



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS



DESAFIOS CONCEITUAIS E METODOLÓGICOS NA AVALIAÇÃO DE
GEOPATRIMÔNIOS: LIÇÕES DO CARSTE EM ARENITOS DE PARAÚNA (GO)

GUILHERME LIMA BRASIL DOS SANTOS

GOIÂNIA

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
GERÊNCIA DE CURSOS E PROGRAMAS INTERDISCIPLINARES

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Guilherme Lima Brasil Dos Santos

3. Título do trabalho

DESAFIOS CONCEITUAIS E METODOLÓGICOS NA AVALIAÇÃO DE GEOPATRIMÔNIOS: LIÇÕES DO CARSTE EM ARENITOS DE PARAÚNA (GO)

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Lima Brasil Dos Santos, Discente**, em 23/02/2026, às 15:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andre Augusto Rodrigues Salgado, Professor do Magistério Superior**, em 23/02/2026, às 19:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5918423** e o código CRC **CA74C40C**.

Guilherme Lima Brasil dos Santos

**DESAFIOS CONCEITUAIS E METODOLÓGICOS NA AVALIAÇÃO DE
GEOPATRIMÔNIOS: LIÇÕES DO CARSTE EM ARENITOS DE PARAÚNA (GO)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, vinculado à Pró-Reitoria de Pós-Graduação da Universidade Federal de Goiás como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Estrutura e Dinâmica Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. André Augusto Rodrigues Salgado

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Panisset Travassos

GOIÂNIA

2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Santos, Guilherme Lima Brasil dos
DESAFIOS CONCEITUAIS E METODOLÓGICOS NA AVALIAÇÃO DE
GEOPATRIMÔNIOS: [E-book]: LIÇÕES DO CARSTE EM ARENITOS DE PARAÚNA
(GO) / Guilherme Lima Brasil dos Santos. - 2026.
CIX, 109 f.: 2026

Orientador: Prof. Dr. André Augusto Rodrigues Salgado; co-orientador: Dr. Luiz Eduardo Panisset Travassos
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Pró-reitoria de Pós-graduação (PRPG), Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Goiânia, 2026.

Anexo.
Bibliografia.
Inclui: lista de figuras.

1. Carste Não-tradicional. 2. Morfogênese. 3. Geossítio. 4. Fichas de Avaliação.

I. Salgado, André Augusto Rodrigues, orient. II. Travassos, Luiz Eduardo Panisset, co-orient. III. Título.

CDU 502/504



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

GERÊNCIA DE CURSOS E PROGRAMAS INTERDISCIPLINARES

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **DM001/2026** da sessão de **Defesa de Dissertação** de **Guilherme Lima Brasil Dos Santos**, que confere o título de **Mestre em Ciências Ambientais**, na área de concentração em **Estrutura e Dinâmica Ambiental**.

Ao(s) **vinte dia(s) de fevereiro de dois mil e vinte e seis**, a partir da(s) **nove horas**, no(a) sala virtual do(a) **Google Meet** <<https://meet.google.com/cao-kqye-bxv>>, realizou-se a sessão pública de **Defesa de Dissertação** intitulada **“DESAFIOS CONCEITUAIS E METODOLÓGICOS NA AVALIAÇÃO DE GEOPATRIMÔNIOS: LIÇÕES DO CARSTE EM ARENITOS DE PARAÚNA (GO)”**. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Orientador(a), Doutor(a) **André Augusto Rodrigues Salgado (IESA/UFG)**, com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Doutor(a) **Guilherme Taitson Bueno (IESA/UFG)**, **membro titular externo**; Doutor(a) **Úrsula Ruchkys de Azevedo (UFMG)**, **membro titular externo**. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da **Dissertação**, tendo sido o(a) candidato(a) **aprovado(a)** pelos seus membros.

Proclamados os resultados pelo(a) Doutor(a) **André Augusto Rodrigues Salgado (IESA/UFG)**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos membros da Banca Examinadora, ao(s) **vinte dia(s) de fevereiro de dois mil e vinte e seis**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Andre Augusto Rodrigues Salgado, Professor do Magistério Superior**, em 20/02/2026, às 11:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Taitson Bueno, Professor do Magistério Superior**, em 20/02/2026, às 11:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Úrsula Ruchkys de Azevedo, Usuário Externo**, em 20/02/2026, às 11:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5918405** e o código CRC **9BC8E89A**.

Referência: Processo nº 23070.001598/2026-73

SEI nº 5918405

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a meus pais, Vânia Lima e Flávio Brasil, que desde o princípio acreditaram em meu potencial e contribuíram de forma decisiva para minha formação pessoal e acadêmica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento e apoio à pesquisa de mestrado.

Ao Prof. André Salgado, por sua orientação cuidadosa e presença ímpar ao longo de todo o mestrado.

Ao Prof. Luiz Travassos, pela coorientação marcada por contribuições singulares e valiosos ensinamentos sobre o carste.

Aos membros da banca de Qualificação, Prof. Fernando de Moraes e Profa. Karla Faria, e aos membros da banca de Defesa Prof. Guilherme Bueno e Profa. Úrsula Ruchkys, pela disponibilidade em avaliar este trabalho e contribuir para o aprimoramento da presente dissertação.

Ao corpo docente do CIAMB, em especial à Profa. Agustina Echeverría e Prof. Denilson Teixeira, pelas conduções instigantes nas disciplinas que compuseram minha formação no mestrado, possibilitando o desenvolvimento de perspectivas ambientais sob um olhar multi e interdisciplinar

À Coordenadora do CIAMB, Profa. Daniela Melo, por todo seu zelo, atenção e empenho em resolver as demandas documentais, mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos professores Renata Momoli e Márcio Zancopé, bem como aos membros do Pequeno Espeleogrupo de Pesquisa e Extensão, por proporcionarem oportunidades ímpares de vivenciar de perto as maravilhas de carste e compreender mais sobre este tema singular.

Aos companheiros de laboratório do Laboratório de Geomorfologia, Pedologia e Geografia Física (LABOGEF/UFG) Lisbeth, Leonilson, Miguel, Deysser, Diogo e Karol, pelos bons momentos partilhados e pelas amizades construídas ao longo deste período.

Às colegas Kiara e Zenialice, amigas significativas que as disciplinas do CIAMB me proporcionaram e que levarei para a vida.

Ao Centro de Práticas Corporais, vinculado à Faculdade de Educação Física e Dança (FEFD/UFG), por proporcionar o projeto de extensão “Caminhos Marciais: Jiu Jitsu Brasileiro”, que decerto foi fundamental para acalmar a mente durante todo o mestrado.

Por fim, agradeço à Dora, uma companhia felina que esteve ronronando a meu lado enquanto este trabalho era escrito.

*Não adianta escrever meu nome numa pedra,
Pois um dia essa pedra em pó vai se transformar.*

Hermes Aquino, Nuvem Passageira (1976)

RESUMO

Relevos cársticos são tradicionalmente associados a processos de dissolução em rochas carbonáticas. Contudo, processos semelhantes também podem ocorrer em litologias siliciclásticas, como arenitos e quartzitos, constituindo o que é denominado de carste não-tradicional. O presente trabalho analisa o geopatrimônio desenvolvido sob litologia arenítica no município de Paraúna, Goiás, tendo como áreas de estudo a Serra das Galés, inserida no Parque Estadual de Paraúna (PEPa), e a Reserva Particular de Patrimônio Natural ponte de Pedra. A metodologia contempla revisão bibliográfica; análises morfoestruturais com uso de técnicas de geoprocessamento; trabalhos em campo com registro fotogramétrico por drones; coleta de amostras para análises mineralógicas e geoquímicas; aplicação de fichas de avaliação de valor científico para geossítios e proposta de metodologia de avaliação de valor científico diretamente em geopatrimônios. Os resultados indicam que os geopatrimônios analisados apresentam processos diferentes de morfogênese, sendo a serra das galés um caso comum de carste não-tradicional, cuja torres cársticas se desenvolveram via arenização, enquanto a Ponte de Pedra apresentou uma gênese complexa, associada à atuação conjunta entre litologias carbonáticas e não carbonáticas, o que trouxe a luz uma distinção da binariedade entre carste tradicional e não tradicional. A aplicação de fichas de valoração científica evidenciou limitações metodológicas para uma adequada interpretação de sistemas cársticos em casos excepcionalmente raros, guiando a uma nova proposta metodológica mais compatível. Conclui-se que o geopatrimônio Ponte de Pedra constitui um exemplo ímpar de elevada relevância científica, cuja compreensão demanda abordagens integradas que articulem morfogênese, revisão conceitual e avaliação crítica das metodologias de valoração, contribuindo assim para o aprimoramento de práticas de geoconservação no contexto nacional.

Palavras-Chave: Carste não-tradicional; Morfogênese; Geossítio; Fichas de Avaliação.

ABSTRACT

Karst landscapes are traditionally associated with dissolution processes in carbonate rocks. However, similar processes may also occur in siliciclastic lithologies, such as sandstones and quartzites, constituting what is referred to as non-traditional karst. This study analyzes the geopatrimony developed under sandstone lithology in the municipality of Paraúna, Goiás, Brazil, focusing on the Serra das Galés, located within the Paraúna State Park (PEPa), and the Ponte de Pedra Private Natural Heritage Reserve. The methodology includes a literature review; morphostructural analyses using geoprocessing techniques; fieldwork with drone-based photogrammetric surveys; collection of samples for mineralogical and geochemical analyses; application of scientific value assessment forms for geosites; and the proposal of a methodology for the direct evaluation of scientific value in geopatrimonies. The results indicate that the analyzed geopatrimonies exhibit distinct morphogenetic processes. Serra das Galés represents a typical case of non-traditional karst, in which karst towers developed through arenization processes, whereas Ponte de Pedra displays a complex genesis associated with the combined action of carbonate and non-carbonate lithologies. This complexity challenges the binary distinction between traditional and non-traditional karst. The application of scientific value assessment forms revealed methodological limitations in the adequate interpretation of exceptionally rare karst systems, leading to the proposal of a more compatible methodological approach. It is concluded that the Ponte de Pedra geopatrimony constitutes a unique example of high scientific relevance, whose understanding requires integrated approaches that articulate morphogenesis, conceptual revision, and critical evaluation of valuation methodologies, thereby contributing to the improvement of geoconservation practices in the national context.

Keywords: Non-traditional karst; Morphogenesis; Geosite; Assessment forms.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - A Location map of the geoheritage sites in the municipality of Paraúna in Goiás State; B: Serra das Galés geoheritage; C: Ponte de Pedra geoheritage. | 32 |
| Figura 2 - Lithological map of the Paraúna area; adapted from CPRM (2008). | 33 |
| Figura 3 - Serra das Galés, in the Parque Estadual de Paraúna. (a) View of the ruiniform reliefs of Serra das Galés; (b) Elongated indentation with a rounded bottom between two massifs; (c) Circular cavity completely traversing the rock; (d) Double opposing concavities in the rock. Yellow lines highlight the boundaries of the features, and the empty spaces are filled with low-opacity yellow polygons. | 36 |
| Figura 4 - Ponte de Pedra: (a) Internal view of the cave exit, with the presence of stalactites on the ceiling; (b) Skylight at the top of the cavity; (c) Column-type speleothem; (d) Flowstone speleothem; (e) Rounded pebble present in a fluvial paleolevel. | 39 |
| Figura 5 - (a) Collapsed blocks along the course of the Ponte de Pedra River; (b) close-up view of the fallen blocks. | 39 |
| Figura 6 - Geopatrimônios em Paraúna/GO. A: Visão parcial dos relevos ruiniformes da Serra das Galés; B: Visão parcial do interior da Ponte de Pedra. | 47 |
| Figura 7 - Mapa de localização dos geopatrímônios em Paraúna | 48 |
| Figura 8 - Exemplos de geossítios presentes na Serra das Galés. A: Pedra do Cálice; B: Pedra da Tartaruga. | 49 |
| Figura 9 - Claraboia no topo da Ponte de Pedra. | 50 |
| Figura 10 - Difratoformas das amostras coletadas na Serra das Galés. A, C e D: amostra coletada em morros testemunhos aleatórios ao redor da Pedra do Cálice. B: Amostra coletada na base da pedra do Cálice. | 55 |
| Figura 11 - Blocos colapsados no Rio Ponte de Pedra. | 56 |
| Figura 12 - Geofórmulas no interior da Ponte de Pedra. | 58 |
| Figura 13 - Difratoformas das amostras coletadas na Ponte de Pedra. A: Espeleotema do tipo escorrimento; B: Paleonível fluvial; C: Chão da caverna; D: Espeleotema do tipo estalagmite. | 59 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 9 |
| 2. GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA, CARSTE NÃO-TRADICIONAL E PATRIMÔNIO GEOMORFOLÓGICO..... | 11 |
| 2.1 Definição de Carste..... | 11 |
| 2.1.1 Carste Tradicional..... | 12 |
| 2.1.2 Carste não-tradicional e pseudocarste..... | 13 |
| 2.2 Geoformas cársticas | 14 |
| 2.2.1 <i>Exocarste</i> | 15 |
| 2.2.2 <i>Endocarste</i> | 19 |
| 2.3 Geodiversidade, geoconservação e geoturismo no carste..... | 20 |
| 2.3.1 <i>Patrimônio Geomorfológico e geoconservação no carste</i> | 22 |
| 2.3.2 <i>Carste e geoturismo</i> | 23 |
| 2.4 Inventariação de geopatrimônios para valores científicos..... | 25 |
| 3. METODOLOGIA..... | 26 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 28 |
| 4.1 Beyond the Traditional and Non-traditional Karst Dichotomy: Insights from Sandstone Landforms in the Central Plateau of South America | 29 |
| <i>Abstract</i> | 29 |
| 4.1.1 <i>Introduction</i> | 29 |
| 4.1.2 <i>Study Area</i> | 31 |
| 4.1.3 <i>Materials and methods</i> | 34 |
| 4.1.4 <i>Results</i> | 35 |
| 4.1.4.1 <i>Serra das Galés</i> | 35 |
| 4.1.4.2 <i>Ponte de Pedra</i> | 37 |
| 4.1.5 <i>Discussion</i> | 40 |
| 4.1.5.1 <i>Serra das Galés</i> | 40 |
| 4.1.5.2 <i>Ponte de Pedra</i> | 41 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1.5.3 <i>Traditional or Non-Traditional Karst: Rethinking Conceptual Boundaries</i> | 42 |
| 4.1.6 <i>Conclusion</i> | 43 |
| 4.2 Geodiversidade em carste: excepcionalidades em Paraúna, Goiás, Brasil | 44 |
| <i>Resumo</i> | 44 |
| 4.2.1 <i>Introdução</i> | 44 |
| 4.2.2 <i>Área de estudo</i> | 47 |
| 4.2.3 <i>Metodologia</i> | 50 |
| 4.2.4 <i>Resultados</i> | 54 |
| 4.2.4.1 Serra das Galés | 54 |
| 4.2.4.2 Ponte de Pedra | 56 |
| 4.2.4.3 Comparação entre os VCI dos geossítios e geopatrimônios..... | 60 |
| 4.2.5 <i>Discussões</i> | 61 |
| 4.2.5.1 Comparação com a literatura e com análise mineralógica | 61 |
| 4.2.5.2 Comparação entre os VCI dos geopatrimônios | 63 |
| 4.2.5.3 Proposta de ficha adaptada para geopatrimônios | 65 |
| 4.2.6 <i>Considerações finais</i> | 69 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 70 |
| BIBLIOGRAFIA | 73 |
| ANEXO A – FICHA DE AVALIAÇÃO DO VALOR CIENTÍFICO (VCI) | 82 |
| ANEXO B – FICHA DE AVALIAÇÃO DO VALOR EDUCACIONAL (VED) | 85 |
| ANEXO C – FICHA DE AVALIAÇÃO DO VALOR TURÍSTICO (VTU) | 90 |
| ANEXO D – ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA BRASILEIRA DE GEOMORFOLOGIA: “BEYOND THE TRADITIONAL AND NON-TRADITIONAL KARST DICHOTOMY: INSIGHTS FROM SANDSTONE LANDFORMS IN THE CENTRAL PLATEAU OF SOUTH AMERICA” | 95 |

1. INTRODUÇÃO

O geopatrimônio constitui um dos principais eixos da geodiversidade, definindo-se como a variedade de elementos geológicos, geomorfológicos e pedológicos, bem como dos processos que os originam e transformam (Gray, 2004; Brilha, 2005), de modo que a sua preservação se faz necessária para as atuais e futuras gerações (Eberhard, 1997; Sharples, 2002). A valorização de geopatrimônios fundamenta-se em distintas dimensões (intrínseca, cultural, estética, econômica, funcional, científica e educativa), as quais justificam medidas de geoconservação (Gray, 2004; Brilha, 2005), e reforçam a necessidade de sensibilização social para o uso consciente dos recursos naturais (Nascimento, Ruchkys e Mantesso-Neto, 2008; Evangelista e Travassos, 2014). Dentre diversos tipos de paisagens dotadas de elevado valor geopatrimonial, destacam-se àquelas desenvolvidas a partir de sistemas cársticos, amplamente reconhecidas por fatores como beleza cênica, complexidade geomorfológica e importância científica. (Lobo et al., 2007; Williams, 2008).

Conforme a abordagem sistêmica de Ford e Williams (2007), define-se *carste* como um sistema de componentes geográficos que alimentam terrenos cuja hidrologia e geomorfologia é reflexo da combinação de rochas com elevada solubilidade e tendência ao intemperismo químico a partir de uma porosidade secundária altamente desenvolvida. Feições cársticas são comumente associadas à litologias carbonáticas, ricas em minerais como a calcita (CaCO_3) e a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Isto ocorre em virtude da elevada solubilidade de rochas ricas em carbonato quando em contato com a água (Cvijić, 1895; 2017). Assim, define-se paisagem cárstica como aquela que há predominância de formas resultantes de intensa dissolução sobre rochas solúveis, como o calcário e dolomito.

Entretanto, geoformas classicamente associadas ao carste, tais como karrens, kamenitzas e ponors, têm sido registradas em rochas não carbonáticas, incluindo arenitos, quartzitos e formações ferruginosas (Andreychouk et al., 2009; Willems et al., 2008; Maia et al., 2015; Travassos, 2019; Hardt, Rodet e Zogbi, 2022). Tal ocorrência é denominada de carste não tradicional, conceito relativamente recente na literatura. Nestes casos, os processos cársticos variam conforme a litologia, sendo observada por exemplo, na formação de espeleotemas a partir da dissolução de caulinita, ilita e quartzo, em contraste com a precipitação de cálcica típica dos sistemas cársticos carbonáticos. (Melo et al., 2015; Travassos, 2019).

As paisagens cársticas, tradicionais ou não, apresentam elevada complexidade na interação entre águas superficiais e subterrâneas, bem como expressivos valores culturais, recreativos e cênicos, configurando-os como importantes geopatrimônios (Williams, 2008).

Exemplos notáveis de carste não tradicionais incluem geopatrímônios desenvolvidos em arenitos, como o Parque Nacional Canaima, na Venezuela, e o Purnulu National Park, na Austrália (Williams, 2008; Young, 2010; Timo e Travassos, 2022). No Brasil, existem áreas amplamente reconhecidas por seu patrimônio cárstico em contextos carbonáticos, tais como o complexo espeleológico Furna Feia e o Parque Estadual do Sumidouro (Cruz et al. 2009; Evangelista e Travassos, 2015) e casos de carstificação em litologias não tradicionais como no Parque Estadual Vila Velha (Paraná) e Serra da Capivara (Piauí) (Melo et al. 2015; Silva e Maia, 2024).

Nesse sentido, o município de Paraúna, em Goiás, exemplifica expressivamente ambiguidades conceituais associadas à distinção entre carste tradicional e não tradicional. A área abriga um conjunto de geoformas notáveis, com destaque aos geossítios inseridos na Serra das Galés, no Parque Estadual de Paraúna (PEPa), onde incidem torres ruiformes reconhecíveis por pareidolia, tais como a Pedra do Cálice e a Pedra da Tartaruga. Soma-se a este contexto, o Monumento Natural Ponte de Pedra, um geopatrímônio cuja morfologia sugere um sistema de fluvio-carste, no qual o rio homônimo atravessa uma cavidade, formando uma ponte natural adornada interiormente por espeleotemas típicos de carste tradicional. Ambos os geopatrímônios encontram-se inseridos em formações cuja litologia é predominantemente arenítica, condição na qual se esperariam feições associadas ao carste não tradicional. Apesar da expressiva relevância científica, sua gênese e enquadramento conceitual permanecem pouco discutidos na literatura, revelando limitações no entendimento da dicotomia entre carste tradicional e não tradicional.

Além disso, a inventariação é uma etapa essencial para a promoção da geoconservação, sendo indispensável para que o entendimento dos processos de formação das geoformas anteceda qualquer classificação e proposta de manejo (Brilha, 2005). Desse modo, compreender a morfogênese dessas unidades torna-se essencial para avaliar sua singularidade, raridade e, conseqüentemente, valor científico. Além disso, considerando que as metodologias de valoração da geodiversidade aplicada no Brasil baseiam-se em análises pontuais de geossítios, desconsiderando o contexto geomorfológico mais amplo, torna-se pertinente questionar sua adequação à análise de geopatrímônios cársticos desenvolvidos em litologia pouco convencionais.

Desse modo, este trabalho tenta responder a seguinte pergunta norteadora: “De que modo o geopatrímônio das unidades de conservação de Paraúna (GO) pode ser compreendido a partir de seus processos morfogenéticos, de seus limites conceituais, terminológicos e das fichas de valoração científica de Geopatrimônio e Geossítios aplicadas ao contexto brasileiro?”

Partiu-se da hipótese de que as geoformas presentes tanto na Serra das Galés quanto na Ponte de Pedra foram originadas a partir de processo de carstificação, devido à presença de lentes carbonáticas não registradas em mapeamentos oficiais. No caso específico da Ponte de Pedra, supôs-se que o processo era intensificado pela ação da drenagem do Rio Ponte de Pedra, caracterizando um fluviocarste. Acredita-se que a mescla entre litologias carbonáticas e não carbonáticas possam transcender a discussão binária entre “carste tradicional” e “não-tradicional”.

Ademais, parte-se da hipótese de que a complexidade morfogênética tão diferentes destas formas contribui diretamente para reconhecimento e valorização do geopatrimônio, uma vez que reforça sua singularidade, raridade e importância para compreensão dos processos geológicos locais, portanto, dotados de alto valor científico.

Neste contexto, o trabalho tem como objetivo geral analisar o geopatrimônio das unidades de Conservação em Paraúna, Goiás, discutindo sua morfogênese, terminologia e métodos de valoração científica. Dessa forma, são objetivos específicos:

- Compreender os processos morfogênicos que originam o geopatrimônio local.
- Discutir os limites conceituais dos termos “carste tradicional” e “carste não-tradicional” a partir das singularidades destes geopatrimônios.
- Analisar a relevância e singularidade dos geopatrimônios das unidades de conservação em Paraúna (GO), considerando seu contexto geológico e geomorfológico.
- Avaliar criticamente a metodologia de valoração científica aplicada ao geopatrimônio, identificando potencialidades e limitações para o contexto brasileiro.

A partir da articulação da análise morfogênética das geoformas, a discussão conceitual acerca da definição entre carste tradicional e não tradicional, assim como a aplicação crítica das fichas de valoração científica de geopatrimônios, o presente trabalho busca contribuir para metodologias empregadas na valorização do geopatrimônio no contexto brasileiro e evidenciar a real relevância científico dos casos identificados em Paraúna.

2. GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA, CARSTE NÃO-TRADICIONAL E PATRIMÔNIO GEOMORFOLÓGICO

2.1 Definição de Carste

Relevos cársticos podem ser caracterizados como uma paisagem, um fenômeno, um conjunto de formas de relevo ou um sistema (Klimchouk, 2015). O nome origina da palavra

eslovena “Kras” e faz referência ao Planalto Kras, que abrange territórios da Eslovênia e Itália. Para descrever o fenômeno em rochas calcárias, adaptou-se o termo para o alemão como “Karst” (Kranjc, 2011). Portanto, é do alemão de onde deriva diretamente a versão portuguesa “Carste”.

2.1.1 Carste Tradicional

O carste tradicional é historicamente compreendido como o conjunto de processos, formas e dinâmicas que se desenvolvem em rochas carbonáticas altamente solúveis, sobretudo em calcários e dolomitos (Cvijić, 1895; 2017; Travassos, 2019). As definições clássicas apresentam variações que convergem para a centralidade da dissolução química como processo motor elementar. Lowe (1992) define carste como uma paisagem formada sobre rochas carbonáticas oriundas de dissolução pelo ácido carbônico. Luhr (2003) também apresenta a definição de paisagem, salientando a existência de drenagem subterrânea para seu desenvolvimento. Além disso, Gvozdetsky (1972 *apud* Klimchouk, 2015) compreende carste como a totalidade dos fenômenos que originam formas em rochas solúveis. Seguindo a mesma linha, Tsykin (1985 *apud* Klimchouk, 2015) afirma que o carste significa a totalidade das formas de uma seleção intempérica de rochas compostas por minerais solúveis em águas naturais.

A abordagem sistêmica abordada em Ford e Williams (2007) compreende o carste como um sistema hidrogeomorfológico, na qual os componentes geográficos que influenciam no desenvolvimento de paisagens abundantes em formas cársticas. Nesse modelo, o fluxo de recarga e descarga hídrica atua como principal controlador do sistema (Ford e Williams, 2007; Klimchouk, 2015), e o predomínio de erosão química sobre a mecânica é essencial para caracterizar um ambiente cárstico (White, 1988).

Nas definições mais clássicas, enfatiza-se a presença de rochas carbonáticas. (Cvijić, 1895; 2017; Lowe, 1992; Luhr, 2003). Klimchouk (2015) aponta que isto é um “efeito colateral” da origem do termo, pois, associado a uma região calcária, herdou esta característica como requisito para ser considerado carste. Há autores que se referem ao carste em litologia carbonática como “carste verdadeiro” (Cvijić, 1895;2017; Bakalowicz, 2005). Conforme De Waele e Gutiérrez (2022) carstes bem desenvolvidos ocorrem sobretudo em rochas carbonáticas com mais de 80% de calcita (CaCO_3) ou dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), as quais a dissolução química é o processo morfogenético dominante. Desse modo, a definição de Martel (1894 *apud* Klimchouk, 2015), de que o carste é um fenômeno exclusivo de calcários, ficou enraizada na literatura (Klimchouk, 2015).

A combinação entre solubilidade, fraturamento e alta pureza mineral manteve o modelo clássico de carstificação, sendo um paradigma ao longo da história. Entretanto, estudos posteriores demonstraram que a ocorrência de feições tipicamente cársticas não é exclusiva dos carbonatos (Travassos, 2019), indicando a necessidade de rever o paradigma da carstificação estritamente associada à rochas carbonáticas (Klimchouk, 2015), desse modo abrindo espaço para o reconhecimento de carstificação em litologias de menor solubilidade.

2.1.2 Carste não-tradicional e pseudocarste

Lowe (1992) aborda os processos de dissolução em halita, gipso e andrinita, minerais também demasiadamente solúveis, sob a denominação de “carste evaporítico”. Além disso, Wray (1997) aponta que há uma extensão de fenômenos associados ao carste ainda maior em locais com outras litologias, como é o exemplo das áreas em arenitos e quartzitos. Para estes casos, Gilli (2015) introduziu o termo “paracarste” para denominar geoformas cársticas de dissolução em rochas não carbonáticas. Nesse sentido, a classificação de “carste não-tradicional” é um termo alternativo para se referir à ocorrência de geoformas cásticas em litologias não carbonáticas, em especial silicatos (Andreychouk *et al.*, 2009; Travassos, 2019).

Young (2010) reporta a existência de um complexo de torres em maciços em arenito na Austrália, que possuem formas similares às encontradas em carste tradicional, em que a gênese está associada à lixiviação prolongada da sílica e corrosão dos grãos de quartzo. Na Venezuela, Aubrecht *et al.* (2008) aponta que as cavernas em arenito são formadas principalmente por erosão e colapso de rocha, com significância menor da dissolução. Além disso afirma que a erosão ocorre quando há a exposição à água, resultando em cavernas horizontais.

Hardt e Pinto (2009) levantaram áreas de potencial desenvolvimento de carste não tradicional no Brasil. Destacam-se localidades como a Serra da Capivara e Sete Cidades, no Piauí e na Serra Geral, do sul de Minas Gerais até o Rio Grande do Sul. Ambas têm em comum a presença de formas cársticas em arenitos. Ferreira e Candeiro (2022) também apontam a existência de uma ponte de pedra em Paraúna, Goiás, localizado em uma área de litologia arenítica (CPRM, 2008).

Hardt (2011) demonstra que, apesar do processo de formação de geoformas cársticas em arenitos não sejam inteiramente formados por dissolução, como a dos carbonatos, existe a formação de um sistema. Klimchouk e Ford (2000) definem o carste como um sistema de transferência de massa em rochas solúveis, no qual a permeabilidade estrutural é controlada por condutos formados pelo intemperismo químico, facilitando o fluxo de água. Conforme Hardt (2011), esta definição não se limita a determinar uma litologia específica, mas enfoca na existência de um sistema cárstico, caracterizando-o.

Trabalha-se também com o conceito de pseudocarste, definido por Kempe e Halliday (1997) como paisagens similares ao carste, que apesar de ter predominância de drenagem subterrânea, carecem do elemento de evolução a longo prazo por dissolução. Os autores identificam: 1 – pseudocarste reogênico (formado por fluxos de lava); 2 – pseudocarste em geleiras; 3 – pseudocarste em “badlands”; 4 – pseudocarste em permafrost e 5 – pseudocarste em tálus, incluindo campos de pedregulhos e cursos d’água cobertos. Halliday (2007) inclui outros tipos de pseudocarste: 6 – pseudocarste em fendas; 7 – pseudocarste de compactação e 8 – pseudocarste consequente.

Nota-se que no caso do conceito de pseudocarste, o termo se refere a feições semelhantes ao carste, mas que se originam por processos diferentes da dissolução da rocha, sendo a erosão mecânica preponderante.

Devido à baixa solubilidade das rochas silicatadas, as cavernas formadas em litologias siliciclásticas foram por muitos anos identificadas como pseudocarste, uma vez que mecanismos físicos seriam preponderantes ao da dissolução, desempenhando papel principal em sua formação (Aubrecht *et al.*, 2008). Wray (1997) ressalta que evidências de remoção de sílica de arenitos e quartzitos em condições próximas a superfície são menos recorrentes. Se a sílica fosse consideravelmente mais solúvel, o carste em arenito seria similar ao carbonático, sem necessidade de remoção mecânica do material intemperizado (Jennings, 1985). Em quartzitos e arenitos, a dissolução se inicia em zonas de fácil absorção e progride ao longo dos limites dos cristais, ampliando os espaços vazios da rocha, até tornar-se mecanicamente instável, pelo processo chamado de “arenização” (arenisation) (Martini, 1979).

2.2 Geofomas cársticas

Em virtude da ação do sistema, diversos tipos de carste se desenvolvem em determinados arranjos morfológicos. Bögli (1980) cunhou o termo “exocarste” para definir geofomas cársticas que ocorrem em superfície. Abrange uma diversidade de geofomas, tais como: karren, dolinas (sinkholes), planícies de corrosão, poljes, glaciocarste e fluvioicarste.

Em zona intermediária, subcutânea, situa-se o epicarste. Formada pela parte superior da rocha subjacente, coberta ou não por material inconsolidado (Palmer, 1991; Ford e Williams, 2007), predomina a dissolução do calcário e lixiviação do manto de intemperismo (Piló, 2000). Abaixo do epicarste, localiza-se o endocarste (Bögli, 1980), reconhecido pelas cavernas e pelas geofomas associadas. Conforme Ford e Williams (2007), o processo de gênese do endocarste ocorre devido a atitude estrutural e fluxo de água no sistema cárstico no subterrâneo.

2.2.1 Exocarste

Na superfície de um sistema cárstico, as geoformas mais expressivas são os *karren* (ou lapiás). Cvijić (1895; 2017) as define como ranhuras estreitas separadas por cumes afiados, de profundidade variável decimétrica a métrica. Na maioria das vezes são formas que ocorrem em conjunto, formando os *karrenfields*, ou campos de lapiás (Ford e Williams, 2007; Travassos, 2019). Para classificar um *karrenfield*, é necessário que a paisagem esteja exposta em pelo menos 5% e componha um sistema de fluxo de água com recarga e descarga (Ginés, 2009)

Dentre as formas hidrodinâmicas de *karren*, destacam-se as *Kamenitzas* (bacias de dissolução); *Rillenkarrens* (lapiás paralelos e estreitos); *Rinnenkarrens* (canais de dissolução maiores paralelos); *Craterkarrens* (pequenas crateras formadas pela chuva); *Rillenstaine* (micro caneluras formadas pela capilaridade e pela ação eólica) (Ford e Williams, 2007; Cucchi, 2009; Veress, 2009; Lundberg e Ginés, 2009; Ginés *et al.*, 2009; Ginés, 2009; Travassos, 2019; De Waele e Gutiérrez, 2022). Estas geoformas não são exclusivas do carste tradicional, ocorrem também em rochas não carbonáticas (Cucchi, 2009).

Já as *dolinas* são as depressões superficiais em forma de bacia, com diâmetro chegando a centenas de metros e com profundidade de 2 a 100 metros, (Cvijić 1895; 2017; De Waele; Gutiérrez, 2022). Travassos (2019) ressalta que a forma de classificar estas geoformas ainda não é consensual, de modo que alguns autores classificam de acordo com a forma e outros conforme a gênese. As primeiras classificações a caracterizavam de acordo com a forma. A classificação de Cvijić (1985; 2017), as classificava em três formas: bacia, funil ou poço. Entretanto, Williams (2004) propõe uma classificação que atualmente é mais aceita, baseada na morfogênese, com seis tipos: dolinas de dissolução, colapso, subsidência (dropout), enterradas, de cobertura (caprock) e de sufusão.

As dolinas de dissolução se formam a partir da corrosão química do calcário sob uma cobertura de solo, enquanto as de colapso surgem a partir desmoronamento do teto de uma caverna. As dolinas dropout se formam em sedimentos inconsolidados, e dolinas enterradas são preenchidas por sedimentos compactados. Dolinas de cobertura ocorrem em áreas em que a camada rochosa solúvel colapsa sobre cavidades cársticas subjacentes e dolinas de sufusão são depressões encobertas por sedimentos, formadas por deslocamento gradual da superfície (Waltham e Fookes, 2003; Williams, 2004; Kranjc, 2013; Travassos 2019).

Para definir depressões fechadas maiores que uma dolina e menores que um polje, utiliza-se o termo *uvala*. Este termo foi introduzido por Cvijić (1895;2017) e significa coalescência entre duas ou mais dolinas, representando um estágio intermediário entre dolina e polje. A palavra deriva das línguas eslavas, que indica um vale ou uma abertura entre montanhas

ou elevações (Kranjc, 2013). Travassos (2019) descreve estas formas como alongadas e irregulares, podendo possuir escalas quilométricas, com fundo ondulado ou irregular, apresentando dolinas e sumidouros, mas também pode ser aplainado devido a presença de sedimentos coluvionais.

Conforme Čalić (2011), a definição proposta por Cvijić (1895;2017) apresenta-se equivocada, pois em seus estudos comprovou-se que a origem das uvalas estão principalmente relacionadas ao rebaixamento corrosivo em zonas de altas densidade de fraturas, não à junção de dolinas. De Waele e Gutiérrez (2022) propõe o termo *dolinas compostas* (Compound sinkholes) para os casos de coalescência.

Às grandes depressões fechadas, cuja forma do interior é de uma planície de mais de um quilômetro de extensão, dá-se o nome de *polje* (Cvijić 1895; 2017). A palavra também deriva das línguas eslavas significando “campo”, devido a dimensão aplainada da forma. Estas formas são poligenéticas, derivadas tanto de processos tectônicos, como também por ação fluvial e cárstica (Kranjc, 2013). Ford e Williams (2007) identificam três tipos de poljes: polje de borda, polje estrutural e polje de nível freático.

Segundo Ford e Williams (2007), os poljes de borda são marcados por controle derivado de drenagem alóctone, desenvolvendo-se na zona de variação do nível freático em rochas não cársticas e se estende até a zona cárstica. Os poljes estruturais tem como controle principal os fatores geológicos, associados a falhas, fraturas e à litologia menos permeável (a exemplo do dolomito). São caracterizadas pela forma alongada e comumente ocorrem em áreas tectonicamente ativas. Um polje de nível freático se forma quando a dissolução rebaixa a superfície até a zona epifreática, abrindo espaço para o nível freático, sem necessidade de controle alógeno ou geológico.

Conforme Waltham e Fookes (2003), o *fluviocarste* é um tipo de relevo cárstico caracterizado por extensos sistemas dendríticos de vales secos, cortados por rios antes de serem capturados por uma drenagem subterrânea do sistema cárstico. Sweeting (1972) aponta que esta forma é originada a partir da ação combinada entre processos fluviais e cársticos, embora seja uma definição vaga, pois, conforme Gunn (2004a), a existência de processos fluviais é comum em diversas formas de relevo cársticas, como a origem de dolinas e poljes. O termo foi introduzido por Roglić (1964), substituindo o conceito de “merokarst” de Cvijić (1924), que se referia a um carste com elementos fluviais em áreas com predomínio de intemperismo mecânico (Gunn, 2004a).

As principais características do fluviocarste incluem baixa vazão de drenagem, rios intermitentes, vales secos, sumidouros (ponors) e sedimentos fluviais oriundos de áreas não

carbonáticas (Karmann, 1994). Rios superficiais são atípicos em ambientes cársticos, mas, segundo Bögli (1980), podem ocorrer quando: (1) o carste não está desenvolvido o suficiente para reter toda a água da chuva, fazendo com que o rio perca volume; (2) o canal atinge o lençol freático cárstico, criando uma interação com a água subterrânea; (3) a drenagem alcança uma camada impermeável subjacente; (4) o leito do rio é impermeabilizado posteriormente; ou o permafrost bloqueia a drenagem subterrânea, formando uma drenagem superficial chamada “blocked karst”.

O curso hídrico alimenta o sistema cárstico. Sendo assim, a drenagem origina geoformas de recarga e descarga hídrica. Entre as formas de recarga, destacam-se os sumidouros (ponors) vales cegos (blind valleys), vales secos (dry valleys) e vales fechados (pocket valleys) (Travassos, 2019).

Os *sumidouros* (ponor) são fissuras no maciço cárstico por onde o rio adentra o subsolo. (Travassos, 2019). Bonacci (2009) aponta que estas geoformas desempenham um importante papel hidrológico e hidrogeológico, uma vez que a circulação de água em terrenos cársticos alimenta o sistema e os sumidouros são considerados as principais redes de recarga. De acordo com Milanović (1981), podem incluir grandes poços, cavernas, fissuras. Além disso, existem sumidouros que conectam diretamente a superfície às cavernas e tendem a ocorrer em calcários horizontalizados (Sweeting, 1972). Todavia, em calcários fraturados verticalmente, dá-se o nome de pot-holes (Travassos, 2019). De qualquer modo, ambos os termos definem geoformas que capturam água para o subterrâneo.

Vales Cegos (Blind Valleys) ocorrem quando um rio afluente de uma rocha cárstica perde parte ou seu fluxo completo em sumidouros (ponors), conforme destacado por De Waele e Gutiérrez (2022). Jennings (1985) aponta que, nesses casos, o rio aprofunda seu leito, de modo que não retoma a barreira. À medida que o sumidouro aumenta sua capacidade de absorção, o trecho do vale à jusante se torna seco, criando um fluxo de água sazonal (Travassos, 2019; De Waele e Gutiérrez, 2022). Além disso, em carste exposto e altamente fraturado, canais significativamente volumosos podem ser absorvidos abruptamente (Sweeting, 1972).

Os *vales secos* (Dry Valleys) são definidos como “vales fluviais sem rios, que existem devido ao fato de a água ter sido capturada por um sistema subterrâneo” (Travassos, 2019, p.77). Estas feições parecem menos incidentes em áreas de clima tropical, possivelmente por causa da elevada precipitação e intenso processo de carstificação (Sweeting, 1972). De Waele e Gutiérrez (2022) apontam que o desenvolvimento destas geoformas podem ser atribuídas a distintos fatores, dentre eles: (i) condições climáticas antecessoras com chuvas mais intensas; (ii) sobreposição de uma drenagem desenvolvida em rochas não carbonática; (iii) queda do

nível da água, alterando o comportamento hidrológico de riachos; (iv) aumento da permeabilidade da rocha no substrato rochoso, incluindo o epicarste e; (v) pirataria subterrânea a partir do desenvolvimento de sumidouros.

Um *vale fechado* (Pocket Valley) pode ser compreendido como o inverso dos vales cegos (Gunn, 2004b), pois trata-se de um vale cuja gênese está associada a um rio que escavou uma vertente a partir de uma nascente ou surgência (Travassos, 2019). Conforme De Waele e Gutiérrez (2022), o recuo da escarpa é acelerado pela erosão das nascentes, originando vales com cabeceiras íngremes, em forma de anfiteatro.

Todas estas feições se desenvolvem, conforme Klimchouk (2015), em carste epigênico, ocorrendo próximo à superfície que recebe recarga a partir da água pluvial que, a partir da infiltração, começa a circular pelo subterrâneo (Travassos, 2019). De acordo com Klimchouk (2015), o carste epigênico é um fator importante para o desenvolvimento de *relevos ruiformes*. De Waele e Gutiérrez (2022) definem uma “paisagem ruiforme” como um campo de rochas residuais dispersos, com morfologia variável. Composto as formas de relevo ruiformes, estão as geoformas conhecidas como pináculos, maciços residuais, cones e torres cársticas (White, 1988). Os *pináculos* são definidos por De Waele e Gutiérrez (2022) como resíduos de rocha com topos pontiagudos, isolados por garras ou cortadores. Possuem altura variável entre métrica a decamétrica (spitzkarren) acima da superfície terrestre circundante. Possuem forma de espirais ou de pináculos isolados originados a partir da dissolução da rocha ao longo de fraturas periféricas (White, 1988).

Os *maciços residuais*, por sua vez, são as colinas ou elevações isoladas que permanecem após a erosão de uma área circundante (White, 1988). Normalmente estes maciços retêm fragmentos da rocha original, protegendo-os mais da erosão, em comparação a seu entorno. White (1988) ressalta que no carste central do Kentucky nos Estados Unidos, estas colinas isoladas recebem o nome de “**knobs**” e em outros locais, como no Carste Dinárico e no Brasil, recebem o nome de “**hums**” (Tricart e Silva, 1960; Herek e Stringfield, 1972). Apesar de possuírem diferenças litológicas e morfogenéticas, Travassos (2019) faz uma analogia dos hums ou humes a um inselberg no carste.

Dependendo da forma das vertentes, as colinas residuais podem ser chamadas de **cones** (kegelkarst ou fengcong) ou **torres** (turmkarst ou fenglin), conforme destacado por Lehmann, 1982) e Waltham (2008). Tais elevações residuais variam de dezenas a centenas de metros e podem possuir cavernas e pontos de infiltração (White, 1988). O carste em cone é caracterizado por dolinas cônicas, isoladas ou interligadas por superfícies mais baixas, quando em depressões fechadas formam uma topografia de “caixa de ovos” (Ford e Williams, 2007; Day, 2004). Esta

geoforma não ocorre de forma isolada, mas sim em agrupamentos, separados por depressões fechadas ou por dolinas profundas (Waltham, 2008; Travassos, 2019). A drenagem sobre estas geoformas é autóctone, com os cones e depressões formando bacias fluviais organizadas. Entretanto, ainda assim podem ocorrer entradas de áreas não cársticas subjacentes (Day, 2004).

Por sua vez, paisagens de carste em torres são marcadas por colinas residuais com vertentes íngremes, que emergem de superfícies planas e corroídas, comumente cobertas por sedimentos aluviais (Day e Tang, 2009). Este tipo de paisagem é raro, praticamente restrito ao sudeste asiático, na parte do sul da China e até o nordeste do Vietnã. Entretanto, também ocorre na Tailândia, Burma e Indonésia. (Waltham, 2008; Travassos, 2019).

Travassos (2019) também reporta as **stone forest** (florestas de pedra), definidas como um conjunto complexo de rochas e pináculos esculpidos na rocha, que se diferem dos karren por apresentar um desenvolvimento genético subcutâneo. As “florestas de pedra” representam uma fase evoluída dos relevos ruiformes.

2.2.2. Endocarste

O ambiente endocárstico envolve o subterrâneo e está constantemente associado às cavernas. Conforme De Waele, Plan e Audra (2009), o endocarste origina-se do alargamento de fissuras em subsolo, criando uma rede de condutos e cavernas. Por esse motivo, a espeleogênese (formação de cavernas) é o nome dado à evolução dos sistemas cársticos (Travassos, 2019).

Em relação à gênese das cavernas, existem dois tipos básicos: as epigênicas e as hipogênicas. As **Cavernas epigênicas** são formadas a partir da ação intempérica da água sob a rocha, que a desenvolve “de cima para baixo” (Travassos, 2019). Tais cavernas se desenvolvem em tamanhos variados, métricos a quilométricos, onde os pontos de infiltração estão em elevações que permitam o fluxo freático da área de recarga até as nascentes (De Waele e Gutiérrez, 2022). Já as **Cavernas hipogênicas** são formadas a partir da dissolução da rocha por águas profundas, desenvolvendo-se de forma ascendente (Travassos, 2019). Audra e Palmer (2015) apontam que a origem de cavernas hipogênicas está relacionada a movimentos de circulação de fluidos subterrâneos controlados regionalmente pela gravidade, destacando áreas de convergência e fluxos ascendentes, onde a dissolução do substrato rochoso é mais intensa.

Os sistemas de cavernas associados ao carste ruiforme de cone incluem cavernas verticais, sistemas centrípetos que drenam cones e depressões, e condutos regionais profundos. Estudos paleomagnéticos em sedimentos de cavernas sugerem que os cones são formas de relevo que evoluem ao longo do tempo, com seus cumes sendo mais antigos que suas bases (Williams, 1987; Day, 2009).

Além de serem geoformas por si só, as cavernas abrigam diversas outras geoformas menores, conhecidas como espeleotemas. White (2012) classifica estas formas a partir da seguinte proposta: (A) Formas criadas por fluxo hídrico (e.g.: escorrimentos, represas de travertino e colaroides); (B) Formas criadas por gotejamento (e.g.: estalactites, estalagmites, colunas e cortinas); (C) Formas criadas pelo movimento da água via capilaridade (e.g.: crostas, helictites e flores de caverna); (D) Formas criadas pela água estagnada (e.g.: dentes de cão e “jangadas”).

Referentes às formas criadas a partir de fluxo hídrico, os **escorrimentos** são espeleotemas formados a partir da água rica em carbonato dissolvido que flui de modo laminar sobre a superfície da caverna, criando uma superfície corroída; as **represas de travertino** são depósitos de carbonato de cálcio que surgem quando a água, menos saturada em carbonatos, ficam retidas, criando um pequeno mecanismo de “represa”; os **coraloides** são nódulos de calcita de dimensão milimétrica a centimétrica, de superfície convexa (White, 2012).

A respeito das formas oriundas via gotejamento, estas ocorrem a partir da infiltração de água pelo solo e epicarste, a partir do padrão de fraturas (Travassos, 2019). As **estalactites** são formadas a partir da água saturada em calcita que, durante o processo de gotejamento, deposita a calcita suspensa no topo da caverna. Já as **estalagmites**, por sua vez, se formam a partir do depósito de calcita no chão da caverna, crescendo de baixo para cima. Quando ambas as formas coalescem, forma-se uma **coluna**. Por fim, quando há o escoamento dos gotejamentos em superfície inclinada, as estalagmites podem seguir o caminho de uma falha, formando **cortinas** (White, 2012; Travassos, 2019).

Apesar de baixa permeabilidade intragranular, há o desenvolvimento de geoformas a partir da ação da capilaridade (Travassos, 2019). As **helictites** são exemplos de espeleotemas originados do fluxo da água saturada através de canais capilares sob alta pressão, se caracterizando pelo crescimento de múltiplas direções. (White, 2012).

Os espeleotemas que se formam a partir da água estagnada podem surgir de duas formas principais: na superfície da água ou de modo submerso (Travassos, 2019). As **pérolas de caverna** são espeleotemas soltos, pedaços esféricos que se concentram em pequenas áreas agitadas pelo gotejamento. Já os espeleotemas **dentes-de-cão** são cristais de calcita com pontas afiadas, desenvolvidos sobre pequenos lagos ou represas de travertino, originado a partir da precipitação de calcita em água supersaturada (White, 2012; Travassos, 2019).

2.3 Geodiversidade, geoconservação e geoturismo no carste

O conceito de geodiversidade é praticamente análogo ao termo mais difundido na comunidade científica como biodiversidade (Brilha, 2005). Conforme Gray (2004), o termo

surgiu na Conferência de Malvern, que ocorreu em 1993, com o tema Conservação Geológica e Paisagística, a fim de definir a variedade do meio abiótico. Nesta conferência, Wiedenbein (1994) se utilizou deste termo para abordar a conservação de geótopos em países germanófonos.

O termo “geodiversidade” recebeu distintas definições. Dentre estas, Stanley (2000) define geodiversidade como a variedade de processos, fenômenos e ambientes geológicos que influem na composição de paisagens, rochas, minerais, fósseis, solos e outros depósitos que compõe a vida na Terra. Por sua vez, Gray (2004) define geodiversidade como a variedade natural de aspectos geológicos, geomorfológicos, e de solo, incluindo suas coleções, relações, propriedades, interpretações e sistemas. Nesta definição, cria-se uma distinção mais clara sobre “geológico” e “geomorfológico”, onde o primeiro se refere à minerais, rochas e fósseis e o segundo à forma de paisagem e seus processos.

Nascimento, Ruchkys e Mantesso-Neto (2008) advogam que o termo “geodiversidade” caminha lado a lado com o conceito de “patrimônio geológico”, que representa o conjunto de geossítios. Todavia, os autores reforçam a ideia de que se trata de conceitos distintos, em que a geodiversidade englobe a variedade de minerais, rochas, fósseis e paisagens que existem no planeta, enquanto a concepção de patrimônio geológico é uma fração da geodiversidade que apresenta características especiais e que, portanto, merece ser preservado.

Brilha (2005) aponta que há um consenso no meio científico da necessidade de conservação do meio biótico (biodiversidade) e levanta um questionamento sobre a desimportância dada ao meio abiótico, alegando que a geodiversidade deve ser protegida e faz-se necessário o desenvolvimento de estratégias de conservação. Gray (2004) propõe uma classificação dos valores atribuídos a geossítios, incluindo aspectos intrínsecos, culturais, estéticos, econômicos, funcionais, científicos e educativos. O valor intrínseco, embora difícil de quantificar, reflete a relação filosófica e religiosa de uma sociedade com a natureza (Brilha, 2005). Por outro lado, o valor cultural abrange significados sociais e folclóricos atribuídos ao ambiente físico, como a “geomitologia”, que explora explicações sobrenaturais para formações naturais. De fato, cavernas foram locais utilizado para adoração em diversas culturas (Travassos, 2010).

O valor estético, embora subjetivo, é amplamente reconhecido, pois paisagens naturais são apreciadas por sua beleza (Brilha 2005). Em contraste, o valor econômico é mais claro e quantificável, envolvendo locais ricos em recursos minerais e energéticos, que têm relevância tanto para a extração quanto para a geração de energia (Gray, 2004). O valor funcional relaciona-se a usos práticos do ambiente, enquanto valores científicos e educativos ressaltam a

importância de geossítios para investigações e educação nas Ciências da Natureza, essenciais para a compreensão dos fenômenos geológicos (Gray, 2004; Brilha, 2005)

Neste contexto, vale ressaltar que as paisagens cársticas se diferem de outras em virtude da complexa relação entre as águas superficiais e subterrâneas, tornando estes ambientes com valores intrínsecos, culturais, científicos, recreacional, econômicos e estéticos (Williams, 2008). Relacionados ao geopatrimônio em terrenos cársticos, Hamilton-Smith (2007) listou os seguintes valores: estético/cênico, biodiversidade, história geoambiental, química mineral, e cultural.

Existem diversos exemplos de geossítios cársticos reconhecidos internacionalmente. Dos que abrangem carste não-tradicional se destacam o Parque Nacional Canaima (Venezuela), que contempla o desenvolvimento de cavernas em rochas quartzíticas pré-cambrianas e o Purnulu National Park, na Austrália, que preserva um fluviocarste desenvolvido sobre litologia arenítica e é dotado de torres cársticas, chamada de ‘Maciço Bungle Bungle’ (Williams, 2008; Young, 2010; Timo e Travassos, 2022). No Brasil, destacam-se como exemplos de carste não tradicional as cavernas em quartzito da Serra do Caraça (Clemente, 2015); o Abismo Guy Collet, localizado em Barcelos (AM), considerado o maior desnível de quartzito do mundo (Lobo e Boggiani, 2013); e as notáveis formas residuais como pináculos, torres e arcos naturais encontradas na Serra da Capivara, no Piauí (Silva e Maia, 2024).

2.3.1 Patrimônio Geomorfológico e geoconservação no carste

Segundo a UNESCO (1972), o patrimônio natural inclui os monumentos naturais com formações físicas e biológicas de valor universal excepcional em termos estéticos ou científicos, bem como zonas que abrigam espécies ameaçadas. Brilha (2005) define geossítio como um local com um ou mais elementos científicos pedagógicos, culturais ou turísticos. Neste viés, patrimônio geológico é definido como o conjunto de geossítios em uma determinada área ou região.

Claudino-Sales (2018) afirma que a concepção de “patrimônio geológico” se apresenta demasiadamente limitada para os elementos de uma geodiversidade que estuda as formas de relevo, advogando a favor de uma identidade própria ao “patrimônio geomorfológico”. Desse modo, um sítio geomorfológico (ou geomorfossítio) é definida como uma forma de relevo cujos atributos geomorfológicos qualificam um valor (Panizza e Piacente, 2008). São classificados em diferentes categorias, levando em consideração características litológicas, estruturais e geomorfológicas (Reynard e Brilha, 2018).

A Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP) foi criada em 1997 a fim de inventariar geossítios no Brasil e em 2006, o Serviço Geológico do Brasil lançou o Projeto Geoparques, com o intuito de promover áreas com potencial para oficialização de geoparques (Pereira, 2010; Schobbenhaus e Silva, 2012). Evangelista e Travassos (2014) destacam a necessidade de integrar abordagens subjetivas e objetivas na avaliação do patrimônio geomorfológico, enfatizando a importância da geoconservação, que visa preservar a geodiversidade e manter a evolução natural das formas geológicas (Sharples, 2002).

Uma vez estabelecida o valor e grau de importância de um geopatrimônio, urge a necessidade de promover a geoconservação (Brilha, 2005). Neste contexto, Nascimento, Ruchkys e Mantesso-Neto (2008) ressaltam que é necessário promover a compreensão da comunidade a respeito do valor de geopatrimônio. Evangelista e Travassos (2014) apontam que costumeiramente o uso do termo “geoconservação” está associado ao uso sustentável do meio abiótico, em uma tentativa de compatibilizar a conservação do meio natural com a utilização consciente de parte dos recursos naturais. Sharples (2002) define geoconservação como a ação voltada à preservação da geodiversidade, abrangendo aspectos e processos geológicos, geomorfológicos e pedológicos significativos, com o objetivo de manter a evolução natural dessas formas.

Os objetivos básicos da geoconservação, de acordo com Sharples (2002) são: 1 – garantir a preservação e a continuidade da geodiversidade; 2 – conservar as taxas e intensidade de mudanças dos processos geológicos; 3 – proteger e manter a integridade dos locais de importância da geoconservação; 4 – reduzir os impactos negativos em áreas significativas para a geoconservação; 5 – oferecer interpretações sobre a geodiversidade aos visitantes de áreas protegidas e 6 – colaborar para a preservação da biodiversidade e dos processos ecológicos que dependem da geodiversidade.

2.3.2 Carste e geoturismo

Conforme a definição de Hose (2000), geoturismo é definido como a oferta de recursos interpretativos e serviços que destacam o valor e benefícios sociais de locais e materiais geológicos e geomorfológicos, garantindo sua preservação para uso de estudantes, turistas e demais interessados em atividades recreativas ou de lazer. Posteriormente, Ruchkys (2007) definiu o conceito como um ramo da atividade turística, em que o patrimônio geológico é a principal atração, visando a proteção a partir da conservação dos recursos naturais e conscientização dos visitantes. Ainda conforme a autora, a viabilização do acesso ao público leigo, colabora para a promoção da divulgação e avanço das geociências.

A concepção de geoturismo evoca o conceito de “turismo sustentável”. Conforme Beni (2002), esse tipo de turismo pode ser entendido como o aprimoramento da distribuição dos benefícios do desenvolvimento econômico, fundamentado no fortalecimento das condições necessárias para a oferta de serviços turísticos, garantindo a preservação a recuperação e a melhoria dos recursos naturais. Este termo entra como oposição ao termo “Turismo predatório”, quando não há planejamento ou medidas de geoconservação sobre a paisagem, degradando-a (Körössy, 2008). Vale ressaltar que Nascimento, Ruchkys e Mantesso-Neto (2008) apontam que a atividade turística, quando bem orientada, contribui para a conservação do patrimônio a partir da sensibilização do turista em relação ao atrativo que está visitando.

A respeito ao público não acadêmico do geoturismo, Hose (2000) cita que existem dois tipos de geoturistas: (i) os geoturistas dedicados, ou seja, aqueles que visitam sítios geológicos com objetivos educacionais, buscando crescimento intelectual e apreciação do patrimônio geológico e (ii) os geoturistas casuais, que são indivíduos que visam geossítios e exposições por mero lazer e buscam pouco estímulo intelectual.

Moreira (2014) aponta que o geoturismo é dotado de fatores condicionantes que fazem parte de seu desenvolvimento, sintetizados em três grupos: 1 – de caráter científico, específicos da comunidade geológica e envolvem a definição e descrição do geopatrimônio; 2 – de caráter político, que abrange a gestão, legislação e promoção dos atrativos; 3 – de caráter social e turístico, que englobam o setor turístico, como as agências de turismo, operadoras, hotelarias, transporte, marketing, lojas de souvenir e outros. Neste sentido, a ação do geoturismo pode se tornar um fator de grande importância para o desenvolvimento socioeconômico de uma localidade, assim como pode promover a conservação dos geossítios já estabelecidos (Bezerra *et al.*, 2013).

No que se refere ao geoturismo ligado ao carste, em sua tese de doutorado, Travassos (2010) evidenciou uma relação direta das cavernas com o turismo religioso, de modo que as grutas eram vistas como “locais santificados”. Antić, Tomić e Marković (2020) propuseram um modo de quantificar valores a monumentos naturais de pontes de pedra no nordeste da Sérvia, visando valores estéticos e de relevância científica e educacional. Além disso Sunkar *et al.* (2022) avaliaram os riscos potenciais das atividades turísticas no carste de Sangkurilang-Mangkalihat, na Indonésia, apontando que este parque detém potencial para se tornar um geoparque global pela UNESCO.

Em paralelo, dentre as cavernas mais visitadas no Brasil, se destacam as grutas do Lago Azul (Bonito-MS), Maquiné (Cordisburgo-MG) e no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), no estado de São Paulo (Timo e Travassos, 2022). Também há o exemplo do

Santuário de Bom Jesus da Lapa, construído no interior de uma caverna na Bahia, o que promove, ao mesmo tempo, o turismo religioso e espeleológico (Lobo e Boggiani, 2013; Nascimento e Carvalho, 2013).

Deste modo, fica claro que o carste possui grande potencial para a criação de geossítios e para o desenvolvimento do geoturismo. No entanto, é necessário estudá-lo em termos de morfogênese, geodiversidade e biodiversidade antes de abri-lo à exploração turística, pois o geoturismo demanda conhecimentos e pode causar impactos ambientais, colocando em risco a integridade do geopatrimônio.

2.4 Inventariação de geopatrimônios para valores científicos

A inventariação do geopatrimônio constitui uma etapa base para quaisquer estratégias de geoconservação e representa o primeiro passo para o reconhecimento, avaliação e gestão dos elementos abióticos dotados de relevância científica, educativa, cultural ou estética (Gray, 2004; Brilha, 2005; 2016). Quanto ao patrimônio geomorfológico, a identificação e avaliação das geoformas exigem a articulação entre aspectos morfogenéticos, morfoestruturais e morfodinâmicos, bem como a análise de sua representatividade no contexto geomorfológico regional (Reynard et al., 2016; Moura-Fé, 2024).

Dessa forma, a inventariação transcende a mera descrição de formas e torna-se uma etapa interpretativa, vinculando o conhecimento das feições aos procedimentos que compõe sua morfogênese. Mas também da dinâmica ambientam responsável por sua manutenção e das relações entre unidades de relevo e o arcabouço geológico. Portanto, define-se como um procedimento epistemológico, tratando-se de selecionar, interpretar e hierarquizar elementos da geodiversidade conforme critérios teóricos fundamentados. (Sellier, 2010; Reynard et al. 2016; Moura-Fé, 2024).

O método proposto por Moura-Fé (2024) baseia-se nas contribuições de Reynard et al. (2016), Brilha (2016) e Sellier (2010), buscando a seleção de sítios geomorfológicos e avaliando seus valores científico, educacional e turísticos, a partir da análise de um recorte espacial. Cada autor contribui em um aspecto estrutural. Brilha (2016) fundamenta o conceito de geopatrimônio, distinção entre sítios geomorfológicos geossítios e sítios de geodiversidade, bem como a utilização das fichas de valoração (científica, educacional e turística); Reynard et al. (2016) destaca a análise das paisagens a partir de contextos morfoestruturais, morfoesculturais e morfogenéticos, bem como a definição de critérios-chave como representatividade e raridade; Sellier (2010) enfatiza o papel central do mapa geomorfológico e processo da seleção dos geossítios a serem inventariados.

A etapa de avaliação do inventário tem como objetivo obter dados que auxiliem a devida gestão dos geossítios inventariados. Ela procura reduzir a subjetividade do julgamento, a partir de uma base em indicadores numéricos de 0 a 4, que resulta em uma lista ordenada de geossítios, aplicada para definir prioridades em gestão (Moura-Fé, 2024).

O autor propõe fichas em três tipos de valores de geodiversidade, sendo eles: (1) valor científico (VCi); (2) Valor Educacional (VEEd); e (3) Valor Turístico (VTu).

A ficha de avaliação do valor científico (VCi) (Anexo 1) refere-se à significância científica do geossítio, sem necessariamente depender do uso imediato. Utiliza os seguintes critérios: Representatividade; localidade-chave; conhecimento científico; integridade; diversidade; raridade e limitações de uso.

A ficha de avaliação do Valor Educacional (VEEd) (Anexo 2) tem como objetivo medir o potencial de uso para ensino em diferentes níveis educacionais. Tem como critérios: vulnerabilidade; acessibilidade; limitações de uso; segurança; logística; densidade da população; associação com outros valores; cenários; singularidade; condições de observação; potencial didático e diversidade geomorfológica.

A ficha de avaliação do Valor Turístico (VTu) (Anexo 3) se refere ao potencial de visitação pública, sendo os seguintes critérios: Vulnerabilidade; acessibilidade; limitações de uso; segurança; logística; densidade da população; associação com outros valores; cenário; singularidade; condições de observação; potencial interpretativo; nível econômico e áreas de lazer.

Desse modo, evidencia-se que a inventariação e avaliação do patrimônio geomorfológico são processos interdependentes, fundamentados em princípios teóricos consolidados e em procedimentos analíticos capazes de mensurar a singularidade científica educativa e turísticas destes geopatrimônios. O método proposto por Moura-Fé (2024) busca integrar fundamentos como a coerência entre interpretação geomorfológica, seleção criteriosa e aplicação das ferramentas de valoração. Desse modo, é possível compreender a complexidade dos geopatrimônios por meio da combinação da leitura geomorfológica detalhada, aplicação de fichas de avaliação e posterior classificação da geodiversidade.

3. METODOLOGIA

O trabalho foi estruturado em duas frentes complementares de pesquisa: (i) análise da morfogênese das geoformas presentes nas unidades de conservação de paraúna, culminando em uma discussão sobre as limitações das classificações de carste tradicional e não tradicional e

(ii) a valoração do geopatrimônio com base em critérios de geodiversidade, a partir dos critérios de avaliação da relevância científica.

Foram desenvolvidas sete etapas para a obtenção dos resultados de ambas as frentes: (1) revisão bibliográfica; (2) análise regional da área via geoprocessamento; (3) coleta de dados em campo; (4) análises laboratoriais e tratamento de dados; (5) comparação dos resultados com a literatura; (6) aplicação de fichas de avaliação do valor científico; e (7) proposição de uma metodologia ajustada de avaliação de Valor Científico aplicada ao geopatrimônio.

A primeira etapa consistiu na revisão bibliográfica em livros, artigos científicos, teses, dissertações e monografias acerca dos conceitos e geofomas que foram estudadas durante a pesquisa. A partir das ferramentas “Scopus” e “Portal de Periódicos CAPES”, realizou-se uma pesquisa sistemática de trabalhos publicados com os seguintes termos: “Karst; Non-traditional karst; Karst in sandstone; Geodiversity; Geoconservation; Geotourism; Geodiversity in karst”. Além disso, foram consultadas publicações sobre a geologia do município de Paraúna, visando compreender seu contexto regional.

A segunda etapa consistiu na análise da área de estudo com base em sensoriamento remoto e material cartográfico. Foram utilizados dados georreferenciados acerca da geodiversidade e geologia do estado de Goiás, fornecido pelo Serviço Geológico Brasileiro. Estes dados foram empregados para identificar os aspectos da litologia e geomorfologia regional. Empregou-se também dados de Modelo digital de Elevação com resolução de 12 metros, do satélite ALOS Palsar para visualização da topografia. Nos trabalhos de sensoriamento remoto especial atenção foi dada para o cânion do rio Ponte de Pedra. Esta etapa de trabalho permitiu a confecção dos mapas temáticos em escala 1:135.000 da área de estudo, com destaque para o topográfico e para o de declividade.

A terceira etapa consistiu em pesquisa de campo para diagnóstico geral da área de estudo, que envolveu: (a) identificação das microfeições cársticas desenvolvidas, tipo de descarga e recarga fluvial e identificação petrográfica macroscópica; (b) Realização de imageamento da Ponte de Pedra e do Parque Estadual de Paraúna a partir de voo com drone DJI Air2S (Modelo DJI-MVA200S-C1) com câmera com sensor CMOS de 1 polegada que grava vídeos em 5.4 K e fotos de 20 MP. As ortofotografias georreferenciadas (GNSS GPS+GLONASS+GALILEO) geradas durante os vôos (autorizações DECEA #46FA6E99 e #523AD5D9) resultaram em imagens com de dimensões 6033 x 8000 e resolução de 8.83 cm/pixel; (c) Coleta de 12 amostras de rocha no interior da Ponte de Pedra, entorno e imediações do Parque Estadual.

Na quarta etapa, em parceria com o Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico (CRTI), as amostras coletadas em campo foram trituradas e enviadas para realização de análise por Fluorescência de Raio X, a fim de obter dados a respeito da composição química das amostras. Também foi realizada análise mineralógica a partir do método de Difração de Raio X, a fim de verificar a presença de cristais que compunham a rocha, em especial, a presença de calcita. Além disso, os dados coletados em campo via imageamento aéreo foram tratados e gerado um modelo digital de terreno (MDT), por meio dos softwares CloudCompare e Agisoft Metashape, possibilitando uma abordagem mais precisa e observação detalhada do relevo em gabinete.

A quinta etapa consistiu na comparação dos resultados obtidos com a literatura especializada, de modo a contextualizar a morfogênese da Serra das Galés e da Ponte de Pedra em relação a outros exemplos nacionais e internacionais.

Na sexta etapa, aplicou-se a ficha de avaliação quantitativa do Valor Científico (VCi), proposta por Moura-Fé (2024), com o objetivo de verificar sua adequação metodológica ao contexto dos geopatrimônios estudados.

A sétima etapa consistiu em refinar a proposta de avaliação quantitativa do Valor Científico aplicada previamente, ajustando pesos e critérios para adequar sua aplicação a geopatrimônios ao invés de geossítios isolados. Desse modo, foi possível comparar geopatrimônios compostos por um ou poucos geossítios com outros mais extensos, permitindo avaliar de maneira integrada os valores científicos tanto da Ponte de Pedra quanto da Serra das Galés.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente dissertação foi defendida no formato de artigos e seus resultados estão subdivididos em dois subcapítulos. O primeiro corresponde a um estudo já publicado na Revista Brasileira de Geomorfologia (anexo D), enquanto o segundo não foi ainda submetido. A seguir, ambos os artigos são apresentados, sendo que o primeiro corresponde a discussão dos limites da classificação do carste em tradicional e não tradicional e o segundo discute a capacidade da metodologia de análise de valor científico em corretamente valorar um geopatrimônio arenítico no Brasil.

4.1 Beyond the Traditional and Non-traditional Karst Dichotomy: Insights from Sandstone Landforms in the Central Plateau of South America

Abstract

This study analyses two distinct karstic sandstone landscapes—Serra das Galés and Ponte de Pedra (GO)—located in the Central Plateau of South America, Brazil. Considering that the former constitutes a ruiniform relief and the latter a fluviokarst, the objective was to discuss the conceptual boundaries between traditional and non-traditional karst. Based on geomorphological mapping, aerial photogrammetry, and geochemical analyses by X-ray fluorescence (XRF), morphogenetic processes in both areas were investigated. In Serra das Galés, the high silica purity, absence of calcium and magnesium oxides, and the geometry of the features suggest a process dominated by arenization and mechanical collapse (piping). In contrast, at Ponte de Pedra, caves, speleothems, and structural collapses associated with the dissolution of carbonate lenses interbedded within sandstone indicate hybrid morphogenesis. The results challenge the binary classification between traditional karst (in carbonate rocks) and non-traditional karst (in non-carbonate lithologies), suggesting the need to understand karstification as a spectrum of processes that vary according to lithological solubility and erosion mechanisms. This approach is relevant for geomorphological mapping, geoheritage inventories, and the management of areas with geoconservation value developed in mixed or atypical substrates.

Keywords: Mixed lithology karst; Ruiniform Relief; Fluviokarst; Sandstone speleogenesis.

4.1.1 Introduction

Karst systems are traditionally associated with carbonate rocks, such as limestone and dolomite, which, due to their high solubility, promote the development of typical landforms such as caves, sinkholes, and ruiniform reliefs (Cvijić, 1895; 2017; Ford and Williams, 2007). Karst hydrology and physical speleology are thus two aspects of the subterranean karst phenomenon and should be viewed congruently (Bögli, 1980). Although there are many typical karst landforms in non-carbonate rocks such as sandstones and quartzites, due to the low solubility of quartz, predominantly quartzose rocks, with high silica content, were considered immune to dissolution, so the karst-like landforms associated with these lithologies were initially understood as pseudokarst (De Waele and Gutiérrez, 2022). However, for Ford and Williams (2007), typical karst features such as karren, sinkholes, and caves can develop in low-solubility lithologies, including quartzose ones, as long as there is the presence of a groundwater flow organized by the action of dissolution, characterizing the karst system.

In this context, later studies expanded the concept to include karst landforms developed in other lithologies, particularly siliciclastic rocks such as sandstones and quartzites, giving rise to what is now referred to as non-traditional karst (Andreychouk et al., 2009; Travassos, 2019). Indeed, the dissolution processes that act on siliciclastic rocks, although distinct from those observed in carbonate rocks, also play a relevant role in the development of karst in sandstones (Briceño & Schubert, 1990; Wray, 1997). White (1988) describes the existence of complex systems of surface and subsurface watercourses in non-carbonate rocks such as sandstones, where dissolution occurs mainly through the alteration of soluble minerals that cement the rock grains, as well as through the dissolution of amorphous silica, which is intensified under conditions of high temperature and the presence of acidified water (Veress, 2020). This dissolution process weakens the internal structure of siliciclastic rocks, making them more susceptible to physical erosion and subsequently leading to collapse episodes. This phenomenon is extremely important in the development of karst in sandstones and is known as arenization (Martini, 1979).

Examples of non-traditional karst have been described in various parts of the world, such as Canaima National Park in Venezuela (Aubrecht et al., 2008) and Purnululu National Park in Australia (Young, 2010), among others. In Brazil, studies on karst developed in siliciclastic rocks have gained prominence in recent decades, with notable examples documented in Chapada dos Guimarães (Hardt et al., 2008), Rurópolis (Hardt et al., 2022), and Serra da Capivara (Silva and Maia, 2024). However, these systems still require further investigation, particularly concerning the morphogenetic evolution of fluviokarst systems developed in sandstone.

Indeed, although the development of karst features in carbonate lithologies is well established in the literature (Klimchouk, 2015; Travassos, 2019; De Waele and Gutiérrez, 2022), the question remains as to what extent features developed in non-carbonate lithologies can be legitimately recognized as karst, or whether they originate from distinct morphogenetic processes, even if they result in morphologically analogous landforms. A detailed investigation into the morphogenesis of these features is essential for refining the criteria that define karstification, thereby broadening the epistemological debate on what constitutes a karst system, including the division between traditional and non-traditional karst.

In this context, two areas located a few kilometers apart, each with numerous karst features and a similar sandstone lithology, coexist in the Central Plateau of South America, in the municipality of Paraúna in the state of Goiás, Brazil. However, these two areas also have many unique characteristics, as a ruiniform relief characterizes one—Serra das Galés—and the

other by a typical fluviokarst—Ponte de Pedra. This study seeks to analyze the mechanisms responsible for the morphogenesis of these two areas to debate the boundaries of the division of karst relief into traditional and non-traditional karst. For this purpose, regional geological mapping, aerial photogrammetry using drones, and chemical analysis of samples by X-ray fluorescence were employed.

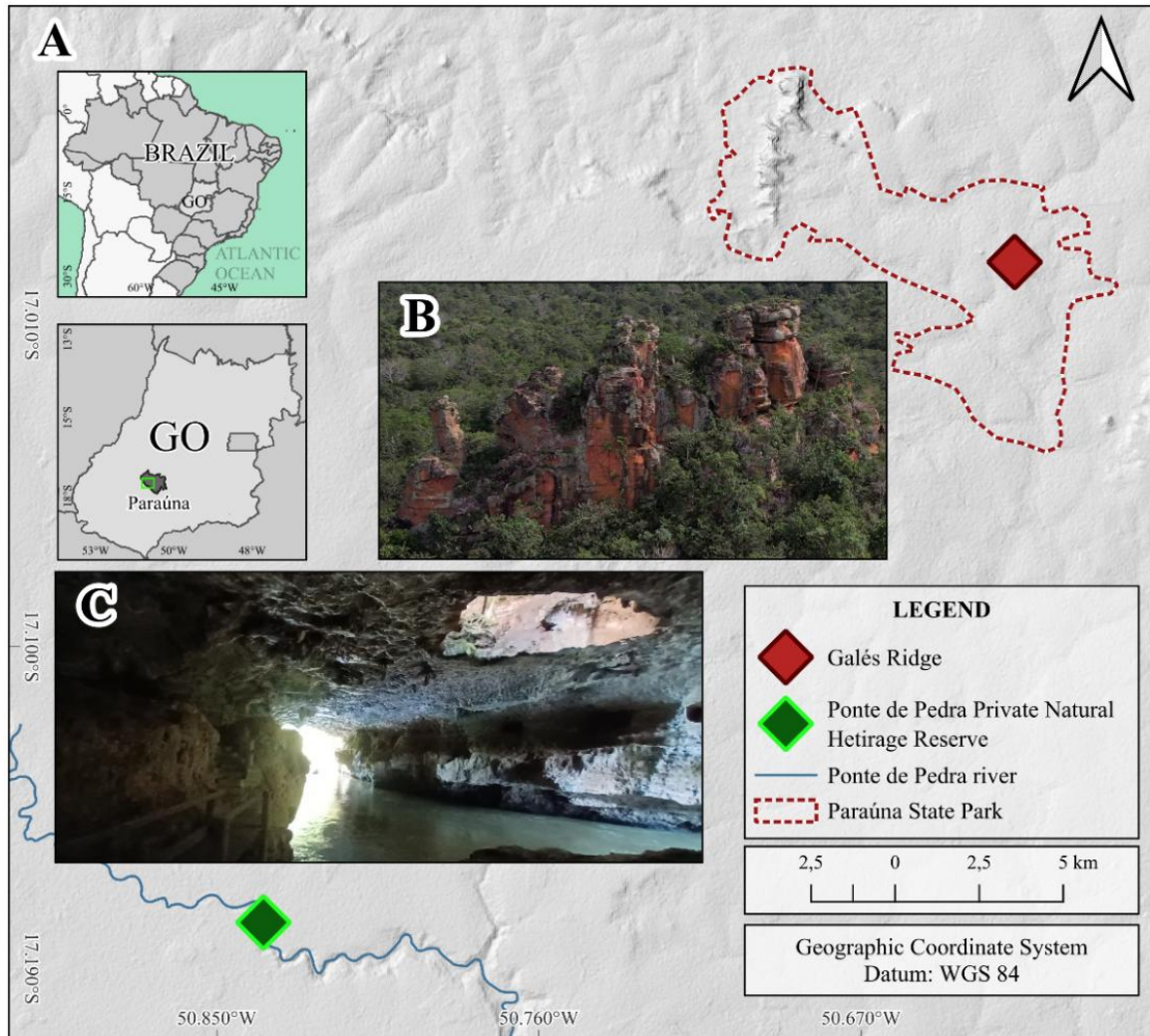
4.1.2 Study Area

The study area encompasses two locations of scenic and didactic relevance of the State of Goiás in the Brazilian Central Plateau (Figure 1). Both are situated in the municipality of Paraúna: the first is the Serra das Galés in the Paraúna State Park, and the second is the Ponte de Pedra ("Stone Bridge"), located less than 20 km from each other. The predominant biome in the area is the Cerrado, characterized by vegetation with multiple physiognomies, including forest, savanna, and grassland formations. However, most of the original vegetation has been replaced by livestock farming and, more prominently, by agricultural areas.

The Serra das Galés in the Paraúna State Park is located within the Paraná Sedimentary Basin II, specifically in the Itararé Group, Aquidauana Formation (Figure 2), which is the only formation of this group present in the state of Goiás (CPRM, 2008). This formation exhibits significant facies variation, resulting from fluvial and lacustrine deposition, with evidence of glaciation. At its base, quartz pebbles and sandstone layers are found. Above this layer, medium to coarse-grained, friable sandstones predominate, occasionally containing feldspar. Overlying these, there are fine siltstones and mudstones, as well as red to greenish-grey shales.

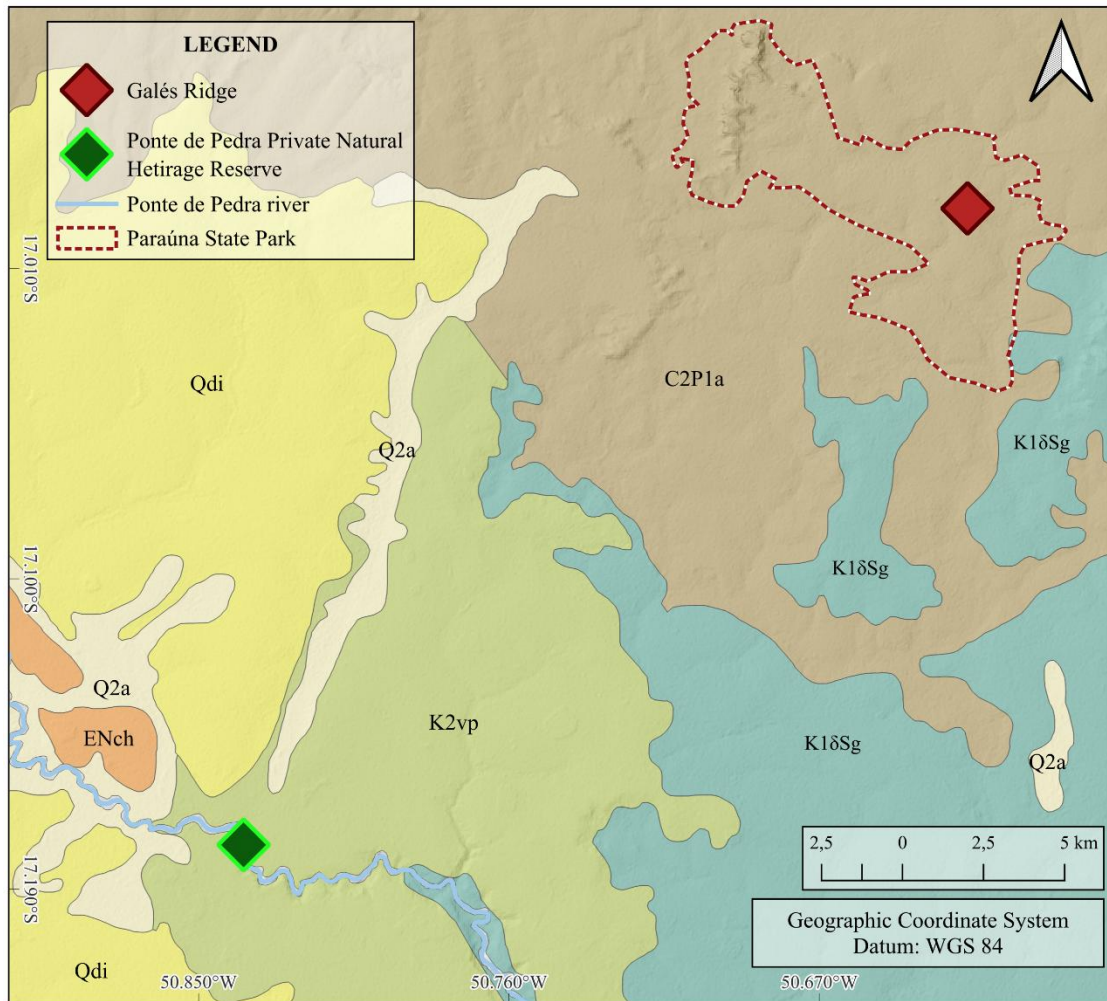
The Ponte de Pedra, a Natural Monument (a Natural Private Reserve), lies atop the Bauru Group, within the Vale do Rio do Peixe Formation (Figure 2). The Bauru Group consists of continental siliciclastic sediments deposited on the South American Platform during the sedimentation of the Paraná Basin in the Cretaceous period (135–65 Ma) (Stradioto et al., 2008). The Vale do Rio do Peixe Formation is composed of fine- to very fine-grained sandstones, with quartz crystals and occasional carbonate cementation (Fernandes, 1998). The soils within the state park are mostly dystrophic quartzarenic neosols (Moreira et al., 2024). At Ponte de Pedra, according to georeferenced data from the State Geoinformation System (SIEG, 2017), gleysols are found in the area surrounding the fluvial channel, which is regionally bordered by red latosols.

Figura 1 - A Location map of the geoheritage sites in the municipality of Paraúna in Goiás State; B: Serra das Galés geoheritage; C: Ponte de Pedra geoheritage.



Fonte: Autoria própria

Figura 2 - Lithological map of the Paraúna area; adapted from CPRM (2008).



GEOLOGICAL LEGEND

| | | SURFICIAL FORMATIONS | | PALEO-MESOZOIC BASINS | | | |
|-----------|------------|----------------------|--|-----------------------|--------------|---|--|
| CENOZOIC | QUATERNARY | 0,05 Ma | <p>Q2a Alluvial deposits: Sandy to sandy-clayey alluvium with gravel layers</p> <p>Qdi Undifferentiated detrital covers: Fine to coarse sandy-silty-clayey with conglomeratic levels</p> | MESOZOIC | CRETACEOUS | 135 - 65 Ma | <p>Bauru Basin Bauru Group</p> <p>K2vp Vale do Rio do Peixe Formation: Sandstone and siltstone; conglomeratic levels</p> |
| | PALEOGENE | 65,0 - 1,0 Ma | <p>Detrital-lateritic covers</p> <p>ENch Cachoeirinha Formation: Poorly sorted sand with lenticular gravel layers, partially lateritized siltstone and claystone</p> | JURASSIC/ TRIASSIC | 250 - 135 Ma | <p>Serra Geral Basin São Bento Group</p> <p>K1δSg Serra Geral Formation: Basaltic flow, rhyolite and andesite</p> | |
| PALEOZOIC | | | | CARBONIFEROUS | 355 - 295 Ma | <p>Paraná Basin II Itararé Group</p> <p>C2P1a Aquidauana Formation: Red sandstone, arkosic sandstone with silicified levels, siltstone, shale, red mudstone, rhytmite and lenticular conglomerate</p> | |

Fonte: autoria própria

The regional climate by the Köppen-Geiger classification (Alvares et al., 2014) is a sub-humid tropical, with two well-defined seasons: a rainy summer (October to April) and a dry winter (May to September). The average temperature of the hottest month is around 30°C, while that of the coldest months is approximately 18°C. The annual mean temperature is 22°C (Ferreira, Lima and Candeiro, 2020).

According to the geomorphological mapping of the state of Goiás (Latrubesse and Carvalho, 2006), the rocks of the Paraná Basin have undergone regional planation processes. As a result, the predominant landforms are regional planation surfaces associated with tabular reliefs. These processes have given rise to minimally dissected plateaus, with gentle slopes (3–8%) transitioning to moderate, rolling relief (8–20%). However, within the Paraúna State Park, areas of differential erosion occur, featuring silicified layers that give rise to ruiniform reliefs (CPRM, 2008).

The cavity that characterizes the Ponte de Pedra, according to Ferreira et al. (2020), originated from ancient underground drainage channels that were deactivated and now remain suspended above the current base level, where the Ponte de Pedra River flows. A skylight is also observed at the top of the gallery, which gradually expands over time.

4.1.3 Materials and methods

The study was carried out in five stages: (1) literature review; (2) regional analysis of the area using geoprocessing techniques; (3) field data collection; (4) laboratory analyses; and (5) data analysis in the office. Details and procedures for each stage are outlined below.

As the first stage, the research began with a theoretical review of topics related to karst geomorphology, including the characterization of traditional and non-traditional karst landforms, karst in sandstones and quartzites, fluviokarst, and ruiniform reliefs in karst environments (Cvijić, 1895; 2017; Bögli, 1980; Jennings, 1985; White, 1988; Wray, 1997; Piló, 2000; Ford and Williams, 2007; Willems et al., 2008; Klimchouk, 2015; Travassos, 2019; Hardt et al., 2022; De Waele and Gutiérrez, 2022). This stage was essential, as it provided the theoretical foundation to classify the regional karst landforms accurately.

For the second stage, geoprocessing and remote sensing tools were employed to analyze the regional geomorphology. Data on the geodiversity and geology of the state of Goiás, provided by the Brazilian Geological Survey, were used to identify lithological and slope-related aspects. Additionally, ALOS-PALSAR digital elevation model (DEM) imagery was used for topographic visualization. This enabled the creation of thematic maps of the study area.

The third stage involved fieldwork for data collection. This included: (a) identification and interpretation of the karst landforms developed in Paraúna; (b) aerial imaging of the Serra das Galés and the Ponte de Pedra River using a DJI Air2S drone (Model DJI-MVA200S-C1), equipped with a 1-inch CMOS sensor camera capable of recording videos in 5.4K resolution and capturing 20-megapixel photographs. The georeferenced orthophotos (GNSS: GPS + GLONASS + GALILEO), generated during the flights (authorized by DECEA under protocols

#46FA6E99 and #523AD5D9), resulted in images with dimensions of 6033 × 8000 and a resolution of 8.83 cm/pixel; (c) In total, nine samples were collected. Five of them were obtained from Serra das Galés, one from Pedra do Cálice, the geoform that symbolizes the park, and four from other nearby residual hills. The remaining four samples were collected at Ponte de Pedra and included: (1) PP01 - a flowstone speleothem, (2) PP02 - a paleo fluvial level, (3) PP03 - the cave floor, and (4) PP04 - a stalagmite.

The fourth stage was conducted at the Regional Centre for Technological Development (CRTI) of Goiás Federal University - Brazil. During this stage, the field-collected samples were crushed, and X-ray fluorescence analysis was performed to determine the chemical composition of the samples. Finally, in the fifth stage, data collected by aerial imaging were used to generate a digital terrain model (DTM) using the software CloudCompare and Agisoft Metashape. This approach enabled a more accurate office-based analysis, allowing detailed visualization of relief in areas with difficult access, as well as the production of larger-scale maps.

4.1.4 Results

4.1.4.1 Serra das Galés

According to the geological mapping of the state of Goiás (CPRM, 2008), the Serra das Galés lies within the Itararé Group, Aquidauana Formation, which is lithologically composed primarily of medium to coarse-grained sandstones, mostly feldspathic, with the presence of residual hills formed at silicified levels. Morphologically, it exhibits typical characteristics of ruiniform relief, marked by residual features sculpted into the rock. Among these, residual towers stand out with a morphology similar to karst towers, easily identifiable in the landscape both from the ground and by drone overflight (Figure 3A).

In addition to the towers, indentations developed along fracture zones between two rock blocks can be observed. These have elongated shapes with gently rounded bases, resembling degraded natural conduits (Figure 3B). Circular concavities that completely perforate the rock have also been recorded (Figure 3C). Another notable feature is the presence of paired concavities carved in symmetrical opposition, as seen in the case of Pedra do Cálice (Figure 3D), a symbolic landform of the Serra das Galés. Taken together, these concave features resemble ancient underground conduits that have been almost entirely degraded by erosion.

Figura 3 - Serra das Galés, in the Parque Estadual de Paraúna. (a) View of the ruiniform reliefs of Serra das Galés; (b) Elongated indentation with a rounded bottom between two massifs; (c) Circular cavity completely traversing the rock; (d) Double opposing concavities in the rock. Yellow lines highlight the boundaries of the features, and the empty spaces are filled with low-opacity yellow polygons.



Fonte: Autoria própria

Regarding the chemical analysis by X-ray fluorescence (XRF), all samples showed silicon (SiO_2) contents above 90%, ranging from 92.12% to 94.79% (Table 1). Aluminium oxide (Al_2O_3) contents ranged from 2.75% to 4.06%. Iron oxide (Fe_2O_3) values remained relatively constant, between 0.59% and 0.71%. Magnesium oxide (MgO) and calcium oxide (CaO) were below the limit of quantification in all samples and, therefore, not quantified. Loss on ignition (LOI) was low, with values below 1.2%. These results are consistent with the geological mapping of the state of Goiás, which identified medium to coarse-grained feldspathic sandstones in the area (CPRM, 2008).

Tabela 1. Major oxides by X-ray fluorescence (XRF) at Serra das Galés

| Oxides Analyzed (%) | SG 01 | SG 02 | SG 03 | SG 04 | SG 07 |
|--------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | 93,32 | 92,47 | 94,33 | 94,79 | 92,12 |
| Al ₂ O ₃ | 2,75 | 3,32 | 2,92 | 2,90 | 4,06 |
| FeO ₃ | 0,59 | 0,71 | 0,68 | 0,60 | 0,69 |
| MgO | < LQ ² | < LQ | < LQ | < LQ | < LQ |
| CaO | < LQ | < LQ | < LQ | < LQ | < LQ |
| LOI ¹ | 1,01 | 0,94 | 0,81 | 0,60 | 1,18 |
| Other oxides | 2,33 | 2,56 | 1,26 | 1,11 | 1,95 |

¹ Loss in Ignition; ² Below the quantifiable limit;

4.1.4.2 Ponte de Pedra

Geological mapping of Goiás (CPRM, 2008) indicates that the Ponte de Pedra is situated within the Vale do Rio do Peixe Formation, which is composed of sandstone layers interbedded with siltstone or mudstone, and may include carbonate cementation and lenses of clayey or carbonate intraclasts (Fernandes, 1998; Fernandes and Coimbra, 2000). Ponte de Pedra itself is characterized by a sinkhole and an upwelling feature (Figure 4A), separated by a decametric distance, as well as a skylight at the top of the landform (Figure 4B).

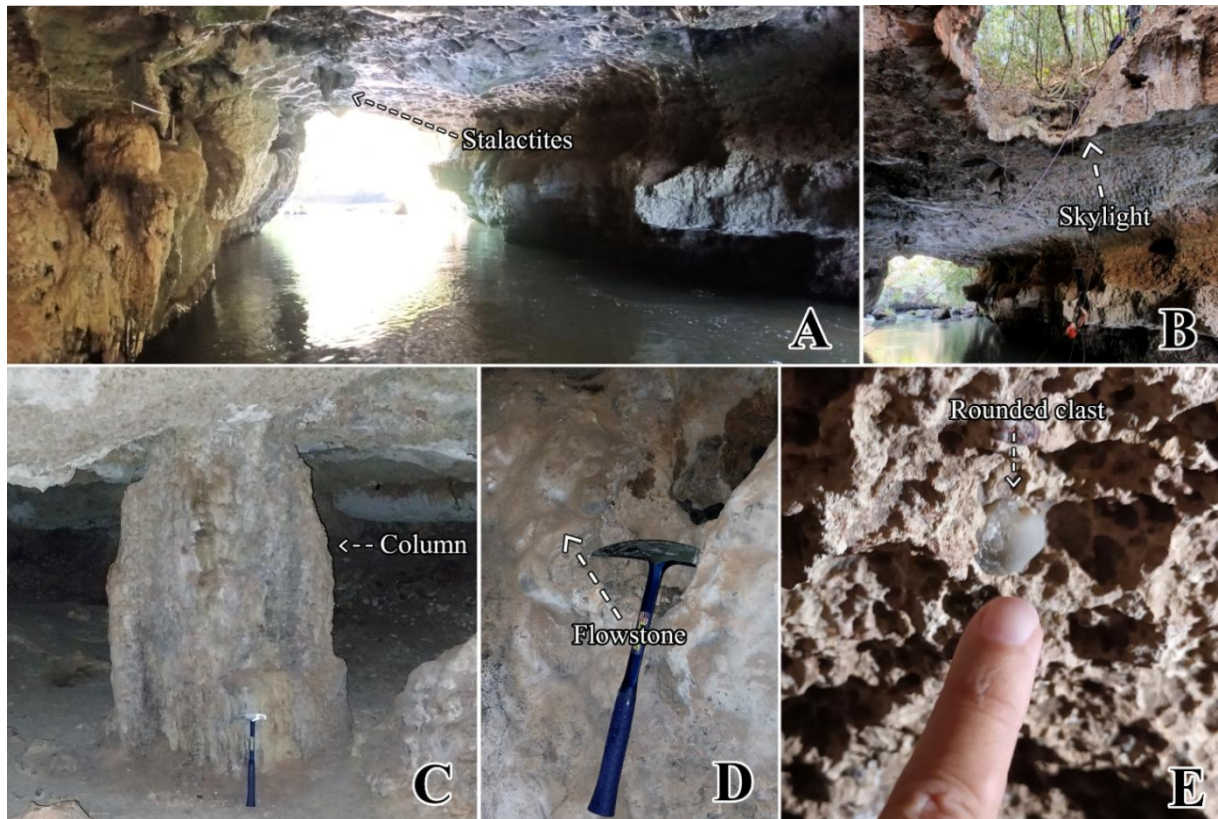
Inside the Ponte de Pedra cavity, flowstone speleothems (Figure 4D), along with stalactites, stalagmites, and columns (Figure 4C), were identified. Fluvial paleolevels are also present, evidenced by the occurrence of rounded pebbles at the bottom of the cavity (Figure 4E). In broader terms, Ponte de Pedra can be described as a small cave-like cavity traversed by a stream, regionally entrenched within a canyon.

Drone imaging revealed several sections of collapsed blocks along the Ponte de Pedra River as it flows through its canyon (Figure 5). These blocks are angular, exhibit minimal to no rounding, and vary in size. Given the lack of rounding typically associated with fluvial transport, it is reasonable to infer that these blocks likely originated from the collapse of the roofs of former cave extensions along the canyon. Notably, little to no vegetation cover is observed on the blocks, and there is no visible evidence of fluvial transport.

The results of chemical analyses performed by X-ray fluorescence (XRF) on the four samples from Ponte de Pedra indicate significant variations in chemical composition (Table 2). Calcium oxide (CaO) is predominant in samples PP 01 (flowstone; 41.54%) and PP 04 (stalagmite; 50.98%), substantial in PP 03 (cave floor; 29.10%), and less pronounced in PP 02 (paleofluvial level; 17.06%). Silicon dioxide (SiO₂) shows the highest value in PP 02 (51.89%) and the lowest in PP 04 (2.61%). Loss on ignition (LOI) yielded high values, with a maximum

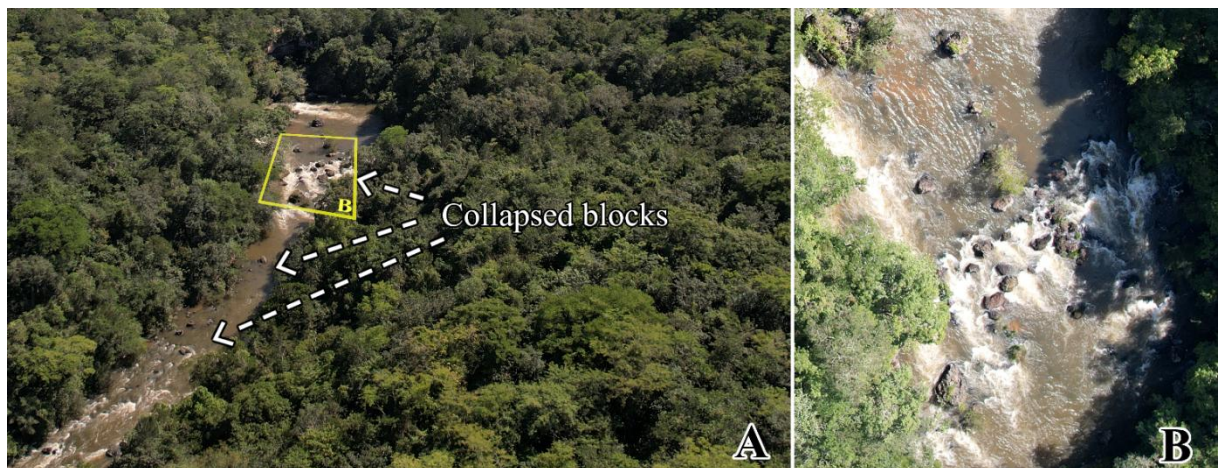
in PP 04 (43.65%) and a minimum in PP 02 (19.89%). Magnesium oxide (MgO) contents are relatively consistent across the samples, ranging from 2.89% to 5.89%. Aluminium oxide (Al_2O_3) and iron oxide (Fe_2O_3) are present in lower concentrations, with PP 02 exhibiting the highest values for both: 2.53% and 2.04%, respectively. These values are consistent with the geological mapping of the area, as the elevated CaO levels appear to be related to the carbonate cementation identified in local sandstones (Fernandes, 1998; Fernandes and Coimbra, 2000).

Figura 4 - Ponte de Pedra: (a) Internal view of the cave exit, with the presence of stalactites on the ceiling; (b) Skylight at the top of the cavity; (c) Column-type speleothem; (d) Flowstone speleothem; (e) Rounded pebble present in a fluvial paleolevel.



Fonte: Aatoria propria

Figura 5 - (a) Collapsed blocks along the course of the Ponte de Pedra River; (b) close-up view of the fallen blocks.



Fonte: Aatoria própria

Tabela 2. Major oxides by X-ray fluorescence (XRF) at Serra das Galés

| Oxides Analyzed (%) | SG 01 | SG 02 | SG 03 | SG 04 | SG 07 |
|--------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------------------|
| SiO ₂ | 15,94 | 51,89 | 34,19 | 2,61 | 15,94 |
| Al ₂ O ₃ | 0,54 | 2,53 | 0,97 | 0,16 | 0,54 |
| FeO ₃ | 0,37 | 2,04 | 0,72 | 0,11 | 0,37 |
| MgO | 4,91 | 5,05 | 5,89 | 2,89 | 4,91 |
| CaO | 41,54 | 17,06 | 29,10 | 50,98 | 41,54 |
| LOI ¹ | 36,97 | 19,89 | 28,39 | 43,65 | 36,97 |
| Other oxides | < LQ ² | 1,54 | 0,74 | < LQ | < LQ ² |

¹ Loss in Ignition; ² Below the quantifiable limit;

4.1.5 Discussion

4.1.5.1 Serra das Galés

Serra das Galés is part of the Itararé Group, and our sample analyses indicate that the rocks from this unit are predominantly quartz sandstones, with scarce carbonate minerals (Table 1). In this context, the features observed in the Serra das Galés may be associated with non-traditional karst processes developed in siliciclastic rocks. Hardt et al. (2022) report significant occurrences of sandstone karst in Brazil, highlighting Vila Velha State Park in Ponta Grossa, Paraná, as a case particularly similar to Serra das Galés. As in Serra das Galés, the Ponta Grossa sandstone exhibits lithological homogeneity and exokarst features characteristic of ruiniform relief.

According to Pontes et al. (2022), the origin of these landforms is related to a non-traditional karst initially formed by small underground conduits, which were later modified by mechanical processes and surface dissolution. Silva and Maia (2024) emphasize that the development of karst in sandstone is associated with two fundamental processes: (1) intragranular dissolution of the cementing material, a process known as arenization (Martini, 1979; Wray and Sauro, 2017); and (2) mechanical collapse of the altered grains through the piping process (Martini, 1979; Galán, 1991).

Given the absence of carbonates in the Serra das Galés (Table 1), the sandstone formation process offers the most plausible explanation for the morphogenesis of its ruiniform relief. In this context, the high silica homogeneity and the absence of calcium and magnesium oxides (Table 1) limit classical dissolution processes, while favouring sandstone arenization followed by mechanical grain collapse through piping. This collapse was more intense in the less cemented portions of the sandstone—typically cemented by iron oxides—but did not affect

the entire rock mass, thereby preserving sections of sandstone above the surface in the form of 'ruins,' which characterizes the ruiniform aspect of the landscape.

4.1.5.2 Ponte de Pedra

In Ponte de Pedra a traditional karst system can be observed, in which the local geological map (CPRM, 2008) and laboratory analysis (Table 2) confirm the presence of carbonate layers interbedded with sandstone facies. The development of caves began through dissolution within these layers. As the calcium content decreased in the subsequent strata, water flow began to act predominantly through mechanical processes, widening the conduits and later connecting to new carbonate layers, which favors the progressive expansion of the cavities. This evolutionary pattern is similar to that described by Rodet, Willems, and Pouclet (2015) in the fluviokarst of Peruaçu, in Minas Gerais, Brazil. This formation process demonstrates a polyphasic evolution, which may occur over extended geological time scales (White, 2009). The concentrated hydrological recharge observed at Ponte de Pedra corresponds to the studies by Souza, Salgado, and Auler (2019), which highlight the importance of the origin and volume of infiltrating water in the pace of karstification.

Breitenbach et al. (2010) describe that caves in sandstone tend to develop preferentially along zones of weakness and structural faults, directly aligning with the case observed at Ponte de Pedra, where carbonate layers function as zones of weakness concerning dissolution processes. The presence of speleothems reinforces the role of calcite layers as conduits for the dissolution process, in which pressurized water beneath silicified layers can dissolve underlying carbonate units, resulting in structural collapse and the formation of conduits, with subsequent roof collapse in the caves (Orndorff, Weary, and Harrison, 2006). The settling of blocks on the bed of the Ponte de Pedra River appears to represent this stage of instability.

In the effort to understand the landform evolution of the Chapada das Mesas (Maranhão and Tocantins states), Martins et al. (2017) proposed a similar hypothesis: there is a predominantly subsurface drainage system, in which the karstification process at more advanced stages leads to the collapse of cave roofs, exposing canyons and waterfalls. The similarity between Ponte de Pedra and the features of Chapada das Mesas highlights the recurrence of geomorphological patterns associated with karstification in sandstone, even when occurring in distinct depositional contexts.

This example of morphogenesis reveals an intermediate conceptual zone in which traditional karst classification categories become insufficient. In this sense, understanding the karstification process as a spectrum, rather than a binary phenomenon, may be essential to

incorporate the complexity of systems developed in lithologies of varying solubility, such as sandstone with occurrences of carbonate lenses or cementation.

This interpretation reinforces the importance of lithological variability in shaping karst evolution in sandstone environments. Considering these contrasting cases, we now turn to a broader conceptual discussion on the adequacy of current karst classifications and their applicability to mixed lithological contexts.

4.1.5.3 Traditional or Non-Traditional Karst: Rethinking Conceptual Boundaries

The diversity of morphogenetic processes observed in Serra das Galés and Ponte de Pedra raises important questions regarding the current classification of karst. The current prevailing view is that the concept of karst extends beyond carbonate rocks. In this revised framework, if the morphological features are typical and chemical dissolution played a significant role in their genesis—even if not the dominant one—the system may already be characterized as karst (Bento, Travassos, and Rodrigues, 2015). Thus, karst can be understood as a hydrogeological system whose morphogenesis is associated with porosity and permeability in soluble rocks, not limited to carbonates. This new karst paradigm prioritizes speleogenetic processes over lithology as the defining criterion (Klimchouk, 2015). Nevertheless, due to the higher solubility of carbonate rocks, karst is subdivided into two categories: traditional—primarily associated with carbonates—and non-traditional, which includes siliciclastic rocks such as sandstone. This perspective is essential for classifying Ponte de Pedra as a karst-related area that falls outside the classical definitions of traditional and non-traditional karst.

When comparing the ruiniform relief of Serra das Galés with the fluviokarst of Ponte de Pedra, distinct morphogenetic processes are observed, ranging from karst initiated by dissolution but sustained by mechanical processes, to karst directly driven by carbonate dissolution. While Serra das Galés can be classified as a case of non-traditional karst, Ponte de Pedra exhibits intermediate characteristics, lying within a transitional zone between traditional and non-traditional karst. Its morphogenesis involved both carbonate dissolution and mechanical erosion, as cavity development could proceed only through sandblasting and/or classical erosive processes once the carbonate lenses were depleted.

Therefore, the distinction between traditional karst—commonly associated with carbonate rocks such as limestone and dolomite—and non-traditional karst—developed in non-carbonate rocks—proves insufficient in light of the empirical evidence recorded in this study. The Ponte de Pedra Private Natural Reserve (RPPN) exemplifies features typically associated with traditional fluviokarst, such as caves and speleothems. Yet, it formed in sandstone with

localized carbonate lenses interbedded between its layers. While some of its features contain significant amounts of calcium oxide, others are largely dominated by silicon (Table 2). From an epistemological standpoint, these results reinforce the need to move beyond the dichotomy between traditional and non-traditional karst. In nature, as illustrated by the case of Ponte de Pedra, processes are often too complex to be fully captured by rigid classification schemes. Therefore, new conceptual approaches are needed—ones that acknowledge the complexity of karst system morphogenesis.

4.1.6 Conclusion

The results of this study contribute to a deeper understanding of the conceptual boundaries between traditional and non-traditional karst, demonstrating that karst systems in sandstone can originate from a typical sandblasting process—as observed in Serra das Galés—but may also have a genesis associated with carbonate dissolution combined with sandblasting and mechanical erosion, as in the Ponte de Pedra. In Serra das Galés, although the high degree of degradation of certain landforms makes it difficult to confirm their origin, their geometry and chemical composition directly suggest a morphogenesis linked to intragranular dissolution and successive collapse. In contrast, at Ponte de Pedra, the presence of caves, speleothems, and evidence of chemical dissolution in carbonate lenses interbedded within sandstone reveals landforms characteristic of traditional karst, albeit developed in siliciclastic rocks.

This condition challenges the binary classification between traditional and non-traditional karst, prompting epistemological reflections on classical karst concepts. The study highlights the need to reconsider the dichotomy of karst categories and to adopt a more integrative framework capable of recognizing transitional forms in complex lithological settings. Such an approach may be particularly relevant for geomorphological mapping, geoheritage inventories, and the environmental management of karst terrains developed in mixed or atypical substrates.

In this context, future studies could benefit from applying this interpretative model to other sandstone karst systems in Brazil and globally, contributing to a refined understanding of karstification as a spectrum rather than a fixed typology.

4.2 Geodiversidade em carste: excepcionalidades em Paraúna, Goiás, Brasil

Resumo

Geopatrimônio compreende sítios, geoformas e paisagens de valor científico, educativo, turístico e cultural, cuja adequada valoração é fundamental para orientar ações de geoconservação. Em Paraúna (GO), destacam-se dois geopatrímônios cársticos não tradicionais, desenvolvidos em arenitos siliciclásticos: a Serra das Galés e a Ponte de Pedra. Este artigo tem como objetivo comparar o valor científico desses geopatrímônios e avaliar criticamente a aplicação da ficha de valoração proposta por Moura-Fé (2024) ao contexto de geopatrímônios brasileiros, propondo ajustes metodológicos quando necessário. A pesquisa envolveu revisão bibliográfica, trabalhos de campo, registro e mapeamento de geoformas, amostragem de materiais e análises mineralógicas por difração de raios X, além da aplicação da ficha original e de uma versão adaptada aos dois geopatrímônios. Os resultados indicam que a ficha original tende a supervalorizar critérios institucionais e de reconhecimento formal, favorecendo o geossítio da Serra das Galés, enquanto subestima a raridade geomorfológica e a complexidade interna da Ponte de Pedra. A ficha revisada, com maior ênfase em critérios intrínsecos (representatividade, raridade e diversidade de formas), produziu uma hierarquização mais coerente com as características excepcionais da Ponte de Pedra. Conclui-se que a metodologia reformulada contribui para aperfeiçoar a valoração científica de geopatrímônios cársticos não tradicionais, oferecendo subsídios para inventários, diagnósticos e estratégias de geoconservação em escala regional

Palavras-chave: Geopatrimônio; Patrimônio Geomorfológico; Fluviocarste; Arenito.

4.2.1 Introdução

O estudo dos geopatrímônios é frequentemente estruturado a partir da tríade geodiversidade, geoconservação e geoturismo, entendidos como elementos interdependentes que orientam tanto a identificação e a valorização quanto a preservação e o uso sustentável dos recursos naturais (Nascimento, Ruchkys e Mantesso-Neto, 2008). A geoconservação, por sua vez, busca garantir a proteção e o manejo adequados desse patrimônio (Sharples, 2002). Já o geoturismo atua como ferramenta de divulgação e valorização, ofertando experiências, recursos e serviços que evidenciam os valores e benefícios dos geopatrímônios e contribuem para a educação ambiental e o desenvolvimento local (Hose, 2000).

O patrimônio geomorfológico, uma das categorias do geopatrímônio, refere-se ao reconhecimento de geoformas como locais de interesse, estabelecido a partir de comparações

qualitativas e quantitativas quanto à sua relevância e à sua beleza cênica (Pereira; Pereira; Alves, 2007). Trata-se do conjunto de sítios geomorfológicos, por vezes referidos como geomorfossítios (Reynard, 2004), que podem estar associados predominantemente ao valor científico das formas e dos processos que registram e permitem compreender a história da Terra (Grandgirard, 1999; Mazzucato et al., 2024). Geossítio, por sua vez, é definido como a ocorrência de um ou mais elementos da geodiversidade dotados de valor singular (Brilha, 2005), constituindo, em geral, uma unidade menor de um geopatrimônio.

O conceito de geopatrimônio e de patrimônio geomorfológico também pode ser empregado para identificar paisagens cársticas que reúnem diferentes categorias do patrimônio natural e cultural em uma mesma área (Lobo; Boggiani, 2013; Timo; Travassos, 2022). Carste é um tipo de relevo caracterizado por geoformas resultantes de processos de dissolução associados a sistemas hídricos subterrâneos (Piló, 2000; Ford; Williams, 2007; Timo; Travassos, 2022). Embora seja comumente associado a rochas carbonáticas, em razão da alta suscetibilidade dessas rochas às reações químicas com a água, o carste também ocorre em outras litologias (Klimchouk, 2015; Travassos, 2019), como evaporitos (halita, gipsita e anidrita; Lowe, 1992) e silicatos – arenito e quartzito (Wray, 1997; Andreychouk et al., 2009; Travassos, 2019). Neste segundo caso, o carste é classificado como não tradicional.

De fato, os processos geomorfológicos no carste dão origem a paisagens cujo relevo apresenta múltiplos valores – estético, turístico, cultural, didático e científico (Gray, 2004; Brilha, 2005; Oliveira; Rodrigues, 2014). Conforme Hamilton-Smith (2007), podem ser reconhecidas, no âmbito do geopatrimônio cárstico, as seguintes categorias de valor: (1) valor estético e cênico; (2) biodiversidade; (3) história geoambiental; (4) composição e química mineral; e (5) história cultural. Nesse contexto, elementos como águas cristalinas, cavernas, pontes e arcos rochosos frequentemente são alvo de forte valorização turística devido à sua beleza cênica (Lobo et al., 2007).

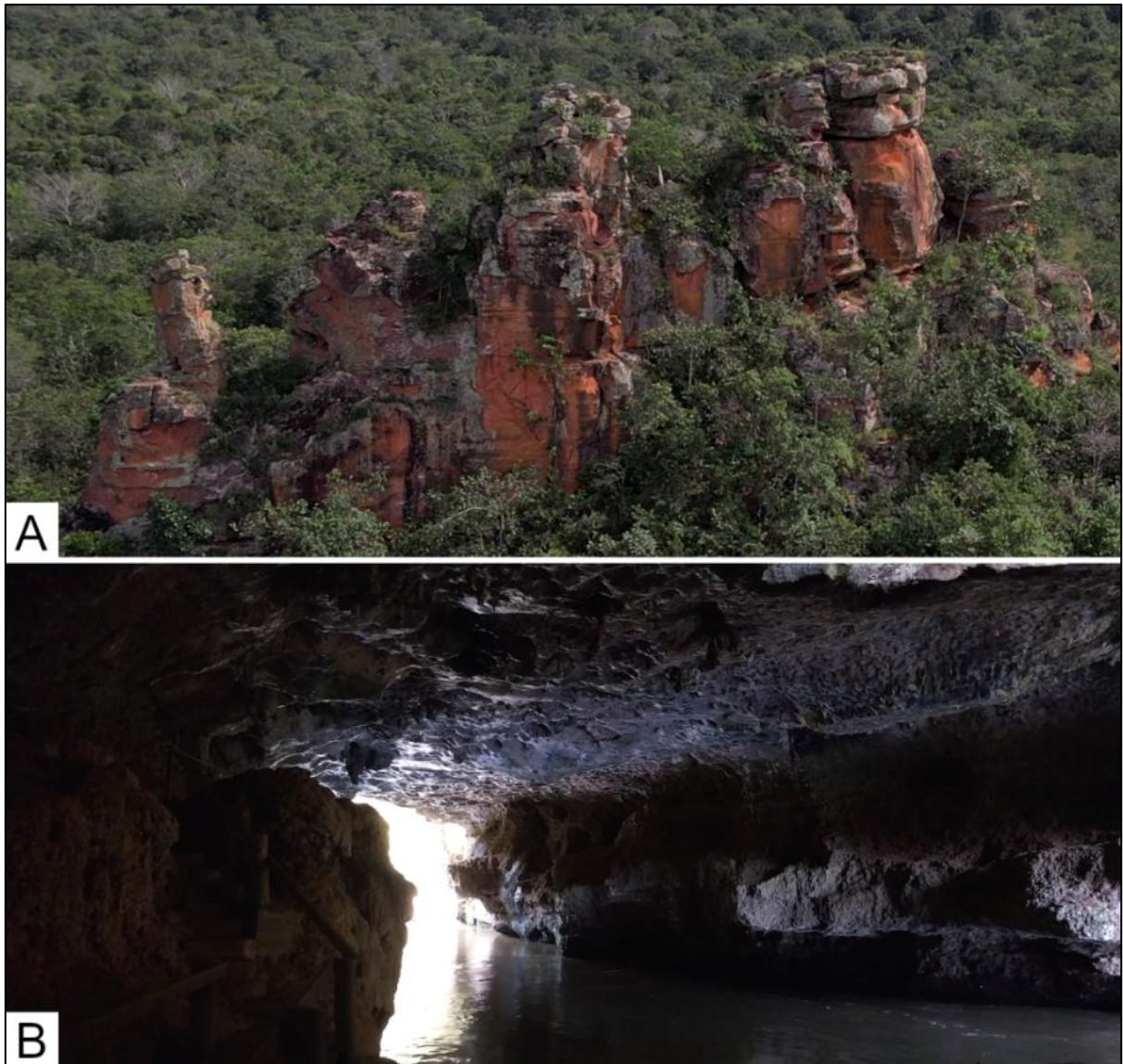
O valor científico está associado à relevância dos elementos da geodiversidade para o avanço do conhecimento, sobretudo na compreensão das relações entre os geossistemas (Lima, 2008; Pereira, 2010; Brilha, 2016). Esses elementos devem ser conservados pelo que representam, independentemente do uso científico imediato que possam ter (Moura-Fé, 2024). Em Paraúna (GO) destacam-se geopatrimônios cársticos não tradicionais que desempenham papel central na identidade local. O primeiro deles é constituído pelas geoformas ruiformes da Serra das Galés, situadas no Parque Estadual de Paraúna (Figura 1A). Soma-se a essa área a RPPN Ponte de Pedra, um fluvio-carste atrativo pela beleza cênica e pela importância turística (Figura 1B). Ambos os geopatrimônios apresentam evidências de processos cársticos

semelhantes, embora distintos entre si e, apesar de estarem localizados a apenas 50 km de distância, representam formas cársticas contrastantes. Enquanto a Serra das Galés é composta por um conjunto de torres cársticas, a Ponte de Pedra caracteriza-se como um fluviocarste arenítico típico do carste não tradicional, com a presença inclusive de espeleotemas.

No Brasil, avaliações de áreas geológicas frequentemente utilizam fichas de valoração quantitativa concebidas para geossítios pontuais, o que pode gerar distorções quando aplicadas a geopatrimônios amplos, raros e internamente complexos. Diante disso, este artigo tem como objetivo comparar o valor científico de dois geopatrimônios cársticos não tradicionais em arenito – Serra das Galés e Ponte de Pedra – em Paraúna (GO), bem como avaliar criticamente a aplicação da ficha de Moura-Fé (2024) a esse contexto, propondo ajustes metodológicos mais compatíveis com os geopatrimônios brasileiros.

Parte-se da hipótese de que a ficha original tende a subestimar geopatrimônios que combinam raridade geomorfológica, diversidade de geoformas e evidências de carste não tradicional em arenito, ao atribuir peso relativamente maior a critérios institucionais e de reconhecimento formal. Espera-se que a revisão dos pesos e descritores permita expressar de forma mais fiel a singularidade científica desses geopatrimônios.

Figura 6 - Geopatrimônios em Paraúna/GO. A: Visão parcial dos relevos ruiformes da Serra das Galés; B: Visão parcial do interior da Ponte de Pedra.



Fonte: autoria própria

4.2.2 Área de estudo

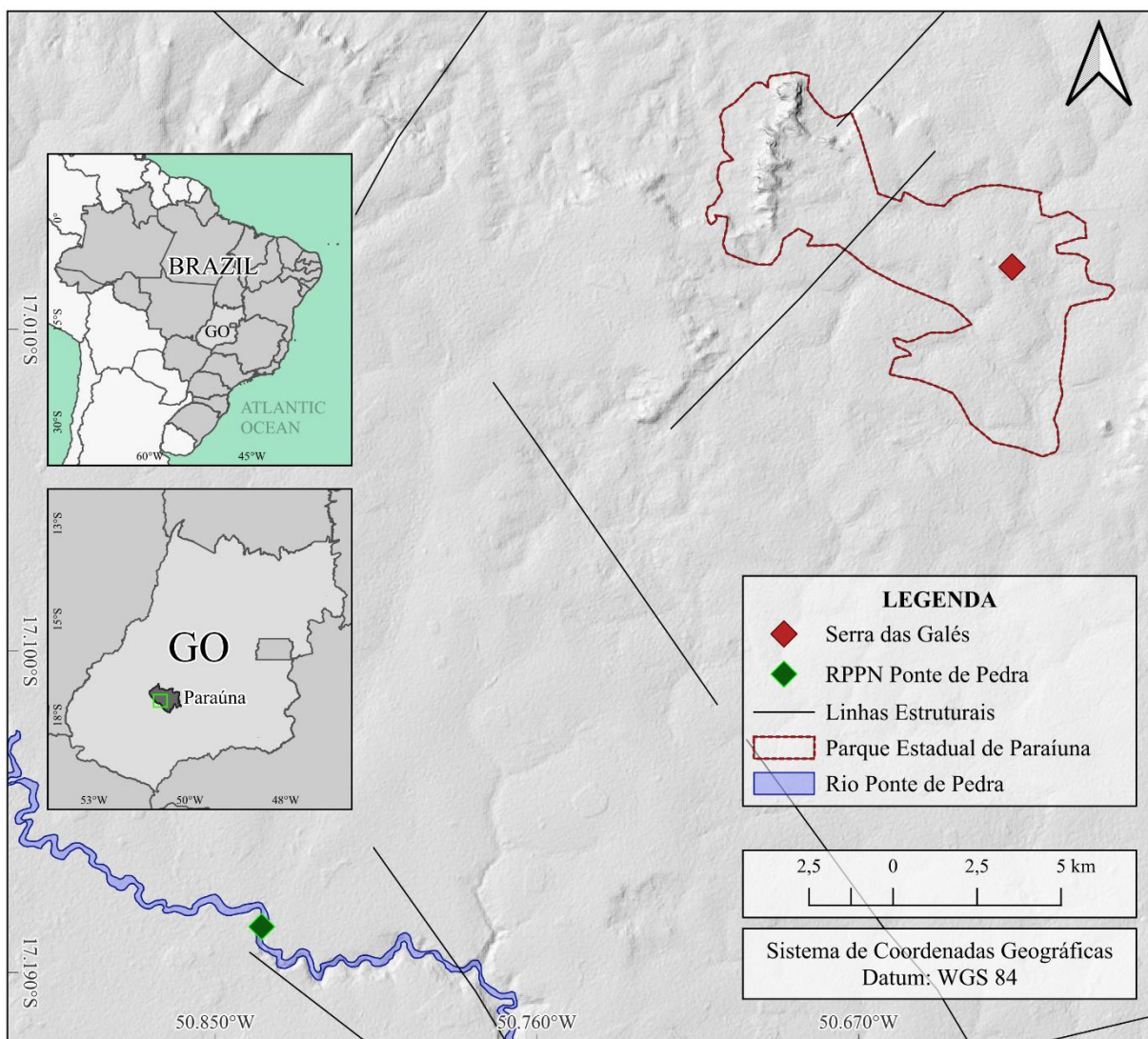
A área de estudo compreende dois geopatrimônios de relevância localizados em Paraúna/GO, na mesorregião Sul Goiano, Brasil (Figura 2). O primeiro deles refere-se as geoformas ruiformes da Serra das Galés, no Parque Estadual de Paraúna (Figura 1A) e o segundo localiza-se no Rio Ponte de Pedra que atravessa duas cavidades naturais, formando “pontes de pedra” (Figura 1B).

De acordo com a classificação de Köppen-Geiger (Alvares et al., 2014), Paraúna/GO apresenta clima tropical sub-úmido. Duas estações definidas, sendo o verão chuvoso e inverno seco. A temperatura média do mês mais quente alcança os 30°C, enquanto nos meses mais frios

pode cair para os 18°C, com média anual de 22°C (Ferreira, Lima e Candeiro, 2020). O bioma predominante da área é o Cerrado, caracterizado por uma vegetação de múltiplas fisionomias, dentre formações florestais, savânicas e campestres. Contudo, a vegetação original da área já foi quase completamente substituída por lavoura comercial de soja, milho e cana-de-açúcar.

De acordo com Moreira *et al.* (2024), os solos que incidem no interior do parque estadual são, grande parte, neossolos quartzarênicos distróficos e ao nordeste e norte, nas vertentes das escarpas mais íngremes, incidem-se cambissolos hálicos. Na Ponte de Pedra, segundo /dados georreferenciados pelo Sistema Estadual de Geoinformação (SIEG), encontram-se gleissolos na área em torno do leito do rio, circundada por latossolos vermelhos (GOIÁS, [s.d.]).

Figura 7 - Mapa de localização dos geopatrimônios em Paraúna



Fonte: autoria própria

O Parque Estadual de Paraúna está situado sobre a Formação Aquidauana, do Grupo Itararé, na Bacia do Paraná, caracterizada por grande variação faciológica com depósitos fluviais, lacustres e evidências de glaciação.(CPRM, 2008). Inclui seixos de quartzo, arenitos, siltitos, argilitos e folhelhos. Já o Monumento Natural Ponte de Pedra, encontra-se sobre a Formação Vale do Rio do Peixe do Grupo Bauru, composta por arenitos finos a muito finos com cristais de quartzo e desenvolvimento local de lentes carbonáticas, depositados na Bacia do Paraná durante o Cretáceo (Fernandes, 1992; CPRM, 2008). Conforme o mapeamento geomorfológico do estado de Goiás realizado por Latrubesse e Carvalho (2006), as rochas da Bacia do Paraná foram submetidas a processos de aplainamento regional. Como resultado, as unidades predominantes são superfícies regionais de aplainamento, associadas a relevos tabulares.

Neste contexto ambiental, o Parque Estadual de Paraúna, criado em 2002, abriga a Serra das Galés, que se trata de um conjunto de pináculos e torres ruiformes desenvolvidas em arenito (Figura 3). O geossítio mais representativo da Serra das Galés é a própria Pedra do Cálice (Figura 3A), adotada como um símbolo cultural da cidade de Paraúna. Há outros exemplos que evocam figuras reconhecíveis por pareidolia, como a Pedra da Tartaruga (Figura 3B).

Figura 8 - Exemplos de geossítios presentes na Serra das Galés. A: Pedra do Cálice; B: Pedra da Tartaruga



Fonte: autoria própria

Já a RPPN Ponte de Pedra, situada a 50km da Serra das Galés, apresenta geoformas distintas dos relevos ruiformes. Trata-se de um fluviocarste encaixado dentro da superfície aplainada, onde duas cavernas formam pontes naturais atravessadas pelo rio homônimo. Destaca-se na caverna mais turística uma claraboia (Figura 4).

Figura 9 - Claraboia no topo da Ponte de Pedra



Fonte: autoria própria

4.2.3 Metodologia

Com o objetivo de verificar se as fichas de avaliação quantitativa dos valores científicos propostas por Moura-Fé (2024) são efetivamente adequadas à realidade do geopatrimônio existente no território brasileiro, o presente trabalho foi estruturado em quatro etapas: (1) revisão bibliográfica; (2) trabalho de campo; (3) análise mineralógica para reconhecimento detalhado do substrato geológico das áreas de estudo; e (4) inventariação científica dos valores do geopatrimônio.

Na primeira etapa, realizou-se uma revisão bibliográfica em livros, artigos científicos, teses, dissertações e monografias sobre geopatrimônios cársticos no Brasil e no mundo. A priori, foram pesquisados os conceitos de carste, carste não tradicional, carste em arenitos e quartzitos, relevos ruiformes e fluviocarste. Além disso, incorporaram-se à revisão temas relativos à geodiversidade, à geoconservação e aos geopatrimônios, com ênfase no patrimônio geomorfológico e no geopatrimônio em ambientes cársticos. Também foram selecionados trabalhos que abordam a morfogênese e a relevância da geodiversidade de geopatrimônios similares às formas encontradas na Serra das Galés e na Ponte de Pedra. Essa etapa buscou

estabelecer referenciais comparativos para a análise dos geopatrimônios identificados em Paraúna (GO), de modo a contextualizar sua excepcionalidade diante de outros geossítios reconhecidos pela literatura especializada e, assim, avaliar subjetivamente seus valores geopatrimoniais.

A segunda etapa consistiu no trabalho de campo, que incluiu o reconhecimento da área, o sobrevoo com drone, o registro fotográfico dos geossítios e das geoformas cársticas, bem como a coleta de amostras para posterior análise mineralógica. Na Serra das Galés foram coletadas sete amostras de forma aleatória, sendo uma na base da Pedra do Cálice e as outras seis em morros residuais do entorno. As amostras foram identificadas pelo prefixo SG-, seguido da numeração correspondente à ordem de coleta. Na Ponte de Pedra, na caverna mais turística, foram coletadas quatro amostras, na seguinte ordem: em um espeleotema do tipo escorrimento (PP 01); na parede, em um paleonível de dissolução (PP 02); no piso (PP 03); e em um espeleotema do tipo estalagmite (PP 04).

Na terceira etapa, procedeu-se à análise mineralógica das amostras coletadas nos geopatrimônios estudados. Das sete amostras coletadas na Serra das Galés, cinco foram selecionadas para análise, enquanto, na Ponte de Pedra, foram analisadas as quatro amostras coletadas. As análises foram realizadas por difração de raios X (DRX), em parceria com o Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico (CRTI) da Universidade Federal de Goiás. Separou-se uma alíquota de aproximadamente 5 gramas, seca em estufa a 105 °C por 12 horas e destinada à determinação de perda ao fogo (LOI) ou ganho ao fogo (GOI). As medidas foram feitas em um difratômetro Bruker D8 Discover, utilizando radiação monocromática de um tubo com ânodo de cobre acoplado a um monocromador Johansson para $K\alpha_1$, operando a 40 kV e 40 mA, em configuração Bragg–Brentano θ – 2θ , com detector unidimensional Lynxeye, intervalo de 2θ de 3° a 100° e passo de 0,01°. As amostras foram mantidas em rotação de 15 rpm durante a medida. Esse procedimento permitiu identificar as fases cristalinas presentes, possibilitando interpretar a mineralogia das rochas que compõem esses geopatrimônios e identificar anomalias no mapeamento geológico.

Na quarta etapa realizou-se a inventariação dos geopatrimônios estudados a partir da aplicação da ficha de avaliação quantitativa do Valor Científico (VCi), proposta por Moura-Fé (2024), uma adaptação para a realidade nacional das metodologias de Sellier (2010), Reynard et al (2016) e Brilha (2016). Embora originalmente desenvolvida para geossítios, a ficha foi aqui aplicada de modo experimental aos geopatrimônios, buscando avaliar sua resposta quando utilizada em unidades de maior extensão e complexidade interna. A aplicação ocorreu inicialmente em gabinete e foi posteriormente revisada em campo, garantindo que os critérios

e pontuações refletissem adequadamente observações in loco. O resultado gerou uma pontuação ponderada, utilizada para hierarquizar os geopatrimônios analisados e assim subsidiar a avaliação de sua raridade, excepcionalidade e relevância científica.

A ficha utilizada (Quadro 1) avalia os seguintes critérios: (A) Representatividade; (B) Localidade-chave; (C) Conhecimento científico; (D) Integridade; (E) Diversidade geomorfológica; (F) Raridade e (G) Limitações de uso. Cada critério recebe pontuação de 0 a 4 e possui peso específico, cuja soma totaliza 100%.

Na sua formulação original, a ficha foi concebida para a avaliação de geossítios pontuais, em escala local, enfatizando sobretudo aspectos como grau de conhecimento científico consolidado, institucionalização, acessibilidade e existência de instrumentos formais de proteção. Essa configuração é adequada para geossítios clássicos, mas pode não capturar plenamente a complexidade interna, a raridade geomorfológica e a diversidade de geofomas quando o objeto de análise é um geopatrimônio entendido como conjunto espacialmente articulado de feições.

Quadro 1 – Ficha de avaliação quantitativa do valor científico (VCi)

| Identificação do Geomorfossítio | | |
|---|--|-------------------|
| Nome: | | |
| Código: | | |
| Crítérios | Parâmetros | |
| Representatividade | Capacidade de um geomorfossítio em ilustrar elementos ou processos geomorfológicos das unidades de relevo e contextos geomorfológicos associados | |
| Localidade-chave | Importância de um geomorfossítio como referência ou modelo para a geomorfologia. | |
| Conhecimento científico | A existência de estudos científicos publicados sobre o geomorfossítio traduz o VCI atribuído pela comunidade geocientífica. | |
| Integridade | Relacionada com o estado de conservação dos principais elementos geomorfológicos; quanto melhor a integridade, maior o VCI. | |
| Diversidade Geomorfológica | Um número maior de diferentes elementos geomorfológicos com interesse científico num geomorfossítio implica em um VCI superior. | |
| Raridade | Um pequeno número de geomorfossítios semelhantes na área de estudo aumenta o VCI. Quanto mais raro, maior o VCI. | |
| Limitações de uso | A existência de obstáculos que possam ser problemáticos para o uso científico regular do geomorfossítio tem impactos no VCI | |
| Crítérios / Indicadores | | Parâmetros |
| A - REPRESENTATIVIDADE | | |
| O geomorfossítio é o melhor exemplo na área de estudo para ilustrar formas ou processos. | | [] 4 pontos |
| O geomorfossítio é um bom exemplo na área de estudo para ilustrar formas ou processos | | [] 2 pontos |
| O geomorfossítio ilustra razoavelmente elementos ou processos na área de estudo | | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores | | [] 0 ponto |
| B – LOCALIDADE-CHAVE | | |
| O geomorfossítio faz parte de um Geoparque Mundial da UNESCO (UGGp - UNESCO Global Geoparks) e/ou é um sítio cadastrado no grupo de trabalho de geomorfossítios da IAG - International Association of Geomorphologists. | | [] 4 pontos |
| O geomorfossítio é utilizado pela ciência internacional. | | [] 2 pontos |

| | | | |
|--|--------------|----------------------|--------------|
| O geomorfossítio é utilizado pela ciência nacional e/ou está cadastrado no Geossit (Cadastro de sítios geológicos do Serviço Geológico do Brasil - SBG), na temática geomorfológica. | [] 1 ponto | | |
| Não se aplica nenhum dos indicadores | [] 0 ponto | | |
| C – CONHECIMENTO CIENTÍFICO | | | |
| Existem artigos em revistas científicas internacionais sobre este geomorfossítio. | [] 4 pontos | | |
| Existem artigos em revistas científicas nacionais sobre este geomorfossítio. | [] 2 pontos | | |
| Existem resumos apresentados em eventos científicos internacionais sobre este geomorfossítio. | [] 1 ponto | | |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto | | |
| D – INTEGRIDADE | | | |
| Os principais elementos geomorfológicos encontram-se muito bem conservados . | [] 4 pontos | | |
| Geomorfossítio não tão bem preservado, mas os principais elementos geomorfológicos ainda estão conservados . | [] 2 pontos | | |
| Geomorfossítio com problemas de conservação e com os principais elementos geomorfológicos bastante alterados ou modificados . | [] 1 ponto | | |
| Não se aplica nenhum dos indicadores | [] 0 ponto | | |
| E – DIVERSIDADE GEOMORFOLÓGICA | | | |
| Geomorfossítio com mais de 3 tipos de formas geomorfológicas distintas com relevância científica | [] 4 pontos | | |
| Geomorfossítio com 3 tipos de formas geomorfológicas distintas com relevância científica. | [] 2 pontos | | |
| Geomorfossítio com 2 tipos de formas geomorfológicas distintas com relevância científica. | [] 1 ponto | | |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto | | |
| F – RARIDADE | | | |
| O geomorfossítio é a única ocorrência deste tipo na área de estudo. | [] 4 pontos | | |
| Na área de estudo existem 2 a 3 exemplos de geomorfossítios semelhantes . | [] 2 pontos | | |
| Na área de estudo, existem 4 a 5 exemplos de geomorfossítios semelhantes . | [] 1 ponto | | |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto | | |
| G – LIMITAÇÕES DE USO | | | |
| O geomorfossítio não tem limitações (permissões legais, barreiras físicas etc.) para fazer trabalho de campo, incluindo amostragem. | [] 4 pontos | | |
| É possível fazer trabalho de campo depois de superar as limitações | [] 2 pontos | | |
| O trabalho de campo são muito difíceis de realizar devido a limitações difíceis de ultrapassar | [] 1 ponto | | |
| Não se aplica nenhum dos indicadores | [] 0 ponto | | |
| CRITÉRIO | SOMA | PESOS | TOTAL |
| A – Representatividade | | X Peso: 30% | |
| B – Localidade-chave | | X Peso: 20% | |
| C – Conhecimento científico | | X Peso: 5% | |
| D – Integridade | | X Peso: 15% | |
| E – Diversidade Geomorfológica | | X Peso: 5% | |
| F – Raridade | | X Peso: 15% | |
| G – Limitações de uso | | X Peso: 10% | |
| | | Total (100%): | |

Fonte: Moura-Fé, 2024. Adaptação: os autores

A quinta e última etapa partiu das limitações observadas na aplicação da ficha em unidades mais amplas. Esta consistiu em propor ajustes metodológicos voltados especificamente na avaliação de geopatrimônios, não apenas de geossítios. Nessa etapa, identificaram-se os critérios que melhor se adequavam à mudança de escala, especialmente aos relacionados à diversidade interna, grau de institucionalização e complexidade espacial dos geopatrimônios. A partir desta análise crítica, discutiu-se possíveis adaptações dos pesos e descritores da ficha, bem como a necessidade de incorporar novos parâmetros que representem de forma adequada o valor científico de geopatrimônios extensos e multifacetados.

4.2.4 Resultados

4.2.4.1 Serra das Galés

A partir da análise da literatura acerca de geopatrimônios cársticos no Brasil, foram identificados exemplos que, assim como a Serra das Galés, correspondem a relevos ruiformes desenvolvidos em rochas não carbonáticas, em especial siliciclásticas. Entre eles destacam-se o Parque Estadual de Vila Velha (PR), a Serra dos Tapuias (BA), a Serra da Capivara (PI) e a Pedra do Castelo (PI).

A partir da análise das amostras por difração de raios X na Serra das Galés, os difratogramas revelaram um padrão mineralógico bastante uniforme (Figura 5). As quatro amostras (SG02 – Figura 6A; SG03 – Figura 6B; SG04 – Figura 6C; e SG07 – Figura 6D) apresentaram predominância absoluta de quartzo, sendo esse o único mineral identificado com picos consistentes em todos os difratogramas. Como não foram identificados picos relevantes de outros minerais, conclui-se que essas amostras possuem composição essencialmente silicática, típica de arenitos puros. Essa informação é considerada na avaliação quantitativa proposta, uma vez que o valor científico é aferido principalmente a partir da raridade, e não da complexidade da composição mineralógica.

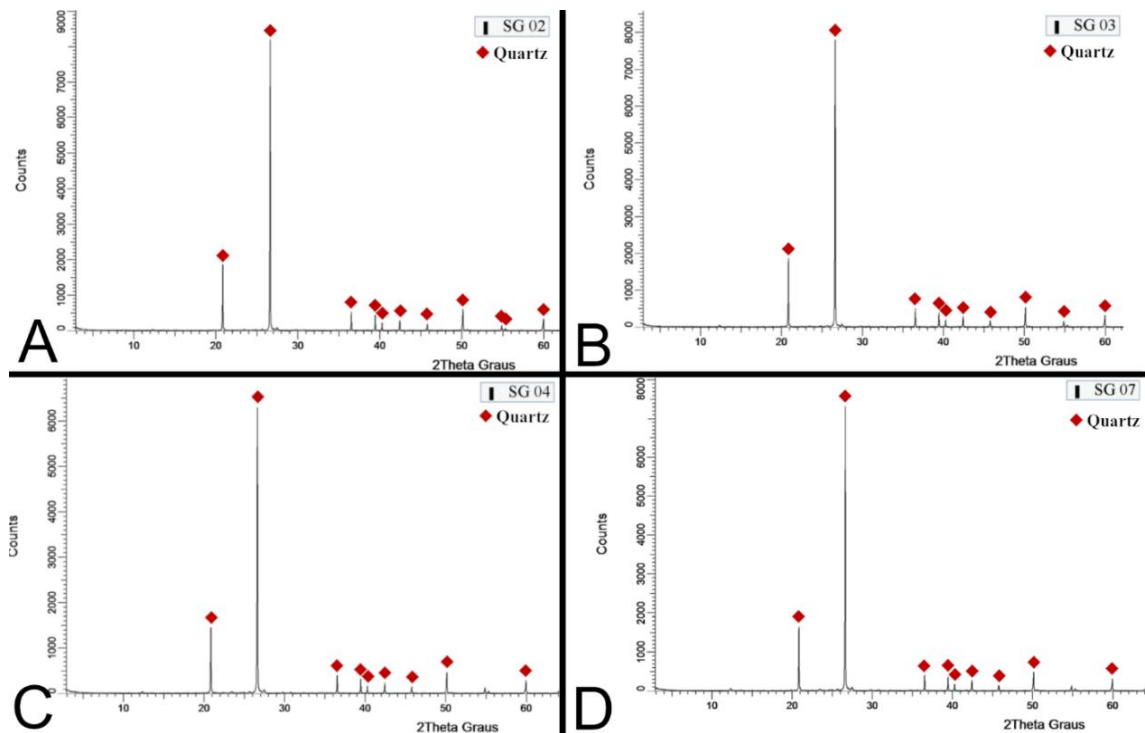
Assim, a partir da análise conjunta da literatura e dos dados mineralógicos (Figura 5), a inventariação da Serra das Galés, realizada conforme a metodologia proposta por Moura-Fé (2024) para avaliação do valor científico (Quadro 1), resultou em um valor total de 73,75%. Esse resultado foi obtido pela soma dos critérios apresentados no Quadro 1, detalhados a seguir.

O primeiro critério avaliado foi a representatividade, por meio do qual se constatou que a Serra das Galés é o melhor exemplo, no Parque Estadual, dos processos de formação de relevo ruiforme, recebendo pontuação 4 (máxima). No segundo critério, localidade-chave, o geossítio obteve pontuação 1, pois, embora esteja com cadastro em análise no Geossit, não possui reconhecimentos adicionais de ordem institucional, o que impede valores mais elevados. O terceiro critério, conhecimento científico, recebeu pontuação 2 em função das poucas publicações nacionais sobre a área, tendo sido identificado apenas um artigo em língua inglesa, publicado em periódico nacional. O quarto critério, integridade, recebeu pontuação máxima, uma vez que a Serra das Galés se encontra pouco antropizada, sem sinais claros de degradação. Para o quinto critério, diversidade geomorfológica, considerou-se que o geossítio abriga dois tipos de formas geomorfológicas de relevância científica: (i) as características próprias do relevo ruiforme (como as concavidades na Pedra do Cálice e condutos parcialmente erodidos) e (ii) as formas poligonais presentes na Pedra da Tartaruga. Quanto ao critério raridade,

compreende-se que esse geossítio corresponde à única ocorrência com essas características na região.

Desse modo, os critérios que receberam pontuação máxima foram representatividade (30%), integridade (15%) e raridade (15%), alcançando, em conjunto, 60% do total. Já conhecimento científico (5%) e limitações de uso (10%) obtiveram pontuação intermediária (2 pontos), totalizando 7,5%. Localidade-chave e diversidade geomorfológica apresentaram pontuação reduzida (1 ponto), somando 7,5%. Essa distribuição indica que o valor científico atribuído à Serra das Galés esteve fortemente relacionado à sua representatividade geomorfológica e ao bom estado de conservação. Por outro lado, a baixa diversidade de formas e o frágil reconhecimento institucional contribuíram para reduzir a pontuação final.

Figura 10 - Difratogramas das amostras coletadas na Serra das Galés. A, C e D: amostra coletada em morros testemunhos aleatórios ao redor da Pedra do Cálice. B: Amostra coletada na base da pedra do Cálice.



Fonte: autoria própria

Quadro 2 – Ficha de avaliação quantitativa do valor científico (Vci) para o geossítio da Serra das Galés

| Identificação do Geomorfossítio | | | |
|---------------------------------|-----------------|--|-------|
| Nome: | Serra das Galés | | |
| Código: | SG | | |
| CRITÉRIO | PESOS | DESCRIÇÃO E PONTOS | TOTAL |
| Representatividade | 30% | O geomorfossítio é o melhor exemplo na área de estudo para ilustrar formas ou processos. [4 pontos] | 30% |
| Localidade-chave | 20% | O geomorfossítio é utilizado pela ciência nacional e/ou está cadastrado no Geossit (Cadastro de sítios geológicos do Serviço Geológico do Brasil - SBG), na temática geomorfológica. [1 ponto] | 5% |
| Conhecimento científico | 5% | Existem artigos em revistas científicas nacionais sobre este geomorfossítio. [2 pontos] | 2,5% |

| | | | |
|-----------------------------------|-----|---|---------------|
| Integridade | 15% | Os principais elementos geomorfológicos encontram-se muito bem conservados . [4 pontos] | 15% |
| Diversidade Geomorfológica | 5% | Geomorfossítio com 2 tipos de formas geomorfológicas distintas com relevância científica. [1 ponto] | 1,25% |
| Raridade | 15% | O geomorfossítio é a única ocorrência deste tipo na área de estudo. [4 pontos] | 15% |
| Limitações de uso | 10% | O geomorfossítio não tem limitações (permissões legais, barreiras físicas etc.) para fazer trabalho de campo, incluindo amostragem. [2 pontos] | 5% |
| Total (100%): | | | 73,75% |

Fonte: Fonte: Moura-Fé, 2024. Adaptação: os autores

4.2.4.2 Ponte de Pedra

Geoformas similares à Ponte de Pedra no Brasil ocorrem no Parque Estadual do Ibitipoca, um reconhecido fluvio-carste desenvolvido em quartzito (Sousa, 2014); na Chapada das Mesas, cuja gênese está associada à fluvio-carstes em arenito (Martins, Salgado e Barreto, 2017); e na Formação Furnas, a qual foram reportadas formas de dissolução como os espeleotemas a partir de dissolução em caulinita e ilita (Melo et al, 2015).

O leito do rio Ponte de Pedra é marcado pela presença de blocos angulosos colapsados (Figura 5), muito provavelmente originados a partir do abatimento do teto da caverna que devia ser mais longa, expondo o canal. Além disso, no interior da caverna ocorrem níveis com seixos rolados fixados nas paredes (Figura 6B), indicando um antigo nível fluvial. Apesar de pouco extensa e desenvolvida em arenito, a caverna da Ponte de Pedra é adornada por espeleotemas do tipo estalactite, estalagmite, coluna (Figura 6C) e escorrimento (Figura 6D). A existência de lentes carbonáticas e progressiva erosão dessas estruturas permitem o desenvolvimento de feições características do carste tradicional.

Figura 11 - Blocos colapsados no Rio Ponte de Pedra



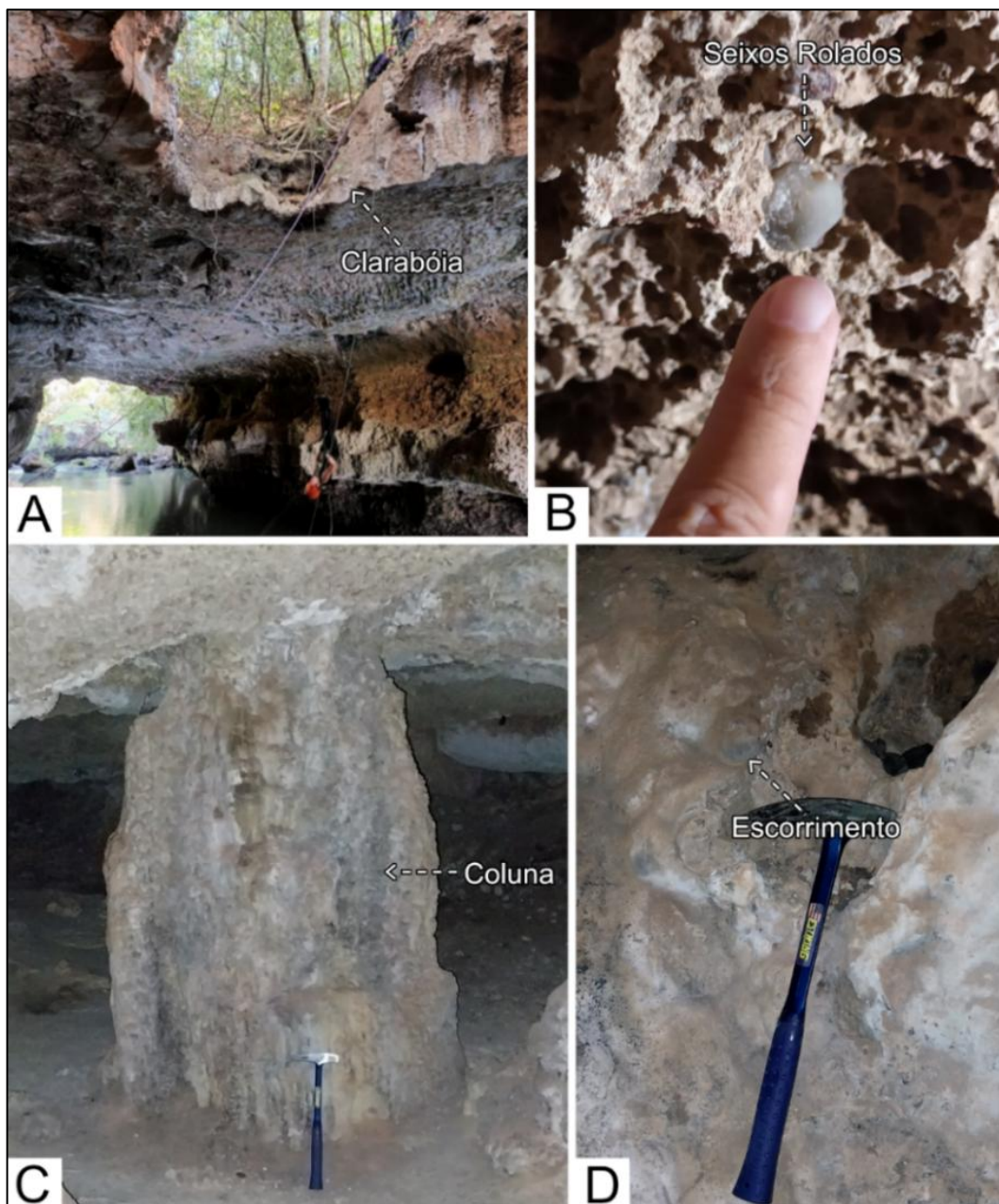
Fonte: Autoria própria

A respeito dos difratogramas das amostras coletadas no interior da Ponte de Pedra (Figura 7), foram identificadas diferentes fases mineralógicas. A amostra PP01, coletada de espeleotema do tipo corrimento, na parede da caverna (Figura 7A) evidenciou predominância dos picos de calcita, acompanhados por picos secundários de quartzo. A amostra PP02, referente a um paleonível fluvial no interior da caverna (Figura 7B) revelou fases de silicatos, como quartzo e palygorskita, além de picos menores de carbonatos, incluindo dolomita e calcita. Na amostra PP03, proveniente do piso da caverna (Figura 7C) observou-se a presença majoritária de silicatos (quartzo e palygorskita), juntamente com picos significativos de calcita magnésiana. A amostra PP04, correspondente a um espeleotema do tipo estalagmite (Figura 7D), apresentou predominância de calcita magnésiana, com um discreto pico de quartzo. Estes resultados fornecem subsídios para avaliar se a ficha de Moura-Fé (2024) leva em consideração as variações de composição entre geossítios com gênese distinta.

Com base na análise da bibliografia, registros identificados em campo e análise mineralógica por difração de raios X, a ficha de análise quantitativa de valor científico (VCi) do geossítio Ponte de Pedra (Quadro 3), constatou um valor final de 65% de Valor Científico, distribuídos conforme especificado abaixo.

No critério representatividade, atribuiu-se pontuação máxima (4 pontos), em virtude de ser o exemplo mais nítido de um fluviocarste na área de estudo, torna-o o maior exemplo para ilustrar formas e processos geomorfológicos característicos. Já em relação à localidade-chave, apesar de sua forma atípica, o sítio não é reconhecido como geopatrimônio, não estando sequer cadastrado no Geossit, tampouco em bases internacionais, motivo pelo qual foi atribuído 0 pontos. Por sua vez, no critério conhecimento científico, em virtude de existirem estudos nacionais publicados que apresentem a Ponte de Pedra como um patrimônio geomorfológico de elevada atratividade turística (Ferreira e Candeiro, 2022; Ferreira, Lima e Candeiro, 2025) e um artigo escrito em língua inglesa em mesmo tema, mas ainda publicado em uma revista nacional (Ferreira, Lima e Candeiro, 2020); foi atribuído 2 pontos, correspondendo a 2,5% do percentual total, uma vez que todas as publicações identificadas foram em revistas nacionais.

Figura 12 - Geoformas no interior da Ponte de Pedra

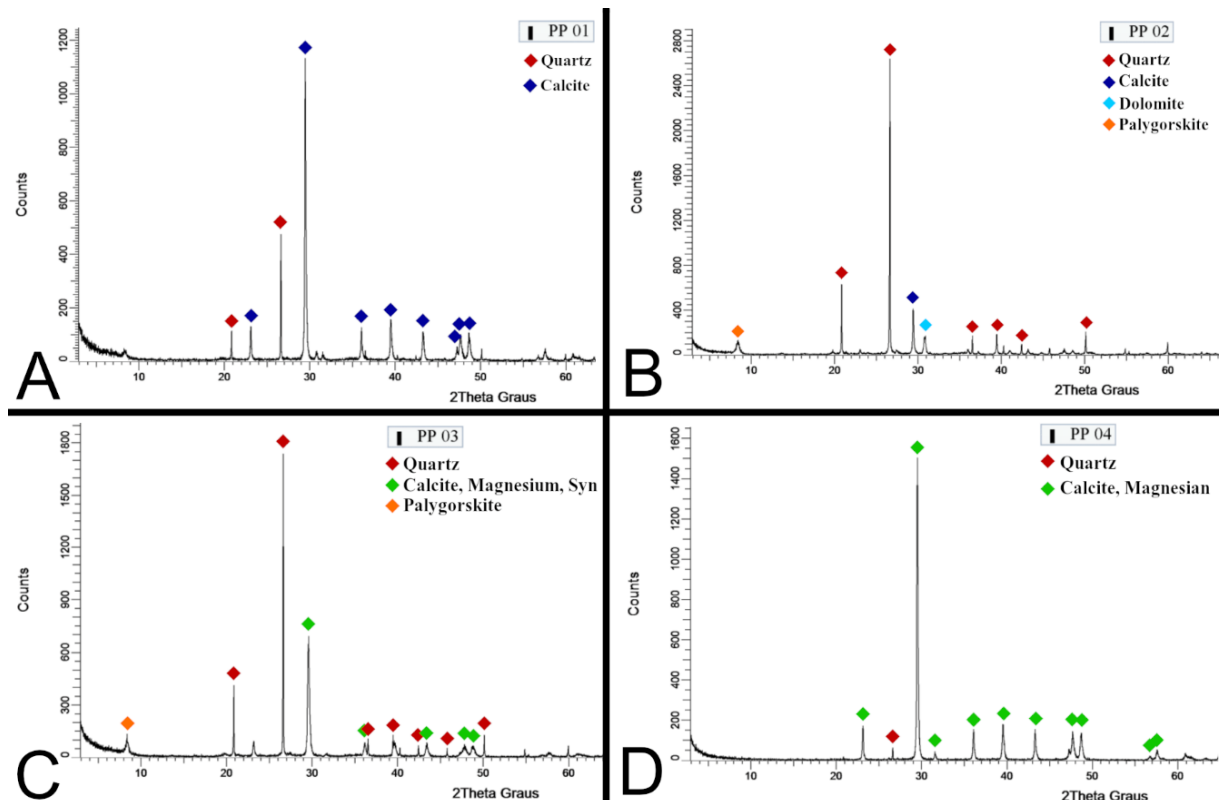


Fonte: Autoria própria

O critério integridade recebeu a 2 pontos, correspondendo a 7,5% da percentagem total, visto que apesar das geoformas estarem em sua maioria preservadas, a claraboia no topo da caverna foi originada de forma antrópica, sendo um traço marcante de degradação. Mas no que se refere à diversidade geomorfológica, foram atribuídos pontuação máxima (4 pontos), correspondente a 10% do valor total, pois o geossítio apresenta diversas geoformas cársticas em seu interior. Dentre estes se destacam o fluviocarste em si, o desenvolvimento de espeleotemas como estalactites, estalagmites, coluna e escorrimentos e a presença de seixos rolados incrustados nas paredes da caverna. De mesmo modo, reconhece-se pontuação máxima

também ao critério raridade, correspondendo a 15% do valor total, pois a Ponte de Pedra é um exemplo único de fluviocarste na região. Por fim, o critério limitações de uso recebeu 2 pontos, correspondendo a 5%, uma vez que a área se trata de uma Reserva Particular, ou seja, a visita deve ser combinada com o proprietário, sendo a única limitação.

Figura 13 - Difratoogramas das amostras coletadas na Ponte de Pedra. A: Espeleotema do tipo escorrimento; B: Paleonível fluvial; C: Chão da caverna; D: Espeleotema do tipo estalagmite.



Fonte: Autoria própria

Quadro 3 – Ficha de avaliação quantitativa do valor científico (VCi) para a Ponte de Pedra

| Identificação do Geomorfossítio | | | |
|---------------------------------|-----------------|--|-------|
| Nome: | Serra das Galés | | |
| Código: | SG | | |
| CRITÉRIO | PESOS | DESCRIÇÃO E PONTOS | TOTAL |
| Representatividade | 30% | O geomorfossítio é o melhor exemplo na área de estudo para ilustrar formas ou processos. [4 pontos] | 30% |
| Localidade-chave | 20% | Não se aplica a nenhum dos indicadores [0 ponto] | 0 |
| Conhecimento científico | 5% | Existem artigos em revistas científicas nacionais este geomorfossítio. [2 pontos] | 2,5% |
| Integridade | 15% | Geomorfossítio não tão bem preservado, mas os principais elementos geomorfológicos ainda estão conservados . [2 pontos] | 7,5% |
| Diversidade Geomorfológica | 5% | Geomorfossítio com mais de 3 tipos de formas geomorfológicas distintas com relevância científica. [4 pontos] | 5% |
| Raridade | 15% | O geomorfossítio é a única ocorrência deste tipo na área de estudo. [4 pontos] | 15% |

| | | | |
|-------------------|-----|---|------------|
| Limitações de uso | 10% | É possível fazer trabalho de campo depois de superar as limitações. [2 pontos] | 5% |
| Total: | | | 65% |

Fonte: Fonte: Moura-Fé, 2024. Adaptação: os autores

Os critérios que receberam pontuação máxima foram representatividade (30%), diversidade geomorfológica (5%) e raridade (15%), correspondendo juntos a 50% do valor total. Os critérios conhecimento científico (5%), integridade (15%) e limitações de uso (10%) obtiveram pontuação intermediária (2 pontos) refletindo 15% do total para este geossítio. Já o critério localidade-chave (20%) não pontuou em virtude da ausência de reconhecimento formal ou registro em bases institucionais. Essa distribuição aponta que o valor científico da Ponte de Pedra está fortemente associado à variedade e singularidade de formas cársticas, mas é limitado pela escassez de estudos científicos e pela falta de reconhecimento oficial em inventários consolidados.

4.2.4.3 Comparação entre os VCI dos geossítios e geopatrimônios

A aplicação da ficha de valoração científica (quadro 2 e quadro 3) indicou comportamentos distintos quando aplicada para unidades de natureza e distintas escalas, afetando significativamente na distribuição das pontuações entre os dois geossítios.

A Serra das Galés, tratada aqui como geopatrimônio, apresentou valor científico total de 73,75%, enquanto a Ponte de Pedra alcançou 65%, refletindo uma diferença de 8,75%. Em ambos os casos, o critério representatividade obteve pontuação máxima (4 pontos), confirmando que os dois geossítios são exemplos de suas respectivas morfologias. Contudo, a Serra das Galés também recebeu pontuação máxima nos critérios integridade e raridade (4 pontos), que quando somados contribuiriam relativamente para uma nota mais elevada. A Ponte de Pedra, embora também considerada rara e representativa pelos critérios da ficha, obteve apenas 2 pontos em integridade, devido à presença de alterações antrópicas.

Em contrapartida, a Ponte de Pedra, apesar de também ser um geopatrimônio, é constituído de um geossítio dominante (a caverna atravessada pelo rio). Esta apresentou valores maiores em diversidade geomorfológica (4 pontos), apontando maior variedade de formas cársticas em relação à Serra das Galés, que obteve 1 ponto neste critério. Todavia este critério representa somente 5% do valor total, não impactando fortemente no resultado. O outro contraste é o critério Localidade-chave, pois a Serra das Galés obteve 1 ponto devido seu cadastro no Geossit, enquanto a Ponte de Pedra não pontuou um critério que corresponde a 20% do valor total por ausência de reconhecimento institucional.

Ambos geossítios apresentaram pontuação intermediária (2 pontos) nos critérios conhecimento científico e limitações de uso, indicando condições semelhantes quanto à disponibilidade de estudos e acessibilidade para pesquisa. Portanto, de acordo com a metodologia empregada, observa-se que a Serra das Galés obteve melhor desempenho em critérios relacionados à conservação e reconhecimento institucional, enquanto a Ponte de Pedra destacou-se pela diversidade e complexidade geomorfológica.

4.2.5 Discussões

A análise comparativa entre os dois geossítios demonstra que a metodologia proposta por Moura-Fé (2024) adaptada de Brilha (2016), Sellier (2010) e Reynard et al (2016), embora operacionalmente eficiente para hierarquizar o valor científico de um geopatrimônio, apresenta limitações quando aplicada ao contexto da geodiversidade brasileira de alta singularidade litológica e morfológica, mas pouco estudada e protegida. A diferença entre a pontuação da Serra das Galés e a Ponte de Pedra reflete mais os pesos atribuídos a critérios institucionais e de integridade do que a raridade e relevância científica efetiva dos geossítios. Em outras palavras, a comparação entre ambas as áreas indica que a metodologia quantifica de forma satisfatória geossítios bem delimitados, contudo, apresenta limitações quando aplicadas a geopatrimônios extensos com uma maior variedade de geossítios, como observado na Serra das Galés.

4.2.5.1 Comparação com a literatura e com análise mineralógica

Os dados de DRX confirmam que a Serra das Galés é composta quase integralmente por arenito quartzoso, com ausência de minerais mais solúveis como os carbonatos. Isso indica que seu relevo ruiforme resulta de intemperismo físico e arenização. Esta característica diferencia o geossítio de exemplos cársticos clássicos e aproxima-o de formas silicilásticas como as reportadas em Vila Velha (PR), Serra dos Tapuias (BA) e Bungle Bungle (Austrália) (Wray, 1997; Young, 2010; Melo et al, 2011; Meira e Santos, 2014).

Na Formação Furnas, onde situa-se o Parque Vila Velha (PR) identificaram a presença de feições de dissolução em macro e microescala, associadas principalmente à caulinita, ilita e quartzo (Melo et al., 2025). Nesta área observações microscópicas apontaram a corrosão de grãos e cimentos argilosos, além do desenvolvimento de espeleotemas e incrustações compostas por sílica e óxidos de ferro. A carstificação relatada na área se assemelha aos processos de dissolução descritos em carstes siliciclásticos em arenização (Wray, 1997; Andreychouk et al., 2009). A uniformidade quartizítica percebida na Serra das Galés aponta um

processo de gênese em arenização (Martini, 1979; Wray, 1997), mas sem preservar espeleotemas.

A semelhança morfológica com a Taça do Parque Vila Velha (PR) (Melo et al, 2011; Pontes et al., 2022) e com as torres areníticas da Serra da Capivara (Silva e Maia, 2024) reforça que a Serra das Galés integra um conjunto de relevos ruiformes incomuns, porém distribuídos no Brasil. O cartão postal de Ponta Grossa, cidade que abriga o Parque Vila Velha, é a pedra da Taça, que possui uma morfologia similar à Pedra do Cálice de Paraúna. Desse modo, sua nota elevada ($V_{ci} = 73,75$) expressa bem sua importância regional, mas não necessariamente uma singularidade nacional.

Além disso, foram reportadas feições ruiformes em arenitos siliciclásticos na Serra dos Tapuias, na Bahia (Meira e Santos, 2014). Trata-se de blocos rochosos isolados na paisagem, com ocorrência de cavernas em arenito originadas a partir da abertura de dutos, que também apresentam registros arqueológicos, como pinturas rupestres (Meira e Nascimento, 2015). Este tipo de feições não é reportado na Serra das Galés, tendo seu valor maior na excepcionalidade das geoformas.

No Piauí, sobre a Bacia do Parnaíba, na Formação Serra Grande possui o Parque Estadual Serra da Capivara, originado a partir de uma carstificação condicionada por estruturas tectônicas reativadas, associada ao lineamento transbrasileiro (Silva e Maia, 2024). Este é um carste não tradicional característico, com presença de torres e pináculos e quedas d'água. Além disso, também sobre a bacia do Paranaíba há o caso da Pedra do Castelo, situada sobre a Formação Cabeças, que passa por processos de carstificação aparentes, incluindo vugs e alvéolos na rocha corroída (Maia, 2023). Neste sentido, a Serra das Galés apresenta algumas características semelhantes, contudo com déficit de geoformas de dissolução recente mais expressivas, sendo identificadas somente paleocondutos já parcialmente destruídos.

Em contrapartida, a Ponte de Pedra apresenta feições fluviocarsticas com espeleotemas carbonáticos desenvolvidos em arenito, sendo um caso extremamente raro. Estudos de dissolução em ambientes siliciclásticos (Corrêa Neto et al. 1997; Sousa, 2014 e Melo et al. 2015) indicam a presença de lentes carbonáticas, associada ao fraturamento e lixiviação de feldspatos e micas, favorecendo o desenvolvimento de cavidades e depósitos secundários de carbonato. Para o caso da Ponte de Pedra, destaca-se a existência de lentes carbonáticas, que além de acentuar a dissolução, também permitem a geração de espeleotemas em uma rocha basicamente arenítica.

Em litologia majoritariamente arenítica, o estudo sobre a morfogênese da Chapada das Mesas aponta um geopatrimônio de origem cárstica e poligenética (Martins, Salgado e Barreto,

2017). As taxas de denudação registradas na Chapada das Mesas indicam a existência de um sistema subterrâneo que se foi exposto após o colapso do teto das cavernas (Martins, Salgado e Barreto, 2017). Tal hipótese é compatível com o processo de exposição da Ponte de Pedra, uma vez que se pode observar a presença de blocos colapsados angulosos ao longo do leito do Rio Ponte de Pedra.

No estudo sobre a dissolução na formação Furnas, na Bacia do Paraná (Melo et al, 2015) foram identificadas feições de dissolução na cimentação argilosa com minerais silicatados como caulinita e ilita, que a partir de precipitação podem gerar espeleotemas, mesmo que não carbonáticos. A Ponte de Pedra, se desenvolvendo sobre litologia arenítica, tem espeleotemas desenvolvidos em sua superfície, mas neste caso associado a presença das lentes carbonáticas. Ou seja, os espeleotemas desenvolvidos na Ponte de Pedra, como apontado pelos dados de DRX, são característicos do carste clássico, com origem associada a calcários, dolomitos e calcários magnesianos, mas ocorrem em arenitos.

4.2.5.2 Comparação entre os VCI dos geopatrimônios

A aplicação da ficha de avaliação do Valor Científico (VCI) revelou comportamentos contrastantes entre a Serra das Galés e a Ponte de Pedra, apontando para a diferença de escala e interpretação dos resultados. Conforme o levantamento de geossítios em Paraúna realizado por Ferreira, Lima e Candeiro (2025), a Serra das Galés constitui o principal exemplo regional de relevos ruiformes com formas reconhecíveis por pareidolia. Tal característica contribuiu para sua pontuação máxima nos critérios representatividade e raridade, uma vez que amplia o interesse científico, paisagístico e interpretativo do geopatrimônio (Queiroz et al, 2025). Todavia, isto não reflete um caráter de raridade nacional, uma vez que outras geoformas deste tipo são reportadas em outros estados do Brasil.

O critério Integridade também obteve pontuação máxima, dado que as formas se encontram preservadas e protegidas por se situarem em uma Unidade de Conservação. Todavia, a aplicação da ficha a uma área extensa e composta por múltiplos geossítios resultou em um VCI total artificialmente elevado, reduzindo a sensibilidade em variações internas. Desse modo, o método não aponta o valor científico de modo segmentado como a soma qualificada dos geossítios, mas sim tratando o geopatrimônio como uma unidade homogênea.

Todavia, o inverso ocorre na Ponte de Pedra. O método penalizou a área por apresentar menor reconhecimento institucional, menor volume bibliográfico, cadastramento e reconhecimento formal mais restritos, embora seu valor científico seja evidente quando se analisa a excepcionalidade e a raridade do geossítio individualmente. Ainda assim, a Ficha de

Valor Científico (VCi) da Ponte de Pedra indica expressiva relevância científica, pois, apesar das poucas publicações a seu respeito, a diversidade geomorfológica ali presente é abundante e atípica. Conforme Ferreira, Lima e Candeiro (2020), o geossítio Ponte de Pedra é relevante para o geoturismo em virtude da interação entre a geologia, com suas formas características, e o acesso relativamente facilitado.

O valor científico está diretamente relacionado à importância de sustentar o conhecimento presente e futuro sobre o funcionamento dos geossistemas (Brilha, 2016). Nesse sentido, a Ponte de Pedra apresenta potencial ímpar para ampliar a compreensão dos processos cársticos em rochas não carbonáticas, pois a ocorrência de espeleotemas carbonáticos mesclados a litologias areníticas é aparentemente muito rara e, portanto, de elevado valor científico.

Os critérios nos quais a Ponte de Pedra obteve pontuação máxima (representatividade, diversidade geomorfológica e raridade) totalizam 50% do valor final e reforçam que esse geopatrimônio reúne feições excepcionais tanto pela variedade de formas quanto pela singularidade dos processos que as originam. A presença de um flúviocarste com lentes carbonáticas é considerada rara, havendo poucas publicações que descrevam esse tipo de geoforma em escala global. Além disso, atribuiu-se nota 2 ao critério integridade, em razão da existência de uma claraboia artificialmente desenvolvida no topo da forma. Essa característica evidencia a necessidade de ações de geoconservação na área, pois acelera o processo evolutivo de exposição do flúviocarste. Contudo, não interfere na raridade das geoformas, o que torna ainda mais urgente a realização de estudos detalhados sobre o local.

Ressalta-se que pesquisas em geodiversidade e geopatrimônio podem ser geograficamente enviesadas, uma vez que muitas regiões carecem de estudos e de inventários detalhados (Ibáñez; Brevik; Cerdà, 2019). Esse cenário interfere diretamente na avaliação de geopatrimônios, pois as metodologias de valoração dependem, em geral, de volume bibliográfico, reconhecimento institucional e registros formais. Desse modo, a diferença de 8,75% entre os valores científicos totais (73,75% para a Serra das Galés e 65% para a Ponte de Pedra) aponta uma tendência metodológica que privilegia critérios institucionais em detrimento de atributos científicos intrínsecos, como originalidade genética, raridade geomorfológica e potencial para avanços teóricos. Como o critério diversidade geomorfológica possui peso reduzido (5%), enquanto localidade-chave alcança 20%, a metodologia tende a valorizar geossítios já reconhecidos e inventariados, desvalorizando aqueles ainda pouco estudados, mas geomorfológicamente excepcionais.

Reconhece-se o mérito da proposta desenvolvida por Moura-Fé (2024), especialmente ao sistematizar parâmetros aplicáveis a geossítios no contexto nacional. Contudo, os resultados mostram que, ao ser transposta para geopatrimônios, a ficha perde acurácia e pode obscurecer áreas cuja relevância científica não está necessariamente alinhada ao volume de publicações ou ao grau de institucionalização. O fato de a Ponte de Pedra – uma feição singular em termos de gênese, composição e processos – obter valor inferior ao da Serra das Galés indica que o método funciona bem para geossítios isolados, mas não é suficiente para capturar adequadamente a complexidade e a diversidade espacial do geopatrimônio.

A diferenciação obtida entre Serra das Galés e Ponte de Pedra, a partir da ficha adaptada, tem implicações diretas para a gestão territorial e para as estratégias de geoconservação em Paraúna. Ao explicitar a primazia da raridade, da diversidade de geoformas e do potencial de pesquisa em relação ao simples reconhecimento formal, a metodologia proposta oferece um instrumento mais sensível para a definição de prioridades em inventários, planos de manejo, propostas de criação ou ampliação de unidades de conservação e iniciativas de geoturismo. Em contextos de disputa territorial e pressão antrópica crescente, como o cerrado goiano, essa qualificação do valor científico contribui para fundamentar políticas públicas e ações locais de proteção do geopatrimônio.

4.2.5.3 Proposta de ficha adaptada para geopatrimônios

A ficha de avaliação proposta por Moura-fé (2024) foi originalmente desenvolvida para aplicação em geossítios, com um enfoque direcionado à feições pontuais. Ao utilizar o método para geopatrimônios em maior escala, percebeu-se a necessidade de incorporar novos aspectos interpretativos, como a complexidade interna, distribuição espacial e a multiplicidade de geoformas presentes.

Outro aprimoramento foi realizado ao sistema de pontuação. Na ficha original não havia a categoria de 3 pontos, gerando saltos bruscos entre as classes avaliadas, principalmente os critérios de maior peso. Na versão reformulada, inseriu-se a pontuação intermediária com o objetivo de reduzir a grande diferenciação entre os níveis.

Os sete critérios foram revisados e com pesos redistribuídos. O critério Representatividade, associado à capacidade do geopatrimônio de contribuir para a compreensão dos processos geomorfológicos (Reynard et al., 2016), demonstrou adequada aplicabilidade tanto em geossítios quanto em geopatrimônios, portanto, seu peso foi mantido elevado. O critério Localidade-chave foi mantido, mas teve seu peso reduzido, uma vez que o caráter

institucional poderia superestimar o valor científico em detrimento de critérios intrínsecos, bem como representatividade ou raridade.

No terceiro critério, na ficha original denominada “conhecimento científico”, observou-se que apenas refletia a produção científica existente, desconsiderando o potencial de futuras pesquisas. Desse modo, o critério foi reformulado para “potencial científico”, valorizando áreas pouco estudadas, mas com ampla capacidade de contribuir para o avanço do conhecimento geomorfológico. O critério Integridade foi ampliado para contemplar a avaliação de diferentes unidades internas do geopatrimônio, permitindo maior precisão interpretativa. Quanto ao critério Diversidade Geomorfológica, seu peso foi significativamente aumentado, reconhecendo que geopatrimônios com maior diversidade geram maior possibilidade de abordagem e possibilidade científica.

Para o critério Raridade, além do aumento do peso, foi incorporada uma gradação mais refinada entre raridade local e nacional, apontando níveis distintos de excepcionalidade. Por fim, o critério Limitações de uso se mostrou adequado para o novo modelo, ajustado a fim de contemplar a acessibilidade e restrições em maior escala.

A redistribuição dos pesos manteve o total de 100 pontos, porém elevou proporcionalmente a importância dos critérios intrínsecos ao geopatrimônio (representatividade, raridade, diversidade de formas e integridade) em relação aos critérios institucionais e de uso. Essa decisão está alinhada à literatura de geoconservação, que indica que o valor científico deve refletir primordialmente a singularidade geológica, a raridade e o potencial de pesquisa de longo prazo, enquanto o reconhecimento formal e o uso turístico tendem a variar em escalas temporais mais curtas e a depender de contextos políticos e institucionais específicos.

Quadro 4 – Proposta de ficha de avaliação do geopatrimônio

| Identificação do Geopatrimônio | |
|---------------------------------------|--|
| Nome: | |
| Código: | |
| Crítérios | Parâmetros |
| Representatividade | Capacidade de um geopatrimônio de ilustrar elementos ou processos geomorfológicos das unidades de relevo e contextos geomorfológicos associados. |
| Localidade-chave | Importância institucional pré-existente atribuída ao geopatrimônio. Mede o grau de notoriedade do sítio na literatura científica |
| Potencial científico | Capacidade do geopatrimônio de gerar pesquisas e conhecimento, medida pela existência estudos, publicações e de discussões possível. |
| Integridade | Grau de preservação dos elementos geomorfológicos principais, considerando impactos naturais e antrópicos. |
| Diversidade Geomorfológica | Variedade de formas, estruturas e processos geomorfológicos presentes no geopatrimônio. |

| Raridade | Ocorrência incomum de formas, estruturas ou processos geomorfológicos que possuem baixa representatividade regional, nacional ou global. |
|--|--|
| Limitações de uso | Conjunto de fatores que restringem ou dificultam atividades de pesquisa, ensino ou visitação, incluindo acessibilidade, fragilidade do terreno, risco físico, presença de áreas privadas ou restrições legais. |
| Critérios / Indicadores | |
| Parâmetros | |
| A - REPRESENTATIVIDADE | |
| Melhor exemplo para ilustrar processos ou geofomas em âmbito regional/nacional . | [] 4 pontos |
| Bom exemplo para ilustrar formas ou processos em âmbito nacional e regional . | [] 3 pontos |
| O geopatrimônio é um bom exemplo para ilustrar formas ou processos em âmbito regional , com relevância científica conhecida. | [] 2 pontos |
| Representatividade parcial, limitada ou pouco expressiva . | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores | [] 0 ponto |
| B – LOCALIDADE-CHAVE | |
| Inserido em Geoparque UNESCO ou reconhecido por redes internacionais | [] 4 pontos |
| Utilizado regularmente pela ciência internacional. | [] 3 pontos |
| Reconhecido pela ciência nacional/registrado em bases oficiais como o Geossit. | [] 2 pontos |
| Há trabalhos que o citam como geopatrimônio, mas sem reconhecimento consolidado. | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores | [] 0 ponto |
| C – POTENCIAL CIENTÍFICO | |
| O geopatrimônio é dotado de alta singularidade, baixa quantidade de estudos e possui elevado potencial de gerar novas pesquisas. | [] 4 pontos |
| Pesquisas iniciais, com amplo campo para desdobramentos científicos. | [] 3 pontos |
| Área com volume razoável de estudos, com potencial moderado para expansão conceitual. | [] 2 pontos |
| Extensa literatura consolidada, grande parte dos processos já bem compreendidos. | [] 1 ponto |
| Campo saturado, sem lacunas científicas relevantes identificadas. | [] 0 ponto |
| D – INTEGRIDADE | |
| Os principais elementos geomorfológicos encontram-se muito bem conservados . | [] 4 pontos |
| Geopatrimônio bem conservado , com poucas alterações. | [] 3 pontos |
| Impactos significativos , mas elementos principais ainda reconhecíveis | [] 2 pontos |
| Geopatrimônio com alteração acentuada e evidente degradação | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores | [] 0 ponto |
| E – DIVERSIDADE GEOMORFOLÓGICA | |
| O geopatrimônio é dotado de 4 ou mais tipos de formas geomorfológicas distintas com relevância científica | [] 4 pontos |
| O geopatrimônio é dotado de 3 tipos de formas geomorfológicas distintas com relevância científica. | [] 3 pontos |
| O geopatrimônio é dotado de 2 tipos de formas geomorfológicas distintas com relevância científica. | [] 2 pontos |
| O geopatrimônio é dotado de apenas 1 tipo de forma geomorfológica predominante. | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto |
| F – RARIDADE | |
| O geopatrimônio apresenta geossítios ou processos geomorfológicos de raridade ímpar, inéditos ou muito pouco reportados na literatura científica . | [] 4 pontos |
| Existem poucos exemplos conhecidos no Brasil ou na região, com ocorrência limitada e relevância científica reconhecida , mesmo que não inédita. | [] 3 pontos |
| O geopatrimônio é incomum regionalmente , porém há equivalentes documentados em outras áreas do país. | [] 2 pontos |
| A raridade é moderada , a feição existe em diversos contextos, mas há algum grau de valor local. | [] 1 ponto |
| O geopatrimônio apresenta feições comuns, amplamente distribuídas e sem caráter raro. | [] 0 ponto |
| G – LIMITAÇÕES DE USO | |
| O geomorfossítio não tem limitações (permissões legais, barreiras físicas etc.) para fazer trabalho de campo, incluindo amostragem. | [] 4 pontos |
| O geopatrimônio permite uma pesquisa possível, com restrições controláveis | [] 3 pontos |
| Pesquisa limitada, com demanda de autorização demasiadamente burocrática ou risco operacional. | [] 2 pontos |
| O geopatrimônio possui acesso muito restrito, quase inviável. | [] 1 ponto |

| Não se aplica nenhum dos indicadores | | | [] 0 ponto |
|--------------------------------------|------|----------------------|-------------|
| CRITÉRIO | SOMA | PESOS | TOTAL |
| A – Representatividade | | X Peso: 30% | |
| B – Localidade-chave | | X Peso: 10% | |
| C – Potencial científico | | X Peso: 20% | |
| D – Integridade | | X Peso: 10% | |
| E – Diversidade Geomorfológica | | X Peso: 10% | |
| F – Raridade | | X Peso: 15% | |
| G – Limitações de uso | | X Peso: 5% | |
| | | Total (100%): | |

Fonte: os autores, adaptado de Moura-Fé (2024)

A aplicação da metodologia revisada sobre a Serra das Galés e Ponte de Pedra teve como finalidade testar operacionalmente a nova seleção de critérios e de pesos, permitindo a geração de valores comparáveis e avaliação de sua eficácia. Percebeu-se que tal reformulação corrigiu limitações detectadas no método anteriormente aplicado, principalmente a subvalorização da raridade e diversidade geomorfológica e supervalorização de aspectos como o grau de institucionalização.

A comparação entre os valores (quadro 5) evidencia que a redistribuição de pesos e critérios altera a hierarquização interna dos atributos científicos dos geopatrimônios analisados. A serra das Galés manteve pontuações elevadas, contudo com maior contribuição de componentes ligados à diversidade geomorfológica e potencial de pesquisa, de modo que o método revisado reduza a influência do reconhecimento institucional como determinante principal do valor final. Enquanto a Ponte de Pedra, que na primeira análise tinha seu valor científico subestimado, apresenta um grande incremento a partir de altos valores de raridade geomorfológica. Tal mudança demonstra que a ficha original tendia a privilegiar geopatrimônios já consolidados, enquanto a reformulação proposta tende a apontar o valor também de geformas singulares ou ainda pouco estudadas.

Quadro 5 – Comparação dos Valores Científicos na Serra das Galés e Ponte de Pedra conforme nova proposta de avaliação

| CRITÉRIO | PESOS | VCi Serra das Galés | VCi Ponte de Pedra |
|----------------------------|---------------|---------------------|--------------------|
| Representatividade | 30% | 15% | 30% |
| Localidade-chave | 10% | 5% | 2,5% |
| Potencial científico | 20% | 15% | 20% |
| Integridade | 10% | 10% | 7,5% |
| Diversidade Geomorfológica | 10% | 7,5% | 10% |
| Raridade | 15% | 7,5% | 15% |
| Limitações de uso | 10% | 3,75% | 3,75 |
| | Total: | 63,75% | 88,75% |

Fonte: Os autores. Adaptado de Moura-Fé, 2024

4.2.6 Considerações finais

Os resultados obtidos demonstraram que a aplicação direta de uma ficha de valoração desenvolvida originalmente para geossítios pode gerar distorções quando utilizada em geopatrimônios, sobretudo em casos com múltiplas feições e elevada complexidade interna. Enquanto a Serra das Galés exibe formas típicas de relevos ruiformes, comumente associadas ao carste não tradicional, a Ponte de Pedra corresponde a um fluviocarste raro que não se encaixa perfeitamente nem na definição de carste tradicional nem na de não tradicional. A Serra das Galés consolidou-se como símbolo identitário do município e, embora apresente feições incomuns, é relativamente semelhante a outros exemplos descritos na literatura nacional. Em contrapartida, a Ponte de Pedra se destaca pela excepcionalidade de suas feições, configurando um raríssimo exemplo de fluviocarste em arenito com espeleotemas carbonáticos, o que lhe confere maior relevância científica e raridade geomorfológica. Essa situação revelou uma assimetria, já que a Ponte de Pedra apresentou valores inferiores aos esperados para um geopatrimônio tão singular.

Diante dessa constatação, a reformulação metodológica proposta buscou redistribuir pesos e detalhar critérios de modo a tornar o processo avaliativo mais sensível à singularidade geomorfológica, sobretudo em contextos brasileiros pouco reportados na literatura ou ainda carentes de institucionalização efetiva. A reaplicação da análise mostrou que tal ajuste conferiu maior representatividade às características intrínsecas dos geopatrimônios. Desse modo, a nova ficha não apenas reequilibra a interpretação, como também amplia a capacidade da ferramenta para avaliar geopatrimônios cársticos não tradicionais com características pouco convencionais.

Portanto, considera-se que a metodologia reformulada contribui para o aprimoramento das práticas de inventário e diagnóstico dos patrimônios geológicos e geomorfológicos no contexto brasileiro, ao subsidiar ações de manejo, reconhecimento institucional e políticas de geoconservação. Espera-se que este trabalho ajude a ampliar as discussões sobre os geopatrimônios do Centro-Oeste brasileiro, incentivando o desenvolvimento de novas metodologias de inventariação quantitativa de geopatrimônios e geossítios adequadas a diferentes escalas, bem como estudos comparativos que reforcem a valorização científica e a conservação da geodiversidade regional.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos a partir das análises em Paraúna (GO) demonstraram de forma expressiva de que modo os geopatrimônios cársticos que evoluíram em arenito desafiam classificações já consolidadas e revelam nuances importantes para o avanço da pesquisa geomorfológica e geopatrimonial no Brasil. A Serra das Galés e a Ponte de Pedra, embora espacialmente próximas e com substrato arenítico similar, apresentam evoluções distintas dentro dos processos cársticos, apontando que a dicotomia entre carste tradicional e não tradicional é insuficiente para lidar com a complexidade destes sistemas. Tal constatação, além de indicar a necessidade de rever categorias conceituais, também apontam que instrumentos de avaliação científica que dependem destas informações para valorizar o geopatrimônio, também tendem a apresentar limitações importantes, principalmente quando aplicados a áreas cuja singularidade morfogenética não segue os modelos clássicos previamente estabelecidos. Desse modo, métodos de inventariação de geopatrimônio podem não valorizar adequadamente feições excepcionais e raras, sendo necessária a criação de novas propostas de validação.

Ao fim do primeiro artigo, concluiu-se que a evolução da Serra das Galés compõe um exemplo clássico de evolução de relevos em carste não-tradicional em arenito, tendo como indutor inicial processos de intemperismo químico seguido a movimentos mecânicos. Trata-se de um típico processo de arenização. Contudo, a Ponte de Pedra demonstrou ser um caso ímpar. Um fluviocarste com presença de espeleotemas característicos de carste tradicional, mas com litologia interna e circundante formada majoritariamente por rochas silicilásticas (em especial, arenito). Logo, desafia os conceitos da literatura já estabelecida. Definir a Ponte de Pedra como um carste tradicional devido à presença de espeleotemas ignora a presença da litologia circundante; de igual maneira, defini-lo como carste não tradicional não reflete a realidade em detrimento do grau de dissolução. Portanto, o caso do fluviocarste da Ponte de Pedra - originada a partir da interação entre o arenito circundante com lentes carbonática demasiadamente solúveis - se situa em uma zona intermediária entre o tradicional e o não tradicional. Sendo assim, deve ser compreendido como um fenômeno com características além dos paradigmas atualmente estabelecidos.

O segundo artigo, baseando-se nos dados de morfogênese também aplicados no primeiro, trouxe uma reflexão acerca dos métodos de valoração do geopatrimônio e comparação entre estes. Comumente as metodologias de avaliação do geopatrimônio consistem na inventariação de geossítios individualmente, sem necessariamente levar em consideração o contexto do geopatrimônio como um todo. Este tipo de abordagem mostrou-se inadequado para a área de estudo, pois atribuiu maior valor para a Serra das Galés do que para a Ponte de Pedra

que, por sua vez, possui morfogênese mais rara. Desse modo, a fim de comparar a Serra das Galés e a Ponte de Pedra, percebeu-se viável a proposta de uma metodologia de inventariação de aspectos diretamente de geopatrimônios, o que possibilita a comparação entre estes e se adequa melhor a realidade do Brasil, um país de dimensões continentais. Tal metodologia proposta possibilitou validar a relevância científica da Ponte de Pedra, devido seu potencial científico, frente à Serra das Galés, que apesar de reconhecida institucionalmente como um símbolo da identidade da cidade de Paraúna, não é dotado de geofomas tão raras.

A relação entre a compreensão da morfogênese e as metodologias de avaliação do valor científico evidencia que a classificação e o inventário do geopatrimônio não devem permanecer desassociados das discussões conceituais presentes na geomorfologia cárstica contemporânea. A análise integrada de ambos os artigos aponta que estas limitações podem distorcer a percepção do potencial científico de tais áreas. De mesmo modo, se fichas quantitativas de avaliação do valor científico seguem baseando alto valor à geopatrimônios consolidados institucionalmente, reforça-se uma hierarquia que favorecem locais já reconhecidos, inibindo assim o destaque de geossistemas cársticos emergentes, justamente que possuem alto potencial científico, portanto, de maior relevância.

Ao propor ajustes metodológicos sobre a fundamentação de evidências morfogenéticas, demonstra-se que a valoração científica não deve prescindir uma leitura refinada dos processos de origem e evolução dos geopatrimônios. As feições cársticas, litologias contrastantes e o resultado diferente da dissolução registrado entre a Serra das Galés e a Ponte de Pedra revelam que instrumentos de avaliação de valor científico devem abarcar a heterogeneidade interna de um sistema cárstico. Dessa forma, ambos os artigos convergem à constatação: compreender o carste em arenito como um espectro multifacetado é essencial não apenas para superar paradigmas teóricos sobre o carste, mas também garantir que metodologias de inventariação se aproximem cada vez mais de uma representação acurada da complexidade real das paisagens avaliadas.

Desse modo, ao integrar as análises morfogenéticas, mineralógicas e metodológicas, reforça-se que: (1) as paisagens cársticas desenvolvidas em arenito podem apresentar graus variados de dissolução, bem como processos híbridos que rompam as definições rígidas entre carste tradicional e não tradicional e (2) a valoração científica de geopatrimônios pode ser ajustada a fim de captar adequadamente a singularidade de sistemas morfologicamente excepcionais e raros, mesmo que pouco institucionalizados. De modo conjunto, ambas as reflexões oferecem aportes tanto teóricos como aplicados para a revisão de paradigmas da

Geomorfologia Cárstica e para o aprimoramento das ferramentas de inventário, gestão e conservação de geopatrimônios nacionais.

BIBLIOGRAFIA

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. R. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014. DOI: [10.1127/0941-2948/2013/0507](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507)
- ANDREYCHOUK, V.; DUBLYANSKY, Y.; EZHOV, Y.; LYSENIN, G. **Karst in the Earth's Crust: its distribution and principal types**. Sosnowiec–Simferopol: University of Silesia – Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, 2009, 72p.
- ANTIĆ, A.; TOMIĆ, N.; MARKOVIĆ, S. Karst-based geotourism in Eastern Carpathian Serbia: exploration and evaluation of natural stone bridges. *Geoconservation Research*, v. 3, n. 2, p. 62–80, 2020.
- AUBRECHT, R.; LÁNEZOS, T.; SMIDA, B.; BREWE-CARÍAS, C.; MAYORAL, F.; SCHLOGL, J.; AUDY, M.; VICEK, L.; KOVÁCIK, L.; GREGOR, M. Venezuelan sandstone caves: a new view on their genesis, hydrogeology and speleothems. *Geomorfologia Croatica*, v. 61, n. 2–3, p. 345–362, 2008. DOI: [10.4154/gc.2008.27](https://doi.org/10.4154/gc.2008.27)
- AUDRA, P.; PALMER, A. N. Research frontiers in speleogenesis: dominant processes, hydrogeological conditions and resulting cave patterns. *Acta Carsologica*, v. 44, n. 3, p. 315–332, 2015. DOI: [10.3986/ac.v44i3.1960](https://doi.org/10.3986/ac.v44i3.1960)
- BAKALOWICZ, M. Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal*, v. 13, n. 1, p. 148–160, 2005. DOI: [10.1007/s10040-004-0402-9](https://doi.org/10.1007/s10040-004-0402-9)
- BENI, M. C. **Análise estrutural do turismo**. 7. ed. São Paulo: SENAC, 2002.
- BENTO, L. C. M.; TRAVASSOS, L. E. P.; RODRIGUES, S. C. Considerações sobre as cavernas quartzíticas do Parque Estadual do Ibitipoca, Minas Gerais, Brasil. *Caminhos de Geografia*, v. 16, n. 54, p. 125–139, 2015. DOI: [10.14393/RCG165429131](https://doi.org/10.14393/RCG165429131)
- BEZERRA, S. G.; SILVA FILHO, V. P.; OLIVEIRA, W. A.; NASCIMENTO, M. A. L. do. **Estratégias para o desenvolvimento do geoturismo nos geossítios Cânions dos Apertados, Pico do Totoró e Mina Brejuí, município de Currais Novos (RN, nordeste do Brasil)**. In: Simpósio Brasileiro de Patrimônio Geológico, 2., 2013, Ouro Preto. Anais... Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2013. v. 1, p. 107–108. DOI: [10.18285/geonomos.v22i1.291](https://doi.org/10.18285/geonomos.v22i1.291)
- BÖGLI, A. **Karst hydrology and physical speleology**. Berlin: Springer-Verlag, 1980. 284 p. DOI: [10.1007/978-3-642-67669-7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-67669-7)
- BONACCI, O. Ponors. In: GUNN, J. (ed.). **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Fitzroy Dearborn, 2004. p. 1282–1283.
- BREITENBACH, S. F. M.; DONGES, J. F.; DALY, B. K.; KOHN, T.; KOHN, T. Two sandstone caves on the southern edge of the Meghalaya Plateau, India. *Cave and Karst Science*, v. 37, n. 2, p. 49–52, 2010.

BRICEÑO, H. O.; SCHUBERT, C. Geomorphology of the Gran Sabana, Guayana Shield, southeastern Venezuela. **Geomorphology**, v. 3, p. 125–141, 1990. DOI: [10.1016/0169-555X\(90\)90041-N](https://doi.org/10.1016/0169-555X(90)90041-N)

BRILHA, J. B. R. **Patrimônio geológico e geoconservação: a conservação da natureza na sua vertente geológica**. Braga: Palimage Editora, 2005. 190 p.

BRILHA, J. Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review. **Geoheritage**, v. 8, p. 119–134, 2016. DOI: [10.1007/s12371-014-0139-3](https://doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3)

ĆALIĆ, J. Karstic uvala revisited: toward a redefinition of the term. **Geomorphology**, v. 134, p. 32–42, 2011. DOI: [10.1016/j.geomorph.2011.06.029](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.029)

CLAUDINO-SALES, V. Morfogeopatrimônio, morfodiversidade: pela afirmação do patrimônio geomorfológico strictu sensu. **Revista Casa da Geografia de Sobral**, v. 20, n. 3, p. 3–12, 2018. DOI: [10.35701/rcgs.v20n3.409](https://doi.org/10.35701/rcgs.v20n3.409)

CORRÊA NETO, A. V.; BAPTISTA FILHO, J. Espeleogênese em quartzitos da Serra do Ibitipoca, Sudeste de Minas Gerais. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 20, p. 75–87, 1997. DOI: [10.11137/1997_0_75-87](https://doi.org/10.11137/1997_0_75-87)

CPRM. Mapa geológico do Estado de Goiás e Distrito Federal. Goiânia: CPRM, 2008. Escala: 1:500.000

CRUZ, K. C.; BENTO, D. M.; SANTOS, D. J.; FREITAS, J. I. M.; CAMPOS, U. P. **Complexo espeleológico da Furna Feia (RN): uma proposta de unidade de conservação**. In: XXX Congresso Brasileiro de Espeleologia, 2009, Montes Claros, MG. Anais... Montes Claros, MG: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2009, p.29-35.

CUCCHI, F. Kamenitzas. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T.; DREYBRODT, W. (eds.). **Karst rock features: karren sculpturing**. Ljubljana; Postojna: Založba ZRC, 2009, p. 139–150. DOI: [10.3986/9789610502968](https://doi.org/10.3986/9789610502968)

CVIJIC, J. Carste: uma monografia geográfica (1895). Belo Horizonte: PUC Minas, 2017. Tradução de Luiz Eduardo Panisset Travassos, 167p.

CVIJIC, J. The evolution of lapies: a study in karst physiography. **Geographical Review**, v. 14, p. 26–49, 1924. DOI: [10.2307/208353](https://doi.org/10.2307/208353)

DAY, M. Cone karst. In: GUNN, J. (ed.). **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Fitzroy Dearborn, 2004. p. 495–498.

DAY, M.; TANG, T. Tower karst. In: GUNN, J. (ed.). **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Fitzroy Dearborn, 2004. p. 1571–1574.

DE WAELE, J.; GUTIÉRREZ, F. **Karst hydrogeology, geomorphology and caves**. 1. ed. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2022. 888 p. DOI: [10.1002/9781119605379](https://doi.org/10.1002/9781119605379).

DE WAELE, J.; PLAN, J.; AUDRA, P. Recent developments in surface and subsurface karst geomorphology: An introduction. **Geomorphology**, v. 106, p. 1–8, 2009. DOI: [10.1016/j.geomorph.2008.09.023](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.09.023).

EBERHARD, R. (ed.). **Pattern & process: towards a regional approach for national estate assessment of geodiversity**. Canberra: Australian Heritage Commission; Environment Forest Taskforce; Environment Australia, 1997. (Technical series, n. 2).

EVANGELISTA, V. K.; TRAVASSOS, L. E. P. Estratégias para o geoturismo e geoconservação no Parque Estadual do Sumidouro, Minas Gerais. **BGJournal**, v. 6, n. 2, p. 67–79, 2015.

EVANGELISTA, V. K.; TRAVASSOS, L. E. P. **Patrimônio geomorfológico do Parque Estadual do Sumidouro**. Belo Horizonte: PUC Minas, 2014, 140p.

FERREIRA, B. M.; CANDEIRO, C. R. A. Sítio de geodiversidade Ponte de Pedra em Paraúna, Goiás, Brasil: caracterização física e utilização na geoeducação. *In*: CARNEIRO, V. A. (org.). **Geodiversidade: envolvimento e experiências**. Anápolis: Editoração dos autores, 2022. p. 120–133.

FERREIRA, B. M.; LIMA, C. L.; CANDEIRO, C. R. A. Geodiversity geological and geomorphological of the municipality of Paraúna, central-southern Goiás state, Brazil. **Sociedade & Natureza**, v. 32, n. 1, p. 586–600, 2020. DOI: [10.14393/SN-v32-2020-47312](https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-47312)

FERREIRA, B. M.; LIMA, C. V.; CANDEIRO, C. R. A. Geoturismo em Paraúna, Goiás, Brasil. **Terrae Didactica**, v. 21, 2025. DOI: [10.20396/td.v21i00.8678474](https://doi.org/10.20396/td.v21i00.8678474).

FORD, D. C.; WILLIAMS, P. W. **Karst hydrogeology and geomorphology**. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 562 p. DOI: [10.1002/9781118684986](https://doi.org/10.1002/9781118684986).

GILLI, E. **Karstology - karsts, caves and springs: elements of fundamental and applied karstology**. Boca Raton: CRC Press, 2015. 244 p. DOI: [10.1201/b18380](https://doi.org/10.1201/b18380)

GINÉS, A. Karrenfield landscapes and karren landforms. *In*: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T.; DREYBRODT, W. (eds.). **Karst rock features: karren sculpturing**. Ljubljana; Postojna: Založba ZRC, 2009. DOI: [10.3986/9789610502968](https://doi.org/10.3986/9789610502968)

GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T.; DREYBRODT, W. (eds.). **Karst rock features: karren sculpturing**. Ljubljana; Postojna: Založba ZRC, 2009. DOI: [10.3986/9789610502968](https://doi.org/10.3986/9789610502968)

GRANDGIRARD, V. L'évaluation des géotopes. **Geologia Insubrica**, v. 4, n. 1, p. 59–66, 1999.

GRAY, M. **Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature**. London: John Wiley & Sons, 2004. 434 p.

GUNN, J. Fluviokarst. *In*: GUNN, J. (ed.). **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Fitzroy Dearborn, 2004. p. 751–753. DOI: [10.4324/9780203483855](https://doi.org/10.4324/9780203483855)

GUNN, J. Valleys in karst. *In*: GUNN, J. (ed.). **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Fitzroy Dearborn, 2004. p. 1607–1610. DOI: [10.4324/9780203483855](https://doi.org/10.4324/9780203483855)

HALLIDAY, W. R. Pseudokarst in the 21st century. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 69, n. 1, p. 103–113, 2007.

HAMILTON-SMITH, E. Karst and world heritage status. *Acta Carsologica*, v. 36, n. 2, p. 291–302, 2007. DOI: [10.3986/ac.v36i2.198](https://doi.org/10.3986/ac.v36i2.198)

HARDT, R. **Patrimônio geomorfológico e geoconservação no Brasil**: proposições metodológicas. 2009. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

HARDT, R.; PINTO, S. A. F. Carste em litologias não carbonáticas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 10, n. 2, p. 99–105, 2009. DOI: [10.20502/rbg.v10i2.134](https://doi.org/10.20502/rbg.v10i2.134)

HARDT, R.; PINTO, S. A. F. **Geomorfossítios do Brasil**: bases conceituais e metodológicas. 2009. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

HARDT, R.; RODET, J.; PINTO, S. A. F.; WILLEMS, L. Exemplos brasileiros de carste em arenito: Chapada dos Guimarães (MT) e Serra do Itaqueri. *Espeleo-Tema*, v. 20, n. 1/2, p. 7–23, 2009.

HARDT, R.; RODET, J.; ZOGBI, L. A. Sandstone and karst development in Brazil. *Karstologia Mémoires*, v. 3, n. 23, 2022.

HEREK, M.; STRINGFIELD, V. T. **Karst**: important karst regions of the Northern Hemisphere. Amsterdam: Elsevier, 1972, 565p.

HOSE, T. A. European geotourism: geological interpretation and geoconservation promotion for tourists. In: BARETTINO, D.; EIMBLETON, W. A. P.; GALLEGO, E. (eds.). **Geological heritage: its conservation and management**. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España, 2000. p. 127–146.

IBÁÑEZ, J.-J.; BREVIK, E. C.; CERDÀ, A. Geodiversity and geoheritage: Detection scientific and geographic biases and gaps through a bibliometric study. *Science of the Total Environment*, v. 659, p. 1032–1044, 2019. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.12.443](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.443)

JENNINGS, J. N. **Karst geomorphology**. Oxford: Basil Blackwell, 1985. 293 p.

KEMPE, S.; HALLIDAY, W. R. **Report on the discussion on pseudokarst**. In: 12th International Congress of Speleology, 1997, Basel, Switzerland. Proceedings... Basel: Speleo Projects (Vol. 6), 1997, p.108.

KLIMCHOUK, A. The karst paradigm: Changes Trends and Perspectives. *Acta Carsologica*, v. 44, n. 3, p. 289–313, 2015. DOI: [10.3986/ac.v44i3.2996](https://doi.org/10.3986/ac.v44i3.2996).

KÖRÖSSY, N. Do “turismo predatório” ao “turismo sustentável”: uma revisão sobre a origem e a consolidação do discurso da sustentabilidade na atividade turística. *Caderno Virtual de Turismo*, v. 8, n. 2, 2008.

KRANJC, A. The origin and evolution of the term “karst”. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, v. 19, p. 567–570, 2011. DOI: [10.1016/j.sbspro.2011.05.170](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.05.170)

LATRUBESSE, E. M.; CARVALHO, T. M. Geomorfologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. *Boletim Goiano de Geografia*, v. 27, n. 3, p. 169–172, 2006.

- LEHMANN, H. Morphological studies in Java. *In*: SWEETING, M. M. (ed.). **Karst geomorphology**. Stroudsburg: Hutchinson Ross, 1982. p. 320–328.
- LOBO, H. A. S. **Geodiversidade e geoconservação**: estudo aplicado ao município de São Desidério (BA). 2013. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- LOBO, H. A. S.; BOGGIANI, P. C. Cavernas como patrimônio geológico. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 70, n. 1, p. 190–199, 2013. DOI:[10.5380/geo.v70i0.31698](https://doi.org/10.5380/geo.v70i0.31698).
- LUHR, J. F. (ed.). **Earth**. New York: Smithsonian Institution; Dorling Kindersley, 2003. 520 p.
- LUNDBERG, J.; GINÉS, A. Rillenkarren. *In*: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T.; DREYBRODT, W. (eds.). **Karst rock features**: karren sculpturing. Ljubljana; Postojna: Založba ZRC, 2009. DOI: [10.3986/9789610502968](https://doi.org/10.3986/9789610502968)
- MAIA, R. P. Aspectos morfoestruturais do carste em arenitos no Nordeste Brasileiro: O caso de Castelo do Piauí. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 3, 2023. DOI: [10.20502/rbg.v24i3.2249](https://doi.org/10.20502/rbg.v24i3.2249).
- MAIA, R.P.; NASCIMENTO, M.A.L.; BEZERRA, F.H.R.; CASTRO, H.S.; MEIRELES, A.J.A.; ROTHIS, L.M. Geomorfologia do campo de inselbergues de Quixadá, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 2, 2015. DOI: [10.20502/rbg.v16i2.651](https://doi.org/10.20502/rbg.v16i2.651).
- MARTINI, J. E. J. Karst in Black Reef Quartzite near Kaapsehoop, Eastern Transvaal. **Annals of the South African Geological Survey**, v. 13, p. 115–128, 1979..
- MARTINS, F. P.; SALGADO, A. A. R.; BARRETO, H. N. Morfogênese da Chapada das Mesas (Maranhão-Tocantins): Paisagem cárstica e poligenética. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 3, 2017. DOI: [10.20502/rbg.v18i3.1180](https://doi.org/10.20502/rbg.v18i3.1180)
- MAZZUCATO, E.; MUCIVUNA, V.C.; TOLEDO, D.L.C.B.; GARCIA, M.G.M. Patrimônio geomorfológico brasileiro: análise das publicações sobre inventários de geomorfossítios. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 25, n. 2, 2024. DOI: [10.20502/rbgeomorfologia.v25i2.2433](https://doi.org/10.20502/rbgeomorfologia.v25i2.2433)
- MEIRA, S. A.; NASCIMENTO, M. A. L. . Valores de Geodiversidade da Serra dos Tapuias – Riachão das Neves, Bahia. **Entre-Lugar**, v. 6, n. 12, p. 171–188, 2016.
- MEIRA, S. A.; SANTOS, G. B. Potencialidades educativas de aspectos geomorfológicos da Serra dos Tapuias – Bahia. **Revista Geonorte**, v. 10, n. 1, p. 142–146, 2014.
- MELO, M. S.; GUIMARÃES, G. B.; CHINELATTO, A. L.; GIANNI, P. C. F.; PONTES, H. S.; CHINELATTO, A. S. A.; ATENCIO, D. Kaolinite, illite and quartz dissolution in the karstification of Paleozoic sandstones of the Furnas Formation, Paraná Basin, Southern Brazil.. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 63, p. 20–35, 2015. DOI: [10.1016/j.jsames.2015.06.011](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.06.011)
- MILANOVIĆ, P. T. **Karst hydrogeology**. Littleton, CO: Water Resources Publications, 1981, 434p.

MOREIRA, H.G.B.; CAMINHAS, F.G.; BUENO, G.T.; ZANCOPE, M.H. Distribuição dos solos e pedogênese em uma topossequência com vereda no Parque Estadual de Paraúna – Goiás (GO). *Revista Mirante*, v.17, n.1, p.179–194, 2024.

MOURA-FÉ, M. M. Inventário do patrimônio geomorfológico: método de seleção, avaliação e classificação de geomorfossítios e sítios geomorfológicos. *Revista Ibero-Afro-Americana de Geografia Física e Ambiente*, v. 6, n. 1, p. 1–23, 2024.

NASCIMENTO, M. A. L. do; RUCHKYS, U. A.; MANTESSO-NETO, V. **Geodiversidade, geoconservação e geoturismo**: trinômio importante para a proteção do patrimônio geológico. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 2008. 82 p. DOI: [10.1590/S1982-45132009000200015](https://doi.org/10.1590/S1982-45132009000200015)

NASCIMENTO, M. A. L.; CARVALHO, H. L. **Geodiversidade no centro histórico de Natal/RN (NE do Brasil)**. In: II Simpósio Brasileiro de Patrimônio Geológico, 2013, Ouro Preto. Anais... Ouro Preto: II Simpósio Brasileiro de Patrimônio Geológico, 2013.

OLIVEIRA, P. C. A.; RODRIGUES, S. C. Patrimônio geomorfológico: Conceitos e Aplicações. *Espaço Aberto*, v. 4, n. 1, p. 73–86, 2014. DOI: [10.36403/espacoaberto.2014.2434](https://doi.org/10.36403/espacoaberto.2014.2434)

ORNDORFF, R.C.; WEARY, D.J.; HARRISON, R.W. The role of sandstone in the development of an Ozark karst system, south-central Missouri. In: HARMON, R.S.; WICKS, C. (Eds.). **Perspectives on karst geomorphology, hydrology and geochemistry** – A tribute volume to Derek C. Ford and William B. White. Boulder: Geological Society of America, 2006. Special Paper 404, p. 31–38. DOI: [10.1130/2006.2404\(04\)](https://doi.org/10.1130/2006.2404(04))

PALMER, A. N. Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, v. 103, p. 1–21, 1991. DOI: [10.1130/0016-7606\(1991\)103<0001:OAMOLC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)103<0001:OAMOLC>2.3.CO;2)

PANIZZA, M.; PIACENTE, S. Geomorphosites and geotourism. *Revista Geográfica Acadêmica*, v. 2, n. 1, p. 5–9, 2008.

PEREIRA, P.; PEREIRA, D. Í.; ALVES, M. I. C. Avaliação do patrimônio geomorfológico: proposta de metodologia. *Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, v. 5, p. 235–247, 2007.

PILÓ, L. B. Geomorfologia cárstica (Revisão de literatura). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 1, n. 1, 2000. DOI: [10.20502/rbg.v1i1.73](https://doi.org/10.20502/rbg.v1i1.73)

PONTES, H.S.; FERNANDES, L.A.; MELO, M.S.; GUIMARÃES, G.B.; MASSUQUETO, L.L. Características litofaciológicas e aspectos genéticos de feições cársticas da Formação Furnas e Arenito Vila Velha no município de Ponta Grossa (Paraná, Brasil). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.23, n.1, 2022. <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i1.2085>

QUEIROZ, L. S.; DINIZ, M. T. M.; MEDEIROS, J. F.; PEREIRA, P.; ARAÚJO, I. G. D.; TERTO, M. L. O. A methodological contribution to assess rock landform geomorphosites related with pareidolia: a case study in Northeast Brazil. *Geomorphology*, v. 485, n. 1, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.109858>

REYNARD, E.; BRILHA, J. Geoheritage: a multidisciplinary and applied research topic. In: REYNARD, E.; BRILHA, J. (eds.). **Geoheritage**: assessment, protection and management. Amsterdam: Elsevier, 2018. p. 3–9. DOI: [10.1016/B978-0-12-809531-7.00030-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00030-7)

RODET, J.; WILLEMS, L.; POUCKET, A. The Rio Peruaçu Basin: an impressive multiphased karst system. *In*: VIEIRA, B. C.; SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C. (eds.). **Landscapes and landforms of Brazil**. Dordrecht: Springer, 2015. p. 171–181. DOI: [10.1007/978-94-017-8023-0_15](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8023-0_15)

ROGLIĆ, J. Karst valleys in the Dinaric karst. **Erdkunde**, p. 113–116, 1964. DOI: [10.3112/erdkunde.1964.02.06](https://doi.org/10.3112/erdkunde.1964.02.06)

SCHOBENHAUS, C.; SILVA, C.R. O papel do serviço geológico do Brasil na criação de geoparques e na conservação do patrimônio geológico. *In* SCHOBENHAUS, C.; SILVA, C.R. (org.) **Geoparques do Brasil: Propostas**. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2012, 745p.

SHARPLES, C. **Concepts and principles of geoconservation**. 3. ed. Hobart: Tasmanian Parks & Wildlife Service, 2002

SELLIER, D. L'analyse intégrée du relief e a seleção déductive des géomorphosites: application à la Charente-Maritime (France). **Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement**, v. 2, p. 199–214, 2010. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.7931>

SIEG. Mapeamento de solos do Brasil a partir de compilações (Embrapa, IBGE) e conversão para o meio digital de levantamentos de solos produzidos pelo Projeto RADAMBRASIL. Goiânia: SIEG, 2017. Escala: 1:250.000

SILVA, M. B.; MAIA, R. P. Morphostructural aspects of the sandstone karst in Northeastern Brazil: Example from Serra da Capivara – PI. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 25, n. 1, 2024. DOI: [10.20502/rbgeomorfologia.v25i1.2392](https://doi.org/10.20502/rbgeomorfologia.v25i1.2392)

SOUZA, F. C. R. **Caracterização de feições cársticas desenvolvidas em quartzitos na região sudeste de Diamantina/MG**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, 2014. 229 p.

SOUZA, T. A. R.; SALGADO, A. A. R.; AULER, A. S. O carste em mármore na borda oeste da Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 1, 2019. DOI: [10.20502/rbg.v20i1.1457](https://doi.org/10.20502/rbg.v20i1.1457)

STANLEY, M. Geodiversity. **Earth Heritage**, n. 14, p. 15–18, 2000. DOI: [10.5465/ame.2000.4468059](https://doi.org/10.5465/ame.2000.4468059).

STRADIOTO, M.R.; KIANG, C.H.; CHANG, M.R.C. Petrography and diagenetic aspects of the Bauru Group sandstones in the southwestern region of the São Paulo State. **Geociências**, v.61, n.4, p.433–441, 2008. DOI: [10.1590/S0370-44672008000400005](https://doi.org/10.1590/S0370-44672008000400005)

SUNKAR, A; LAKSPRIYANTI, A.P.; HARYONO, E.; BRAHMI, M.; SETIAWAN, P.; JAYA, A.F. Geotourism Hazards and Carrying Capacity in Geosites of Sangkulirang-Mangkalihat Karst, Indonesia. **Sustainability**, v.14, 2022.

SWEETING, M. M. **Karst landforms**. London: Macmillan; New York: Columbia University Press, 1972.

TIMO, M. B.; TRAVASSOS, L. E. P. **Geopatrimônio e geoturismo na paisagem cárstica**. 1. ed. Belo Horizonte: PUC Minas, 2022. 101 p.

TRAVASSOS, L. E. P. **Princípios de carstologia e geomorfologia cárstica**. 1. ed. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2019. 242 p.

TRICART, J.; SILVA, T. C. Un exemple d'évolution karstique en milieu tropical esc: Le morne de Bom Jesus da Lapa (Bahia, Bresil). *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 4, p. 29–42, 1960.

UNESCO. Convenção para a protecção do património mundial, cultural e natural. Paris: UNESCO, 1972, 20p. Disponível em: < <http://whc.unesco.org/archive/convention-pt.pdf>>. Acesso em: Set. 2024.

VERESS, M. Karst type and their karstification. *Journal of Earth Science*, v. 31, n. 3, p. 621–634, 2020. DOI: [10.1007/s12583-020-1306-x](https://doi.org/10.1007/s12583-020-1306-x).

VERESS, M. Rinnenkarren. *In*: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T.; DREYBRODT, W. (eds.). **Karst rock features: karren sculpturing**. Ljubljana; Postojna: Založba ZRC, 2009. DOI: [10.3986/9789610502968](https://doi.org/10.3986/9789610502968)

WALTHAM, T. Fengcong, fenglin, cone karst and tower karst. *Cave and Karst Science*, v. 35, n. 3, p. 77–88, 2008.

WALTHAM, T.; FOOKES, P. G. Engineering classification of karst ground. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, v. 36, p. 101–118, 2003. DOI: [10.1144/1470-9236/2002-33](https://doi.org/10.1144/1470-9236/2002-33)

WHITE, W. B. **Geomorphology and hydrology of karst terrains**. 1. ed. Oxford: Oxford University Press, 1988. 464 p.

WHITE, W. B. The evolution of Appalachian fluviokarst: Competition between stream erosion, cave development, surface denudation, and tectonic uplift. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 71, n. 3, p. 159–167, 2009. DOI: [10.4311/jcks2008es0046](https://doi.org/10.4311/jcks2008es0046).

WIEDENBEIN, F. W. Origin and use of the term “geotope” in German-speaking countries. *In*: O'HALLORAN, D.; GREEN, C.; HARLEY, M.; STANLEY, M.; KNILL, J. (eds.). **Geological and landscape conservation**. London: Geological Society, 1994. p. 117–120.

WILLEMS, L.; RODET, J.; POUCKET, A.; MELO, S.; RODET, M.J.; COMPERE, P.; HATERT, F.; AULER, A. Karsts in sandstone and quartzites of Minas Gerais, Brazil. *Cadernos Lab. Xeolóxicos de Laxe*, v.33, p.127–138, 2008

WILLIAMS, P. Geomorphic inheritance and the development of tower karst. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 12, n. 5, p. 453–465, 1987. DOI: [10.1002/esp.3290120503](https://doi.org/10.1002/esp.3290120503)

WILLIAMS, P. **World heritage caves and karst**. Gland: IUCN, 2008. 57 p.

WRAY, R. A. L. A global review of solutional weathering forms on quartz sandstones. *Earth-Science Reviews*, v. 42, n. 3, p. 137–160, 1997. DOI: [10.1016/S0012-8252\(96\)00056-6](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(96)00056-6)

WRAY, R. A. L.; SAURO, F. An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites. *Earth-Science Reviews*, v. 171, p. 520–557, 2017. DOI: [10.1016/j.earscirev.2017.06.008](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.008)

YOUNG, R. Bungle Bungle: tower karst in sandstone. *In*: MIGON, P. (ed.). **Geomorphological landscapes of the world**. Dordrecht: Springer, 2010. p. 333–340. DOI: [10.1007/978-90-481-3055-9_34](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3055-9_34)

ANEXO A – FICHA DE AVALIAÇÃO DO VALOR CIENTÍFICO (VCI)

| Identificação do Geomorfossítio | |
|---|--------------|
| Nome: | |
| Código: | |
| Critérios / Indicadores | Parâmetros |
| A - REPRESENTATIVIDADE | |
| O geomorfossítio é o melhor exemplo na área de estudo para ilustrar formas ou processos. | [] 4 pontos |
| O geomorfossítio é um bom exemplo na área de estudo para ilustrar formas ou processos | [] 2 pontos |
| O geomorfossítio ilustra razoavelmente elementos ou processos na área de estudo | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores | [] 0 ponto |
| B – LOCALIDADE-CHAVE | |
| O geomorfossítio faz parte de um Geoparque Mundial da UNESCO (UGGp - UNESCO Global Geoparks) e/ou é um sítio cadastrado no grupo de trabalho de geomorfossítios da IAG - International Association of Geomorphologists. | [] 4 pontos |
| O geomorfossítio é utilizado pela ciência internacional. | [] 2 pontos |
| O geomorfossítio é utilizado pela ciência nacional e/ou está cadastrado no Geossit (Cadastro de sítios geológicos do Serviço Geológico do Brasil - SBG), na temática geomorfológica. | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores | [] 0 ponto |
| C – CONHECIMENTO CIENTÍFICO | |
| Existem artigos em revistas científicas internacionais sobre este geomorfossítio. | [] 4 pontos |
| Existem artigos em revistas científicas nacionais sobre este geomorfossítio. | [] 2 pontos |
| Existem resumos apresentados em eventos científicos internacionais sobre este geomorfossítio. | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto |
| D – INTEGRIDADE | |
| Os principais elementos geomorfológicos encontram-se muito bem conservados . | [] 4 pontos |
| Geomorfossítio não tão bem preservado, mas os principais elementos geomorfológicos ainda estão conservados . | [] 2 pontos |
| Geomorfossítio com problemas de conservação e com os principais elementos geomorfológicos bastante alterados ou modificados . | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores | [] 0 ponto |
| E – DIVERSIDADE GEOMORFOLÓGICA | |
| Geomorfossítio com mais de 3 tipos de formas geomorfológicas distintas com relevância científica | [] 4 pontos |
| Geomorfossítio com 3 tipos de formas geomorfológicas distintas com relevância científica. | [] 2 pontos |

| | | |
|--|-------------|----------------------|
| Geomorfossítio com 2 tipos de formas geomorfológicas distintas com relevância científica. | | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | | [] 0 ponto |
| F – RARIDADE | | |
| O geomorfossítio é a única ocorrência deste tipo na área de estudo. | | [] 4 pontos |
| Na área de estudo existem 2 a 3 exemplos de geomorfossítios semelhantes . | | [] 2 pontos |
| Na área de estudo, existem 4 a 5 exemplos de geomorfossítios semelhantes . | | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | | [] 0 ponto |
| G – LIMITAÇÕES DE USO | | |
| O geomorfossítio não tem limitações (permissões legais, barreiras físicas etc.) para fazer trabalho de campo, incluindo amostragem. | | [] 4 pontos |
| É possível fazer trabalho de campo depois de superar as limitações | | [] 2 pontos |
| O trabalho de campo são muito difíceis de realizar devido a limitações difíceis de ultrapassar | | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores | | [] 0 ponto |
| CRITÉRIO | SOMA | PESOS |
| A – Representatividade | | X Peso: 30% |
| B – Localidade-chave | | X Peso: 20% |
| C – Conhecimento científico | | X Peso: 5% |
| D – Integridade | | X Peso: 15% |
| E – Diversidade Geomorfológica | | X Peso: 5% |
| F – Raridade | | X Peso: 15% |
| G – Limitações de uso | | X Peso: 10% |
| | | Total (100%): |

Fonte: Moura-Fé, 2024. Adaptação: os autores

ANEXO B – FICHA DE AVALIAÇÃO DO VALOR EDUCACIONAL (VED)

| Identificação do Geomorfofóssítio | |
|---|--------------|
| Nome: | |
| Código: | |
| Critérios / Indicadores | Parâmetros |
| A - VULNERABILIDADE | |
| Os elementos geomorfológicos do sítio não apresentam possível deterioração por atividade antrópica | [] 4 pontos |
| Existe a possibilidade de deterioração de elementos geomorfológicos secundários por atividade antrópica | [] 3 pontos |
| Existe a possibilidade de deterioração dos principais elementos geomorfológicos por atividade antrópica. | [] 2 pontos |
| Existe a possibilidade de deterioração de todos os elementos geomorfológicos pela atividade antrópica | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto |
| B – ACESSIBILIDADE | |
| Sítio localizado a menos de 100 m de estrada asfaltada e com estacionamento para ônibus. | [] 4 pontos |
| Sítio localizado a menos de 500 m de estrada asfaltada . | [] 3 pontos |
| Local acessível por ônibus, mas por estrada integralmente em leito natural . | [] 2 pontos |
| Local sem acesso direto por estrada , mas localizado a menos de 1 km de uma estrada acessível por ônibus, através de trilha sinalizada. | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto |
| C – LIMITAÇÕES DE USO | |
| O sítio não tem limitações (legais, permissões, físicas, animais, cheias, chuvas, marés, etc.) para ser usado por estudantes. | [] 4 pontos |
| O sítio pode ser usado por estudantes, mas apenas ocasionalmente . | [] 3 pontos |
| O local pode ser utilizado por estudantes, mas apenas após ultrapassar as limitações . | [] 2 pontos |
| A utilização por estudantes e turistas é muito difícil de concretizar devido a limitações difíceis de ultrapassar. | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto |
| D – INTEGRIDADE | |
| Local com instalações de segurança (cercas, escadas, corrimões etc.), cobertura de telefonia móvel e localizado a menos de 5 km de serviços de emergência. | [] 4 pontos |
| Local com instalações de segurança (cercas, escadas, corrimões etc.), cobertura de telefonia móvel e localizado a menos de 25 km de serviços de emergência. | [] 3 pontos |
| Local sem segurança, mas com cobertura de telefonia móvel e localizado a menos de 50 km dos serviços de emergência. | [] 2 pontos |

| | |
|---|--------------|
| Local sem segurança, sem cobertura de telefonia móvel e localizado a mais de 50 km de serviços de emergência. | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto |
| E – LOGÍSTICA | |
| Hospedagem e restaurantes para grupos de 50 pessoas a menos de 15 km do local. | [] 4 pontos |
| Hospedagem e restaurantes para grupos de 50 pessoas a menos de 50 km do local. | [] 3 pontos |
| Hospedagem e restaurantes para grupos de 50 pessoas a menos de 100 km do local. | [] 2 pontos |
| Hospedagem e restaurantes para grupos de até 25 pessoas e a menos de 50 km do local. | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto |
| F – DENSIDADE POPULACIONAL | |
| Sítio localizado em município com mais de 1.000 habitantes/km² . | [] 4 pontos |
| Sítio localizado em município com 250–1.000 habitantes/km² . | [] 3 pontos |
| Sítio localizado em município com 100–250 habitantes/km² . | [] 2 pontos |
| Sítio localizado em município com menos de 100 habitantes/km² . | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto |
| G – ASSOCIAÇÃO COM OUTROS VALORES | |
| Ocorrência de vários valores ecológicos e culturais a menos de 5 km de distância do local. | [] 4 pontos |
| Ocorrência de vários valores ecológicos e culturais a menos de 10 km de distância do local. | [] 3 pontos |
| Ocorrência de UM valor ecológico E UM valor cultural a menos de 10 km de distância do local. | [] 2 pontos |
| Ocorrência de um valor ecológico OU cultural a menos de 10 km de distância do local. | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto |
| H – CENÁRIO | |
| Local regularmente utilizado como destino turístico em campanhas nacionais . | [] 4 pontos |
| Local ocasionalmente utilizado como destino turístico em campanhas nacionais . | [] 3 pontos |
| Sítio regularmente usado como destino turístico em campanhas locais / regionais . | [] 2 pontos |
| Local ocasionalmente usado como destino turístico em campanhas locais / regionais . | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto |
| I – SINGULARIDADE | |
| O sítio mostra características únicas e incomuns considerando este país e os países vizinhos . | [] 4 pontos |
| O sítio mostra características únicas e incomuns no país . | [] 3 pontos |
| O sítio mostra características comuns nesta região , mas são incomuns em outras regiões do país . | [] 2 pontos |

| | | | |
|--|--------------|--------------|--------------|
| O sítio mostra características bastante comuns em todo o país . | [] 1 ponto | | |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto | | |
| J – CONDIÇÕES DE OBSERVAÇÃO | | | |
| Todos os elementos geomorfológicos são observados em boas condições . | [] 4 pontos | | |
| Existem alguns obstáculos que dificultam a observação de alguns elementos geomorfológicos . | [] 3 pontos | | |
| Existem alguns obstáculos que dificultam a observação dos principais elementos geomorfológicos . | [] 2 pontos | | |
| Existem alguns obstáculos que quase obstruem a observação dos principais elementos geomorfológicos . | [] 1 ponto | | |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto | | |
| K – POTENCIAL DIDÁTICO | | | |
| O sítio apresenta elementos geomorfológicos que são ensinados em todos os níveis de ensino. | [] 4 pontos | | |
| O sítio apresenta elementos geomorfológicos que são ensinados nas escolas de ensino fundamental . | [] 3 pontos | | |
| O sítio apresenta elementos geomorfológicos que são ensinados nas escolas de ensino médio . | [] 2 pontos | | |
| O sítio apresenta elementos geomorfológicos que são ensinados na universidade . | [] 1 ponto | | |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto | | |
| L – DIVERSIDADE GEOMORFOLÓGICA | | | |
| Mais de 3 tipos de elementos geomorfológicos ocorrem no sítio (formas, processos etc.) | [] 4 pontos | | |
| Existem 3 tipos de elementos geomorfológicos no sítio. | [] 3 pontos | | |
| Existem 2 tipos de elementos geomorfológicos no sítio. | [] 2 pontos | | |
| Existe apenas 1 tipo de elemento geomorfológico no local. | [] 1 ponto | | |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto | | |
| CRITÉRIO | SOMA | PESOS | TOTAL |
| A – Vulnerabilidade | | X Peso: 10% | |
| B – Acessibilidade | | X Peso: 10% | |
| C – Limitações de uso | | X Peso: 5% | |
| D – Segurança | | X Peso: 10% | |
| E – Logística | | X Peso: 5% | |
| F – Densidade da população | | X Peso: 5% | |
| G – Associação com outros valores | | X Peso: 5% | |
| H – Cenário | | X Peso: 5% | |
| I – Singularidade | | X Peso: 5% | |
| J – Condições de observação | | X Peso: 10% | |
| K – Potencial didático | | X Peso: 20% | |

| | | | |
|---------------------------------------|--|----------------------|--|
| L – Diversidade geomorfológica | | X Peso: 10% | |
| | | Total (100%): | |

Fonte: Moura-Fé, 2024. Adaptação: os autores

ANEXO C – FICHA DE AVALIAÇÃO DO VALOR TURÍSTICO (VTU)

| Identificação do Geomorfofóssítio | |
|---|--------------|
| Nome: | |
| Código: | |
| Critérios / Indicadores | Parâmetros |
| A - VULNERABILIDADE | |
| Os elementos geomorfológicos do sítio não apresentam possível deterioração por atividade antrópica. | [] 4 pontos |
| Existe a possibilidade de deterioração de elementos geomorfológicos secundários por atividade antrópica. | [] 3 pontos |
| Existe a possibilidade de deterioração dos principais elementos geomorfológicos por atividade antrópica. | [] 2 pontos |
| Existe a possibilidade de deterioração de todos os elementos geomorfológicos pela atividade antrópica. | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto |
| B – ACESSIBILIDADE | |
| Sítio localizado a menos de 100 m de estrada asfaltada e com estacionamento para ônibus. | [] 4 pontos |
| Sítio localizado a menos de 500 m de estrada asfaltada . | [] 3 pontos |
| Local acessível por ônibus, mas por estrada integralmente em leito natural . | [] 2 pontos |
| Local sem acesso direto por estrada , mas localizado a menos de 1 km de uma estrada acessível por ônibus, através de trilha sinalizada. | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto |
| C – LIMITAÇÕES DE USO | |
| O sítio não tem limitações para ser usado por turistas (legais, permissões, físicas, animais, cheias, chuvas, marés, etc.). | [] 4 pontos |
| O sítio pode ser usado por turistas, mas apenas ocasionalmente . | [] 3 pontos |
| O local pode ser utilizado por turistas, mas apenas após ultrapassar as limitações . | [] 2 pontos |
| A utilização por estudantes e turistas é muito difícil de se concretizar devido a limitações difíceis de ultrapassar. | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto |
| D – SEGURANÇA | |
| Local com instalações de segurança (cercas, escadas, corrimões etc.), cobertura de telefonia móvel e localizado a menos de 5 km de serviços de emergência. | [] 4 pontos |
| Local com instalações de segurança (cercas, escadas, corrimões etc.), cobertura de telefonia móvel e localizado a menos de 25 km de serviços de emergência. | [] 3 pontos |
| Local sem segurança, mas com cobertura de telefonia móvel e localizado a menos de 50 km dos serviços de emergência. | [] 2 pontos |

| | |
|--|--------------|
| Local sem segurança, sem cobertura de telefonia móvel e localizado a mais de 50 km de serviços de emergência. | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto |
| E – LOGÍSTICA | |
| Hospedagem e restaurantes para grupos de 50 pessoas a menos de 15 km do local. | [] 4 pontos |
| Hospedagem e restaurantes para grupos de 50 pessoas a menos de 50 km do local. | [] 3 pontos |
| Hospedagem e restaurantes para grupos de 50 pessoas a menos de 100 km do local. | [] 2 pontos |
| Hospedagem e restaurantes para grupos de até 25 pessoas e a menos de 50 km do local. | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto |
| F – DENSIDADE POPULACIONAL | |
| Sítio localizado em município com mais de 1.000 habitantes/km² . | [] 4 pontos |
| Sítio localizado em município com 250–1.000 habitantes/km² . | [] 3 pontos |
| Sítio localizado em município com 100–250 habitantes/km² . | [] 2 pontos |
| Sítio localizado em município com menos de 100 habitantes/km² . | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto |
| G – ASSOCIAÇÃO COM OUTROS VALORES | |
| Ocorrência de vários valores ecológicos e culturais a menos de 5 km de distância do local. | [] 4 pontos |
| Ocorrência de vários valores ecológicos e culturais a menos de 10 km de distância do local. | [] 3 pontos |
| Ocorrência de UM valor ecológico E UM valor cultural a menos de 10 km de distância do local. | [] 2 pontos |
| Ocorrência de um valor ecológico OU cultural a menos de 10 km de distância do local. | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto |
| H – CENÁRIO | |
| Local regularmente utilizado como destino turístico em campanhas nacionais . | [] 4 pontos |
| Local ocasionalmente utilizado como destino turístico em campanhas nacionais . | [] 3 pontos |
| Sítio regularmente usado como destino turístico em campanhas locais / regionais . | [] 2 pontos |
| Local ocasionalmente usado como destino turístico em campanhas locais / regionais . | [] 1 ponto |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto |
| I – SINGULARIDADE | |
| O sítio mostra características únicas e incomuns considerando este país e os países vizinhos . | [] 4 pontos |
| O sítio mostra características únicas e incomuns no país . | [] 3 pontos |
| O sítio mostra características comuns nesta região , mas são incomuns em outras regiões do país . | [] 2 pontos |

| | | | |
|---|--------------|--------------|--------------|
| O sítio mostra características bastante comuns em todo o país . | [] 1 ponto | | |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto | | |
| J – CONDIÇÕES DE OBSERVAÇÃO | | | |
| Todos os elementos geomorfológicos são observados em boas condições . | [] 4 pontos | | |
| Existem alguns obstáculos que dificultam a observação de alguns elementos geomorfológicos . | [] 3 pontos | | |
| Existem alguns obstáculos que dificultam a observação dos principais elementos geomorfológicos . | [] 2 pontos | | |
| Existem alguns obstáculos que quase obstruem a observação dos principais elementos geomorfológicos . | [] 1 ponto | | |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto | | |
| K – POTENCIAL INTERPRETATIVO | | | |
| O sítio apresenta elementos geomorfológicos de forma muito clara e expressiva para todos os tipos de público . | [] 4 pontos | | |
| O público precisa ter algum conhecimento geomorfológico para entender os elementos geomorfológicos do local. | [] 3 pontos | | |
| O público precisa ter sólida formação e/ou experiência geomorfológica para entender os elementos geomorfológicos do local. | [] 2 pontos | | |
| O sítio apresenta elementos geomorfológicos compreensíveis apenas para geomorfológos/as especialistas. | [] 1 ponto | | |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto | | |
| L – NÍVEL ECONÔMICO | | | |
| O local está localizado em um município com renda familiar de, pelo menos, o dobro da média nacional. | [] 4 pontos | | |
| O local está localizado em um município com renda familiar superior à média nacional. | [] 3 pontos | | |
| O local está localizado em um município com renda familiar semelhante à média nacional. | [] 2 pontos | | |
| O local está localizado em um município com renda familiar inferior à média nacional. | [] 1 ponto | | |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto | | |
| M – PROXIMIDADE COM ÁREA DE LAZER | | | |
| Local localizado a menos de 5 km de uma área de lazer ou atração turística. | [] 4 pontos | | |
| Local localizado entre 5 e 10 km de uma área de lazer ou atração turística. | [] 3 pontos | | |
| Local localizado entre 10 e 20 km de uma área de lazer ou atração turística. | [] 2 pontos | | |
| Local localizado a mais de 20 km de uma área de lazer ou atração turística. | [] 1 ponto | | |
| Não se aplica nenhum dos indicadores. | [] 0 ponto | | |
| CRITÉRIO | SOMA | PESOS | TOTAL |
| A - Vulnerabilidade | | X Peso: 10% | |
| B - Acessibilidade | | X Peso: 10% | |

| | | | |
|-----------------------------------|--|----------------------|--|
| C - Limitações de uso | | X Peso: 5% | |
| D - Segurança | | X Peso: 10% | |
| E - Logística | | X Peso: 5% | |
| F - Densidade da população | | X Peso: 5% | |
| G - Associação com outros valores | | X Peso: 5% | |
| H - Cenário | | X Peso: 15% | |
| I - Singularidade | | X Peso: 10% | |
| J - Condições de observação | | X Peso: 5% | |
| K - Potencial interpretativo | | X Peso: 10% | |
| L - Nível econômico | | X Peso: 5% | |
| M - Proximidade de áreas de lazer | | X Peso: 5% | |
| | | Total (100%): | |

Fonte: Moura-Fé, 2024. Adaptação: os autores

**ANEXO D – ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA BRASILEIRA DE
GEOMORFOLOGIA: “BEYOND THE TRADITIONAL AND NON-TRADITIONAL
KARST DICHOTOMY: INSIGHTS FROM SANDSTONE LANDFORMS IN THE
CENTRAL PLATEAU OF SOUTH AMERICA”**

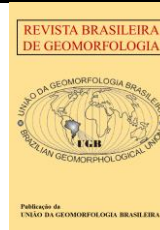


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 26, n° 4 (2025)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v26i4.2747>



Research Article

Beyond the Traditional and Non-Traditional Karst Dichotomy: Insights from Sandstone Landforms in the Central Plateau of South America

Além da dicotomia do Carste tradicional e não tradicional: novas perspectivas sobre geoformas areníticas no Planalto Central da América do Sul

Guilherme Lima Brasil dos Santos¹, André Augusto Rodrigues Salgado² e Luiz Eduardo Panisset Travassos³

¹ Federal University of Goiás, Graduate Program in Environmental Sciences (CIAMB). Goiânia, Brazil. guilhermelbrasil@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5342-9697>

² Federal University of Goiás, Institute of Socioenvironmental Studies, Goiânia, Brazil. salgado@ufg.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7679-5944>

³ Pontifical Catholic University of Minas Gerais, Department of Geography, Belo Horizonte, Brazil.

luizepanisset@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6264-2429>

Received: 28/08/2025; Accepted: 11/11/2025; Published: 28/11/2025

Abstract: This study analyses two distinct karstic sandstone landscapes—Serra das Galés and Ponte de Pedra (GO)—located in the Central Plateau of South America, Brazil. Considering that the former constitutes a ruiniform relief and the latter a fluviokarst, the objective was to discuss the conceptual boundaries between traditional and non-traditional karst. Based on geomorphological mapping, aerial photogrammetry, and geochemical analyses by X-ray fluorescence (XRF), morphogenetic processes in both areas were investigated. In Serra das Galés, the high silica purity, absence of calcium and magnesium oxides, and the geometry of the features suggest a process dominated by arenization and mechanical collapse (piping). In contrast, at Ponte de Pedra, caves, speleothems, and structural collapses associated with the dissolution of carbonate lenses interbedded within sandstone indicate hybrid morphogenesis. The results challenge the binary classification between traditional karst (in carbonate rocks) and non-traditional karst (in non-carbonate lithologies), suggesting the need to understand karstification as a spectrum of processes that vary according to lithological solubility and erosion mechanisms. This approach is relevant for geomorphological mapping, geoheritage inventories, and the management of areas with geoconservation value developed in mixed or atypical substrates.

Keywords: Mixed lithology karst; Ruiniform Relief; Fluviokarst; Sandstone speleogenesis

Resumo: Este estudo analisa duas paisagens distintas de relevo cárstico em arenito — a Serra das Galés e a Ponte de Pedra (GO) — localizadas no Planalto Central da América do Sul no Brasil. Considerando-se que a primeira constitui um relevo ruiforme e a segunda um fluviocarste, objetivou-se discutir os limites conceituais entre carste tradicional e não tradicional. A partir de mapeamento geomorfológico, fotogrametria aérea e análises geoquímicas por fluorescência de raios X (XRF), investigaram-se os processos morfogenéticos nas duas áreas. Na Serra das Galés, a alta pureza silicosa, a ausência de óxidos de cálcio e magnésio e a geometria das feições sugerem um processo dominado por arenização e colapso mecânico (*piping*). Já na Ponte de Pedra, observam-se cavernas, espeleotemas e colapsos estruturais associados à dissolução de lentes carbonáticas intercaladas ao arenito, indicando morfogênese híbrida. Os resultados desafiam a classificação binária entre carste tradicional (em rochas carbonáticas) e não tradicional (em litologias não carbonáticas), sugerindo a necessidade de se compreender a carstificação como um espectro de processos que variam conforme a solubilidade litológica e os mecanismos de erosão. Tal abordagem é

relevante para o mapeamento geomorfológico, inventários de geossítios e gestão de áreas com geopatrimônio desenvolvido em substratos mistos ou atípicos.

Palavras-chave: Carste em litologia mista; Relevo ruiforme; Fluviocarste; Espeleogênese em arenito.

1. Introduction

Karst systems are traditionally associated with carbonate rocks, such as limestone and dolomite, which, due to their high solubility, promote the development of typical landforms such as caves, sinkholes, and ruiniform reliefs (Cvijić, 1895; 2017; Ford and Williams, 2007). Karst hydrology and physical speleology are thus two aspects of the subterranean karst phenomenon and should be viewed congruently (Bögli, 1980). Although there are many typical karst landforms in non-carbonate rocks such as sandstones and quartzites, due to the low solubility of quartz, predominantly quartzose rocks, with high silica content, were considered immune to dissolution, so the karst-like landforms associated with these lithologies were initially understood as pseudokarst (De Waele and Gutiérrez, 2022). However, for Ford and Williams (2007), typical karst features such as karren, sinkholes, and caves can develop in low-solubility lithologies, including quartzose ones, as long as there is the presence of a groundwater flow organized by the action of dissolution, characterizing the karst system.

In this context, later studies expanded the concept to include karst landforms developed in other lithologies, particularly siliciclastic rocks such as sandstones and quartzites, giving rise to what is now referred to as non-traditional karst (Andreychouk et al., 2009; Travassos, 2019). Indeed, the dissolution processes that act on siliciclastic rocks, although distinct from those observed in carbonate rocks, also play a relevant role in the development of karst in sandstones (Briceño & Schubert, 1990; Wray, 1997). White (1988) describes the existence of complex systems of surface and subsurface watercourses in non-carbonate rocks such as sandstones, where dissolution occurs mainly through the alteration of soluble minerals that cement the rock grains, as well as through the dissolution of amorphous silica, which is intensified under conditions of high temperature and the presence of acidified water (Veress, 2020). This dissolution process weakens the internal structure of siliciclastic rocks, making them more susceptible to physical erosion and subsequently leading to collapse episodes. This phenomenon is extremely important in the development of karst in sandstones and is known as arenization (Martini, 1979).

Examples of non-traditional karst have been described in various parts of the world, such as Canaima National Park in Venezuela (Aubrecht et al., 2008) and Purnululu National Park in Australia (Young, 2010), among others. In Brazil, studies on karst developed in siliciclastic rocks have gained prominence in recent decades, with notable examples documented in Chapada dos Guimarães (Hardt et al., 2008), Rurópolis (Hardt et al., 2022), and Serra da Capivara (Silva and Maia, 2024). However, these systems still require further investigation, particularly concerning the morphogenetic evolution of fluviokarst systems developed in sandstone.

Indeed, although the development of karst features in carbonate lithologies is well established in the literature (Klimchouk, 2015; Travassos, 2019; De Waele and Gutiérrez, 2022), the question remains as to what extent features developed in non-carbonate lithologies can be legitimately recognized as karst, or whether they originate from distinct morphogenetic processes, even if they result in morphologically analogous landforms. A detailed investigation into the morphogenesis of these features is essential for refining the criteria that define karstification, thereby broadening the epistemological debate on what constitutes a karst system, including the division between traditional and non-traditional karst.

In this context, two areas located a few kilometers apart, each with numerous karst features and a similar sandstone lithology, coexist in the Central Plateau of South America, in the municipality of Paraúna in the state of Goiás, Brazil. However, these two areas also have many unique characteristics, as a ruiniform relief characterizes one—Serra das Galés—and the other by a typical fluviokarst—Ponte de Pedra. This study seeks to analyze the mechanisms responsible for the morphogenesis of these two areas to debate the boundaries of the division of karst relief into traditional and non-traditional karst. For this purpose, regional geological mapping, aerial photogrammetry using drones, and chemical analysis of samples by X-ray fluorescence were employed.

2. Study Area

The study area encompasses two locations of scenic and didactic relevance of the State of Goiás in the Brazilian Central Plateau (Figure 1). Both are situated in the municipality of Paraúna: the first is the Serra das Galés in the Paraúna State Park, and the second is the Ponte de Pedra ("Stone Bridge"), located less than 20 km from each other.

The predominant biome in the area is the Cerrado, characterized by vegetation with multiple physiognomies, including forest, savanna, and grassland formations. However, most of the original vegetation has been replaced by livestock farming and, more prominently, by agricultural areas.

The Serra das Galés in the Paraúna State Park is located within the Paraná Sedimentary Basin II, specifically in the Itararé Group, Aquidauana Formation (Figure 2), which is the only formation of this group present in the state of Goiás (CPRM, 2008). This formation exhibits significant facies variation, resulting from fluvial and lacustrine deposition, with evidence of glaciation. At its base, quartz pebbles and sandstone layers are found. Above this layer, medium to coarse-grained, friable sandstones predominate, occasionally containing feldspar. Overlying these, there are fine siltstones and mudstones, as well as red to greenish-grey shales.

The Ponte de Pedra, a Natural Monument (a Natural Private Reserve), lies atop the Bauru Group, within the Vale do Rio do Peixe Formation (Figure 2). The Bauru Group consists of continental siliciclastic sediments deposited on the South American Platform during the sedimentation of the Paraná Basin in the Cretaceous period (135–65 Ma) (Stradioto et al., 2008). The Vale do Rio do Peixe Formation is composed of fine- to very fine-grained sandstones, with quartz crystals and occasional carbonate cementation (Fernandes, 1998). The soils within the state park are mostly dystrophic quartzarenic neosols (Moreira et al., 2024). At Ponte de Pedra, according to georeferenced data from the State Geoinformation System (SIEG, 2017), gleysols are found in the area surrounding the fluvial channel, which is regionally bordered by red latosols.

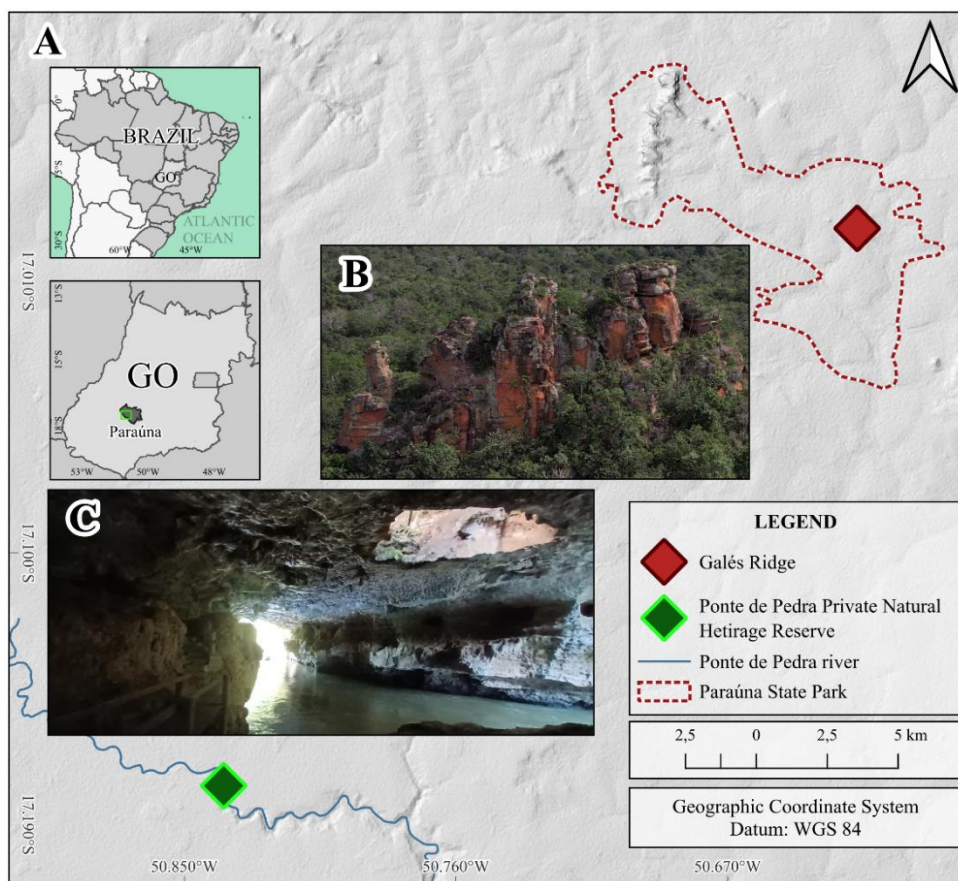
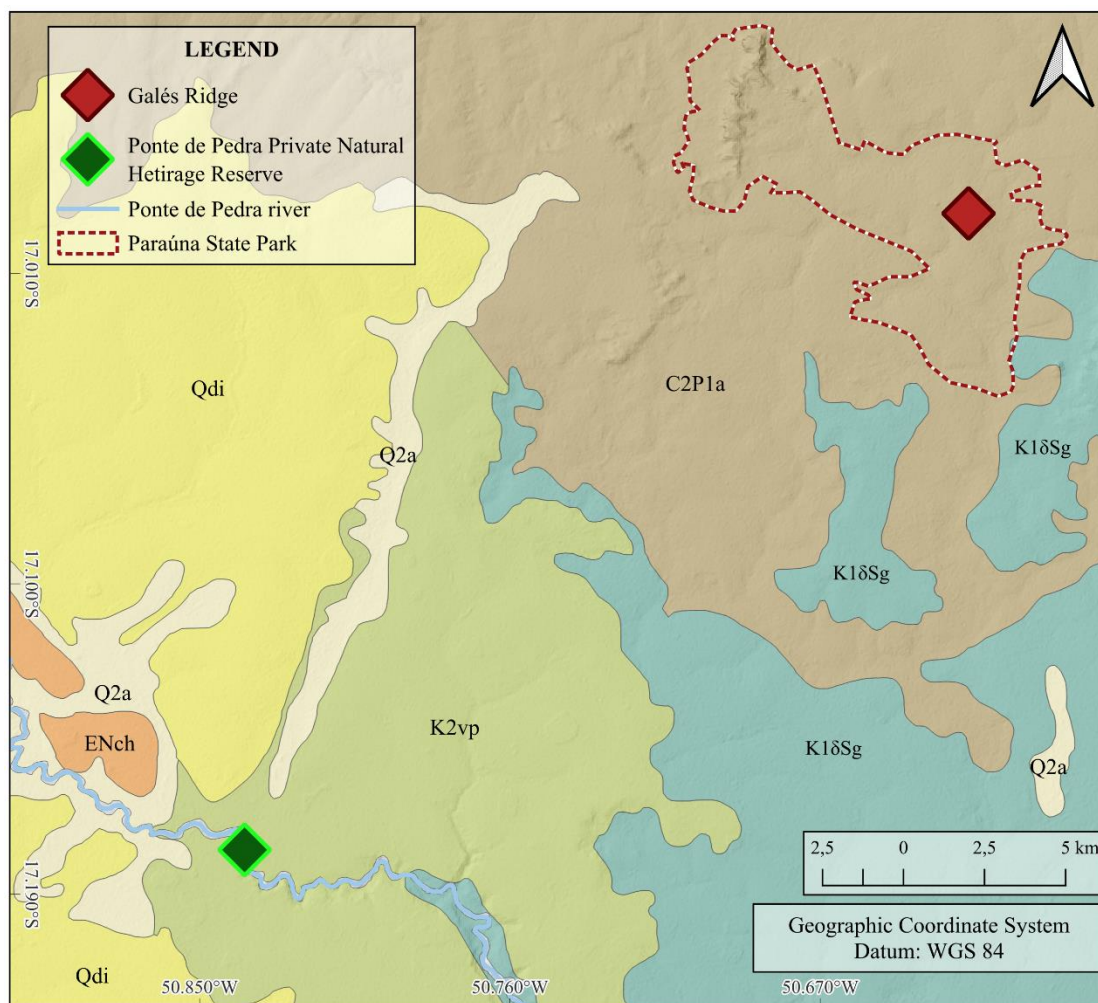


Figure 1. A Location map of the ge heritage sites in the municipality of Paraúna in Goiás State; B: Serra das Galés ge heritage; C: Ponte de Pedra ge heritage.



GEOLOGICAL LEGEND

| | | SURFICIAL FORMATIONS | | PALEO-MESOZOIC BASINS | | |
|-----------|-----------------------|--|--|-----------------------|---------------|--|
| CENOZOIC | QUATERNARY | 0,03 Ma | <p>Q2a Alluvial deposits: Sandy to sandy-clayey alluvium with gravel layers</p> <p>Qdi Undifferentiated detrital covers: Fine to coarse sandy-silty-clayey with conglomeratic levels</p> | MESOZOIC | CRETACEOUS | <p>Bauru Basin Bauru Group</p> <p>K2vp Vale do Rio do Peixe Formation: Sandstone and siltstone; conglomeratic levels</p> |
| | JURASSIC/ TRIASSIC | 250 - 135 Ma | <p>K18Sg Serra Geral Formation: Basaltic flow, rhyolite and andesite</p> | | | <p>Serra Geral Basin São Bento Group</p> |
| PALEOGENE | 65,0 - 1,0 Ma | <p>ENCh Cachoeirinha Formation: Poorly sorted sand with lenticular gravel layers, partially lateritized siltstone and claystone</p> | | PALEOZOIC | CARBONIFEROUS | <p>Paraná Basin II Itararé Group</p> <p>C2P1a Aquidauana Formation: Red sandstone, arkosic sandstone with silicified levels, siltstone, shale, red mudstone, rhythmite and lenticular conglomerate</p> |

Figure 2. Lithological map of the Paraúna area; adapted from CPRM (2008).

The regional climate by the Köppen-Geiger classification (Alvares et al., 2014) is a sub-humid tropical, with two well-defined seasons: a rainy summer (October to April) and a dry winter (May to September). The average temperature of the hottest month is around 30°C, while that of the coldest months is approximately 18°C. The annual mean temperature is 22°C (Ferreira, Lima and Candeiro, 2020).

According to the geomorphological mapping of the state of Goiás (Latrubesse and Carvalho, 2006), the rocks of the Paraná Basin have undergone regional planation processes. As a result, the predominant landforms are regional planation surfaces associated with tabular reliefs. These processes have given rise to minimally dissected

plateaus, with gentle slopes (3–8%) transitioning to moderate, rolling relief (8–20%). However, within the Paraúna State Park, areas of differential erosion occur, featuring silicified layers that give rise to ruiniform reliefs (CPRM, 2008).

The cavity that characterizes the Ponte de Pedra, according to Ferreira et al. (2020), originated from ancient underground drainage channels that were deactivated and now remain suspended above the current base level, where the Ponte de Pedra River flows. A skylight is also observed at the top of the gallery, which gradually expands over time.

3. Materials and methods

The study was carried out in five stages: (1) literature review; (2) regional analysis of the area using geoprocessing techniques; (3) field data collection; (4) laboratory analyses; and (5) data analysis in the office. Details and procedures for each stage are outlined below.

As the first stage, the research began with a theoretical review of topics related to karst geomorphology, including the characterization of traditional and non-traditional karst landforms, karst in sandstones and quartzites, fluviokarst, and ruiniform reliefs in karst environments (Cvijić, 1895; 2017; Bögli, 1980; Jennings, 1985; White, 1988; Wray, 1997; Piló, 2000; Ford and Williams, 2007; Willems et al., 2008; Klimchouk, 2015; Travassos, 2019; Hardt et al., 2022; De Waele and Gutiérrez, 2022). This stage was essential, as it provided the theoretical foundation to classify the regional karst landforms accurately.

For the second stage, geoprocessing and remote sensing tools were employed to analyze the regional geomorphology. Data on the geodiversity and geology of the state of Goiás, provided by the Brazilian Geological Survey, were used to identify lithological and slope-related aspects. Additionally, ALOS-PALSAR digital elevation model (DEM) imagery was used for topographic visualization. This enabled the creation of thematic maps of the study area.

The third stage involved fieldwork for data collection. This included: (a) identification and interpretation of the karst landforms developed in Paraúna; (b) aerial imaging of the Serra das Galés and the Ponte de Pedra River using a DJI Air2S drone (Model DJI-MVA200S-C1), equipped with a 1-inch CMOS sensor camera capable of recording videos in 5.4K resolution and capturing 20-megapixel photographs. The georeferenced orthophotos (GNSS: GPS + GLONASS + GALILEO), generated during the flights (authorized by DECEA under protocols #46FA6E99 and #523AD5D9), resulted in images with dimensions of 6033 × 8000 and a resolution of 8.83 cm/pixel; (c) In total, nine samples were collected. Five of them were obtained from Serra das Galés, one from Pedra do Cálice, the geoform that symbolizes the park, and four from other nearby residual hills. The remaining four samples were collected at Ponte de Pedra and included: (1) PP01 - a flowstone speleothem, (2) PP02 - a paleo fluvial level, (3) PP03 - the cave floor, and (4) PP04 - a stalagmite.

The fourth stage was conducted at the Regional Centre for Technological Development (CRTI) of Goiás Federal University - Brazil. During this stage, the field-collected samples were crushed, and X-ray fluorescence analysis was performed to determine the chemical composition of the samples. Finally, in the fifth stage, data collected by aerial imaging were used to generate a digital terrain model (DTM) using the software CloudCompare and Agisoft Metashape. This approach enabled a more accurate office-based analysis, allowing detailed visualization of relief in areas with difficult access, as well as the production of larger-scale maps.

4. Results

4.1. Serra das Galés

According to the geological mapping of the state of Goiás (CPRM, 2008), the Serra das Galés lies within the Itararé Group, Aquidauana Formation, which is lithologically composed primarily of medium to coarse-grained sandstones, mostly feldspathic, with the presence of residual hills formed at silicified levels. Morphologically, it exhibits typical characteristics of ruiniform relief, marked by residual features sculpted into the rock. Among these, residual towers stand out with a morphology similar to karst towers, easily identifiable in the landscape both from the ground and by drone overflight (Figure 3A).

In addition to the towers, indentations developed along fracture zones between two rock blocks can be observed. These have elongated shapes with gently rounded bases, resembling degraded natural conduits (Figure 3B). Circular concavities that completely perforate the rock have also been recorded (Figure 3C). Another notable feature is the presence of paired concavities carved in symmetrical opposition, as seen in the case of Pedra do Cálice (Figure 3D), a symbolic landform of the Serra das Galés. Taken together, these concave features resemble ancient underground conduits that have been almost entirely degraded by erosion.



Figure 3. Serra das Galés, in the Parque Estadual de Paraúna. (a) View of the ruiniform reliefs of Serra das Galés; (b) Elongated indentation with a rounded bottom between two massifs; (c) Circular cavity completely traversing the rock; (d) Double opposing concavities in the rock. Yellow lines highlight the boundaries of the features, and the empty spaces are filled with low-opacity yellow polygons.

Regarding the chemical analysis by X-ray fluorescence (XRF), all samples showed silicon (SiO_2) contents above 90%, ranging from 92.12% to 94.79% (Table 1). Aluminium oxide (Al_2O_3) contents ranged from 2.75% to 4.06%. Iron oxide (Fe_2O_3) values remained relatively constant, between 0.59% and 0.71%. Magnesium oxide (MgO) and calcium oxide (CaO) were below the limit of quantification in all samples and, therefore, not quantified. Loss on ignition (LOI) was low, with values below 1.2%. These results are consistent with the

geological mapping of the state of Goiás, which identified medium to coarse-grained feldspathic sandstones in the area (CPRM, 2008).

Table 1. Major oxides by X-ray fluorescence (XRF) at Serra das Galés

| Oxides Analyzed (%) | SG 01 | SG 02 | SG 03 | SG 04 | SG 07 |
|--------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | 93,32 | 92,47 | 94,33 | 94,79 | 92,12 |
| Al ₂ O ₃ | 2,75 | 3,32 | 2,92 | 2,90 | 4,06 |
| FeO ₃ | 0,59 | 0,71 | 0,68 | 0,60 | 0,69 |
| MgO | < LQ ² | < LQ | < LQ | < LQ | < LQ |
| CaO | < LQ | < LQ | < LQ | < LQ | < LQ |
| LOI ¹ | 1,01 | 0,94 | 0,81 | 0,60 | 1,18 |
| Other oxides | 2,33 | 2,56 | 1,26 | 1,11 | 1,95 |

¹ Loss in Ignition; ² Below the quantifiable limit;

4.2. Ponte de Pedra

Geological mapping of Goiás (CPRM, 2008) indicates that the Ponte de Pedra is situated within the Vale do Rio do Peixe Formation, which is composed of sandstone layers interbedded with siltstone or mudstone, and may include carbonate cementation and lenses of clayey or carbonate intraclasts (Fernandes, 1998; Fernandes and Coimbra, 2000). Ponte de Pedra itself is characterized by a sinkhole and an upwelling feature (Figure 4A), separated by a decametric distance, as well as a skylight at the top of the landform (Figure 4B).

Inside the Ponte de Pedra cavity, flowstone speleothems (Figure 4D), along with stalactites, stalagmites, and columns (Figure 4C), were identified. Fluvial paleolevels are also present, evidenced by the occurrence of rounded pebbles at the bottom of the cavity (Figure 4E). In broader terms, Ponte de Pedra can be described as a small cave-like cavity traversed by a stream, regionally entrenched within a canyon.

Drone imaging revealed several sections of collapsed blocks along the Ponte de Pedra River as it flows through its canyon (Figure 5). These blocks are angular, exhibit minimal to no rounding, and vary in size. Given the lack of rounding typically associated with fluvial transport, it is reasonable to infer that these blocks likely originated from the collapse of the roofs of former cave extensions along the canyon. Notably, little to no vegetation cover is observed on the blocks, and there is no visible evidence of fluvial transport.

The results of chemical analyses performed by X-ray fluorescence (XRF) on the four samples from Ponte de Pedra indicate significant variations in chemical composition (Table 2). Calcium oxide (CaO) is predominant in samples PP 01 (flowstone; 41.54%) and PP 04 (stalagmite; 50.98%), substantial in PP 03 (cave floor; 29.10%), and less pronounced in PP 02 (paleofluvial level; 17.06%). Silicon dioxide (SiO₂) shows the highest value in PP 02 (51.89%) and the lowest in PP 04 (2.61%). Loss on ignition (LOI) yielded high values, with a maximum in PP 04 (43.65%) and a minimum in PP 02 (19.89%). Magnesium oxide (MgO) contents are relatively consistent across the samples, ranging from 2.89% to 5.89%. Aluminium oxide (Al₂O₃) and iron oxide (Fe₂O₃) are present in lower concentrations, with PP 02 exhibiting the highest values for both: 2.53% and 2.04%, respectively. These values are consistent with the geological mapping of the area, as the elevated CaO levels appear to be related to the carbonate cementation identified in local sandstones (Fernandes, 1998; Fernandes and Coimbra, 2000).

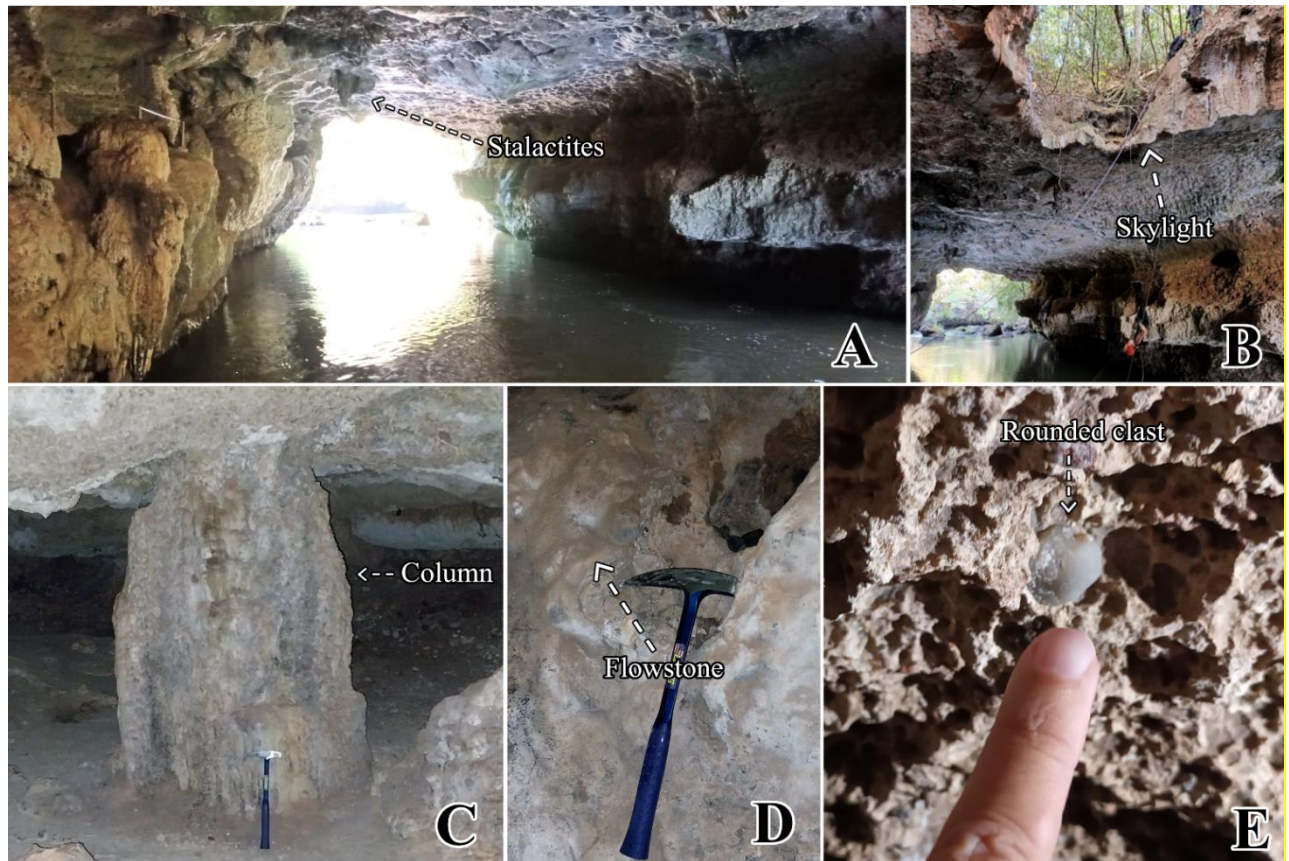


Figure 4. Ponte de Pedra: (a) Internal view of the cave exit, with the presence of stalactites on the ceiling; (b) Skylight at the top of the cavity; (c) Column-type speleothem; (d) Flowstone speleothem; (e) Rounded pebble present in a fluvial paleolevel.

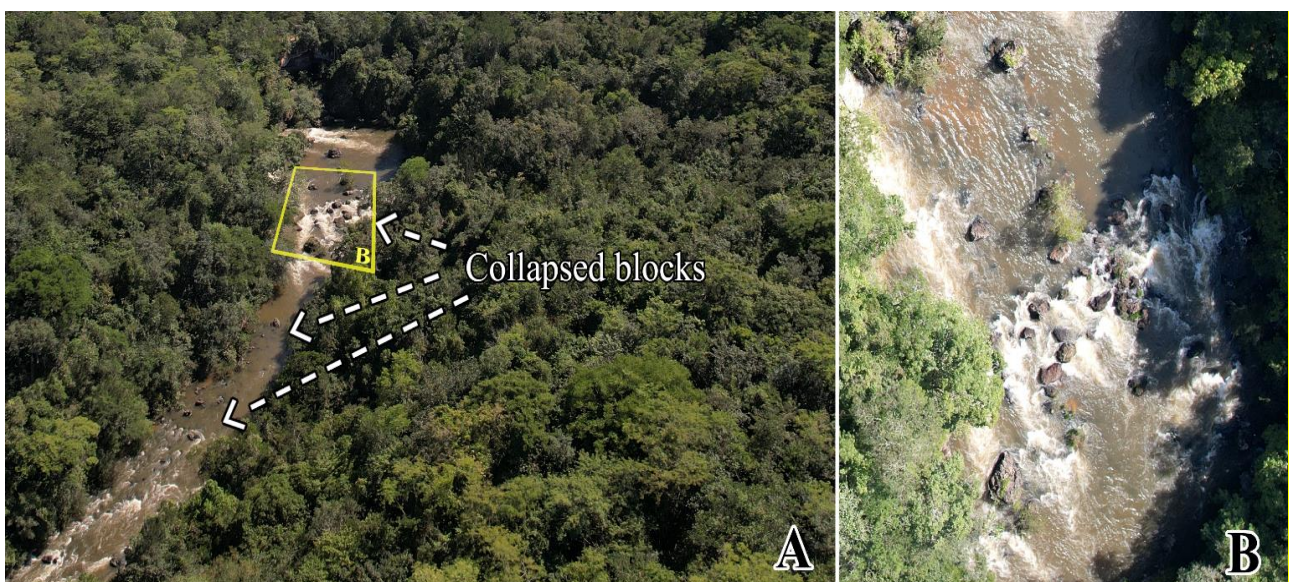


Figure 5. (a) Collapsed blocks along the course of the Ponte de Pedra River; (b) close-up view of the fallen blocks.

Table 2. Major oxides by X-ray fluorescence (XRF) at Ponte de Pedra

| Oxides Analyzed (%) | PP 01 (Flowstone) | PP 02 (Paleo fluvial level) | PP 03 (Cave Floor) | PP 04 (Stalagmite) |
|--------------------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|
| SiO ₂ | 15,94 | 51,89 | 34,19 | 2,61 |
| Al ₂ O ₃ | 0,54 | 2,53 | 0,97 | 0,16 |
| FeO ₃ | 0,37 | 2,04 | 0,72 | 0,11 |
| MgO | 4,91 | 5,05 | 5,89 | 2,89 |
| CaO | 41,54 | 17,06 | 29,10 | 50,98 |
| LOI ¹ | 36,97 | 19,89 | 28,39 | 43,65 |
| Other oxides | < LQ ² | 1,54 | 0,74 | < LQ |

¹ Loss in Ignition; ² Below the quantifiable limit;

5. Discussion

5.1. Serra das Galés

Serra das Galés is part of the Itararé Group, and our sample analyses indicate that the rocks from this unit are predominantly quartz sandstones, with scarce carbonate minerals (Table 1). In this context, the features observed in the Serra das Galés may be associated with non-traditional karst processes developed in siliciclastic rocks. Hardt et al. (2022) report significant occurrences of sandstone karst in Brazil, highlighting Vila Velha State Park in Ponta Grossa, Paraná, as a case particularly similar to Serra das Galés. As in Serra das Galés, the Ponta Grossa sandstone exhibits lithological homogeneity and exokarst features characteristic of ruiniform relief.

According to Pontes et al. (2022), the origin of these landforms is related to a non-traditional karst initially formed by small underground conduits, which were later modified by mechanical processes and surface dissolution. Silva and Maia (2024) emphasize that the development of karst in sandstone is associated with two fundamental processes: (1) intragranular dissolution of the cementing material, a process known as arenization (Martini, 1979; Wray and Sauro, 2017); and (2) mechanical collapse of the altered grains through the piping process (Martini, 1979; Galán, 1991).

Given the absence of carbonates in the Serra das Galés (Table 1), the sandstone formation process offers the most plausible explanation for the morphogenesis of its ruiniform relief. In this context, the high silica homogeneity and the absence of calcium and magnesium oxides (Table 1) limit classical dissolution processes, while favouring sandstone arenization followed by mechanical grain collapse through piping. This collapse was more intense in the less cemented portions of the sandstone—typically cemented by iron oxides—but did not affect the entire rock mass, thereby preserving sections of sandstone above the surface in the form of 'ruins,' which characterizes the ruiniform aspect of the landscape.

5.2. Ponte de Pedra

In Ponte de Pedra a traditional karst system can be observed, in which the local geological map (CPRM, 2008) and laboratory analysis (Table 2) confirm the presence of carbonate layers interbedded with sandstone facies. The development of caves began through dissolution within these layers. As the calcium content decreased in the subsequent strata, water flow began to act predominantly through mechanical processes, widening the conduits and later connecting to new carbonate layers, which favors the progressive expansion of the cavities. This evolutionary pattern is similar to that described by Rodet, Willems, and Poulet (2015) in the fluviokarst of Peruaçu, in Minas Gerais, Brazil. This formation process demonstrates a polyphasic evolution, which may occur over extended geological time scales (White, 2009). The concentrated hydrological recharge observed at Ponte de Pedra corresponds to the studies by Souza, Salgado, and Auler (2019), which highlight the importance of the origin and volume of infiltrating water in the pace of karstification.

Breitenbach et al. (2010) describe how caves in sandstone tend to develop preferentially along zones of weakness and structural faults, directly aligning with the case observed at Ponte de Pedra, where carbonate layers function as zones of weakness concerning dissolution processes. The presence of speleothems reinforces the role of calcite layers as conduits for the dissolution process, in which pressurized water beneath silicified layers can dissolve underlying carbonate units, resulting in structural collapse and the formation of conduits, with subsequent roof collapse in the caves (Orndorff, Weary, and Harrison, 2006). The settling of blocks on the bed of the Ponte de Pedra River appears to represent this stage of instability.

In the effort to understand the landform evolution of the Chapada das Mesas (Maranhão and Tocantins states), Martins et al. (2017) proposed a similar hypothesis: there is a predominantly subsurface drainage system, in which the karstification process at more advanced stages leads to the collapse of cave roofs, exposing canyons and waterfalls. The similarity between Ponte de Pedra and the features of Chapada das Mesas highlights the recurrence of geomorphological patterns associated with karstification in sandstone, even when occurring in distinct depositional contexts.

This example of morphogenesis reveals an intermediate conceptual zone in which traditional karst classification categories become insufficient. In this sense, understanding the karstification process as a spectrum, rather than a binary phenomenon, may be essential to incorporate the complexity of systems developed in lithologies of varying solubility, such as sandstone with occurrences of carbonate lenses or cementation.

This interpretation reinforces the importance of lithological variability in shaping karst evolution in sandstone environments. Considering these contrasting cases, we now turn to a broader conceptual discussion on the adequacy of current karst classifications and their applicability to mixed lithological contexts.

5.3. *Traditional or Non-Traditional Karst: Rethinking Conceptual Boundaries*

The diversity of morphogenetic processes observed in Serra das Galés and Ponte de Pedra raises important questions regarding the current classification of karst. The current prevailing view is that the concept of karst extends beyond carbonate rocks. In this revised framework, if the morphological features are typical and chemical dissolution played a significant role in their genesis—even if not the dominant one—the system may already be characterized as karst (Bento, Travassos, and Rodrigues, 2015). Thus, karst can be understood as a hydrogeological system whose morphogenesis is associated with porosity and permeability in soluble rocks, not limited to carbonates. This new karst paradigm prioritizes speleogenetic processes over lithology as the defining criterion (Klimchouk, 2015). Nevertheless, due to the higher solubility of carbonate rocks, karst is subdivided into two categories: traditional—primarily associated with carbonates—and non-traditional, which includes siliciclastic rocks such as sandstone. This perspective is essential for classifying Ponte de Pedra as a karst-related area that falls outside the classical definitions of traditional and non-traditional karst.

When comparing the ruiniform relief of Serra das Galés with the fluviokarst of Ponte de Pedra, distinct morphogenetic processes are observed, ranging from karst initiated by dissolution but sustained by mechanical processes, to karst directly driven by carbonate dissolution. While Serra das Galés can be classified as a case of non-traditional karst, Ponte de Pedra exhibits intermediate characteristics, lying within a transitional zone between traditional and non-traditional karst. Its morphogenesis involved both carbonate dissolution and mechanical erosion, as cavity development could proceed only through sandblasting and/or classical erosive processes once the carbonate lenses were depleted.

Therefore, the distinction between traditional karst—commonly associated with carbonate rocks such as limestone and dolomite—and non-traditional karst—developed in non-carbonate rocks—proves insufficient in light of the empirical evidence recorded in this study. The Ponte de Pedra Private Natural Reserve (RPPN) exemplifies features typically associated with traditional fluviokarst, such as caves and speleothems. Yet, it formed in sandstone with localized carbonate lenses interbedded between its layers. While some of its features contain significant amounts of calcium oxide, others are largely dominated by silicon (Table 2). From an epistemological standpoint, these results reinforce the need to move beyond the dichotomy between traditional and non-traditional karst. In nature, as illustrated by the case of Ponte de Pedra, processes are often too complex to be fully captured by rigid classification schemes. Therefore, new conceptual approaches are needed—ones that acknowledge the complexity of karst system morphogenesis.

5. Conclusion

The results of this study contribute to a deeper understanding of the conceptual boundaries between traditional and non-traditional karst, demonstrating that karst systems in sandstone can originate from a typical sandblasting process—as observed in Serra das Galés—but may also have a genesis associated with carbonate dissolution combined with sandblasting and mechanical erosion, as in the Ponte de Pedra. In Serra das Galés, although the high degree of degradation of certain landforms makes it difficult to confirm their origin, their geometry and chemical composition directly suggest a morphogenesis linked to intragranular dissolution and successive collapse. In contrast, at Ponte de Pedra, the presence of caves, speleothems, and evidence of chemical dissolution in carbonate lenses interbedded within sandstone reveals landforms characteristic of traditional karst, albeit developed in siliciclastic rocks.

This condition challenges the binary classification between traditional and non-traditional karst, prompting epistemological reflections on classical karst concepts. The study highlights the need to reconsider the dichotomy of karst categories and to adopt a more integrative framework capable of recognizing transitional forms in complex lithological settings. Such an approach may be particularly relevant for geomorphological mapping, geoheritage inventories, and the environmental management of karst terrains developed in mixed or atypical substrates.

In this context, future studies could benefit from applying this interpretative model to other sandstone karst systems in Brazil and globally, contributing to a refined understanding of karstification as a spectrum rather than a fixed typology.

Author contribution: Conception: G.L.B.S., L.E.P.T and A.A.R.S.; methodology: G.L.B.S., L.E.P.T and A.A.R.S.; software: G.L.B.S.; validation: A.A.R.S and L.E.P.T; formal analysis: G.L.B.S.; research: G.L.B.S., L.E.P.T and A.A.R.S.; resources: L.E.P.T. and A.A.R.S.; data preparation: G.L.B.S. and L.E.P.T.; article writing: G.L.B.S. and A.A.R.S.; review: A.A.R.S and L.E.P.T.; supervision: A.A.R.S. and L.E.P.T.; acquisition of funding: A.A.R.S. All authors read and agreed with the final version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) by the projects 303047/2021-6, 303388/2024-2, and 306667/2022-3.

Acknowledgments: We thank the anonymous reviewers for their valuable comments and the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), Brazil, for financial support.

Conflict of interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.R.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, n.6, p.711–728, 2014. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
2. AUBRECHT, R.; LÁNEZOS, T.; SMIDA, B.; BREWE-CARÍAS, C.; MAYORAL, F.; SCHLOGL, J.; AUDY, M.; VICEK, L.; KOVÁCIK, L.; GREGOR, M. Venezuelan sandstone caves: a new view on their genesis, hydrogeology and speleothems. *Geologia Croatica*, v.61, n.2–3, p.345–362, 2008. DOI: 10.4154/GC.2008.27
3. BENTO, L.C.M.; TRAVASSOS, L.E.P.; RODRIGUES, S.C. Considerações sobre as cavernas quartzíticas do Parque Estadual do Ibitipoca, Minas Gerais, Brasil. *Caminhos de Geografia*, v.16, n.54, p.125–139, 2015. DOI: 10.14393/RCG165429131
4. BÖGLI, A. *Karst Hydrology and Physical Speleology*. Berlin: Springer Verlag, 1980. 284p.
5. BREITENBACH, S.F.M.; DONGES, J.F.; DALY, B.K.; KOHN, T.; KOHN, T. Two sandstone caves on the Southern edge of the Meghalaya Plateau, India. *Cave and Karst Science*, v.37, n.2, p.49–52, 2010.
6. BRICEÑO, H.O.; SCHUBERT, C. Geomorphology of the Gran Sabana, Guayana Shield, southeastern Venezuela. *Geomorphology*, v. 3, 1990, p.125-141. DOI: 10.1016/0169-555X(90)90041-N
7. CPRM. Mapa geológico do Estado de Goiás e Distrito Federal. Goiânia: CPRM, 2008. Escala: 1:500.000
8. CVIJIĆ, J. *Carste: Uma monografia geográfica (1895)*. Belo Horizonte: PUC Minas, 2017. Tradução de Luiz Eduardo Panisset Travassos.
9. DE WAELE, J.; GUTIÉRREZ, F. *Karst Hydrogeology, Geomorphology and Caves*. 1ª ed. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2022. 888p.
10. FERNANDES, L.A. *Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil)*. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. 216p.

11. FERREIRA, B.M.; LIMA, C.L.; CANDEIRO, C.R.A. Geodiversity geological and geomorphological of the municipality of Paraúna, central-southern Goiás state, Brazil. *Sociedade & Natureza*, v.32, n.1, p.586–600, 2020. DOI: 10.14393/SN-v32-2020-47312.
12. FORD, D.C.; WILLIAMS, P.W. *Karst hydrogeology and geomorphology*. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 562p.
13. HARDT, R.; PINTO, S.A.F. Carste em litologias não carbonáticas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.10, n.2, p.99–105, 2009. DOI: 10.20502/rbg.v10i2.134
14. HARDT, R.; RODET, J.; PINTO, S.A.F.; WILLEMS, L. Exemplos brasileiros de carste em arenito: Chapada dos Guimarães (MT) e Serra de Itaqueri (SP), Brasil. *Revista Espeleo-Tema*, v.20, n.1/2, 2009, p.7-23.
15. HARDT, R.; RODET, J.; ZOGBI, L.A. Sandstone and karst development in Brazil. *Karstologia Mémoires*, v.3, n.23, 2022.
16. JENNINGS, J.N. *Karst geomorphology*. Oxford: Basil Blackwell Ltd., 1985, 293 p.
17. KLIMCHOUK, A. The karst paradigm: change, trends and perspectives. *Acta Carsologica*, v.44, n.3, p.289–313, 2015. DOI: 10.3986/ac.v44i3.2996
18. LATRUBESSE, E.M.; CARVALHO, T.M. Geomorfologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. *Boletim Goiano de Geografia*, v.27, n.3, 2006, p.169-172.
19. MARTINI, J.E.J. Karst in Black Reef Quartzite near Kaapsehoop, Eastern Transvaal. *Annals of the South African Geological Survey*, v.13, p.115–128, 1979.
20. MARTINS, F.P.; SALGADO, A.A.R.; BARRETO, H.N. Morfogênese da Chapada das Mesas (Maranhão–Tocantins): Paisagem cárstica e poligenética. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.18, n.3, 2017. DOI: 10.20502/rbg.v18i3.1180
21. MOREIRA, H.G.B.; CAMINHAS, F.G.; BUENO, G.T.; ZANCOPE, M.H. Distribuição dos solos e pedogênese em uma topossequência com vereda no Parque Estadual de Paraúna – Goiás (GO). *Revista Mirante*, v.17, n.1, p.179–194, 2024.
22. ORNDORFF, R.C.; WEARY, D.J.; HARRISON, R.W. The role of sandstone in the development of an Ozark karst system, south-central Missouri. In: HARMON, R.S.; WICKS, C. (Eds.). *Perspectives on karst geomorphology, hydrology and geochemistry – A tribute volume to Derek C. Ford and William B. White*. Boulder: Geological Society of America, 2006. Special Paper 404, p. 31–38. DOI: 10.1130/2006.2404(04)
23. PILÓ, L.B. Geomorfologia cárstica (Revisão de literatura). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.1, n.1, 2000. DOI: 10.20502/rbg.v1i1.73
24. PONTES, H.S.; FERNANDES, L.A.; MELO, M.S.; GUIMARÃES, G.B.; MASSUQUETO, L.L. Características litofaciológicas e aspectos genéticos de feições cársticas da Formação Furnas e Arenito Vila Velha no município de Ponta Grossa (Paraná, Brasil). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.23, n.1, 2022. DOI: 10.20502/rbg.v23i1.2085
25. RODET, J.; WILLEMS, L.; POUCKET, A. The Rio Peruaçu Basin: An impressive multiphased Karst System. In: VIEIRA, B. C.; SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C. (Eds.). *Landscapes and landforms of Brazil*. Dordrecht: Springer, 2015. p. 171-181.
26. SIEG. Mapeamento de solos do Brasil a partir de compilações (Embrapa, IBGE) e conversão para o meio digital de levantamentos de solos produzidos pelo Projeto RADAMBRASIL. Goiânia: SIEG, 2017. Escala: 1:250.000
27. SILVA, M.B.; MAIA, R.P. Morphostructural aspects of the sandstone karst in Northeastern Brazil: Example from Serra da Capivara – PI. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.25, n.1, 2024. DOI: 10.20502/rbg.v25i1.2392
28. SOUZA, T.A.R.; SALGADO, A.A.R.; AULER, A.S. O carste em mármore na borda oeste da Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.20, n.1, 2019. DOI: 10.20502/rbg.v20i1.1457
29. STRADIOTO, M.R.; KIANG, C.H.; CHANG, M.R.C. Petrography and diagenetic aspects of the Bauru Group sandstones in the southwestern region of the São Paulo State. *Geociências*, v.61, n.4, p.433–441, 2008.
30. TRAVASSOS, L.E.P. *Princípios de carstologia e geomorfologia cárstica*. 1ª ed. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2019. 242p.
31. VERESS, M. Karst Types and Their Karstification. *Journal of Earth Science*, v.31, n.3, p.621–634, 2020. DOI: 10.1007/s12583-020-1306-x
32. WHITE, W.B. *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. 1ª ed. Oxford: Oxford University Press, 1988. 464p.
33. WHITE, W.B. The evolution of Appalachian fluviokarst: Competition between stream erosion, cave development, surface denudation, and tectonic uplift. *Journal of Cave and Karst Studies*, v.71, n.3, p.159–167, 2009. DOI: 10.4311/jcks2008es0046
34. WILLEMS, L.; RODET, J.; POUCKET, A.; MELO, S.; RODET, M.J.; COMPERE, P.; HATERT, F.; AULER, A. Karsts in sandstone and quartzites of Minas Gerais, Brazil. *Cadernos Lab. Xeolóxicos de Laxe*, v.33, p.127–138, 2008.
35. WRAY, R.A.L. A global review of solutional weathering forms on quartz sandstones. *Earth-Science Reviews*, v.42, n.3, p.137–160, 1997. DOI: 10.1016/S0012-8252(96)00056-6
36. WRAY, R.A.L.; SAURO, F. An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites. *Earth-Science Reviews*, v.171, p.520–557, 2017. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.06.008

37. YOUNG, R. Bungle Bungle: Tower Karst in sandstone. In: MIGON, P. (Ed.). Geomorphological Landscapes of the World. Dordrecht: Springer, 2010. p. 333-340. DOI: 10.1007/978-90-481-3055-9



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.