

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO

ARACELI MENDONÇA DE OLIVEIRA

FEIÇÕES ASSOCIADAS À BIOCARSTIFICAÇÃO EM MACIÇO CALCÁRIO NO
NORTE DE MINAS GERAIS

UBERABA

2020

Araceli Mendonça de Oliveira

Feições associadas à biocarstificação em maciço calcário no Norte de Minas Gerais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, área de concentração “Qualidade Ambiental”, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Torres Costa Pereira

Uberaba

2020

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

Oliveira, Araceli Mendonça de

O45f Feições associadas à biocarstificação em maciço calcário no Norte de
Minas Gerais / Araceli Mendonça de Oliveira. -- 2020.

87 f. : il., tab.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) -- Univer-
sidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2020

Orientador: Prof. Dr. Thiago Torres Costa Pereira

CDU 631.46

ARACELI MENDONÇA DE OLIVEIRA

Feições associadas à biocarstificação em maciço calcário no Norte de Minas Gerais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, área de concentração “Qualidade Ambiental”, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Uberaba (MG), 23 de novembro de 2020.

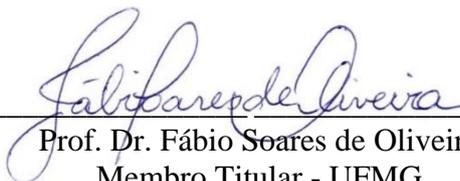
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Thiago Torres Costa Pereira
Orientador - UEMG / UFTM - PPGCTA



Prof.ª. Dr.ª. Mônica Hitomi Okura
Membro Titular - UFTM - PPGCTA



Prof. Dr. Fábio Soares de Oliveira
Membro Titular - UFMG

Aos meus pais, Gaspar (*in memoriam*) e Dalva,

A quem tudo devo.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

À Universidade Federal do Triângulo Mineiro, pela oportunidade de realização do mestrado que tanto acrescentou em minha formação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Thiago Torres Costa Pereira, pelos ensinamentos, por me mostrar o caminho a ser seguido e por estar sempre disponível a ajudar.

Ao Prof. Dr. Fábio Soares de Oliveira, pela oportunidade em realizar esta pesquisa, pelas valiosas sugestões e por me despertar o gosto pela Carstologia.

À Prof^a. Mônica Hitomi Okura, pelas notáveis contribuições principalmente sobre biofilmes microbianos que enriqueceram o trabalho.

À Prof^a. Dr^a. Rúbia Santos Fonseca e ao Prof. Dr. Daniel Meira Arruda, pela acolhida e conhecimentos compartilhados nos trabalhos de campo.

À Prof^a. Dr^a. Ana Carolina Borella Marfil, pelos ensinamentos e orientações para executar a microfotografia da cianobactéria presente neste estudo.

Ao Prof. Dr. Deusmaque Carneiro Ferreira, por tantas palavras de incentivo e pela inestimável ajuda na transmissão de conhecimentos químicos essenciais na discussão da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Wagner Rodrigues Silva, por me proporcionar uma nova visão sobre “Educação Ambiental” e conceder a realização do estágio em docência.

Ao Prof. Dr. Luiz Eduardo Panisset Travassos, pela prontidão em procurar em seu acervo bibliográfico sobre Carstologia, material direcionado à minha pesquisa.

Ao Prof. Dr. Philip Doddy e a Prof^a. Dr^a. Beatriz Roncero Ramos, pelo fornecimento de materiais bibliográficos.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, pela experiência e sabedoria compartilhada, especialmente ao Dr. Renato Farias do Valle Júnior, Dr. Mário Sérgio da Luz, Dr. Thiago da Silva Marinho, Dr. Ricardo Vicente Ferreira, Dr. Lauro Osiro e Dr. Júlio Cesar de Souza Inácio Gonçalves.

À Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Universidade Estadual de Minas Gerais (UEMG), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e ao Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) Campus Bambuí, por todo suporte concedido para a realização das análises laboratoriais.

À secretária Luciana Martins, pela atenção e presteza em me auxiliar nos problemas burocráticos.

À diretora Zulma Moreira e vice-diretoras Irlane Carvalho e Neile Ávares Burgos, por proporcionarem condições para que eu pudesse desenvolver minhas atividades profissionais juntamente com o estudo.

Ao proprietário da área onde se localiza o afloramento de calcário na Comunidade Samambaia, por ter permitido a coleta das amostras analisadas.

Aos colegas de mestrado, pelos bons momentos de aprendizagem e descontração que me proporcionaram.

Aos meus amigos e familiares que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

À minha mãe, pelo incentivo e apoio incondicional.

E à Deus, por me dar coragem nos momentos mais difíceis desta jornada acadêmica.

Muito obrigada!

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,
mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

RESUMO

OLIVEIRA, Araceli Mendonça de. Universidade Federal do Triângulo Mineiro, novembro de 2020. **Feições associadas à biocarstificação em maciço calcário no Norte de Minas Gerais.** Orientador: Thiago Torres Costa Pereira.

O Norte de Minas Gerais apresenta diversas paisagens cársticas que são admiradas por suas belezas peculiares marcadas pela dinâmica dissolutiva das rochas carbonáticas. Dentre essas paisagens, ganham destaque os lapiás desenvolvidos em rochas calcárias localizadas no município de Montes Claros, que atraem olhares curiosos pelas suas formas e feições, as quais são colonizadas por cianobactérias do gênero *Desmonostoc* sp. e por Mocós (*Kerodon rupestris*). Como várias espécies de organismos podem participar ou influenciar as reações bioquímicas e biomecânicas nos substratos litológicos, o presente estudo teve como objetivo analisar o papel da cianobactéria *Desmonostoc* sp. e do Mocó (*Kerodon rupestris*) na transformação superficial do calcário e gênese de feições que contribuem com a evolução do relevo cárstico no Norte de Minas Gerais. O trabalho se justificou pela carência de estudos sobre a influência desses organismos no processo de evolução do relevo cárstico. Os métodos utilizados para investigar a interação das espécies em estudo com a rocha calcária partiu da análise do teor de carbono orgânico total com fracionamento de substâncias húmicas, da acidez potencial e das características micromorfológicas. Os resultados obtidos demonstraram uma pequena recuperação de carbono orgânico total com predomínio da fração humina; a acidez potencial apresentou valores de acidez muito alta para a amostra referente às excreções do Mocó e a micromorfologia revelou algumas feições cársticas como crostas associadas às eflorescências salinas, córtex de alteração, descoloração, halos, fragmentos e preenchimentos. Foi possível concluir que o delgado horizonte orgânico e as crostas de alteração foram as expressões mais notáveis que indicaram processos associados à biocarstificação, e possivelmente a cianobactéria *Desmonostoc* sp. e o Mocó, respectivamente, estiveram envolvidos oportunizando condições para a formação de biofilmes microbianos e os compostos exopoliméricos produzidos por diversas atividades metabólicas estimularam reações bioquímicas e biomecânicas, favorecendo as transformações na rocha calcária e o desenvolvimento de novas feições que auxiliam a evolução do relevo cárstico no Norte de Minas Gerais.

Palavras-chave: *Desmonostoc* sp., Mocó, *Kerodon rupestris*, Calcário.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Araceli Mendonça de. Federal University of Triangulo Mineiro, November 2020. **Features associated with biocarstification in limestone massif in the North Minas Gerais State, Brazil.** Advisor: Thiago Torres Costa Pereira.

The North of Minas Gerais State, Brazil, has several karst landscapes that are noticed for their peculiar beauty marked by dissolutive dynamics of carbonate rocks. Among these landscapes, the lapiás developed in limestones located in the municipality of Montes Claros stand out, which attract curious looks for their shapes and features, which are colonized by cyanobacteria of the genus *Desmonostoc* sp. and Mocós (*Kerodon rupestris*). As several species of organisms can participate or influence the biochemical and biomechanical reactions in the lithological substrates, the present study aimed to analyze the role of the cyanobacterium *Desmonostoc* sp. and Mocó (*Kerodon rupestris*) in the superficial transformation of limestone and the genesis of features that contribute to the karst relief evolution in North of Minas Gerais. The work was justified by the lack of studies about the influence of these organisms in the process of the karst relief evolution. The methods used were analysis of the total organic carbon content and fractionation of humic substances, potential acidity and micromorphological characteristics. Results obtained showed a small recovery of the total organic carbon and a predominance of the humine fraction; potential acidity showed very high acidity values for sample referring to the Mocó excretions and the micromorphology revealed some karst features such as crusts associated with saline efflorescence, alteration cortex, discoloration, halos, fragments and fillings. It was possible to conclude that the thin organic horizon and the scabs of alteration were the most notable expressions that indicated processes associated with biocarstification, and possibly the cyanobacterium *Desmonostoc* sp. and Mocó, respectively, were involved in providing conditions for microbial biofilms formation and the exopolymeric compounds produced by various metabolic activities stimulated by biochemical and biomechanical reactions, favoring transformations in the limestones and the development of new features that can contribute to karst relief evolution in the North of Minas Gerais.

Key words: *Desmonostoc* sp., Mocó, *Kerodon rupestris*, Limestone.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 1: FEIÇÕES CÁRSTICAS E ASPECTOS FISIAGRÁFICOS DE MONTES CLAROS, MINAS GERAIS.....	21
Figura 1: <i>Lapiás</i> na Comunidade Samambaia em Montes Claros, Minas Gerais.....	27
Figura 2: <i>Kamenitza</i> encontrada na área de estudo em Montes Claros, Minas Gerais.	28
Figura 3: Fases de desenvolvimento de uma <i>Kamenitza</i>	28
Figura 4: Afloramento de calcário no Alto da Pena, Portugal.	29
Figura 5: Afloramento de calcário na ilha Sicília, Itália.	30
Figura 6: Entalhes de raízes <i>Wurzelkarren</i> em Montes Claros, Minas Gerais.....	30
Figura 7: <i>Lapiás</i> decorrentes do escoamento superficial da água.	31
Figura 8: <i>Lapiás</i> resultantes do escoamento da água e dos fatores estruturais.	32
Figura 9: Cobertura vegetal representativa dos <i>Lapiás</i> em Montes Claros, Minas Gerais.	36
Figura 10: Mapa geológico do município de Montes Claros, Minas Gerais.....	38
Figura 11: Cianobactéria <i>Desmonostoc</i> sp. encontrada em Montes Claros, Minas Gerais.....	40
Figura 12: Filamentos da cianobactéria <i>Desmonostoc</i> sp. com heterocisto e acineto.....	41
Figura 13: Mocó (<i>Kerodon rupestris</i>).	42

CAPÍTULO 2: DA COLONIZAÇÃO BIOLÓGICA À FORMAÇÃO DE BOLSÕES DE SOLOS E CROSTAS: UMA ANÁLISE DO PAPEL DE ATUAÇÃO DA CIANOBACTÉRIA *Desmonostoc* sp. E DO MOCÓ NO DESENVOLVIMENTO DE FEIÇÕES ASSOCIADAS À PAISAGEM CÁRSTICA NO NORTE DE MINAS GERAIS.....53

Figura 1: Localização das áreas estudadas e pontos coletados 60

Figura 2: Afloramentos de calcários em forma de Lapiás, Montes Claros - MG. 60

Figura 3: Rochas calcárias colonizadas, Montes Claros - MG. 61

Figura 4: Ambiente de colonização da cianobactéria *Desmonostoc* sp. 66

Figura 5: Fragmentos de rocha muito alterada. 67

Figura 6: Preenchimento dos poros por matéria orgânica. 67

Figura 7: Ambiente de colonização do Mocó. 68

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2: DA COLONIZAÇÃO BIOLÓGICA À FORMAÇÃO DE BOLSÕES DE SOLOS E CROSTAS: UMA ANÁLISE DO PAPEL DE ATUAÇÃO DA CIANOBACTÉRIA *Desmonostoc* sp. E DO MOCÓ NO DESENVOLVIMENTO DE FEIÇÕES ASSOCIADAS À PAISAGEM CÁRSTICA NO NORTE DE MINAS GERAIS.....53

Tabela 1: Fontes literárias que abordam os organismos estudados e as paisagens cársticas .. 58

Tabela 2: Características gerais das amostras coletadas..... 62

Tabela 3: Teores de carbono orgânico das frações húmicas e acidez potencial..... 65

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	18
CAPÍTULO 1: FEIÇÕES CÁRSTICAS E ASPECTOS FISIAGRÁFICOS DE MONTES CLAROS, MINAS GERAIS.....	21
RESUMO.....	22
ABSTRACT	23
1 INTRODUÇÃO.....	24
1.1 DESENVOLVIMENTO DE FEIÇÕES CÁRSTICAS	25
1.2 CLASSIFICAÇÕES CÁRSTICAS.....	26
1.3 ROCHAS CARBONÁTICAS.....	33
1.3.1 Mineralogia das rochas carbonáticas.....	33
1.3.2 Classificação das rochas carbonáticas.....	34
1.4 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS DE MONTES CLAROS, MINAS GERAIS.....	36
1.4.1 Características das cianobactérias.....	39
1.4.2 O roedor <i>Kerodon rupestris</i>.....	42
2 CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
CAPÍTULO 2: DA COLONIZAÇÃO BIOLÓGICA À FORMAÇÃO DE BOLSÕES DE SOLOS E CROSTAS: UMA ANÁLISE DO PAPEL DE ATUAÇÃO DA CIANOBACTÉRIA <i>Desmonostoc</i> sp. E DO MOCÓ NO DESENVOLVIMENTO DE FEIÇÕES ASSOCIADAS À PAISAGEM CÁRSTICA NO NORTE DE MINAS GERAIS.....	53
RESUMO.....	54
ABSTRACT	55
1 INTRODUÇÃO.....	56
2 MATERIAIS E MÉTODOS	58
2.1 ÁREA DE ESTUDO	59
2.2 AMOSTRAGEM	61
2.3 ANÁLISES LABORATORIAIS.....	63

3 RESULTADOS	64
3.1 CARBONO ORGÂNICO TOTAL, FRACIONAMENTO DE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS E ACIDEZ POTENCIAL	64
3.2 CARACTERIZAÇÃO MICROMORFOLÓGICA	66
3.2.1 Seções delgadas associadas à cianobactéria <i>Desmonostoc</i> sp.	66
3.2.1 Seções delgadas associadas ao Mocó.....	67
4 DISCUSSÃO.....	69
4.1 O PAPEL DA CIANOBACTÉRIA <i>Desmonostoc</i> sp. NA TRANSFORMAÇÃO SUPERFICIAL DO CALCÁRIO E GÊNESE DE FEIÇÕES	69
4.2 O PAPEL DO MOCÓ NA TRANSFORMAÇÃO SUPERFICIAL DO CALCÁRIO E GÊNESE DE FEIÇÕES	72
5 CONCLUSÃO	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85



INTRODUÇÃO GERAL

Foto: Araceli Mendonça de Oliveira

INTRODUÇÃO GERAL

O estudo do relevo em regiões cársticas, tema este de pesquisa, torna-se imprescindível para a análise geográfica, pois de acordo com Travassos (2010), Cavalcante e Bastos (2017) esses ambientes são evidências de climas que ocorreram no passado em consonância com diversos fenômenos do meio físico, os quais atuaram no substrato litológico em diferentes escalas temporais como fatores determinantes na gênese e evolução do carste.

As regiões cársticas apresentam uma litologia com predominância de rochas solúveis, como calcário, gesso, dolomita (ZHOU et al., 2020) e mármore (TANG et al., 2019), resultantes do processo geoquímico de dissolução do carbonato de cálcio pela água, superficial (meteórica) ou subterrânea (vadosa e freática), rica em gás carbônico e naturalmente acidificada (BIGARELLA, 2007; TIMO, 2014). No entanto, rochas não carbonáticas tais como as siliciclásticas (SILVA, 2013; FABRI; AUGUSTIN; AULER, 2014) em condições especiais podem apresentar processos de intemperismo semelhantes às rochas solúveis (MACIEL FILHO et al., 2013), porém suas feições apresentam formas diferentes em decorrência das características químicas das rochas (TALIM; BUENO, 2014).

Embora a água acidulada seja um dos principais agentes químicos na dissolução dos carbonatos (KOHLENER, 2009; DANTAS, 2018) vários estudos enfatizam que a ação dos microrganismos e da fauna podem desempenhar um papel significativo na transformação das rochas em superfície, na formação do solo e na evolução do relevo. Pinheiro et al. (2019) ao estudarem sobre a biodeterioração de monumentos de calcário em Portugal, afirmaram que algas, cianobactérias, fungos, bactérias e líquens são capazes de danificar o substrato de carbonato. Golubiel, Seong-Joo e Browne (2000) definiram as cianobactérias como arquitetas de estruturas sedimentares, pois participam na produção, construção e destruição de sedimentos. Warren et al. (2001) ao investigarem o processo de degradação da ureia concluíram que os microrganismos não atuam apenas como catalisadores biogeoquímicos para a precipitação, mas suas superfícies celulares atuam como modelos altamente eficazes para promoverem a nucleação de carbonatos.

Lian et al. (2008) estudando o efeito do intemperismo microbiano em rochas carbonáticas, mostraram que os microrganismos por meio de diversas atividades geoquímicas e geológicas promovem a corrosão, precipitação, formação e evolução dos solos. Osório-Rodrigues e Sanchez-Quinonez (2018) ao analisarem a colonização de cianobactérias em formações cretáceas Colombianas concluíram que esses microrganismos exercem um papel relevante na ligação e formação de estruturas sedimentares. Levett et al. (2020) pesquisando

sobre assinaturas geoquímicas de intemperismo e precipitação, demonstraram a importância dos microrganismos na dissolução e reprecipitação do ferro em cangas, na Província Mineral de Carajás, Brasil. Rossell et al. (2005), Ecke et al. (2017) e Ulicsni et al. (2020) em seus estudos sobre os castores relataram que esses organismos são capazes de modificar significativamente a geomorfologia dos ecossistemas.

A dissolução do carbonato de cálcio resulta em diversas morfologias com feições específicas como lapiás, poljés, dolinas, canhões, uvalas, cavernas, cones cársticos, entre outras (FLORENZANO, 2008). De extrema beleza cênica esses ambientes abrigam significativos elementos da biodiversidade, pois são áreas complexas com expressivas feições cársticas, tanto em micro como em macro escala, onde se encontram aquíferos formadores de importantes mananciais e espécies endêmicas com significativo valor científico (TRAVASSOS, 2019).

No município de Montes Claros, Norte de Minas Gerais, é possível encontrar um complexo paisagístico que se destaca pela sua singularidade e beleza de suas formas cársticas. Seus afloramentos de rochas calcárias em forma de lapiás são colonizados por cianobactérias do gênero *Desmonostoc* sp. e por roedores *Kerodon rupestris*, conhecidos como Mocós.

Tendo em vista os estudos supracitados que os microrganismos e a fauna possam participar de transformações na escala local que, em conjunto, levam à transformação da paisagem, tomou-se como base os seguintes questionamentos:

- Qual o papel desempenhado pela cianobactéria *Desmonostoc* sp. e pelo Mocó no processo de biocarstificação?

- Essas espécies participam diretamente na degradação e formação do carste ou são apenas mediadoras que impulsionam transformações no relevo cárstico?

A hipótese que sustentou a pesquisa foi que as espécies em estudo oportunizam interações com o substrato litológico estimulando a formação de biofilmes microbianos, e consequentemente, participam de transformações no relevo cárstico dissolvendo carbonatos, precipitando minerais secundários e transformando rochas em solos.

Estudos recentes vêm sendo realizados sobre as cianobactérias no Brasil como dos autores Obuekwe et al. (2019), Guimarães et al. (2020) e Wieliczko et al. (2020). No entanto, o que se sabe sobre esses microrganismos se refere, principalmente, à sua existência em ecossistemas aquáticos, e mesmo sendo os Mocós mais adaptados aos habitats rochosos (ALENCAR JÚNIOR, 2011), seus estudos se limitam às adaptações morfológicas, fisiológicas ou comportamentais como nos estudos de Aro (2019) e Souza et al. (2020). Desta forma, o pioneirismo do presente estudo se justificou pela importância do conhecimento sobre

biocarstificação em maciços de calcário e pela escassez de pesquisas direcionadas à influência da cianobactéria *Desmonostoc* sp. e do Mocó no processo de evolução do relevo cárstico.

Em forma de artigo, a dissertação foi estruturada em dois capítulos cada um com propostas específicas, porém voltadas para o cumprimento do objetivo geral que foi:

- Analisar o papel da cianobactéria *Desmonostoc* sp. e do Mocó (*Kerodon rupestris*) na transformação superficial do calcário e gênese de feições que contribuem com a evolução do relevo cárstico no Norte de Minas Gerais.

E, como objetivos específicos:

- Descrever os principais componentes fisiográficos da área em estudo como cobertura vegetal, clima, hidrografia, geomorfologia, geologia e pedologia;
- Apresentar as principais características das cianobactérias e do Mocó;
- Determinar o teor de carbono orgânico total das substâncias húmicas e acidez potencial;
- Investigar as características micromorfológicas presentes nas crostas e rochas calcárias colonizadas pela cianobactéria *Desmonostoc* sp. e pelo Mocó.

O percurso metodológico e operacional para o cumprimento dos objetivos partiu-se de uma revisão teórica, da observação e coleta de dados em áreas representativas do relevo cárstico e de análises laboratoriais. Coletou-se em dois afloramentos de rochas calcárias dezesseis amostras constituídas por excrementos, bolsões de solo, crostas e rochas; realizou-se o fracionamento químico da matéria orgânica presente nos bolsões de solo para quantificação do teor de carbono orgânico total das frações húmicas e determinou-se a acidez potencial e as características micromorfológicas em diferentes amostras.

Deste modo, o *Capítulo 1: Feições cársticas e aspectos fisiográficos de Montes Claros, Minas Gerais*, abordou-se a fundamentação teórica essencial para o desenvolvimento dos assuntos tratados no próximo capítulo. Procurou-se discutir o conceito de feição cárstica em rochas carbonáticas, seu processo de desenvolvimento, sua mineralogia e classificações, dando ênfase aos lapiás em forma de pias ou bacias de dissolução, as Kamenitzas em que a cianobactéria *Desmonostoc* sp. cresce preferencialmente. A área de estudo foi caracterizada e contextualizada a partir dos aspectos fisiográficos associados às suas particularidades.

O *Capítulo 2: Da colonização biológica à formação de bolsões de solos e crostas: uma análise do papel de atuação da cianobactéria Desmonostoc sp. e do Mocó no desenvolvimento de feições associadas à paisagem cárstica no Norte de Minas Gerais*, contemplou-se especificamente o desenvolvimento da pesquisa. Foram apresentados os procedimentos metodológicos adotados como suporte para investigação e os resultados alcançados sobre o

papel de atuação da cianobactéria *Desmonostoc* sp. e do Mocó no processo de transformação do relevo cárstico, foram indicados, analisados e discutidos.

Além destes dois capítulos, a *Introdução Geral* apresentou-se o tema da pesquisa, os questionamentos, a hipótese, os objetivos, o percurso metodológico, a justificativa e a estruturação da dissertação. E para finalizar, em *Considerações Finais* abordou-se os principais resultados alcançados ao longo da pesquisa, os quais foram confrontados com a hipótese, com os questionamentos e objetivos apresentados.

A partir do trabalho elaborado espera-se contribuir para a ciência básica através de novos conhecimentos sobre a biocarstificação em maciços de calcário, pois têm-se neste estudo os primeiros resultados associados ao papel de atuação da cianobactéria *Desmonostoc* sp. e do Mocó na transformação superficial do relevo cárstico no Norte de Minas Gerais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR JÚNIOR, R. N. **O repertório acústico de um especialista de rochedos da caatinga, o Mocó.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Psicologia. Área de concentração: Psicologia Experimental – Instituto de Psicologia da USP. SP, 2011.

ARO, M. M.; SANTOS, A. C.; SILVEIRA, E. E.; LISBOA NETO, A. F. S.; OLIVEIRA, M. F.; ASSIS NETO, A. C. Morphological tools to evaluate the digestory apparatus in rocky cavity (*Kerodon rupestris*). **Microsc Res Tech.**, 2019. 696-708p.

BIGARELLA, J. J. et. al. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais.** 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007.

CAVALCANTE, D. R.; BASTOS, F. H. Relações entre oscilações climáticas e relevo cárstico no semiárido cearense, o exemplo do município de Tejuçuoca. In: RASTEIRO, M.A.; TEIXEIRA-SILVA, C.M.; LACERDA, S.G. (orgs.) **Congresso Brasileiro De Espeleologia**, Ouro Preto. Anais. Campinas: SBE, 34, 2017. 439-445p.

DANTAS, R. B. Análise de Feições da Paisagem Cárstica na Área de Proteção Ambiental de São Desidério-BA. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.12, n.3, 2018. 848-858p.

ECKE, F. et al. Meta-analysis of environmental effects of beaver in relation to artificial dams. **Environmental Research Letters.** v.12, n.11, 2017.

FABRI, F.; AUGUSTIN, Cristina Helena Ribeiro Rocha; AULER, Augusto Sarreiro. **Relevo Cárstico em Rochas Siliciclásticas: Uma Revisão com Base na Literatura.** **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.15, n.3, 2014. 339-351p.

FLORENZANO, T. G. Introdução à Geomorfologia. In: FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia: Conceitos e Tecnologias Atuais.** SP: Oficina de Textos, 2008. 11-30p.

GOLUBIEL, S.; SEONG-JOO, L.; BROWNE, K.M. Cyanobacteria: Architects of Sedimentary Structures. In: Riding R.E., Awramik S.M. (eds) *Microbial Sediments*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2000. 57-67p.

GUIMARAES, A.; SILVA, P. H.; CARNEIRO, F. M.; SILVA, D. P. Usando modelos de distribuição para estimar florações de cianobactérias fitossanitárias no Brasil. **Biota Neotropica**. [online]. 2020, vol.20, n.2, e20190756. Epub Mar 23, 2020.

KOHLER, H.C. Geomorfologia cárstica. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S. B. da (Orgs.) **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009. 309-334p.

LEVETT, A. et al. Microbial weathering signatures in lateritic ferruginous duricrusts. **Earth and Planetary Science Letters**. v.538, n.5, 2020.

LIAN B.; CHEN Y.; ZHU L.; YANG R. **Effect of Microbial Weathering on Carbonate Rocks**. *Earth Science Frontiers*, v.15, n.6, 2008, 90-99p.

MACIEL FILHO, C. L.; NUMMER, A. V.; SILVA, J. L. S.; SANGO, D. S.; DESCOVI FILHO, L. **Feições de carste sobre a formação serra geral na região de Vacaria, RS, e Lages, SC**. *Caminhos de Geografia Uberlândia* v.14, n.48, 2013. 197-208p.

OBUEKWE, I. S. et al. Arsenic-contaminated sediment from mining areas as source of morphological and phylogenetic distinct cyanobacterial lineages. **Algal Research**, v.42, 2019.

OSORIO-RODRIGUEZ, D.; SANCHEZ-QUIÑÓNEZ, C. A. Biological and geological characterization of modern biofilms and microbial mats and comparison with similar lithified structures in Colombian Cretaceous formations. **Earth Sciences Research Journal**, v. 22, n.3, 2018. 159-168p.

PINHEIRO, A. C. et al. Limestone biodeterioration: A review on the Portuguese cultural heritage scenario, **Journal of Cultural Heritage**. v.36, 2019, 275-285p.

ROSELL, F.; BOZÉR, O.; COLLEN, P.; PARKER, H. Ecological impact of beavers *Castor fiber* and *Castor canadenses* and their ability to modify ecosystems. **Mammal Society**, *Mammal Review*, v.35, n.3-4, 2005. 248-276p.

SILVA, M. B. **Caracterização Pedológica e gênese de solos em duas topossequências no sistema cárstico da Serra da Bodoquena – MS**. Tese de doutorado. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Ciências do solo, Seropédica-RJ: 2013.

SOUZA, M. V.; CHAVES, S. A. M.; HUGOT, J.P.; IÑIGUEZ, A. M. New parasite records from *Kerodon rupestris* (rodentia, caviidae) an endemic species to northeastern Brazil. **Oecologia Australis**, v.24, n.1, 2020. 96-203p.

TALIM, H. L. C.; BUENO, G. T. Análise das feições cársticas desenvolvidas no maciço das agulhas negras - Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.15, n.3, 2014. 327-338p.

TANG, J.; TANG, X.; QIN, Y.; HE, Q.; YI, Y.; JI, Z. Karst rocky desertification progress: Soil calcium as a possible driving force. **Science of The Total Environment**, v.649, 2019. 1250-1259p.

TIMO, M. B. **Mapeamento geomorfológico da Região cárstica do córrego do cavalo, Piumhi (MG)**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2014.

TRAVASSOS, L. E. P. **A importância cultural do carste e das cavernas**. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2010.

TRAVASSOS, L. E. P. **Princípios de Carstologia e Geomorfologia Cárstica**. Brasília: ICMBio, 2019.

ULICSNI, V.; BABAI, D.; JUHA´SZ, E.; MOLNA´R, Z.; BIRO, M. Local knowledge about a newly reintroduced, rapidly spreading species (Eurasian beaver) and perception of its impact on ecosystem services. **Plos One**, v.15, n.5, 2020.

WARREN, L. A.; MAURICE, P. A.; PAMAR, N.; GRANT FERRIS, F. Precipitation: Implications for Interpreting Calcite Precipitation and for Solid-Phase Capture of Inorganic Contaminants. **Geomicrobiology Journal**, v.18, n.1, 2001. 93-115p.

WIELICZKO, A. R.; RODRIGUES, L. R.; MOTTA-MARQUES, D.; CROSSETTI, L. O. Phytoplankton structure is more influenced by nutrient enrichment than by temperature increase: an experimental approach upon the global changes in a shallow subtropical lake. **Limnetica**, v.39, n.1, 2020. 405-418 p.

ZHOU, L.; WANG, X.; WANG, Z.; ZHANG, X.; CHEN, C.; LIU, H. The Challenge of Soil Loss Control and Vegetation Restoration in the Karst Area of Southwestern China. **International Soil and Water Conservation Research**, v.8, n.1, 2020, 26-34 p.



CAPÍTULO 1:

Feições cársticas e aspectos fisiográficos de
Montes Claros, Minas Gerais

Foto: Araceli Mendonça de Oliveira

RESUMO

OLIVEIRA, Araceli Mendonça de. **Feições cársticas e aspectos fisiográficos de Montes Claros, Minas Gerais**. Uberaba: UFTM, 2020. Cap. 1 (Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental).

O Capítulo 1 teve como objetivo fazer uma revisão literária das feições cársticas e os aspectos do meio físico de Montes Claros, Minas Gerais, como subsídio para compreensão e análise do processo de transformação do relevo cárstico na área de estudo. A metodologia partiu de fontes bibliográficas que abordam o assunto tratado, bem como de visitas a campo e observações morfológicas da cianobactéria por microscopia, visando incorporar informações novas à discussão do embasamento teórico. Foi abordado que os estudos realizados no Planalto do Kras pelo geógrafo sérvio Jovan Cvijić contribuíram para estabelecer às bases científicas para a ciência do carste, pois seus conhecimentos contribuíram para caracterizar a morfologia de formações carbonáticas resultantes de processos geoquímicos de dissolução. Várias são as formas de classificação das rochas carbonáticas, porém a mais utilizada está relacionada com os teores de óxido de magnésio e cálcio. O desenvolvimento de feições cársticas ocorrem principalmente pela ação da água rica em gás carbônico e levemente acidulada que atua no processo de dissolução das rochas. O carste pode ser classificado em endocarste, que se refere à expressão subsuperficial do sistema cárstico, exocarste que corresponde as características morfológicas superficiais e epicarste que corresponde a uma zona pouco espessa e muito fraturada localizada na zona logo abaixo da superfície, entre o solo e a rocha calcária. Alguns autores ressaltam que há um conjunto de lapiás fundamentalmente de origem bioquímica como *Kamenitza*, *Grübchenkarren*, *Deckenkarren*, *Honeycomb*, *Biokarstic borings*, *Rundkarren* e *Wurzelkarren*. Outras formas de lapiás são decorrentes do escoamento superficial da água como *Rinnenkarren*, *Mäanderkarren*, *Rillenkarren*, *Hohlkarren*, *Wandkarren*, *Trittkarren* e *Rillenstaine*. A ação conjunta de escoamento da água e dos fatores estruturais resultam em lapiás como *Kluftkarren*, *Spitzkarren*, *Schichtfugenkarren*, *Karrentische* e *Bogaz*. No município de Montes Claros o relevo cárstico atraem olhares curiosos pelo seu potencial paisagístico presente nas diversas feições tipicamente dissolutivas da região. Além de suas belezas cênicas, essas áreas apresentam diversas formas de vida, em destaque as cianobactérias *Desmonostoc* sp. e os Mocós (*Kerodon rupestris*), que fazem do carste o seu habitat.

Palavras-chave: Lapiás. Calcário. Cianobactérias. Mocós.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Araceli Mendonça de. **Karst features and physiographic aspects of Montes Claros, Minas Gerais State, Brazil**. Uberaba: UFTM, 2020. Chap. 1 (Master's Dissertation in Environmental Science and Technology).

Chapter 1 aimed to do a literary review on karst features and aspects of the physical environment of Montes Claros, Minas Gerais State, Brazil, as a basis for understanding and analyzing the process of transformation of karst relief in the study area. The methodology started from bibliographic sources that approach the subject treated, as well as field visits and analyzing morphological aspects of cyanobacteria by microscopy, incorporating new information to the discussion of the theoretical background. It was discussed that the studies carried out in the Kras Plateau by the Serbian geographer Jovan Cvijić contributed to establish scientific bases for karst science, as his knowledge contributed to characterize the morphology of carbonate formations resulting from geochemical dissolution processes. There are several ways of classifying limestones, but the most used is related to the levels of magnesium oxide and calcium. The development of karstic features occurs mainly by the action of water rich in carbon dioxide and slightly acidulated which acts in the process of dissolving the rocks. Karst can be classified into endocarste, which refers to the subsurface expression of the karst system, exocarste which corresponds to the surface morphological characteristics and epicarste which corresponds to a thin and very fractured area located in the area just below the surface, between the soil and limestone rock. Some authors point out that there is a set of lapiás fundamentally of biochemical origin such as *Kamenitza*, *Grübchenkarren*, *Deckenkarren*, *Honeycomb*, *Biokarstic borings*, *Rundkarren* and *Wurzelkarren*. Other forms of lapiás are due to the runoff of water as *Rinnenkarren*, *Mäanderkarren*, *Rillenkarrren*, *Hohlkarren*, *Wandkarren*, *Trittkarren* and *Rillenstaine*. The joint action of water drainage and structural factors results in lapiás such as *Kluftkarren*, *Spitzkarren*, *Schichtfugenkarren*, *Karrentische* and *Bogaz*. In the municipality of Montes Claros, karst relief attracts curious views due to its landscape potential present in the various typically dissolving features in the region. In addition to their scenic beauty, these areas have different forms of life, in particular the cyanobacteria *Desmonostoc* sp. and the Mocós (*Kerodon rupestris*), that make karst their habitat.

Key words: Lapiás. Limestone. Cyanobacteria. Mocós.

FEIÇÕES CÁRSTICAS E ASPECTOS FISIAGRÁFICOS DE MONTES CLAROS, MINAS GERAIS

1 INTRODUÇÃO

O termo carste (karst), inicialmente foi empregado pelo geógrafo sérvio Jovan Cvijić em estudos realizados no Planalto de Kras, localizado em áreas limítrofes entre Itália e Eslovênia (TRAVASSOS, 2019). Sua obra *Das Karstphänomen* publicada em 1893 em alemão, foi a primeira produção científica que contribuiu para estabelecer às bases para a ciência do carste (HARDT; RODET; PINTO, 2010), ou seja, seus conhecimentos contribuíram para designar a morfologia regional das formações carbonáticas resultantes de processos geoquímicos de dissolução em rochas solúveis (GUARESCHI, 2012; TRAVASSOS, 2019).

Com diferenças no papel desempenhado pelo intemperismo químico e físico (FREIRE et al., 2017), estudos recentes apontam que as feições cársticas estão presentes em diversas litologias de rochas como as siliciclásticas e não apenas relacionadas aos processos de dissolução em rochas carbonáticas como o calcário, o dolomito e o mármore (SILVA, 2013; FABRI; AUGUSTIN; AULER, 2014). As rochas sedimentares carbonáticas, que formam a paisagem cárstica na área de estudo, são as mais solúveis, pois apresentam como principal componente mineralógico a calcita (CaCO_3) e/ou a dolomita $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ que dissociam-se em íons de cálcio (Ca^{2+}) e/ou carbonato (CO_3^{2-}) pela ação da água acidulada (LANHARE, 2014) formando as mais diversas feições cársticas.

No Brasil, cerca de 5 a 7% do seu território é ocupado por relevos cársticos, sendo que as principais unidades estão localizadas no Cráton São Francisco e abrangem os estados de Minas Gerais, Goiás e Bahia, pertencentes aos Grupos Bambuí e Una com expressivas litologias carbonáticas e dolomíticas do Proterozoico Superior. Em Minas Gerais, cerca de 3 a 5% de seu território é constituído por áreas cársticas que se encontram em compartimentos rochosos de diversas idades e formações geológicas específicas onde se encontram espécies endêmicas, extensos mananciais, registros histórico-geográficos e significativos espeleotemas que podem fornecer diversas informações paleoambientais (KARMANN, 1994; TRAVASSOS, 2010; TRAVASSOS, 2019).

A metodologia do Capítulo 1 partiu de fontes bibliográficas que abordam o assunto tratado, bem como de visitas a campo e observações morfológicas da cianobactéria sendo analisada a presença ou ausência de heterocistos e acinetos através de imagens obtidas pelo microscópio Biológico Trinocular modelo Zeiss - Primo Star com iluminação LED e câmera

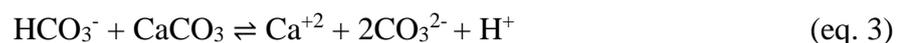
digital, visando incorporar informações novas à discussão do embasamento teórico. Deste modo, o objetivo foi realizar uma revisão literária sobre feições cársticas e os aspectos do meio físico de Montes Claros, Minas Gerais, como subsídio para compreensão e análise do processo de transformação do relevo cárstico na área de estudo.

1.1 DESENVOLVIMENTO DE FEIÇÕES CÁRSTICAS

O desenvolvimento de feições cársticas é resultado principalmente da ação da água rica em CO₂ e levemente acidulada que atua no processo de dissolução de rochas carstificáveis (DANTAS, 2018; TRAVASSOS, 2019). Para Kohler (2011) e Silva (2013) o grau de desenvolvimento varia em decorrência do teor de carbonato de cálcio, da estrutura litológica representada por fissuras e/ou fraturas, da hidrologia, do relevo e do clima. Ferreira (2013) ainda complementa que o processo é contínuo e de caráter policíclico em decorrência de ser interrompido e retomado várias vezes ao longo do tempo.

A água da chuva (H₂O) quando absorve o gás carbônico (CO₂) da atmosfera ou da matéria orgânica em decomposição, forma uma solução aquosa ácida, o ácido carbônico (H₂CO₃) (eq. 1). Ao encontrar com a rocha carbonática, este se dissocia formando íons de hidrogênio (H⁺) e bicarbonato (HCO₃⁻) (eq. 2), que reage com a calcita (CaCO₃) dissolvendo-a lentamente, liberando cálcio (Ca⁺²), carbonato (CO₃²⁻) e hidrogênio (H⁺) (eq. 3). O carbonato (CO₃²⁻) combina com o hidrogênio (H⁺) formando bicarbonato (HCO₃⁻) (eq. 4), este altamente solúvel é conduzido para fora do sistema provocando o aumento da porosidade e a formação das mais variadas feições cársticas (FERREIRA, 2013; SILVA, 2013).

A solubilidade das rochas carbonáticas depende principalmente de íons de hidrogênio (H⁺), o qual é controlado pelo dióxido de carbono (CO₂), sendo representada pelas equações:



Como os sistemas de reações são dinâmicos e reversíveis tem-se como resultado final:



Desta forma o intemperismo químico atua como agente de gênese e desenvolvimento das mais belas e fascinantes feições cársticas. Quando ocorre a completa dissolução dos minerais, não formando novas fases sólidas, este processo é denominado “congruente” e o carste evolui de forma mais rápida, porém se apenas parte dos minerais se dissolvem é denominado “incongruente” e menos notório a existência do carste (FORD; WILLIAMS, 2007; HARDT; PINTO, 2009; SILVA, 2013).

Em regiões quentes e úmidas com presença de vegetação abundante, a morfologia cárstica é altamente desenvolvida, pois a cobertura vegetal propicia a existência de um solo ácido, rico em húmus (BARRETO, 2007) que aumenta a acidez da água e seu processo de dissolução. O sul da China, com cerca de meio milhão de km² em meio à floresta, é um dos exemplos mais espetaculares e de referência mundial em paisagens cársticas esculpidas pela ação do clima quente e úmido em rochas calcárias (FORD; WILLIAMS, 2007; SILVA, 2013).

Em consequência da carência de cobertura vegetal densa, baixa pluviosidade, solos pouco desenvolvidos e pequena quantidade de gás carbônico (ELORZA, 2008; SILVA, 2013; CALVACANTE; BASTOS, 2017), as feições cársticas em regiões de clima árido ou semiárido são pouco desenvolvidas, ou até mesmo ausentes, conforme destacado por Bigarella, Becker e Santos (2009). Os autores ainda afirmaram que a presença de feições cársticas nessas áreas podem ser explicadas como relíquias formadas em decorrência de variações paleoclimáticas onde as precipitações eram significativas. Áreas de climas frios são favoráveis ao processo de carstificação devido a maior capacidade da água absorver o gás carbônico e este torna a água mais agressiva a dissolução dos carbonatos (TRAVASSOS, 2010).

1.2 CLASSIFICAÇÕES CÁRSTICAS

No Brasil, a forma mais utilizada para classificar o carste, parte dos estudos realizados por Bögli (1980) que divide entre endocarste e exocarste, sendo o último o mais importante para a compreensão deste estudo, e posteriormente, Piló (2000) que adiciona o termo epicarste na classificação (FERREIRA; UAGODA, 2019). O endocarste se refere à expressão subsuperficial do sistema cárstico caracterizado pela ocorrência de cavernas, condutos e salões (GAMBARINI, 2012) que resultam da percolação da água através de fendas ou fraturas nas rochas (PILÓ, 2000). Para Monteiro (2014), as cavernas de dissolução são as feições mais representativas de um relevo cárstico subterrâneo, pois estão diretamente relacionadas com o processo de dissolução fundamental para sua gênese e evolução.

As morfologias superficiais geradas pela dissolução de rochas solúveis são classificadas como exocartes e compreendem desde depressões fechadas em formato circular ou oval, as chamadas *dolinas*, até depressões mais amplas como *uvalas* e *poljés* (PILÓ, 2000; TRAVASSOS, 2019). Os *canhões* são feições típicas de vales escarpados e íngremes; já os *cones* cársticos constituem vertentes fortemente inclinadas que resistiram à dissolução e os *lapiás* (Karren), forma cárstica encontrada na área de estudo (Figura 1), se caracterizam por sulcos ou canais superficiais que evidenciam o caminho percorrido pela água (PILÓ, 2000).

Figura 1: *Lapiás* na Comunidade Samambaia em Montes Claros, Minas Gerais.



Fonte: Autor, (2019).

Para Guerra e Cunha (2011) os lapiás representam a fase inicial de formação do carste, sendo de grande importância o seu estudo, pois fornecem dados de evolução e gênese para as diversas feições cársticas. Em um estudo sobre classificação e tipologias dos lapiás, Rodrigues (2012) ressalta que há um conjunto de lapiás fundamentalmente de origem bioquímica, ou seja, se formam a partir da ação conjunta entre o processo de dissolução e os diferentes tipos de organismos, sendo elas: bacias ou pias de dissolução *Kamenitza*, alvéolos de dissolução ou lapiás alveolares *Grübchenkarren*, alvéolos suavizados *Deckenkarren* e lapiás em ninhos ou favos de abelhas *Honeycomb*.

As bacias ou pias de dissolução *Kamenitzas* (Figura 2) são pequenas e médias depressões geralmente circulares, ovoides ou elípticas (BUENO; TALIM, 2014) formadas a partir da concentração de ácidos húmicos (SALVIA, 2006) que se desenvolvem em estruturas litológicas horizontais ou sub-horizontais com fundo geralmente plano no pavimento calcário (VERESS, 2010; RODRIGUES, 2012). O processo de dissolução na *Kamenitza* tende a ocorrer das laterais junto à base (RODRIGUES, 2012), pois conforme explicou Veress (2010) a matéria orgânica no fundo da *Kamenitza* leva a água acidulada em direção a lateral contribuindo para o processo de dissolução da rocha, principalmente se as paredes apresentarem ranhuras.

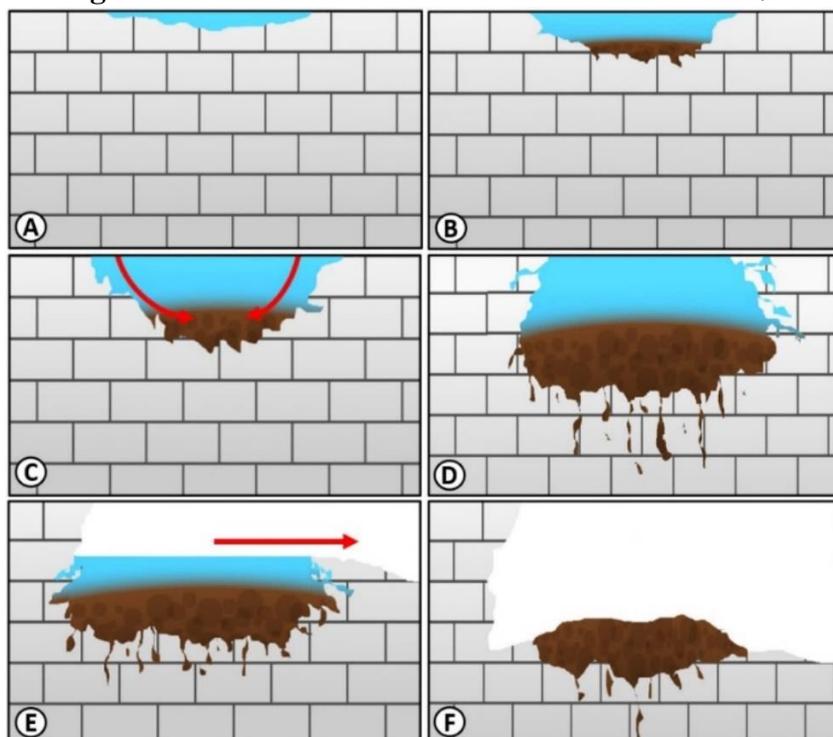
Figura 2: *Kamenitza* encontrada na área de estudo em Montes Claros, Minas Gerais.



Fonte: Autor, (2019).

Em um estudo sobre *Kamenitzas*, Cucchi (2009) também explicou que as paredes evoluem mais que o fundo por causa do soluto e de materiais que se acumulam sobre o piso. O autor ainda complementa que há várias fases no processo de desenvolvimento das *Kamenitzas* (Figura 3): a primeira fase chamada *Formação* corresponde ao processo de corrosão subcutânea provocada por águas, que juntamente com solo, sedimentos clásticos, matéria orgânica e atividade biológica provocam a denudação. A segunda fase *Desenvolvimento*, corresponde na ampliação lateral que, por vezes, é acompanhada por escoamento ou canais que ocasionam a progressiva *Degradação* e logo o seu *Desaparecimento*, formando novas feições cársticas.

Figura 3: Fases de desenvolvimento de uma *Kamenitza*.

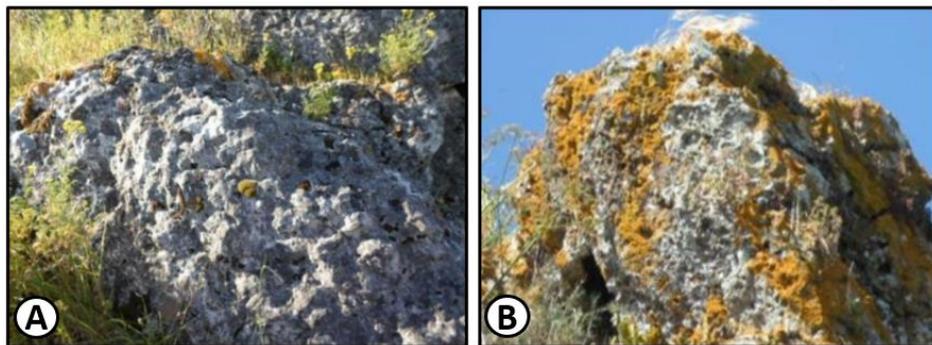


Nota: A e B) Formação: acúmulo de água acidulada e material orgânico. C e D) Desenvolvimento e ampliação lateral. E) Degradação progressiva. F) Desaparecimento. **Fonte:** Autor, (2020) adaptado de Cucchi, (2009).

Para atingir uma profundidade de 10 cm e um raio de 20 cm, Rose e Vincent (1986) em um estudo sobre *Kamenitzas* na Reserva Natural de Gait Barrows, na Inglaterra, estimaram aproximadamente 3.260 anos. Já Cucchi, Forti e Finocchiaro (1987) realizaram uma pesquisa sobre a dissolução no Karst de Triest, na Itália, e concluíram que a taxa de redução foi de 0,02 e 0,03 mm/ano e para atingir 4-5 cm precisaria de pelo menos 2.500 anos para ser completamente formada (CUCCHI, 2009). O tempo de formação de uma *Kamenitza* depende de várias intempéries e para que o processo seja eficiente às condições climáticas, um ambiente ácido, altos índices de gás carbônico (GILLI, 2015) e a composição química e física da rocha, são essenciais para o processo de dissolução da rocha (CUCCHI, 2009; TRAVASSOS, 2019).

Com dimensões centimétricas e independentes do declive das superfícies, os alvéolos de dissolução ou lapiás alveolares *Grübchenkarren* (Figura 4A) se desenvolvem sobre a rocha desnuda ou semidesnuda devido a ação da matéria orgânica (ALCÁNTARA, 2019), que para Rodrigues (2012) e Santos (2014), parece desempenhar papel dominante no processo de formação dos alvéolos. Já os alvéolos suavizados *Deckenkarren*, devido à ação direta das raízes de plantas, apresentam formas alveolares boleadas, enquanto que os lapiás em forma de ninhos ou favos de abelha *Honeycomb* (Figura 4B) são microformas com poucos milímetros e alguns centímetros que podem evoluir para formações alveolares (RODRIGUES, 2012).

Figura 4: Afloramento de calcário no Alto da Pena, Portugal.

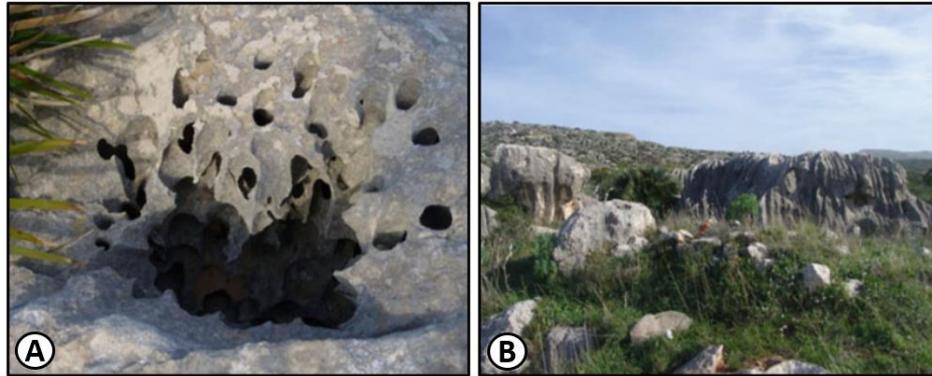


Nota: A) Lapiás em alvéolos de dissolução *Grübchenkarren*. B) Lapiás em ninhos ou favos de abelha *Honeycomb*. **Fonte:** Adaptado de Santos, (2014).

Travassos (2019) ainda cita três formações cársticas de origem bioquímica: as perfurações biocársticas *Biokarstic borings* (Figura 5A) que correspondem aos *Nanokarren* geralmente inferiores a 1 mm ou mesmo com outras dimensões, desenvolvidos através da atividade biológica com perfurações microscópicas, milimétricas e centimétricas; os lapiás em sulcos arredondados *Rundkarren* (Figura 5B) formados pela rocha coberta pelo húmus ou pela

vegetação e os entalhes de raízes *Wurzelkarren* (Figura 6) desenvolvidos pela ação química dos ácidos orgânicos e pelas raízes que fragmentam a rocha.

Figura 5: Afloramento de calcário na ilha Sicília, Itália.



Nota: A) Perfurações biocársticas *Biokarstic borings* em Sella Cofano. B) Lapiás em sulcos arredondados *Rundkarren*, Zimmaria. **Fonte:** Adaptado de Ruggieri, (2016).

Figura 6: Entalhes de raízes *Wurzelkarren* em Montes Claros, Minas Gerais.

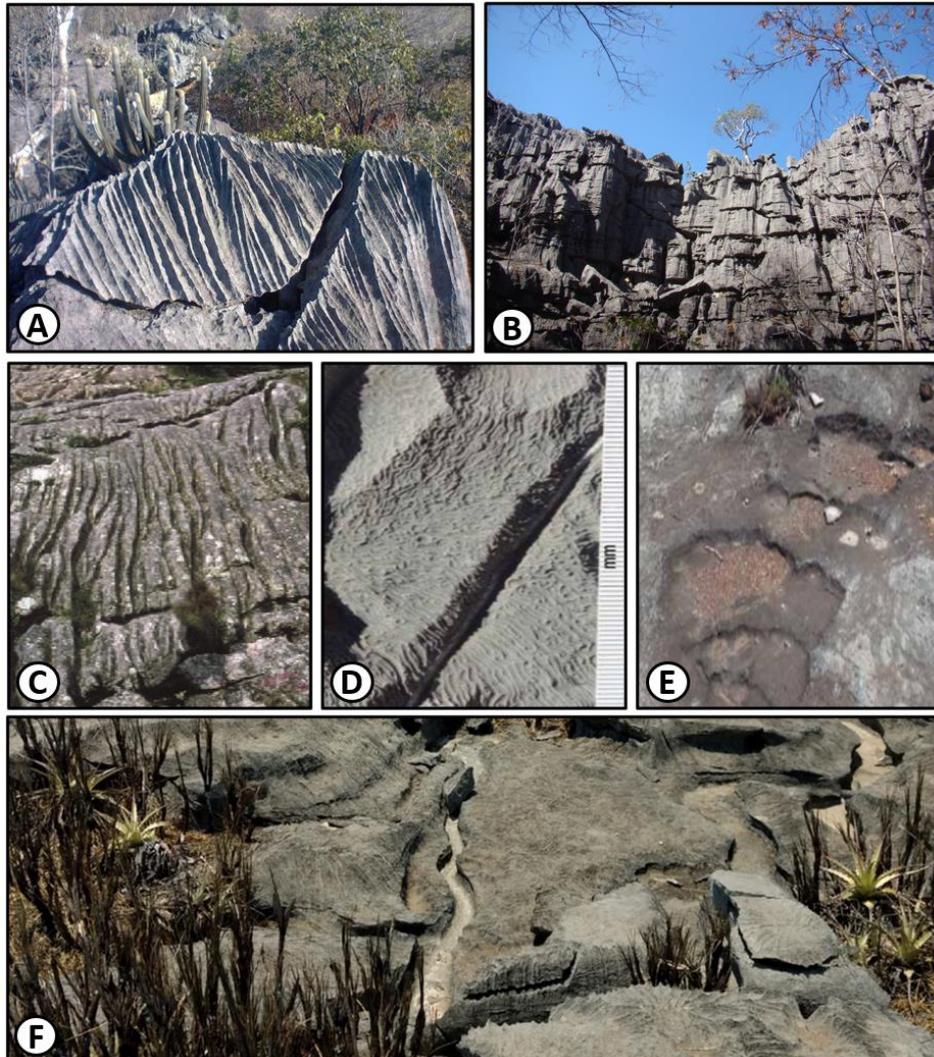


Fonte: Autor, (2019).

Outras formas de lapiás são desenvolvidas e classificadas conforme as características hidrodinâmicas e estruturais da rocha hospedeira. Os principais lapiás decorrentes do escoamento superficial da água (Figura 7) são: os lapiás em sulcos ou ranhuras *Rinnenkarren* que se desenvolvem em superfícies inclinadas e com dimensões que aumentam em direção à base, decorrente do escoamento ser mais intenso nos canais iniciais; os lapiás meandriformes *Mäanderkarren* ocorrem em superfícies levemente inclinadas e com formas semelhantes aos meandros em canais fluviais; os lapiás em caneluras *Rillenkarren* se formam em superfícies fortemente inclinadas ou quase verticais sobre o topo de uma vertente e desaparece em direção à base; os lapiás em sulcos suavizados *Hohlkarren* parecidos com os lapiás em sulcos, porém com dimensões superiores; os lapiás verticais *Wandkarren* apresentam ranhuras mais profundas que os lapiás em sulcos e se formam pelo escoamento da água em superfícies verticais; os lapiás em degraus *Trittkarren* se formam pelo movimento da água sobre irregularidades superficiais

formando degraus; e os lapiás em microcaneluras *Rillenstaine* que correspondem a pequenas ranhuras, cerca de 1 mm, que se formam pela fina camada de água, a qual é controlada pela ação eólica e pelas depressões da rocha (RODRIGUES, 2012; TRAVASSOS, 2019).

Figura 7: *Lapiás* decorrentes do escoamento superficial da água.

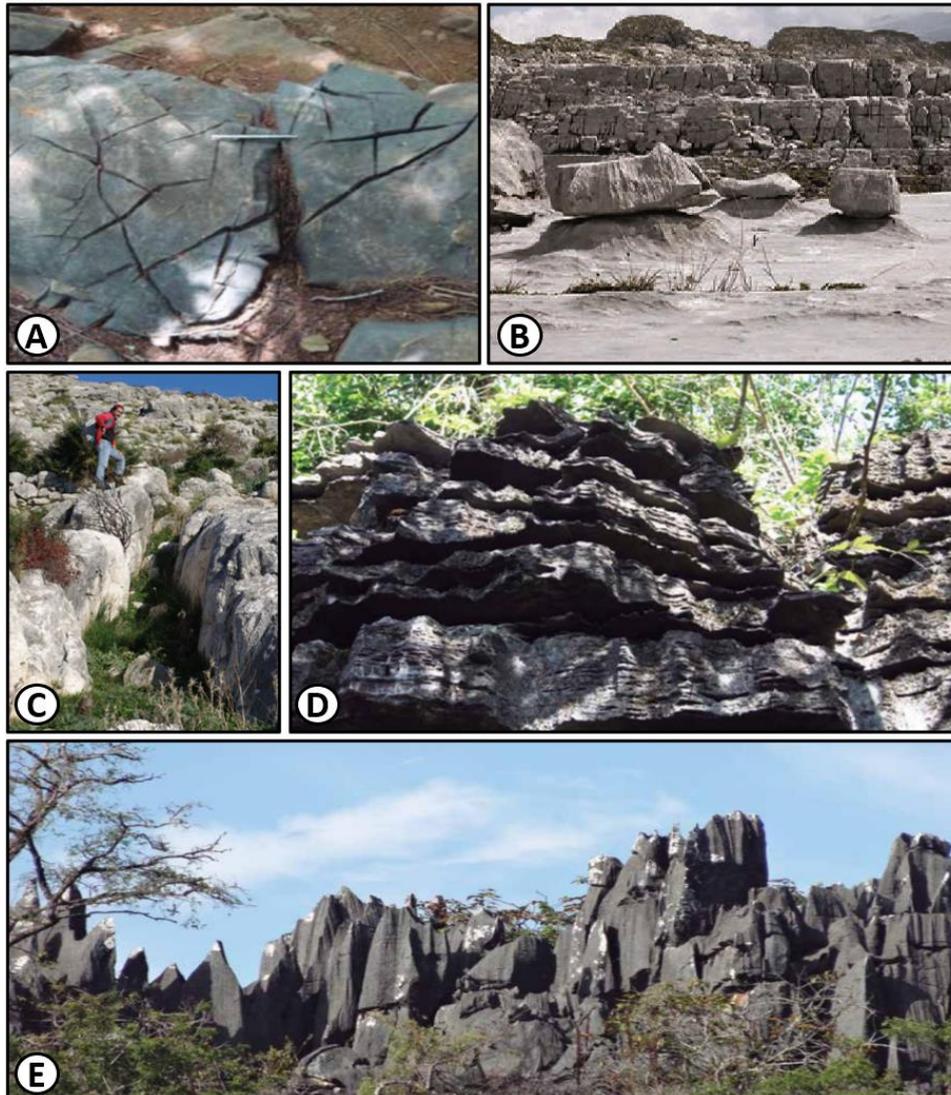


Nota: A) Lapiás em caneluras *Rillenkarren*, Capitão Enéas, Minas Gerais. B) Lapiás verticais *Wandkarren*, Capitão Enéas, Minas Gerais. C) *Rinnenkarren*, vale dos lagos Triglav, Eslovênia. D) Microcaneluras *Rillenstaine* sugerindo que a fina camada de água pode ter sido movida pela ação eólica. E) Lapiás em degraus *Trittkarren*, Sete Lagoas, Minas Gerais. F) Lapiás meandriformes *Mäanderkarren*, Montes Claros, Minas Gerais.
Fonte: (A, B e F) Autor, (2019). (C, D e E) Adaptado de Veress, (2010); Grimes, (2012) e Travassos, (2019).

A ação conjunta de escoamento da água e dos fatores estruturais (Figura 8) resultam em lapiás em fendas ou ranhuras *Kluftkarren* que se formam em estrutura rochosa com fraturas em superfícies horizontais ou sub-horizontais com exposição subaérea ou sob cobertura; lapiás em agulhas *Spitzkarren* característicos por apresentarem formas pontiagudas e ocorrem verticalmente em rochas intensamente fraturadas; lapiás horizontais *Schichtfugenkarren* que se desenvolvem em superfícies horizontais ou sub-horizontais ao longo da estratificação; lapiás

em mesa *Karrentische* ou *Flachkarren* que se desenvolvem em padrão ortogonal com formas quadrangulares ou retangulares; e a progressiva abertura dos lapiás em fendas resultam nos corredores de dissolução *Bogaz* que podem atingir grandes dimensões (VERESS, 2010; RODRIGUES, 2012; TRAVASSOS, RODRIGUES, TIMO, 2015; TRAVASSOS, 2019).

Figura 8: *Lapiás* resultantes do escoamento da água e dos fatores estruturais.



Nota: A) Lapiás em fendas ou ranhuras *Kluftkarren*, Montes Claros, Minas Gerais. B) Lapiás em mesa *Karrentische*, Mären. C) Corredores de dissolução *Bogaz*. D) Lapiás horizontais *Schichtfugenkarren*, Lagoa Santa, Minas Gerais. E) Lapiás em agulhas *Spitzkarren*, Pains, Minas Gerais.

Fonte: Adaptado de Ruggieri, (2016); Travassos, (2019).

O epicarste corresponde a uma zona pouco espessa e muito fraturada (TRAVASSOS; RODRIGUES; TIMO, 2015) que se encontra na zona logo abaixo da superfície, englobando o contato entre o solo, que para Bakalowicz (2012) é a principal fonte de gás carbônico para a dissolução dos carbonatos e a rocha calcária, pois é a área mais influente do intemperismo (PILÓ, 2000; TRAVASSOS, 2019). No processo de carstificação, o solo e a vegetação

assumem papel de destaque, pois estão em contato direto com a rocha, sendo a adição de materiais orgânicos a água, capazes de influenciar na evolução de diferentes tipos de feições cársticas (MOURA, 2017).

1.3 ROCHAS CARBONÁTICAS

As rochas carbonáticas sedimentares são compostas essencialmente por minerais carbonáticos altamente instáveis e quimicamente reativos, os quais foram depositados naturalmente em ambientes marinhos e continentais de águas claras, cálidas e rasas ou mesmo através de processos deposicionais erosivos que resultaram na sedimentação dessas rochas em camadas paralelas e horizontais (ACOCELLA; TURRINI, 2010; TONIETTO, 2010; FERREIRA, 2019).

1.3.1 Mineralogia das rochas carbonáticas

As rochas carbonáticas são predominantemente constituídas por calcita (CaCO_3) e/ou dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], porém podem conter aragonita (polimorfo da calcita). Restrita a depósitos recentes e formada por bioclastos marinhos em ambientes de águas quentes, a aragonita é metaestável e com o tempo se transforma em calcita. Outros minerais secundários como siderita (FeCO_3), magnesita (MgCO_3) e ankerita [$\text{Ca}[\text{Mg,Fe}](\text{CO}_3)_2$] também formam o grupo dos carbonatos, mas com reduzida participação (ALMEIDA; SAMPAIO, 2005; DUARTE, 2012; NOGUEIRA, 2018). A presença de impurezas como argilas, sílicas, sulfetos, sulfatos, compostos de ferro, matéria orgânica e outros, motivou a classificação da maioria das rochas carbonáticas (HOLANDA, 1987; ALMEIDA; SAMPAIO, 2005; COSTA et al., 2014).

A classificação química mais utilizada está relacionada com os teores de óxido de magnésio (MgO) e óxido de cálcio (CaO) presentes nas rochas carbonáticas. Desta forma, a Embrapa (2004) apontou os tipos de rochas calcárias em três classes: a) quando apresentam óxido de magnésio (MgO) inferior a 5% e óxido de cálcio (CaO) entre 45% a 55%, são denominadas *Calcíticas*; b) entre 5% a 12% de óxido de magnésio (MgO) e 40% a 42% de óxido de cálcio (CaO), *Magnesianas* e; c) entre 13% a 21% de óxido de magnésio (MgO) e 25% a 35% de óxido de cálcio (CaO), *Dolomíticas*.

Diferentemente, Holanda (1987) determinou cinco classes para as rochas calcárias conforme o teor de óxido de magnésio (MgO): a) Calcário *Calcítico* entre 0 a 1,1% de óxido de magnésio (MgO); b) Calcário *Magnesiano* entre 1,1 a 2,1% de óxido de magnésio (MgO);

c) Calcário *Dolomítico* entre 2,1 a 10,8% de óxido de magnésio MgO; d) Calcário *Dolomítico Calcítico* entre 10,8 a 19,5% de óxido de magnésio (MgO) e; e) Calcário *Dolomito* entre 19,5 a 21,7% de óxido de magnésio (MgO).

Os carbonatos apresentam grupos de minerais formados por um complexo aniônico $(\text{CO}_3)^{2-}$ e por cátions metálicos bivalentes, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} e Cu^{2+} , juntamente com outros minerais menos comuns. Na presença de íons de hidrogênio (H^+), o grupo carbonato se quebra liberando gás carbônico (CO_2) e água (H_2O) como produto. Essa reação química é comumente utilizada para diferenciar rochas carbonáticas de não carbonáticas. Quando se lança ácido em rochas carbonáticas a ação efervescente sobre a superfície da rocha carbonática irá distinguir o dolomito, que irá efervescer vagarosamente e o calcítico, rapidamente (AHR, 2008).

A estrutura cristalina dos minerais carbonáticos calcita e dolomita se formam em um sistema cristalográfico hexagonal com hábito escalonoédrica e romboédrica e a aragonita no sistema ortorrômbico com hábito bipiramidal (DANA; HURLBUT, 1960; AHR, 2008). De acordo com Tonietto (2010), o mineral dolomita possui um sistema altamente ordenado necessitando de tempo para precipitar, sua síntese não ocorre em condições normais de temperatura e pressão, a não ser com a interação de cianobactérias ou que a razão Mg/Ca aumente. A autora ainda complementa que as dolomitas primárias são muito raras e se restringem a ambientes evaporativos como lagunas, lagos ou planícies de maré.

Dentre os minerais calcita e dolomita, este primeiro apresenta maior valor econômico e o principal constituinte dos calcários com elevada pureza (ALMEIDA; SAMPAIO, 2005). Esse mineral pode se formar como um precipitado químico de cimentação diversa, como a *Calcita tipo drusa*, quando ocorre um agrupamento dos cristais em direção ao centro do poro; a *Calcita poiqilotópica* com cristais largos englobando diversos grãos rochosos; a *Calcita equante* ocorre em função da textura formada pelo neomorfismo resultando em mosaico equicristalino; a *Calcita sintaxial* os cristais crescem no sentido do eixo óptico do núcleo englobando por vezes outros grãos; a *Calcita prismática* com cristais alongados e grossos provavelmente decorrente de fases iniciais de soterramento e, a *Calcita blocosa* formada por cristais não alongados e grossos ocorrendo como cimentação tardia (TONIETTO, 2010).

1.3.2 Classificação das rochas carbonáticas

De acordo com Terra et al. (2010), classificar e denominar as rochas carbonáticas torna-se uma tarefa difícil em virtude da complexa variabilidade dos carbonatos. Várias classificações

foram propostas por Embry e Klovan (1971), que classificam as rochas carbonáticas biogênicas, por Wright (1992), que enfatizou os aspectos deposicionais, biológicos e diagenéticos, por Riding (2000), que propôs uma classificação para os carbonatos microbianos e Terra et al. (2010), que formularam uma classificação aplicável às bacias sedimentares brasileiras. No entanto, suas propostas foram fundamentadas nas classificações de Folk (1959) e Dunham (1962), sendo que o primeiro enfatizou os componentes das rochas, ou seja, a composição do grão (aloquímico), a matriz (micrita) e o cimento (espática) ou o espaço poroso, enquanto que o segundo tratou de estudar a textura deposicional da rocha carbonática (NOGUEIRA, 2018).

Para Folk (1959, 1962), a composição do grão pode ser *Aloquímica* quando cimentada em calcita espática ou matriz de calcítica microcristalina; rochas *Ortoquímicas* com calcita microcristalina sem grãos aloquímicos e rochas *Recifais Autóctones*, denominadas biolitos. Os grãos carbonáticos *Intraclastos* são formados por fragmentos sedimentares fracamente litificados que foram redepositados dentro da própria bacia de formação como um sedimento clástico; os *Oolitos* apresentam formas esféricas e elipsoidais bem definidas com tamanho até 2 mm e, quando o grão ultrapassa esse valor, é chamado de pisóide; os *Fósseis* são formados por detritos orgânicos esqueléticos e com dimensões variando de 0,03 a 0,15 mm, já os *Pellets* apresentam estruturas ovoides constituída de fragmentos de algas, clastos de lamelas ou pelotas fecais (TONIETTO, 2010; TRAVASSOS, 2019). A matriz que proporciona a junção dos grãos, é classificada em *esparita* formada por cristais de carbonato que precipitam nos espaços vazios entre os grãos dos sedimentos e *micrito* que corresponde a uma base microcristalina muito fina subtranslúcida depositadas em águas tranquilas (PERRAS; DIEDERICHS, 2011).

Baseado na textura deposicional de sedimentação dos grãos, Dunham (1962) considera três características essenciais para classificar os carbonatos: presença ou ausência de lama; abundância de grãos e ocorrência de atividade de bioconstrução. Assim, o autor classifica as rochas carbonáticas em dois grupos deposicionais sendo um de *Texturas reconhecíveis* subdivididos em: *Mudstone* quando a lama carbonática é acima de 90% e com menos de 10% de grãos aloquímicos; *Wackestone* com mais de 10% dos grãos presentes no micrito; *Packstone* quando o arcabouço do grão é suportado por lama micrítica; *Grainstone* não há presença de matriz e o espaço é preenchido por esparita; *Boundstone* presença de componentes orgânicos coloniais ligados durante a deposição, e outro de *Texturas não reconhecíveis* como o calcário *Cristalino* com estrutura sedimentar não visível (CAMACHO, 2009; TERRA et al., 2010; TRAVASSOS, 2019).

1. 4 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS DE MONTES CLAROS, MINAS GERAIS

O Norte de Minas Gerais apresenta diversas paisagens que as tornam admiradas pela sua dinâmica pretérita e atual no processo de desenvolvimento do relevo cárstico. Dentre essas paisagens, ganha destaque os afloramentos cársticos desenvolvidos em rochas carbonáticas localizadas no município de Montes Claros, que se destaca pelo seu cenário paisagístico e considerável complexo espeleológico e paleontológico (ACISMC, 2008) presente nas diversas feições tipicamente dissolutivas da região.

A vegetação que se desenvolve sobre o carste desempenha um importante papel no processo de carstificação (MACEDO, 2019) e pode variar consideravelmente em termos florísticos e estruturais, podendo apresentar desde fisionomias campestres até áreas predominantemente florestais (CARVALHO, 2009). A cobertura vegetal do município é constituída por Cerrado *stricto sensu* cobrindo áreas de topos e chapadões, por Floresta Estacional Semidecidual presente nas drenagens de encostas e, com reduzida cobertura, por Macaúbas em porções mais aplainadas da paisagem. Em áreas situadas sobre os afloramentos calcários encontram-se fragmentos de vegetação rupestre e da Floresta Estacional Decidual (Figura 9), popularmente conhecida como “Mata Seca” ou “Mata Calcária” (NASCIMENTO; FELFILI; MEIRELLES, 2004; CARVALHO, 2009; MENDES, 2013; FONSECA; ARRUDA; XAVIER, 2020; PEREIRA et al., 2020).

Figura 9: Cobertura vegetal representativa dos *Lapiás* em Montes Claros, Minas Gerais.



Fonte: Autor, (2019).

Consideradas de importância singular por conterem fisionomias próprias e espécies endêmicas (CARVALHO, 2009; PEREIRA et al., 2020), a principal característica das “Matas secas” é a perda de grande parte de suas folhas na estação seca, superior a 50% (VELOSO; RANGEL FILHO; LIMA, 1991), resultado da sazonalidade climática favorecida pelo clima do

tipo Aw da região, ou seja, tropical úmido de savanas com invernos secos (SILVA, 2016). A temperatura média anual é de 22,7 °C com chuvas concentradas entre os meses de outubro a março e notória estação seca entre os meses de junho a agosto. Mesmo apresentando moderado regime pluviométrico, com média anual de 1.029 mm, a região abriga diversos mananciais e nascentes da bacia do rio São Francisco como as sub-bacias do rio Pacuí, Verde Grande e São Lamberto (LEITE; SANTOS; ALMEIDA, 2011; CLIMATE DATA, 2019), que auxiliam no processo de esculturação das feições cársticas.

As características litológicas, em consonância com os processos exógenos de intemperismo, contribuíram para esculpir os cenários cársticos em Montes Claros, que apresentam cotas altimétricas entre 500 e 1.075 m, sendo que as áreas com menores altitudes correspondem a cerca de 33% das superfícies de aplainamento da depressão Sanfranciscana, e as de maiores altitudes integram 67%, que facilitam o escoamento das águas subterrâneas e a evolução do relevo cárstico presente no Planalto Residual do São Francisco (LEITE; SANTOS; ALMEIDA, 2011), com destaque para as Serras Geral, Montes Claros, Fonseca, Baixo, Velha, Mão Torta, Cordilheira e Sapé; as Chapadas da Lagoinha e Mocotó e as Grutas da Lapa Grande, Lapa da Guiné, Lapa do Miréllis, Lapa da Claudina, Lapa Pintada, Lapa D'água e Lapa da Lagoinha (TOLMASQUIM, 2009).

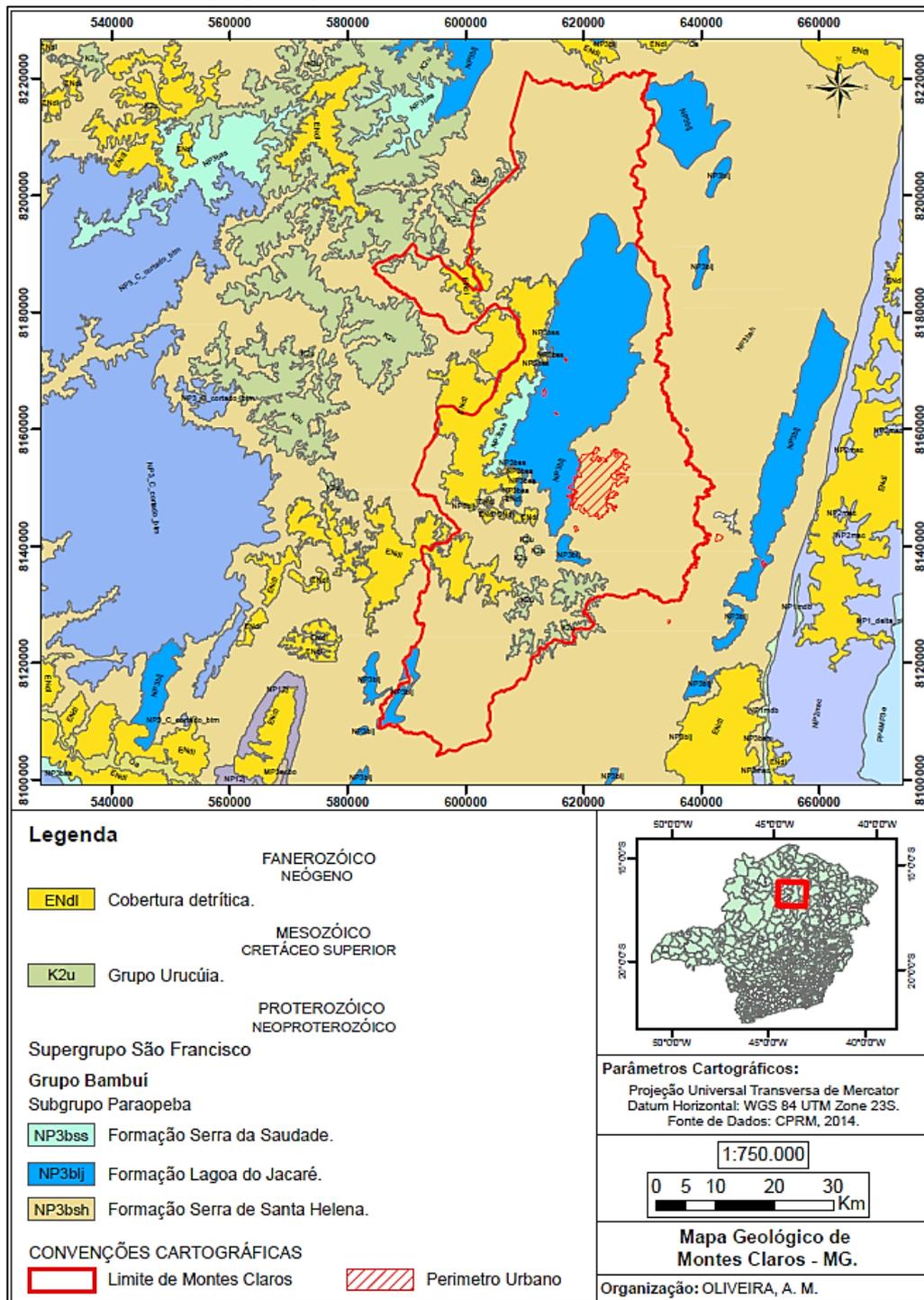
Para Alves, Cordeiro e Murilo (2019), a geomorfologia de Montes Claros é predominantemente constituída de formações cársticas, pois o município encontra-se inserido na província geológica do Supergrupo São Francisco (Figura 10), formada por uma sequência de rochas metassedimentares terrígenas e carbonáticas do Grupo Bambuí, as quais foram depositadas numa bacia antepaís de sedimentação exclusivamente marinha e adjacente à Faixa Brasília (CRUZ, 2012), que através das ações biogeoquímicas, atuaram na dissolução e precipitação de elementos mais solúveis modelando as feições de relevo cárstico.

Formado durante o Neoproterozoico pela junção do Gondwana Ocidental numa plataforma do tipo rampa (REIS, 2013), a litoestratigrafia do Grupo Bambuí é composta por uma sucessão basal marinha, constituída da base para o topo pela Formação Sete Lagoas “carbonática”, Serra de Santa Helena “pelítico-carbonática”, Lagoa do Jacaré “carbonática” e Serra da Saudade “pelítica”, as quais formam o Subgrupo Paraopeba; e no topo, pela sucessão marinho-continental representada pela Formação Três Marias “psamítica” (MARTÍNEZ, 2007; IGLESIAS; UHLEIN; 2009).

Na área de estudo, afloram rochas da Formação Lagoa do Jacaré (ALVES; CORDEIRO; MILO, 2019), composta pela deposição de calcário fino cristalizado, cinza, grosseiramente estratificado a maciço com abundância de estilólitos; siltitos cinza-esverdeados e piritosos;

calcário cinza com níveis pouco espessos de brecha lamelar intraformacional, além de calcários margosos, placosos, escuros, por vezes oosparíticos, recristalizados e brechoides, piritosos, com nódulos de calcita preta fétida, intercalações de siltitos e raras margas (IGLESIAS; UHLEIN; 2009). A sedimentação dessa unidade teria ocorrido em ambiente marinho litorâneo agitado, sendo submetido a influência das ondas e correntes de maré (MARTÍNEZ, 2007).

Figura 10: Mapa geológico do município de Montes Claros, Minas Gerais.



Fonte: Autor, (2020).

As características climáticas, em conjunto com a geologia e litologia, influenciaram a pedologia da região, já que em muitas situações envolvendo o mesmo embasamento geológico, é possível encontrar diferentes tipos de solo (MACEDO, 2019). De acordo com Leite, Santos e Almeida (2011) no município de Montes Claros ocorrem desde solos muito desenvolvidos, com horizonte Bw, até Neossolos Litólicos. Leite (2009) ainda complementa a ocorrência de Latossolos álicos, distróficos e eutróficos.

As feições cársticas, além de suas belezas paisagísticas, apresentam diversas formas de vida, como os seres troglóxeos que vivem regularmente no ambiente subterrâneo, mas que necessitam retornar periodicamente à superfície para completar seu ciclo de vida; os troglófios, que completam seu ciclo de vida tanto no meio subterrâneo quanto no epígeo, e os troglóbios, que são espécies restritas ao meio subterrâneo (TRAJANO; BICHUETTE, 2006). Dentre esses seres, se destacam na área de estudo as cianobactérias *Desmonostoc* sp. e os Mocós, que fazem do carste o seu habitat.

1.4.1 Características das cianobactérias

Os estudos paleontológicos demonstram que as cianobactérias são os seres vivos mais antigos do planeta, surgiram a cerca de 3,5 bilhões de anos no arqueano médio e vêm se adaptando até os dias atuais (CASTELLAN et al., 2018). As datações foram confirmadas a partir dos fósseis estromatólitos que se formaram pela atividade metabólica desses microrganismos. Pelo fato de realizarem fotossíntese e por existirem há tanto tempo, acredita-se que as cianobactérias foram as responsáveis pelo *Grande Evento de Oxidação* na atmosfera, o que resultou em grandes mudanças no sistema terrestre (SCHIRRMESTER; GUGGER; DONOGHUE, 2015).

Antes chamadas de algas azuis, as cianobactérias são seres procariontes (ausência de núcleo verdadeiro e plastos), suas células possuem paredes constituídas de peptidoglicanos envoltas pela cápsula de polissacarídeos. Seu citoplasma é composto pela molécula de DNA, ribossomo, plasmídeos e tilacóides fotossintetizantes. Além da capacidade de sintetizar a clorofila, possuem caratenóides, ficoeritrina de cor vermelha e ficocianina de cor azulada, os quais se dispõem na superfície dos tilacóides em forma de pequenos corpúsculos, os chamados ficobilisomas (PARRA; BICUDO, 1996; REVIERS, 2018).

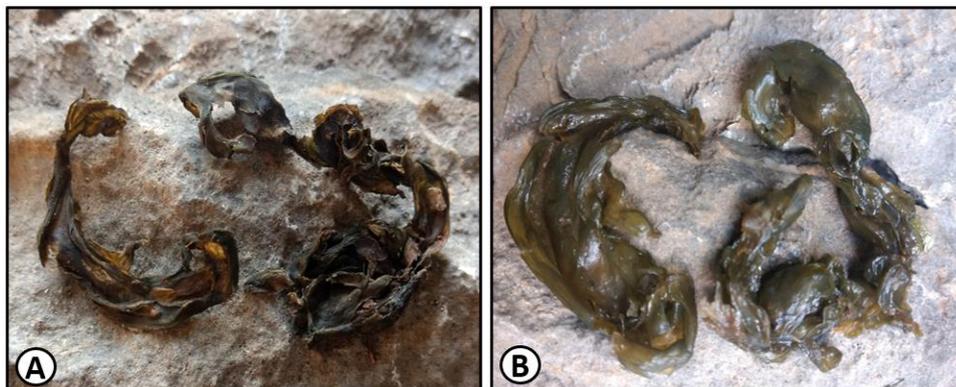
Ao realizar a atividade fotossintética o metabolismo das cianobactérias pode aumentar o pH e as concentrações de cálcio (Ca^{2+}) promovendo a precipitação de carbonatos. O aumento da alcalinidade no ambiente celular induz a precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3) pela

troca de bicarbonato (HCO_3^-) e hidroxila (OH^-) através da membrana celular. O bicarbonato (HCO_3^-) é transportado para dentro da célula como fonte de carbono inorgânico para a fotossíntese e convertido pela enzima anidrase carbônica em gás carbônico (CO_2). A liberação de hidroxila (OH^-) para o ambiente da bacia resulta no aumento de carbonato (CO_3^{2-}) em solução. Os íons livres de cálcio (Ca^{2+}) são atraídos para a membrana celular que são carregadas negativamente promovendo a nucleação do carbonato de cálcio (CaCO_3) (DUPRAZ et al., 2009).

As cianobactérias se reproduzem de forma assexuada ocorrendo por fragmentação dos filamentos dando origem a hormogônios que se separam dos filamentos originais; por fissão binária, ocorrendo a divisão celular simples; por acinetos, que possuem paredes espessas com substâncias de reserva metabólica que podem se soltar do filamento de origem, formando uma nova célula; por exósporos, que consistem na divisão em duas porções terminais da célula, e por endósporos, também denominados baeócitos, em que o conteúdo de uma célula se divide em esporos (REVIERS, 2018).

Por apresentarem características fisiológicas peculiares, estes microrganismos vivem nos mais diferentes ambientes, desde os picos congelados das montanhas até o interior dos grandes desertos. Tolerantes a altas temperaturas, de até $70\text{ }^\circ\text{C}$ (REVIERS, 2018), as cianobactérias possuem a habilidade de diminuir seu metabolismo durante longos períodos de seca (Figura 11), desidratando-se quando a umidade é extremamente baixa e, em seguida, reidratando quando as condições atmosféricas forem favoráveis (WILLIAMS et al., 2014).

Figura 11: Cianobactéria *Desmonostoc* sp. encontrada em Montes Claros, Minas Gerais.



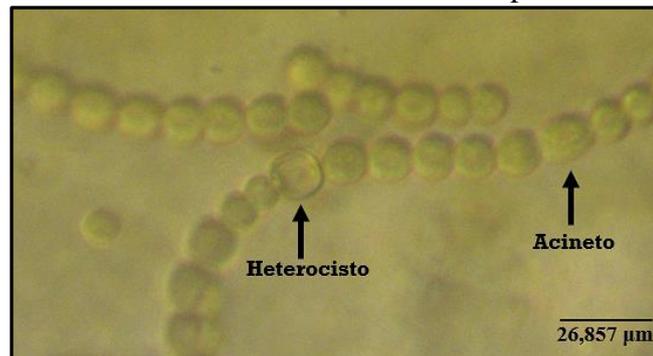
Nota: A) Desidratada. B) Hidratada. **Fonte:** Autor, (2020).

Em períodos de estresse osmótico as cianobactérias compensam a perda de umidade através de solutos citoplasmáticos, como polissacarídeos extracelulares, os quais são carboidratos que funcionam como reserva metabólica (WILLIAMS; BÜDEL; WILLIAMS,

2018) constituídos por enzimas, ácidos nucleicos, proteínas, lipídeos, ácidos húmicos dentre outros (COSTA; RAAIJMAKERS; KUMAE, 2018) e pigmentos especializados como o *Scytonemim* que protege seu aparelho fotossistema contra os raios ultravioletas, permitindo assim sobreviverem a intensa radiação solar (ROSSI, DE PHILIPPIS, 2015).

As cianobactérias são consideradas pioneiras na colonização de ambientes restritos (ROSSI; DE PHILIPPIS, 2015), além de protegerem contra a dessecação, os polissacarídeos extracelulares apresentam significativas funções, pois proporcionam um microambiente ideal para o desenvolvimento de biofilmes microbianos que interagem entre si e potencializam alterações na estrutura do substrato (GOLUBIEL; SEONG-JOO; BROWNE, 2000; OSÓRIO-RODRIGUES; SANCHEZ-QUINONEZ, 2018); facilitam a adesão à superfície; promovem a formação de bolsões de solos que passam a reter pequenas quantidades de água e argila criando condições para a instalação de outros seres e também fornecem atributos bioquímicos e físicos que são essenciais para as plantas, como exemplo, o nitrogênio (WILLIANS; BÜDEL; WILLIANS, 2018; RONCERO-RAMOS et al., 2020). Algumas espécies apresentam uma célula especializada para a fixação de nitrogênio, o heterocisto (Figura 12), que através da enzima nitrogenase, converte o nitrogênio em formas moleculares disponíveis para bactérias e plantas (BÜDEL et al, 2009).

Figura 12: Filamentos da cianobactéria *Desmonostoc* sp. com heterocisto e acineto.



Fonte: Autor, (2020).

Os biofilmes são constituídos por complexos microrganismos heterotróficos e fototróficos que ao aderirem a superfície criam microambientes, onde diferentes tipos de atividades metabólicas podem coexistir e promover a dissolução e precipitação de carbonatos (DUPRAZ et al., 2004). Ao colonizar o substrato, os microrganismos provocam várias transformações como o enfraquecimento físico em decorrência dos ciclos de dessecação e reidratação, a descoloração resultante da produção de pigmentos contra os raios UV, a efluorescência que envolve a precipitação de minerais secundários e a excreção de ácidos

corrosivos que dissolvem os minerais alterando as características químicas do substrato (SCHEERER; ORTEGA-MORALES; GAYLARDE, 2009; NEGI; SARETHY, 2019).

A cianobactéria do gênero *Desmonostoc* sp., que se encontra nos afloramentos calcários na área de estudo, se agrupa como membro recém descrito (HRUZEK et al., 2013). Esse gênero é definido por linhagens que apresentam características morfológicas semelhantes ao gênero *Nostoc* (ANDREOTE, 2013), sendo um gênero de ampla distribuição geográfica e diferenciado entre si pelos filamentos e células vegetativas, pela formação de acinetos e colônias, pela posição dos heterocistos, pela presença de bainha e alta complexidade em seu ciclo de vida (HRUZEK et al., 2013; ALVARENGA et al., 2018).

1.4.2 O roedor *Kerodon rupestris*

O *Kerodon rupestris*, popularmente conhecido como Mocó (Figura 13), é um mamífero roedor da ordem Rodentia, família Caviidae e subfamília Caviinae (ARO et al., 2019) que vive especialmente em afloramentos rochosos no semiárido brasileiro e em algumas porções do Norte de Minas, limítrofes com o Cerrado (PORTELA, 2015). Os rochedos lhes servem de abrigo e refúgio contra predadores, que segundo Resende (2017), são principalmente, a raposa (*Lycalopex vetulus*), o gavião pé de serra (*Geranoaetus melanoleucus*), o jacurutu (*Bubo virginianus*) e o gato-macambira (*Leopardus tigrinus*).

Figura 13: Mocó (*Kerodon rupestris*).



Fonte: Micheletti, (2016).

Parecido com o preá, mas com particularidades morfológicas e comportamentais distintas (OLIVEIRA et al., 2011), eles saem para forragear principalmente no final da tarde ou à noite em busca de alimento e conseguem se adaptar bem às condições ambientais do

semiárido, caracterizadas pela alta temperatura e pela escassez de água e alimento, principalmente nos períodos de grandes secas (RESENDE, 2017).

Considerado um animal escansorial e herbívoro como todos os Cavídeos, eles exploram o chão em busca de alimentos associados ao habitat rochoso, como folhas, gramíneas ou frutos e escalam árvores para se alimentar dos brotos dos galhos (OLIVEIRA et al., 2011). Na ausência de folhas eles consomem a casca de árvores como forma de suprir suas necessidades nutricionais (PORTELA, 2015).

Desprovidos de dentes caninos e cauda, os Mocós apresentam orelhas curtas, olhos grandes, cabeça com um longo e estreito focinho, quatro dentes incisivos, longas pernas (SOUSA, 2006) e unhas subcutâneas em todos os dígitos, com exceção de uma no interior dos pés onde se encontra uma pequena garra, a qual é utilizada para pentear o pelo (RESENDE, 2017) e devido a sua capacidade perceptiva eles podem perceber a presença humana e de outros animais a longa distâncias (SOUSA, 2006).

Resende (2017) afirma que a reprodução do Mocó ocorre ao longo do ano, porém com exceção de abril a junho que corresponde ao período mais seco no ano, com ninhadas variando de um a dois filhotes, as fêmeas por apresentarem estro pós-parto, são capazes de se acasalarem com poucas horas após os filhotes nascerem. A amamentação ocorre até o 35º dia de vida, porém Oliveira et al., (2006) afirmaram que filhotes com apenas dois dias de vida já foram registrados forrageando em busca de alimentos. Com 200 dias eles atingem a idade adulta (ZOGNO, 2002) e para protegerem seus filhotes, elas se refugiam em buracos ou fendas das rochas (RESENDE, 2017).

Sua pelagem macia e densa, com coloração dorsal cinzenta variando entre marrom-amarelado e garganta com pelos agrisalhados favorecem a camuflagem oferecendo proteção no ambiente em que vivem. Como forma de alertar o grupo em situações que os colocam em perigo, eles emitem um som sinalizando, por exemplo, a presença de um predador. Um hábito curioso é o costume de defecar sempre no mesmo lugar, nas chamadas latrinas que geralmente se localizam em áreas mais elevadas do rochedo (SOUSA, 2006; OLIVEIRA; BONVICINO, 2011; RESENDE, 2017).

Por se tratar de um roedor endêmico da Caatinga com pelagem macia e de tamanho considerável, sua carne é apreciada pela população nordestina (SOUSA, 2006; CHAVES; ALVES; ALBUQUERQUE, 2020), conseqüentemente a caça para consumo da carne e pele associada a destruição de seu habitat natural, têm proporcionado a redução de suas populações e inclusão na categoria de espécie vulnerável de extinção publicada pelo Ministério do Meio

Ambiente (MMA, 2018). Em Minas Gerais a espécie é considerada “Quase Ameaçada” (COPAM, 2010).

2 CONCLUSÃO

A revisão literária possibilitou o conhecimento pormenorizado sobre o processo de desenvolvimento das feições cársticas; as classificações do carste com destaque para o exocarste em forma de lapiás; a mineralogia e classificação das rochas carbonáticas; os elementos físicos que compõem a área de estudo como cobertura vegetal, clima, hidrografia, geomorfologia, geologia, pedologia e as principais características das cianobactérias e do Mocó, sendo estes assuntos de extrema relevância como base teórica para a interpretação dos resultados alcançados a serem discutidos no capítulo seguinte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOCELLA, A.; TURRINI, D. Formation, appearance and characterization of travertine: In: **Sieneze travertine**. Alinea, Florence, 2010, 303p.

ACISMC, Associação Comercial, Industrial e de Serviços de Montes Claros. **Montes Claros: potencialidades**. Montes Claros: Unimontes, 2008. 80p.

AHR, W. N. Geology of carbonate reservoirs: The Identification, Description, and Characterization of Hydrocarbon Reservoirs. In: **Carbonate Rocks**. Wiley. Texas A&M University. 2008.

ALCÁNTARA, A. L. **Propuestas gráficas de divulgación científica en el Geoparque de Las Loras: algunos ejemplos de geomorfología estructural y kárstica**. Dissertação de mestrado. Universidad de Cantabria, Espanha, 2019.

ALMEIDA, S. L. M.; SAMPAIO, J. A. Calcário e Dolomito. **Rochas e Minerais Industriais**. CETEM, 2005.

ALVARENGA, L. V. et al. Extending the ecological distribution of Desmonostoc genus: Proposal of Desmonostoc salinum sp. nov., a novel Cyanobacteria from a saline–alkaline Lake. **Int J Syst Evol Microbiol**. v.68, n.9, 2018. 2770-2782p.

ALVES, M. A.; CORDEIRO, M. R.; MILO, R. L. Ocorrência das águas subterrâneas no município de Montes Claros-MG: um estudo de caso utilizando a geotecnologia. **Águas Subterrâneas - Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas**, 2019.

ANDREOTE, A. P. D. **Filósfera Mata Atlântica: isolamento e sistemática de cianobactérias, bioprospecção e caracterização da comunidade diazotrófica**. Centro de energia Nuclear na agricultura. USP, São Paulo, 2013.

- ARO, M. M.; SANTOS, A. C.; SILVEIRA, E. E.; LISBOA NETO, A. F. S.; OLIVEIRA, M. F. de; ASSIS NETO, A. C. de. Morphological tools to evaluate the digestory apparatus in rocky cavy (*Kerodon rupestris*). **Microsc Res Tech.**, 2019. 696-708p.
- BAKALOWICZ, M. Epikarst. In: WHITE, W. B.; CULVER, D.C. (Eds.), **Encyclopedia of Caves**. Second Ed. New York: Elsevier, 2012. 284-288p.
- BARRETO, E. A. S.; ALMEIDA, E. A. B. de; RODRIGUES, V. P. A.; ARAÚJO, H. M. **Influências paleoclimáticas na morfologia cárstica em Sergipe**. Direto do Centro da Terra 1, v.1, 2007. 15-21p.
- BIGARELLA, J. J; BECKER, R.D.; SANTOS, G.F. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais**. v.1. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 2009.
- BÖGLI, A. **Karst hydrology and physical speleology**. Springer-Verlag, 1980. 284p.
- BÜDEL, B. et al. Southern African biological soil crusts are ubiquitous and highly diverse in drylands, being restricted by rainfall frequency, **Microb. Ecol.**, v.57, 2009. 229-247p.
- BUENO, G. T.; TALIM; H. L. C. Análise das feições cársticas desenvolvidas no maciço das Agulhas negras - RJ. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.15, n.3, 2014. 327-338p.
- CAMACHO, D. G. F. **Aspecto petrográficos dos carbonatos da Formação Riachuelo – Albino, Bacia de Sergipe**. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro: 2009.
- CARVALHO, F. A. **Dinâmica da vegetação arbórea de uma floresta estacional decidual sobre afloramentos calcários no Brasil Central**. Tese de doutorado. Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2009.
- CASTELLANI, C.; MAAS, A.; ERIKSSON, M.; HAUG, J. T.; HAUG, C.; WALOSZER, D. **First record of cyanobacteria in cambrian orsten deposits of sweden**. **Palaeontology**, v.61, n.6, 2018. 855-880p.
- CAVALCANTE, D. R.; BASTOS, F. H. Relações entre oscilações climáticas e relevo cárstico no semiárido cearense, o exemplo do município de Tejuçuoca. **Anais: Sociedade Brasileira de Espeleologia**. Ouro Preto, MG, 2017.
- CHAVES, L. S.; ALVES, R. R. N.; ALBUQUERQUE, U. P. Hunters' preferences and perceptions as hunting predictors in a semiarid ecosystem. **Science of The Total Environment**. v.726, 2020.
- CLIMATE DATA, org. **Dados Climatológicos para Montes Claros, Minas Gerais**. 2019. Disponível em: < <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/montes-claros-2886/> > Acesso em: 11/03/2020.
- COSTA, D. L. FERNANDES, I. M. M. FARIAS, R. M. C.; BRAGA, A. N. S.; MENEZES, R.R.; NEVES, G. A. Caracterização micro-estrutural de amostras de pedras Cariri. In: **21º CBECIMAT**. Cuiabá, MT, 2014. 290-297p.

COSTA, O. Y.; RAAIJMAKERS, J. M.; KUMAE, E. E. Microbial Extracellular Polymeric Substances: Ecological Function and Impact on Soil Aggregation. **Front. Microbiol.** v.9, n.1636, 2018.

COPAM - Conselho de Política Ambiental. **Deliberação Normativa COPAM nº 147, de 30 de abril de 2010: Aprova a Lista de Espécies Ameaçadas de Extinção da Fauna do Estado de Minas Gerais.** Diário Oficial do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte. 04. mai. 2010.

CRUZ, A. B. **Detalhamento da geologia das unidades carbonáticas do Grupo Bambuí na região de Alvorada do Norte,** UNB, Brasília, 2012.

CUCCHI, F. Kamenitzas. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T.; DREYBRODT, W. (Ed.), **Karst Rock Features, Karren Sculpturing.** Založba ZRC, Cap.12, 2009. 139-150p.

CUCCHI, F.; FORTI, F.; FINOCCHIARO, Furio. Carbonate surface solution in the classical karst. **International Journal of Speleology,** v.16, 1987. 125-138p.

DANA, E.S; HURLBUT, C.S. **Manual de Mineralogia.** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, v.2, 1960.

DANTAS, R. B. Análise de Feições da Paisagem Cárstica na Área de Proteção Ambiental de São Desidério-BA. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.12, n.3, 2018.

DUARTE, W. H. B. **Aspectos da contaminação geoquímica ambiental da produção de calcários corretivos e cal na região de Santa Maria do Cambucá – Pernambuco: Considerações sobre a produção mineral regional.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

DUNHAM R.J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham W.E. (Ed.), **Classification of carbonate rocks.** American Association of Petroleum Geologists, v.1, 1962. 108-121p.

DUPRAZ, C.; REID, R. P.; BRAISSANT, O.; DECHO, A. W.; NORMAN, R. S.; VISSCHER, P. T. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. **Earth-Science Reviews,** v.96, n.3, 2009. 141-162p.

DUPRAZ, C.; VISSCHER, P.T.; BAUMGARTNER, L. K.; REID, R. P. Microbe–mineral interactions: early carbonate precipitation in a hypersaline lake (Eleuthera Island, Bahamas). **Sedimentology,** v.51, 2004. 745-765p.

ELORZA, M. G. **Geomorfología.** Madrid: Pearson Educación, 2008.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Características de corretivos agrícolas.** Ana Cândida Primavesi; Odo Primavesi. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2004. 28p.

EMBRY, A. F.; KLOVAN, J. E. A Late Devonian reeftract on northeastern Banks Islands, Northwest Territories. **Bulletin of Canadian Petroleum Geology,** v.19, 1971. 730-781p.

- FABRI, F.; AUGUSTIN, Cristina Helena Ribeiro Rocha; AULER, Augusto Sarreiro. **Relevo Cárstico em Rochas Siliciclásticas: Uma Revisão com Base na Literatura. Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.15, n.3, 2014. 339-351p.
- FERREIRA, C. F.; UAGODA, Rogério Elias Soares. Tipologias do carste e classificações de dolinas: uma revisão. **Caminhos de Geografia Uberlândia-MG** v.20, n.70, 2019. 519-537p.
- FERREIRA, E. P. **Gênese e classificação de solos em ambientes cársticos na Capada do Apodi**. Tese de doutorado. Instituto agrônômico. Campinas-SP: 2013.
- FERREIRA, K. C. **Origem, evolução e geometria da porosidade das rochas carbonáticas da Formação Quissamã, Grupo Macaé, Albino, Bacia de Campos, Brasil**. IGEO/UFGS, 2019.
- FOLK, R.L. Practical petrographic classification of limestones. **Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists**, v.43, n.1, 1959. 1-38p.
- FOLK, R.L. Spectral subdivision of limestone types. In: Classification of carbonate rocks (Ed. By Ham, W.E.) **Mem. Am. Ass. Petrol. Geol.** Tulsa, v.1, 1962. 62-84p.
- FONSECA, R. S.; ARRUDA, D. M.; XAVIER, M. V. B. **Vegetações de Montes Claros**. 2020. No prelo.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. Dissolution: Chemical and Kinetic Behaviour of the Karst Rocks. In: **Karst geomorphology and geomorphology**. London: John Wiley e Sons Ltd. 2007. 39-65p.
- FREIRE, L. M.; LIMA, J. S.; VERÍSSIMO, C. U. V.; SILVA, E. V. Carste em Rochas Não Carbonáticas: contribuição ao estudo geomorfológico em cavernas de arenito da Amazônia Paraense. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.1, 2017. 1829-1845p.
- GAMBARINI, A. **Cavernas no Brasil**. São Paulo, Metalivros, 2012.
- GILLI, E. **Karstology: karst, caves and springs**. New York: CRC Press, 2015.
- GOLUBIEL, S.; SEONG-JOO, L.; BROWNE, K.M. Cyanobacteria: Architects of Sedimentary Structures. In: Riding R.E., Awramik S.M. (eds) **Microbial Sediments**. Springer, Berlin, Heidelberg. 2000. 57-67p.
- GRIMES, K. G. Surface Karst Features of the Judbarra/Gregory National Park, Northern Territory, Australia. **Helictite**, v.41, 2012. 15-36p.
- GUARESCHI, V. D. **Feições de carste sobre a formação serra geral no município de São Martinho da Serra – RS**. UFSM, Santa Maria, RS, Brasil, 2012.
- GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 10ª Ed., Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011.
- HARDT, R.; PINTO, S. A. F. Carste em litologias não carbonáticas. **Revista Brasileira de geografia**, v.10, n.20, 2009. 99-105p.

HARDT, R. RODET, J.; PINTO, S. A. F. O carste. produto de uma evolução ou processo? evolução de um conceito. **Revista de Geografia**. Recife: UFPE – DCG/NAPA, VIII SINAGEO, n.3, 2010.

HOLANDA C. **Calcários de Pernambuco: rochas para fins industriais**. Recife, SICOM - Minérios de Pernambuco, 1987. 229p.

HRUZEK, P.; LUKESOVÁ, A.; MARES, J.; AVENTURA, S. Description of the cyanobacterial genus *Desmonostoc* gen. nov. including *D. muscurum* cam. nov. as a distinct, phylogenetically coherent taxon related to the genus *Nostoc*. **Fottea. Olomuc**, Praha, v.13, n.2, 2013. 201-213p.

IGLESIAS, M.; UHLEIN, A. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geociências**, v.39, n.2, 2009.

KARMANN, I. **Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do Alto Vale do Ribeira de Iguape, sudoeste do estado de São Paulo**. Tese Doutorado. Universidade de São Paulo. 1994. 228p.

KOHLER, C. H. Geomorfologia Cárstica. In: GUERRA, A. J. T; CUNHA, S. B. da; **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. v.11, n.2, ed: Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2011.

LANHARE, B. D. **Vulnerabilidade do carste na cabeceira dos rios das Almas, São José de Guapiara (Bacia do rio Paranapanema) e do rio Pilões (Bacia do rio Ribeira de Iguapé) na região do Parque Estadual Intervales (PEI), Estado de São Paulo**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, SP, 2014.

LEITE, M. E.; SANTOS, I. S.; ALMEIDA, J. W. L. Mudança de Uso do Solo na Bacia do Rio Vieira, em Montes Claros/MG. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.4, 2011. 779-792p.

LEITE, M. R. **Geotecnologias Aplicadas no mapeamento do uso do solo da terra no município de Montes Claros/MG**. Universidade Estadual de Montes Claros – UNIMONTES, Montes Claros, MG, 2009. 75p.

MACEDO, H. S. **Ambientes cársticos em sergipe: vulnerabilidade e instrumentos para sua gestão**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, SE, 2019.

MARTÍNEZ, M. I. **Estratigrafia e tectônica do Grupo Bambuí no norte do estado de Minas Gerais**. UFMG. Belo Horizonte, MG, 2007.

MENDES, J. B. **Propostas didáticas para o ensino do carste na educação básica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, MG, 2013.

MICHELETTI, T. **Management of invasive species in insular environments: The case of the rock cavy in Fernando de Noronha, Brazil**. Technische Universitat Dresden. 2016.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Lista Oficial das Espécies da Fauna Brasileira Ameaçadas de Extinção**. Brasília, DF, 2018.

MONTEIRO, F. A. D. **A espeleologia e as cavernas no Ceará: Conhecimento, Proteção ambiental e panorama atual**. UFC. 2014.

MOURA, P. E. F. **Evolução Geomorfológica do relevo cárstico do município de Martins – Rio Grande do Norte**. UFC: Fortaleza, 2017.

NASCIMENTO, A.R.T.; FELFILI, J.M.; MEIRELLES, E.M. Florística e estrutura da comunidade arbórea de um remanescente de Floresta Estacional Decidual de encosta, Monte Alegre, GO, **Brasil. Revista Acta Bot. Bras.** v.18, n.3, 2004. 659-669p.

NEGI, A.; SARETHY, I. P. Microbial Biodeterioration of Cultural Heritage: Events, Colonization, and Analyses. **Microbial Ecology**, v.78, 2019. 1014-1029p.

NOGUEIRA, L. B. **Estudo geoquímico e isotópico de rochas carbonáticas das formações Grandarela e Fecho do Funil: Quadrilátero Ferrífero – Brasil**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2018.

OLIVEIRA, J. A.; BONVICINO, C. R. Ordem Rodentia. In: Reis, N. R.; PERACCHI, A. L.; PEDRO, W. A.; LIMA, I. P. (Eds.) **Mamíferos do Brasil**. Londrina, 2011, 358-431p.

OLIVEIRA, G. B. et al. Origem e distribuição do nervo femoral do mocó, *Kerodon rupestris* (Cavidae). **Pesq. Vet. Bras.**, v.31, 2011, 84-88p.

OLIVEIRA, M. F.; CARTER, A. M.; BONATELLI, M.; AMBROSIO, C. E.; MIGLINO, M. A. **Placentation in the rock Cavy, *Kerodon rupestris* (wied). Placenta**, v.27, 2006. 87-97p.

OSORIO-RODRIGUEZ, D.; SANCHEZ-QUIÑÓNEZ, C. A. Biological and geological characterization of modern biofilms and microbial mats and comparison with similar lithified structures in Colombian Cretaceous formations. **Earth Sciences Research Journal**, v.22, n.3, 2018. 159-168p.

PARRA, O.; BICUDO, C.E.M. **Algas de aguas continentales: Introducción a la Biología y sistemática**. Ediciones Universidad de Concepción. 1996.

PEREIRA, T.T.C.; BRASIL, R.D.; OLIVEIRA, A.M.; POEIRAS, L.M.; ALMEIDA, I.C.C.; Propostas e desafios para definição de áreas prioritárias para conservação da biodiversidade no norte de Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v.8, n.1, 2020. 53-69p.

PERRAS, M. A.; DIEDERICHS, M. S. The importance of classification for carbonates and mudrocks in engineering. **Geotechnical Conference**. 2011.

PILÓ, L. B. Revisão de literatura: geomorfologia cárstica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.1, n.1, 2000.

- PORTELLA, A. S. **Ecologia de Kerodon acrobata (Rodentia: Caviidae) em fragmentos de mata seca associados a afloramentos calcários no Cerrado do Brasil Central**. Tese de doutorado em Ecologia. UnB, Brasília, 2015.
- REIS, A. C. Geologia, **Sistemas deposicionais e estratigrafia isotópica do grupo Bambuí na região de Santa Maria da Vitória, BA**. UNB, Brasília, 2013.
- RESENDE, N. S. **Distribuição dos grupamentos neuronais colinérgicos no encéfalo do mocó (Kerodon rupestris)**. Biologia Estrutural e Funcional. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- REVIERS, B. **Biologia e Filogenia das Algas**. Artmed. Capítulo 1. 2018.
- RIDING, R. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms. **Sedimentology**, v.47, 2000. 179-214p.
- RODRIGUES, M. L. Classificação e tipologias dos lapiás: Contributo para uma terminologia das formas cársicas. **Finisterra**. n.93, Lisboa, 2012.
- RONCERO-RAMOS, B.; MUÑOS-MARTÍN, M. A.; Y. CANTÓN, Y.; CHAMIZO, S.; RODRÍGUEZ-CABALLERO, E.; MATEO, P. Land degradation effects on composition of pioneering soil communities: An alternative successional sequence for dryland cyanobacterial biocrusts. **Soil Biology and Biochemistry**, v.146, 2020.
- ROSE L.; VINCENT P. J. The kamenitzas of Gait Barrows National Nature Reserve, north Lancashire, England. In: **Paterson K.**, Sweeting M. M. (Eds.), *New Directions in Karst*. Geobooks, Norwich, 1986. 473-496p.
- ROSSI, F.; DE PHILIPPIS, R.: **Role of Cyanobacterial Exopolysaccharides in Phototrophic Biofilms and in Complex Microbial Mats**, *Life*, v.5, 2015. 1218-1238p.
- RUGGIERI, R. Karst Geomorphological Features. In: **Speleological and Speleogenetic Aspects of the Monti di Capo San Vito (Sicily)**. Springer Theses, 2016.
- SALVIA, E. S. **A reconstrução da paisagem da paleo-micro bacia do Antônio e a sua ocupação pelo homem no pleistoceno**. Tese de doutorado. Pós-graduação em História. Universidade Federal de Pernambuco: Recife: PE, 2006.
- SANTOS, R. N.S. **Levantamento do Geopatrimónio no Concelho de Loures e definição de Percursos Geoturísticos**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Lisboa. 2014.
- SCHEERER, S.; ORTEGA-MORALES, O.; GAYLARDE, C. Chapter 5 Microbial Deterioration of Stone Monuments - An Updated Overview. **Advances in Applied Microbiology**, v.66, 2009.
- SCHIRRMESTER, B. E; GUGGER, M.; DONOGHUE, P. C. J. **Cyanobacteria and the great oxidation event: evidence from genes and fossils by**. *Palaeontology*, v.58, n.5, 2015. 769-785p.

SILVA, M. Mapeamento de superfícies aplainadas no norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.9, n.2, 2016. 526-545p.

SILVA, M. B. **Caracterização Pedológica e gênese de solos em duas topossequências no sistema cárstico da Serra da Bodoquena – MS**. Tese de doutorado. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Ciências do solo, Seropédica-RJ: 2013.

SOUSA, R. A. **Caracterização do ritmo de atividade/repouso do mocó (Kerodon rupestris) em fotoperíodo artificial**. Departamento de Psicobiologia. Universidade federal do Rio Grande do Norte. 2006.

TERRA, G. J. S. et al. Classificação de rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras. **B. Geoci. Petrobras**, Rio de Janeiro, v.18, n.1, 2010. 9-29p.

TOLMASQUIM, M. T. **Análise socioambiental de alternativas para o atendimento à Interligação Pirapora** – Montes Claros; Rio de Janeiro, 2009.

TONIETTO, S. N. **Diagênese e hidrotermalismo em rochas carbonáticas proterozóicas: Grupo Bambuí e Vazante, Bacia do São Francisco**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, Universidade de Brasília, 2010. 196p.

TRAJANO, E.; BICHUETTE, M. E. **Biologia subterrânea – Introdução**. São Paulo. Redespeleo Brasil, 2006.

TRAVASSOS, L. E. P. **Considerações sobre o carste da região de Cordisburgo, Minas Gerais, Brasil**. Belo Horizonte: Tradição Planalto, 2010.

TRAVASSOS, L. E. P. **Princípios de Carstologia e Geomorfologia Cárstica**. Brasília: ICMBio, 2019.

TRAVASSOS, L.E.P.; RODRIGUES, B. D.; TIMO, M.B. **Glossário conciso e ilustrado de termos cársticos e espeleológicos**. PUC, BH: 2015.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal**. IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Rio de Janeiro. 1991.

VERESS, M. Karren Features. In: **Karst Environments: Karren Formation in High Mountains**. Springer Science + Business Media B.V. 2010. 134-140p.

WILLIAMS, W. J., BÜDEL, B., REICHENBERGER, H., ROSE, N.: **Cyanobacteria in the Australian northern savannah detect the difference between intermittent dry season and wet season rain**, *Biodivers. Conserv.* v.23, 2014. 1827-1844p.

WILLIAMS, W., BÜDEL, B.; WILLIAMS, S. **Wet season cyanobacterial N enrichment highly correlated with species richness and Nostoc in the northern Australian savannah**. *Biogeosciences*, v.15, 2018. 2149-2159p.

WRIGHT, V.P. Paleopedology: Stratigraphic relationship and empirical models. In: MARTINI, I.P.; CHESWORTH, W., eds. **Weathering, soils e paleosols**. Amsterdam, Elsevier, 1992. 475-499p.

ZOGNO, M. A. **Aspectos reprodutivos da fêmea de mocó (kerodon rupestres): análise bioquímica dos líquidos fetais e caracterização colpocitológica do ciclo estral**. Tese de Doutorado. Departamento de Medicina Veterinária da USP, São Paulo, 2002.



CAPÍTULO 2:

Da colonização biológica à formação de bolsões de solos e crostas: uma análise do papel de atuação da cianobactéria *Desmonostoc* sp. e do Mocó no desenvolvimento de feições associadas à paisagem cárstica no Norte de Minas Gerais

Foto: Araceli Mendonça de Oliveira

RESUMO

OLIVEIRA, Araceli Mendonça de. **Da colonização biológica à formação de bolsões de solos e crostas: uma análise do papel de atuação da cianobactéria *Desmonostoc* sp. e do Mocó no desenvolvimento de feições associadas à paisagem cárstica no Norte de Minas Gerais.** Uberaba: UFTM, 2020. Cap. 2 (Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental).

A suscetibilidade das rochas calcárias à colonização biológica pode desempenhar um papel significativo no desenvolvimento do relevo cárstico, uma vez que a formação de biofilmes microbianos e compostos exopoliméricos produzidos por distintas atividades metabólicas, podem influenciar os processos de dissolução e precipitação de minerais, estimulando transformações específicas no carste. Tendo em vista que os estudos sobre a atuação biológica em afloramentos de calcário no Norte de Minas Gerais ainda são escassos, o presente estudo teve como objetivo analisar o papel da cianobactéria *Desmonostoc* sp. e do Mocó (*Kerodon rupestris*) na transformação superficial do calcário e gênese de feições que contribuem com a evolução do relevo cárstico no Norte de Minas Gerais. Os procedimentos técnicos de pesquisa partiram de uma revisão teórica e trabalho de campo com visitas a dois afloramentos de rochas calcárias, onde foram coletadas dezesseis amostras constituídas por excrementos, bolsões de solos, crostas e rochas, as quais foram submetidas às análises do teor de carbono orgânico total e fracionamento de substâncias húmicas; de acidez potencial e de caracterização micromorfológica. Os resultados apontaram uma pequena recuperação do carbono orgânico total, com predomínio da humina, seguida pelos ácidos húmicos e fúlvicos; a acidez potencial apresentou valores classificados como muito baixa, baixa e muito alta, especialmente para a amostra referente às excreções do Mocó. As imagens micromorfológicas revelaram algumas feições no calcário como crostas associadas às eflorescências salinas, córtex de alteração, descoloração, halos, fragmentos e preenchimentos. Pode-se concluir que as espécies em estudo estão inseridas dentro de uma evolução do relevo cárstico e possivelmente os efeitos da colonização foram capazes de promover a formação de biofilmes, que por meio de complexas interações metabólicas, estimularam os processos de biocarstificação, favorecendo as transformações superficiais na rocha calcária e a gênese de feições que auxiliam a evolução do relevo cárstico.

Palavras-chave: Biocarstificação, Rochas Calcárias, Biofilme, *Kerodon rupestris*.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Araceli Mendonça de. **From biological colonization to the formation of pockets of soils and crusts: an analysis of the role of cyanobacteria *Desmonostoc* sp. and Mocó in the development of features associated with the karst landscape in North of Minas Gerais State, Brazil.** Uberaba: UFTM, 2020. Chap. 2 (Master's Dissertation in Environmental Science and Technology).

The susceptibility of limestones to biological colonization can be a significant role in the development of karst relief, since the microbial biofilms formation and exopolymeric compounds produced by different metabolic activities, can influence the dissolution processes and precipitation of minerals, boosting specific transformations at karst. Study about biological performance in limestone outcrops in the North of Minas Gerais are still scarce, so it was aimed to analyze the role of the cyanobacterium *Desmonostoc* sp. and Mocó (*Kerodon rupestris*) in the superficial transformation of limestones and genesis of features that contribute to evolution of karst relief in North Minas Gerais. The technical research procedures started from a theoretical review and field work with visits to two outcrops of limestone rocks, where sixteen samples were collected made up of excrement, soil pockets, scabs and rocks, which were submitted to analysis of the total organic carbon content and fractionation of humic substances; potential acidity and micromorphological characterization. Results showed a small recovery of total organic carbon, with a predominance of humine, followed by humic and fulvic acids; the potential acidity presented very low, low and very high values, especially for Mocó excretions samples. Micromorphological results showed some features in the limestones as crusts associated with saline efflorescence, alteration cortex, discoloration, halos, fragments and fillings. It can be concluded that species under study are part of an evolution of the karst relief and possibly the effects of colonization were able to promote the biofilm formation, which through complex metabolic interactions, stimulated the biocarstification processes and favoring the superficial transformations in limestone rocks and the genesis of features that help the evolution of karst relief.

Key words: Biocarstification, Limestone Rocks, Biofilm, *Kerodon rupestris*.

DA COLONIZAÇÃO BIOLÓGICA À FORMAÇÃO DE BOLSÕES DE SOLOS E CROSTAS: UMA ANÁLISE DO PAPEL DE ATUAÇÃO DA CIANOBACTÉRIA *Desmonostoc* sp. E DO MOCÓ NO DESENVOLVIMENTO DE FEIÇÕES ASSOCIADAS À PAISAGEM CÁRSTICA NO NORTE DE MINAS GERAIS

1 INTRODUÇÃO

O termo carste (karst) inicialmente foi empregado pelo geógrafo sérvio Jovan Cvijić para designar a morfologia regional das formações calcárias resultantes de processos geoquímicos de dissolução (TRAVASSOS, 2019). Ainda que as feições cársticas estejam presentes em diversas litologias (FABRI; AUGUSTIN; AULER, 2014), são em rochas carbonáticas que elas ganham suas mais nítidas manifestações. O desenvolvimento do carste ocorre principalmente pela atuação da água da chuva, que ao absorver o gás carbônico da atmosfera ou da matéria orgânica em decomposição forma o ácido carbônico, e este ao interagir com os calcários provoca reações químicas dissolvendo os carbonatos (SILVA, 2013).

No Brasil, cerca de 5 a 7% do seu território é formado por paisagens cársticas, e em Minas Gerais cerca de 3 a 5% do território é constituído por rochas carbonáticas (TRAVASSOS, 2010). No município de Montes Claros, Norte de Minas Gerias, o relevo cárstico molda a paisagem com seus afloramentos de rochas calcárias em forma de lapiás, os quais são colonizados por diversos tipos de organismos, dentre eles as cianobactérias do gênero *Desmonostoc* sp. e os roedores *Kerodon rupestris*, conhecidos como Mocós.

As cianobactérias são seres fotossintetizantes que apresentam características fisiológicas peculiares que lhes permitem colonizar os mais diferentes ambientes (REVIERS, 2018). Esses microrganismos constituem um dos elementos essenciais na formação de biofilmes microbianos (ROSSI; MUGNAI; DE PHILIPPIS, 2018), pois sua capacidade de excretar polissacarídeos extracelulares aumentam a diversidade microbiana, que coexiste e interage entre si e com o substrato mineral (DUPRAZ; VISSCHER, 2005; GOLUBIEL; SEONG-JOO; BROWNE, 2000; OSÓRIO-RODRIGUES; SANCHEZ-QUINONEZ, 2018) estimulando o estabelecimento de estágios sucessionais de outras espécies como líquens e musgos (RONCERO-RAMOS et al., 2020; SU et al. 2020).

Também com características fisiológicas que lhes permitem adaptar bem à alta temperatura e escassez de água e alimento, principalmente em períodos extremos de secas (OLIVEIRA et al., 2011; RESENDE, 2017), os Mocós da ordem Rodentia, família Caviidae e subfamília Caviinae (ARO et al., 2019) vivem especialmente em fendas ou rachaduras de

afloramentos rochosos no semiárido brasileiro e em algumas porções do Norte de Minas, limítrofes com o Cerrado (PORTELA, 2015). Esses locais servem de refúgio contra predadores e de latrinas coletivas em pontos estratégicos, geralmente em áreas elevadas dos rochedos (OLIVEIRA; BONVICINO, 2006; PARENTE; CAVALCANTI, 2017).

Muitos estudos têm observado o papel dos microrganismos e da fauna nos processos que influenciam na transformação das rochas em superfície, na formação do solo e na evolução do relevo. Doddy e Roden (2018) examinaram o potencial dos microrganismos como agentes de bioerosão, e mostraram que as cianobactérias estão envolvidas na produção de solo e na transformação dos afloramentos de calcário de Burren, na Irlanda, em um ambiente favorável à sucessão ecológica. Lü et al. (2019) observaram que a enzima anidrase carbônica microbiana desempenha um papel importante na precipitação de carbonato e na morfologia de espeleotemas modernos. Levett et al. (2020) demonstraram como a participação de microrganismos é fundamental na dissolução e reprecipitação do ferro em cangas, garantindo a dinâmica de degradação e formação desses materiais na paisagem.

Reconhecidos como “engenheiros de ecossistemas”, os castores são bons exemplos de como a fauna atua em modificações no relevo. Rosell et al. (2005), por exemplo, demonstraram a capacidade dos castores em modificar os sistemas hidrogeomorfológicos, o que também foi estudado por Ecke et al. (2017), que avaliaram os efeitos de barragens construídas por castores na hidrogeomorfologia, biogeoquímica e o funcionamento do ecossistema e da biodiversidade; e Ulicsni et al. (2020) que estudaram o conhecimento e a percepção local do impacto de castores nos ecossistemas e nos meios de subsistências em áreas geologicamente distintas da Hungria e da Romênia.

Embora tenha sido bastante documentado que os microrganismos e a fauna possam participar de transformações na escala local que, em conjunto, levam à transformação da paisagem, até o momento não foi encontrado na literatura brasileira nenhum estudo sobre a contribuição da cianobactéria *Desmonostoc* sp. e do Mocó no processo de desenvolvimento do relevo cárstico. As pesquisas nacionais geralmente se limitam a estudos sobre adaptações morfológicas, fisiológicas ou comportamentais dessas espécies, como nos estudos de Aro (2019), Obuekwe et al. (2019), Souza et al. (2020) e Alvarenga et al. (2020).

O objetivo do estudo foi analisar o papel da cianobactéria *Desmonostoc* sp. e do Mocó (*Kerodon rupestris*) na transformação superficial do calcário e gênese de feições que contribuem com a evolução do relevo cárstico no Norte de Minas Gerais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi realizado a partir de uma revisão teórica, de observações e coleta de dados em áreas representativas de relevo cárstico e de análises laboratoriais. A revisão teórica consistiu de um levantamento bibliográfico em fontes primárias e secundárias (ALBRECHT; ÛHIRA, 2000) sobre a evolução das paisagens cársticas e o comportamento dos organismos estudados, suas características fisiológicas e hábitos, com destaque para os autores apresentados na Tabela 1:

Tabela 1: Fontes literárias que abordam os organismos estudados e as paisagens cársticas.

Autores	Ano	Organismos	Carste
Golubiel, Seong-Joo e Browne	2000	x	
Piló	2000		x
Waren et al.	2001	x	
Dupraz et al.	2004	x	
Dupraz e Visscher	2005	x	
Li et al.	2005	x	x
Lian et al.	2008	x	x
Cucchi	2009		x
Dupraz et al.	2009	x	
Veress	2010		x
Travassos	2010		x
Dakal e Cameotra	2012	x	x
Gómez-Cornélio et al.	2012	x	x
Grimes	2012		x
Perri, Manzo e Tucker	2012	x	x
Rodrigues	2012		x
Silva	2013		x
Rossi e De Philippis	2015	x	
Travassos, Rodrigues e Timo	2015		x
Klimchouk et al.	2016		x
Phillips	2016	x	x
Cavalcante e Bastos	2017		x

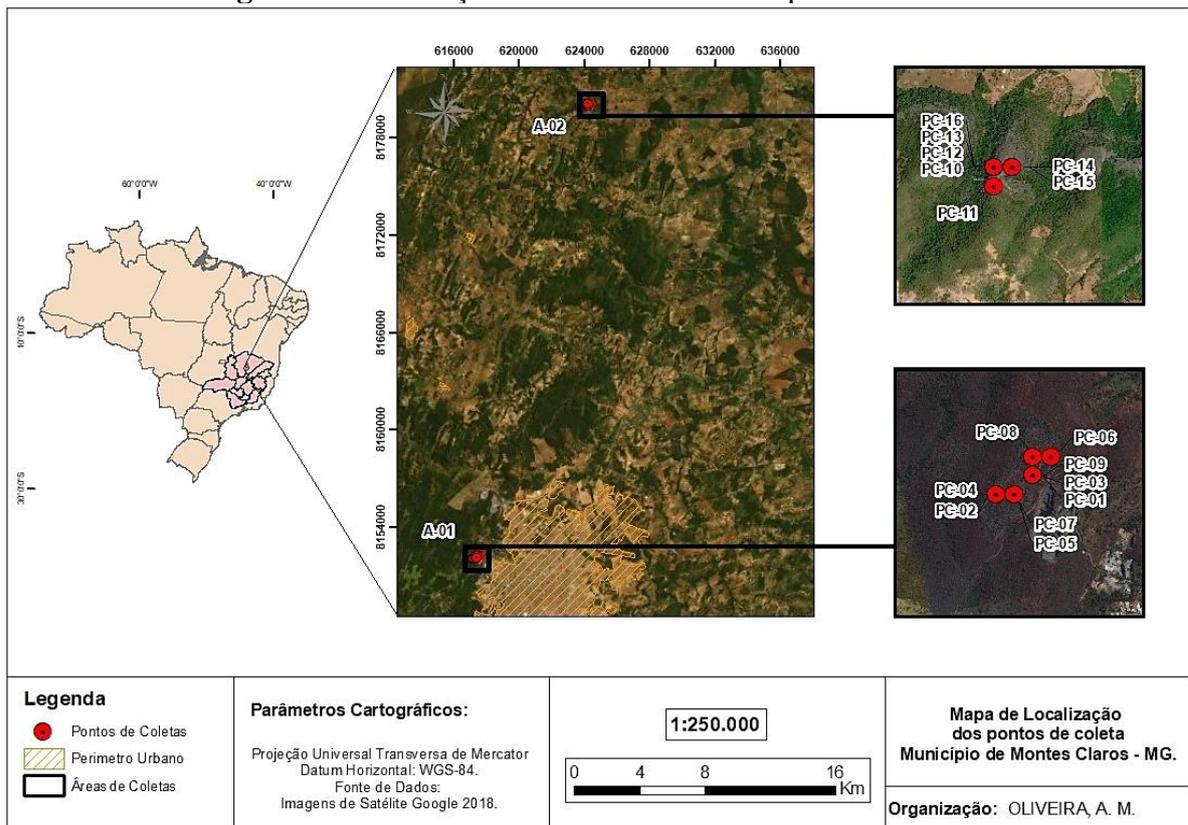
(Continuação)

Autores	Ano	Organismos	Carste
Doddy e Roden	2018	x	x
Lepinay et al.	2018	x	x
Osório-Rodrigues e Sanchez-Quinonez	2018	x	
Reviere	2018	x	
Rossi, Mugnai e De Philippis	2018	x	
Williams, Büdel e Williams	2018	x	
Aro et al.	2019	x	
Lü et al.	2019	x	x
Negi e Sarethy	2019	x	
Obuekwe et al.	2019	x	
Pinheiro et al.	2019	x	
Tang et al.	2019	x	x
Travassos	2019		x
Alvarenga et al.	2020	x	
Guimarães et al.	2020	x	
Levett et al.	2020	x	
Kuzyakov, Blagodatskaya	2020	x	
Roncero-Ramos et al.	2020	x	
Souza et al.	2020	x	
Wieliczko et al.	2020	x	
Zhou et al.	2020		x

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2020.

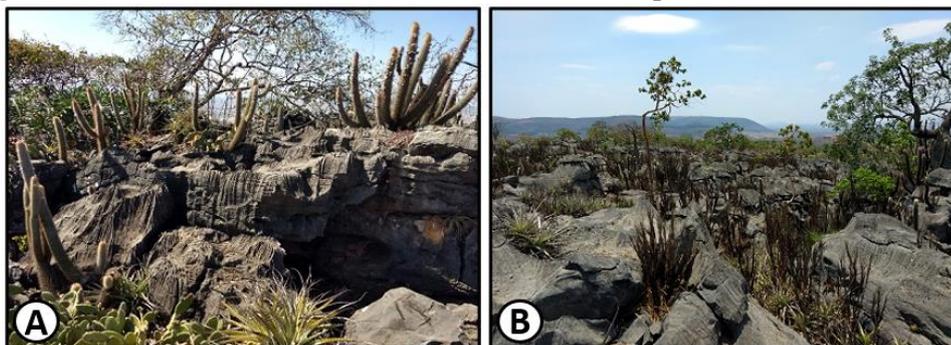
2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado no município de Montes Claros, localizado na Bacia do Alto Médio São Francisco, ao Norte de Minas Gerais (Figura 1). O clima é do tipo Aw, ou seja, tropical úmido de savana com inverno seco (SILVA, 2016). A média anual de precipitação é de 1.029 mm com chuvas concentradas entre os meses de outubro a março, enquanto a estação seca ocorre entre os meses de junho a agosto, com média térmica anual de 22,7 °C (CLIMATE DATA, 2019).

Figura 1: Localização das áreas estudadas e pontos coletados.

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2020).

A cobertura vegetal do município é constituída por Cerrado *stricto sensu* cobrindo áreas de topos e chapadões, por Floresta Estacional Semidecidual presente nas drenagens de encostas e, com reduzida cobertura, por Macaubaís em porções mais aplainadas da paisagem. Nas áreas amostradas situadas em afloramentos calcários (Figura 2) encontram-se fragmentos de vegetação rupestre rica em espécies das famílias Cactaceae e Bromeliaceae, muitas com ocorrência restrita como a bromélia *Encholirium luxor* L. B. Sm. & R. W. Read, intercaladas por Floresta Estacional Decidual, conhecida como “mata seca” (FONSECA; ARRUDA; XAVIER, 2020; PEREIRA et al., 2020).

Figura 2: Afloramentos de calcários em forma de Lapiás, Montes Claros - MG.

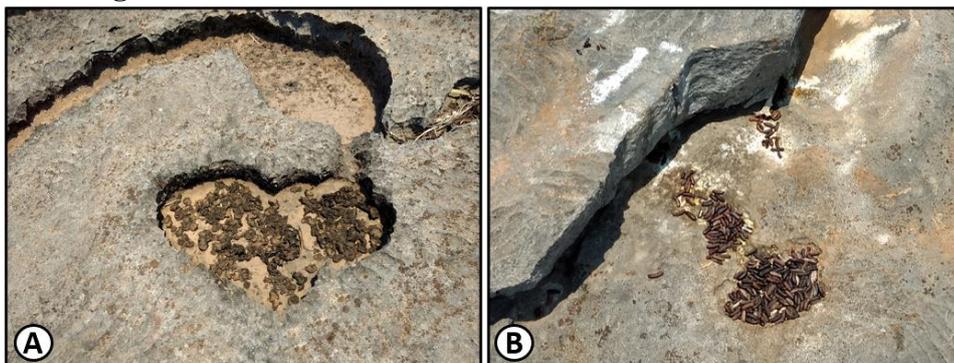
Nota: A) Área 01: Destaque para os lapiás. B) Área 02: Visão geral da paisagem. **Fonte:** Autor, (2019).

Montes Claros se insere em um domínio carbonático carstificado (ALVES; CORDEIRO; MURILO, 2019), na província do Cráton São Francisco, especificamente associado a rochas metassedimentares terrígenas e carbonáticas de idade Neoproterozóica do Grupo Bambuí, as quais foram depositadas em uma bacia antepaís, de sedimentação exclusivamente marinha. Na área de estudo afloram rochas da Formação Lagoa do Jacaré, onde são encontrados calcário fino cristalizado, estilólitos, siltitos cinza-esverdeados e piritosos; calcários margosos, placosos, escuros, por vezes oosparíticos recristalizados e brechoides, piritosos, com nódulos de calcita preta fétida, intercaladas de siltitos e raras margas (IGLESIAS; UHLEIN, 2009; LEITE, SANTOS; ALMEIDA, 2011; CRUZ, 2012).

2.2 AMOSTRAGEM

As coletas foram realizadas considerando sempre como referência os afloramentos rochosos visivelmente influenciados pela ocupação da cianobactéria *Desmonostoc* sp., que geralmente ocorre em Kamenitza, e pelos excrementos do Mocó sobre a rocha calcária, indicando sua presença no local (Figura 3).

Figura 3: Rochas calcárias colonizadas, Montes Claros - MG.



Nota: A) Kamenitza (*Desmonostoc* sp.). B) Latrina (Mocó). **Fonte:** Autor, (2019).

Foram coletadas 16 amostras de rochas, bolsões de solos, crostas e excrementos, em dois afloramentos de calcário, um nas proximidades do perímetro urbano de Montes Claros e outro na Comunidade Samambaia, sendo 13 amostras referentes ao material sob a influência da cianobactéria *Desmonostoc* sp. e 03 de influência do Mocó. As amostras foram coletadas utilizando martelo, formão, espátula e sacos plásticos para acondicionamento, que após identificação foram encaminhadas para análises laboratoriais. As características das amostras coletadas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Características gerais das amostras coletadas

Área de coleta	Altitude	Ponto de coleta	Coordenada geográfica	Características do material coletado	Análises realizadas
A1 Próximo ao perímetro urbano de Montes Claros	816 m	P01	16°42'36" S 43°53'52" O	Rochas calcárias e crostas sem excreções do Mocó	(H+Al) MICRO
		P02	16°42'39" S 43°54'01" O	Rochas calcárias e crostas sem excreções do Mocó	(H+Al) MICRO
		P03	16°42'36" S 43°53'52" O	Excreções do Mocó	(H+Al)
		P04	16°42'39" S 43°54'01" O	Cianobactérias sobre fragmentos de rochas calcárias	COT - SH (H+Al) MICRO
		P05	16°42'00" S 43°54'01" O	Pó calcário com cianobactérias	COT - SH (H+Al)
		P06	16°42'39" S 43°53'49" O	Bolsões de solos entre fragmentos de rochas calcárias e cianobactérias	COT SH (H+Al)
		P07	16°42'00" S 43°54'01" O	Bolsões de solos entre fragmentos de rochas calcárias e cianobactérias	COT SH (H+Al)
		P08	43°53'52" S 16°42'32" O	Bolsões de solos com cianobactérias	COT - SH (H+Al)
		P09	16°42'36" S 43°53'52" O	Bolsões de solos entre fragmentos de rochas calcárias e cianobactérias	COT - SH (H+Al)
A2 Comunidade Samambaia	790 m	P10	16°27'25" S 43°50'09" O	Cianobactérias sobre fragmentos de rochas calcárias	COT - SH (H+Al) MICRO
		P11	16°27'28" S 43°50'09" O	Bolsões de solos com cianobactérias	COT - SH H+AL
		P12	16°27'25" S 43°50'09" O	Bolsões de solos com cianobactérias	COT - SH (H+Al)
		P13	16°27'25" S 43°50'09" O	Bolsões de solos entre fragmentos de rochas calcárias e cianobactérias	COT SH H+AL
		P14	16°27'25" S 43°27'25" O	Bolsões de solos entre fragmentos de rochas calcárias e cianobactérias	COT - SH (H+Al) MICRO
		P15	16°27'25" S 43°27'25" O	Bolsões de solos com cianobactérias	COT - SH (H+Al)
		P16	16°27'25" S 43°50'09" O	Bolsões de solos com cianobactérias	COT - SH (H+Al)

Nota: COT: Carbono Orgânico Total. SH: Substâncias Húmicas. (H+Al): Acidez Potencial. MICRO: Micromorfologia. **Fonte:** Elaborado pelo Autor, (2020).

2.3 ANÁLISES LABORATORIAIS

Para a cianobactéria *Desmonostoc* sp. foram analisados o teor de carbono orgânico total, o fracionamento de substâncias húmicas, a acidez potencial (P04 ao P16) e a caracterização micromorfológica (P04, P10 e P14) e, para o Mocó, por suas amostras se tratarem de excrementos, crostas e rochas com pequena quantidade de bolsões de solos, não foi possível realizar a análise do teor de carbono e o fracionamento de substâncias húmicas, sendo analisada a acidez potencial (P01, P02 e P03) e a caracterização micromorfológica (P01 e P02).

O teor de carbono orgânico total foi determinado por meio da oxidação utilizando 0,5 g de terra fina seca ao ar (TFSA) em 5 mL da solução de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) 0,167 mol L⁻¹ e 7,5 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado, a uma temperatura de 170 °C por 30 min, em bloco digestor. Após o repouso, os extratos foram transferidos para erlenmeyers de 250 mL, completando com água destilada para um volume final de 80 mL. Foi adicionado 250 mL de solução indicadora de ferroin ($C_36H_{24}FeN_6^{2+}$) e titulação com solução de sulfato ferroso amoniacal $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ 0,20 mol L⁻¹ (sal de Mohr). O teor de carbono orgânico total foi calculado conforme a equação proposta por Yeomans e Bremner (1988).

O fracionamento químico das substâncias húmicas foi realizado segundo método adaptado de Swift (1996) por Mendonça e Matos (2005). Para a extração, foi utilizado 1,0 g de terra fina secas ao ar (TFSA) e adicionado 10 mL de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 mol L⁻¹. Após uma 1 h de agitação e descanso por 24 h, os extratos alcalinos e os resíduos foram separados por meio de centrifugação a 3.000 rpm por 20 min. Os resíduos da fração húmica foram retirados dos tubos da centrífuga e secados a 45 °C em estufa. O pH da solução contendo as frações de ácido fúlvico e húmico foi ajustado, seguido de repouso por 18 h e por 5 min em centrifugação a 3.000 rpm, o sobrenadante de ácido fúlvico e o precipitado de ácido húmico foram aferidos utilizando água destilada. Foi calculado o percentual do índice de humificação e das frações ácido fúlvico, ácido húmico e húmica em relação ao teor de carbono orgânico total.

A acidez potencial foi determinada pelo método de extração por acetato de cálcio [$Ca(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$] 0,5 mol L⁻¹ tamponado a pH 7,0 e determinado por titulação com hidróxido de sódio (NaOH) 0,025 mol L⁻¹ em presença de fenolftaleína como indicador, estabelecido por Embrapa (2017). Para essa determinação, foram adicionados 75 mL de solução extratora a um erlenmeyer de 125 mL contendo 5 g de terra fina seca ao ar (TFSA). Após 10 min de agitação e repouso durante uma noite, foram tomadas alíquotas de 25 mL da solução sobrenadante obtidas e, a seguir, adicionou-se 3 gotas de indicador fenolftaleína a 1% com

solução de $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ de hidróxido de sódio (NaOH) até o desenvolvimento da cor rósea. O cálculo de teor da acidez potencial foi obtido usando a fórmula descrita por Embrapa (2017).

Para a caracterização micromorfológica foram confeccionadas lâminas delgadas e polidas, conforme Martins et al. (2002). As amostras foram impregnadas por resina, transferidas para uma estufa sob temperatura de $55 \text{ }^\circ\text{C}$, fatiadas e polidas até alcançar a dimensão de $1,8 \times 30 \times 40 \text{ mm}$ ($30 \text{ }\mu\text{m}$ de espessura). Seguindo os critérios estabelecidos por Stoops (2003) e Stoops et al. (2018), as lâminas foram descritas por meio das imagens obtidas pelo microscópio Petrográfico Trinocular, modelo Zeiss - Axiophot, com câmera acoplada.

3 RESULTADOS

3.1 CARBONO ORGÂNICO TOTAL, FRACIONAMENTO DE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS E ACIDEZ POTENCIAL

Os bolsões de solos coletados (Tabela 3) apresentaram uma pequena recuperação de carbono orgânico variando de $0,53$ a $24,82 \text{ dag.kg}^{-1}$, nos P10 e P15, respectivamente. Sendo que os maiores valores foram obtidos nas amostras P15 ($24,82 \text{ dag.kg}^{-1}$), P14 ($19,94 \text{ dag.kg}^{-1}$), P16 ($19,33 \text{ dag.kg}^{-1}$) e P06 ($18,72 \text{ dag.kg}^{-1}$) e os menores valores nas amostras P10 ($0,53 \text{ dag.kg}^{-1}$), P04 ($1,36 \text{ dag.kg}^{-1}$), P07 ($2,86 \text{ dag.kg}^{-1}$) e P05 ($2,87 \text{ dag.kg}^{-1}$).

O índice de humificação apresentou valores de maturação distintos, variando entre $3,6\%$ (P10) a $64,2\%$ (P07) sendo os maiores valores observados nas amostras P07 ($64,2\%$) e P04 ($52,2\%$), enquanto que as amostras P10, P12 e P13 apresentaram os menores valores ($3,6\%$), ($5,6\%$) e ($6,5\%$), respectivamente.

Ao analisar a solubilidade das substâncias húmicas em meio aquoso, observou-se que a humina foi a fração mais significativa como reserva de carbono variando de $0,40$ a $20,67\%$, seguida pela fração ácido húmico com valores entre $0,01$ a $6,98\%$ e fúlvico de $0,07$ a $9,28\%$. Os maiores valores para a humina foram observados nas amostras P11 ($20,67\%$) e P08 ($19,30\%$) e os menores em P13 ($0,40\%$) e P10 ($0,06\%$).

Entre as frações solúveis, os ácidos húmicos apresentaram maiores teores nas amostras P16 ($6,98\%$), P12 ($6,18\%$) e P06 ($6,08\%$), enquanto que os menores teores foram observados nas amostras P10 ($0,01\%$), P04 ($0,27\%$) e P08 ($0,67\%$). A fração ácido fúlvico apresentou os maiores teores nas amostras P16 ($9,28\%$) e P15 ($8,08\%$) e os menores nas amostras P10 ($0,07\%$), P05 ($0,01\%$) e P04 ($0,07\%$).

Os teores de acidez potencial apresentaram um amplo intervalo com valores entre 0,16 a 23,9 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$, evidenciando diferentes intensidades de poder tampão e trocas catiônicas. Ao analisar os resultados obtidos com a classificação proposta por Ribeiro, Guimarães e Alvarez (1999) para a acidez potencial, foi possível identificar amostras com acidez “muito baixa” ($\leq 1,0 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$) nos P06 (0,64 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$), P07 (0,48 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$), P09, P11, P13 (0,32 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$) e P02, P05 (0,16 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$); acidez “baixa” (entre 1,01 - 2,50 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$) nos P14 (2,14 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$), P16 (2,08 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$), P15 (1,92 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$) e P12 (1,60 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$) e acidez “muito alta” ($> 9,00 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$) no P03 (23,90 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$) para a amostra de excrementos do Mocó. Não foram apresentados resultados de acidez potencial para as amostras P01, P04, P08 e P10 por se tratarem de resultados insatisfatórios.

Tabela 3: Teores de carbono orgânico das frações húmicas e acidez potencial.

AMOSTRAS	CARBONO ORGÂNICO DAS FRAÇÕES					ACIDEZ POTENCIAL
	COT ⁽¹⁾ dag.kg ⁻¹	IH ⁽²⁾	FAF ⁽³⁾	FAH ⁽⁴⁾	HUM ⁽⁵⁾	(H+Al) cmol _c .kg ⁻¹
			%			
(*)(***) P01	-	-	-	-	-	-
(*) P02	-	-	-	-	-	0,16
(*) P03	-	-	-	-	-	23,9
(***) P04	1,36	52,2	0,07	0,27	4,04	-
P05	2,87	45,6	0,01	1,37	11,22	0,16
P06	18,72	14,5	5,17	6,08	4,50	0,64
P07	2,86	64,2	1,57	1,47	16,57	0,48
(***) P08	5,91	33,6	1,17	0,67	19,30	-
P09	6,52	32,1	1,27	2,17	17,71	0,32
(***) P10	0,53	3,6	0,07	0,01	0,06	-
P11	5,91	37,8	1,97	1,97	20,67	0,32
P12	10,18	5,6	3,17	6,18	1,65	1,60
P13	8,35	6,5	2,37	2,27	0,40	0,32
P14	19,94	26,1	5,37	5,88	15,43	2,14
P15	24,82	19,4	8,08	5,68	9,62	1,92
P16	19,33	18,7	9,28	6,98	6,89	2,08

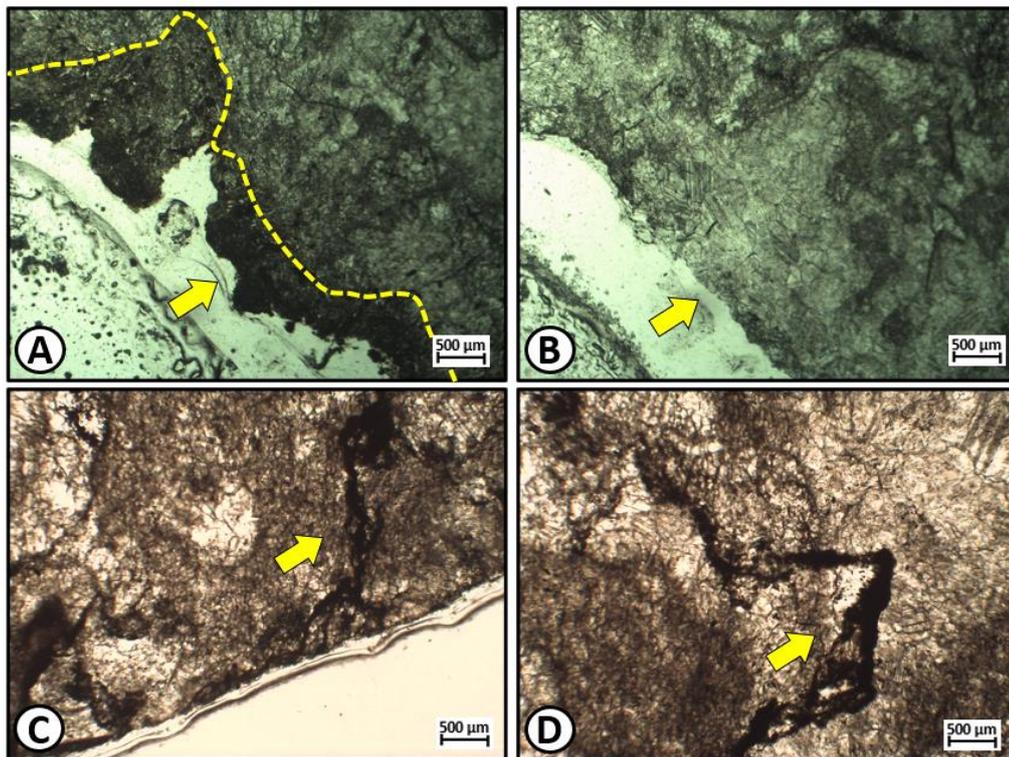
Nota: ⁽¹⁾COT: Carbono orgânico total. ⁽²⁾IH: Porcentagem do índice de humificação. ⁽³⁾FAF: Porcentagem da fração ácidos fúlvicos em relação ao carbono orgânico total. ⁽⁴⁾FAH: Porcentagem da fração ácidos húmicos em relação ao carbono orgânico total. ⁽⁵⁾HUM: Porcentagem da fração húmica em relação ao carbono orgânico total. (*): Não são apresentados resultados de COT para as amostras P01 e P02 considerando se tratarem de crostas e rochas com pouca quantidade de bolsões de solos disponíveis e o P03 de excrementos do Mocó. (**): Resultados insatisfatórios para (H+Al). **Fonte:** Elaborado pelo Autor, (2020).

3.2 CARACTERIZAÇÃO MICROMORFOLÓGICA

3.2.1 Seções delgadas associadas à cianobactéria *Desmonostoc* sp.

Os resultados indicaram áreas com uma fina cobertura de material moderadamente a muito humificado, com tonalidade de preto a preto-avermelhado escuro, constituindo uma carapaça que se encontra impregnada na superfície da rocha de forma descontínua (Figura 4A), não foram observadas reações semelhantes em outros pontos da rocha (Figura 4B). Onde o córtex de alteração é mais espesso, aproximadamente 2 mm de espessura em média, a superfície da rocha adquire aspecto mais irregular, sugerindo dissolução seletiva. A penetração do material orgânico ocorre por meio das fraturas e os preenchimentos acompanham os planos de diáclases que reproduzem internamente as reações de borda da superfície (Figura 4CD).

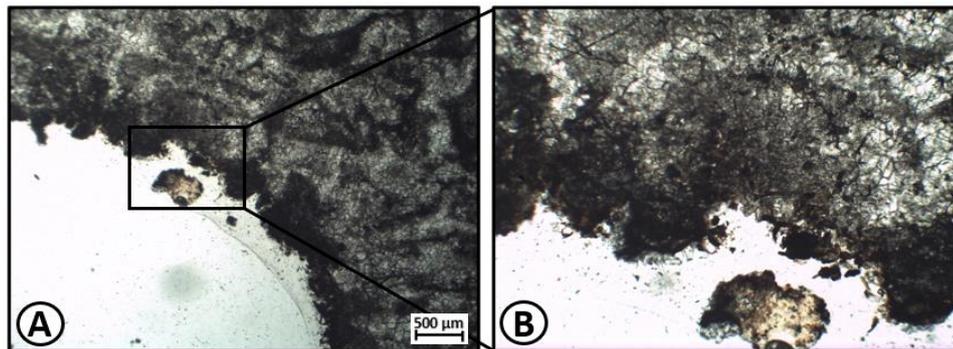
Figura 4: Ambiente de colonização da cianobactéria *Desmonostoc* sp.



Nota: A) Com carapaça. B) Sem carapaça. C e D) Fraturas com material orgânico. **Fonte:** Autor, (2020).

Ao ampliar a imagem (aumento de 100x) as observações microscópicas revelaram o aspecto filamentososo na superfície da rocha calcária, bem como o desprendimento de pequenos fragmentos de rocha muito alterada e bastante embebida pelo material orgânico humificado amorfo (Figura 5).

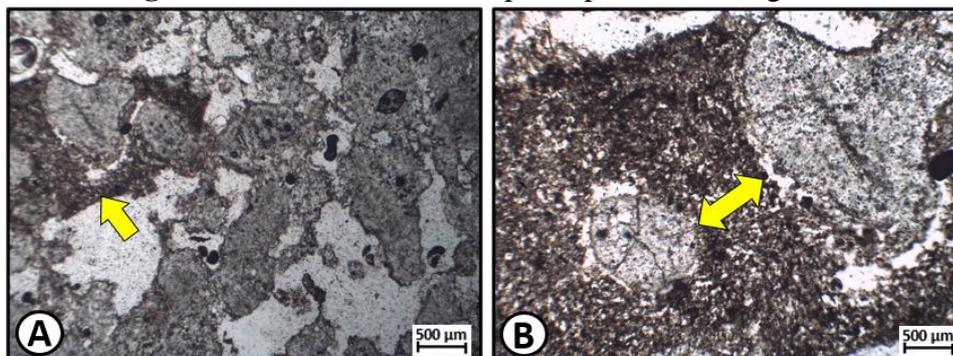
Figura 5: Fragmentos de rocha muito alterada.



Nota: A) Fragmentos de rocha. B) Detalhe da imagem A. **Fonte:** Autor, (2020).

Observou-se que a reação de alteração entre o material orgânico humificado e os carbonatos, parece ser bem intensa e além de mais penetrativa, a matéria orgânica ocorre em maior quantidade, sugerindo que esse tipo de rocha oportuniza melhores condições para o crescimento de microrganismos. A abertura da matriz ocorre através da formação de poros de formato irregular, tipicamente de dissolução, que vão se conectando, formando uma rede do tipo empacotamento simples e isolando pequenos fragmentos de rocha ainda não degradados (Figura 6).

Figura 6: Preenchimento dos poros por matéria orgânica.



Nota: A) Poros irregulares sendo ocupados por matéria orgânica. B) Fragmentos de rocha isolados.
Fonte: Autor, (2020).

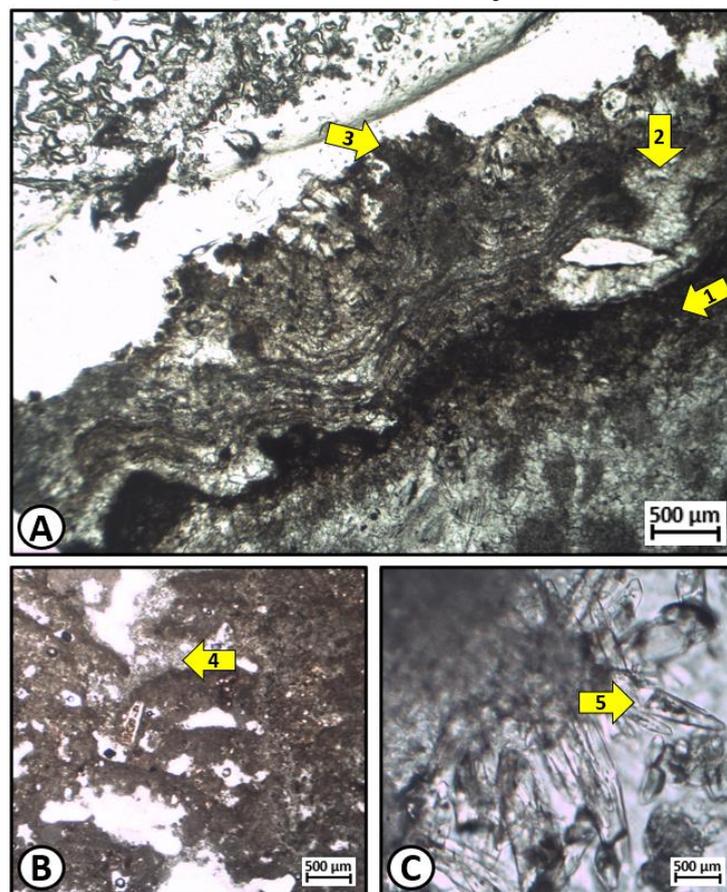
3.2.1 Seções delgadas associadas ao Mocó

A formação de crostas foram as feições mais expressivas de influência dos efeitos de colonização do Mocó e estão associadas às eflorescências salinas que se encontram incrustadas sobre a superfície do calcário. Foi observado que elas apresentam características macroscópicas indicativas de considerável revestimento com espessuras milimétricas a centimétricas,

apresentando superfícies rugosas com coloração variando de cinza-esbranquiçada a amarelada, sendo facilmente identificadas a campo.

Nas seções delgadas, as crostas que se formaram na superfície do calcário apresentaram uma variedade de microfáceis com distintos estágios de biocarstificação. A porção de contato da crosta com a superfície do calcário é sinalizada por um córtex de alteração de cor avermelhada, cujo comportamento sugere a formação de compostos de ferro e que, aparentemente, é marcada pela sua degradação (Figura 7 - A1). A precipitação crescente de soluções sobre a rocha leva à formação de halos bem demarcados de materiais calcificados (Figura 7 - A2). Na parte superior da crosta foi possível observar a descoloração do substrato resultando no escurecimento da superfície (Figura 7 - A3). Os poros são parcialmente preenchidos por subprodutos com aspectos amorfos de reprecipitação, evidenciando uma maior atividade microbiana (Figura 7 - B4). Minerais com hábito aciculado são visíveis e o crescimento das hastes sugere a nucleação em estruturas orgânicas identificadas pela mancha escura, sendo provavelmente, uma *needle fiber calcite* (Figura 7 - C5).

Figura 7: Ambiente de colonização do Mocó.



Nota: As setas indicam cada estágio de biocarstificação. A1) Acidificação. A2) Precipitação. A3) Descoloração. B4) Reprecipitação. C5) Provável *needle fiber calcite*. **Fonte:** Autor, (2020).

4 DISCUSSÃO

4.1 O PAPEL DA CIANOBACTÉRIA *Desmonostoc* sp. NA TRANSFORMAÇÃO SUPERFICIAL DO CALCÁRIO E GÊNESE DE FEIÇÕES

As cianobactérias são pioneiras no processo de colonização e favorecem a formação de biofilmes microbianos (ROSSI; MUGNAI; DE PHILIPPIS, 2018) que por meio de complexas interações metabólicas podem precipitar ou dissolver minerais (DUPRAZ et al., 2009). Possivelmente o mecanismo de colonização se inicia com a fixação da cianobactéria *Desmonostoc* sp. no substrato litológico que passa a secretar polissacarídeos extracelulares, os quais são responsáveis por manter a adesão à superfície e atrair diversos microrganismos, formando biofilmes. Uma vez aderidos aos substratos os microrganismos podem formar colônias com interações complexas e transformar as características físico-químicas das rochas (GOLUBIEL; SEONG-JOO; BROWNE, 2000; DAKAL; CAMEOTRA, 2012; PINHEIRO et al., 2019).

Dentre essas transformações os resultados demonstraram uma estreita relação entre os carbonatos e os microrganismos, sugerindo que as diferentes atividades metabólicas presentes no biofilme desempenham um papel significativo na degradação da rocha. Desta forma, é possível considerar que a tendência para os maiores teores de carbono orgânico sejam decorrentes de um estágio mais avançado de colonização realizado pela cianobactéria *Desmonostoc* sp. que oportuniza condições para a formação de uma matriz orgânica composta por diferentes microrganismos que atuam na produção e mineralização do carbono orgânico, enquanto que os menores teores obtidos são indicativos de um estágio inicial de formação com baixas taxas de densidade microbiana, riqueza de espécies e atividade metabólica, o que pode limitar o avanço do processo de humificação da matéria orgânica.

É muito provável que os maiores valores obtidos para o índice de humificação, também tenham relação direta com o desenvolvimento do biofilme, uma vez que a cianobactéria *Desmonostoc* sp. interage com a complexa matriz microbiana na produção de polissacarídeos extracelulares e múltiplos metabolismos intensificam a decomposição do material orgânico, proporcionando a formação de grupos funcionais hidroxilas e carboxilas que podem promover ou inibir a precipitação de carbonatos (DRUPAZ et al., 2009). A heterogeneidade entre o material de origem (diferentes tipos de calcário), a resistência a decomposição e a complexidade das reações metabólicas que influenciam a intensidade do processo de humificação, podem ter motivado os diferentes valores encontrados (MARTINS et al., 2015).

Foi relatado por Dupraz et al. (2004), Dupraz e Visscher (2005), Baumgartner et al. (2009) e Glunk et al. (2011) que as substâncias exopoliméricas produzidas por diversos microrganismos, principalmente por cianobactérias, possuem algumas macromoléculas que contêm grupos hidroxilas e carboxilas que se ligam aos cátions de cálcio e magnésio inibindo a precipitação de carbonatos, porém a capacidade de ligação catiônica pode ser reduzida através da degradação da matriz extracelular de polissacarídeos por microrganismos heterotróficos (fermentadores) e pela radiação UV, que por meio da hidrólise e descarboxilação favorece a concentração de cátions livres em solução, o que resulta em microambientes de precipitação de carbonatos.

Neste estudo, observou-se que a humina foi a fração mais significativa das substâncias húmicas, seguida pelos ácidos húmicos e fúlvicos, o que sugere maior estabilidade e interação com a fração mineral (PRIMO, MENEZES; SILVA, 2011). Pizauro Júnior e Melo (1995) destacaram que o predomínio de uma fração em detrimento da outra indica o estágio avançado de mineralização da matéria orgânica e a incorporação de nitrogênio à estrutura húmica, assim como Nierop (1999) utilizando o ^{13}C , afirmou que 40-45% do carbono da fração humina são polissacarídeos extracelulares que se apresentam preservados no solo através da interação com a fração mineral e formação dos complexos organometálicos.

Como a cianobactéria *Desmonostoc* sp. apresenta o heterocisto, célula capaz de fixar nitrogênio (WILLIANS; BÜDEL; WILLIANS, 2018), ela provavelmente ao converter o nitrogênio a formas disponíveis para assimilação pode estar contribuindo para que a humina seja a fração mais expressiva da matéria orgânica. Além disso, o clima Aw da área em estudo, por apresentar estações bem definidas, possivelmente contribui para a predominância da humina entre as frações húmicas (ácido fúlvico e ácido húmico) na medida em que possibilita a desidratação dos compostos orgânicos na estação seca, concentrada entre os meses de junho a agosto, e a rápida formação de compostos orgânicos mais estáveis com elevado peso molecular no período de chuvas, entre os meses de outubro a março (MANZATTO, 1990; SILVA, 2013; CLIMATE DATA, 2019).

As seções delgadas revelaram que a cianobactéria *Desmonostoc* sp. parece estar inserida dentro de uma evolução de feições específicas na rocha calcária com destaque para o córtex de alteração, a fragmentação e os preenchimentos. A presença do delgado horizonte orgânico sugere ter relação direta com o córtex de alteração, sendo um indicativo de que o processo de alteração na rocha calcária pode ser restrito a microambientes ativos de intenso metabolismo e diversidade microbiana que ocorre em consonância com as características da rocha e do ambiente, formando “hotspots microbianos” (KUZUYAKOV; BLAGODATSKAYA, 2015) e,

além do metabolismo que impulsiona as transformações biogeoquímicas, possivelmente a dissolução seletiva se deve à solubilidade diferenciada dos minerais, a capacidade ácida da solução e ao tempo de permanência em contato com a superfície reativa do calcário (EMBRAPA, 2004; FORD; WILLIAMS, 2007; OLIVEIRA, 2016).

Os afloramentos de calcários servem como fonte de carbono dissolvido para o metabolismo fotossintético (PENTECOSTE; WHITTON, 2012) da cianobactéria *Desmonostoc* sp. que cresce preferencialmente em Kamenitzas. Ao colonizar a rocha calcária, a cianobactéria *Desmonostoc* sp. em associação com microrganismos que coexistem no biofilme (SCHEERER; ORTEGA-MORALES; GAYLARDE, 2009) pode estar aumentando o pH e as concentrações de cálcio induzindo a precipitação de carbonatos (DRUPAZ et al., 2009) e estimulando a dissolução através da excreção de ácidos que, lentamente, corroem a superfície do substrato liberando pequenos fragmentos de rochas. Os polissacarídeos extracelulares e a expansão dos poros facilitam a retenção de água e partículas de argila transportadas pelo ar, o que faz com que seja favorecida a formação de bolsões de solos que acumulam biomassas orgânicas e servem como fonte de nutrientes para o desenvolvimento de organismos subsequentes (LIAN et al., 2008; DODDY; RODEN, 2018; NEGI; SARETHY, 2019), que podem potencializar a degradação da rocha calcária.

O papel dos microrganismos na dissolução dos carbonatos tem sido bastante documentado pela sua capacidade em excretar substâncias quelantes e ácidos orgânicos (oxálico, cítrico, pirúvico, láctico e outros) e inorgânicos (sulfúrico, nítrico, carbônico e outros) que, por serem corrosivos, reagem com os minerais e aceleram o processo de dissolução (GARCIA-PICHEL, 2006; LIAN et al., 2008; PINHEIRO et al., 2019; NEGI; SARETHY, 2019). Em um estudo sobre as formas cársticas, White e White (2013) afirmaram que a solubilidade dos minerais carbonáticos na presença de água pura é de cerca de 7 mg L^{-1} , muito baixa, e aumenta rapidamente em função da absorção de gás carbônico dissolvido e de outros ácidos. Por essa razão, os ácidos resultantes de excreções da cianobactéria *Desmonostoc* sp. em cooperação metabólica com o biofilme e especialmente do Mocó, que apresentou acidez potencial “muito alta” (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999), são indicativos do aumento de água quimicamente agressiva para dissolver a rocha carbonática e desenvolver diversas feições cársticas. Parente e Cavalcanti (2017) também confirmaram uma tendência para substrato ácido em amostras de excreções do Mocó. O amplo intervalo de valores encontrados para a acidez potencial evidenciaram as diferentes intensidades de poder tampão e podem estar relacionados ao menor teor de matéria orgânica, aos distintos tipos de

argilominerais e a complexidade metabólica que influencia a decomposição da biomassa orgânica (ALMEIDA JÚNIOR et al., 2015; COSTA et al., 2019).

É possível que o processo de fragmentação que gerou pequenos sedimentos de calcário incorporados ao material amorfo, tenha ocorrido pela fase de dissolução que conduziu a produção de partículas soltas de rochas e carbonatos em solução, o que resultou em uma fase construtiva (DUANE; AL-MISHWAT; RAFIQUE, 2003) que por meio da matriz extracelular de polissacarídeos se ligaram a essas partículas (ROSSI; DE PHILIPPIS, 2015). Além disso, em períodos de seca as bainhas das cianobactérias sofrem considerável encolhimento, enquanto que em períodos de chuva, elas podem absorver água 20 vezes o peso seco, conforme afirmou Satoh et al. (2002). Esse processo de dessecação e hidratação provoca o aumento da pressão sobre os poros e a descamação superficial da rocha, o que também pode ter levado à fragmentação do calcário. No caso dos preenchimentos a intensa reação de alteração entre o material humificado e os carbonatos, parecem ter ligação direta com a higroscopicidade do calcário que através de superfícies fraturadas e com alta porosidade permitem uma maior retenção de água, essencial para atrair e permitir o crescimento microbiano (GOMEZ-CORNELIO et al., 2012).

4. 2 O PAPEL DO MOCÓ NA TRANSFORMAÇÃO SUPERFICIAL DO CALCÁRIO E GÊNESE DE FEIÇÕES

Os resultados revelaram uma possível participação do Mocó na neogênese mineral a partir da influência de seus excrementos que estão envolvidos dentro de um processo de evolução de feições identificadas na rocha calcária como as eflorescências, o córtex de alteração, a descoloração, os halos, as crostas e os preenchimentos. É bem provável que a alta temperatura de Montes Claros e os principais componentes, a ureia e o ácido úrico presentes na urina do Mocó (ZONGO, 2002), funcionaram como catalisadores para acelerar as reações de dissolução/cristalização dos sais solúveis e insolúveis presentes na composição química do calcário provocando eflorescências salinas, que de acordo com Saiz-Jimenez e Laiz (2000), Pinãr et al. (2009) e Lepinay et al. (2018) são habitats ideais para a fixação de microrganismos que podem promover a precipitação de minerais.

Em um estudo sobre patologias causadas pela urina em rochas ornamentais compostas por granito, mármore e calcário, Ribeiro et al. (2011) demonstraram a forte ligação intermolecular do hidrogênio entre os minerais com a ureia e/ou ácido úrico. Seus resultados indicaram alterações mais intensas no calcário Cariri decorrente do grau de porosidade e

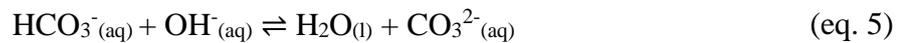
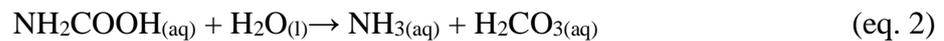
subsequente oxidação do ferro. Isso sugere que o córtex de alteração de coloração avermelhada tenha se formado pela percolação da urina do Mocó através dos poros e fraturas da rocha que em condições mais ácidas favoreceram sua provável oxidação (STEPHENS; ROSE; GILBERTSON, 2016). Embora o processo de precipitação, dissolução e reprecipitação de compostos de ferro ocorra pela ação do oxigênio que reage com o ferro sob a influência de vários fatores como pH, temperatura e principalmente pela umidade, (SCHWERTMANN; CORNELL, 1991 apud FIGUEIREDO, 1999), esse processo também é influenciado por várias espécies de microrganismos (STEPHENS; ROSE; GILBERTSON, 2016) que, para obterem energia ou catalisarem o ferro sem benefício energético, suas complexas vias metabólicas podem favorecer o ciclo biogeoquímico de oxidação e redução do ferro, transformando o ferro ferroso (Fe II) solúvel em ferro férrico (Fe III) insolúvel que se precipita (EMERSON; WEISS; MEGONIGAL, 1999; RODEN et al., 2004; EMERSON, 2019).

Parece, entretanto, que a presença de fungos e bactérias ocasionou a descoloração na rocha calcária, uma vez que o aumento da exposição à radiação UV induz a síntese de pigmentos escuros de melanina como forma de defesa do microrganismo (WAKEFIELD; JONES, 1998; SCHEERER; ORTEGA-MORALES; GAYLARDE, 2009; ROSSI; DE PHILIPPIS, 2015). O escurecimento do substrato reduz o albedo que pode interferir na temperatura da superfície da rocha e provocar o estresse mecânico de expansão e contração dos poros, resultando em danos estruturais no substrato (WARKE; SMITH; MAGEE, 1996). Essa alteração é intensificada pelas hifas bacterianas e fúngicas que ao penetrarem entre os planos de clivagem dos minerais podem provocar tensões mecânicas e desestabilizar a estrutura da rocha, que juntamente com a excreção de ácidos corrosivos, aceleram os efeitos de degradação (DAKAL; CAMEOTRA, 2012). A influência dos ciclos sazonais alternando períodos secos e úmidos, a flutuação populacional do Mocó e o complexo metabolismo microbiano, podem ter levado ao desenvolvimento dos halos de alteração. Os períodos úmidos favorecem a deposição de carbonatos precipitados, pois a maior disponibilidade de umidade estimula a formação de novas colônias microbianas e a rápida produção de substâncias exopoliméricas que aceleram o desenvolvimento de substratos ligeiramente laminados ao longo de várias estações (WAKEFIELD; JONES, 1998; DUANE, 2001).

Conforme demonstrado por Castanier, Me´layer-Levrel e Perthuisot (1999) os metabólitos envolvidos na fotossíntese, na metanogênese, no ciclo do enxofre e do nitrogênio, induzem várias modificações químicas no microambiente que podem promover a precipitação de carbonatos. Neste estudo parece muito provável que a degradação da ureia, presente na urina do Mocó, tenha impulsionado a formação de crostas com precipitados de carbonatos. A enzima

urease sintetizada por vários microrganismos quando catalisa a hidrólise da ureia, produz amônia e carbamato (eq. 1) que naturalmente se hidrolisa para produzir amônia e ácido carbônico (eq. 2). Estes produtos ao se equilibrarem no meio aquoso formam bicarbonato, amônio e hidróxidos (eq. 3 e 4), provocando o aumento do pH. Com a redução dos íons de hidrogênio e o aumento da concentração de hidroxila, o equilíbrio do bicarbonato é alterado favorecendo a formação de carbonatos (eq. 5 e 6) que, na presença de cálcio livre, promovem a precipitação de carbonatos (eq. 7) (CASTANIER; ME LAYER-LEVREL; PERTHUISOT, 1999; WARREN et al. 2001; HAMMES et al., 2003; CHU; STABNIKOV; IVANOV, 2012; PHILLIPS et al., 2013; SILVA; PASSARINI; SANTOS, 2017; KRAJEWSKA, 2018).

Reações químicas envolvidas na catalisação da hidrólise da ureia pela enzima urease:



A análise deste processo sugere que a capacidade microbiana em promover o aumento da alcalinidade e criar condições de precipitação localizada, poderiam explicar os preenchimentos iniciais dos poros com subprodutos com aspectos amorfos e provavelmente hidratados, que progressivamente formaram estruturas mais cristalinas de crescimento (CASTANIER; ME LAYER-LEVREL; PERTHUISOT, 1999), resultando na provável *needle fiber calcite*. A origem desta calcita pode estar intimamente associada a matriz extracelular de polissacarídeos ou a presença de superfícies celulares microbianas, as quais serviram como modelos de nucleação, facilitando a precipitação e o crescimento do cristal (CAILLEAU et al., 2009; DUPRAZ et al., 2009), embora a análise combinada de estudos microquímicos e mineralógicos sejam necessários para confirmar a origem e a presença desse mineral.

É muito provável que o processo de biocarstificação na rocha calcária ocorra pela interação metabólica entre várias espécies presentes no biofilme e não apenas de um grupo específico de microrganismos (WARSCHEID; BRAAMS, 2000; SCHEERER; ORTEGA-MORALES; GAYLARDE, 2009). A decomposição do material orgânico possivelmente estimulou a acidez, que alterou os carbonatos e impulsionou a colonização microbiana e com o

estabelecimento do biofilme, os complexos microrganismos neutralizaram o meio ácido favorecendo a formação de crostas de precipitados que, por sua vez, podem exercer influências no fluxo de escoamento superficial da água formando novas feições cársticas e no processo de sucessão ecológica, criando condições mais estáveis para a instalação de novas espécies. Fato interessante observado em campo é que nas áreas colonizadas pelo Mocó, não se encontrou a cianobactéria *Desmonostoc* sp. e o provável é que isso ocorra devido a acidez de suas excreções, pois segundo Sand-Jensen e Jespersen (2012) em um estudo sobre a tolerância da cianobactéria *Nostoc commune* a variações extremas de temperatura, pH e estresse salino, eles relataram que ao expor a cianobactéria a um pH 2 o seu metabolismo parou. O gênero *Desmonostoc* se agrupa como membro recém descrito (HRUZEK et al., 2013) e segundo Andreote (2013), esse gênero é definido por linhagens que apresentam características morfológicas semelhantes ao gênero *Nostoc*.

5 CONCLUSÃO

Foi possível concluir que o processo de biocarstificação no Norte de Minas Gerais é complexo e envolve diversos fatores na dissolução dos carbonatos, e é muito provável, que os papéis de atuação desempenhados pelas espécies em estudo se desenvolvem conforme as condições ambientais e as propriedades físico-químicas dos substratos.

Os resultados apresentados revelaram que o delgado horizonte orgânico e as crostas de alteração foram os efeitos mais notáveis que indicaram processos de biocarstificação no relevo cárstico, sendo muito provável a participação da cianobactéria *Desmonostoc* sp. e do Mocó, respectivamente.

A cianobactéria *Desmonostoc* sp., ao colonizar o substrato litológico, possivelmente proporcionou modificações iniciais permitindo condições para atrair microrganismos e formar biofilmes com complexos metabolismos que estimularam a pequena recuperação do carbono orgânico total e o predomínio da humina.

As diversas atividades metabólicas permitem liberar substâncias ácidas que dissolvem e fragmentam gradativamente a rocha, formando bolsões de solos que atraem microrganismos estimulando os processos de biocarstificação.

O teor de matéria orgânica, os diferentes tipos de argilominerais e os estágios distintos de decomposição podem ter motivado os diferentes resultados observados para a acidez potencial, porém a amostra de excreção do Mocó pode ser um indicativo da presença de água quimicamente agressiva capaz de estimular a dissolução dos carbonatos e formar novas feições.

As transformações observadas nas rochas influenciadas pela atuação do Mocó, indicaram que diferentes processos de biocarstificação estiveram envolvidos e a causa mais provável para tais transformações seja a urina que reage com os minerais dissolvendo-os, e os poros gerados criam microambientes favoráveis para o desenvolvimento de microrganismos que intensificam os sítios de reação dando origem a uma crosta de precipitados que pode exercer influência no relevo cárstico e na sucessão ecológica.

As espécies em estudo estão inseridas dentro de um processo de transformação do relevo cárstico e mesmo que as feições observadas, sejam em princípio imperceptíveis, seus efeitos acumulativos no tempo e no espaço, podem promover transformações superficiais na rocha calcária e também devem ser levadas em consideração ao analisar a evolução do relevo cárstico.

Estes resultados fornecem os primeiros *insights* sobre o papel desempenhado pela cianobactéria *Desmonostoc* sp. e pelo Mocó na transformação e evolução do relevo cárstico no Norte de Minas Gerais, porém pesquisas complementares deverão ser realizadas para compreender como a densidade e a riqueza microbiana do biofilme estariam interagindo com os carbonatos e possivelmente criando feições associadas à biocarstificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBRECHT, R. F.; ÜHIRA, Maria Lourdes BJatt. Bases de dados: metodologia para seleção e coleta de documentos. **Revista ACB: Biblioteconomia em Santa Catarina**. v.5, n.5, 2000.
- ALMEIDA JÚNIOR, A. B.; NASCIMENTO, A.; WILLIAMS C.; BARROS, F. M. R. Acidez Potencial Estimada Pelo Método do pH SMP em Solos do Estado da Paraíba **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.3, 2015. 767-773p.
- ALVARENGA, L. V. de. et al. Physiological responses to light intensity and photoperiod of the halotolerant cyanobacterium *Desmonostoc salinum* CCM-UFV059. **Bioresource Technology Reports**, v.11, 2020.
- ALVES, M. A.; CORDEIRO, M. R.; MILO, R. L. Ocorrência das águas subterrâneas no município de Montes Claros- MG: um estudo de caso utilizando a geotecnologia. **Águas Subterrâneas - Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas**, 2019.
- ANDREOTE, A. P. D. **Filosfera Mata Atlântica: isolamento e sistemática de cianobactérias, bior prospecção e caracterização da comunidade diazotrófica**. Centro de energia nuclear na agricultura. USP, São Paulo, 2013.
- ARO, M. M.; SANTOS, A. C.; SILVEIRA, E. E.; LISBOA NETO, A. F. S.; OLIVEIRA, M. F.; ASSIS NETO, A. C. de. Morphological tools to evaluate the digestory apparatus in rocky cavity (*Kerodon rupestris*). **Microsc. Res. Tech.**, 2019. 696-708p.

BAUMGARTNER, L. K.; DUPRAZ, C.; BUCKLEY, D. H.; SPEAR, J. R.; PACE, N. R.; VISSCHER, P. T. Microbial Species Richness and Metabolic Activities in Hypersaline Microbial Mats: Insight into Biosignature Formation Through Lithification. **Astrobiology**, v.9, n.9, 2009. 861-874p.

CAILLEAU, G.; VERRECCHIA, E. P.; BRAISSANT, O.; EMMANUEL, L. **The biogenic origin of needle fibre calcite. Sedimentology**, v.56, 2009. 1858-1875p.

CASTANIER, S.; ME TAYER-LEVREL, G.; PERTHUISOT, J. P. Ca-carbonates precipitation and limestone genesis - the microbiogeologist point of view. **Sedimentary Geology**, v.126, 1999. 9-23p.

CAVALCANTE, D. R.; BASTOS, F. H. Relações entre oscilações climáticas e relevo cárstico no semiárido cearense, o exemplo do município de Tejuçuoca. **Anais: Sociedade Brasileira de Espeleologia**. Ouro Preto, MG, 2017.

CHU, J.; STABNIKOV, V.; IVANOV, V. Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation on Surface or in the Bulk of Soil. **Geomicrobiology Journal**, v.29, n.6, 2012. 544-549p.

CLIMATE DATA, org. **Dados Climatológicos para Montes Claros, Minas Gerais**. 2019. Disponível em: < <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/montes-claros-2886/> > Acesso em: 11/03/2020.

COSTA, J. J. F.; SILVA, E. B.; COELHO, F. F.; TIECHER, T.; BISSANI, C. A.; FILIPP, D. **Atributos químicos relacionados à acidez e capacidade de troca de cátions de solos do Rio Grande do Sul com diferentes graus de intemperização**. Acta Iguazu, Cascavel, v.8, n.2, 2019. 81-100p.

CRUZ, A. B. da. **Detalhamento da geologia das unidades carbonáticas do Grupo Bambuí na região de Alvorada do Norte**, UNB, Brasília, 2012.

CUCCHI, F. Kamenitzas. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T.; DREYBRODT, W. (Ed.), **Karst Rock Features, Karren Sculpturing**. Založba ZRC, Cap.12, 2009. 139-150p.

DAKAL, T.C., CAMEOTRA, S.S. Microbially induced deterioration of architectural heritages: routes and mechanisms involved. **Environ Sci Eur**, v.24, n.36, 2012.

DODDY, P.; RODEN, C. M. The Fertile Rock: Productivity and erosion in limestone solution hollows of the Burren, Co. Clare. **Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy**, v.118B, n.1, 2018. 1-12p.

DUANE, M. J. Biomineralization And Phytokarst Development On Cavernous Quaternary Carbonate Terraces, Mohammedia, Northwest Morocco. **Carbonates and Evaporites**, v.16, n.2, 2001. 107-116p.

DUANE, M. J.; AL-MISHWAT, A. T.; RAFIQUE, M. Weathering and biokarst development on marine terraces, northwest Morocco. **Earth Surf. Process. Landforms**, v.28, 2003.

DUPRAZ, C.; REID, R. P.; BRAISSANT, O.; DECHO, A. W.; NORMAN, R. S.; VISSCHER, P. T. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. **Earth-Science Reviews**, v.96, n.3, 2009. 141-162p.

DUPRAZ, C.; VISSCHER, P. T.; BAUMGARTNER, L. K.; REID, R. P. Microbe-mineral interactions: early carbonate precipitation in a hypersaline lake (Eleuthera Island, Bahamas). **Sedimentology**, v.51, n.4, 2004. 745-765p.

DUPRAZ, C.; VISSCHER, P.T. Microbial lithification in marine stromatolites and hypersaline mats. **Trends in Microbiology**, v.13, 2005. 429-438p.

ECKE, F. et al. Meta-analysis of environmental effects of beaver in relation to artificial dams. **Environmental Research Letters**. v.12, n.11, 2017.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Revisão do intemperismo de micas**. MARTINS, J. C.; MARTINS, E. S.; REATTO, A. Planaltina, DF. 2004. 48p.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. TEIXEIRA, P. C. T. et al., editores técnicos. Brasília, DF, v.3. 2017.

EMERSON, D. The role of iron-oxidizing bacteria in biocorrosion: a review. **Biofouling**, v.34, n.9, 2019. 989-1000p.

EMERSON, D.; WEISS, J. V.; MEGONIGAL, J. P. Iron-Oxidizing Bacteria Are Associated with Ferric Hydroxide Precipitates (Fe-Plaque) on the Roots of Wetland Plants. **Applied And Environmental Microbiology**. v.65, n.6, 1999. 2758-2761p.

FABRI, F.; AUGUSTIN, C. H. R. R.; AULER, A. S. **Relevo Cárstico em Rochas Siliciclásticas: Uma Revisão com Base na Literatura**. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.15, n.3, 2014. 339-351p.

FIGUEIREDO, M. A. **Óxidos de Ferro Pedogênicos e sua Influência na Agregação de Partículas de Argila: Estudo de Caso nos Solos da Região de Gouveia - Serra do Espinhaço Meridional – MG**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Minas Gerais. 1999.

FONSECA, R. S.; ARRUDA, D. M.; XAVIER, M. V. B. **Vegetações de Montes Claros**. 2020. No prelo.

FORD, D.; WILLIAMS, P. Dissolution: Chemical and Kinetic Behaviour of the Karst Rocks. In: **Karst geomorphology and geomorphology**. London: Jonh Wiley e Sons Ltd. 2007. 39-65p.

GARCIA-PICHEL, F. Plausible mechanisms for the boring on carbonates by microbial phototrophs. **Sedimentary Geology**, v.185, n.3-4, 2006. 205-213p.

GLUNK, C.; DUPRAZ, C.; BRAISSANT, O.; GALLAGHER, K. L.; VERRECCHIA, E. P.; VISSCHER, P. T. Microbially mediated carbonate precipitation in a hypersaline lake, Big Pond (Eleuthera, Bahamas). **Sedimentology**, v.58, n.3, 2011. 720-736p.

GOLUBIEL, S.; SEONG-JOO, L.; BROWNE, K.M. Cyanobacteria: Architects of Sedimentary Structures. In: Riding R.E., Awramik S.M. (eds) *Microbial Sediments*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2000. 57-67p.

GÓMEZ-CORNELIO, S. et al. Succession of fungi colonizing porous and compact limestone exposed to subtropical environments. **Fungal Biology**, v.116, n.10, 2012. 1064-1072p.

GRIMES, K. G. Surface Karst Features of the Judbarra/Gregory National Park, Northern Territory, Australia. **Helictite**, v.41, 2012. 15-36p.

GUIMARAES, A.; SILVA, P. H.; CARNEIRO, F. M.; SILVA, D. P. Usando modelos de distribuição para estimar florações de cianobactérias fitossanitárias no Brasil. **Biota Neotropica**. [online]. 2020, vol.20, n.2, e20190756. Epub Mar 23, 2020.

HAMMES, F.; BOON, N.; VILLIERS, J.; VERSTRAETE, W.; SICILIANO, S. D. Strain-Specific Ureolytic Microbial Calcium Carbonate Precipitation. **Applied and Environmental Microbiology**, v.69, n.8. 2003. 4901-4909p.

HRUZEK, P.; LUKESOVÁ, A.; MARES, J.; AVENTURA, S. Description of the cyanobacterial genus *Desmonostoc* gen. nov. including *D. muscurum* cam. nov. as a distinct, phylogenetically coherent taxon related to the genus *Nostoc*. **Fottea. Olomuc**, Praha, v.13, n.2, 2013. 201-213p.

IGLESIAS, M.; UHLEIN, A. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de MG. **Revista Brasileira de Geociências**, v.39, n.2, 2009.

KLIMCHOUK, A. et al. Hypogenic origin, geologic controls and functional organization of a giant cave system in Precambrian carbonates, Brazil. **Geomorphology**. v.253, 2016. 385-405p.

KRAJEWSKA, B. Urease-aided calcium carbonate mineralization for engineering applications: A review. **Journal of Advanced Research**, v.13, 2018. 59-67p.

KUZYAKOV, Y.; BLAGODATSKAYA, E. Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept & review. **Soil Biology and Biochemistry**, v.83, 2015. 184-199p.

LEITE, M. E.; SANTOS, I. S.; ALMEIDA, J. W. L. Mudança de Uso do Solo na Bacia do Rio Vieira, em Montes Claros/MG. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.4, 2011.

LEPINAY, C. et al. Bacterial diversity associated with saline efflorescences damaging the walls of a French decorated prehistoric cave registered as a World Cultural Heritage Site. **International Biodeterioration & Biodegradation**. v.130, 2018. 55-64p.

LEVETT, A. et al. Microbial weathering signatures in lateritic ferruginous duricrusts. **Earth and Planetary Science Letters**. v.538, 2020.

LI, W. et al. Effects of microbes and their carbonic anhydrase on Ca^{2+} and Mg^{2+} migration in column-built leached soil-limestone karst systems. **Applied Soil Ecology**. v.29, 2005. 274-281p.

LIAN, B., CHEN, Y., ZHU, L.; YANG, R. Effect of Microbial Weathering on Carbonate Rocks. **Earth Science Frontiers**, v.15, n.6, 2008. 90-99p.

LÜ, X. et al. Calcium carbonate precipitation mediated by bacterial carbonic anhydrase in a karst cave: Crystal morphology and stable isotopic fractionation. **Chemical Geology** v.530, 2019.

MANZATTO, H. R. H. **Dinâmica da matéria orgânica em solo glei pouco húmico cultivado com arroz inundado no vale do São João, Itaguaí, RJ.** Tese de Doutorado. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1990.

MARTINS, E. S.; FERREIRA, A. P. M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; CARDOSO, F. B. F. **Técnicas de coleta e preparação de amostras para micromorfologia com otimização do procedimento de impregnação.** Embrapa, Planaltina, DF, 2002.

MARTINS C. M. et al. Frações da matéria orgânica em solos sob formações decíduais no norte de Minas Gerais. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.28, n.4, 2015. 10-20p.

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria Orgânica do Solo: Métodos de Análises.** Viçosa: UFV, 2005. 107p.

NEGI, A.; SARETHY, I. P. Microbial Biodeterioration of Cultural Heritage: Events, Colonization, and Analyses. **Microbial Ecology**, v.78, n.4, 2019. 1014-1029p.

NIEROP, K. **Origin and fate of organic matter in sandy soils along a primary vegetation succession.** Tese (Hoogleraar in de Bodemvorming en Ecopedologie) - Universitair Hoofddocent, Veenendaal, 1999. 160p.

OBUEKWE, I. S. et al. Arsenic-contaminated sediment from mining areas as source of morphological and phylogenetic distinct cyanobacterial lineages. **Algal Research**, v.42, 2019.

OLIVEIRA, A. D. **Análise das alterações físico-químicas decorrentes de ensaios de dissolução em rochas carbonáticas sintéticas.** Dissertação Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2016.

OLIVEIRA, G. B. et al. Origem e distribuição do nervo femoral do mocó, *Kerodon rupestris* (Caviidae). **Pesq. Vet. Bras.** v.31 supl.1 RJ, 2011.

OLIVEIRA, J.A.; BONVICINO, C.R. Ordem Rodentia. Pp: 347-406. In: Reis, N.R.; Peracchi, A.L.; Pedro, W.A.; Lima, I.P. (Eds.) **Mamíferos do Brasil.** Universidade Estadual de Londrina. Londrina, PR, 2006. 437p.

OSORIO-RODRIGUEZ, D.; SANCHEZ-QUIÑÓNEZ, C. A. Biological and geological characterization of modern biofilms and microbial mats and comparison with similar lithified structures in Colombian Cretaceous formations. **Earth Sciences Research Journal**, v.22, n.3, 2018. 159-168p.

PARENTE, M. P. M.; CAVALCANTI, L. H. *Arcyria cinerea* (bull.) Pers. (myxomycetes, trichiaceae): Encontrada em fezes de mocó (*kerodon rupestris* wied-neuwied, 1820, rodentia: caviidae). **Revista Ouricuri**, Paulo Afonso, Bahia, v.7, n.1, 2017. 001-011p.

PENTECOST, A.; WHITTON, B. A.; Subaerial Cyanobacteria. **Ecology of Cyanobacteria II**, 2012. 291-316 p.

PEREIRA, T.T.C.; BRASIL, R.D.; OLIVEIRA, A.M.; POEIRAS, L.M.; ALMEIDA, I.C.C.; Propostas e desafios para definição de áreas prioritárias para conservação da biodiversidade no norte de Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v.8, n.1, 2020. 53-69p.

PERRI, E.; MANZO, E.; TUCKER, M. E. Multi-scale study of the role of the biofilm in the formation of minerals and fabrics in calcareous tufa. **Sedimentary Geology**. v.263, n.264, 2012. 16-29p.

PHILLIPS, J. D. Biogeomorphology and contingent ecosystem engineering in karst landscapes. **Progress in Physical Geography**. 2016. 1-24p.

PHILLIPS, A.; GERLACH, R.; LAUCHNOR, E.; MITCHELL, A. C.; CUNNINGHAM, A. B.; SPANGLER, L. Engineered applications of ureolytic biomineralization: a review. **Journal of Bioadhesion and Biofilm Research**. v.29, n.6, 2013. 715-733p.

PILÓ, L. B. Revisão de literatura: geomorfologia cárstica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.1, n.1, 2000.

PIÑAR, G.; PIPKA, K.; WEBER, J.; STERFLINGER, K. The micro-biota of a sub-surface monument the medieval chapel of St. Virgil (Vienna, Austria). **International Biodeterioration & Biodegradation**. v.63, 2009. 851-859p.

PINHEIRO, A. C., et al. Limestone biodeterioration: A review on the Portuguese cultural heritage scenario. **Journal of Cultural Heritage**. v.36, 2019. 275-285p.

PIZAURO JR, J. M; MELO, W. J. Influência da incorporação da parte aérea de sorgo ou lablabe nas frações da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho-Escuro. **Revista Brasileira de Ciências do solo**, 1995. 95-103p.

PORTELLA, A. S. **Ecologia de Kerodon acrobata (Rodentia: Caviidae) em fragmentos de mata seca associados a afloramentos calcários no Cerrado do Brasil Central**. Tese de doutorado em Ecologia. UnB Brasília, 2015.

PRIMO, D. C.; MENEZES, R.C; SILVA, T. O. Substâncias húmicas da matéria orgânica do solo: uma revisão de técnicas analíticas e estudos no nordeste brasileiro. **Scientia Plena**, v.7, 2011.

RESENDE, N. S. **Distribuição dos grupamentos neuronais colinérgicos no encéfalo do mocó (Kerodon rupestris)**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2017.

REVIERS, B. **Biologia e Filogenia das Algas**. Artmed. Capítulo 1. 2018.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa: 1999.

RIBEIRO, R. C. C.; CASTRO, N. F.; QUEIRÓZ, J. P. C.; MACHADO-DANIEL, V. **Alterações causadas em rochas ornamentais pelo efeito do ácido úrico e da ureia presentes na urina.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2011. 50p.

RODEN, E. E.; SOBOLEV, D.; GLAZER, B.; LUTHER, G.W. Potential for microscale bacterial Fe redox cycling at the aerobic-anaerobic interface. **Geomicrobiology Journal** v.21, 2004. 379-391p.

RODRIGUES, M. L. Classificação e tipologias dos lapiás: Contributo para uma terminologia das formas cársicas. **Finisterra**. n.93, Lisboa, 2012.

RONCERO-RAMOS, B.; MUÑOS-MARTÍN, M. A.; Y. CANTÓN, Y.; CHAMIZO, S.; RODRÍGUEZ-CABALLERO, E.; MATEO, P. Land degradation effects on composition of pioneering soil communities: An alternative successional sequence for dryland cyanobacterial biocrusts. **Soil Biology and Biochemistry**, v.146, 2020.

ROSELL, F.; BOZÉR, O.; COLLEN, P.; PARKER, H. Ecological impact of beavers Castor fiber and Castor canadenses and their ability to modify ecosystems. **Mammal Society**, Mammal Review, v.35, n.3-4, 2005. 248–276p.

ROSSI, F.; DE PHILIPPIS, R. Role of Cyanobacterial Exopolysaccharides in Phototrophic Biofilms and in Complex Microbial Mats, **Life**, v.5, 2015. 1218-1238p.

ROSSI, F.; MUGNAI, G.; DE PHILIPPIS, R. Complex role of the polymeric matrix in biological soil crusts. **Plant and Soil**, v.429, 2018. 19-34p.

SAIZ-JIMENEZ, C.; LAIZ, L. Occurrence of halotolerant/halophilic bacterial communities in deteriorated monuments. **International Biodeterioration & Biodegradation**. v.46, 2000. 319-326p.

SAND-JENSEN, K.; JESPERSEN, T. S. Tolerance of the widespread cyanobacterium Nostoc commune to extreme temperature variations (-269 to 105°C) pH and salt stress. **Oecologia**. v.169, 2012. 331-339p.

SATOH, K.; HIRAI, M.; NISHIO, J.; YAMAJI, T.; KASHINO, Y.; KOIKE, H. Recovery of Photosynthetic Systems during Rewetting is Quite Rapid in a Terrestrial Cyanobacterium, Nostoc commune. **Plant and Cell Physiology**, v.43, n.2, 2002. 170-176p.

SCHEERER, S.; ORTEGA-MORALES, O.; GAYLARDE, C. Chapter 5 Microbial Deterioration of Stone Monuments - An Updated Overview. **Advances in Applied Microbiology**, v.66, 2009. 97-139p.

SILVA, M. Mapeamento de superfícies aplainadas no norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.9, n.2, 2016. 526-545p.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 3ª edição revisada e atualizada. Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC. 2001.

SILVA, F. P. C.; PASSARINI, V. C.; SANTOS, F. C. S. **Bioconcreto: a tecnologia para construção sustentável**. INOVAE - ISSN: 2357-7797, São Paulo, v.5, n.2, 2017. 41-58p.

SILVA, M. B. **Caracterização Pedológica e gênese de solos em duas topossequências no sistema cárstico da Serra da Bodoquena – MS.** Tese de doutorado. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Ciências do solo, Seropédica, RJ, 2013.

SOUZA, M. V.; CHAVES, S. A. M.; HUGOT, J.P.; IÑIGUEZ, A. M. New parasite records from *Kerodon rupestris* (rodentia, caviidae) an endemic species to northeastern Brazil. **Oecologia Australis**, v.24, n.1, 2020. 196-203p.

STEPHENS, M.; ROSE, J.; GILBERTSON, D. D. Post-depositional alteration of humid tropical cave sediments: Micromorphological research in the Great Cave of Niah, Sarawak, **Journal of Archaeological Science**, 2016. 1-16p.

STOOPS, G. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. Madison: **Soil Science Society of America**, 2003.

STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F. editors. Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. 2nd ed. Amsterdam: **Elsevier**; 2018.

SU, Y.; CHEN, Y.; PADILLA, F. M.; ZHANG, Y.; HUANG, G. The influence of biocrusts on the spatial pattern of soil bacterial communities: A case study at landscape and slope scales. **Soil Biology and Biochemistry**, v.142, 2020.

SWIFT, R.S. Organic matter characterization. In: SPARKS, D.L., ed. **Methods of soil analysis**. Part 3. Chemical methods. Soil Sci. Soc. Am. Book Series: 5. Soil Sci. Soc. Am. Madison, 1996. 1018-1020p.

TANG, J.; TANG, X.; QIN, Y.; HE, Q.; YI, Y.; JI, Z. Karst rocky desertification progress: Soil calcium as a possible driving force. **Science of The Total Environment**, v.649, 2019. 1250-1259p.

TRAVASSOS, L. E. P. Contribuições científicas do professor Dr. Heinz Charles Kohler para a Geomorfologia Cárstica Tropical brasileira. **Sociedade e natureza**, v.22, n.3. 2010.

TRAVASSOS, L. E. P. **Princípios de Carstologia e Geomorfologia Cárstica**. Brasília: ICMBio, 2019.

TRAVASSOS, L.E.P.; RODRIGUES, B. D.; TIMO, M.B. **Glossário conciso e ilustrado de termos cársticos e espeleológicos**. PUC, BH: 2015.

ULICSNI, V.; BABAI, D.; JUHA´SZ, E.; MOLNA´R, Z.; BIRO, M. Local knowledge about a newly reintroduced, rapidly spreading species (Eurasian beaver) and perception of its impact on ecosystem services. **Plos One**, v.15, n.5, 2020.

VERESS, M. Karren Features. In: **Karst Environments: Karren Formation in High Mountains**. Springer Science + Business Media B.V. 2010. 134-140p.

WAKEFIELD, R. D.; JONES, M. S. An introduction to stone colonizing micro-organisms and biodeterioration of building stone. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, v.31, 1998. 301-313p.

WARKE, P. A.; SMITH, B. J.; MAGEE, R. W. Thermal response characteristics of stone: Implications for weathering of soiled surfaces in urban environments. *Earth Surf. Proc. Land*. v.21, 1996. 295-306p.

WARREN, L. A.; MAURICE, P. A.; PAMAR, N.; GRANT FERRIS, F. Precipitation: Implications for Interpreting Calcite Precipitation and for Solid-Phase Capture of Inorganic Contaminants. ***Geomicrobiology Journal***, v.18, n.1, 2001. 93-115p.

WARSCHEID, T.; BRAAMS, J. Biodeterioration of stone: a review. ***International Biodeterioration & Biodegradation***, v.46, n.4, 2000. 343-368p.

WIELICZKO, A. R.; RODRIGUES, L. R.; MOTTA-MARQUES, D.; CROSSETTI, L. O. Phytoplankton structure is more influenced by nutrient enrichment than by temperature increase: an experimental approach upon the global changes in a shallow subtropical lake. ***Limnetica***, v.39, n.1, 2020. 405-418 p.

WILLIAMS, W.; BÜDEL, B.; WILLIAMS, S. Wet season cyanobacterial N enrichment highly correlated with species richness and Nostoc in the northern Australian savannah. ***Biogeosciences***, v.15, 2018. 2149-2159p.

WHITE, W.B.; WHITE, E.L. Karst landforms: scope and processes in the early twenty-first century. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). ***Treatise on geomorphology***. San Diego (CA): Academic Press, 2013. 14-22p.

YEOMANS, J. C.; BREMMER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. ***Communications in Soil Science and Plant Analysis***, 1988.

ZHOU, L.; WANG, X.; WANG, Z.; ZHANG, X.; CHEN, C.; LIU, H. The Challenge of Soil Loss Control and Vegetation Restoration in the Karst Area of Southwestern China. ***International Soil and Water Conservation Research***, v.8, n.1, 2020, 26-34 p.

ZONGO, M. A. **Aspectos reprodutivos da fêmea de Mocó (*Kerodon rupestris*): análise bioquímica dos líquidos fetais e caracterização colpocitológica do ciclo estral**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Faculdade de Medicina Veterinária. Departamento de Cirurgia, 2002.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foto: Araceli Mendonça de Oliveira

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de biocarstificação no Norte de Minas Gerais apresenta um sistema complexo que envolve diversos fatores no processo de dissolução dos carbonatos e, neste estudo, foi possível analisar o papel de atuação da cianobactéria *Desmonostoc* sp. e do Mocó na transformação superficial do calcário e gênese de feições que contribuem para a evolução do relevo cárstico.

Os resultados apresentados revelaram que o delgado horizonte orgânico e as crostas de alteração foram os efeitos mais notáveis que indicaram processos de biocarstificação no relevo cárstico e que possivelmente a cianobactéria *Desmonostoc* sp. e o Mocó, respectivamente estiveram envolvidos, sejam participando direta ou indiretamente desses processos.

É muito provável que a cianobactéria *Desmonostoc* sp., pioneira na colonização de ambientes restritos, proporcionou condições para a formação de biofilmes com complexos metabolismos que estimularam a pequena recuperação do carbono orgânico total, o predomínio da fração húmica e a formação de bolsões de solos que favoreceram a instalação de novos microrganismos, intensificando a biocarstificação na rocha calcária.

A matriz extracelular de polissacarídeos além de favorecer o desenvolvimento de biofilmes microbianos, aderir partículas de argila contribuindo para a formação de bolsões de solos, facilitar a fixação à superfície, proteger contra os ciclos de dessecação e hidratação, pode ter influenciado a capacidade de precipitar carbonatos, inibindo ou promovendo.

O destaque para o resultado da acidez potencial foi observado na amostra de excreções do Mocó que apresentou valor classificado como acidez “muito alta”, sendo possivelmente, um indicativo de solução acidulada capaz de estimular a dissolução dos carbonatos. Os diferentes valores encontrados, classificados como acidez “muito baixa” e “baixa”, podem estar relacionados ao menor teor de matéria orgânica, aos distintos tipos de argilominerais e a complexidade metabólica que influencia a intensidade do processo de humificação.

A análise micromorfológica foi essencial para a identificação de algumas feições cársticas associadas à biocarstificação, e que possivelmente, estiveram envolvidas com a ocupação da cianobactéria *Desmonostoc* sp. como o córtex de alteração constituindo uma carapaça descontínua; o desprendimento de fragmentos de rocha muito alterada e impregnada pelo material amorfo e preenchimentos com material orgânico através de fraturas e poros irregulares tipicamente de dissolução, sendo estes, fundamentais para a percolação de soluções e promover o crescimento de microrganismos.

A interação dos excrementos do Mocó com a rocha calcária, principalmente a urina, permitiu identificar distintos estágios de biocarstificação que incluíram a formação de algumas feições específicas como as eflorescências salinas formadas provavelmente pela ação da ureia/ácido úrico e da elevada temperatura com os minerais; o córtex de alteração avermelhado que sugere ser compostos de ferro; os halos bem demarcados de materiais calcificados; a descoloração que ocasionou o escurecimento do substrato; as crostas de alteração associadas às eflorescências e os preenchimentos dos poros com subprodutos com aspectos amorfos de reprecipitação microbiana, que por meio do intenso metabolismo, induziu a precipitação da provável *needle fiber calcite*.

Como o processo de biocarstificação dificilmente acontece em função de um grupo específico de microrganismos, é muito provável, que as transformações superficiais identificadas na rocha calcária tenham ocorrido pela interação da cianobactéria *Desmonostoc* sp. e do Mocó com o substrato litológico, e estes proporcionaram microambientes suscetíveis à formação de consórcios microbianos que atuaram em conjunto na biocarstificação da rocha calcária através de processos bioquímicos e biomecânicos.

As feições identificadas na rocha calcária são consequências de uma lenta e, muitas vezes, imperceptível evolução do relevo cárstico. As espécies em estudo estão inseridas dentro de um processo de transformação da rocha calcária e também devem ser consideradas ao analisar feições que estão associadas aos processos de biocarstificação, uma vez que esses processos provocam transformações sutis na rocha calcária e que, ao longo do tempo e do espaço, os efeitos acumulativos podem vir a exercer influências significativas no fluxo de escoamento da água desenvolvendo novas feições cársticas e no estabelecimento de estágios sucessionais, criando condições mais estáveis para novas espécies atuarem na rocha calcária.

Os estudos sobre o relevo cárstico em Montes Claros, Norte de Minas Gerais, ainda são escassos e a partir dos resultados aqui apresentados, espera-se contribuir para a ciência básica através de novos conhecimentos sobre feições que estão associadas à biocarstificação em maciços de calcário, pois têm-se neste estudo os primeiros resultados sobre o papel de atuação desempenhado pela cianobactéria *Desmonostoc* sp. e pelo Mocó na transformação superficial e gênese do relevo cárstico.