NETWORK. A partir desta análise foi possível representar os haplótipos em círculos de tamanho proporcional ao número de indivíduos que apresentam estes haplótipos, bem como as mutações no alinhamento, sendo representadas por ramos e números.

4. Resultados

4.1. Seleção e coleta da espécie modelo em cavernas selecionadas

As amostras de *Pseudoporatia sp.* analisadas neste estudo foram coletadas em quatro áreas distantes uma das outras (Serra Norte, Serra Leste, Serra da Bocaina e Serra Sul), pertencentes à Formação Ferrífera Carajás.

Segundo o pesquisador Luiz Iniesta, especialista no grupo, os Pyrgodemidae coletados foram taxonomicamente identificados em apenas um morfótipo pertencente ao gênero *Pseudoporatia* sp. (FIGURA 40).

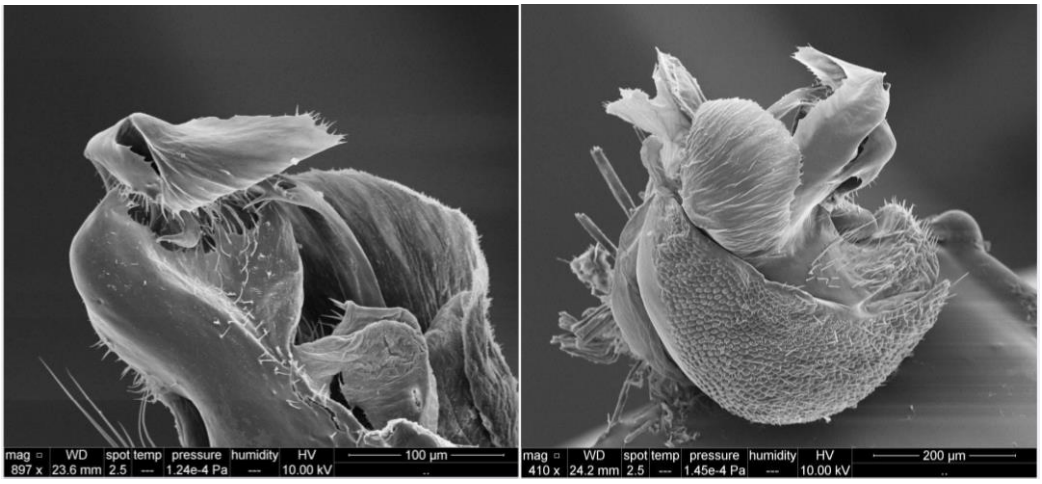


Figura 40: Estruturas gonopodais de *Pseudopratia* sp. Fonte: Iniesta, L. (comunicação pessoal).

Nas figuras 41, 42, 43 e 44 são apresentadas a localização das cavernas cujas amostras foram analisadas, incluindo as 26 amostras coletadas pelo ITV, também morfotipadas a partir dos dados das coleções de referência dos dados de licenciamento ambiental, compondo a totalidade das 198 amostras analisadas.

Figura 41: Mapa das cavidades amostradas em N3.

Figura 42: Mapa das cavidades amostradas no platô Serra Leste.

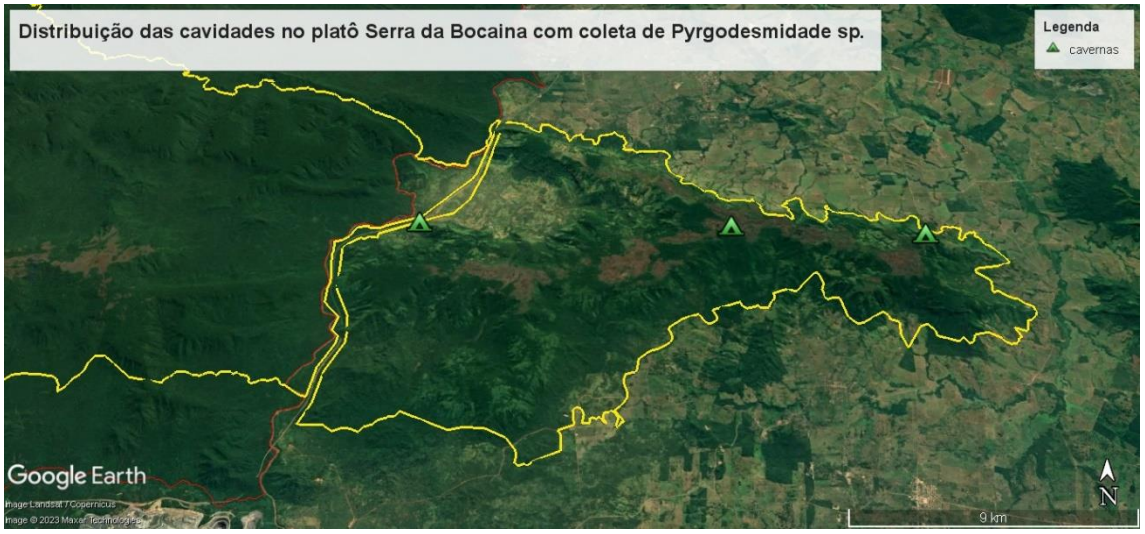


Figura 43: Mapa das cavidades amostradas no platô Serra da Bocaina.

Figura 44: Localização das amostras de *Pseudoporatia* sp. obtidas a partir de dados secundários.

4.2. Análise da estruturação genética em populações de *Pseudoporatia* sp., com base na sequência do marcador mitocondrial COI

Todas as amostras de *Pseudoporatia sp.1*, tanto as coletadas durante este estudo quanto as coletadas pela equipe de pesquisadores do ITV, foram previamente morfotipadas e processadas a partir de todo o tecido do animal. No total, foram processadas aproximadamente 300 amostras coletadas em 22 cavernas em quatro serras distintas, uma vez que além nas análises moleculares a partir dos dados das três serras, foram incluídos dois indivíduos de Serra Sul.

Nem todas as cavernas visitadas apresentaram indivíduos da espécie alvo, bem como nem todas as amostras resultaram em material com qualidade suficiente para as análises. Na Serra Sul foram coletadas duas amostras de uma caverna no platô S11C. Em Serra Leste foram obtidas amostras em apenas uma caverna (n = 29), bem como o que ocorreu em Serra da Bocaina, onde foram coletadas amostras em apenas uma caverna (n= 5) conforme demonstrado na tabela 9.

Tabela 9: Áreas amostradas e quantitativo de amostras coletadas e analisadas.

SERRA	PLATÔ	CAVERNA	AMOSTRAS P/ CAV	Obs.
S. NORTE	N3	N3_0024	28	Três amostras da caverna N3_0024 foram cedidas pelo ITV, as demais foram coletadas durante o estudo.
S. NORTE	N3	N3_0026	10	
S. NORTE	N3	N3_0037	73	
S. NORTE	N3	N3_0041	3	
S. NORTE	N3	N3_0052	1	
S. NORTE	N3	N3_0054	12	
S. NORTE	N3	N3_0074	14	
S. NORTE	N4E	N4E_0011	1	Amostras cedidas pelo ITV
S. NORTE	N4E	N4E_0013	5	
S. NORTE	N4E	N4E_0074	1	
S. NORTE	N4E	N4E_0088	5	
S. NORTE	N4WS	N4WS_0015	1	
S. NORTE	N5S	N5S_0011	3	
S. NORTE	N5S	N5S_0037	1	
S. NORTE	N5SM2	N5SM2_0088	4	
S. SUL	S11C	S11C_0054	2	
S. BOCAINA	SB	SB_0031	5	Amostras coletadas durante o estudo
S. LESTE	SL	SL_0093	29	
4	**8**	**18**	**198**	

Fonte: Autor com base nos dados geoespaciais amostrados

A partir da etapa de extração do mtDNA foram realizadas as etapas de formação dos arquivos de entrada para posterior edição e alinhamento das sequências obtidas. Este

estudo pretendeu corroborar com a abordagem do DNA *Barcode* em discriminar e identificar as amostras de *Pyrgodesmidae sp*. coletadas a fim de produzir informações de identificação molecular universal e complementar o conhecimento taxonômico já existente.

Foi determinada a estrutura genética entre linhagens de diferentes cavernas e platôs em populações de *Pyrgodesmidae sp.1*, por meio de análises filogenéticas e filogeográficas, com base na sequência do marcador mitocondrial COI (TABELA 10).

Tabela 10: Parâmetros analisados nas populações de cada cavidades amostradas.

caverna	n amostra	sítios polimórficos	het. Esperada	div. genética	C%	T%	A%	G%	Tagima's D	Fu's Fs
N3_0024	28	2	0.25714	0.2571	11,93	43,44	18,42	26,21	0.13252	0.34111
N3_0026	10	0	0	0	11,93	43,4	18,44	26,23	0	
N3_0037	73	2	0,00064	0,3425	11,91	43,42	18,45	26,22	0,61194	0,59445
N3_0041	3	1	0	1	11,93	43,59	18,44	26,04	0,57842	
N3_0052	1	0	0	1	12,12	43,22	18,44	26,22	0	
N3_0054	12	1	0,25	0,25	12,09	43,25	18,44	26,22	1,05482	0,18197
N3_0074	12	3	0,002	0,6364	11,97	43,37	18,34	26,32	0,37195	0,40381
N4E_0013	5	0	0	1	11,93	43,38	18,24	26,45	0	
N4E_0011	3	0	0	1	11,9	43,72	18,03	26,35	0	
N4E_0074	1	0	0	1	11,93	43,41	18,27	26,39	0	
N4E_0088	5	0	0	1	11,92	43,59	18,26	26,23	0	
N5S_0011	3	0	0	1	11,79	43,64	18,32	26,25	0	
N5S_0037	1	0	0	1	11,94	43,49	18,15	26,42	0	
N5SM2_0088	4	1	0	1	11,93	43,4	18,44	26,23	0	
N4WS_0015	1	0	0	1	12,02	43,38	18,45	26,15	0	
S11C_0054	2	0	0	1	12,05	43,29	18,44	26,22	0	
SB_0031	5	5	0,598365	0,98225	14,54	41,38	18,16	25,92	0,85452	0,68542
SL_0093	29	0	0	1	15,19	40,51	18,63	25,67	0,45163	0,35321

Fonte: Analise realizada com base nos dados moleculares obtidos

Para realizar uma primeira avaliação da variabilidade genética entre as diferentes localidades, as sequências foram separadas por grupos amostrados, neste caso, as cavernas. Desta forma, cada caverna foi considerada uma população. Nesta etapa foram determinadas tanto a distância genética total, considerando toda a população amostrada, quanto a distância genética dentro dos platôs amostrados neste estudo.

A partir das análises moleculares com base em cada caverna como uma população amostrada, foi possível obter os seguintes valores de distância genética, tanto dentro de cada população (TABELA 11), quanto entre as populações (TABELA 12).

Tabela 11: Estimativas médias das distâncias genéticas com base nos pares de sequências dentro de cada caverna.

Distância genética média dentro do grupo (caverna)	
Cavidade	Distância
N3_0024	0,000573349
N3_0074	0,001947751
N3_0026	0
N3_0037	0,000836775
N3_0052	n/c
N3_0054	0,00088611
N4E_0011	n/c
N4E_0013	0,000753839
N4E_0074	n/c
N4E_0088	0,000753839
N5S_0011	0
N5S_0037	n/c
N5SM2_0088	0
N4WS_0015	n/c
N3_0041	0
S11C_0054	0
SB_0031	0,01118375
SL_0093	0

Fonte: autor com base nas distâncias genéticas observadas

É mostrado o número de substituições de bases por sítio da média de todos os pares de sequências dentro de cada grupo. As análises foram conduzidas usando o modelo Tamura-Nei (TAMURA e NEI, 1993). Esta análise envolveu 198 sequências de nucleotídeos. Todas as posições ambíguas foram removidas para cada par de sequências (opção de exclusão em pares). Foi determinado um total de 533 posições no conjunto de dados final. Análises evolutivas foram realizadas no MEGA X (TAMURA et al., 2021).

Tabela 12: estimativas das divergências evolutivas com base nos pares de sequências entre as cavernas amostradas.

	N3_0024	N3_0074	N3_0026	N3_0037	N3_0052	N3_0054	N4E_0011	N4E_0013	N4E_0074	N4E_0088	N5S_0011	N5S_0037	N5SM2_0088	N4WS_0015	N3_0041	S11C_0054	SB_0031	SL_0093
N3_0024																		
N3_0074	0,001954																	
N3_0026	0,000337	0,001616																
N3_0037	0,000853	0,002134	0,000517															
N3_0052	0,002222	0,002694	0,001885	0,002407														
N3_0054	0,002066	0,002673	0,001730	0,002251	0,000471													
N4E_0011	0,006017	0,007312	0,005673	0,006191	0,007562	0,007406												
N4E_0013	0,005635	0,006929	0,005292	0,005810	0,007181	0,007025	0,000377											
N4E_0074	0,002216	0,003498	0,001879	0,002396	0,003768	0,003612	0,003786	0,003406										
N4E_0088	0,005635	0,006929	0,005292	0,005810	0,007181	0,007025	0,000377	0,000603	0,003406									
N5S_0011	0,000337	0,001616	0,000000	0,000517	0,001885	0,001730	0,005673	0,005292	0,001879	0,005292								
N5S_0037	0,000337	0,001616	0,000000	0,000517	0,001885	0,001730	0,005673	0,005292	0,001879	0,005292	0,000000							
N5SM2_0088	0,000337	0,001616	0,000000	0,000517	0,001885	0,001730	0,005673	0,005292	0,001879	0,005292	0,000000	0,000000						
N4WS_0015	0,002222	0,003506	0,001885	0,002407	0,003789	0,003632	0,007562	0,007181	0,003768	0,007181	0,001885	0,001885	0,001885					
N3_0041	0,002216	0,003498	0,001879	0,002396	0,003768	0,003612	0,007567	0,007185	0,003764	0,007185	0,001879	0,001879	0,001879	0,003768				
S11C_0054	0,000337	0,001616	0,000000	0,000517	0,001885	0,001730	0,005673	0,005292	0,001879	0,005292	0,000000	0,000000	0,000000	0,001885	0,001879			
SB_0031	0,146025	0,148800	0,146529	0,146056	0,148662	0,148486	0,138644	0,139208	0,144277	0,139208	0,146529	0,146529	0,146529	0,146955	0,144277	0,146529		
SL_0093	0,175493	0,174289	0,175030	0,174492	0,177509	0,177305	0,172684	0,172177	0,172684	0,172177	0,175030	0,175030	0,175030	0,172526	0,172684	0,175030	0,203202	

Fonte: Autor com base nas divergências evolutivas observadas entre as cavernas.

É possível notar que as cavernas espacialmente localizadas em platôs contínuos, como N4 e N5 apesar de distantes entre si, apresentam distância genética pouco expressiva devido a ausência de barreiras. Apesar de também fazer parte de Serra Norte, N3 apresentou uma distância genérica mais expressiva em relação à N4 e N5, devido à separação entre os platôs (FIGURA 45). Este resultado se refletirá na análise da rede de haplótipos.

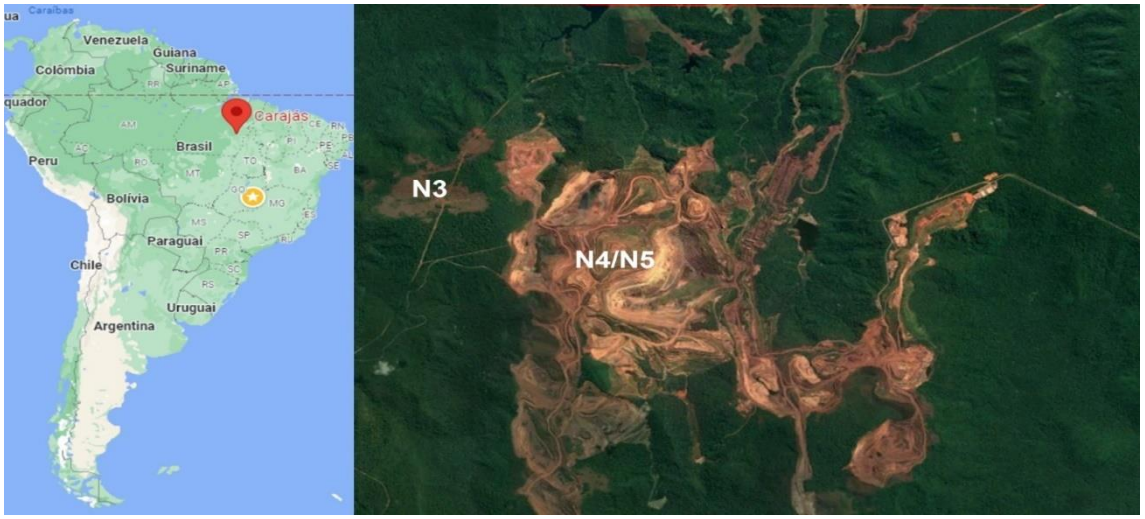


Figura 45: distância entre o platô N3 em relação à N4 e N5, que apresentam uma continuidade na paisagem.

Os platôs Serra Leste e Serra da Bocaina, que localizam-se cerca de 60 e 50 km da Serra Norte, respectivamente, apresentam uma distância genética compatível com seu isolamento, como apresentado na tabela 12 onde a distância geográfica termina contribuindo com a distância genética entre estas unidades taxonômicas.

A partir dos resultados obtidos é possível observar que as distancias genéticas apresentadas sugerem a existência de outras unidades taxônomicas filogeneticamente relacionadas, já que a morfologia entre todas as amostras não pode ser taxonomicamente distinguida. Desta forma, pode existir uma espécie para cada serra estudada, (Norte, Leste e Bocaina), sendo notória a influência da matriz florestal como barreira geográfica entre os platôs. As análises foram conduzidas usando o modelo *Maximum Composite Likelihood.*

A história evolutiva foi inferida usando o método da Máxima Verossimilhança e o modelo Tamura-Nei. A árvore com a probabilidade de log mais alta (-1415,82) é mostrada. A árvore inicial foi obtida automaticamente aplicando os algoritmos Neighbor-Join e BioNJ a uma matriz de distâncias pareadas estimadas usando o modelo Tamura-Nei e, em seguida, selecionando a topologia com valor de log verossimilhança superior. A árvore é desenhada em escala, com comprimentos de ramificação medidos no número de substituições por local. Esta análise envolveu 198 sequências de nucleotídeos. Havia um total de 533 posições no conjunto de dados final. As análises evolutivas foram realizadas no MEGA X (FIGURA 46). Sequências repetidas foram retiradas da amostra para melhor visualização dos resultados.

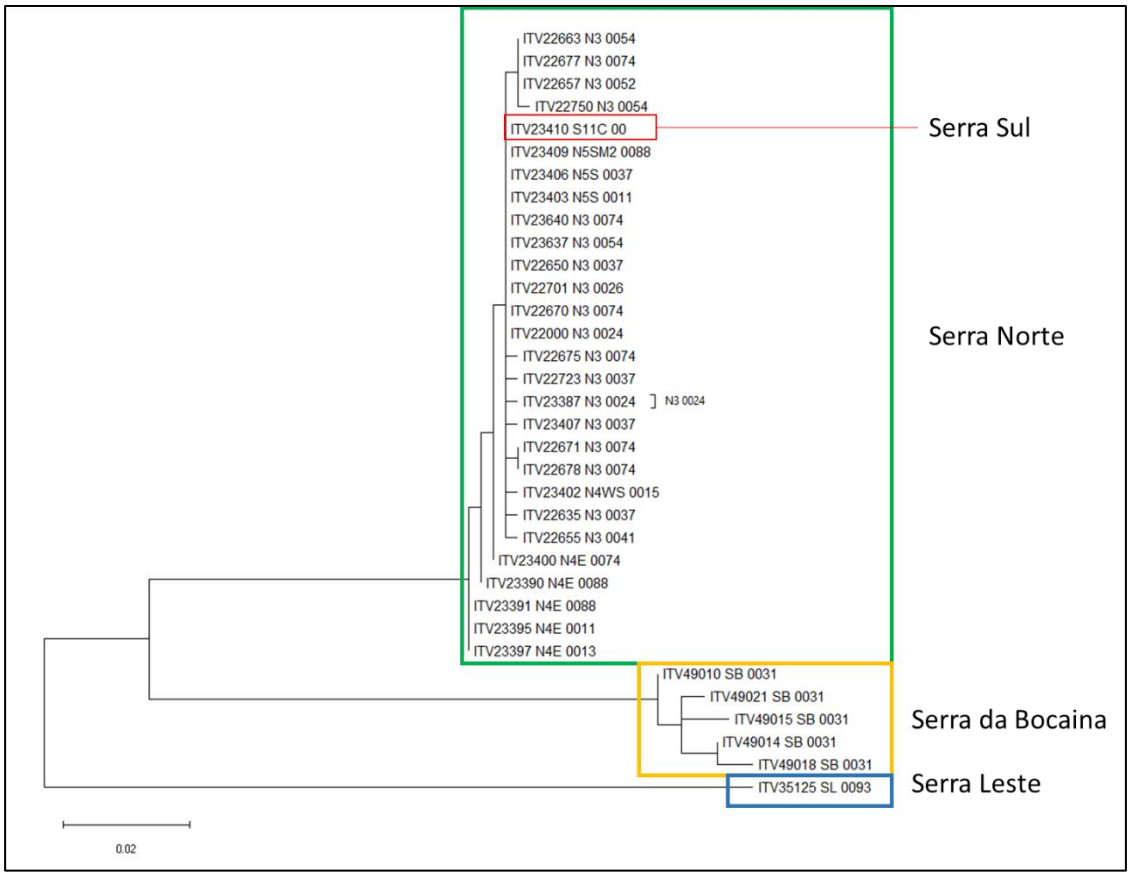


Figura 46: Reconstrução filogenética – máxima verossimilhança. É possível notar a proximidade entre as amostras de cavernas em Serra Norte (polígono verde), bem como notar a divergência entre cavernas de diferentes serras.

A formação disjunta entre as serras e platôs em formação ferrífera numa matriz florestal pode representar uma barreira geográfica para a distribuição espacial de espécies troglóbias, pois dependem do MSS para sua dispersão. As análises, realizadas no software DNAsp versão 5 (ROZAS et al., 2010), foram baseadas em 18 cavernas com amostras de *Pseudoporatia* sp, subdivididas em 6 grupos de acordo com os platôs. Desta maneira, foram amostradas sete cavernas no platô N3, cinco cavernas no platô N4, três em N5, uma Serra Leste, uma Serra Sul e uma Serra da Bocaina.

Ao se analisar a diferenciação genética foram observados os parâmetros da população estudada. A variação observada entre os grupos foi de 98,35%. Apenas 0.74% da variação foi observada entre populações dentro de cada grupo e 0.91% dentro de cada população. O F*st*, fator que descreve o quanto as populações são diferentes foi de 0.99092, o que indica uma elevada diferenciação genética entre as serras.

A partir destes resultados é possível observar uma alta estruturação entre as populações de diferentes serras. É possível observar também uma baixa estruturação entre populações de cavernas em áreas contínuas de formação ferrífera e baixa estruturação dentro das populações (indivíduos), evidenciando uma alta conectividade entre as cavernas estudadas, evidenciando a possibilidade de migração de indivíduos entre as cavernas de um mesmo platô ao ponto de não serem observadas diferenciações nas estruturas genéticas entre as populações estudadas.

Na tabela 13 são apresentadas as populações amostradas, e na tabela 14, a comparação de Fst par a par entre as populações.

Tabela 13: Ordenamento das populações amostradas.

Rótulo	Nome da População
1:	N3_0024
2:	N3_0026
3:	N3_0037
4:	N3_0041
5:	N3_0052
6:	N3_0054
7:	N3_0074
8:	N4E_0011
9:	N4E_0013
10:	N4E_0074
11:	N4E_0088
12:	N4WS_0015
13:	N5SM2_0088
14:	N5S_0011
15:	N5S_0037
16:	S11C_0054
17:	SB_0031
18:	SL_0093

Fonte: Autor com base na localização das cavernas amostradas

Tabela 14: comparação par a par do Fst entre populações.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0.00000																	
2	0.06707	0.00000																
3	0.15960	0.07667	0.00000															
4	0.77571	1.00000	0.69426	0.00000														
5	0.74186	1.00000	0.65173	1.00000	0.00000													
6	0.66919	0.72402	0.62172	0.80286	-0.87879	0.00000												
7	0.41285	0.34761	0.43441	0.57199	0.27692	0.46069	0.00000											
8	0.90429	1.00000	0.86448	1.00000	1.00000	0.88008	0.73219	0.00000										
9	0.91618	1.00000	0.87564	1.00000	1.00000	0.90794	0.79439	0.00000	0.00000									
10	0.74186	1.00000	0.65173	1.00000	1.00000	0.75494	0.44379	1.00000	1.00000	0.00000								
11	0.89272	0.95516	0.85713	0.93048	0.89474	0.87901	0.76623	-1.00000	-0.05263	0.77778	0.00000							
12	0.74186	1.00000	0.65173	1.00000	1.00000	0.75494	0.44379	1.00000	1.00000	1.00000	0.89474	0.00000						
13	-0.02711	0.00000	-0.00233	1.00000	1.00000	0.63422	0.22429	1.00000	1.00000	1.00000	0.91886	1.00000	0.00000					
14	-0.07752	0.00000	-0.04791	1.00000	1.00000	0.60883	0.17989	1.00000	1.00000	1.00000	0.90596	1.00000	0.00000	0.00000				
15	-0.70370	0.00000	-0.61944	1.00000	1.00000	0.48760	-0.20513	1.00000	1.00000	1.00000	0.85714	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000			
16	-0.18929	0.00000	-0.15045	1.00000	1.00000	0.57217	0.09739	1.00000	1.00000	1.00000	0.88764	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000		
17	0.98441	0.97282	0.98883	0.94140	0.91399	0.97163	0.96773	0.90867	0.94801	0.91141	0.95139	0.91298	0.95031	0.94226	0.91272	0.93090	0.00000	
18	0.99818	1.00000	0.99610	1.00000	1.00000	0.99840	0.99598	1.00000	1.00000	1.00000	0.99938	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.99194	0.00000

Fonte: Autor com base nos dados de diferenciação na frequência alélica

Na tabela 15 é mostrada a matriz de significância dos valores de Fst.

Tabela 15: Matriz de significância dos valores P de Fst a partir de 110 permutações e nível de significância de 0,05.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1																		
2	-																	
3	+	-																
4	+	+	+															
5	-	-	-	-														
6	+	+	+	+	-													
7	+	+	+	+	-	+												
8	-	-	-	-	-	-	-											
9	+	+	+	+	-	+	+	-										
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-									
11	+	+	+	+	-	+	+	-	-	-								
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
13	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	-						
14	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	+	-	-					
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
16	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-			
17	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-		
18	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+	+	

Fonte: Autor com base nos dados de diferenciação na frequência alélica

A partir destes resultados foi possível interpretar as diferenças nas sequências encontradas nas amostras, uma vez que os animais que ocorrem em um determinado platô estão em contato direto e potencialmente se encontram para trocar genes dentro deste determinado platô, mesmo que em cavernas diferentes. Por outro lado, a presença de uma

barreira geográfica sugere fortemente que as populações de diferentes platôs pertencem a diferentes espécies, quando observamos as distâncias genéticas, que, inclusive, se reflete no agrupamento obtido na árvore filogenética entre as áreas estudadas. No caso específico de Carajás é possível observar que a matriz geológica que ocorre nos platôs apresenta uma estrutura diferente do pacote geológico encontrado nas áreas onde não ocorre depósitos de ferro, impossibilitando a migração entre platôs, principalmente tratando-se de uma espécie troglóbia associada ao habitat subterrâneo.

4.3. Construção de rede de haplótipos

A partir da rede de haplótipos resultante é possível inferir uma diversidade genética bem distribuída entre as populações nas áreas em que não há barreiras. Por sua vez, os poucos haplótipos das periferias, comuns aos da área central, representam uma subamostra dos haplótipos encontrados na região central analisada disposto em forma de estrela. Desta forma sugerem a manutenção contínua do contato entre as populações, ao contrário do encontrado entre o haplótipo 10 e as amostras de Serra da Bocaina, e entre os haplótipos 11 e 20, que apresentam diversos passos mutacionais entre as demais populações, indicando que há uma forte limitação ao fluxo gênico entre os platôs estudados. Outro ponto identificado foi a falta de relação entre os haplótipos de Serra Leste e Serra da Bocaina, indicando a possibilidade de existência de uma espécie em cada uma das áreas. O haplótipos 10, 11, 12 e 13 apresentaram poucos passos mutacionais em relação às amostras de N3, mesmo os platôs N4 e N5 (contíguos e com um conjunto próprio de haplótipos) estando separados de N3 por uma formação florestal que dificulta o trânsito de indivíduos (FIGURAS 47 e 48).

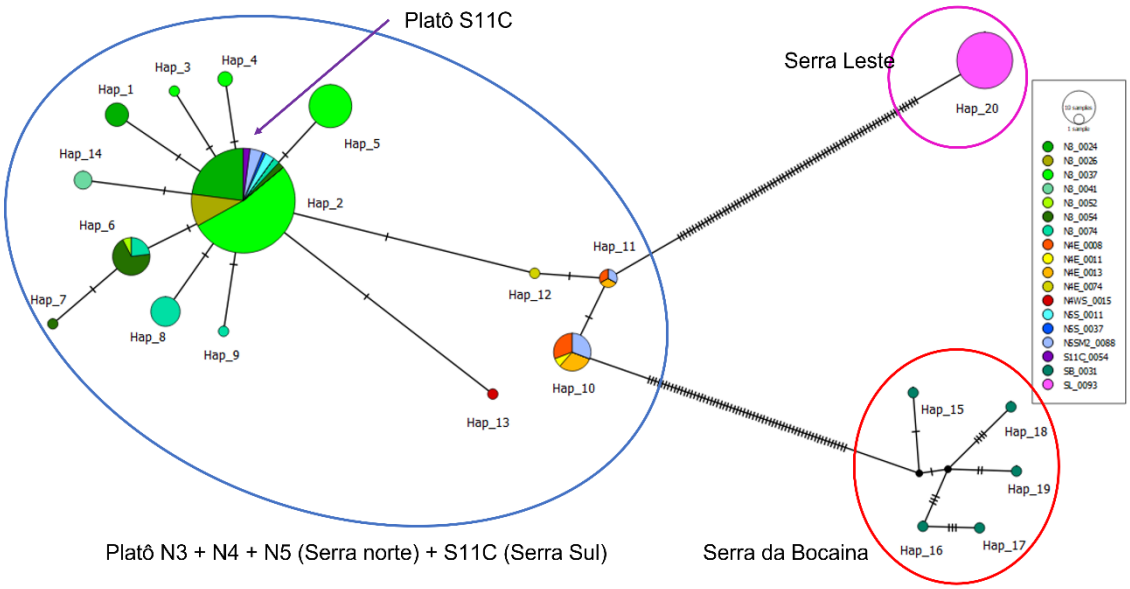


Figura 47: Rede de haplótipos amostrados em populações de Pseudoporatia sp. na formação ferrífera de Carajás. Em verde os haplotipos de N3, em tons amarelos, N4 e N5. Em rosa, Serra Leste e em verde escuro Serra da Bocaina. Fonte: elaboração própria.

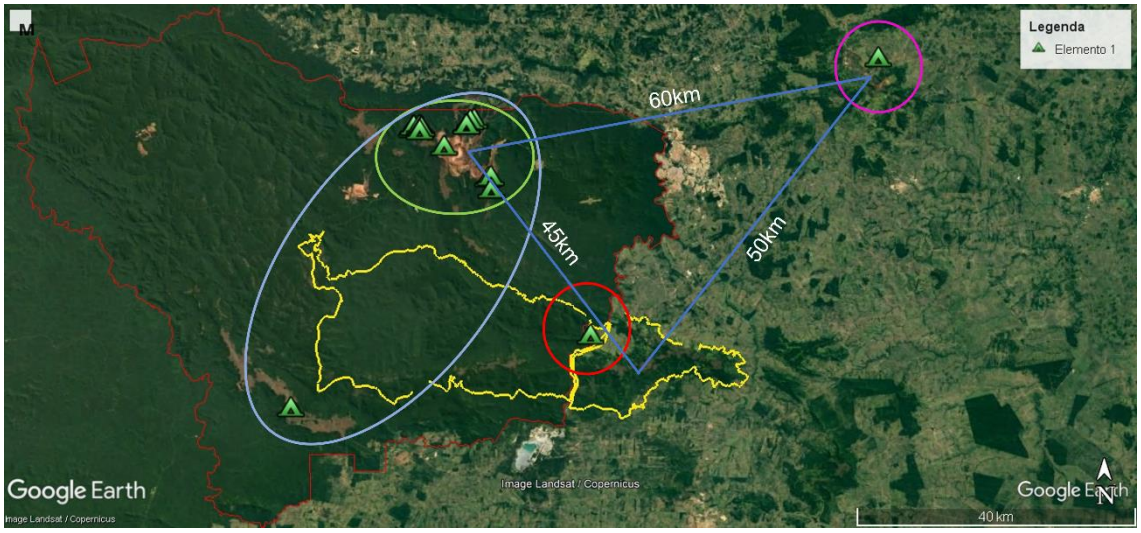


Figura 48: Paisagem e rede de haplótipos entre aas serras de acordo com os resultados obtidos a partir das análises moleculares. Fonte: elaboração própria.

5. Discussão

A espécie *Pseudoporatia* sp. foi selecionada para o estudo por apresentar uma ampla distribuição, fácil identificação e coleta nas cavernas da formação ferrífera. Além disso, apresenta características troglomórficas. Entretanto, faz-se necessário a seleção de

outras espécies modelos para melhor descrever a situação abordada uma vez que a história evolutiva de cada espécie é diferente.

Anteriormente à realização deste estudo, os dados morfológicos e taxonômicos analisados durante do licenciamento ambiental na região indicavam a ocorrência de apenas um único morfótipo de Pyrgodesmidae com ampla distribuição nas cavernas da área de estudo. A partir dos dados moleculares, foi possível observar uma estruturação molecular entre as populações amostradas nas diferentes serras, o que pode indicar uma forte associação de *Pseudoporatia sp* com as cavernas da formação ferrífera.

Do ponto de vista molecular, os baixos valores de distância genética dentro de uma mesma serra, mesmo quando observadas diferentes populações (cavernas), indicam que o morfótipo encontrado em Serra Norte não apresenta divergências genéticas, o que leva ao entendimento da existência de uma única espécie. De modo contrário, ao se analisar a distância genética observada entre os platôs, é plausível a ideia de que o morfótipo que ocorre em Serra Norte, o morfótipo que ocorre em Serra Leste e o morfótipo que ocorre em Serra da Bocaina representem um complexo de espécies com três unidades taxonômicas distintas, evidenciando que estes animais aparentemente não são capazes de manterem contato entre serras, uma vez que a formação florestal representa uma importante barreira geográfica, tornando-se geneticamente diferentes. A partir dos resultados obtidos é indicada a seleção de outros marcadores moleculares, tanto mitocondriais quanto nucleares para melhor descrever a situação abordada.

De acordo com os resultados obtidos, faz-se necessário analisar outras espécies do grupo taxonômico estudado que não apresentem limitações na sua distribuição entre as serras, para verificar se os valores de distância genética obtidos representam espécies já estabelecidas ou ainda em processo de divergência.

A árvore evolutiva obtida a partir dos dados moleculares demonstraram graficamente agrupamentos entre as amostras de cavernas de uma mesma serra, como também é possível observar agrupamentos evidentemente divididos entre as amostras de cada uma das serras (Serra Norte, Serra Sul, Serra da Bocaina e Serra Leste). As amostras de Serra Sul agruparam-se com as amostras de Serra Norte, mesmo estes sendo platôs distantes entre si. Como trata-se de apenas duas amostras, é recomendável novas coletas em Serra Sul para complementar os presentes dados. Como o esperado em espécies troglóbias, não deve haver migração entre as serras, com presença de cavernas disjuntas na paisagem por uma matriz impermeável a esta fauna.

A rede de haplótipos, outra forma de representar graficamente os dados obtidos, evidenciou o resultado encontrado nas análises de estruturação populacional, mostrando uma maior diversidade haplotípica entre as amostras de cavernas em uma paisagem contínua (serras) e um acúmulo significativo de mutações quando comparados entre as Serras Norte, Sul, Leste e Bocaina, da mesma forma que o indicado pela árvore evolutiva.

A partir do acesso ao banco de dados ainda não publicados do ITV, foi possível analisar sequências do marcador COI de populações de outras espécies já descritas e caracterizadas como troglóbias, como Diplopoda *Glomeridesmus speleaus* (NUNES et al., 2020). A partir da análise de distância molecular entre 11 indivíduos desta espécie amostrados em cavernas de Serra Norte e Serra Sul, Serra da Bocaina e Serra Leste foi obtido entre 6% e 11% de diferença genética entre as populações destas serras, com variações entre 1% e 2% quando comparados dentro das populações.

Foi possível analisar também outras duas espécies troglóbias de aracnídeos do gênero *Charinus,* representado por *C. ferreous e C. carajás* (GIUPPONI e DE MIRANDA, 2016). A partir de 95 indivíduos coletados em cavernas na Serra Norte e Serra Sul foram obtidos resultados semelhantes, com diferenças de aproximadamente 21% entre as amostras de serras diferentes (considerando as duas espécies) e uma variação menor que 2% entre populações da mesma serra (considerando-se cada espécie).

A partir destes resultados podemos perceber que as distâncias genéticas observadas entre estas diferentes espécies seguem o mesmo padrão de diferenças genéticas significativas entre as serras, sugerindo unidades taxonômicas distintas, como no caso das espécies de *Charinus*, já diferenciadas e descritas, e de *Glomeridesmus*, que até o momento apresenta apenas uma espécie descrita. Esses dados, semelhantes aos encontrados em nosso trabalho para Pseudoporatia sp., sugerem que esta possa ser considerada um conjunto de espécies crípticas com possibilidade de determinação de novos troglóbios.

6. Conclusões

Os ecossistemas subterrâneos tem sido considerados laboratórios naturais para o estudo de ecologia e evolução devido à relativa simplicidade de suas comunidades e de isolamento temporal e espacial de sua biota (POULSON e WHITE, 1969). Portanto, as

espécies troglóbias são bons modelos para a realização de estudos micro evolutivos e tem sido cada vez mais estudados pelo aspecto filogeográfico (STRECKER et al., 2003; NIEMILLER et al., 2008).

Levando-se em consideração as características ecológico-evolutivas dos troglóbios, somado à inaptidão de ocupar espaços superficiais para livre dispersão, pequenas distâncias são suficientes para diferenciá-las. Nestes grupos taxonômicos é comum o status de raro ou relicto para espécies troglóbias conhecidas e restritas a apenas uma determinada caverna.

O conhecimento dos padrões filogeográficos, a história da espécie e a avaliação da ação de diferentes forças evolutivas são bem suportadas quando há comparações na variação de padrões geográficos obtidos a partir de diferentes metodologias (GARNIER, et al., 2005; WILEY, 2011). Porém, uma vez que organismos troglóbios são restritos ao ambiente subterrâneo, a sua distribuição nestes ambientes está associada à existência de conexões subterrâneas atuais ou históricas (KREJAC, 2005; PALANDAČIĆ, 2011).

Desta forma, o marcador utilizado apresenta-se adequado para uma abordagem inicial de um grupo de espécies com pouco estudos taxonômicos e moleculares para balizar os dados genéticos obtidos aqui. Fases futuras da abordagem molecular podem ser mais aprofundadas e precisas a partir de dados de sequenciamento de nova geração, capaz de gerar uma quantidade maior de polimorfismo e, consequentemente, um maior refinamento das análises de diversidade e estruturação genética.

Neste estudo foi possível observar uma alta estruturação entre as populações de platôs disjuntos. Por outro lado, foi possível observar também uma baixa estruturação entre populações de cada caverna e baixa estruturação dentro das populações (indivíduos), evidenciando a existência de conectividade entre as cavernas situadas em platôs contínuos, não sendo observadas diferenciações nas estruturas genéticas entre as populações estudadas em cada serra.

A partir destes dados também foi possível inferir a possibilidade deste único morfótipo descrito para as cavernas da região tratar-se de um complexo de espécies crípticas. Os resultados apresentados fornecem suporte à futuras análises para confirmação taxonômica, auxiliando nos esforços de conservação e evitando a perda líquida de espécies.

7. Referências bibliográficas

AB'SÁBER, A. N. Geomorfologia da região. In: Almeida, J.M.G. (org.). **Carajás: desafio político, ecologia e desenvolvimento**. CNPq, Brasília, pp. 88-124, 1986.

ADIS J. (Ed.) Amazonian Arachnida and Myriapoda. Identification Keys to All Classes, Orders, Families, Some Genera, and Lists of Known Terrestrial Species. **Pensoft Publishers**, Sofia–Moscow,. 2002.

ADIS, J.; MORAIS, J. W.; FRANKLIN, E. Myriapoda In: **A fauna de artrópodes da Reserva Florestal Ducke** / organizadores, Claudio Ruy Vasconcelos da Fonseca ... [et al.] -- Manaus: Editora INPA, 308 p.: il, 2009.

ALBERTS, B.; JOHNSON, A; LEWIS, J.; MORGAN, D.; RAFF, M.; ROBERTS, K.; WALTER, P.; WILSON, J.; HUNT, T. **Biologia molecular da célula tradução**: [Ardala Elisa Breda Andrade... et al.]; revisão técnica: Ardala Elisa Breda Andrade, Cristiano Valim Bizarro, Gaby Renard. – 6. ed. – Porto Alegre : Artmed, 2017.

AVISE, J. C. Phylogeography: retrospect and prospect. **Journal of Biogeography**, 36: 3-15. 2009.

BARR, T. C.*;* HOLSINGER, J. R. Speciation in cave faunas. **Ann. Rev. Ecol. Syst**., v.16, p. 313- 337. 1985.

BEHEREGARAY, L.B. Twenty years of phylogeography: the state of the field and the challenges for the Southern Hemisphere. **Molecular Ecology**, 17: 3754-3774. 2008.

BENTO, D. M.; FREITAS; PROUS, X., SOUZA-SILVA, M.; BELLINI, B. C.; VASCONCELLOS, A. Seasonal Variations in Cave Invertebrate Communities in the Semiarid Caatinga, Brazil. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 78, no. 2, p. 61–71. August, 2016.

BENTO, D. M. Filogeografia de artrópodes troglóbios do Oeste da formação Jandaíra, Nordeste do Brasil: evolução e conectividade biológica em ambientes subterrâneos como base para ações de conservação. **Tese**. Doutorado em Sistemática e Evolução do Centro de Biociências da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2021.

BERTHIER, K.; GALAN, M.; FOLTETE, J. C.; CHARBONNEL, N.; COSSON, J. F. Genetic structure of the cyclic fossorial water vole (Arvicola terrestris): landscape and demographic influences. **Molecular Ecology**, 14: 2861–2871, 2005.

BIOESPELEO. Consultoria Ambiental. **Revisão da análise de relevância Serra Leste.** 2018.

CABALLERO, A.; RODRÍGUEZ-RAMILO, S. T.; ÁVILA, V.; FERNÁNDEZ, J. Management of genetic on subdivided populations in conservation programmes. **Conservation Genetics**, Dordrecht, v. 11, p. 409 – 419, 2010.

CARSTE. Consultores Associados. Serra Leste – **Espeleologia: Diagnóstico espeleológico, diagnóstico bioespeleológico e análise de relevância**. Belo Horizonte, Minas Gerais. 549p. 2011.

CARSTE. Consultores Associados. **Estudos Espeleológicos do Projeto Serra Norte Geoespeleologia, Bioespeleologia, Análise de Relevância**. Belo Horizonte. 301pp. 2014.

CARVALHO, D. C.; SEERIG, A.; MELO, D. C.; SOUSA, A. B.; PIMENTA, D.; OLIVEIRA, D. A. A. Identificação molecular de peixes: o caso do Surubim (Pseudoplatystoma spp.). **Revista Brasileira de Reprodução Animal**, Belo Horizonte, v.32, n.4, p.215-219, 2008.

COSTA, D.; TIMMERMANSB, M. J. T. N.; SOUSA, J. P.; RIBEIRO, R.; ROELOFSD, D.; VAN STRAALEND, N. M. Genetic structure of soil invertebrate populations: collembolans, earthworms and isopods. **Applied Soil Ecology**, 68: 61–66. 2013.

CULVER, D. C. **Cave Life. Evolution and Ecology**. Harvard University Press. Cambridge, Massachussets and London, England. 189 pp, 1982.

CULVER, D. C.; KANE, T. C.; FONG, D. W. Adaptation and Natural Selection in Caves. The Evolution of Gammarus Minus. Cambridge: **Harvard University Press**. 1995.

CULVER, D. C.; PIPAN, T. **The Biology of Caves and Other Subterranean Habitats**. Oxford: Oxford University Press. 2009.

ENGHOFF, H.; GOLOVATCH, S.; SHORT, M.; STOEV, P.; WESENER, T. **Diplopoda - taxonomic overview**. 2. 363-453. 2015.

EXCOFFIER, L.; LISCHER, H. Arlequin suite ver 3.5: A new series of programs to perform population genetics analyses under Linux and Windows. **Molecular Ecology Resources**, 10: 564–567. 2010.

FERREIRA, R. L.; MARTINS, R. P. Diversity of Spiders Associated with Bat Guano Piles in Morrinho Cave (Bahia State, Brazil). **Diversity and Distributions**, 4:235-241. 1998.

FERREIRA, R. L.; MARTINS, R. P. Trophic Structure and Natural History of Bat Guano Invertebrate Communities with Special Reference to Brazilian Caves. **Tropical Zoology**, v. 2, n. 12, p. 231-259, 1999.

FERREIRA, R. L.; MARTINS, R. P.; YANEGA, D. Ecology of bat guano arthropod communities in a brazilian dry cave. **Ecotropica**, 6(2):105-116. 2000.

FERREIRA, R. L. A vida subterrânea nos campos ferruginosos. **O Carste** (Belo Horizonte), v. 3, p. 106-115, 2005.

FISĚR, C.; ZAGMAJSTER, M.; FERREIRA, R. L. Two new Amphipod families recorded in South America shed light on an old biogeographical enigma. **Systematics and Biodiversity** 11:2, 117-139, 2013.

GALLÃO, J. E.; BICHUETTE, M. E. Brazilian obligatory subterranean fauna and threats to the hypogean environment. **Zookeys**. 746:1–2, 2018.

GARNIER, S.; MAGNIEZ-JANNIN, F.; RASPLUS J. Y.; ALIBERT, P. When morphometry meets genetics: inferring the phylogeography of Carabus solieri using Fourier analyses of pronotum and male genitalia. **Journal of Evolutionary Biology** v.18, p.269-280, 2005.

GILBERT, J.; DEHARVENG, L. Subterranean Ecosystems: A Truncated Functional Biodiversity. **BioScience**. 52: 473–481. 2002.

GIUPPONI, A. P. D. L.; DE MIRANDA, G. S. Eight New Species of *Charinus* Simon, 1892 (Arachnida: Amblypygi: Charinidae) Endemic for the Brazilian Amazon, with Notes on Their Conservational Status. **PLoS ONE** 11(2): e0148277. 2016.

GNASPINl-NETTO, P. Análise comparativa da fauna associada a depósitos de guano de morcegos cavernícolas no Brasil. Primeira aproximação. **Revta bras. Entomol**. 1989.

GOLOVATCH, S. I.; HOFFMAN, R. L.; ADIS, J.; DE MORAIS, J. W. Identification plate for the milipede orders populating the Neotropical Region south of central Mexico (Myriapoda, Diplopoda). **Studies on Neotropical Fauna & Environment**, v. 30, n. 3, p. 159-164, 1995.

GOLOVATCH, S. I., GEOFFROY, J. - J., MAURIÈS, J. - P. Several new or poorly-known cavernicolous millipedes (Diplopoda) from southern China. **Arthropoda Selecta**, 15 (2), 81 - 89. 2006.

GOLOVATCH, S. I.; KIME, D. Millipede (Diplopoda) distributions: a review. **Soil Organisms**, v. 81, n. 3, p. 565-597, 2009.

GRIFFITHS, A. J.; WESSLER, S. R.; GELBART, W. M.; SUZUKI, D. T.; MILLER, J. H. **Introdução à genética**. 8a. ed. Guanabara Koogan. Rio de Janeiro - RJ. 2006.

HANSKI, I. Metapopulation dynamics. **Nature**, 396:41–49. 1998.

HARE, M. P. Prospects for nuclear gene phylogeography. **Trends Ecol. Evol**. 16:700–706. 2001.

HEBERT, P. D. N.; RATNASINGHAM, S.; DE WAARD, J. R. Barcoding animal life: cytochrome c oxidase subunit 1 divergences among closely related species. **Proceedings of the Royal Society** *B (Supplement)* **270**, S96-S99. 2003a.

HEBERT, P. D. N.; CYWINSKA, A.; BALL, S. L.; DE WAARD, J. R. Biological identifications through DNA barcodes. **Proceedings of the Royal Society of London** B 270: 313–322. 2003b.

HOCH, H. FERREIRA, R. L. Potiguara troglobia gen. n., sp. n. – first record of a troglobitic Kinnaridae from Brazil (Hemiptera: Fulgoromorpha). **Deutsche entomologische Zeitschrift**. Berlin 60(1): 33-40 [34]. 2013.

HOFFMAN, R. L. Diplopoda. In: PARKER, S. B., ed., **Synopsis and Classification of Living Organisms**, 2, 689–724. 1982.

HOLSINGER, K. E.; WEIR, B. S. Genetics in geographically structured populations: Defining, estimating and interpreting FST. **Nat Rev Genet** 10:639-650. 2009.

HUMPHREYS, W. F. Biodiversity patterns in Australia. 109-126. In: White WB and Culver DC (eds**), Encyclopedia of Caves**, 3nd Edition. Academic Press, San Diego, 2019.

ICMBIO. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Projeto cenários: conservação de campos ferruginosos diante da mineração em Carajás** / Frederico Drumond Martins, Luciana Hiromi Yoshino Kamino e Kátia Torres Ribeiro (organizadores). – 1. ed. – Tubarão (SC): Copiart, 2018.

INIESTA, L. M., BOUZAN, R. S., SOUZA, C. A. R. Diplopoda. In: **Fauna Cavernícola do Brasil**/ Organizadores Robson de Almeida Zampaulo e Xavier Prous. Belo Horizonte, MG: Rupestre, 2022.

INIESTA L. F. M., BOUZAN R. S., SOUZA C. A. R., ZAMPAULO R. A., CIZAUSKAS I. & BRESCOVIT A. D. Additions to the millipede fauna of an Amazonian ferruginous landscape: a new species of Pseudoporatia Golovatch, 1999 widespread in rock outcrops (Diplopoda, Polydesmida, Pyrgodesmidae). **Zoosystema** 45 (16): 463-498. 2023.

JORGENSEN, M; SIERWALD, P. Millipedes of the Caribbean: a review of the pyrgodesmid genus Docodesmus Cook with notes on potentially related genera (Polydesmida, Pyrgodesmidae). **International Journal of Myriapodology**, 3(1): 20-50. 2010.

JUAN C, GUZIK MT, JAUME D, COOPER SJB. Evolution in caves: Darwin's 'wrecks of ancient life' in the molecular era. **Molecular Ecology** 19:3865-3880. 2010

KREJAC, K. Stygobite phylogenetics as a tool for determining aquiferevolution. (**Doctoral Thesis**)-University of Texas, Austin, 115p, 2005.

MAMMOLA, S.; ISAIA, M.; ARNEDO, M. A. Alpine endemic spiders shed light on the origin and evolution of subterranean species. **PeerJ**, 3, e1384, 2015.

MAMMOLA, S.; GIACHINO, P. M.; PIANO, E. Ecology and sampling techniques of an understudied subterranean habitat: the Milieu Souterrain Superficiel (MSS). **Sci Nat** 103, 88, 2016.

MAMMOLA, S. Finding answers in the dark: caves as models in ecology fifty years after Poulson and White - Mammola - 2019 - **Ecography** - Wiley Online Librar. Ecography. 1331-1351, 2018.

MORITZ, C.; CICERO, C. DNA Barcoding: Promise and Pitfalls. **PLoS Biol** 2(10): e354. 2004.

MARSKE, K.A. Phylogeography, In: Encyclopedia of Evolutionary Biology, Editor(s): Richard M. Kliman, **Academic Press**, p. 291-296, 2016.

NABHOLZ, B.; GLEMIN, S.; GALTIER, N. Strong Variations of Mitochondrial Mutation Rate a cross Mammals—the Longevity Hypothesis. **Mol. Biol. Evol**. 25:120–130. 2008.

NIEMILLER, L. M.; FITZPATRICK, B. M.; MILLER, B. T. Recent divergence with gene flow in Tennessee cave salamanders (Plethodontidae: Gyrinophilus) inferred from gene genealogies **Molecular Ecology** (2008) 17, 2258–2275, 2008.

NUNES, G. L.; OLIVEIRA, R. R. M.; PIRES, E. S.; PIETROBON, T.; PROUS, X.; OLIVEIRA, G.; VASCONCELOS, S. Complete mitochondrial genome of *Glomeridesmus spelaeus* (Diplopoda, Glomeridesmida), a troglobitic species from iron-ore caves in Eastern Amazon. **Mitochondrial DNA B Resour**. 31;5(3):3272-3273. 2020.

PALANDAČIĆ, A.; BONACCI, O.; SNOJ, A. Molecular data as a possible tool for tracing groundwater flow in karst environment: example of Delminichthys adspersus in Dinaric karst system. **Ecohydrology**. doi: 10.1002/eco.269, 2011.

PIPAN, T.; CULVER, D. C. The unity and diversity of the subterranean realm with respect to invertebrate body size. **Journal of Cave and Karst Studies** 79: 1–9. 2017.

POULSON, L.T. Bat guano ecosystems. **Bulletin of the National Speleological Society**, 34(2), 55-59. 1972.

POULSON, T. L.; WHITE, W. B. The cave environment. **Science**, 165(3897), p.971-981, 1969.

PROVAN, J.; POWELL, W.; HOLLINGSWORTH, P. M. Chloroplast microsatellites: New tools for studies in plant ecology and evolution. **Trends Ecol. Evol**. 16:142–147. doi: 10.1016/S0169-5347(00)02097-8, 2001.

RACOVITZA, E. G. Essai sur les problèmes biospéologiques. Archives de Zoologie Expérimentale et Générale, 4ª ser., v.6, p371-488 [Edición Facsímil. In: BELLÉS, X, (Ed.). 2004. **Assaig sobre els problemes bioespeleològics**. Institut d´Estudis Catalans, Barcelona. 1907.

RODRIGUES, L. B.; PIMENTA, J. R.; PENA, S. D. J. The Genetic Structure of Human Populations Studied Through Short Insertion-Deletion Polymorphisms. **Annals of Human Genetics** Volume 70, Issue 5 p. 658-665. 2006.

ROSS, J. L. S. O Relevo Brasileiro nas Macroestruturas Antigas**. Continentes** 1: 8-27, 2013.

ROZAS, J.; LIBRADO, P.; SÁNCHEZ-DELBARRIO, J. C.; MESSEGUER, X.; ROZAS, R. DnaSP version 5.10. 1 (Selfextracting file of 4.6 Mb) Universitat de Barcelona. Current Released Version: 5.10.1, 2010.

RUSSELL, M. J.; MACLEAN, V. L. Management issues in a Tasmanian tourist cave: Potential microclimatic impacts of cave modifications. **Journal of Environmental Management**, v. 87, n. 3, p. 474-483, 2008.

SANGER, F.; NICKLEN, S.; COULSON, A. R. DNA sequencing with chain-terminating inhibitors. **Proc Natl Acad Sci** U S A 74:5463–5467, 1997.

SHEAR, W. A. Millipeds (Diplopoda) from Mexican and Guatemalan caves. **Accademia, Nazionale Dei Lincei, Problemi Attuali Di Scienza E Di Cultura,** 171(2): 239–305. 1973.

SOUZA, S.; RIUTORT, M.; FERREIRA, R. L.; LEAL-ZANCHET, A. An integrative taxonomic approach reveals the first marine triclad (Platyhelminthes) trapped in a cave from a semiarid Neotropical environment. **Invertebrate Systematics** 32(3): 627-638, 2018.

SPIELMAN, D.; BROOK, B. W.; FRANKHAM, R. Most species are not driven to extinction before genetic factors impact them**. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 101: 15261–21526. 2004.

STECHER, G.; TAMURA, K.; KUMAR, S. Molecular Evolutionary Genetics Analysis (MEGA) for macOS. **Mol Biol Evol.** 2020 Apr 1;37(4):1237-1239. doi: 10.1093/molbev/msz312, 2020.

STOECKLE, M., WAGGONER, P.E., AUSUBEL, J.H. Barcoding life, illustrated. Goals, rationale, disponível em (www.barcoding.si.edu). 2005.

STRECKER, U.; BERNATCHEZ, L.; WILKENS, H. Genetic divergence between cave and surface populations of Astyanax in Mexico (Characidae, Teleostei). **Molecular Ecology**, v.12, p.699 – 710, 2003.

TAMURA, K.; NEI, M. Estimation of the number of nucleotide substitutions in the control region of mitochondrial DNA in humans and chimpanzees. **Molecular Biology and Evolution** 10:512-526, 1993.

TAMURA, K.; STECHER G.; KUMAR, S. MEGA 11: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 11. **Molecular Biology and Evolution** https://doi.org/10.1093/molbev/msab120, 2021.

TRAJANO, E.; BICHUETTE, M. E. **Biologia subterrânea**: introdução. 2006.

TRAJANO, E.; BICHUETTE, M. E. Diversity of Brazilian subterranean invertebrates, with a list of troglomorphic taxa. **Subterranean Biology**, vol.7, p.1-16, 2009.

TRAJANO, E.; BICHUETTE, M. E. Relevância de cavernas: porque estudos ambientais espeleobiológicos não funcionam. **Espeleo-Tema**. SBE – Campinas SP v. 21, n. 1, p. 105-112. 2010.

TRAJANO, E.; BESSI, R. A classificação schiner-racovitza dos organismos subterrâneos: uma análise crítica, dificuldades para aplicação e implicações para conservação. **Espeleo-Tema**. v.28, n.1. SBE – Campinas, SP, 2017.

TRENDALL, A. F.; BASEI, M. A. S.; LAETER, J. R.; NELSON, D. R. Shrimp zircon U-Pb constraits on the age of the Carajás formation, Grão Pará Group, Amazon Craton. Journal of South America **Earth Sciences**, 11: 265-277, 1998.

UÉNO, S.I. The Derivation of Terrestrial Cave Animals. **Zool Sci** 4: 593-606. 1987

WHITE, W. B.; CULVER, D. C.; PIPAN, T. Encyclopedia of caves, 3rd edn. Academic press, 2019.

WHITLOCK, M. C.; MCCAULEY, D. E. Some population genetic consequences of colony formation and extinction: Genetic correlations within founding groups. **Evolution**, 44: 1717–1724. 1990.

WILEY, E. O.; LIEBERMAN, B. S. Species and Speciation. In: WILEY, E. O.; LIEBERMAN, **Phylogenetics: Theory and Practice of Phylogenetic Systematics**, Second Edition, John Wiley & Sons 432p, 2011.

WRIGHT, S. The genetical structure of populations. **Annals of Eugenic**, New York, v. 15, p. 395-420, 1951.

WRIGHT, S. The interpretation of population structure by F-statistics with special regard to systems of mating. Evolution; **International Journal of Organic Evolution**; 19(3): 395-420. 1965.

ZAPPI, D. Paisagens e Plantas de Carajás = Landscapes and Plants of Carajas: Instituto Tecnológico Vale (ITV), 1. ed. **Bilíngue,** Belém/PA, 2017.

CONCLUSÕES GERAIS

Para o melhor aproveitamento no levantamento de dados ecológicos em futuros estudos abordando o MSS devem ser previstas alterações na metodologia atual de perfuração dos furos de sondagem, adaptando-os aos objetivos de monitoramento de dados biológicos e mantendo as características bióticas e abióticas do ambiente subterrâneo.

De maneira geral, foi observado o trânsito de espécies da fauna total de artrópodes presentes no MSS, sendo também registrada a presença de espécies troglomórficas e registros de novas espécies.

As armadilhas com isca padrão, formada somente por folhiço esterilizado, foram significativamente mais eficientes na coleta de espécies da fauna de artrópodes subterrâneo, em detrimento da isca enriquecida. Contudo, quando comparamos a composição de espécies há complementaridade dos resultados, sendo importante, portanto, a utilização de mais de um modo de coleta.

A profundidade foi um fator que influenciou positivamente as espécies mais pré-adaptadas ao meio subterrâneo, como ácaros e colêmbolas, e de forma negativa espécies ligadas ao ambiente edáfico, como as aranhas.

A sazonalidade foi marcada pela variação entre as espécies ocupantes do MSS ao longo das estações sendo possível observar o efeito de *turnover* das espécies.

Ao se analisar os dados de betadiversidade é possível entender que quando a riqueza e a composição das amostras de uma área contínua são comparadas é possível observar que são formados grupos fracamente hierarquizados, uma vez que a diferença entre as amostras é muito pequena.

Como esperado para populações de espécies troglóbias, foi registrada uma fraca evidência de estruturação genética para populações de cavernas de uma mesma serra, bem como a utilização do MSS por espécies troglóbias. Por outro lado, foi observada uma forte estruturação entre cavernas de diferentes serras, indicando a possibilidade de existência de mais de uma unidade taxonômica nos diferentes locais estudados. Estes resultados apontam para uma forte ligação de *Pseudoporeatia* sp. com o ambiente

subterrâneo ferrífero, o que reforça o status de troglóbia a partir da descrição formal da espécie e possíveis espécies crípticas.

Ao observar a rede de haplótipos formada é possível entender a provável existência de espécies distintas do ponto de vista molecular, mas que ainda não apresentaram diferenciação morfológica. A partir destes dados será possível reavaliar os morfótipos das diferentes serras e avaliar se a diferença molecular observada entre os haplótipos de cada serra da Formação Ferrífera de Carajás representa de fato espécies diferentes. A utilização de outras espécies modelos para estudos de estruturação genética populacional de troglóbios se faz necessária para que os resultados encontrados aqui possam ser utilizados com maior segurança promovendo o entendimento do padrão de distribuição destas espécies.

A proteção de espécies ainda não descritas é feita de forma deficitária a partir do momento que espécies crípticas são erroneamente definidas com uma única unidade taxonômica, possibilitando a perda de novas espécies em processos evolutivos próximos.

A partir dos resultados obtidos é possível entender que as duas metodologias utilizadas responderam à estruturação da comunidade e à estruturação genética da espécie modelo da mesma maneira. Ou seja, tanto os dados ecológicos, quanto os dados moleculares demonstraram uma fraca estruturação dentro de uma mesma serra (área contínua). Contudo ainda faz-se necessário verificar esta estruturação sob o aspecto ecológico entre serras/platôs.

Desta maneira, os dados aqui apresentados corroboram com a hipótese de que espécies troglóbias transitem pelo ambiente subterrâneo via MSS dentro de uma mesma serra ou platôs contínuos na Formação Ferrífera de Carajás.

Futuros planejamentos para conservação da fauna subterrânea devem evitar focar apenas em cavernas, mas também observar as áreas de MSS circundantes, acessando a fauna de forma indireta em furos de sondagem mineral. Proteger uma área com alta riqueza de troglóbios endêmicos no MSS pode ser mais eficaz do que proteger uma caverna rasa quando se trata de preservar a diversidade troglóbia.

Observa-se mais uma evidência de que espécies troglóbias são restritas ao ambiente subterrâneo, mas não se restringem às cavernas, e acende o alerta para futuras mudanças normativas que observem a real área de ocorrência destas espécies, desvinculando sua ocorrência ao desenvolvimento linear da caverna.

ANEXO 1 - **Autorização SISBIO**

Ministério do Meio Ambiente - MMA
Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio
Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade - SISBIO

Extrato da solicitação Nº 62000 em PDF - Gerado em: 16/02/2018 as 16:02:06 horas

Dados básicos da Solicitação

Nº da solicitação: 62000	Situação atual: Submetida para análise	Data da situação atual: 16/02/2018
Tipo da solicitação: Autorização para atividades com finalidade científica		
Título do Projeto: TROGLOFAUNA DO SISTEMA FERRÍFERO DE CARAJÁS: A dinâmica populacional como indicador de conectividade de habitat		

Dados do pesquisador

Nome: Daniel Reis Maiolino de Mendonça	Nacionalidade: Brasileira	CPF: 04530724450	E-mail: daniel.mendonca@icmbio.gov.br	Identidade: 0725493340 MEX PE
Endereço: Qd 01, Conj. 05, Lote 05 Casa A				
Bairro: SMPW	CEP: 71735-105	Município: BRASILIA	UF: DF	Fone: (0xx61) 3341-9315 / Fax:
Profissão: Biólogo	Nível escolar: Teroeiro grau			

Dados do vínculo institucional

Instituição: INSTITUTO C. MENDES DE CONS. DA BIODIVERSIDADE-ICMBIO (SEDE)	CNPJ: 08.829.974/0002-75	Fone: (0xx61) 2028-9792
Tipo de vínculo: Servidor público	Email: daniel.mendonca@icmbio.gov.br	
Observação:		

Membros da equipe

Nome do pesquisador	CPF	Nacionalidade	Função
André Afonso Ribeiro	29691444844	Brasileira	Coleta de material biológio
GUILHERME CORRÊA OLIVEIRA	68655118672	Brasileira	Coleta de material biológico
Jocy Brandao Cruz	24852929300	Brasileira	Coleta de material biológico
RODRIGO LOPES FERREIRA	02507575670	Brasileira	Coleta de material biológico
Fernando Pacheco Rodrigues	17167322806	Brasileira	Coleta de material biológico
DIEGO DE MEDEIROS BENTO	03630154425	Brasileira	Coleta de material biológico

Atividades da solicitação

Descrição das atividades/substrato	Tipo do item

ANEXO 2 – Resumo 35º CBE

ANAIS do 35º Congresso Brasileiro de Espeleologia
Bonito/MS, 19-22 de junho de 2019 – Sociedade Brasileira de Espeleologia

NOVA ABORDAGEM NA CARACTERIZAÇÃO ECOLÓGICA DA FAUNA SUBTERRÂNEA ASSOCIADA AOS CANALÍCULOS EM FORMAÇÃO FERRÍFERA NO SUDESTE DO ESTADO DO PARÁ, BRASIL

NEW APPROACH IN THE ECOLOGICAL CHARACTERIZATION OF SUBTERRANEAN FAUNA ASSOCIATED TO THE MESO-CAVITIES IN IRON FORMATION IN THE SOUTHEAST OF PARÁ STATE, BRAZIL

Daniel Reis Maiolino de Mendonça[1,2], Tiago Castro Silva[1], Fernando Pacheco Rodrigues[3] e Rodrigo Lopes Ferreira[4]

[1]Centro Nacional de Pesquisas e Conservação de Cavernas/Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. E-mail: *daniel.mendonca@icmbio.gov.br, tiago-castro.silva@icmbio.gov.br;*

[2]Departamento de Genética e Morfologia da Universidade de Brasília E-mail: *fprodrigues@unb.br;*

[3]Departamento de Ecologia da Universidade Federal da Lavras. E-mail: *drops@dbi.ufla.br*

Resumo

Uma das diferenças marcantes entre as diversas litologias existentes, como o calcário (sistema subterrâneo clássico) e as formações ferríferas (considerada uma formação não-cárstica) é a potencial conectividade existente entre as macrocavernas (cavernas penetráveis pelo ser humano) por meio da permeabilidade da rocha. Motivado pela constante necessidade de aprimoramentos e desenvolvimento de novas abordagens no entendimento da conectividade subterrânea, este trabalho objetivou uma nova abordagem metodológica no levantamento massivo da fauna subterrânea, bem como comparar a eficiência de coleta utilizando-se diferentes tratamentos (iscas químicas), com o intuito de descrever ecologicamente a fauna subterrânea habitante dos canalículos em formação ferrífera no sudeste do Pará. 120 armadilhas foram utilizadas, das quais 60 continham a isca padrão e 60 continham isca enriquecida. Em cada furo de sondagem preexisntes na área, cinco armadilhas espaçadas 5 metro entre si foram iscadas com serapilheira coletada anteriormente no proprio local, denominada de Isca padrão (esterilizada em estufa a 90ºC por 1 hora) e outras contendo folhiço e fígado, denominada Isca Enriquecida. Em cada furo foi utilizado apenas um tipo de isca. Foram inseridas a até 25 metros de profundidade durante 2 meses (estação seca). Os morfótipos encontrados pertencem às seguintes Classes: Aracnida, Entognatha, Insecta,

Crustacea, Miryapoda, Nematoda e Turbellaria. Aracnida foi marcada pela alta abundancia de ácaros (13 táxons), seguida de Aranae (4 táxons) e Opilionida (2 táxons). A Classe Entognatha foi representada exclusivamente por Collembola (8 táxons). A classe Insecta for representada por 7 Ordens: Blatodea (3 táxons); Coleoptera (10 táxons); Diptera (12 táxons); Hemiptera (1 táxon); Hymenoptera (2 táxons), Isoptera (1 táxon) e Ortoptera (1 táxon). Nematoda apresentou 2 táxons e em Miryapoda ocorreu apenas 1 táxon, assim como em Crustacea e Turbellaria. A partir da utilização de todo o conjunto de dados disponível observamos que a hipótese de que armadilhas com iscas padrão possuem maior riqueza de espécie do que armadilhas com iscas enriquecidas não foi corroborada, uma vez que a probabilidade do acaso explicar a variação observada não foi observada (t = 2.0477, df = 21, p- value = 0.0533). Por outro lado, ao serem removido dados considerados *outlyers* nas amostras com isca padrão, é possível observar que os resultados são significantes (t = 3.012, df = 19, p-value = 0.007168). Isto indica a necessidade de mais eventos de coleta, uma vez que os dados ficaram no limite entre serem ou não significativos, mesmo partindo da totalidade dos dados.
.

Palavras-Chave: Fauna subterrânea, Mesocavidades, Troglóbios, Província Mineralógica de Carajás

Abstract

One of the striking differences between the various existing lithologies, such as the limestone (classical subterranean system) and the iron formations (considered a non-karstic formation) is the potential connectivity between macrocaverns (human-penetrable caves) through the permeability of rock. Motivated by the constant need for improvements and development of new approaches to understanding the underground connectivity, this work aimed at a new methodological approach by the massive survey of the underground fauna, as well as to compare the sampling efficiency using different treatments (chemical baits) to produce a ecologically describing the subterranean fauna inhabiting the iron formations in Southeastern Pará. 120 traps were used, of which 60 contained the standard bait and 60 contained enriched bait. In each drill hole, five traps spaced 5 meters from each other were installed with litterleaf collected previously in the same place, called the standard Bait (sterilized in a 90ºC oven for 1 hour) and others containing litter and liver, called Enriched Bait. They were lowered up to 25 meters deep for 2 months. The morphotypes found belong to the following Classes: Arachnida, Entognatha, Insecta, Crustacea, Miryapoda, Nematoda and Turbellaria. Arachnida was marked by the high abundance of mites (13 taxa), followed by Aranae (4 taxa) and Opilionida (2 taxa). The Entognatha class was represented exclusively by Collembola (8 taxa). The Insecta class is represented by 7 Orders: Blatodea (3 taxa); Coleoptera (10 taxa); Diptera (12 taxa); Hemiptera (1 taxon); Hymenoptera (2 taxa), Isoptera (1 taxon) and Ortoptera (1 taxon). Nematoda presented 2 taxa and in Miryapoda there was only 1 taxon, as well as in Crustacea and Turbellaria. From the use of the available data, we observed that the hypothesis that traps with standard baits have a species richness bigger than traps with enriched baits was not corroborated, once the chance of explaining the observed variation was low (t = 2.0477, df = 21, p-value = 0.0533). On the other hand, when data are considered outlyers in the standard bait samples, it is possible to observe that the results are significant (t = 3,012, df = 19, p- value = 0.007168). This indicates the need for more repetitions of sampling events, by observation the data wereso clos to the limit between significant or not, even testing the totality of the data.

Keywords*: Troglofauna; Mesocavities; Troglobionts*

INTRODUÇÃO

Uma das diferenças marcantes entre as diversas litologias existentes, como o calcário (sistema subterrâneo clássico) e as formações ferríferas (considerado uma formação não-cárstica) é a potencial conectividade existente entre as macrocavernas (cavernas penetráveis pelo ser humano) por meio da permeabilidade da rocha bem como descontinuidades ou contato entre difrentes rochas, especialmente nas carapaças de canga. Estes fatores sugerem a possibilidade do transito da fauna no meio subterrâneo (FERREIRA 2005; SOUZA- SILVA et al, 2011; FERREIRA, 2015; PILÓ 2015; PILÓ, 2018).

Estes autores apontam que o sistema ferruginoso de forma geral apresenta conexões subterrâneas por meio de descontinuidades estruturais, que possibilitariam o fluxo da fauna subterrânea através da rocha, permitindo que diversas espécies, especialmente as troglóbias,

possam apresentar distribuições mais amplas (FERREIRA, 2015).

As conexões observadas compreendem um sistema de poros, fissuras, fendas e cavidades, que além de funcionarem em conjunto como "esponjas" de captação e recarga hídrica (CARMO, 2010), atuam como micro e meso cavernas (cavidades e canalículos de tamanhos reduzidos, permeáveis à fauna) proporcionando abrigo e vias de locomoção (FERREIRA 2005; BICHUETTE, *et. al*. 2015).

A evolução dos canalículos, ou mesocaidades, pode gerar apêndices ou expansões laterais que podem eventualmente evoluir para galerias laterais. Os canalículos são formas características das cavernas ferríferas, indicando uma intensa rede de pequenos canais na rocha, responsáveis muitas vezes pelo transporte da água pluvial, sedimentos e particulas orgânicas.

Associando-se a permeabilidade à fauna no interior do sistema às populações de organismos de tamanho reduzido, vida curta e com variações populacionais expressivas em um curto espaço de tempo torna-se possível inferir a influência destes canalículos na capacidade de ocupação de novas áreas de acordo com a sazonalidade. Assim, as cavernas em formação de ferro são singulares, uma vez que apresentam elevada riqueza e diversidade de espécies e complexidade biológica.

Pipan e Culver (2014 e 2012) definem habitat subterraneo raso, como solos em até 10 metros de profundidade, caracterizados por espaços maiores do que os organismo que habitam em especial organismos adaptados à escuridão. Desta maneira, o presente estudo extrapola os conceitos de SSH (*shalow subterranean habitat*) e de MSS (*Milieu souterrain superficiel*), que segundo o autor, correnpondem à camadas mais superficiais do solo, restrito a alguns metros de profundidade.

Na Austrália, a formação ferrífera não apresenta cavernas e a fauna subterrânea Ocidental é reconhecida globalmente por causa de sua alta riqueza de espécies e altos níveis de endemismo. Nesta região o levantamento de espécies em estudos de impactos ambientais é realizado apenas nos canalículos por meio dos furos de sondagem (EPA, 2016b).

O trânsito de troglóbios entre diferentes litologias através do MSS – Meio Subterrâneo Superficial foi registrado por JUBERTHIE et al. (1980). De fato, a ocorrência de opilião troglomórfico da família Cryptogeobiidae (aff. Spinopilar) em diferentes cavernas em rocha ferrífera e em caverna no quartzito adjacente no Quadrilátero Ferrífero (COELHO et al., 2010) sugere uma unidade do meio subterrâneo entre as litologias, se tal espécie for realmente troglóbias (TRAJANO *et al.* 2017).

Mais recentemente, Soares e Auler (2017) e Soares et al (2016) apresentaram os resultados da fauna subterrânea em canga em MSS. O MSS trap provou ser o método mais eficiente para coletar estes organismos. Embora a proporção de troglomorfos registrados seja baixa, sua presença nesses espaços tem sido regularmente verificada. Todos esses táxons já foram descritos como presentes nas macrocavernas das áreas estudadas. Estes resultados apresentados confirmam a existência de espécies troglomorfas na canga, e o potencial deste ambiente para sustentar as populações subterrâneas.

Estes dados técnicos apontam para a necessidade de se conhecer o sistema ferrífero de formamais ampla no intuito de se conhecer a fauna subterranea dispersa pelo sistema ferrífero nas mesocavidades contudo existe uma dificuldade metodológica, acessar os canalículos. A realização de sondagem para mapeamento em empreendimento monerários dá a oportunidade de acesso a este sistema sem ficar limitado às macrocavidades, contudo existe a dificulade de se compatibilizar estas

pesquias em áreas com interesse minerário. Desta maneira, o número de trabalhos que abordam essa metedologia ainda é limitado e explora apenas as camadas mais superficiais.

Motivado pela constante necessidade de aprimoramentos e desenvolvimento de novas abordagens no entendimento da conectividade subterrânea, este trabalho objetivou uma nova abordagem metodológica no levantamento massivo da fauna subterrânea, bem como comparar a eficiência de coleta utilizando-se diferentes tratamentos (iscas químicas), com o intuito de descrever ecologicamente a fauna subterrânea habitante dos canalículos em formação ferrífera no sudeste do Pará.

METODOLOGIA

1.1. Área de estudo:

As atividades de coleta das amostras biológicas ocorreram na área denominada Platô N3 (figura 1), localizado na serra norte no interior da Floresta Nacional de Carajás. A unidade espeleológica de Carajás enquadra-se na subclassificação Aw. Na estação chuvosa, os volumes mais expressivos concentram-se no período de janeiro a março e a precipitação média mensal desse intervalo é da ordem de 300 mm. O período seco inclui os meses de junho, julho e agosto, cuja média mensal de precipitação é da ordem de 30 mm (VALE, 2008).

O desenvolvimento da paisagem regional destaca-se inicialmente pelo compartimento de topo das serras acima de 700m, sustentado pela formação ferrífera e pelas coberturas de canga, caracterizado pela vegetação com fisionomia típica do bioma Cerrado (Piló *et al* 2015). Além da superfície de topo merecem destaque as bordas dos platôs, onde a paisagem está sendo erodida pelo intemperismo, revelando cavidades anteriormente oclusas.

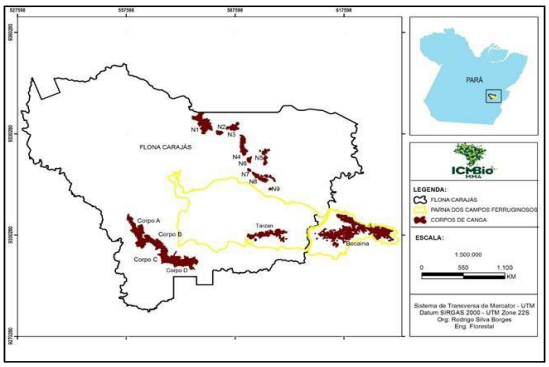


FIGURA 1: Denominação dos corpos de canga (platôs), utilizada na gestão da Floresta Nacional de Carajás. A linha amarela delimita o Parque Nacional Campos Ferruginosos (Arquivo ICMBio).

2.2. Coleta das amostras biológicas:

O Desenho experimental foi baseado na metodologia de Halse and Pearson, (2014) adaptado de EPA (2016a). Cada amostra de troglofauna foi coletada usando a mesma técnica, contudo contendo iscas de diferentes teores de proteína. Ambas as técnicas forneceram subamostras independentes.

A metodologia Halse e Pearson (2014), prevê uma única armadilha profunda colocada a alguns metros acima do fundo do furo de sondagem. A cada quatro furos, são montadas duas armadilhas (cerca de um terço da distância entre a superfície e o fundo do furo e alguns metros acima do fundo), ou seja, uma ou duas armadilhas com a mesma isca em todos os furos de sondagem analisados.

De forma similar a metodologia destes autores, este trabalho utiliza uma metodologia baseada na proposta utilizada por estes autores, no intuito de comparar as metodologias de levantamento de fauna subterrânea em mesocavidades. Assim, foram levantados dados nos furos de sondagem escavados previamente, utilizando-se armadilhas constituidas de tubos de PVC (300 x 70 mm, com furos de acesso pelas laterais)

usados para colonização. Contudo, visando um amplo mapeamento da fauna subterrânea, a metodologia foi adaptada (Figura 2).

Figura 2: Desenho esquemático da armadilha de coleta de fauna subterrânea nos canalículos (mesocavidades) e resumo da metodologia de coleta. Fonte: Adaptado Halse & Pearson (2014).

Em cada furo de sondagem, cinco armadilhas espaçadas 5 metro entre si foram iscadas com serapilheira úmida coletada anteriormente no proprio local, denominada de Isca padrão (esterilizada em estufa a 90ºC por 1 hora) e outras contendo folhiço e fígado, denominada Isca Enriquecida. Foram abaixadas em cabos, a até 25 metros de profundidade (equivalente a um prédio de 8 andares) ou até a zona saturada em locais com ocorrencia de litologias associadas ao ferro na área de estudo.

As armadilhas foram expostas por aproximadamente 8 semanas, entre junho e agosto/2018, período caracterizado pela estação seca.

120 armadilhas foram utilizadas, das quais 60 continham a isca padrão e 60 continham isca enriquecida. Os furos contendo as armadilhas foram preenchidos com apenas um tipo de isca associado espacialmente com o outro furo contendo outro tipo de isca, possibilitando a verificação do efeito da isca localmente de forma par-a-par. Desta maneira, para cada furo contendo armadilhas com de alta energia (iscas enriquecidas), o furo mais próximo foi preenchido com armadilhas com iscas de baixa energia (isca padrão). Isto permitirá a relação da riqueza encontrada em um deterinado ponto tanto pela resultado obtido pelas armadilha com isca enriquecida, quanto pelo conjunto de armadilhas contendo apenas isca padrão e assim verificar a influencia da isca nos 11 pontos de estudo (figura 3).

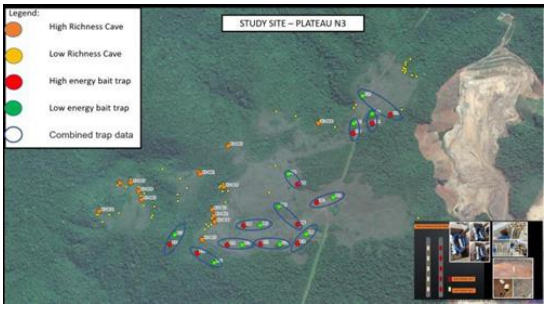


Figura 3: Localização dos pontos de coleta de acordo com o tratamento utilizado no Platô N3. Pontos em amarelo representam as cavernas. Em laranja as cavernas com alta riqueza. Em vermelho, furos de sondagem contendo armadilhas com isca enriquecida (IE); em verde furos de sondagem contendo armadilhas com isca padrão (IP); os círculos azuis representam a associação local dos dois tipos de iscas usados.

Os furos foram fechados para minimizar a entrada de invertebrados superficiais. As armadilhas foram recuperadas oito semanas depois e colocadas individualmente em sacos lacrados e imediatamente triadas no Laboratório de Entomologia da Universidae Frederal Rural da Amazônia, em Paraupebas/PA.

RESULTADOS

1.1. Análise dos dados dos canalículos:

A maioria dos furos de sondagem tinha 150 mm de diâmetro e perfurados semanas antes da amostragem. Apesar da profundidade dos furos sem superior a 100 metros, não foi possível colocar as 5 armadilhas em alguns deles, pois o nível freático estava a menos de 25 metros a partir da superfície ou havia alguma obstrução por desmoronamento das paredes do furo.

As 120 armadilhas foram dispostas inicialmente em 24 furos de sondagem, tendo em vista que alguns dos furos não comportaram as 5 armadilhas. Destas, 14 não puderam ter seus dados coletados uma vez que ficaram presas devido a alguma instabilidade no solo provocando o bloqueamento do furo, restando 96 amostras para análise (figura 4).

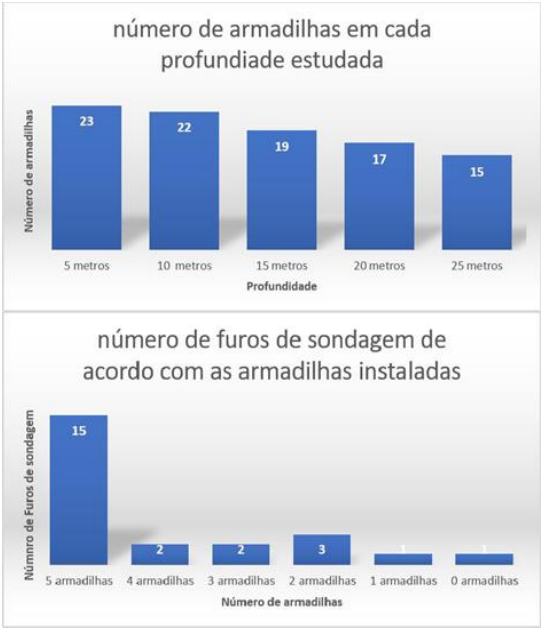


Figura 4: Acima: numero total de armadilhas em cada profundidade analisada. Em baixo: número de furos de acordo com a quantidade de armadilhas instalada em cada um.

Os dados foram coletados em agosto de 2018, representando a estação seca. A amostragem da fauna subterrânea de acordo com a metodologia utilizada no Platô N3 na Serra Norte em Carajás resultou inicialmente na coleta de 63 táxons.

Os morfótipos encontrados pertencem às seguintes Classes: Aracnida, Entognatha, Insecta, Crustacea, Miryapoda, Nematoda e Turbellaria. Aracnida foi marcada pela alta abundancia de ácaros (13 táxons), seguida de Aranae (4 táxons) e Opilionida (2 táxons). A Classe Entognatha foi representada exclusivamente por Collembola (8 táxons). A classe Insecta for representada por 7 Ordens: Blatodea (3 táxons); Coleoptera (10 táxons); Diptera (12Mtáxons); Hemiptera (1 táxon); Hymenoptera (2 táxons), Isoptera (1 táxon) e Ortoptera (1 táxon). Nematoda apresentou 2 táxons e em Miryapoda ocorreu apenas 1 táxon, assim como em Crustacea e Turbellaria.

Acari sp2 e sp3 foram as espécies mais abundantes em número de encontros, independentemente do tipo de isca utilizado (figura5). Das espécies reconhecidas como troglóbias foram coletados dois táxons. O Entognatha Collembola Sp1, encontrado em 10 armadilhas e o Miryapoda Pyrgodesmidae sp1, encontrado em apenas 1.

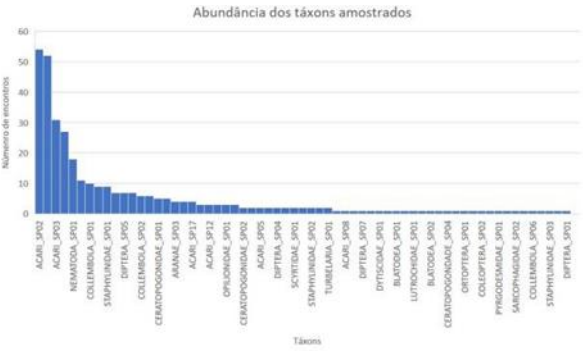


Figura 5: Abundância baseada no número de encontros dos táxons amostrados por armadilhas no platô N3 em Carajás/PA.

A distribuição espacial da riqueza observada nos furos de sondagem de acordo com o tipo de isca utilizada é demonstrada na figura 6.

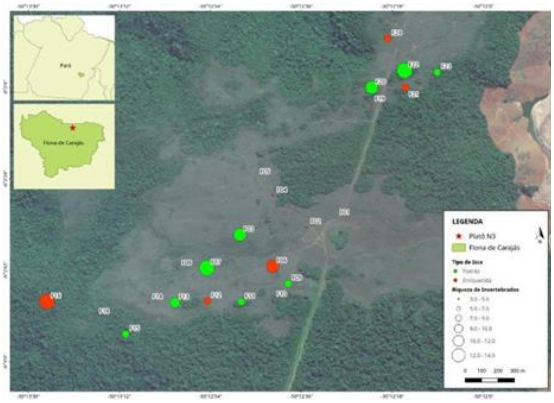


Figura 6: Mapa da riqueza observada nos furos de sondagem. Em verde, armadilhas com isca padrão. Em vermelho, armadilhas com iscas enriquecidas. O tamanho dos pontos reflete o número de espécies encontradas.

A diferença na composição das espécies encontra da nos dois tratamentos não foi significativa (figura 7), contudo algumas espécies foram encontradas exclusivamente em um dos tratamentos.

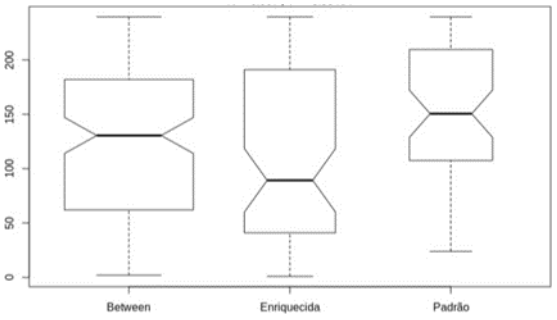


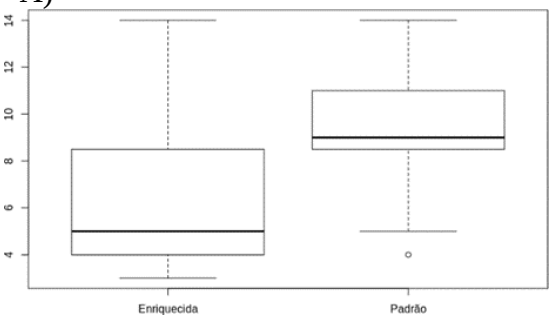
Figura 7: Boxplot entre a composição de espécies ente os dois tratamentos. R=0,007; P= 0,3664.

1.2. Análise de eficiência de coleta

Os resultados confirmam a existência de espécies troglomórficas na canga e o potencial deste ambiente para sustentar populações subterrâneas. Dos 63 táxons levantados, 34 forma coletados por isca enriquecida e 50 coletados por iscas padrão. Contudo, ao se testar a diferença na riqueza observada em cada tipo de tratamento (isca padrão e isca enriquecida), nota-se que não há diferença significativa na eficiência de coleta com base na riqueza amostrada em cada caso.

Foram executados testes de normalidade (Shapiro-Wilk normality test) e de homocedasticidade dos dados (Levene's Test for Homogeneity of Variance), corroborando sua normalidade para realização do teste t. As analises estatísticas foram realizadas utilizando-se pacotes do *software R* (Figura 8).

A)



B)

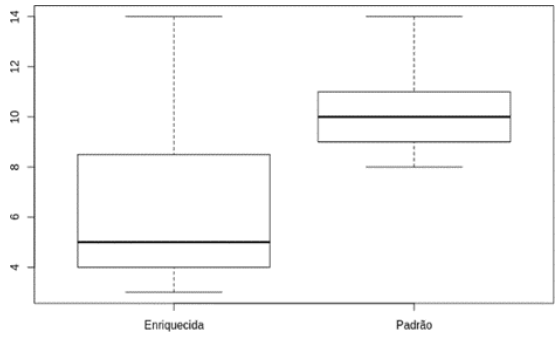


Figura 8: Boxplot da riqueza encontrada nos dois tratamentos (Isca Padrão) e (Isca Enriquecida). A) Eficiencia de coleta em cada tratamento com base na riqueza e amostras total t = 2.0477, df = 21, p-value = 0.0533. B)
Eficiencia de coleta em cada tratamento com base na riqueza e amostras removendo dados *outlyers*.

A partir da utilização de todo o conjunto de dados disponível observamos que a hipótese de que armadilhas com iscas padrão obteve maior riqueza de espécie do que armadilhas com iscas enriquecidas não foi corroborada, uma vez que a probabilidade do acaso explicar a

variação não foi estatisticamente significativa (t = 2.0477, df = 21, p-value = 0.0533). Por outro lado, ao serem removido dados considerados *outlyers* nas amostras com isca padrão, é possível observar que os resultados são significantes (t = 3.012, df = 19, p-value = 0.007168). Isto indica a necessidade de mais repetições de coleta, uma vez que os dados ficaram no limite entre ser ou não significativos, mesmo partindo da totalidade dos dados. Ao se desconsiderarem os dados *outlyers*, em média, a isca padrão capturou no mínimo 3 espécies a mais do que armadilhas com isca enriquecida.

Outro dado que corrobora o melhor desempenho das armadilhas com isca padrão foi o resultado da análise da curva de rarefação, gráfico que registra o número cumulativo de espécies de organismos detectados nas mesocavidades relacionado o tipo de tratamento com uma função do esforço cumulativo gasto na busca (Figura 9).

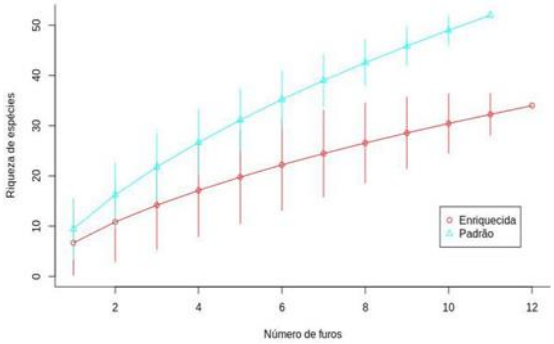


Figura 9: Curva de rarefação de espécies de acordo com o tipo de isca utilizada.

Uma das hipóteses elencadas para a explicar a menor eficiência de coleta observada em alguma das armadilhas com isca enriquecida, foi o desenvolvimento de um fungo potencialmente patógeno que envolveu a armadilha e deve ter causado esse efeito. Esta hipótese ainda está em testes a partir do cultivo do material fúngico para posterior determinação da espécie e seus parâmetros biológicos, inclusive toxicidade (figura 10).

Figura 10: armadilhas com desenvolvimento de colônia de material fúngico. Existe a possibilidade de que este material apresentaria toxicidade e determinado a baixa riqueza encontrada.

CONCLUSÕES

O estudo demonstrou que os furos de sondagem representam um subconjunto das espécies encontradas nas cavernas, que por sua vez representa outro subconjunto das espécies edáficas, contudo de grande interesse em analises de conectividade subterrânea no sistema ferrífero, bem como suas implicações na definição de Área de Influência de cavidades.

A riqueza de espécies encontrada pode ser aumentada após análises de identificação mais aprofunda do material coletado por especialistas.

Diversas questões ainda ficam em aberto na utilização desta metodologia, uma vez que foi testada em um país com características climáticas diferentes, que afetam diretamente a eficiência das armadilhas. Tempo de exposição, tipo de isca, profundidade da armadilha e dos furos, altura do nível freático, entre outras.

A possibilidade de as comunidades biológicas subterrâneas estarem fortemente em conexão tanto na formação ferrífera quanto em áreas cársticas representa questões atuais no entendimento científico para o embasamento de princípios legais no uso e ocupação do solo destes ambientes. Estes dados reforçam a necessidade de aprofundamento dos estudos para melhor compreensão das dinâmicas ecológicas envolvidas tanto nas macrocavernas, quanto nos canalículos.

A demanda dos empreendimentos minerários que afetam cavidades naturais, promove uma carência de dados como os aqui apresentados, uma vez que estes levantamentos quando realizado por iniciativa própria do empreendedor, compõem relatórios técnicos não publicados. Por se tratarem de áreas com relevantes interesse econômico nacional, poucos pesquisadores têm acesso à realização de pesquisas em furos de sondagem

AGRADECIMENTOS

À equipe do Centro de Estudo de Biologia Subterrânea do Departamento de Ecologia da Universidade Federal de Lavras, em especial pelos apoios em campo e identificação do material coletado;

À equipe do Laboratório de Genética e Morfologia do Instituto de Ciências Biológica da Universidade de Brasília;

Aos professores Wilton Cruz e Rosana Luz pela disponibilização do Laboratório de Entomologia da Universidade Federal Rural da Amazônia;

À equipe Vale S.A. envolvida na logística e apoio em campo.

REFERÊNCIAS

BICHUETTE, M. E.; FONSECA-FERREIRA, R.; GALLÃO, J. E. Biota subterrânea associada às cavernas em formação ferrífera. 174-191 p. In: Ruchkys U. A. Travassos, L. E. P. Rasteriro, M. A. Faria, L. E. (Eds.) Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas: propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Campinas/SP, Sociedade Brasileira de Espeleologia,. 354 p. 2015

COELHO, A; PILÓ, L.B.; AULER, A.; BESSI, R. Espeleologia da área do Projeto Apolo, Quadrilátero Ferrífero, MG. Belo Horizonte: **Carste Consultores Associados**,. 179p. 2010 Relatório Técnico.

EPA (Environmental Protection Authority, Western Australia). Subterranean fauna survey. Environmental Assessment Guideline No. 12. June 2013. **Technichal Guidance**., 20p. 2016a Disponível em: http://www.epa.wa.gov.au

EPA (Environmental Protection Authority, Western Australia). Sampling methods and survey considerations for subterranean fauna in western Australia**. Guidance Statement n. 54a**. 2016b, 32p. Disponível em: http://www.epa.wa.gov.au/

FERREIRA, R. L., A vida subterrânea nos campos ferruginosos**. O Carste** (Belo Horizonte), v. 3, p. 106-115. 2005.

FERREIRA, R.L.; OLIVEIRA M. P. A. & SOUZA-SILVA, M. Biodiversidade subterrânea em geossistemas ferruginosos. IN: **Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais** / organizado por Flávio Fonseca do Carmo e Luciana Hiromi Yoshino Kamino. Belo Horizonte : 3i Editora, 2015.

HALSE, S. A. e PEARSON, G. B. Troglofauna in the vadose zone: comparison of scraping and trapping results and sampling adequacy. – **Subterr. Biol**. 13: 17–34 2014.

JUBERTHIE, C.; DELAY, B.; BOUILLON, M. Extension du milieu souterrainen zone non-calcaire: description d'un nouveau milieu et de son peuplement par les coleopterestroglobies. **Mémoires de Biospéologie**, v. 7, p. 19-52. 1980

PIPAN, T., and DAVID C. C. Biology of Caves and Other Subterranean Habitats (The biology of habitats series). **Oxford University** Press, 2009.

PIPAN, T., and DAVID C. C. **Shallow Subterranean Habitats: Ecology, Evolution, and Conservation**. Oxford and New York: Oxford University Press. 2014

PILÓ, L. B.; COELHO, A. E REINO, J. C. R.,. Espeleologia em rochas ferríferas: Cenário atual e conservação. 126-149 pp. In: Ruchkys U. A. Travassos, L. E. P. Rasteriro, M. A. Faria, L. E. (Eds.). **Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas: propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero,** Minas Gerais. Campinas/SP, Sociedade Brasileira de Espeleologia, 351 p. 2015.

PILÓ L. B. RIBEIRO,A. F. REINO, J. C.R., CRUZ,J. B., MAIOLINO, D.R.

Espeleologia na Flona Carajás - cenários para conservação e mineração. In: **Projeto cenários: conservação de campos ferruginosos diante da mineração em Carajás** / Frederico Drumond Martins, Luciana Hiromi Yoshino Kamino e Katia Torres Ribeiro (organizadores). – 1. ed. – Tubarão (SC): Copiart, 2018. 207-258pp.

SOARES. G. A.; AULER, A. S. Iron-rich rocks: A little recognized habitat for troglofauna colonization. In: 17th International Congress of Speleology, 2017, Penrith. **Proceedings 17th International Congress of Speleology**. Sydney: Australian Speleological Federation, 2017. v. 1. p. 399-399.

SOARES, G.; ANDRADE, R.; PERRONI, G. Troglomorphic fauna sampling methods in canga formations, Minas Gerais State, Brazil. **23rd International Conference on Subterranean Biology**. 2016

SOUZA-SILVA, M, MARTINS R. P. & R. L. FERREIRA 2011. Cave lithology determining the structure of the invertebrate communities in the Brazilian Atlantic Rain Forest. **Biodiversity and Conservation** 8(20):1713-1729.

TRAJANO, E.; BESSI, R.. A classificação Schiner-Racovitza dos organismos subterrâneos: uma análise crítica, dificuldades para aplicação e implicações para conservação. **Espeleo-tema**, v. 28, n. 1, p. 87-102, 2017.

ANEXO 3 – Artigo RBEsp

Revista Brasileira de Espeleologia – RBEsp
ISSN 2179.4952- V.01 – N° .12 – 2023.
Recebido: 20 de dezembro de 2022. Aceito: 22 de dezembro de 2022. Publicado: 31 de julho de 2023.

EFICIÊNCIA DE ISCAS NA COLETA DE ARTRÓPODES ENCONTRADOS NO MEIO SUBTERRÂNEO SUPERFICIAL EM FORMAÇÃO FERRÍFERA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA.

EFFICIENCY OF BAIT TO COLLECT ARTHROPODS IN THE SUB-SUPERFICIAL HABITAT IN THE BRAZILIAN AMAZON FOREST IRON FORMATION

Daniel Reis Maiolino de Mendonça
Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio
E-mail: daniel.mendonca@icmbio.gov.br
Fernando Pacheco Rodrigues Universidade de Brasília - UnB
E-mail: fprodrigues@unb.br
Gilson Argolo Universidade Federal de Lavras
E-mail: gilsonjr_2006@hotmail.com
Marconi Sousa-Silva Universidade Federal de Lavras
E-mail: marconisilva@ufla.br
Rodrigo Lopes Ferreira Universidade Federal de Lavras
E-mail: drops@ufla.br

RESUMO: A legislação brasileira concernente à determinação de áreas de conservação do patrimônio espeleológico nacional utiliza-se, dentre outras informações, de levantamentos dos parâmetros biológicos encontrados em cavernas, uma vez que estes locais representam acesso direto ao ambiente subterrâneo. Tal prática é recorrente em procedimentos de licenciamento ambiental de empreendimentos minerários. Na província mineralógica de Carajás encontra-se uma das maiores jazidas de minério de ferro do mundo e esta formação ferrífera apresenta diversas cavernas distribuídas na paisagem. Com a finalidade de aprimorar técnicas de levantamentos indiretos onde o acesso direto é impossível, ou seja, em habitats como o meio subterrâneo superficial – MSS, este trabalho pretendeu avaliar o efeito do uso de iscas em armadilhas sobre a eficiência destas armadilhas na captura de artrópodes que ocupam estes ambientes em um dos platôs da formação ferrífera. Foram testadas a riqueza e a composição da fauna contida no MSS capturada por armadilhas inseridas em furos de sondagem contendo diferentes iscas: isca padrão, composta por folhiço local esterilizado; e isca enriquecida, composta do mesmo folhiço acrescido de proteína animal (fígado bovino moído). Muito embora invertebrados pertencentes a quatro filos tenham sido coletados (Annelida, Mollusca, Plathyhelminthes e Arthropoda), foram considerados apenas os artrópodes, por terem sido mais abundantes nas amostras. A amostragem total de artrópodes subterrâneos resultou na coleta de 66

táxons, distribuídos em cinco Classes e 13 Ordens. Ao se analisar o efeito das diferentes iscas sobre a riqueza de espécies observou-se que não houve diferença significativa quanto ao tipo de isca, contudo alguns grupos como Acari e Araneae foram mais abundantes em armadilhas com isca padrão. A composição de espécies, por outro lado, foi afetada pelos diferentes tipos de iscas.

Palavras-chave: fauna subterrânea, habitat subterrâneo superficial, metodologias de coleta indireta, província mineralógica de Carajás.

ABSTRACT: The Brazilian legislation concerning the determination of conservation areas of the national speleological heritage uses, among other information, surveys of the biological parameters found in caves, since these places represent direct access to the underground environment. This practice is recurrent in environmental licensing procedures for mining projects. In the mineralogical province of Carajás there is one of the largest deposits of iron ore in the world and this iron formation has several caves distributed in the landscape. In order to improve indirect survey techniques which direct access is impossible, in other words, in habitats such as the superficial underground environment - MSS, this work intended to evaluate the effect of using baits in traps on the efficiency of these traps in capturing arthropods that occupy these environments in one of the plateaus of the iron formation. The richness and composition of the fauna contained in the MSS captured by traps inserted in boreholes containing different baits were tested: standard bait, consisting of sterilized local leaf litter; and enriched bait, composed of the same litter plus animal protein (ground bovine liver). Although invertebrates belonging to four phyla were collected (Annelida, Mollusca, Plathyhelminthes and Arthropoda), only arthropods were considered, as they were more abundant in the samples. The total sampling of underground arthropods resulted in the collection of 66 taxa, distributed in 5 Classes and 13 Orders. When analyzing the effect of different baits on species richness, it was observed no significant difference regarding the type of bait, however some groups such as Acari and Araneae were more abundant in traps with standard bait. Species composition, on the other hand, was affected by different types of baits.

Keywords: subterranean fauna, surface subterranean habitat, indirect collection methodologies, mineralogical province of Carajás.

INTRODUÇÃO

Nos primeiros estudos abordando biologia subterrânea RACOVITZA (1907) já apontava que artrópodes hipógenos encontram seu habitat natural nas estreitas fissuras de rochas e não necessariamente em espaços acessíveis ao ser humano, como as cavernas. Desde então, diversos estudos sobre biologia subterrânea foram realizados, cada qual, porém, utilizando-se de metodologias distintas, o que levou, historicamente, a duas situações.

No primeiro caso, a realização de levantamentos faunísticos sem a utilização de uma padronização metodológica acaba por dificultar ou mesmo impedir a comparação entre diferentes estudos, já que a riqueza de espécies observada em um dado levantamento pode ser resultante das diferenças nos esforços amostrais aplicados em cada caso (GNASPINI-NETO,1989; CULVER et al., 2004; FERREIRA, 2005; FERREIRA et al., 1999; TRAJANO et al. 2012; HALSE e PEARSON, 2014). No segundo caso, pode existir alguma limitação nos métodos de levantamento, resultando em uma amostragem subestimada

Apesar dessas limitações técnicas, de um ponto de vista amplo, os levantamentos de fauna devem ser projetados para permitir que as áreas de estudo sejam representativas da gama de ambientes locais, bem como o desenho amostral deve ser replicável e com amostragem idenpendente (GOTELLI & AARON, 2011). Outro ponto importante é a determinação do tempo suficiente para aplicar o esforço de pesquisa comparável em cada local. Estes fatores são determinantes para que os métodos possam ser replicados por outros pesquisadores (BAMFORD et al, 2013).

Ao longo do desenvolvimento das pesquisas em bioespeleologia, diversos autores propuseram métodos para amostragem da fauna subterrânea brasileira, sejam em trabalhos técnicos ou científicos (OLIVEIRA, 2014). Em 1987, TRAJANO realizou coletas baseadas na captura manual, em 2003 Zepellini-Filho e colaborafores coletaram utilizando este mesmo método, mas passaram a considerar o tempo de coleta. Em 2004 Ferreira realizou amostragens utilizando o método de coleta manual com plotagem de espécies.

Esta metodologia é amplamente difundida e pode ser utilizada com ou sem a delimitação de tempo ou área amostrada por caverna (SOUZA e SILVA et al., 2011a, b; PELLEGRINI e FERREIRA, 2012). A coleta manual dos espécimes terrestres é normalmente realizada com auxílio de potes plásticos, pinças, pincéis, com as amostras de artrópodes preservadas em frascos contendo álcool 70%. Em 2006, Silva utilizou o método de captura manual, acescentando pitfalls. Em 2008 Cordeiro realizou amostragem por meio da coleta por aleatorização de quadrantes amostrais. Em 2013, MASCARENHAS e colaboradores utliziaram o médodo de captura manual por tempo e

pitfalls. No mesmo ano BERTELLI-SIMÕES aplicou o método de captura manual e quadrantes amostrais.

Tais variações metodológicas de amostragem da fauna subterrânea em cavernas são amplamente utilizadas em levantamentos, contudo, esta metodologia de coleta apresenta algumas dificuldades, sendo aplicável apenas no ambiente de cavernas. Assim, mesmo em áreas onde a geologia seja propícia à espeleogênese, caso não haja cavidades, este método não é aplicável.

Um dos fatores que contribuem para dificuldade de aplicação do método de levantamento em cavidades é a demanda de tempo de procura, necessitando de uma atividade de campo com maior duração, bem como uma equipe numerosa, elevando os gastos. Outro fator de aplicação do é a necessidade de experiência prévia da equipe, tanto em identificar os microhabitats (substratos) de ocorrência dos grupos faunísticos, bem como em sua identificação. Tais fatores influenciam na eficiência de captura de organismos pertencentes a diferentes taxas.

CULVER e PIPAN (2014) classificou os habitats subsuperficiais em 7 categorias: os ambientes hipotelminorréicos, o epicarste, o meio subterrâneo superficial (MSS), os aquíferos em calcário, o ambiente aquático intersticial (hiporréico), o solo e os tubos de lava.

Dentre todos estes tipos de habitats, o meio subterrâneo superficial (MSS) foi descrito por Juberthie e colaboradores (1980) ao observarem formações de talus não calcárias nos Pirineus. Tais ambientes correspondem a fragmentos de diversos tamanhos, recobertos com uma camada de folhiço que mantém a umidade e permite a entrada de organismos por diversos pontos de fratura do material encontrado entre a superfície e a rocha matriz. Este mesmo conceito passou a ser aplicado em outras formações, como o próprio ambiente cárstico e até rochas vulcânicas (Medina e Oromí, 1990) Além disso, o sistema de canalículos presente em formações ferríferas (especialmente na brecha ferruginosa superficial – a canga) também é funcionalmente semelhante ao meio subterrâneo superficial encontrado em formações carbonáticas.

A maioria das amostragens da fauna subterrânea em cavernas é realizada por meio da busca ativa de animais, que muitas vezes apresentam tamanho corporal relativamente grande. No entanto, armadilhas instaladas em furos de sondagem e outras técnicas empregadas para a amostragem de invertebrados terrestres também podem ser usadas para aumentar o esforço de coleta (SCHNEIDER& CULVER, 2004).

Os métodos passivos de coleta da fauna subterrânea implicam na utilização de dispositivos (pitfall e estratores winkler, etc.) que atraiam e capturem representantes desta fauna (BRITO, 2019). É um método que não depende de experiência do pesquisador, bem como não demanda grandes períodos em campo nem de uma equipe numerosa de coletores, havendo apenas a necessidade da instalação das armadilhas junto ao solo. Alem disso, uma das grandes vantagens da utilização destes métodos é a realização de amostragens em ambientes inacessíveis ao ser humano, já que estas armadilhas podem

ser instaladas em qualquer outro ambiente cárstico além das cavernas, como canalículos, fendas e demais descontinuidades da rocha (POLAK, 1997).

Um dos trabalhos pioneiros na utilização de métodos passivos em levantamentos de fauna subterrânea em cavernas foi o trabalho desenvolvido por Poulson e Culver (1968) em pesquisas relacionadas à diversidade da comunidade terrestre subterrânea em Mammoth Cave National Park, nos Estados Unidos. Os pesquisadores utilizaram tanto métodos de busca ativa por meio da coleta manual, quanto métodos passivos, por meio do uso de armadilhas de queda (pitfall). Desde então, alguns autores apontam que, de maneira genérica, os métodos mais indicados para a caracterização da fauna de invertebrados de cavernas ainda são coleta manual e o uso de armadilhas "pitfall" (GERS, 1998; RUIZ-POTERO et al., 2002; LEWIS et al., 2003), muito embora o uso de armadilhas de queda possam causar potenciais problemas nas comunidades subterrâneas pelo efeito de superamostragem de certos taxa.

Em alguns casos, como neste trabalho, as armadilhas contêm iscas de fígado para atração de organismos detritívoros (POULSON & CULVER, 1968; PECK & THAYER, 2003). As metodologias mais utilizadas no levantamento da fauna presente no MSS compreendem a perfuração de furos rasos, de até 1 metro, que atuam em profundidades mais superficiais, onde de fato estão a maioria dos invertebrados, contudo não se estendem até profundidades maiores, onde também ocorre parte da fauna subterrânea.

As cavidades naturais subterrâneas, comumente chamada de cavernas, foram instituídas como bens da União pela Constituição Federal de 1988 e, portanto, constituem patrimônio de todos os brasileiros. ELEZ e colaboradores (2013), e mais recentemente Oliveira (2020), apontam que a conservação eficaz do ambiente subterrâneo não se limita à proteção da cavidade em si, mas também do seu entorno.

Atualmente, o Decreto nº 6640/2008 está sendo revisto e, em seu lugar, vigora o Decreto nº 10.935, de 12 de janeiro de 2022, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Este novo instrumento flexibilizará a ocorrência de impactos negativos irreversíveis em cavidades classificadas hoje como de máxima relevância e sua área de influência por empreendimentos em licenciamento, com a justificativa de serem de utilidade pública, o que pelo Decreto de 2008 não era possível.

Além disso, a Resolução CONAMA nº 347 de 2004, ao se referir ao licenciamento ambiental em áreas com cavidades naturais, implementa o instrumento da "área de influência" de cavidade, correspondendo à projeção horizontal da caverna acrescida de um entorno de duzentos e cinquenta metros, em forma de poligonal convexa. Assim, atualmente se entende que não somente uma caverna compreende um hábitat, mas que ela é circundada por diversos outros habitats subterrâneos, muitos dos quais interconectados, e que influenciam diretamente em processos biológicos e geológicos cruciais para estas cavernas (CULVER & PIPAN, 2014).

Tendo em vista que em praticamente todas as áreas de ocorrência do sistema ferrífero no Brasil existe algum grau de exploração econômica, acredita-se na necessidade

de um melhor entendimento sobre os padrões de distribuição de espécies e de funcionamento do sistema subterrâneo em escala local e regional.

Com a finalidade de aprimorar as técnicas de levantamento indireto da fauna do MSS, bem como propor metodologias complementares aos levantamentos biológicos realizados em atividades de licenciamento em cavernas, este trabalho pretendeu avaliar o efeito do uso de iscas sobre a eficácia de amostragem através de armadilhas em furos de sondagem, da comunidade de artrópodes que ocupam este ambiente em um platô da formação ferrífera de Carajás.

METODOLOGIA

Área de Estudo

As coletas foram realizadas na Formação Ferrífera Carajás/PA, localizada dentro dos limites da Floresta Nacional (FLONA) de Carajás (FIGURA 1). A paisagem desta região destaca- se pelos topos aplainados das serras acima de 700 m, sustentado pela formação ferrífera e pelas coberturas de canga. A região apresenta uma fitofisionomia típica do bioma Cerrado. A partir da quebra do relevo nas encostas e intervales onde a paisagem está sendo erodida pelo intemperismo, revelando cavidades anteriormente oclusas, ocorre predominantemente a formação de Floresta Amazônica (PILÓ et al., 2015).

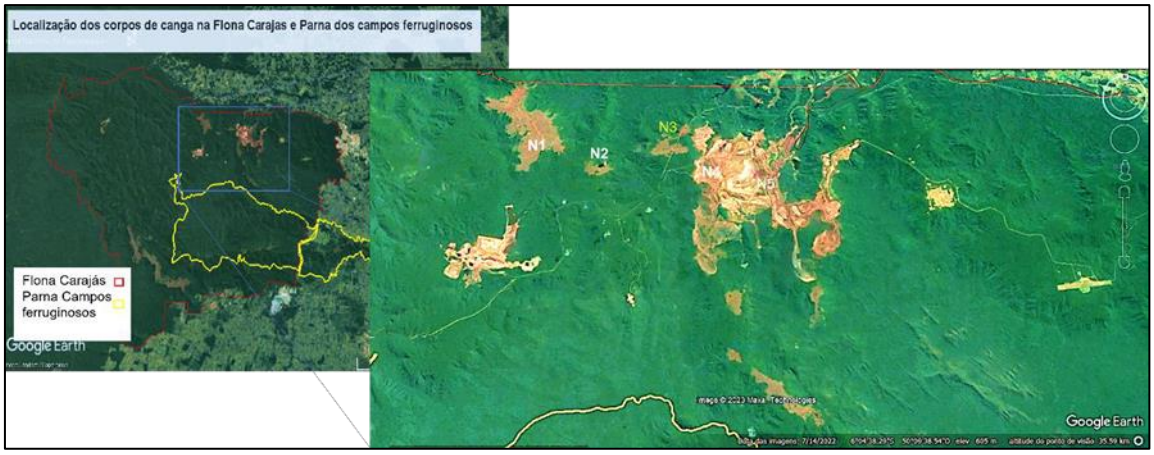


Figura 1: Localização da FLONA Carajás. Fonte: ICMBio, 2018.

O clima é de tipo montano ou serrano amazônico, com temperaturas médias anuais em torno de 21 a 22ºC. A amplitude térmica anual entre o mês mais quente e o mês mais frio não passa de 3 graus centígrados (GOLDER, 2007, 2009). A precipitação se concentra durante os meses de novembro a abril, com média de 229 mm (COSTA, 2014).

As cavernas da formação ferrífera de Carajás encontram-se, de um modo geral, inseridas na base de pequenas escarpas rochosas nas vertentes inclinadas. Esta morfologia faz a conexão entre o topo dos planaltos dissecados, localmente denominados de platôs, e as planícies aluviais. Os litotipos predominantes são a formação ferrífera bandada, mais

especificamente o jaspilito mineralizado, e a formação de canga (PILÓ & AULER, 2009; VALENTIM & OLIVITO, 2011, CAMPOS et al., 2012).

O platô denominado “N3”, situado na porção noroeste da Unidade Geológica Serra Norte, possui 80 cavidades conhecidas (CARSTE, 2014). Uma característica hidrológica de destaque refere-se à presença de uma vereda na porção SE do platô, cujas águas formam um brejo com até um metro de profundidade da lâmina d’água durante a estação chuvosa e converge para o talvegue1 local, situado na porção oeste da formação (PILÓ & AULER, 2009). Nos topos predomina a savana arbustiva de caráter xerófilo, enquanto nas vertentes inclinadas sobressaem fragmentos da Floresta Ombrófila Aberta (CAMPOS et al., 2012).

Caracterização ecológica da comunidade de artrópodes encontrada no MSS

A coleta dos invertebrados ocorreu com base na metodologia utilizada em HALSE e PEARSON, (2014), uma vez que mesmo tratando-se de ambientes com diferentes exposições a temperatura e umidade, correspondem à mesma litologia, guardando as mesmas estruturas que influenciam a distribuição das espécies (FIGURA 2). Estas armadilhas foram inseridas em furos de sondagem já existentes, dispostos na paisagem entre as cavidades para levantar dados da fauna do MSS. Em cada armadilha, composta de canos de PCV com perfurações em toda sua circunferência, foram acrescentadas iscas. Ambas as extremidades de cada armadilha foram fechadas com telas.

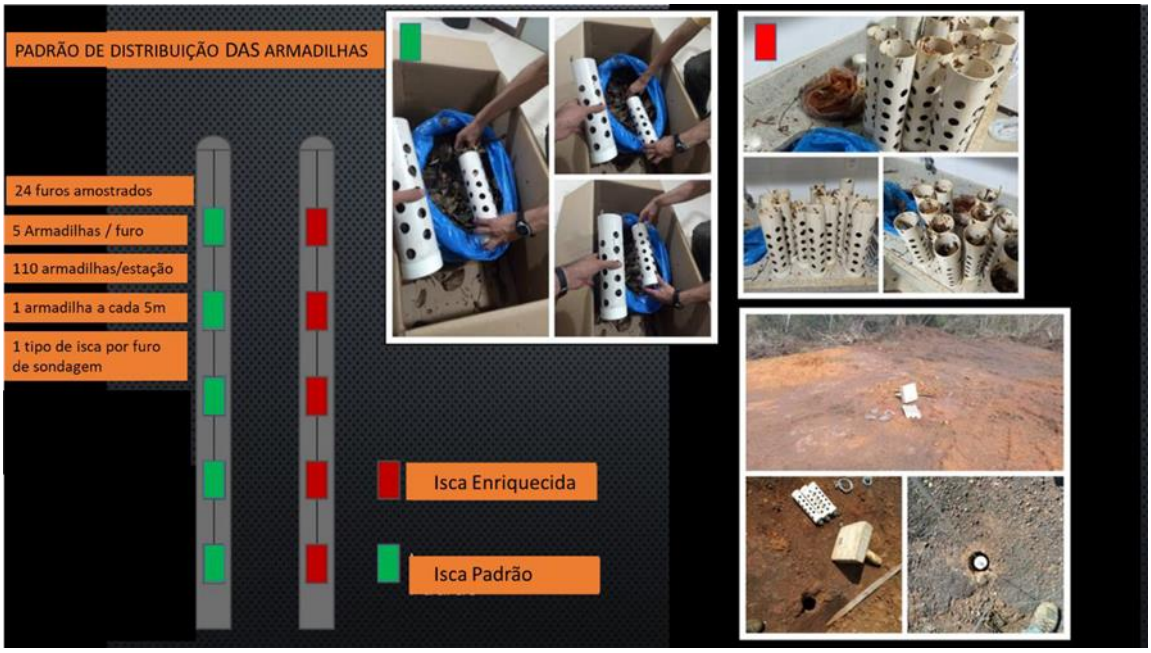


Figura 2: Desenho amostral da distribuição das armadilhas. A isca padrão é composta apenas por folhiço local esterilizado e o a isca enriquecida corresponde a este folhiço acrescido de fígado moído.

As coletas da fauna do MSS, foram realizadas por meio de furos de sondagem mineral já existentes ao longo do platô N3. Os furos utilizados na pesquisa foram perfurados aproximadamente 20 dias antes da colocação das armadilhas e permaneceram

fechados de maneira a diminuir a variação dos elementos abióticos (temperatura e umidade), bem como dificultar o acesso de espécies da superfície. Encontravam-se em bom estado de conservação (FIGURA 3).

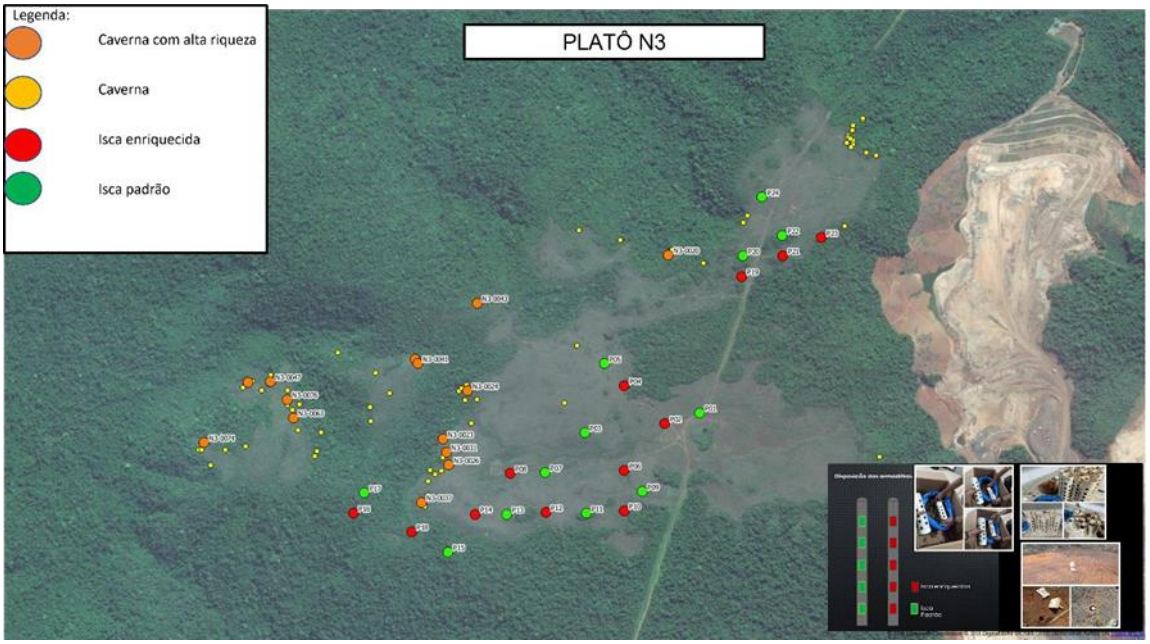


Figura 3: Localização dos pontos de coleta em N3 de acordo com o tratamento utilizado. Pontos em vermelho representam os furos que continham isca enriquecida. Os pontos em verse representam os furos com iscas padrão. Em amarelo as cavernas e em laranja as cavernas com alta riqueza de espécies.

Para observar a influência do tipo de isca utilizado sobre a riqueza e composição da fauna subterrânea, 120 armadilhas foram distribuídas em 24 furos, ao longo de duas estações, totalizando 240 amostragens. As armadilhas foram dispostas em grupos de 5 por furo, distantes verticalmente 5 metros entre si. No desenho amostral foram utilizados 2 tipos de iscas, distribuídos espacialmente em 12 pares de furos. Cada furo contém armadilhas com apenas um dos tipos de isca (FIGURA 4). As iscas utilizadas consistiram de a) gramíneas e folhiço do próprio local (isca padrão) que, após recolhido e picado, passou por um processo de esterilização em estufa para garantir que as amostras coletadas fossem realmente da fauna do MSS e b) gramíneas e folhiço esterilizados acrescido de fígado bovino moído (isca enriquecida).

Figura 4: Introdução das armadilhas em furos de sondagem.

As armadilhas permaneceram nos furos de sondagem por oito semanas, respeitando a literatura existente que sugere de seis a oito semanas para que as taxas de captura sejam maiores (HALSE e PEARSON, 2014). Durante as coletas, o mateial resultante foi conservado em etanol absoluto tanto para as para análises taxônomicas, com base na literatura específica e chaves de identificação, com posterior envio dos grupos para especialistas, quanto par as ecológicas posteriores no software R.

Caracterização Ecológica da Comunidade de Artrópodes Encontrada no MSS

Com a utilização destas armadilhas e a partir do desenho amostral proposto foi possível realizar as análises de caracterização da comunidade que habita o meio subsuperficial. Nesta etapa foi possível identificar as espécies ocupantes dos canalículos bem como realizar uma caracterização da comunidade, frente ao tipo de isca utilizado.

Para testar o efeito do tipo de isca na amostragem da comunidade de artrópodes do MSS foram utilizados os dados de presença/ausência e composição de espécies encontrados no habitat, levando em consideração os diferentes tratamentos (isca padrão e isca enriquecida). As análises levaram em conta a relação entre cada armadilha de um mesmo furo, bem como entre furos diferentes.

A fim de observar os efeitos do tipo de isca utilizado sobre a riqueza da fauna que habita o MSS, foi realizada uma análise de modelo linear generalizado misto (GLMM), em que o preditor contém efeitos aleatórios além dos efeitos fixos usuais.

Efeito fixo corresponde a variável preditora, já o efeito aleatório é representado pela variável que agrupa os dados. Para esta análise cada furo foi definido como um efeito aleatório e a riqueza uma variável quantitativa. A fim de evitar a influência da profundidade, as amostras de cada furo não foram consideradas independentes. Foi utilizada a função GLMM da família Poisson, adequada para esse tipo de dado, onde temos a riqueza em função do tipo de isca em cada furo a fim de verificar o quanto da variabilidade da variável resposta (riqueza) é devida aos efeitos aleatórios do tipo de isca, a fim de observar a eficiência de coleta das iscas utilizadas. Foi calculado o modelo de cada um dos furos, bem como do efeito fixo.

As análises de tipo de isca, sazonalidade climática e profundidade foram realizadas por meio de análises de GLMM no programa R versão 3.6.1 (2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Das 240 armadilhas dispostas, apenas 158 foram recuperadas para análises. A amostragem total de artrópodes subterrâneos resultou na coleta de 66 táxons, distribuídos em cinco Classes e 13 Ordens. As Classes de artrópodes coletados foram: Arachnida, Entognatha, Insecta, Crustacea e Miryapoda. Aracnida foi marcada pela alta riqueza de espécies de ácaros (20 táxons), seguida de Aranae (4 morfótipos) e Opiliones (2 táxons). A Classe Entognatha foi representada exclusivamente por Collembola (11 morfótipos). A Classe Insecta foi representada por 7 Ordens: Blatodea (3 morfótipos); Coleoptera (13 morfótipos); Diptera (5 morfótipos); Hemiptera (1 morfótipo); Hymenoptera (1 morfótipo), Isoptera (1 morfótipo) e Ortoptera (1 táxon). Por fim, em Miryapoda ocorreu apenas um táxon, e em Crustacea, dois. A Tabela 1 a seguir apresenta os grupos taxonômicos coletados.

Tabela 1: grupos taxonômicos coletados.

Relação dos morfótipos coletados no MSS				
CLASSE	**ORDEM**	**FAMILIA**	**GENERO**	**MORFÓTIPO**
Arachnida	Mesostigmata	Ascidae	Lasioseius	Lasioseius sp.1
Arachnida	Sarcoptiformes	Acaridae	Acaridae	Acaridae sp.1
Arachnida	Ixodida	Ixodidae	Amblyomma	Amblyomma sp.1
Arachnida	Mesostigmata	Macrochelidae	Macrocheles	Macrocheles sp.2
Arachnida	Trombidiformes	Scutacaridae	Scutacaridae	Scutacaridae sp.1
Arachnida	Sarcoptiformes	Glycyphagidae	Glycyphagidae	Glycyphagidae sp.1
Arachnida	Mesostigmata	Laelapidae	Laelapidae	Laelapidae sp.1
Arachnida	Mesostigmata	Macrochelidae	Macrocheles	Macrocheles sp.1
Arachnida	Sarcoptiformes	Phthiracaridae	Phthiracaridae	Phthiracaridae sp.1
Arachnida	Trombidiformes	Cunaxidae	Cunaxidae	Cunaxidae sp.1
Arachnida	Mesostigmata	Uropodidae	Uropodina	Uropodina sp.1
Arachnida	Mesostigmata	Uropodidae	Uropodina	Uropodina sp.2
Arachnida	Actinedida/Parasitengona		Parasitengona	Parasitengona (larva) sp.1.
Arachnida	Mesostigmata	Digamaselidae	Digamaselidae	Digamaselidae sp.1
Arachnida	Sarcoptiformes	Acaridae	Acaridae	Acaridae sp.2
Arachnida	Mesostigmata	Ascidae	Proctolaelaps	Proctolaelaps sp.1
Arachnida	Mesostigmata	Ascidae	Proctolaelaps	Proctolaelaps sp.1
Arachnida	Trombidiformes	Cunaxidae	Cunaxidae	Cunaxidae sp.3
Arachnida	Sarcoptiformes	Acaridae	Acaridae	Acaridae sp.3
Arachnida	Sarcoptiformes	Histiostomatidae	Histiostomatidae	Histiostomatidae sp.1
Arachnida	Trombidiformes	Cunaxidae	Cunaxidae	Cunaxidae sp.2
Arachnida				ARANAE_SP3
Arachnida				ARANAE_SP2
Arachnida				ARANAE_SP4
Arachnida				ARANAE_SP5
Arachnida	Opiliones			Opiliones sp.1
Collembola	Entognatha	Paronellidae	Cyphoderus	Cyphoderus sp
Collembola	Entognatha		Artesia	Artesia sp
Collembola	Entognatha	Isotomidae	Isotomiella	Isotomiella sp
Collembola	Entognatha	Katiannidae	Stenognathellus	Stenognathellus sp.1
Collembola	Entognatha	Brachystomellidae	Brachystomella	Brachystomella sp
Collembola	Entognatha	Katiannidae	Stenognathellus	Stenognathellus sp.2
Collembola	Entognatha	Entomobryidae	Lepidocyrtus	Lepdorcytus sp
Collembola	Entognatha	Folsomidae	Folsomides	Folsomides sp
Collembola	Entognatha	Neelidae		Neelidae sp
Collembola	Entognatha	Paronellidae	Trogolaphysa	Troglolaphysa sp
Collembola	Entognatha	Entomobryidae	Pseudocerates	Pseudocerates sp
Crustacea				Copepoda sp.1
Crustacea				Copepoda sp.2
crustacea	Isopoda	Circoniscidae	Circoniscus	Circoniscus sp1
Diplopoda	Polydesmida	Pyrgodesmidae		Pyrgodesmidae sp.1
Insecta				BLATODEA_SP1
Insecta				BLATODEA_SP2
Insecta				BLATODEA_SP3
Insecta	Coleoptera	Pitiliidae		Pitiliidae sp.1
Insecta	Coleoptera	Hidrophilidae		Hidrophilidae sp.1
Insecta	Coleoptera	Noteridae		Noteridae gen. nov. 1
Insecta	Coleoptera	Curculionidae Scolitynae		Curculionidae sp1
Insecta	Coleoptera	Dytiscidae	Copelatus	Copelatus sp. n.
Insecta	Coleoptera	Staphilinidae		Staphilinidae Aleocharinae sp1
Insecta	Coleoptera	Staphilinidae		Staphilinidae Aleocharinae Sp2
Insecta	Coleoptera	Staphilinidae		Staphilinidae gen. nov.
Insecta	Coleoptera			Larva sp.1
Insecta	Coleoptera			Larva sp.2
Insecta	Coleoptera	Lutrochidae	Lutrochus	Lutrochus sp
Insecta	Coleoptera			Larva sp1
Insecta	Coleoptera	Dytiscidae	Copelatus	Copelatus sp1
Insecta	Diptera	Ceratopogonidae		Ceratopogonidae sp.1
Insecta	Diptera	Phoridae		Phoridae sp.1
Insecta	Diptera	Psychodidae		Psychodidae sp.1
Insecta	Diptera			Diptera sp.1
Insecta	Diptera			Diptera sp.2
Insecta	Hemiptera	Reduviidae		Reduviidae sp.1
Insecta	Hymenoptera	Formicidae		Formicidae sp.1
Insecta	Isoptera	Termitidae	Nasutitermes	Nasutitermes sp.1

Fonte: Autor com base nos dados de riqueza e composição de espécies nas armadilhas

Devido a instabilidades nas paredes dos furos utilizados, diversas armadilhas não puderam ser analisadas pois ficaram presas no subsolo. O gráfico apresentado na Figura 5a ilustra o número total de armadilhas recuperadas de acordo com o tipo de isca utilizada, enquanto que as Figuras 5b e 5c apresentam o número de armadilhas recuperadas de acordo com o tipo de isca utilizado levando em consideração as estações climáticas chuvosa e seca, respectivamente. Os três gráficos mostram a importância das chuvas no número de armadilhas recuperadas, tendo em vista uma maior instabilidade do terreno fazendo com que mais armadilhas fiquem presas.

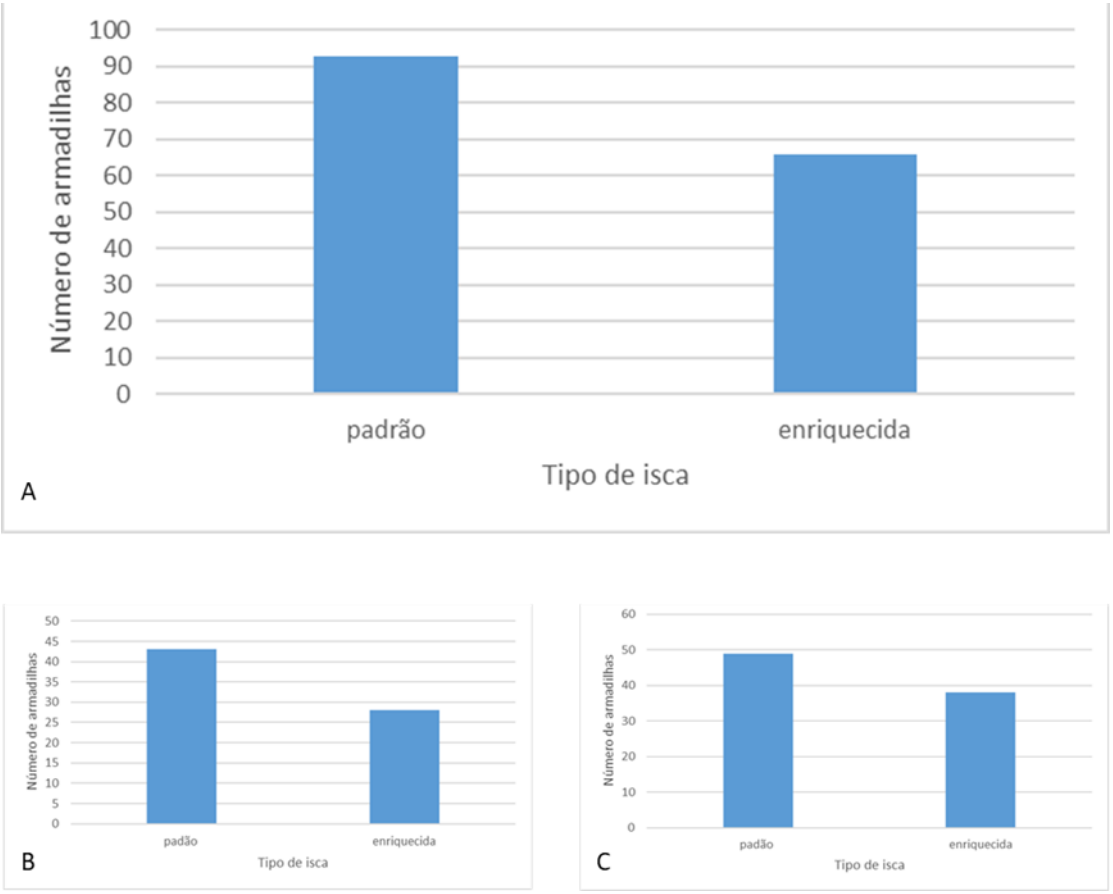


Figura 5: Número total de armadilhas recuperadas para análise de acordo com o tipo de isca e com a estação climática. a) total de armadilhas; b) estação chuvosa e c) estação seca.

O Collembola do gênero Lepdorcytus e o ácaro do gênero Macrocheles foram os taxa mais abundantes, independentemente do tipo de isca utilizado ou estação climática (Figura 6).

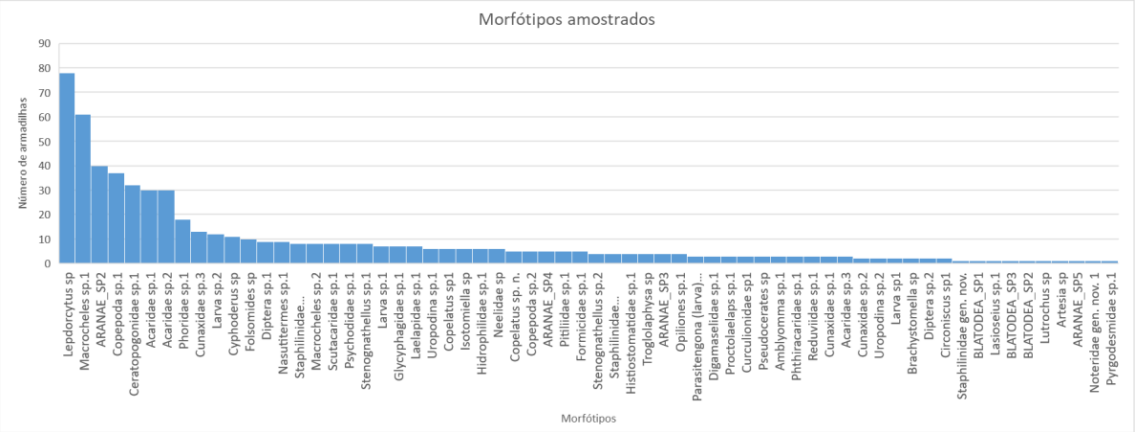


Figura 6: Número de encontros dos morfótipos mais amostrados por armadilhas no platô N3 em Carajás/PA.

A metodologia aplicada no presente trabalho realizando o levantamento faunístico em MSS já foi aplicada anteriormente, contudo para levantamento de grupos faunísticos específicos. Brito (2019), ao inventariar colêmbolas em uma formação ferrífera em Minas Gerais utilizou armadilhas em furos de sondagem, tendo como isca substrato de gramíneas e queijo gorgonzola, durante o período de 90 dias para colonização.

Apesar de não testar diferentes iscas, relacionou a taxocenose de colêmbolas a fatores como profundidade e temperatura e umidade. Os resultados mostraram que a riqueza foi influenciada pela umidade e não possui diferença significativa dentro ou fora da caverna, enquanto a abundância foi influenciada pela temperatura e difere entre os ambientes hipógeo e epígeo., bem como algumas espécies exclusivas do MSS como *Brachystomella grootaerti* (a 41 metros), *Folsomides* spp. (a 15 metros), *Pseudosinella* sp2 (a 15 metros) e *Pseudosinella* sp8 (a 20 metros). Foram coletadas 22 espécies pertencente a 15 gêneros e nove famílias de colêmbolos.

No presente trabalho, foram amostradas espécies de coleópteras e isópodes classificadas como troglomórficas, contudo nenhum colêmbola foi considerado troglomórfico. ZEPELLINI et al (2022), ao utilizar iscas compostas de queijo e cerveja em formações ferríferas no estado de Minas Gerais encontrou 29 espécies de colêmbolas troglóbios e 11 espécies conhecidas de troglófilos., evidenciando a importância deste ambiente para este determinado grupo taxonômico.

O uso de iscas em armadilhas para coleta indireta da fauna do MSS é comum. MAMMOLA (2017) utilizou armadilhas em cavernas e nos MSS iscadas com carne de frango e salmoura conforme GIACHINO E VAILATI (2010). Na Austrália, a troglofauna é coletada em furos de sondagens usando armadilhas com iscas de serapilheira (EPA 2007). HALSE & PERASON (2014) descreveram a utilização do uso de armadilhas em furos de sondagem iscadas com serapilheira úmida. Para tal, coletaram um total de 658 espécies no oeste australiano, considerado um hotspot de biodiversidade subterrânea.

Pinheiro-Machado & Silveira (2006) indica que o melhor resultado em número de espécies coletadas é alcançado quando vários métodos são empregados. As armadilhas

são amplamente empregadas como um método passivo para amostragem de artrópodes (SOUTHWOOD & HENDERSON 2000). Estas armadilhas podem conter iscas ou atrativo e geralmente corresponde a uma substância de natureza biológica usada para atrair o interesse de organismos (DODGE & SEAGO 1954). Iscas à base de vinho tinto, cerveja, fruta fermentada, carne e outras substâncias são frequentemente usadas para artrópodes (BASSET ET AL. 1997). As capturas são obviamente tendenciosas para as espécies atraídas por iscas específicas (AUSDEN & DRAKE 2006), assim, a seleção da isca é crucial no desenho da amostragem relevante para o grupo taxonômico alvo.

Neste princípio, a disponibilização de diferentes atrativos para a fauna pode aumentar a eficiência de coleta. No entanto, contrariando o anteriormente exposto, de forma geral, a riqueza total não apresentou relação significativa com o tipo de isca utilizado (p value > 0,05). Contudo, alguns grupos específicos que tiveram grande riqueza e ampla distribuição entre as armadilhas de acordo com o tipo de isca, como os ácaros, colembolas, dípteros e coleópteros também foram analisados de maneira isolada.

Desses grupos apenas as aranhas e ácaros apresentaram diferenças significativas na riqueza e composição das espécies de acordo com o tipo de isca utilizado, com valores de P iguais a 0,000677 e 0,00203, respectivamente (Figuras 7 e 8). O conhecimento sobre iscas preferenciais para cada grupo taxonômico é, portanto, uma enorme vantagem, especialmente em atividades de monitoramento. Desta forma um dos fatores que pode ter causado a diferença na riqueza e composição de espécies pode estar relacionado a alguma especificidade trófica de um determinado grupo.

Apesar da riqueza total não ter sido influenciada significativamente pelo tipo de isca utilizado, os distintos grupos faunísticos amostrados responderam de diferentes formas. Entre os grupos taxonômicos de ácaros e aranhas, foi possível observar que a isca padrão apresentou diferença significativa com maior riqueza de espécies quando comparado com a isca enriquecida. Um dos fatores que pode ter levado a este resultado é a seletividade da isca utilizada em relação aos aspectos tróficos destes dois grupos. A composição total das espécies coletadas também apresentou diferença significativa entre os tipos de iscas utilizados, indicando uma fauna específica para cada uma delas.

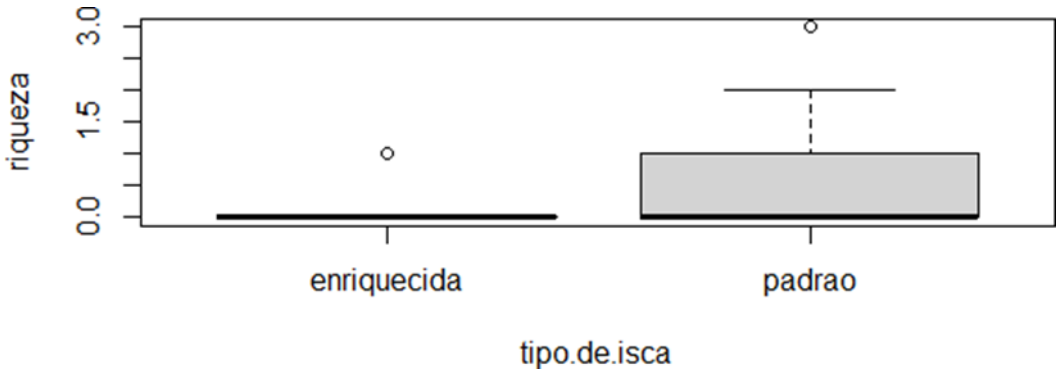


Figura 7: Boxplot da riqueza de aranhas de acordo com o tipo de isca (P = 0,000677).

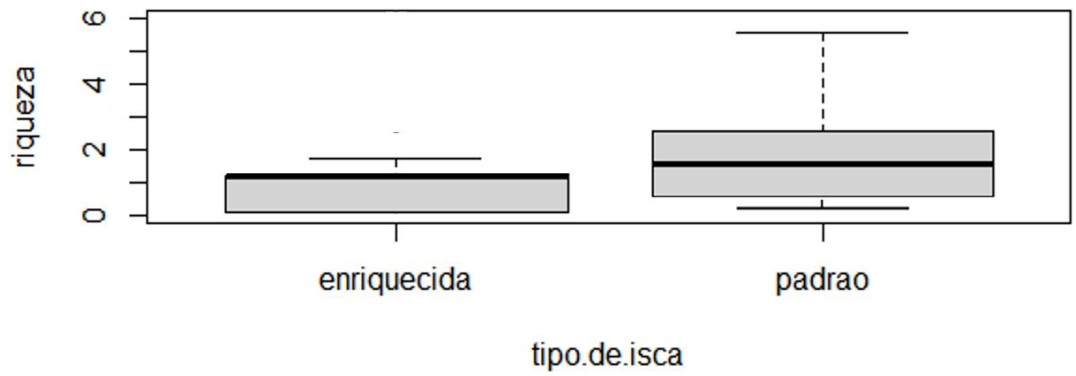


Figura 8: Boxplot da riqueza de ácaros de acordo com o tipo de isca utilizado, independentemente da estação do ano (P = 0,00203).

Além das relações entre riqueza, e após a realização de análises de GLMM, foi possível observar que a composição total de espécies também foi influenciada pelo tipo de isca (P value 0,04287), uma vez que a composição das espécies encontrada nas armadilhas com folhiço foi diferente das espécies em armadilhas com iscas enriquecidas.

Diversos pesquisadores já apontaram que em cavernas em rocha ferrífera, apesar de pequenas e pouco profundas, muitas vezes com poucos metros de desenvolvimento horizontal, as ligações ao MSS são conspícuas e abundantes, proporcionando um habitat subterrâneo bastante contínuo, ainda pouco observado, principalmente nas discussões a respeito da definição de área de influência como instrumento de conservação.

A realização de coletas da fauna subterrânea por meio de armadilhas em furos de sondagem, tanto na formação ferrífera de Carajás quanto de Minas Gerais evidencia que ocorre o trânsito através das conexões do MSS entre ambientes superficiais e subterrâneos, incluindo as cavernas. O mesmo acontece com a energia que vem com raízes que atingem o MSS abundantemente como outros autores já mencionaram (FERREIRA, 2005; SOUZA-SILVA et al, 2011).

Assim, o tipo de isca a ser utilizada, acende a necessidade de compreender os fatores ambientais, como temperatura, umidade, altura do lençol freático, entre outros que estruturam a comunidade dos diferentes organismos que habitam o MSS, bem como indica a necessidade de mudança na compreensão do ambiente subterrâneo, formado não apenas por cavernas, mas também pela matriz ferrífera para manutenção dos organismos troglóbios evitando a perda liquida de espécies.

CONCLUSÕES

A partir destes resultados foi possível observa uma maior eficiência de coleta da a isca padrão, composta apenas de folhiço em relação a isca enriquecida, composta de

folhiço e proteína. Contudo, quanto a composição de espécies existe uma complementaridade resultando no levantamento total de artrópodes do MSS ferrífero em Carajás.

Este resultado evidencia a complexidade deste ambiente ainda pouco estudado, sendo este um dos poucos trabalhos a utilizar furos de sondagem em área de mineração para levantamento indireto da fauna subterrânea presente o MSS. Trata-se de um trabalho exploratório, contudo foi possível comprovar que alguns grupos ocorreram mais nas armadilhas com isca padrão, como no caso de espécies das aranhas e ácaros amostrados.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado a partir de uma parceria com entre o Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – CECAV, Centro de estudos em Biologia Subterrânea – CEBS a partir de recursos do projeto "Filogeografia de invertebrados troglóbios em formação ferrífera e carbonáticas: Evolução e conectividade biológica em ambientes subterrâneos como definidores de ações de conservação", do Termo de Compromisso de Compensação Espeleológica nº 01/2018.

REFERÊNCIAS

AUSDEN, M. & DRAKE, M. (2006) Invertebrates. In: Sutherland, W.J. (ed.), Ecological Census Techniques, a handbook. Second edition. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 214–249.

BAKALOWICZ, M. (2004). The epikast, the skin of kasrt. In: WK Jones, DC Culver, and JS Herman, eds. Epikasrt. Proceedings of the symposium held October 1 through 4, 2003Shepherdstown, West Virginia, pp. 16-22. Karst water institute, Charles Town, West Virginia.

BASSET, Y., SPRINGATE, N.D., ABERLENC, H.P. & DELVARE, G. (1997) A review of methods

for sampling arthropods in tree canopies. In: Stork, N.E., Adis, J. & Didham, R.K. (eds.), Canopy arthropods. Chapman-Hall London. pp. 27–52.

CAMPOS, J. C.; CASTILHO, A. F. Uma visão geográfica da região da Flona de Carajás. In: MARTINS,

F. D. et al. (org.) Fauna da Floresta Nacional de Carajás: estudos sobre vertebrados terrestres. São Paulo: Nitro Images, 2012. p.16-63.

CARSTE – Consultores Associados. 2014. Estudos Espeleológicos do Projeto Serra Norte Geoespeleologia, Bioespeleologia, Análise de Relevância. Belo Horizonte. 301pp.

COSTA, M. F. 2014. Tese: Proposta de metodologia para avaliação da qualidade das águas na área de influência de minas a céu aberto: caso da mina N5sul em Carajás-PA. 160 pp. Porto Alegre/RS.

CULVER D. C., and PIPAN T. 2014: Shallow Subterranean Habitats. ECOLOGY, EVOLUTION AND CONSERVATION Oxford University Press, 2014, 1st Impression, pp. 258.

CULVER D. C., and PIPAN T (2009) The Biology of Caves and Other Subterranean Habitats. Oxford: Oxford University Press

DODGE, H.R. & SEAGO, J.M. (1954) Sarcophagidae and other Diptera taken by trap and net on Georgia mountain summits in 1952. Ecology, 35, 50–9

FERREIRA, R. L., 2005. A vida subterrânea nos campos ferruginosos. O Carste (Belo Horizonte), v. 3,

p. 106-115. 2005.

FERREIRA, R. L.; MARTINS, R. P. 1999. Trophic Structure and Natural History of Bat Guano Invertebrate Communities with Special Reference to Brazilian Caves. Tropical Zoology, v. 2, n. 12, p. 231- 259.

FERREIRA, R.L.; OLIVEIRA M. P. A. & SOUZA-SILVA, M. Biodiversidade subterrânea em geossistemas ferruginosos. IN: Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais. Organizado por Flávio Fonseca do Carmo e Luciana Hiromi Yoshino Kamino. Belo Horizonte: 3i Editora, 2015.

GERS C. Diversity of energy fluxes and interactions between arthropod communities: from Soil to Cave. Acta Oecol 19(3):205-213. 1998

GIACHINO P. M., VAILATI D. (2010) The subterranean environment. Hypogean life, concepts and collecting techniques. WBA Handbooks, Verona

GOLDER ASSOCIATES Brasil Consultoria e Projetos Ltda. Relatório de Análise de Similaridade das Paisagens de Savana Metalófila: Projeto Área Mínima de Canga – 2ª Aproximação. Belo Horizonte, 2009.

GOLDER ASSOCIATES, Relatório de Controle Ambiental. Projeto Serra Norte 100 Mtpa. Relatório, Belo Horizonte, Minas Gerais. 2005.

HALSE, S. A., & PEARSON, G. B. Troglofauna in the vadose zone: Comparison of scraping and trapping results and sampling adequacy. Subterranean Biology, 13, 17–34. 2014.

ICMBIO, 2018. Projeto cenários: conservação de campos ferruginosos diante da mineração em Carajás. Frederico Drumond Martins, Luciana Hiromi Yoshino Kamino e Katia Torres Ribeiro (organizadores). – 1. ed. – Tubarão (SC): Copiart, 2018.

JUBERTHIE C, DELAY B, BOUILLON M. Sur l'existence du milieu souterrain superficiel en zone

calcaire. In: Les entrees d'energie dans le karst et communications libres. Mem Biospeol. 8:77-93. 1980.

LASSAU, S. A., HOCHULI, D. F., (2004). Effects of habitat complexity on ant assemblages. Ecography 27: 157-164.

LEWIS J. J., MOSS P., TECIC D., AND NELSON M. E. A conservation focused inventory of subterranean invertebrates of the southwestern Illinois karst. Journal of Cave and Karst Studies 659- 21.

MAMMOLA S.; PIANO E.; GIACHINO, P. M.; ISAIA, M.; 2017. An ecological survey of the invertebrate Community at the epigean/hypogean interface. Subterranean Biology 24: 27–52. doi: 10.3897/subtbiol.24.21585.

MEDINA AL, ORORNÍ, P. 1990. First data on the superficial underground compartment in La Gornera (Canary Islands). Mém. Biospéol. 17:87-91.

MESTROV, M. (1962). Un nouveau milieu aquatique souterrain: le biotope hypotelminorheique. Compt Rendus Academie des Science, Paris, 254. 2677-2679.

NITZU E, NAE A, BĂNCILĂ R, POPA I, GIURGINCA A, PLĂIAȘU R (2014) Scree habitats:

ecological function, species conservation and vertical-temporal variation in the arthropod community. Systematics and Biodiversity 12: 65–75. https://doi.org/10.1080/14772000.2013.87876

PECK, S. B.; THAYER, M. K. The Cave-inhabiting rove beetles of the United States (Coleoptera; Staphylinidae; excluding Aleocharinae and Pselaphinae): Diversity and distributions. Journal of Cave and Karst Studies, v. 65, n. 1, p. 3-8, 2003.

PELLEGRINI, T. G.; FERREIRA, R. L. Metodologias diferenciadas aumentam a eficiência de inventários faunísticos em cavernas? Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG, Belo Horizonte, v. 21, n. 1, p. 111-121, 2012.

PILÓ, L. B.; AULER, A. S. (2009) Geoespeleologia das cavernas em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 30, 2009. Montes Claros. Anais. SBE. p. 181-186

PILÓ, L. B.; COELHO, A. E REINO, J. C. R., 2015. Espeleologia em rochas ferríferas: Cenário atual e conservação. 126-149 pp. In: Ruchkys U. A. Travassos, L. E. P. Rasteriro, M. A. Faria, L. E. (Eds.). Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas: propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Campinas/SP, Sociedade Brasileira de Espeleologia, 351 p.

PINHEIRO-MACHADO, C. & F.A. SILVEIRA. 2006. Surveying and monitoring of pollinators in natural landscapes and in cultivated fields, p.25-37. In V.L.I.Fonseca, A.M. Saraiva, & D.D. Jong, (eds.). Bees as pollinators in Brazil: Assessing the status and suggesting best practices. Ribeirão Preto, Holos, 96p.

POLAK, S. PRISPEVEK K., 1997. Poznavanju podzemeljske favne nekaterih jamskih objektov Matarskega podolja, jugozahodna Slovenija. In: Bedjanič, M. (ur.): Raziskovalni tabor študentov biologije Podgrad.

RACOVITZA, E.G. (1907) Essai sur les problèmes biospéologiques. Archives de Zoologie Expérimentale et Générale, 4ª ser., v.6, p371-488, 1907. [Edición Facsímil. In: BELLÉS, X, (Ed.). 2004. Assaig sobre els problemes bioespeleològics. Institut d´Estudis Catalans, Barcelona.

RASTERIRO, M. A. FARIA, L. E. (Eds.) Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas: propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Campinas/SP, Sociedade Brasileira de Espeleologia, 354 p. 2015

RUIZ-PORTERO, C. BARRANCO, P. FERNÁNDEZ-CORTÉS, A., Tinaut, A. & Calaforra, J.

M. 2002. Aproximación al conocimiento de la entomofauna de la Cueva Del Yeso (Sorbas, Almería). Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst, Boletín nº3 Sedeck: 16-25.

SCHNEIDER, K. AND CULVER D. C. Estimating subterranean species richness using intensive sampling and rarefaction curves in a high density cave region in West Virginia. Journal of Cave and Karst Studies, v. 66, no. 2, p. 39-45.

SOUTHWOOD, T.R.E. & HENDERSON P.A. (2000) Ecological methods. Third edition. Blackwell Science Ltd., 575 pp

SOUZA-SILVA, M, MARTINS R. P. & R. L. FERREIRA 2011. Cave lithology determining the structure of the invertebrate communities in the Brazilian Atlantic Rain Forest. Biodiversity and Conservation 8(20):1713-1729.

STONE, F.D., Howarth, F. G., HOCH, H. and, ASCHE, M. (2012). Root communities in lava tube. In WB White and DC Culver, eds. Encyclopedia of caves, second edition, pp. 649-654. Elsevier/ Academic Press. Amsterdam, The Netherlands.

TRAJANO E., BICHUETTE M. E. AND BATALHA M.A. Environmental studies in caves: the problems of sampling, identification, inclusion, and indices. EspeleoTema 23: 13-22. 2012.

VALENTIM, R. F. & OLIVITO, J. P. R., 2011. Unidade espeleológica Carajás: delimitação dos enfoques regional e local, conforme metodologia da in-02/2009 MMA. Espeleotema, V. 22, n. 1, p. 41-60.

ZEPPELINI, D., BRITO, R. A. & LIMA, E. C. A. 2018. Three new species of Collembola (Arthropoda: Hexapoda) from Central Brazilian shallow caves: side effects of long term application of environmental law on conservation. Zootaxa 4500 (1), pp. 59-81.

ZEPPELINI, D., OLIVEIRA, J.V.L.C., DE LIMA, E.C.A. BRITO, A. R.; FERREIRA, A. S.; STIEVANO, L. C.; BRITO, N. P.; OLIVEIRA-NETO, M. A. & LOPES, B. C. H. (2022) Hotspot

in ferruginous rock may have serious implications in Brazilian conservation policy. Sci Rep 12, 14871. https://doi.org/10.1038/s41598-022-18798-1.

ANEXO 4 – Resumo 37º CBE

ANAIS do 37º Congresso Brasileiro de Espeleologia

FAUNA DE COLÊMBOLOS DO MEIO SUBTERRÂNEO SUPERFICIAL (MSS) NA FORMAÇÃO FERRÍFERA DE CARAJÁS, AMAZÔNIA BRASILIEIRA

SPRINGTAILS OF MILIEU SOUTERRAIN SUPERFICIEL IN THE CARAJÁS IRON FORMATION, BRAZILIAN AMAZON

Daniel Reis Maiolino de Mendonça (1)

(1) Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas -CECAV/ICMBio.
Contato: daniel.mendonca@icmbio.gov.br

Resumo

A riqueza de espécies de Collembola no MSS na Formação Ferrífera Carajás foi analisada de acordo com a sazonalidade climática e com o tipo de isca utilizado. As amostragens foram realizadas em furos de sondagem utilizando-se armadilhas. Em cada furo foram colocadas cinco armadilhas com cinco metros entre si, contendo um dos dois tipos de iscas previamente estabelecidas. As armadilhas ficaram expostas por 8 semanas e a fauna amostrada permaneceu viva até a triagem. Foram amostradas 12 morfoespécies pertencentes a 8 famílias taxonômicas. Apenas um dos morfótipos apresentou um aparente troglomorfismo (*Pseudosinella*). O gênero *Lepidocyrtus* foi o mais abundante, ocorrendo em 77 armadilhas. Seis morfótipos foram exclusivos da estação chuvosa e apenas um exclusivo da estação seca. Quatro morfótipos foram coletados apenas em armadilha com isca padrão. Não houve diferença significativa na riqueza de acordo com a sazonalidade, porém, foi possível observar uma maior eficiência da isca Padrão.

Palavras-Chave: Ecologia; MSS; Formação Ferrífera Carajás; Collembola.

Abstract

The species richness of springtails in the MSS of the Carajás Iron Formation was analyzed according to the climatic seasonality and the bait used. Samplings were carried out in boreholes using traps. In each hole, five traps with five meters between them were placed, containing one of the two kinds of previously established baits. The traps were exposed for 8 weeks, and the fauna sampled remained alive until sorting. Twelve morphospecies belonging to 8 taxonomic families were sampled. Only one of the morphotypes showed an apparent

troglomorphism (Pseudosinella). The genus Lepidocyrtus was the most abundant, occurring in 77 traps. 6 morphotypes were exclusive to the rainy season and only one was exclusive to the dry season. 4 morphotypes were collected only in a standard baited trap. There was no significant difference in richness according to seasonality, however, it was possible to observe a greater efficiency of the Standard bait.

***Keywords**:* Ecology; MSS; Carajas Iron Formation; springtails

INTRODUÇÃO

Os espaços intersticiais do solo são compostos por pequenas fissuras e rachaduras sendo acessado principalmente por organismos que vivem no solo, e podem tanto acessar estes habitats por meio de suas minúsculas descontinuidades (FERREIRA, 2005). Ao aproximar-se da rocha de embasamento, pode mesclar-se a um conjunto de fendas de maior calibre conformadas por descontinuidades na rocha ou mesmo espaços existentes entre blocos de rocha oriundos da própria fragmentação da porção mais superficial da rocha. Tal região, onde existe este contato do solo com rochas fragmentadas, recebe o nome de meio subterrâneo superficial (MSS), que compõe uma variedade importante de habitats para inúmeras espécies (CULVER, 1982; CULVER; PIPAN, 2009; 2014).

Muitos destes espaços, em geral de volumes reduzidos, são capazes de estocar a água das chuvas que lentamente vão se escoando para porções mais profundas das rochas. Muitas vezes, estes habitats diretamente associados às rochas encaixantes mantêm-se encharcados ou bastante úmidos por todo o ano, possibilitando o estabelecimento de diferentes populações principalmente de invertebrados. Finalmente, os grandes espaços subterrâneos localizados sob esta região epicárstica, compreendem as chamadas cavernas, podendo, este, ser considerado o habitat mais tipicamente hipógeo (BARR; HOLSINGER 1985, POULSON; WHITE, 1969; JUBERTHIE *et al*., 1981; HOWARTH, 1983;
JUBERTHIE, 2000; Palmer, 2007; CULVER;
PIPAN, 2009).

De forma geral, as conexões observadas compreendem estruturas como fraturas, acamamento, dobras e falhas, poros, fissuras, fendas e cavidades (CULVER *et al*, 1995, 2009) constituem descontinuidades importantes, atuando como condicionantes na circulação de fluídos no interior do maciço rochoso. Muitas vezes tais estruturas funcionam como "esponjas" de captação e recarga hídrica (CARMO, 2010), atuam como micro e mesocavidades (cavidades e canalículos de tamanhos reduzidos, permeáveis à fauna) proporcionando abrigo e vias de locomoção para fauna subterrânea (FERREIRA *et al* 2011, 2018) (Figura 1).

Figura 1: Tipos de feições geomorfológicas que favorecem a permeabilidade à fauna. a) Formação em Jaspilito apresentando falhas por dobramentos encontrados na Cav 0030; b) Fendas e blocos de abatimento estrutural encontrados na Cav ST0003; c)

Conjunto de pequenos poros adensados encontrados na Cav ST0003, e d) Poro (mesocavidade) não acessível pelo ser humano encontrado na Cav ST0041. (Fonte: arquivo CECAV).

Estas descontinuidades da rocha possibilitaria o trânsito de invertebrados de hábitos terrestres, aquáticos e terrestres, uma vez que os canalículos podem conectar-se a ambientes epígeos edáficos como serapilheira, lapidícola e endógeno (FERREIRA 2005; BICHUETTE, *et al*. 2015, BRITO, 2019), assemelhando-se ao MSS (Meio Subterrâneo Superficial, definido por Jubethier, (1981) (Figura 2).

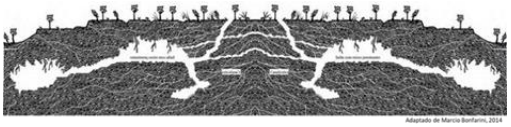


Figura 2: Perfil da formação ferrífera mostrando suas descontinuidades que possibilitam a passagem da fauna subterrânea (BICHUETTE, *et al.* 2015)

Dentre os taxons que compõem a fauna edáfica, mais especificamente na mesofauna, a Classe Collembola é a que detém uma alta representatividade (JANSSENS, 2011). São pequenos hexápodes entognatos, com antenas, porém sem asas, reconhecidos por um apêndice abdominal bifurcado ventral posterior, a fúrcula. Possuem como principal função a participação indireta na decomposição da matéria orgânica, se alimentando de fungos e bactérias e os dispersando Existem cerca de 9400 espécies publicadas em todo o mundo. (BARETTA *et al*., 2008; MORAIS *et al*., 2013).

Os colêmbolos apresentam distribuição vertical ao longo das camadas do solo, podendo ser encontrados três formas de vida (morfotipos), com base no seu grau de distribuição no solo, baseado em características ecomorfólicas, sendo: epígeos, aqueles encontrados na serapilheira; hemiedáficos, são os intermediários, que vivem entre os 5 cm da superfície do solo; e os edáficos, mais especializados ao solo, que vivem abaixo dos 5 cm do solo (OLIVEIRA-FILHO*;* BARETTA, 2016).

Devido aos colêmbolos viverem distribuídos verticalmente no solo presume-se que eles explorem distintos recursos tróficos, desempenhando diferentes funções no ecossistema (POTAPOV *et al*, 2016), sendo de extrema importância pois encontram-se na base da cadeia alimentar e de ciclagem de nutrientes no ambiente edáfico (ZEPPELINI FILHO E BELLINI, 2004).

Estudos focados em padrões ecológicos que tragam um entendimento mais amplo sobre o funcionamento do sistema subterrâneo, contribuem na delimitação deste conjunto de descontinuidades entre o ambiente cárstico (cavernas) e a superfície, em especial na paisagem ferrifera, bem como na gestão do conflito entre conservação e mineração ainda são escassos. Para tanto, faz-se necessárias novas abordagens metodológicas para entender não só as cavidades, mas todo o conjunto que elementos bióticos e abióticos que compõem o sistema, calcadas na conservação de paisagens e promovendo a manutenção do sistema ao longo do tempo.

Desta forma este trabalho pretende amostrar o grupo faunístico de colêmbolos presentes no meio subsuperficial em um platô da Serra Norte da Serra de Carajás/PA relacionando a riqueza de espécies de acordo com a variação climática sazonal e de acordo com o tipo de isca utilizado.

METODOLOGIA

A Serra dos Carajás apresenta umidade relativa e taxas de precipitação suficientes para manter a floresta equatorial úmida. O clima é de tipo montano ou serrano amazônico, com temperaturas médias anuais em torno de 21 a 22ºC. A estação chuvosa concentra

entre 75% e 80% do total anual de precipitação pluviométrica durante os meses de novembro a abril, com média de precipitação pluviométrica de 229 mm (COSTA, 2014)

O desenho experimental foi baseado na metodologia proposta por um estudo realizado em ferricretes na Austrália, visando amostragem de fauna subterrânea (HALSE; PEARSON, 2014). As amostragens foram realizadas em 24 furos de sondagem (150 mm de diâmetro x ~100 metros de profundidade) escavados previamente no platô N3, utilizando- se armadilhas constituídas de tubos de PVC (300 x 75 mm) com furos de acesso pelas laterais usados para colonização. (Figura 3). Devido ao grande volume de amostras, a abundância dos animais foi estimada pelo número de ocorrência nas armadilhas.

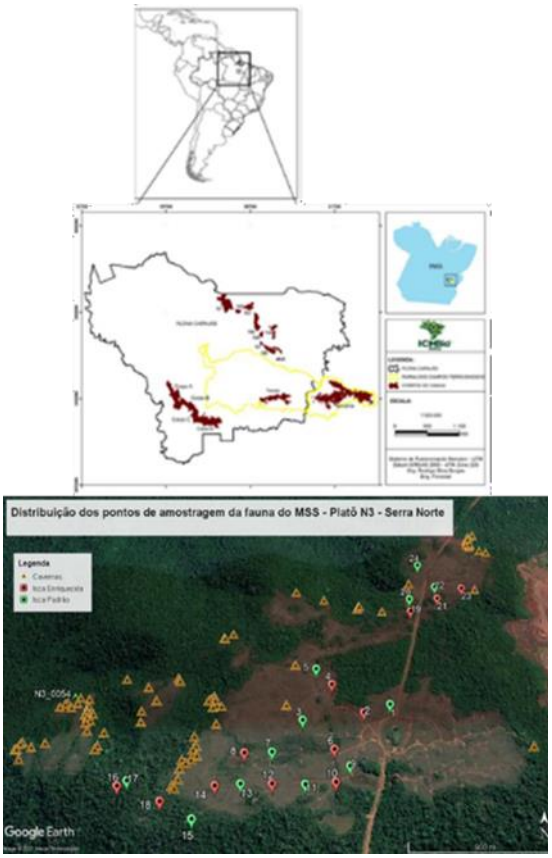


Figura 3: Platô N3/Serra Norte - Localização dos pontos de coleta de acordo com o tratamento utilizado. Triângulos em amarelo representam as cavidades; pontos em vermelho representam as perfurações de sondagem com armadilhas contendo isca enriquecida. Em verde estão os furos de sondagem com armadilhas contendo isca padrão.

Em cada furo de sondagem foram colocadas cinco armadilhas, com espaçamento padrão de cinco metros entre elas, atingindo até 25 metros de profundidade, contendo apenas um dos dois tipos de iscas previamente estabelecidas. As iscas utilizadas foram: Isca Padrão (serapilheira úmida coletada anteriormente no próprio local, esterilizada em estufa a 90ºC por 1 hora) e Isca Enriquecida (folhiço esterilizado misturado a fígado bovino moído). (Figura 4)

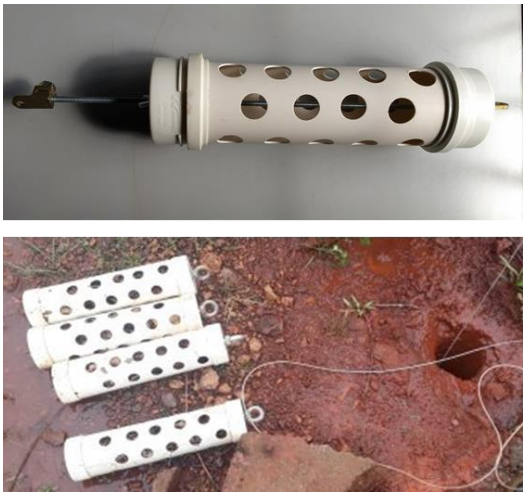


Figura 4: Em cima, detalhe da armadilha e em baixo, conjunto de armadilha com isca padrão sendo inseridas em um furo de sondagem.

A esterilização prévia está descrita na metodologia (HALSE; PEARSON, 2014) e serve para evitar que algum organismo seja inserido ainda vivo acidentalmente na armadilha.

Figura 5: Esterilização do folhiço coletado em campo a ser utilizado nas iscas. Este procedimento evita a contaminação previas das amostras.

Após a instalação, as armadilhas ficaram expostas por aproximadamente oito semanas. Apenas após este período as amostras foram coletadas. As amostras ainda vivas foram armazenadas em embalagens individuais para triagem primária. Após isto foram morfotipadas e identificadas em triagem mais refinada e conservadas em álcool 100%. (Figura 6).

Figura 6: (a) armadilhas recém removidas; (b) triagem primária; (c, d) resultados da morfotipagem e identificação das amostras.

Foram observados os resultados da eficácia de coleta de acordo com o tipo de isca utilizado e o efeito da sazonalidade sobre as amostras. Também foi claculado o Indice de diversidade de Shannon.

Estas comparações decorreram dos dados de riqueza e diversidade de morfótipos encontradas nas armadilhas dispostas no subsolo. Para testar a hipótese de que não há diferença entre os tratamentos foi realizada a comparação das riquezas médias observadas (test-t), tanto dos dados totais, quanto de acordo com a sazonalidade

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização faunística

Dois eventos de amostragem foram realizados, sendo uma na estação seca (ago- set/2018) e outra na estação chuvosa (mar- abr/2019). No primeiro evento amostral, durante a estação seca, foram inseridas 120 armadilhas sendo recuperadas 87 e na estação chuvosa foram recolocadas as mesmas 120 sendo recuperadas 71, totalizando 158 armadilhas analisadas. As demais armadilhas ficaram presas devido a alguma obstrução. Este fato também era previsto na metodologia.

Foram registradas 12 morfoespécies pertencentes a oito famílias de Collembola (Figura 7). 53 indivíduos do gênero *Pseudosinella* ocorreram em 19 armadilhas de nove furos apresentaram um aparente troglomorfismo, como ausência de olhos e de pigmentação (Figura 7a). estes dados são apresentados na Tabela 1.

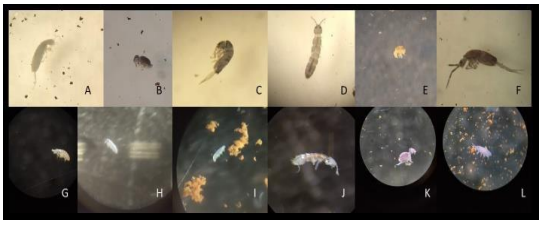


Figura 7: Morfótipos de Collembola encontrados nas armadilhas no MSS: A - Entomobryidae – *Pseudosinella*; B - Bourletiellidae; C - Entomobryidae – *Lepidocyrtus*; D - Isotomidae; E - Neelidae – *Megalothorax*; F - Paronellidae – *Trogolaphysa*; G - Hypogastruridae; H - Hypogastruridae; I - Hypogastruridae; J - Isotomidae; K - Katiannidae e L - Brachystomellidae.

Tabela 1: Morfótipos coletados de acordo com as variáveis analisadas.

Morfótipo		individuos amostrados	N. armadilhas	N. Furos	Furos com isca Padrão	Furos com isca Enriqu.	Estação Seca	Estação Chuvosa
Bourletiellidae		5	5	3	2	1	x	
Brachystomellidae		2	2	2	1	1		x
Pseudosinella sp.1 (Entomobriidae)		32	11	6	1	5	x	x
Lepidocyrtus sp.2 (Entomobriidae)		2310	77	20	10	10	x	x
Isotomidae sp		20	16	8	8	0		x
Paronellidae sp		7	4	4	3	1	x	x
Neelidae		6	6	6	4	2	x	x
Hypogasturidae sp.1		1	1	1	1	0		x
Hypogasturidae sp.2		5	3	3	1	1		x
Hypogasturidae sp.3		1	1	1	1	0		X
Katiannidae		12	8	8	2	1		X

3.2. Análise da sazonalidade

Os gráficos abaixo (Figura 8) mostram a ocorrência dos morfótipos de acordo com o número armadilhas por armadilha (Figura 8a).

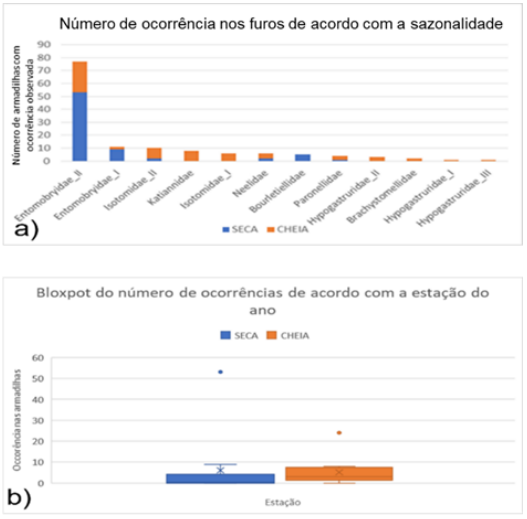


Figura 8: Influência da sazonalidade na amostragem de Collembola no *MSS*: a) Abundância de morfótipos de acordo com número de encontros nas armadilhas. b) *Boxplot* do número de ocorrências de acordo com a estação, evidenciando que não houve diferença significativa entre as estações do ano (*P Value* = 0,433214).

O índice de diversidade de Shannon foi de 1,61 considerando-se a toda a amostragem. Na estação chuvosa foi de 1,94 e na estação seca foi de 0,93, evidenciando uma fauna mais diversa durante a estação de chuvas. Não foi verificada diferença significativa na riqueza média de espécies de acordo com a sazonalidade (*P Value* = 0,433214), aceitando- se a hipótese nula.

3.3. Análise do tipo de isca

Os gráficos abaixo mostram a ocorrência dos morfótipos nos furos de acordo com o tipo de isca utilizado (Figura 9) e ocorrência dos morfótipos nos furos de acordo com a sazonalidade. De acordo com o tipo de isca utilizado, foram amostradas 56 armadilhas contendo colêmbolos com tratamento de iscas enriquecida e 77 armadilhas contendo colêmbolos utilizando-se o tratamento com isca padrão de um total de 158 armadilhas.

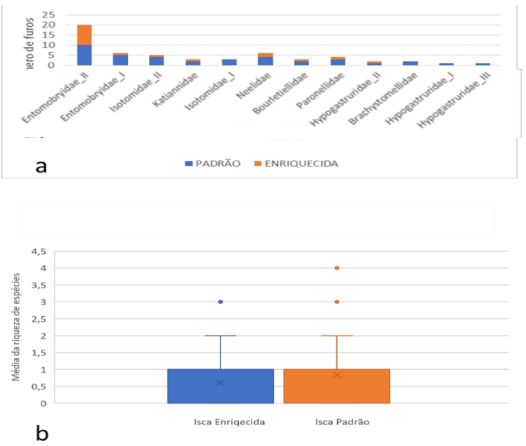


Figura 9: a) Ocorrência dos morfótipos nos furos de acordo com o tipo de isca; b) diferença observada na riqueza de espécies de Collembola de acordo com a isca utilizada (*P-value* 0,025841)

CONCLUSÕES

Foi possível observar que apesar de existir uma diferença na riqueza de

espécies encontradas nas estações chuvosa e seca na região estudada esse fator ambiental não altera significativamente a riqueza de colêmbolos ao longo do ano (*P value* = 0,433214).

Por outro lado, o tipo de isca utilizada na coleta deste grupo apresentou diferenças significativas, comprovando que a utilização da isca padrão apresentou melhor resultado na coleta, em comparação aos resultados apresentados pela isca enriquecida (*P-value* 0,025841), contudo, para um levantamento faunístico mais eficaz, a combinação destes diferentes métodos é capaz de levantar mais espécies, uma vez que ocorreram espécies exclusivas em cada um dos tipos de isca, determinando assim uma melhor amostragem dos colêmbolos do meio subterrâneo superficial.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido em parceria com a Floresta Nacional de Carajás; Centro de Estudos em Biologia Subterrânea – CEBS/ULFA em especial ao Dr. Rodrigo Ferreira e Dr. Marconi Silva; Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em especial o Dr. Bruno Bellini e a Universidade Estadual da Paraíba, em especial o Dr. Douglas Zepellini e o Dr. Roniere Brito.

REFERÊNCIAS

BARR,, T.C.*;* J.R. HOLSINGER, Speciation in cave faunas. **Ann. Rev. Ecol**. **Syst.**, v.16, p. 313-

337. 1985.

BARETTA, D. *et al*. Colêmbolos (Hexapoda: Collembola) como bioindicadores de qualidade do solo em áreas com *Araucaria angustifolia*. 2008. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p. 2693- 2699, Número Especial. 2008

BICHUETTE, E.; FONSECA-FERREIRA, R.; GALLÃO J. E. Biota subterrânea associadas a cavernas em formações ferríferas IN: **Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais** / organizado por Flávio Fonseca do Carmo e Luciana Hiromi Yoshino Kamino. Belo Horizonte : 3i Editora, 2015.

BRITO, R. A. 2019. **Variação espaço-temporal da taxocenose de colêmbolos (Hexapoda: Collembola) em ambientes cavernícolas interligados pelo Habitat Subterrâneo Superficial (HSS), no Quadrilátero Ferrífero (rocha ferruginosa), MG - Brasil** 2019.Tese de Doutorado (Doutorado em Ciências Biológicas - Zoologia) Universidade Estadual da Paraíba. - João Pessoa, 2019.

CARMO F.F. E KAMINO L. H. 2015. **Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais** / organizado por Flávio Fonseca do Carmo e Luciana Hiromi Yoshino Kamino. — Belo Horizonte: 3i Editora. Ferreira *et al* 2011

CAMPOS, J. C.; CASTILHO, A. F. Uma visão geográfica da região da Flona de Carajás. In: MARTINS, F. D. (org.) **Fauna da Floresta Nacional de Carajás: estudos sobre vertebrados terrestres**. São Paulo: Nitro Images, 2012. p.16-63. 2012

COSTA, M. F. 2014**. Proposta de metodologia para avaliação da qualidade das águas na área de influência de minas a céu aberto: caso da mina N5sul em Carajás-PA.** Tese de Doutorado (Doutorado em engenharia de Produção) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS. 2014.

CULVER, D.C. **Cave Life. Evolution and Ecology**. Harvard University Press. Cambridge, Massachussets and London, England. 189 pp.1982.

CULVER DC, KANE TC, AND FONG DW. Adaptation and Natural Selection in Caves. The Evolution of Gammarus Minus. Cambridge: Harvard University Press 1995

CULVER DC AND PIPAN T. **The Biology of Caves and Other Subterranean Habitats**. Oxford: Oxford University Press. 2009.

CULVER D. C. and PIPAN T. **Shallow subterranean habitats. Ecology, evolution and conservation** Oxford University Press, 1st Impression, pp. 258. 2014

DURÃES R, MARTINS W P, VAZ-DE-MELLO F Z. Dung beetle (Coleoptera: Scarabaeidae) assemblages across a natural forestcerrado ecotone in Minas Gerais, Brazil. **Neotrop Entomol** 34: 721-731. 2005

FERREIRA, R. L. A vida subterrânea nos campos ferruginosos. **O Carste,** Belo Horizonte, v. 3, p. 106-115. 2005.

FERREIRA, R. L.; OLIVEIRA, M. P. A. de; SOUZA-SILVA, M. Subterranean biodiversity in ferruginous landscapes. In: **Cave ecology**. Springer, Cham, p. 435-447. 2018

HALSE, S. A., & PEARSON, G. B. 2014. Troglofauna in the vadose zone: Comparison of scraping and trapping results and sampling adequacy. **Subterranean Biology**, 13, 17–34. 2014.

HOWARTH F, G. Ecology of cave arthropods. Annu Rev Entomol 28(1):365-389. doi: 10.1146/annurev.en.28.010183.002053. 1983

JANSSENS, F.; CHRISTIANSEN, K. A. Class Collembola Lubbock, 1870. In: ZHANG, Z.-Q. (Ed.).
Animal biodiversity: an outline of higher-level classification and survey of taxonomic richness (Zootaxa 3148). Auckland: **Magnolia Press**., 2011. p. 192-194. 2008.

JUBERTHIE C. The diversity of the karstic and pseudokarstic hypogea habitats in the world. In: Wilkens H, Culver DC, Humphreys WF (Eds) Subterranean Ecosystems (Ecosystems of the World 30), **Elsevier**, Amsterdam, pp 17-39. 2000.

JUBERTHIE C, DELAY B. Ecological and biological implications of the existence of a ‘‘superficial underground compartment’’. In: Beck BF (Ed) **Proceedings of the 8th International Congress of Speleology**, Bowling Green, KY, Georgia, USA 1:203-206. 1981.

MORAIS, J. W. Mesofauna. In: Moreira, F. M. S.; Cares, J. E.; Zanetti, R.; Sturmer, S. L. O ecossistema solo: componentes, relações ecológicas e feitos na produção vegetal. Lavras: **Ed. UFLA**, 352 p. 2013.

OLIVEIRA FILHO, L. C. I.; BARETTA, D. Por que devemos nos importar com os colembolos edáficos? **Scientia Agraria**, v. 17, n. 2, p. 21-40. 2016.

PALMER, A. N. **Cave geology**. Cave Books, 454 p. 2007.

POTAPOV, A. A. *et al*. Connecting taxonomy and ecology: trophic niches of collembolans as related to taxonomic identity and life forms. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 101, p. 20- 31, 2016.

POULSON, T.L.; WHITE, W.B. The cave environment. **Science**, v.165, n.3897, p.971-981, 1969.

SOUZA-SILVA, M, MARTINS R. P.; R. L. FERREIRA. Cave lithology determining the structure of the invertebrate communities in the Brazilian Atlantic Rain Forest. **Biodiversity and Conservation** 8(20):1713-1729. 2011.

ZEPPELINI FILHO, D.; BELLINI, B.C. **Introdução ao estudo dos Collembola**. João Pessoa, Universidade Federal da Paraíba, 82p. 2004.

ANEXO 5 – Resumo 1º CGBio

A AMOSTRAGEM DA FAUNA SUBTERRÂNEA EM CAVERNAS É SUFICIENTE PARA EVITAR PERDA LÍQUIDA DE ESPÉCIES NO MEIO SUBTERRÂNEO NA FORMAÇÃO FERRÍFERA DE CARAJÁS?

Daniel R.M. Mendonça [(1)]

(1) Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas - CECAV/ICMBio

RESUMO

As normativas que determinam a metodologia de levantamento faunístico de espécies subterrâneas nos licenciamentos ambientais encontram-se baseadas apenas em cavernas. Contudo, é de amplo conhecimento que o meio subterrâneo, especialmente o ferrífero, é composto por diversos micro habitats além das cavernas que, juntamente com as conexões subterrâneas entre as cavernas, favorecem a distribuição de espécies ao longo do maciço. Este complexo de descontinuidades, composto por canalículos e fissuras, são genericamente denominadas de Habitats Subterrâneo Superficial (HSS), e representam micro habitats importantes que complementam os ambientes ocupados por espécies no meio subterrâneo ao longo das estações climáticas. Desta forma, este trabalho teve como objetivo conhecer a fauna subterrânea existente em no HSS de um platô da formação ferrífera Carajás. Para a realização do trabalho foram instaladas 240 armadilhas de colonização distribuídas em 24 furos de sondagem perfurados previamente durante os levantamentos dos dados geológicos no platô N3. A amostragem total de artrópodes subterrâneos resultou na coleta de 63 táxons, distribuídos em 13 Ordens e cinco Classes, Arachnida com 26 morfótipos, Entognatha com 11 morfótipos, Insecta com 25 morfótipos, Crustacea com 2 morfótipos e Miryapoda com apenas um morfótipo. Como principal resultado este trabalho levantou quatro espécies identificadas por especialistas e ainda não descritas ocorrendo apenas no HSS. Os coleópteras Stilicopsina Gen. n., Micropirita Gen. n. e *Copelatus* sp.n. e o ácaro Digamasellidae Gen. n. não constam das listas de táxons levantados nas cavernas durante o licenciamento, demonstrando a existência de espécies no meio subterrâneo que não necessariamente ocupam as cavernas

e apenas por este motivo não influenciam no processo de licenciamento. Assim, fica evidente que esta metodologia mostra-se insuficiente para o levantamento da fauna que ocupa todo o meio subterrâneo, uma vez que o este ambiente é composto por espaços além das cavernas, totalmente negligenciados no licenciamento.

Palavras-Chave: habitat subterrâneo superficial, táxons novos, licenciamento ambiental.

Apoio: CECAV/ICMBio, TCCE 1/2018 VALE.