

## Cavernas do Mato Grosso do Sul: revisão, atributos condicionantes, análise preditiva e autocorrelação espacial

### Caves of Mato Grosso do Sul: review, conditioning attributes, predictive analysis and spatial autocorrelation

### Cuevas de Mato Grosso do Sul: revisión, atributos de acondicionamiento, análisis predictivo y autocorrelación espacial

Alesson Pires Maciel Guirra

<http://orcid.org/0000-0003-4201-3574>

[engeoguirra@gmail.com](mailto:engeoguirra@gmail.com)

*Universidade Federal dos Vales Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, MG*

Antonio Conceição Paranhos Filho

<https://orcid.org/0000-0002-9838-5337>

[antonio.paranhos@pq.cnpq.br](mailto:antonio.paranhos@pq.cnpq.br)

*Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, UFMS, Campo Grande, MS*

**Resumo:** O carste e o pseudocarste desempenham funções ecossistêmicas vitais, fornecendo recursos naturais e assegurando atividades econômicas importantes, além de proporcionar materiais importantes para entender paleoambientes. Porém, estas regiões são intrinsicamente frágeis, associadas a movimentos de massa ou à manutenção da qualidade dos aquíferos, sendo restritas há algumas formas de uso e ocupações do solo. O objetivo deste estudo é executar uma revisão integrativa sobre o carste no Mato Grosso do Sul, avaliar atributos geológico-ambientais por localização que condicionam a ocorrência de cavidades naturais, além de verificar se é possível prever o número de cavidades por métodos de regressão linear simples e múltipla e investigar se há autocorrelação espacial com alguns destes atributos. Observa-se que estudos sobre o carste no estado são recentes e se concentram em temas de reconstituição paleoambiental. A maior parte das cavidades cadastradas ocorre em rochas carbonáticas neoproterozoicas, porém há um relevante potencial espeleológico em rochas não carbonáticas paleozoicas e mesozoicas. Não é possível prever por método estatístico puramente determinístico a ocorrência de cavidades, sendo verificado padrão estocástico em sua distribuição. O estimador de densidade Kernel possibilitou inferências qualitativas da probabilidade de ocorrência de cavidades. Os índices de Moran foram eficientes ao demonstrar que condicionantes geológico-ambientais de cavidades em rochas carbonáticas podem interagir de maneira distinta e inversa em rochas não carbonáticas.

**Palavras-chave:** Cavidades Naturais, Espeleologia, Geoestatística.

**Abstract:** Karst and pseudokarst perform vital ecosystem functions, supplying natural resources and ensuring important economic activities, as well as providing important materials to understand paleoenvironments. However, these regions are intrinsically

fragile, associated with mass movements or the maintenance of aquifer quality, and there are restricted forms of land use and occupation. The aim of this study is to perform an integrative review on the karst in the State of Mato Grosso do Sul (Brazil), evaluate geological-environmental attributes by location conditioning the occurrence of natural cavities, besides verifying whether it is possible to predict the number of cavities by simple and multiple linear regression methods and to investigate whether there is spatial autocorrelation with some of these attributes. We observed that studies on the karst in this state are recent and focus on topics of paleoenvironmental reconstitution. Most of the registered cavities occur in Neoproterozoic carbonate rocks, but there is a relevant speleological potential in Paleozoic and Mesozoic non-carbonate rocks. It is not possible to predict by purely deterministic statistical method the occurrence of cavities, being verified stochastic pattern in its distribution. The Kernel density estimator allowed qualitative inferences of the probability of occurrence of cavities. Moran indices were efficient in demonstrating that geological-environmental constraints of cavities in carbonate rocks can interact differently and inversely in non-carbonate rocks.

**Keywords:** Natural Cavity, Speleology, Geostatistics.

**Resumen:** El karst y el pseudokarst realizan funciones vitales del ecosistema, aportando recursos naturales y asegurando importantes actividades económicas, así como proporcionando materiales importantes para comprender los paleoambientes. Sin embargo, estas regiones son intrínsecamente frágiles, asociadas con corrimientos de tierra o el mantenimiento de la calidad de los acuíferos, y existen algunas formas de uso de la tierra y ocupaciones restringidas. El objetivo de este estudio es realizar una revisión integradora sobre el karst en Mato Grosso do Sul (Brasil), evaluar los atributos geológico-ambientales por ubicación que condicionan la ocurrencia de cavidades naturales, además de verificar si es posible predecir el número de cavidades por métodos de regresión lineal simple y múltiple e investigar si existe autocorrelación espacial con algunos de estos atributos. Observamos que los estudios sobre el karst en el Estado son recientes y se centran en temas de reconstitución paleoambiental. La mayoría de las cavidades registradas ocurren en rocas carbonáticas neoproterozoicas, pero hay un potencial espeleológico relevante en rocas paleozoicas y mesozoicas no carbonatadas. No es posible predecir por método estadístico puramente determinista la ocurrencia de cavidades, siendo verificado el patrón estocástico en su distribución. El estimador de densidad del núcleo permitió inferencias cualitativas de la probabilidad de ocurrencia de cavidades. Los índices de Moran fueron eficientes para demostrar que las restricciones geológico-ambientales de las cavidades en las rocas carbonatadas pueden interactuar de manera diferente e inversa en las rocas no carbonatadas.

**Palabras clave:** Cavidad Natural, Espeleología, Geoestadística.

## INTRODUÇÃO

Terrenos cársticos e pseudocársticos são extremamente relevantes como fontes de água subterrânea e também desempenham funções ecossistêmicas vitais. Além de fornecer recursos naturais, abrigam valores em termos de biodiversidade, cavernas, agricultura, patrimônio fossilífero e arqueológico, no desenvolvimento turístico e atividades culturais, sendo também importantes áreas para o entendimento do clima atual e pretérito (Bertaux et al., 2002; Lobo & Moretti, 2009; Becker et al., 2018; Goldscheider et al., 2020; Si-liang et al., 2021).

Carste é um tipo específico de terreno (ou paisagens), que ocorre devido à alta solubilidade da rocha e/ou porosidade secundária, preferencialmente rochas carbonáticas tais como: calcários, dolomitos e mármore, nas quais se desenvolvem feições de dissolução subterrânea ou drenagem subterrânea integrada (Ferreira & Uagoda, 2019). Processos como arenização e fantomização são condicionados à disponibilidade química e de água em litologias ricas em quartzo com certa presença de argilas, hidróxidos de ferro ou cimento carbonático, que formam terrenos análogos a certos tipos de carste, com mecanismos de intemperismo e espeleogênese, agindo através da dissolução intergranular do quartzo, aumentando a porosidade da rocha e diminuindo a resistência à erosão (Wray & Sauro, 2017). O termo pseudocarte é problemático para se referir a fenômenos semelhantes ao cárstico, uma vez que ignora princípios básicos de classificação sólida, convenções lógicas de nomenclatura e terminologia geomórficas aceitas (Eberhard & Sharples, 2013).

Cerca de 10% da população mundial depende de aquíferos cársticos, sendo a agricultura uma das principais atividades desempenhada, conforme mostra o banco de dados do World Karst Spring (WoKaS), o qual promove a internacionalização da pesquisa hidrológica cárstica e a gestão de águas subterrâneas (Olarinoye et al., 2020). Gestões personalizadas para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos, dadas as condições climáticas adversas, bem como a tendência de expansão urbana aliada ao aumento demográfico, frente a estes ambientes naturalmente suscetíveis, são estratégias a serem implantadas na prevenção, contenção ou mitigação de danos (Klass et al., 2020).

Regiões cársticas representam significativas paisagens de interesse geomorfológico e espeleológico, mas também são áreas intrinsecamente frágeis, podendo provocar uma série de eventos perigosos, configurando restrições ao uso e ocupação do solo, dada a suscetibilidade a movimentos de massa, associadas principalmente a eventos de dolinamento, abatimento, recalque, piping entre outros (Sallun Filho, 2007a; Sallun Filho, 2007b; Parise, 2010). Cavidades naturais na América do Sul são fontes promissoras de sítios paleontológicos e arqueológicos, podendo fornecer elementos da presença humana, de animais da Megafauna Quaternária ou a interação destes, quando se considera assinaturas tafonômicas e ecológicas (Mothé et al., 2020).

Estas regiões também são responsáveis, em maior frequência, pela formação de sumidouros, promovendo descontinuidades na rede fluvial e fornecendo recargas alogênicas (Olarinoye et al., 2020). Diferentes unidades litológicas podem apresentar propriedades como espessura, rugosidade superficial, grau de fraturamento, entre outros tipos de descontinuidades que controlam o padrão de circulação de fluxos na interação rocha-fluido, ocasionando processos de dissolução dos minerais (Balsamo et al., 2020). O campo de tensões regional pode imprimir uma complexa rede de drenagens em superfície, ou ainda estabelecer contrastes e anisotropias entre camadas de uma mesma unidade geológica com intensidade de fraturamentos diferentes (Balsamo et al., 2020).

Várias informações das descontinuidades podem ser obtidas em campo, como geometria, espaçamento interno, distância entre descontinuidades, densidade, direções preferenciais, entre outros atributos. Os principais elementos estruturais passíveis de medição neste contexto, são: fraturas paralelas ou ao longo de contatos geológicos, juntas

sistemáticas e transversais, ou zonas de falhas e fraturas. Por imagens de radar é possível obter de forma semiautomatizada os lineamentos regionais, os quais repercutem em superfície em linhas com contraste de sombreamento no terreno ou estreitos traços de depressões lineares com certa continuidade, geralmente refletindo estruturas tectônicas rúpteis, ou rúpteis-dúcteis.

Diante desse contexto, pode-se questionar: quais os principais atributos geológico-ambientais desempenham processos de carstificação em Mato Grosso do Sul? Existe alguma correlação ou autocorrelação espacial entre estes atributos com o número de cavidades oficialmente cadastradas no estado por áreas? É possível estimar por métodos de estatística determinística a ocorrência de cavidades naturais, diante da escala do mapa de geodiversidade atualmente disponível para este território? Ou ainda, pode haver autocorrelação espacial entre algumas destas variáveis com a ocorrência de cavidades?

Diante deste cenário pode-se formular como hipótese alternativa (H1) que o número de interseções por área entre lineamentos geológicos estruturais, rede de drenagem e contatos geológicos, mutuamente combinados entre si, podem prever o número de cavidades naturais por área. Em contrapartida, a hipótese nula (H0) diz que estes três elementos pontuais, quando quantificados em termos de interseções por unidade de área, não podem prever o número de cavidades naturais de forma inteiramente determinística.

No Mato Grosso do Sul o mapa de geodiversidade derivado do mapa geológico macrorregional (CPRM, 2009) é resultante da articulação de folhas cartografadas com baixo a médio nível de detalhamento (1:100.000 até 1:50.000), os quais não suprem as necessidades de planejamento em escala de município, dada a baixa representatividade do modelo. A área que concentra o maior número de cavidades é também a com maior quantidade de afloramentos visitados e conseqüentemente de maior detalhe cartográfico. Estes fatores demonstram que pode haver maior número de cavidades em outros setores do estado que ainda não foram cadastradas. Outro fato que chama a atenção, pela raridade, é o conteúdo de rochas não carbonáticas com cavidades já cadastradas, as quais se desenvolvem em sua maioria em arenitos, responsáveis por cobrir vasta área deste território, sobretudo no setor centro-leste. A ocorrência de cavidades em rochas não carbonáticas é atestada pelos trabalhos de diversos autores (Sallun Filho, 2007a; Sallun Filho, 2007b; Guirra et al., 2019; Guirra & Paranhos Filho, 2020).

Neste estudo, objetiva-se revisar publicações sobre o carste do Mato Grosso do Sul, em periódicos de alto impacto, verificando os principais condicionantes geológico-ambientais que favorecem a ocorrência de cavidades naturais, bem como se avalia se é possível prever quantitativamente o número de cavidades por área, usando como variáveis preditivas interseções entre atributos geológico-ambientais lineares, dentre eles: rede de drenagem, contato entre unidades geológicas e lineamentos geológico-estruturais. Também foi observado o nível de autocorrelação existente entre as variáveis anteriormente expressas, baseando-se em métricas do índice de Moran (global e local).

Destaca-se neste contexto a ampla aplicabilidade na gestão e planejamento territorial que novos conhecimentos sobre o entendimento da distribuição espacial de áreas cársticas ou potencialmente suscetíveis a processos de carstificação podem fornecer para o uso mais

racional dos recursos naturais disponíveis, sobretudo a manutenção da qualidade da água nos aquíferos e da prevenção a movimentos de massa.

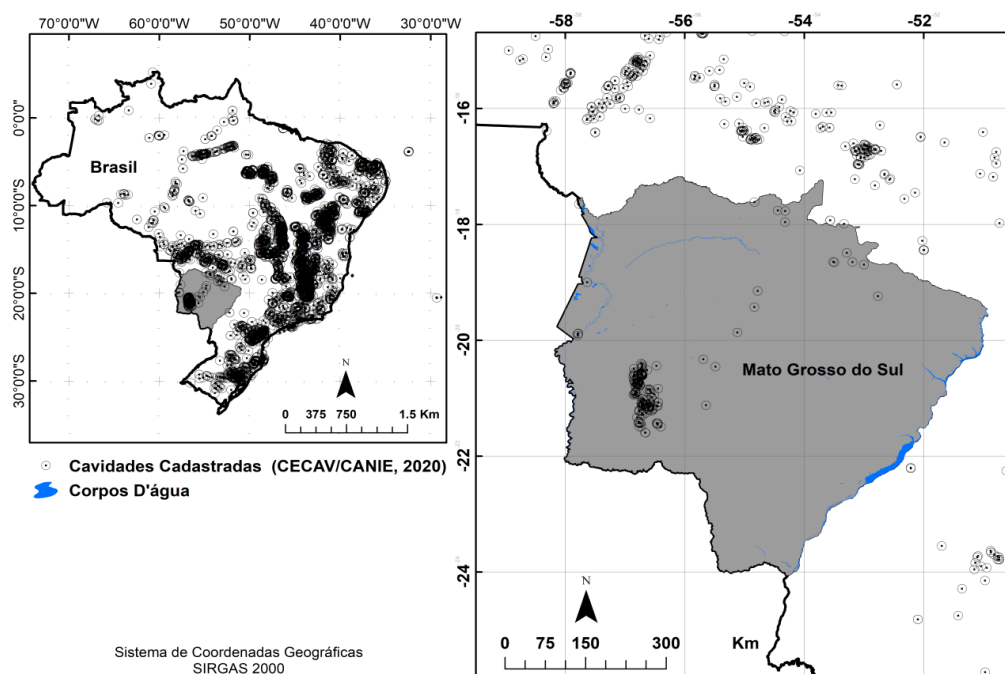
## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de estudo

O estado de Mato Grosso do Sul localiza-se na Região Centro-Oeste do Brasil, centrado nas coordenadas 20°17'24"S, 54°52'12"W, abrangendo área de 357.145,534 km<sup>2</sup>, fazendo limite com a Bolívia (noroeste), Paraguai (sudoeste), Goiás (nordeste), Minas Gerais (leste), Paraná (sul) e São Paulo (sudeste), conforme IBGE (2019).

O mapa de ocorrências de cavernas do Brasil (Fig. 1) mostra que até 2020 existiam 268 cavidades naturais cadastradas no Mato Grosso do Sul, o que corresponde a 1,41% em relação a todo o território brasileiro (CANIE, 2020).

Figura 1 - Mapa de ocorrência das cavidades naturais do Mato Grosso do Sul em relação ao Brasil. Observar que a região de MS em que há maior concentração de cavernas no mapa é a da Serra da Bodoquena, sustentada por rochas pré-cambrianas, predominantemente carbonáticas.



Para realização deste estudo, foram seguidos alguns passos que envolvem a elaboração da pergunta de pesquisa, busca sistematizada por artigos especializados na literatura, coleta de dados, análise dos estudos, proposição de métodos de estimativa de ocorrência de cavidades naturais, discussão dos resultados e apresentação da revisão (Souza et al., 2010).

## Revisão em literatura especializada

Na revisão optou-se pelo método integrativo (Souza et al., 2010), usando técnica de sistematização por filtros processados por operadores booleanos, reunindo os estudos mais relevantes sobre o tema - Cavidades no Mato Grosso do Sul – buscando identificar tendências, lacunas e interações entre pesquisas e pesquisadores. A base de dados utilizada para cumprir esta etapa foi a *Scopus* (Elsevier Bv, 2020), pois nesta plataforma reúne-se um dos maiores bancos de dados de periódicos revisados por pares, com relevantes fatores de impacto, indexando vários títulos em sua biblioteca, das mais diversas áreas e subáreas do conhecimento.

Utilizou-se como apoio a bibliometria, a qual pauta-se na quantificação de publicações sobre determinado tema, coletando informações tais como: a produtividade ao longo de uma série temporal, o ranque entre os principais autores, principais instituições envolvidas, países, subáreas de pesquisa, principais formas de publicação, conteúdos com maior repercussão, entre outros elementos.

Para permitir a análise bibliométrica, utilizou-se o *VOSviewer* (Van Eck & Waltman, 2007), o qual possibilita a criação de redes de conectividade, interações de citações, coautoria, frequência de citações, força da relação entre os conectores, ou até mesmo o desempenho dos autores, publicações ou palavras ao longo do tempo. O *VOSviewer* (VOSviewer, 2020) é um *software* de visualização de similaridades e baseia-se na teoria de Análise de Redes Sociais (SNA), permitindo a elaboração de mapas bidimensionais ponderados pela distância e frequência de citações, sendo que distâncias menores indicam relações mais fortes e nós ou ilhas de calor mais intensas demonstram maior força ou importância da citação (Lima et al., 2019).

A seleção da cadeia de caracteres empregadas na busca refinada sobre o carste no Mato Grosso do Sul teve os seguintes parâmetros: *TITLE-ABS-KEY ( ( "cavi\*" OR "cave\*" OR "speleo\*" OR "karst\*" OR "carst\*" OR hole ) AND "mato grosso do sul" )*.

Nesta primeira tentativa houve retorno de 56 publicações, porém com temas muito variados que divergiram do objetivo deste estudo, sendo necessário empregar outros filtros na busca. Com base nisso, utilizou-se a seguinte cadeia de caracteres: *TITLE-ABS-KEY ( ( "cavi\*" OR "cave\*" OR "speleo\*" OR "karst\*" OR "carst\*" OR hole ) AND "mato grosso do sul" ) AND ( LIMIT-TO ( SUBJAREA , "EART" ) ) AND ( LIMIT-TO ( SUBJAREA , "ENVI" ) ) AND ( LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD , "Brazil" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD , "Cave" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD , "Mato Grosso Do Sul" ) )*, a qual filtrou publicações deste tema em subáreas, retornando 17 documentos, sendo todos estes analisados.

Para tornar o estudo mais abrangente e inclusivo, resgataram-se a partir do portal de periódicos de livre acesso da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes, 2020), estudos que responderam a mesma cadeia de caracteres formulada e que não estavam incorporadas à *Scopus*, resultando em mais três documentos complementares. Estes estudos foram incorporados na análise, porém não foram quantificados na bibliometria, por se tratar de outra base de periódicos.

## Condicionantes geológico-ambientais

O banco de dados geográficos utilizado para relacionar com a distribuição das cavidades é oriundo da base do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2019), o qual fornece vários parâmetros de dados derivados das características físicas, químicas, mecânicas e de formação das unidades litoestratigráficas mapeadas. A tabela de atributos compilada nos vetores georreferenciados suporta diversos temas em função das características geológicas. Este banco de dados também faz a convergência com dados oriundos de outras fontes oficiais de governo, tal como da Agência Nacional das Águas (ANA) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), todos estes dados podem também ser consultados pela plataforma da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE).

Esse banco de dados geográficos também fornece informações sobre a rede de drenagem, lineamentos geológico-estruturais, bacias hidrográficas, unidades aquíferas e parâmetros associados, além de idade das formações e métodos de datação que foram utilizados, caso existam.

Dados atualizados sobre a localização das cavernas naturais brasileiras foram obtidos através do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE, 2020). Neste cadastro se faz diferenciação entre abrigo, caverna e abismo, quanto à classificação de cavidades naturais subterrâneas, dadas as dimensões de abertura, altura, desenvolvimento vertical, horizontal, todas em relação a uma base de referência (base zero). Estas definições estão dispostas em Decreto, havendo também Instruções Normativas do Ministério do Meio Ambiente.

## Análises preditivas e estimador de densidade Kernel

Análises de correlação e de regressão (simples e múltipla) foram usadas para estimar a relação entre as variáveis pontuais do número de interseções por área de: contatos geológicos com rede hidrográfica (HC), lineamentos geológico-estruturais e contatos geológicos (LC), rede hidrográfica com lineamentos (HL) com a variável pontual do número de cavidades, no mesmo sistema de medida.

Foi feito teste-t de normalidade Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov para uma amostra no SPSS (IBM Corp, 2013), para verificar se a distribuição do número de cavidades por área se aproxima de uma distribuição normal ( $H_0$ ) ou não ( $H_1$ ). Onde foi verificado para ambos os testes-t para uma amostra que a média do número de cavidades por área é compatível com uma distribuição não paramétrica ( $t_{KS}(579) = 0,373$ ;  $p < 0,005$  e  $t_{SW}(579) = 0,455$ ,  $p < 0,005$ ), rejeitou-se a hipótese nula ( $H_0$ ). A transformação logarítmica foi tentada para normalizar os dados, porém não surtiu efeito ( $t_{KS}(579) = 0,122$ ;  $p < 0,005$  e  $t_{SW}(579) = 0,952$ ;  $p < 0,005$ ). Dessa forma, manteve-se para efeitos de relação entre as variáveis o número de cavidades por áreas, sem transformação.

Diante do exposto acima a correlação de Spearman foi utilizada, a qual é calculada da seguinte forma (Equação 1):

$$r_s = 1 - \frac{6 \times \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde  $d_i = r_{x_i} - r_{y_i}$ , com  $r_{x_i}$  e  $r_{y_i}$  variando de 1 a  $n$ , com valor máximo de  $r_s = 1$  (maior correlação positiva) e mínimo  $r_s = -1$  (correlação perfeitamente negativa), sendo que valores próximos de zero sugerem inexistência de correlação linear.

A regressão linear simples parte de um conjunto de observações pareadas  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ , em relação a variáveis  $X$  e  $Y$ , dada pela seguinte fórmula (Equação 2):

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i \quad (\text{Equação 2})$$

Onde  $y_i$  é a variável resposta associada a  $i$ -ésima observação de  $Y$ ;  $x_i$  é a  $i$ -ésima observação do valor fixado para a variável independente (e não aleatória)  $X$ ;  $\varepsilon_i$  é o erro aleatório para a  $i$ -ésima observação, isto é, o efeito de fatores que estão afetando a observação de  $Y$  de forma aleatória; enquanto que  $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros que precisam ser estimados pelo método dos mínimos quadrados.

O modelo estatístico da regressão linear múltipla com  $k$  variáveis regressoras  $(x_1, x_2, \dots, x_k)$  é dada por (Equação 3):

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \quad (\text{Equação 3})$$

Onde  $y_i$  é o valor observado de  $Y$  no  $i$ -ésimo nível de  $X$ ;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  são os parâmetros desconhecidos a serem estimados;  $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}$  é o  $i$ -ésimo nível das  $k$  variáveis independentes ( $i = 1, 2, \dots, n$ );  $\varepsilon_i$  é o erro que está associado à distância entre o valor observado  $Y_i$  e o correspondente valor estimado  $Y^*$ , do modelo proposto para o mesmo nível de  $X$ .

Para ambos os modelos de regressão o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é uma medida descritiva da proporção da variação de  $Y$  explicada pela variação de  $X$ , sendo que quanto mais próximo a 1, melhor o grau de explicação de  $Y$  em termos de  $X$  (Equação 4).

$$R^2 = \frac{\text{variação explicada pelo modelo}}{\text{variação total}}; \text{ sendo } 0 < R^2 < 1 \quad (\text{Equação 4})$$

Já o estimador de densidade de Kernel é uma função de densidade de probabilidade, técnica não paramétrica para estimar curvas de densidade ponderadas pela distância em relação a um valor central (núcleo). Onde  $x_0$  e um tamanho de janela  $h$  é definido em um histograma com intervalo  $[x_0 + mh, x_0 + (m + 1)h)$  para inteiro positivos e negativos  $m$ . Geralmente  $K$  é a função de densidade de probabilidade unimodal radialmente simétrica. A extensão para dados multivariados é direta, com o estimador de densidade  $p$ -dimensional, para uma amostra aleatória  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , retirada de uma amostra comum  $f$ , definida por (Equação 5):



$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (\text{Equação 5})$$

Onde  $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)'$  e  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})'$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , sendo que a função Kernel mais utilizada é a gaussiana com padrão de distribuição normal padrão (Equação 6):

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (\text{Equação 6})$$

Para as estimativas de densidade, foi adotado no presente estudo tamanho de pixel de 100 metros e raio de busca de 10 quilômetros.

### Autocorrelação Espacial

O índice I de Moran foi utilizado para o cálculo de autocorrelação espacial bivariada entre as variáveis preditoras HC, LC e HL em relação às cavidades (C). A autocorrelação espacial global é expressa conforme Equação 7 (Sefrin et al., 2018):

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n z_i z_j w_{ij}}{S_0 \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde  $n$  é o número de polígonos,  $z_i = (x_i - \bar{x})$  e  $z_j = (x_j - \bar{x})$  para  $i \neq j = 1 \dots n$ , referindo-se aos valores analisados das populações  $i$  e  $j$  centradas na média  $\bar{x}$  da variável de interesse. Enquanto que  $w_{ij}$  é o elemento da matriz de proximidade  $W$ ,  $n \times n$ , indicando a relação espacial para  $n$  populações, sendo  $S_0$  expresso pela fórmula a seguir (Equação 8):

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (\text{Equação 8})$$

A estatística LISA, ou índice local de Moran, é dado pela equação abaixo (Equação 9):

$$I_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma_0^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \mu), i = 1, \dots, n \quad (\text{Equação 9})$$

Sendo que  $\sigma_0^2$  representa a variância populacional da variável em estudo dos  $n$  polígonos;  $x_i$  mostra a observação de uma variável de interesse no polígono  $i = 1, \dots, n$ , e  $\mu$  corresponde à média dos  $n$  polígonos (população). Dentre as regras de convenção de matrizes de vizinhança, neste estudo foi adotada a mais comumente utilizada, o movimento da rainha de 1ª ordem na contiguidade (*Queen Contiguity*), o que torna a análise mais detalhada.

### Análise dos dados

A análise de dados foi dividida em quatro etapas, sendo elas:

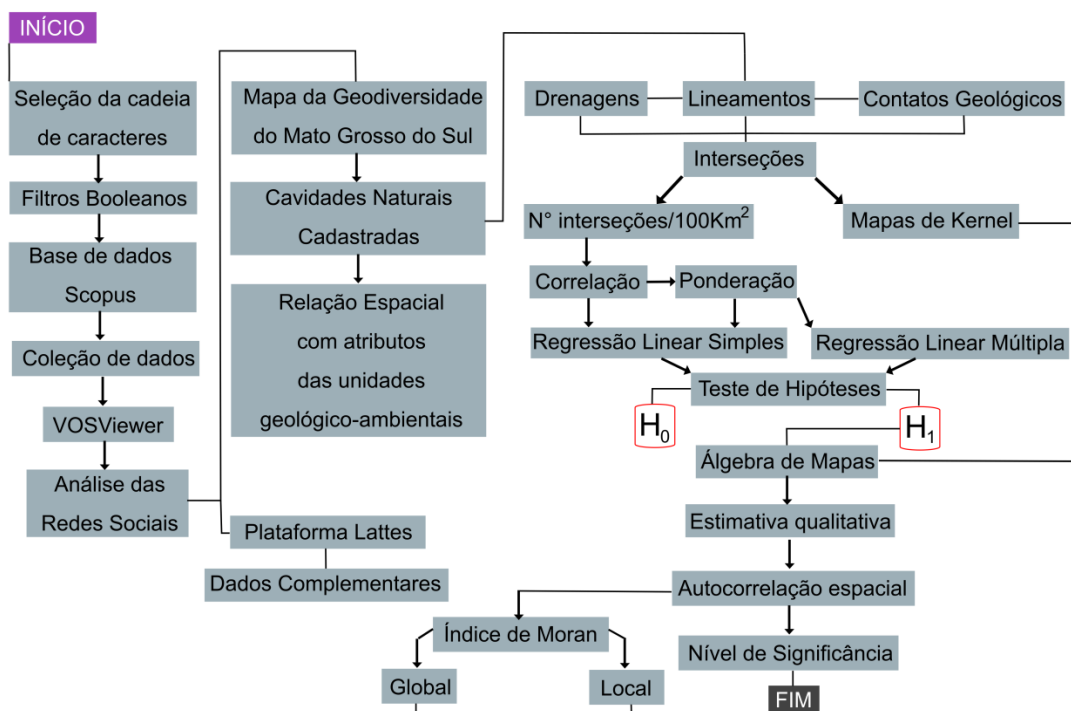
- 1ª) Exposição dos estudos obtidos sobre o tema específico do carste no Mato Grosso do Sul, suas relações, tendências e lacunas;

- 2<sup>a</sup>) Relacionamento entre atributos das unidades geológicas com a distribuição das cavidades naturais cadastradas;
- 3<sup>a</sup>) Análise preditiva por regressão linear simples e múltipla, que considera como variável dependente o número de cavidades por 100 quilômetros quadrados (células de amostragem regular de 10 x 10 km) e como variáveis independentes, as interseções combinadas por pares entre drenagens, lineamentos e contatos geológicos, todas amostradas no mesmo intervalo (100 km<sup>2</sup>);
- 4<sup>a</sup>) Obtenção dos índices de Moran, global e local, bem como o nível de significância das autocorrelações espaciais entre as variáveis da 3<sup>a</sup> etapa. Para o processamento destas informações utilizou-se o *software* QGIS 3.10.3 com GRASS 7.8.2 'A Coruna' (QGIS Development Team, 2020). Técnicas de união de atributos por localização, criação de malha regular amostral de 10 km, cálculo da densidade de pontos, estatística zonal, geração de mapa de calor pelo método Kernel foram empregados nas análises quantitativas e qualitativas.

Os dados estatísticos derivados desse processo foram analisados com o pacote estatístico SPSS (IBM Corp, 2013), obtendo-se informações de correlação e utilizando o valor do coeficiente de correlação para compor pesos na regressão linear simples e múltipla a fim de tentar aperfeiçoar a previsão. As hipóteses nulas ( $H_0$ ) e alternativas ( $H_1$ ) foram avaliadas utilizando os parâmetros do p-valor, coeficiente de correlação (R), coeficiente de determinação ( $R^2$ ), coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ajustado), erro padrão da estimativa (EP), e do teste Durbin-Watson (d).

A álgebra de mapas foi suporte para espacialização das áreas com maior potencial qualitativo de ocorrência de novas cavidades, operada na calculadora raster do QGIS (QGIS Development Team, 2020), sendo os planos de informações hierarquizados com os pesos arredondados resultantes da correlação, em uma equação modelada pela regressão linear múltipla. Para cumprir a 4<sup>a</sup> etapa, foi utilizado o *software* de código aberto e gratuito GeoDa (Anselin et al., 2006), o qual apresenta várias funcionalidades analíticas espaciais especializadas, como teste de autocorrelação e modelagem de regressão espacial. O fluxograma das etapas encontra-se resumido na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma-síntese dos materiais e métodos para estudo da ocorrência das cavidades naturais no Mato Grosso do Sul.



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Sobre as revisões na literatura especializada

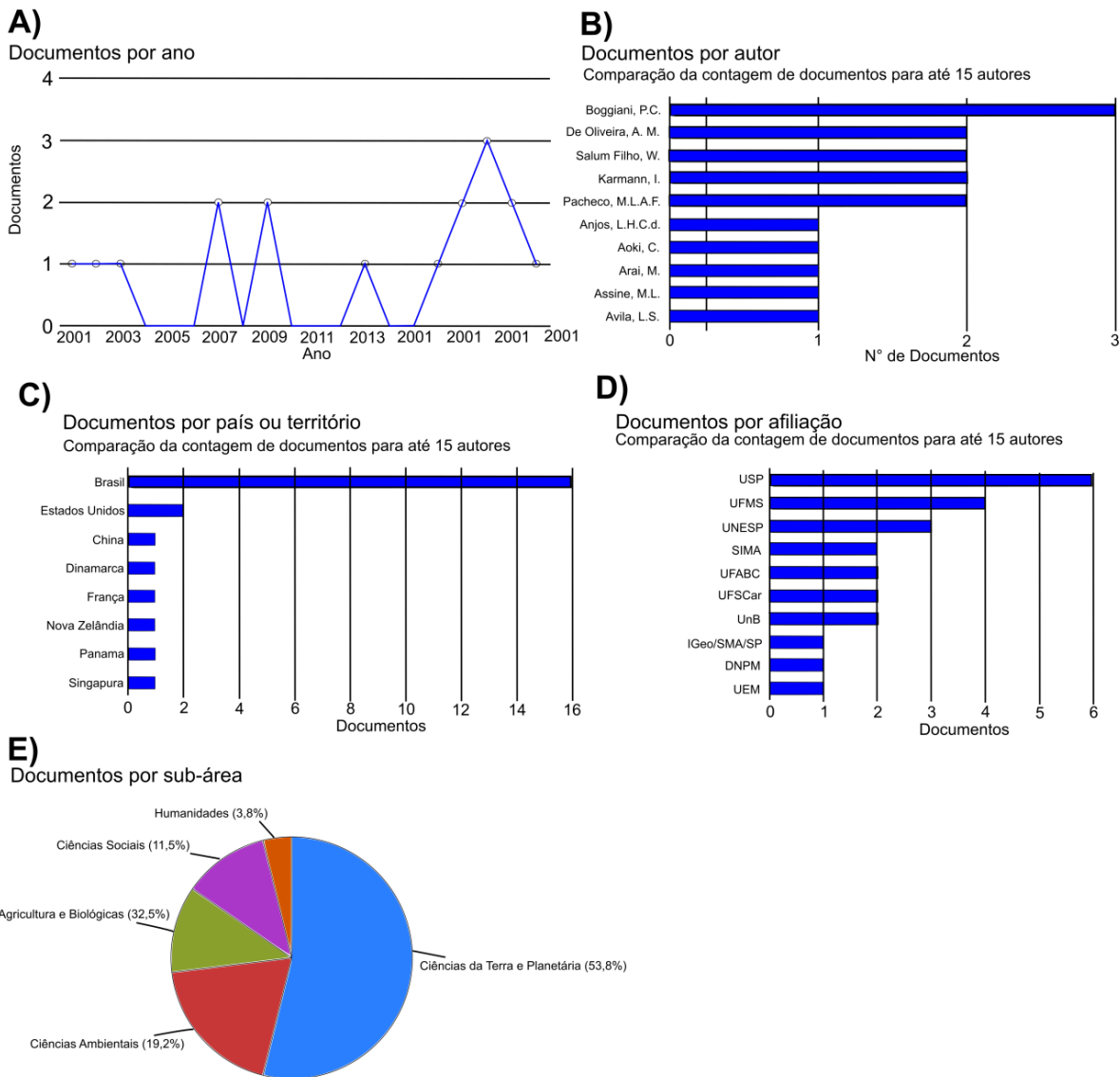
Os estudos relacionados ao carste do Mato Grosso do Sul (MS) datam desde a década de 1950, com trabalhos pioneiros de Mendes (1957) e Almeida (1965), os quais descrevem a Serra da Bodoquena, as primeiras grutas calcárias descobertas nesta região em escala de reconhecimento da geologia e por meio do levantamento de seções geológicas que definiam as unidades litoestratigráficas em nível de grupo. Estes estudos iniciais não estão indexados na Scopus, e mapeamentos geológicos, relatórios ou compilados via de regra não são indexados nestes repositórios.

A partir dos anos 2000, estudos do carste no MS passam a ser indexados, o primeiro aborda a unidade Geomorfológica Taquaruçu e suas lagoas associadas (Kramer; Stevaux, 2001), com o objetivo de caracterizar morfológica e sedimentologicamente material sedimentar na tentativa de reconstruir cenários durante o Holoceno, no que diz respeito às mudanças climáticas e ambientais (Figura 3A). Neste estudo os autores confirmaram a proposta evolutiva paleoclimática definida por outros autores, para o território centro-sul brasileiro e nordeste argentino. Os principais autores ranqueados sobre esta temática são mostrados na Figura 3B, trazendo estudos sobre: paleoclima, reconstrução paleoambiental,

paleogeográfica e paleoecológica, espeleoturismo, mapeamento geomorfológico e geológico de unidades cársticas.

A maior parte dos trabalhos é oriunda de pesquisas realizadas no Brasil, tendo cooperação com países como: Estados Unidos, China, Dinamarca, França, Nova Zelândia, Panamá e Singapura (Figura 3C). As três instituições que se destacam no tratamento deste tema são: Universidade de São Paulo, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul e Universidade Estadual Paulista (Figura 3D). Os estudos do carste no Mato Grosso do Sul interagem com algumas subáreas do conhecimento, tendo participações importantes: Ciências da Terra e Planetária (53,8%), Ciências Ambientais (19,2%), Agricultura e Biológicas (32,5%), Ciências Sociais (11,5%) e Humanidades (3,8%), tal como mostra a Figura 3E.

Figura 3 – A) Desempenho geral das publicações para pesquisas sobre o carste no Mato Grosso do Sul; B) Produtividade dos principais autores que estudam o carste no Mato Grosso do Sul; C) Principais países ranqueados pelo número de publicações sobre o tema; D) Principais instituições que pesquisam o carste no Mato Grosso do Sul; E) As principais subáreas de pesquisa relacionadas ao tema.



Bertaux et al. (2002) detalharam a mineralogia e a geoquímica de estalagmite de 44 cm, de uma das cavernas mais bem estudadas no Mato Grosso do Sul, denominada João Arruda. Os autores deste estudo verificaram informações relacionadas às mudanças climáticas durante os últimos 4000 anos, comparando dados climáticos de áreas próximas na América do Sul. Os resultados também demonstraram haver consistência com o padrão climático regional, confirmando a estalagmite como material de paleorregistro climático de alta resolução.

Registros de alta resolução paleoclimática, baseados em isótopos de oxigênio de estalagmites, coletados na porção central do Brasil, especificamente nas localidades de Bonito no Mato Grosso do Sul (caverna Jaraguá) e no Parque Estadual Terra Ronca, em Goiás (cavernas São Bernardo e São Mateus) permitiram avaliar nos últimos dois milênios a variabilidade hidrológica e verificar a intensidade da influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul no regime de monções (Novello et al., 2018). Em áreas muito próximas às estudadas por Novello et al. (2018), foram monitorados, por mais de 1 (um) ano, parâmetros que regem o crescimento de espeleotemas e da dinâmica de infiltração em ambientes cársticos, indicando que as estalactites apresentam variações na taxa de gotejamento intrinsecamente influenciadas pela defasagem no excedente de água e do fluxo de água em relação à cobertura (Sondag et al., 2003). Dados isotópicos de oxigênio e estrôncio obtidos em espeleotemas da caverna do Jaraguá, citada acima, também permitiram recentemente identificar o padrão e a influência do Sistema de Monções da América do Sul (SMAS) e da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) nas variações significativas de umidade e seca a depender da latitude, durante o Holoceno (Ward et al., 2019).

O filtro de busca retornou o trabalho de Trolle (2003), o qual trata de fauna de mamíferos recentes na região do Pantanal no município de Aquidauana. Essa associação tem dois motivos principais, sendo elas: o nome de uma das principais unidades geológicas carstificáveis presentes no estado é a Formação Aquidauana e também há estudos que tratam de mamíferos relacionados à Megafauna Pleistocênica e de outros mamíferos no registro paleontológico da Serra da Bodoquena (Oliveira et al., 2017).

Derivado de relatório de Estudo de Impacto Ambiental da Visitação Turística do Monumento Natural Gruta do Lago Azul, no município de Bonito (MS), com a autorização dos órgãos de controle - Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) e Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA), Boggiani et al. (2007) determinaram o número de visitas por dia para as grutas do Lago Azul e Nossa Senhora Aparecida. Neste trabalho mostraram a importância e a necessidade de estabelecer caminhos fixos para visitação, em vez de, apenas fazer um zoneamento quanto ao tipo de uso. Segundo estes autores, uma rota fixa de visitação evitaria vários problemas, entre eles: pisoteamento de certas espécies de fauna, acesso às áreas com risco a doenças, contato com fezes de morcego e com espeleotemas.

Outro estudo sobre a utilização de cavernas para o turismo foi conduzido por Lobo & Moretti (2009), visando identificar os procedimentos técnicos de manejo e as características das cavernas de forma que sejam garantidas a qualidade ecológica e a sustentabilidade destas atividades. Os autores verificaram a necessidade de aprimorar as técnicas e sistemas

de gestão, além da revisão de políticas adotadas, algumas das quais até já foram extintas em outros países. Eles também propuseram um programa de gestão contínua dos impactos da visitação turística e um controle da capacidade de carga em um sistema unificado.

O primeiro mapeamento geomorfológico para identificar zonas distintas no carste em escala de semidetalhe (1:60.000) foi elaborado na Serra da Bodoquena, sendo possível identificar várias feições, entre elas: dolinas, cavernas, sumidouros, fontes, cones, corredores, etc, sendo definidas seis principais zonas (Sallun Filho et al., 2007b). De acordo com estes autores, a Serra da Bodoquena é uma das áreas cársticas mais contínuas em superfície do Brasil, com cerca de 200 km de extensão, possuindo também importantes depósitos de tufas. Dolinas em arenitos na Formação Aquidauana, no município de Jardim (MS) foram comparadas às da Formação Furnas, no município de Ponta Grossa (PR), sendo os colapsos interpretados como resultantes do mecanismo de *piping* (Sallun Filho et al., 2007a). Estes autores afirmam que o relevo runiforme se apresenta como formas superficiais de origem erosiva e intempérica no arenito, resultando num pseudocarste conectado em profundidade com o sistema cárstico, sendo a direção dos condutos estruturalmente controlada sobre o arenito. Neste contexto, Sallun Filho et al. (2009) afirmam que a deposição de tufas deve-se à predominância de águas autogênicas enriquecidas em carbonato de cálcio. Por possuir características litológicas distintas, bem como contatos claros e abruptos mapeáveis, estes autores deram o status de Formação, nessa seção tipo da Serra da Bodoquena, portanto denominada Formação Serra da Bodoquena para esses sedimentos quaternários.

A Serra da Bodoquena também tem se configurado como um importante sítio paleontológico, com restos de fauna plesitocênica, as quais permitiram a redefinição da distribuição paleozoogeográfica de alguns táxons (Oliveira et al., 2017). O trabalho de Miraya et al., (2018) que trata sobre depósitos de tufas restritas a algumas drenagens no Vale do Ribeira, no estado de São Paulo, ocorre associado aos filtros utilizados na pesquisa integrativa, pelo fato de ter como um dos autores o pesquisador Sallun Filho, mas também por ser um dos importantes registros de tufas até então conhecidos no contexto geográfico sul-americano. Há também tufas da Formação Serra da Bodoquena ao longo de drenagens que escavam rochas subjacentes do Grupo Corumbá, onde Oste et al. (2018) detalharam três fácies, sendo elas: fitoherma, *shrubs* e estromatólitos, sendo os ambientes deposicionais equivalentes a piscinas, barreiras e cascatas/cachoeiras.

O filtro booleano de busca retornou o trabalho de Puker et al. (2013), pelo fato de tratar de interações ecológicas entre humanos, mamíferos e insetos atuais na região de Aquidauana e Anastácio. Apesar de não envolver o carste, os nomes de unidades geológicas (Formação Aquidauana e Formação Santo Anastácio), bem como a existência de estudos que tratam de coexistência das populações humanas com a megafauna (Pansani et al., 2016) conduziram à associação com este trabalho. O mesmo efeito ocorre com o trabalho de Teodoro & Aoki (2019), o qual relata o padrão de comportamento de mamíferos recentes em área urbana do município de Aquidauana.

Recentemente obteve-se registro da ocorrência de um roedor nativo da América do Sul, o *Cuniculus rugiceps* (popularmente conhecido como paca), na Toca da Raposa, estado de Sergipe, ampliou o conhecimento sobre a sua distribuição geográfica (Silva & Dantas,

2020). O gênero *Cuniculus* spp, anteriormente se restringia às regiões de Minas Gerais, Bahia, Mato Grosso do Sul, Goiás, São Paulo, Paraná, Acre, Pará e Piauí, conforme relatam os autores. A associação com este estudo também se deu pela existência do trabalho de Pansani et al., (2016).

O Mato Grosso do Sul tem revelado um importante potencial paleontológico em seus depósitos quaternários, tanto em grutas como em rios das regiões da Serra da Bodoquena e de Miranda (Pansani et al., 2016), os quais vêm auxiliando na elucidação de questões ainda em aberto sobre a extinção da Megafauna Pleistocênica na América do Sul e as interações ecológico-geográficas.

Com o objetivo de avaliar características físicas, químicas e micromorfológicas de solos no Planalto da Bodoquena, Silva et al., (2017) mostram que ao longo de uma topossequência pode haver uma grande variabilidade dos atributos do solo, mas frequentemente os solos possuem alto teor de carbonato de cálcio, sendo este responsável por revestimento de poros por calcita acicular. As unidades de solos identificadas nesta topossequência, foram: neossolos, luvisolos e chernossolos, assumindo que a gênese destes solos foi principalmente condicionada pela proximidade com o material parental e pela posição da encosta, conforme afirmam os autores.

As assembleias palinológicas preservadas em sedimentos recuperados do fundo de um dos lagos salinos na área de Nhecolândia do Pantanal permitiram reconstruir a história da vegetação local, bem como informações de isótopos de carbono confirmaram em grande parte os registros regionais oriundos de espeleotemas (Becker et al., 2018). Estes autores definiram dois principais períodos, mostrando que entre 3760 e 1510 antes do presente houve o predomínio de regimes de seca, sendo o período atual equivalente a uma fase úmida.

Assim, um panorama dos trabalhos sobre o carste no Mato Grosso do Sul pode ser visualizado na Tabela 1:

Tabela 1 - Resumo dos trabalhos com relação direta e indireta sobre o carste no Mato Grosso do Sul.

Autor(es)	Ano	Método(s)	Objetivo(s)
KRAMER et al.	2001	Caracterização morfológica e sedimentológica de depósitos da unidade geomorfológica Taquaruçu, datação por termoluminescência e susceptibilidade magnética	Reconstituição paleoclimática
BERTAUX et al.	2002	Datação U/Th de lâminas de espeleotemas	Reconstituição paleoclimática
TROLLE **	2003	Relação sem associação direta	
SODAG et al.*	2003	Monitoramento do clima pelo EDAS e relação com taxa de gotejamento de espeleotemas	Identificar parâmetros que regem o crescimento de espeleotemas
BOGGIANI et al.	2007	Método Cifuentes, medida de temperatura, umidade e fluxo energético	Determinação do número de visitantes em monumento natural
SALLUN FILHO & KARMANN	2007	Mapeamento geomorfológico 1:60.000	Identificar zonas cársticas morfologicamente distintas

*continua*

continua

Autor(es)	Ano	Método(s)	Objetivo(s)
SALLUN FILHO et al.*	2007	Mapeamento e comparação entre dolinas em arenito	Demonstrar a relação com o carste subjacente
LOBO & MORETTI	2009	Proposição da capacidade de carga turística	Identificação de procedimentos técnicos de manejo em práticas espeleoturísticas
SALLUN FILHO et al.	2009	Mapeamento de depósito de tufa	Formalização estratigráfica
PUKER et al.**	2013	Relação sem associação direta	
PANSANI et al.	2016	Descrição e identificação de registro paleontológico de depósitos quaternários	Auxiliar na elucidação sobre extinção da megafauna pleistocênica
OLIVEIRA et al.	2017	Registro da ocorrência de mamíferos quaternários	Redefinição da distribuição paleogeográfica
SILVA et al.	2017	Avaliação física, química e mineralógica de solos	Estabelecer a gênese
BECKER et al.*	2018	Análise da assembleia palinológica em sedimentos de lago salino e datação por radiocarbono	Reconstituição paleoambiental
MIRAYA et al.*	2018	Mapeamento, caracterização petrográfica e classificação dos depósitos de tufas	Interpretação sobre a gênese
OSTE et al.	2018	Correlação de dados isotópicos de carbono, oxigênio e palinológicos, análise geoquímica por DRX e FRX,	Reconstituição paleoambiental e identificação do ambiente deposicional
NOVELLO et al.*	2018	Isótopos de oxigênio e correlação com outras localidades	Reconstituição paleoclimática
TEODORO & AOKI**	2019	Relação sem associação direta	
WARD et al.	2019	Correlação entre isotópicos de estrôncio e oxigênio	Reconstituição paleoclimática
SILVA & DANTAS*	2020	Registro da ocorrência de <i>Cuniculus rugiceps</i> e interpretação da razão isotópica de carbono	Reconstituição paleoecológica

\*Base de dados dos periódicos CAPES; \*\*Relação sem associação direta com estudos do carste no Mato Grosso do Sul.

## Das Tendências

Diante das informações adquiridas pode-se perceber que as pesquisas se concentram principalmente em torno de temas relacionados à investigação do paleoclima, fazendo posse de dados isotópicos coletados em espeleotemas. Também há o empenho de técnicas destinadas a reconstituição paleoecológica e paleogeográfica. As tufas calcárias são uma das feições do carste do Mato Grosso do Sul mais bem estudadas em termos estratigráficos e paleoambientais, dada a sua importância na indústria de petróleo como rocha reservatório, auxiliando na compreensão de modelos exploratórios. As tufas foram mapeadas e formalizadas em termos estratigráficos, o que auxiliou na compressão de ambientes deposicionais.

Os trabalhos de geomorfologia cárstica foram essenciais para estabelecer as diferenças entre as feições do relevo com o desenvolvimento de dolinas em rochas não carbonáticas. Enquanto que o espeleoturismo vem buscando formas mais sustentáveis para suas atividades de visitas ao patrimônio natural.



## Das Lacunas

O carste fornece inúmeros métodos de pesquisa, exploração e fomento de atividades que podem contribuir para melhor entendimento da paisagem e da interação entre rocha, solo, clima e água e os processos de dissolução. Avaliar as rochas mais solúveis e com maior porosidade (primária ou secundária), permite identificar relevos cársticos, onde o fluxo de água subterrânea tende a formar uma rede complexa de canais, contribuindo para o aparecimento de dolinas, cavernas, lapiás, sumidouros, ressurgências, entre outras feições. Definir as tipologias cársticas, o seu zoneamento hidrológico e os processos geradores de dolinas, tal como revisado por Ferreira e Uagoda (2019), são questões ainda em aberto no Mato Grosso do Sul.

Neste contexto, denota-se carência de estudos hidrogeológicos, hidrogeoquímicos, geofísicos e estruturais, os quais podem contribuir para melhor compreensão do carste e do endocarste do território sul-mato-grossense. Diagnosticar e monitorar os possíveis fluxos de contaminantes sobre estes aquíferos, tendo em vista a ampla atividade agrícola e pecuária desenvolvida no estado, torna-se essencial para garantir melhor gestão dos recursos hídricos disponíveis.

## Das condicionantes geológico-ambientais

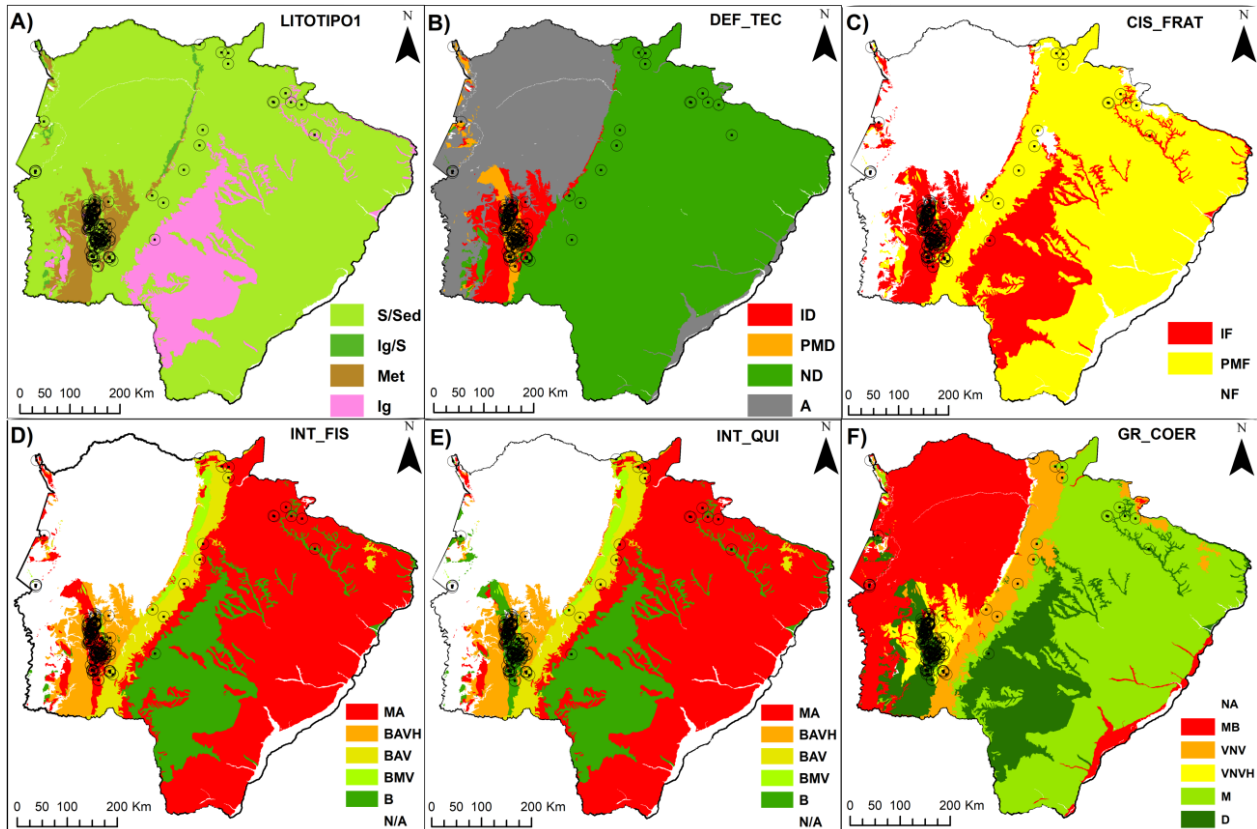
Aproximadamente 21% dos 79 municípios de Mato Grosso do Sul possuem cavidades cadastradas. Do total de 268 registros, 78% ocorrem nos municípios de Bodoquena e Bonito, outros 16% em Porto Murtinho, Jardim, Corumbá e Pedro Gomes. O restante de 6% se distribui entre uma ou duas ocorrências em outros 11 municípios (Guirra & Paranhos Filho, 2020). Considerando o número de cavidades por área municipal, tem-se Bodoquena, Bonito, Jardim, Porto Murtinho e Pedro Gomes destacando-se entre os 5 principais municípios com maior número de cavidades por área, variando de  $4,7 \times 10^{-2}$  cavidades/km<sup>2</sup> a  $8,2 \times 10^{-4}$  cavidades/km<sup>2</sup>.

As classes de rochas que concentram o maior número de cavidades são metamórficas (Met), seguidas pelas sedimentares (S/Sed) e pelas ígneas (Ig), conforme Figura 4A, tendo maior afinidade com ambientes onde a deformação tectônica é classificada como pouco ou moderadamente dobrada (PMD), seguida por intensamente dobrada (ID), não dobrada (ND), ou ausência de dobramento (A), de acordo com a Figura 4B. É notória a prevalência de cavidades em domínios onde a tectônica rúptil se estabeleceu, ocorrendo preferencialmente em zonas intensamente fraturadas (IF) ou em zonas pouco a moderadamente fraturadas (PMF), tal como mostrado na Figura 4C.

As cavidades estão associadas a setores onde o intemperismo físico é principalmente moderado a alto (MA), secundariamente onde varia de baixo a alto na vertical (BAV) e com menor expressão onde varia de baixo a alto, tanto na vertical quanto na horizontal (BAVH), tendo raras ocorrências onde o intemperismo físico é baixo (B), conforme Figura 4D. As cavidades se estabeleceram em unidades geológicas com amplo contraste de susceptibilidade ao intemperismo químico, desde baixa (B) a muito alta (MA), Figura 4E. O grau de coerência ou coesão, que diz respeito à resistência à penetração, baseado na tabela de

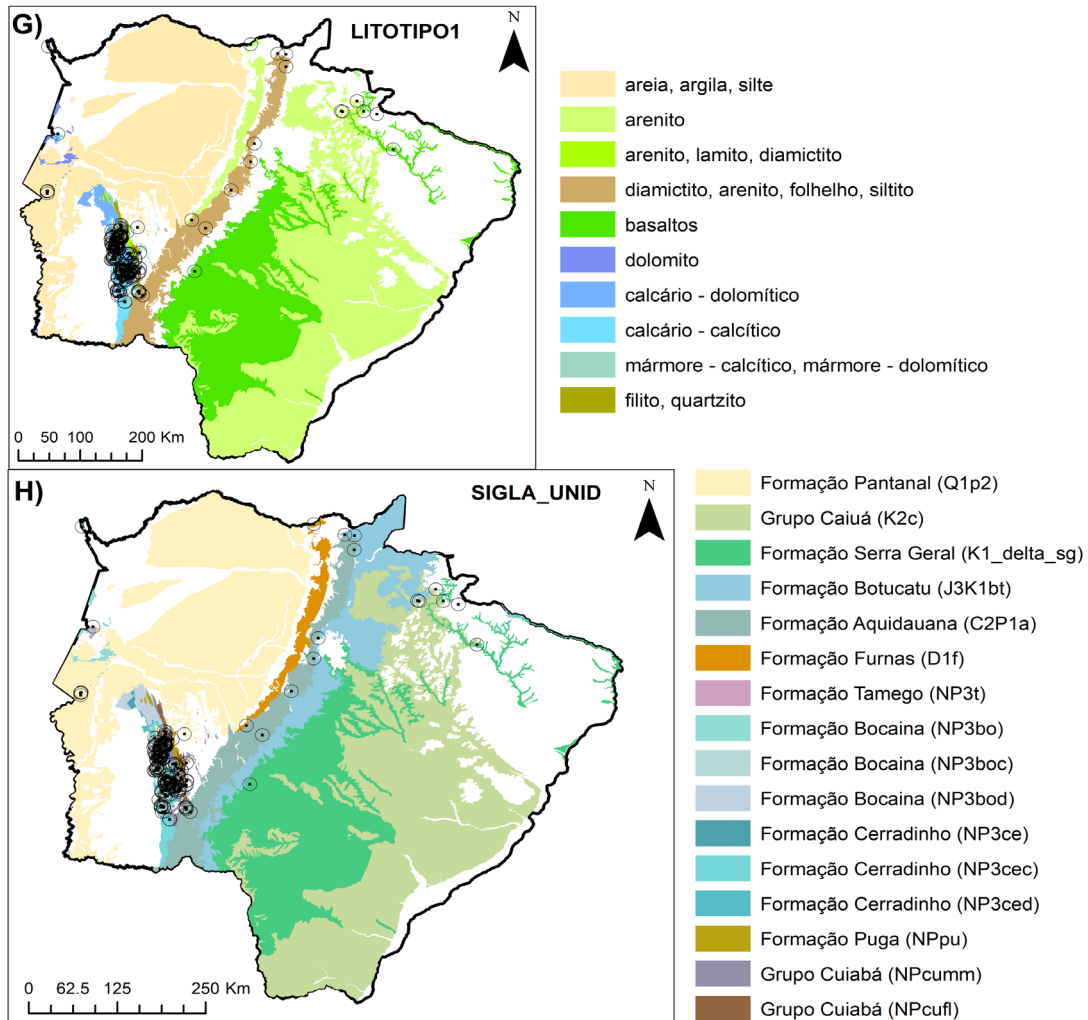
resistência à compressão uniaxial e classes de alteração (VAZ, 1996), traz maior ocorrência de cavidades em rochas duras (D), seguidas pelas médias (M) e com coerência variável na vertical e horizontal (VNVH), Figura 4F.

Figura 4 - Unidades geológico-ambientais do Mato Grosso do Sul. A) Litotipos que representam mais de 10% da unidade litoestratigráfica; B) Deformação tectônica e/ou dobramentos; C) Tectônica de fraturamento; D) Resistência ao intemperismo físico; E) Resistência ao intemperismo químico; F) Grau de coerência.



Cerca de 80% das cavidades ocorrem em rochas carbonáticas neoproterozoicas, 56% das cavidades em calcários calcíticos, outros 14% em mármore, 11% arenitos, 10% em calcários dolomíticos, 8% em quartzitos e 1% em basaltos (Figura 4G). A unidade litológica responsável por abrigar o maior número de cavidades (cerca de 59%) é a Formação Bocaina, com metacalcários oolíticos e dolomíticos silicosos, enquanto que mármore e filitos do Grupo Cuiabá correspondem a outros 22% do total. Entre os arenitos se destacam a Formação Aquidauana, Formação Botucatu e o Grupo Caiuá (Indiviso e Formação Santo Anastácio), as quais juntas expressam 5% do total de cadastros (Figura 4H). Até o momento, não há registro de cavidades nas formações ferríferas, cangas lateríticas, granitos e gnaisses existentes no estado. Neste contexto, Mato Grosso do Sul dispõe de relevante potencial espeleológico em rochas não carbonáticas, as quais cobrem a maior parte do estado, e mapeamentos com maior detalhe poderão revelar novas cavidades.

Figura 4 (cont.) - Unidades geológico-ambientais do Mato Grosso do Sul. G) Litologias ou material geológico predominante das unidades com alguma ocorrência de cavidade natural; H) Grupo ou Formação Geológica com alguma ocorrência de cavidade natural.



## Das Análises Preditivas

O resumo estatístico das variáveis predictoras utilizadas para estimar o número de cavidades por área pode ser visto na Tabela 2.

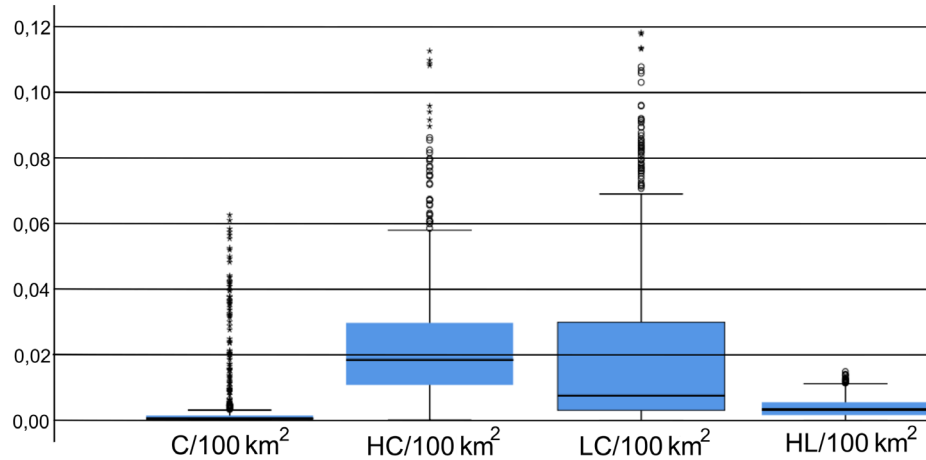
Tabela 2 - Estatística descritiva para as variáveis usadas no modelo de regressão.

Var	N	Média	Mediana	D.Pa	C.V	I.I	Mín	Máx	O
C	580,0	0,004615	0,000498	0,011097	2,404300	0,001185	0,000001	0,062611	0,0
HC	580,0	0,023289	0,018390	0,019180	0,823550	0,018867	0,000056	0,112660	0,0
LC	580,0	0,020354	0,007507	0,026129	1,283700	0,027018	0,000000	0,118280	0,0
HL	580,0	0,003964	0,003266	0,003149	0,794360	0,003880	0,000000	0,014847	0,0

Var = Variável; N = Número de amostras; D.Pa = Desvio padrão amostral; C.V: Coeficiente de variação; I.I = Intervalo interquartil; Mín = Mínimo; Máx = Máximo; O = Casos omissos.

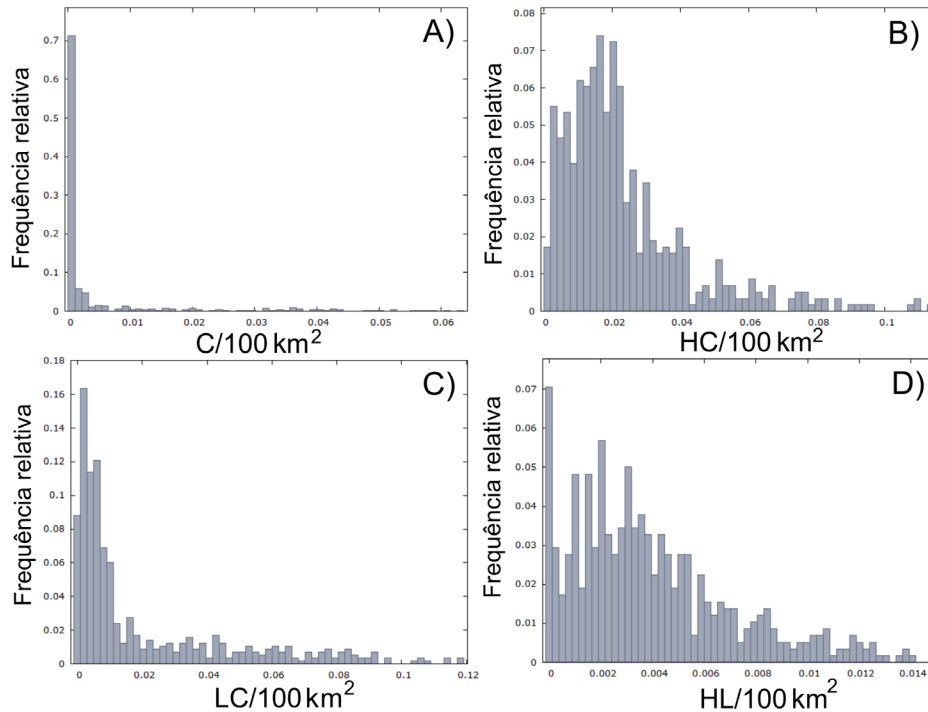
O *boxplot* (Fig. 5) mostra o resumo do conjunto de dados utilizados, onde se verifica alta dispersão de valores e alto número de valores discrepantes para C, HC e LC, sendo HL o dado com menor variabilidade de dispersão de valores.

Figura 5 – *Boxplot* (diagrama de caixa) com a distribuição das variáveis C/100km<sup>2</sup>; HC/100km<sup>2</sup>; LC/100km<sup>2</sup> e HL/100km<sup>2</sup>.



O histograma (Figura 6) resume o conjunto de dados utilizados, mostrando a distribuição da frequência de classes de valores. Observa-se que C e LC concentram grande parte dos dados próximos ao limite inferior (zero), enquanto que HC e HL estão mais bem distribuídos, apresentando maior frequência de valores fora do limite inferior. Ou seja, as variáveis C e LC apresentam-se no terreno de forma agrupada, enquanto que HC e HL tendem a ocorrer de forma mais dispersa.

Figura 6 – Resumo da frequência de distribuição das cavidades e interseções. A) Histograma da distribuição do número de cavidades a cada 100 km<sup>2</sup>; B) Histograma do número de interseções da rede de drenagem com contatos geológicos a cada 100 km<sup>2</sup>; C) Histograma do número de interseções de lineamentos geológico-estruturais com contatos geológicos a cada 100 km<sup>2</sup>; e D) Histograma do número de interseções da rede de drenagem com lineamentos a cada 100 km<sup>2</sup>.



A correlação bivariada de Spearman mostrou que há uma correlação positiva e baixa entre o número de interseções entre drenagens e contatos geológicos (HC) com o número de cavidades naturais ( $\rho = 0,392$ ;  $p < 0,001$ ). Também apresentou correlação positiva e fraca com o número de interseções de lineamentos geológico-estruturais e contatos geológicos (LC -  $\rho = 0,336$ ;  $p = 0,001$ ) e o número de interseções das drenagens e os lineamentos geológico-estruturais (HL), onde ( $\rho = 0,228$ ;  $p = 0,001$ ). Dessa forma se tem a correlação  $HC > LC > HL$  em relação às cavidades (C) em geral, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Desempenho da correlação de Spearman do número de interseções por 100 km<sup>2</sup> e o número de cavidades por 100 km<sup>2</sup>.

Correlação	C x HC	C x LC	C x HL
rô de Spearman ( $\rho$ )	0,392**	0,336**	0,228**
Sig. (2 extremidades)	0,000	0,000	0,000
Número de amostras	580	580	580

A regressão simples mostrou que o número de interseções a cada 100 km<sup>2</sup> entre a rede hidrográfica e contatos geológicos não prevê o número de cavidades (C) a cada 100 km<sup>2</sup> ( $HC = [F(1,578) = 369,984; p < 0,001; R^2 = 0,390]$ ). Tal fato também ocorre com as

interseções de lineamentos geológico-estruturais e contatos geológicos ( $LC = [F(1,578) = 349,173; p < 0,001; R^2 = 0,377]$ ). As interseções entre a rede hidrográfica e os lineamentos geológico-estruturais ( $HL = [F(1,578) = 117,696; p < 0,001; R^2 = 0,169]$ ) e com a soma destas interseções ponderadas pelo coeficiente de correlação de Spearman, ( $HCP + LCP + HLP = [F(1,578) = 536,258; p < 0,001, R^2 = 0,481]$ ) também não são predictoras de número de cavidades por área (a cada  $100 \text{ km}^2$ ), tal como mostra a Tabela 4.

Apesar dos pré-requisitos quanto ao número mínimo de amostras para cada variável preditora, dos valores dos sujeitos experimentais serem independentes e de haver relação linear entre a variável dependente e a variável independente, alguns outros pré-requisitos não foram satisfeitos. Dentre os pré-requisitos da regressão, o teste Durbin-Watson mostrou que existe autocorrelação entre os resíduos ( $d < 1,5$ ), também não houve normalidade dos resíduos, nem homocedasticidade para cada um dos casos, possuindo valores discrepantes acima e abaixo de 3 vezes o desvio padrão (Tabela 4).

Tabela 4 - Desempenho da regressão linear simples do número de interseções por  $100 \text{ km}^2$  e o número de cavidades por  $100 \text{ km}^2$ .

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	Erro padrão da Estimativa	Durbin-Watson
C x HC	0,625	0,390	0,389	0,0083	0,669
C x LC	0,614	0,377	0,376	0,0089	0,662
C x HL	0,411	0,169	0,168	0,1017	0,268
C x Soma (HC <sub>p</sub> +LC <sub>p</sub> +HL <sub>p</sub> )	0,694	0,481	0,480	0,007999	0,771

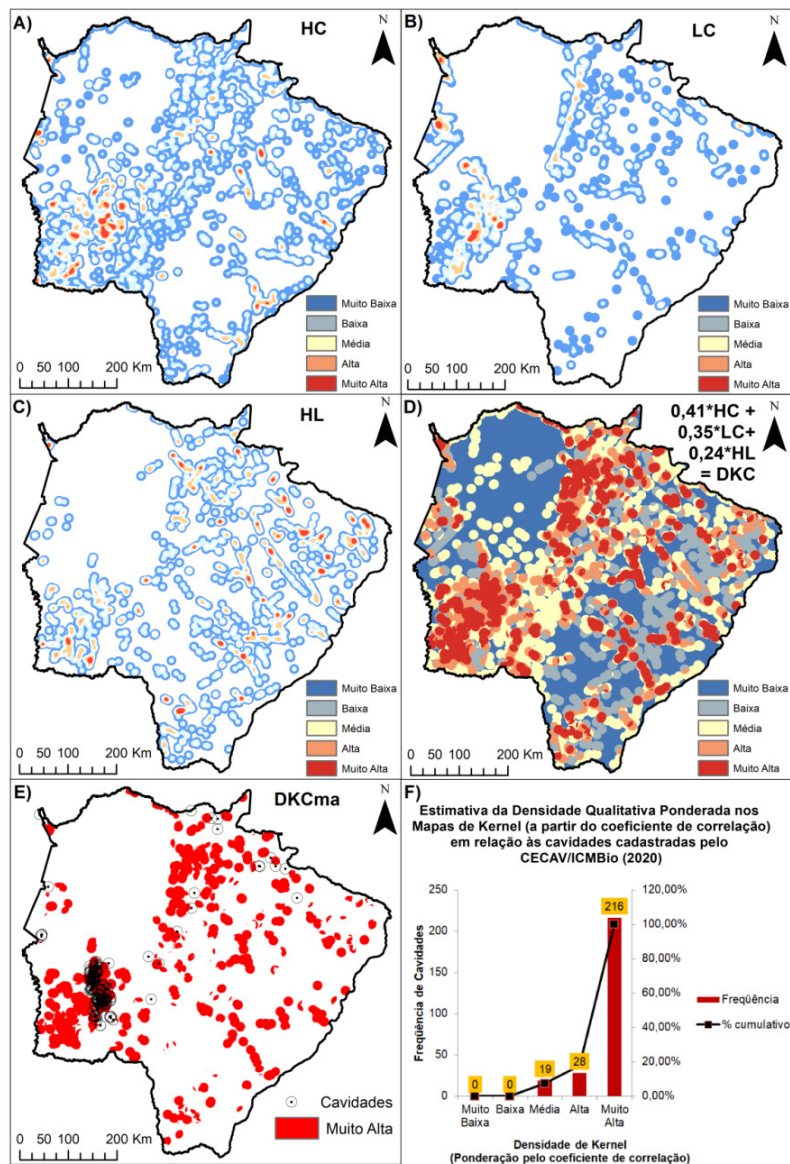
Foi utilizada a regressão múltipla considerando o modelo hierárquico para verificar se as variáveis de interseção ponderadas pelo coeficiente de Spearman ( $HC_p$ ,  $HC_p + LC_p$  e  $HC_p + LC_p + HL_p$ ), são capazes de prever o número de cavidades por áreas a cada  $100 \text{ km}^2$ . A análise resultou em um modelo estatisticamente não significativo [ $F(3,576) = 185,424; p < 0,001; R^2 = 0,491$ ]. Pré-requisitos como: número mínimo de amostras para cada variável preditora, valores dos sujeitos amostrais serem independentes, haver relação linear entre a variável dependente e entre as variáveis independentes e não existir multicolinearidade (Tolerância  $> 0,1$ ; VIF  $< 10,0$ ), foram atendidos. Porém, o teste Durbin-Watson, mostrou existência de autocorrelação entre os resíduos ( $d < 1,5$ ), bem como não houve normalidade entre os resíduos, nem homocedasticidade, possuindo valores discrepantes acima e abaixo de 3 vezes o desvio padrão (Tabela 5).

Tabela 5 - Desempenho da regressão linear múltipla do número de interseções por  $100 \text{ km}^2$  o número de cavidades por  $100 \text{ km}^2$ .

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	Erro padrão da Estimativa	Mudança de R <sup>2</sup>	p-valor	Durbin Watson
C x HC <sub>p</sub>	0,625	0,390	0,389	0,009	0,390	0,000	0,791
C x (HC <sub>p</sub> + LC <sub>p</sub> )	0,690	0,476	0,475	0,008	0,086	0,000	
C x (HC <sub>p</sub> + LC <sub>p</sub> + HL <sub>p</sub> )	0,701	0,491	0,489	0,008	0,015	0,000	

Nesse contexto, sabendo-se que não se podem utilizar as variáveis de interseção HC, LC, HL puras ou ponderadas para prever quantitativamente o número de cavidades, partiu-se para estimativas qualitativas. Isto se deu pelo interpolador de densidade Kernel, usando a função de densidade de probabilidade gaussiana para cada uma das variáveis independentes (Figura 7A, 7B, 7C). O mapa de álgebra ponderado pelo valor arredondado do coeficiente de correlação das variáveis HC, LC e HL, revelou regiões mais propícias à ocorrência de cavidades (Figura 7D, 7E) e a sobreposição das áreas com probabilidade muito alta, quando comparada com áreas com cavidades já cadastradas demonstram uma forte consistência, considerando um raio de busca de 10 km (Figura 7F).

Figura 7 – A) Mapa de densidade de Kernel de interseções de drenagens com contatos entre unidades geológicas; B) Mapa de densidade de Kernel para interseções entre lineamentos e contatos geológicos; C) Mapa de densidade de Kernel para interseções entre drenagens e lineamentos geológicos; D) Mapa da Ponderação entre os Mapas de Kernel anteriores para estimativa qualitativa de áreas mais predispostas à ocorrência de cavidades; E) Áreas com maior probabilidade de ocorrência de cavidades F) Desempenho da estimativa para prever ocorrência de cavidades, considerando raio de busca de 10 km.



De modo geral, os mapas de Kernel mostram que a ocorrência de cavidades está mais bem relacionada às regiões que apresentam interseções entre a rede de drenagem com contatos geológicos, seguida de uma associação secundária onde há lineamentos interceptando contatos geológicos. Estas associações são melhores explicadas no contexto de afloramentos de rochas carbonáticas neoproterozoicas. Para o contexto de cavidades desenvolvidas em substrato de rochas não carbonáticas, as interseções entre a rede de drenagem e lineamentos geológico-estruturais são mais evidentes, portanto melhores relacionadas, estando associadas de forma secundária a interações entre a rede de drenagem com contatos geológicos.

### Das autocorrelações espaciais

A Tabela 6 mostra que todas as variáveis possuem padrão agrupado, onde a diferença entre as  $n$  observações pode ser em parte descrita pela distância entre elas, havendo dependência espacial nas medidas, ou seja, indica que valores próximos tendem a ser mais semelhantes entre si. Seguindo essa lógica, tem-se que a autocorrelação espacial de  $LC > HC > C > HL$ , onde se descarta a hipótese nula de aleatoriedade ( $H_0$ ), sendo  $p < 0,005$  e  $z\text{-score} > 0$ .

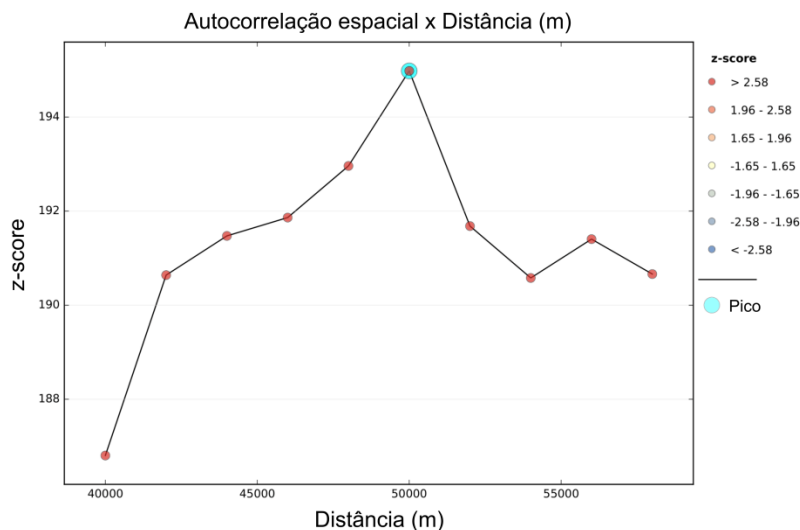
Tabela 6 – Resumo estatístico do índice de Moran Global.

	C	HC	LC	HL
Índice de Moran Global	0,89771	0,929352	0,92863	0,896365
Índice Esperado	-0,000265	0,000265	-0,000265	-0,000265
Variância	0,000210	0,000136	0,000136	0,000138
Z score	103,006040	82,724727	82,577861	78,594061
p-valor	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Ao se avaliar o z-score em relação à distância (Figura 8), o maior valor que indica que número de cavidades por área possuirá maior dependência espacial quando analisada em distâncias com passos de 50 km, ou seja, o padrão agrupado é mais forte e o disperso é mais fraco, diminuindo a probabilidade de distribuição aleatória. Neste caso, para uma análise exploratória de novas cavidades se indica fazer observações em grades regulares de 50 km, onde a dependência espacial é mais intensa, dado o contexto atual da escala de mapeamento e a quantidade e distribuição espacial das cavidades cadastradas.



Figura 8 – Autocorrelação espacial incremental, mostrando os raios do passo onde se verifica maior dependência espacial, dada a configuração da distribuição de cavidades cadastradas no Mato Grosso do Sul.

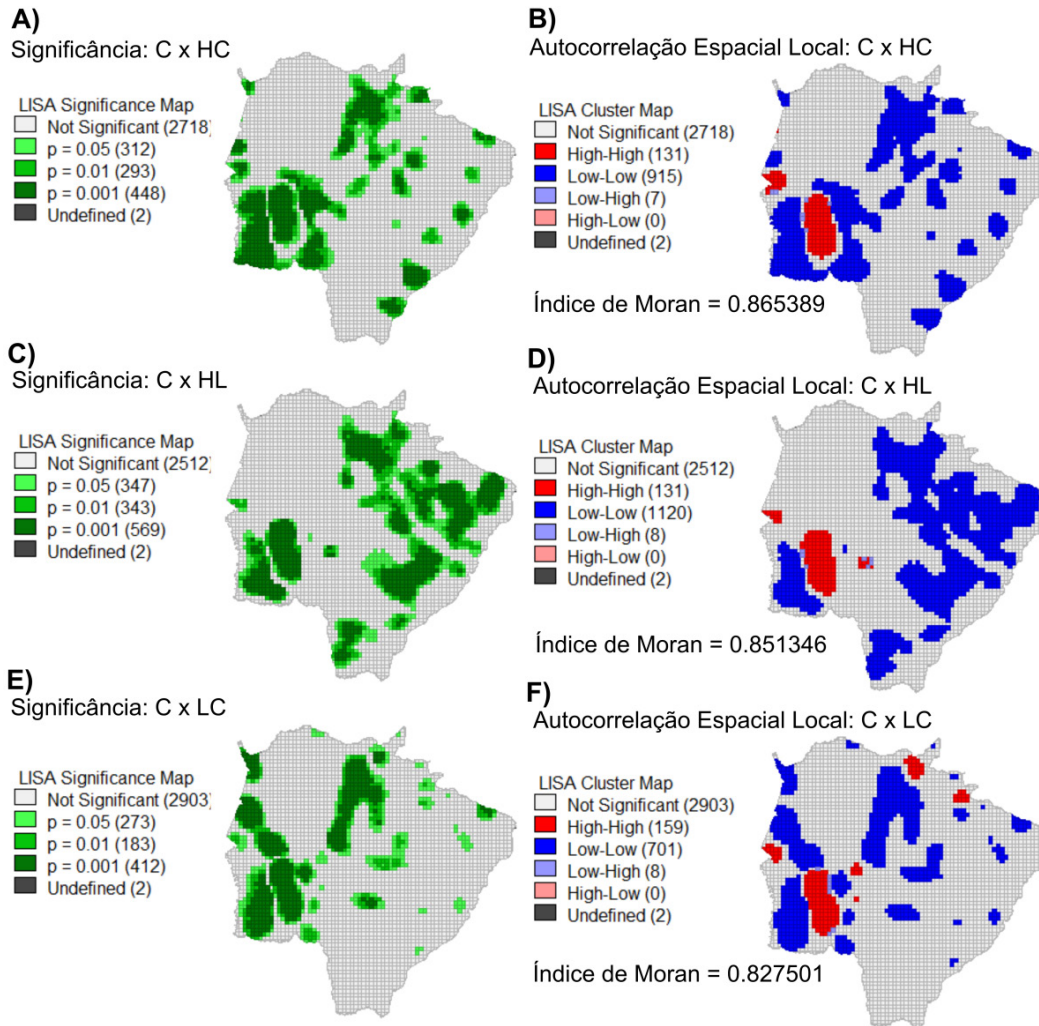


A aplicação do índice de associação local (LISA) representada em cartogramas fornece identificação de agrupamentos e zonas de transição entre bivariáveis.

Os mapas de significância de autocorrelação espacial local de Moran (Figura 9A, 9C, 9E) mostram os locais com uma estatística local significativa, representando em tons de verde cada vez mais escuros. Para valores não significantes o apontamento se dá em condições onde o número de interseções ou de cavidades estimada é nulo para ambas as variáveis, considerando o valor até a sexta casa decimal.

Os mapas de *clusters* (Figura 9B, 9D, 9F) demonstra para as localizações significativas o tipo de associação espacial, expressas em quatro categorias em relação à média, onde: vermelho-escuro (*clusters* alto-alto), azul-escuro (*clusters* baixo-baixo), azul-claro (valores discrepantes baixo-alto), vermelho-claro (valores discrepantes alto-baixo).

De modo geral, os mapas da Figura 9, sugerem padrões de autocorrelação diferentes, o que implica efeitos de interação diversificados com as variáveis condicionantes a depender do substrato rochoso ou compartimento geológico-ambiental envolvido.

Figura 9 – Mapas de significância e de *clusters* dos índices de Moran local.

A relação entre C e HC (Figura 9A, 9B) revela que há uma dependência espacial entre estas variáveis com intervalo de confiabilidade entre 95% e 99%, sobretudo nos domínios onde há rochas do Grupo Cuiabá (subunidade carbonática) e Grupo Corumbá (formações Cerradinho, Bocaina e Tamego). Nos setores onde há alta significância, porém com associações equivalentes de baixa densidade pra ambas variáveis (C e HC), predominam rochas dos grupos São Bento (formações Botucatu e Serra Geral) e Caiuá (Formação Santo Anastácio).

A relação entre C e HL (Figura 9C, 9D) acompanha o mesmo sentido da relação anterior, porém nesta se tornam mais evidentes domínios de alta-significância na autocorrelação do tipo baixo-baixo. As unidades que apresentam associação baixo-baixo, entre C e HL, são regiões de ocorrência do maciço Rio Apa (complexo metavulcanossedimentar), bem como na porção oriental do estado, onde o substrato rochoso é representado pelo Grupo Caiuá (Formação Caiuá indivisa e Formação Santo Anastácio). Chama-se atenção para a autocorrelação (alto-alto) das variáveis C e HL na parte central do mapa (Figura 9D),

onde aflora a Formação Aquidauana, em zona de degraus estruturais e rebordos erosivos, indicando uma resposta a essa interação na forma de relevo predominante.

A relação entre C e LC (Figura 9E, 9F) é significativamente alta nas unidades carbonáticas dos grupos Cuiabá e Corumbá, tal como as interações anteriores. Porém nesta há maior autocorrelação com aglomerados do tipo alto-alto em unidades de rochas não carbonáticas. Nas porções onde aparecem rochas das formações Furnas, Ponta Grossa, Aquidauana e Santo Anastácio, as quais são predominantemente areníticas ou possuem arenitos intercalados ou interdigitados com argilito, siltito e conglomerado, a relação entre C e LC possui bolsões de significância na dependência espacial e conseqüentemente uma autocorrelação espacial positiva. Isso mostra que zonas de lineamentos geológico-estruturais próximas a contatos entre unidades geológicas são áreas propícias ao desenvolvimento de processos de carstificação, o que vem confirmando evidências de mapeamento efetuadas por outros autores no estado, tal como nos trabalhos de Sallun Filho (2007a), Sallun Filho (2007b), Guirra et al., (2019) e Guirra & Paranhos Filho (2020).

Em face destas constatações pode-se estabelecer a seguinte regra para as condicionantes geológico-ambientais de interseção previsoras de processos de carstificação: em cavidades tipicamente carbonáticas a autocorrelação segue a hierarquia de influência de  $HC > HL > LC$ , enquanto que em cavidades não carbonáticas estas variáveis promovem controle e intensidade inversamente proporcional, sendo  $LC > HL > HC$ .

## CONCLUSÃO

Estudos sobre o carste do Mato Grosso do Sul iniciaram na década de 1950 e publicações indexadas ocorrem a partir dos anos 2000, concentrando em temas sobre reconstituição paleoambiental, paleoclimática, paleoecológica e paleogeográfica. Nestes trabalhos, a abordagem sobre o estado de conservação dos espeleotemas, vestígios fósseis e arqueológicos foram fundamentais. O uso de isótopos de oxigênio, carbono e estrôncio mostrou-se como uma técnica promissora de alta resolução na reconstituição paleoambiental. A posição geográfica em relação à América Latina e os padrões de circulação atmosférica atualmente vigentes nesta região, bem como, a preservação dos espeleotemas, a existência de extensos depósitos de tufas e evidências de restos da Megafauna Pleistocênica com coexistência humana, tornam o carste no Mato Grosso do Sul estrategicamente importante para entender interações ecológicas e reconstruir cenários paleoambientais.

Outras contribuições dizem respeito a mapeamentos geomorfológicos, estratigráficos, da gênese de solos e sobre a gestão do patrimônio natural para desenvolvimento do espeleoturismo. A partir deste estudo verifica-se a carência de pesquisas que fazem uso da hidrogeologia, geofísica e de geologia estrutural para entender o carste, haja vista a relevância destes temas para a compreensão da dinâmica destes ambientes.

Apesar de haver correlação entre interseções por área dos parâmetros geológicos (rede hidrográfica, contatos de unidades geológicas e lineamentos geológico-estruturais) com o número de cavidades por área, essa correlação se mostrou fraca. Não é possível

prever quantitativamente o número de cavidades a partir destas interseções, tendo em vista que nem todos os pré-requisitos das regressões (simples e múltipla) foram atendidos. Diante deste fato, aceita-se a hipótese nula ( $H_0$ ), onde o ajuste do modelo sem previsor é igual ao ajuste do modelo com o previsor. Porém, o estimador de densidade Kernel Gaussiano mostrou-se eficiente na estimativa qualitativa de áreas propícias a ocorrência de cavidades, quando ponderada pelo coeficiente de correlação na equação algébrica de mapas utilizando as variáveis HC, LC e HL como previsores.

Os métodos estatísticos espaciais dados pelos índices de Moran (global e local), bem como o nível de significância das autocorrelações mostraram-se eficientes para identificação de padrões de agrupamento entre as variáveis de interseção (HC, LC e HL) com as cavidades (C). Estas condicionantes geológico-ambientais atuam de maneiras distintas em rochas carbonáticas e não carbonáticas, sendo que a partir deste estudo conclui-se que a autocorrelação das variáveis HC, LC e HL, a depender do substrato geológico, atuam com intensidades inversamente proporcionais. Ou seja, em rochas carbonáticas a autocorrelação segue a ordem  $HC > HL > LC$ , enquanto que em rochas não carbonáticas (preferencialmente arenitos) opera a sequência  $LC > HL > HC$ .

As informações oriundas deste estudo servirão como uma primeira aproximação sobre estimativas de zonas homólogas potencialmente carstificáveis. Sugere-se para estudos futuros a aplicação do *Karst Disturbance Index* (PARISE, 2010), o qual considera perigos naturais e antropogênicos, na avaliação do grau de perturbação destes ambientes. Também se indica utilizar as informações oriundas deste estudo para futuras campanhas de prospecção, aliando técnicas de geoprocessamento, parâmetros métricos de bacias hidrográficas e da rede de drenagem associada, a métodos aerogeofísicos, possibilitando identificação do endocarste ou feições associadas que repercutam na superfície, tal como sumidouros e ressurgências.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PGTA/UFMS (Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais), da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS. Esta pesquisa foi realizada com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Também ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Processo 1815261/2019-01 de bolsa de doutorado; Processo 305013/2018-1 de bolsa de produtividade em pesquisa). Esse trabalho contou com o apoio da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC.

## REFERÊNCIAS

Almeida, F.F.M. (1965) Geologia da Serra da Bodoquena (Mato Grosso), Brasil. *Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia do DNPM/Rio de Janeiro*, n. 219, p. 1-96. [https://minerva.ufrj.br/F/?func=direct&doc\\_number=000010132&local\\_base=UFR01](https://minerva.ufrj.br/F/?func=direct&doc_number=000010132&local_base=UFR01)

- Anselin, L., Syabri, I., & Kho, Y. (2006) GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis. *Geographical Analysis*, v.38, n.1, p. 5-22. <https://doi.org/10.1111/j.0016-7363.2005.00671.x>
- Balsamo, F., Bezerra, F.H.R., Klimchouck, A.B., Cazarin, C.L., Auler, A.S., Nogueira, F.C.; & Pontes, C. (2019) Influence of fracture stratigraphy on hypogene cave development and fluid flow anisotropy in layered carbonates, NE Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, v. 114, n. December, p. 104207, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104207>
- Becker, B.F., Silva-Caminha, S.A.F., Guerreiro, R.L., Oliveira, E.J., D'apolito, C.D., & Assine, M.L. (2018) Late Holocene palynology of a saline lake in the Pantanal of Nhecolândia, Brazil. *Palynology*, v. 42, n. 4, p. 457-465. <https://doi.org/10.1080/01916122.2017.1386843>
- Bertaux, J., Sondag, F., Santos, R., Soubiès, F., Causse, C., Plagnes, V., Cornec, F.L., & Seidel, A. (2002). Paleoclimatic record of speleothems in a tropical region: Study of laminated sequences from a Holocene stalagmite in Central-West Brazil. *Quaternary International*, v. 89, n. 1, p. 3-16. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(01\)00077-5](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(01)00077-5)
- Boggiani, P.C., Silva, O.J., Gesicki, A.L.D., Gallati, E.A.B., Salles, L.O., & Lima, M.E.R. (2007). Defining carrying capacity fortourism in caves of the Gruta do Lago Azul Natural Monument (Bonito, MS). *Geociências*, v. 26, n. 4, p. 333-348. [https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/26\\_4/Art%204\\_Boggiani.pdf](https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/26_4/Art%204_Boggiani.pdf)
- CANIE. (2020). *Cadastro Nacional de Informações Espeleológica: Sistema Nacional de Informações do Meio Ambiente*. Disponível em: <<https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/cadastro-nacional-de-informacoes-espeleologicas/canie>> Acesso em: 03 de setembro de 2020.
- CAPES. (2020). *Portal de Periódicos da Capes*. Disponível em: <<https://www-periodicos-capes-gov-br.ez1.periodicos.capes.gov.br/index.php?>>. Acesso em: 15 de abril de 2020.
- CPRM, Serviço Geológico do Brasil. (2009). *Mapa Geodiversidade de Mato Grosso do Sul (1:1.000.000)*. Campo Grande. Disponível em: <<http://geosgb.cprm.gov.br/>> Acesso em: 15 de março de 2019.
- Eberhard, R., & Sharples, C. (2013). Appropriate terminology for karst-like phenomena: the problem with 'pseudokarst'. *International Journal of Speleology*, v. 42, n. 2, p. 109-113. <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.42.2.2>
- Elsevier BV. *Scopus Database*. Disponível em: <https://www.elsevier.com/pt-br/solutions/scopus> Acesso em: 11 fevereiro de 2020.
- Ferreira, C.F., & Uagoda, R.E.S. (2019). Tipologias do carste e classificações de dolinas: uma revisão. *Caminhos de Geografia*, v. 20, n. 70, p. 519-53. <https://doi.org/10.14393/RCG207044169>
- Goldscheider, N., Chen, Z.; Auler, A.S.; Bakalowicz, M., Broda, S., Drew, D., Hartmann, J., Jiang, G., Moosdorf, N., Stevanovic, Z., & Veni, G. (2020). Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. *Hidrogeology Journal*, v. 28, p. 1661-1677. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02139-5>
- Guirra, A.P.M., Carvalho, I.S., Vasconcelos, A.M.C, & Paranhos Filho. (2019). Carste em arenito pós-basalto no nordeste de Mato Grosso do Sul. In: RODET, J (Org.). *Anais do IV Simpósio Mineiro do Carste: o carste em suas múltiplas dimensões*. 01 ed. Belo Horizonte, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, 2019, v. 01, p. 17-18. <http://www.cnek.org/spip.php?article184>
- Guirra, A.P.M., & Paranhos Filho, A.C. (2020). Cavidades do Mato Grosso do Sul. *I Open Network em Geotecnologias*. Evento Online, Universidade Federal do Semi-Árido. 2020. <https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/atenas/article/view/10571>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2019). *Cidades e estados*. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ms.html>> Acesso em: 26 de novembro de 2020.
- IBM Corp. (2013). IBM SPSS Statistics for Windows, Versão 22.0. Armonk, NY: IBM Corp. <https://ibm-spss-statistics-base.br.uptodown.com/windows>
- Klaas, D.K.S.Y., Imteaz, M., Sudiayem, I., Klass, E.M.E., & Klass, E.C.M. (2020). Assessing climate changes impacts on tropical karst catchment : Implications on groundwater resource sustainability and

- management strategies. *Journal of Hydrology*, v. 582, n. October 2019, p. 124426. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124426>
- Kramer, V.M.S., & Stevaux, J.C. (2001). Climatic changes in the Taquaruçu region (MS, Brazil) during the Holoceno. *Boletim Paranaense de Geociências*, n. 49, p. 79–91. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/geo.v49i0.4127>
- Lima, D.L., Motta, J.S., Souza, C.A., Guirra, A.P.M., & Paranhos Filho, A.C. (2019). Revisão bibliométrica sobre turbidez e sólidos suspensos por sensoriamento remoto. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 42, n.1, p.107-116. DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2019\\_1\\_107\\_116](http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_107_116)
- Lobo, H.A.S., & Moretti, E.C. (2009). Tourism in caves and the conservation of the speleological heritage: The case of Serra da Bodoquena (Mato Grosso do Sul State, Brazil). *Acta Carsologica*, v. 38, n. 2–3, p. 265–276. <https://ojs.zrc-sazu.si/carsologica/article/view/127/117>
- Mendes, J.C. (1957). Grutas calcárias na Serra da Bodoquena, Mato Grosso. *Boletim Paulista de Geografia*, n. 25, p. 70-77. <https://publicacoes.agb.org.br/boletim-paulista/article/view/1292>
- Miraya, B.B., Sallun Filho, W., Ribeiro, L.M.A.L., Boggiani, P.C.; & Shimada, H. (2018). New occurrences of tufa in the ribeira river valley (São Paulo state, Brazil) . *Geociências*, v. 37, n. 2, p. 299–313. [https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/37/volume37\\_2\\_files/37-2-artigo-06.pdf](https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/37/volume37_2_files/37-2-artigo-06.pdf)
- Mothé, D., Avilla, L.S., Araújo-Júnior, H.I., Rotti, A., Prous, A., & Azevedo, S.A.K. (2020). An artifact embedded in an extinct proboscidean sheds new light on human-megafaunal interactions in the Quaternary of South America. *Quaternary Science Reviews*. v. 229. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.106125>
- Novello, V.F., Cruz, F.W., Moquet, J.S., Vullue, M., De Paula, M.S., Nunes, D., Edwards, R.L., Cheng, H., Karmann, I., Strikis, N.M., & Campos, J.L.P. (2018). Two Millennia of South Atlantic Convergence Zone Variability Reconstructed From Isotopic Proxies. *Advanced Earth and Space Science, Geophysical Research Letters*, p. 5045–5051. <https://doi.org/10.1029/2017GL076838>
- Olarinoye, T., Gleeson, T., Marx, V. et al. (2020). Global karst springs hydrograph dataset for research and management of the world's fastest-flowing groundwater. p. 1–9. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11336507>
- Oliveira, A.M., Kerber, B.K., Borghezán, L.M.C.R., Avilla, L.S., Pacheco, M.L.A.F., & Santos, C.M.D. (2017). Quaternary mammals from central Brazil (Serra da Bodoquena, Mato Grosso do Sul) and comments on paleobiogeography and paleoenvironments. *Revista Brasileira de Paleontologia*, v. 20, n. 1, p. 31–44. doi:10.4072/rbp.2017.1.03
- Oste, J.T.F., Arai, M., França, A.B., Cury, L.F., & Bahniuk, A.M. (2018). Geochemistry and palinology of calc tufas of the Bonito region (MS): environmental implications. *Geociências*, v. 37, n. 4, p. 733-744. <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/188046>
- Pansani, T.R., Oliveira, A.M., & Pacheco, M.L.A.F. (2016). New occurrence of Pleistocene megafauna in Mato Grosso do Sul. *Revista do Instituto Geológico*, v. 37, n. 2, p. 73–85. doi:10.5935/0100-929x.20160010
- Parise, M. (2010). Harzards in Karst. In: BONACCI, O. Sustainability of the karst environment. International Interdisciplinary Scientif Conference. *Proceedings*, Centre for Karst, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization 7, Fontenoy, Paris. 2010. p.155-162.
- Puker, A., Correa, C.M.A., Koraski, V., Ferreira, K.R., & Oliveira, N.G. (2013). Dung beetles (Coleoptera: Scarabaeidae) attracted to dung of the largest herbivorous rodent on earth: A comparison with human feces. *Environmental Entomology*, v. 42, n. 6, p. 1218–1225. <https://doi.org/10.1603/EN13100>
- QGIS Development Team. (2020). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Avaliado em: <<http://www.qgis.org/>>. Acessado: April 10, 2020.
- Sallun Filho, W., Boggiani, P.C., Cristalli, P.S., & Utida, G. (2009). The deposition of Quaternaty tufas in Mato Grosso do Sul state: Proposal for the definition of the Serra da Bodoquena Formation. *Geologia USP - Serie Cientifica*, v. 9, n. 3, p. 47–60, 2009. : <https://doi.org/10.5327/Z1519-874x2009000300003>
- Sallun Filho, W., & Karmann, I. (2007a). Dolinas em arenitos da Bacia do Paraná : evidências de carste subjacente em Jardim (MS) e Ponta Grossa (PR). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, n. 3, p. 551–564. <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9264>

- Sallun Filho, W., & Karmann, I. (2007b). Geomorphological map of the Serra da Bodoquena karst, west-central Brazil. *Journal of Maps*, v. 3, n. 1, p. 282–295. <https://doi.org/10.1080/jom.2007.9710845>
- Sefrin, R., Araújo, E.C., & Bazzi, C.L. (2018). Análise espacial de área aplicada a produtividade de soja na região oeste do Paraná utilizando o software R. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 6, n. 1, p. 23-43. <http://dx.doi.org/10.3895/rbgeo.v6n1.5912>
- Si-Liang, L., Cong-Quiang, L., Jin-Na, C., & Shi-Jie, W. (2021). Karst ecosystem and environment: Characteristics, evolution processes, and sustainable development. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 306, n. July 2020, p. 107173. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107173>
- Silva, M.B., Anjos, L.H.C., Pereira, M.G., Chiavo, J.A., Cooper, M., & Cavassani, R.S. (2017). Soils in the karst landscape of Bodoquena plateau in cerrado region of Brazil. *Catena*, v. 154, p. 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.02.022>
- Silva, G.C.R., & Dantas, M.A.T. (2020). Fossil record and isotopic paleoecology ( $\delta^{13}C$ ) of *Cuniculus rugiceps* in Toca da Raposa, Simão Dias, Sergipe, Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 43, n. 1, p. 334–338. [http://dx.doi.org/10.11137/2020\\_1\\_334\\_338](http://dx.doi.org/10.11137/2020_1_334_338)
- Sondag, F., Ruymbeke, M.Van., Soubiès, F., Santos, R., Somerhausen, A., Seidel, A., & Boggiani, P. (2003). Monitoring present day climatic conditions in tropical caves using an Environmental Data Acquisition System (EDAS). *Journal of Hydrology*, v. 273, p. 103–118. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00362-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00362-1)
- Souza, M.T., Silva, M.D., & Carvalho, R. (2010). Integrative review: what is it? How to do it? *Einstein*, v.8, p.102-106. <https://doi.org/10.1590/S1679-45082010RW1134>
- Teodoro, J. R., & Aoki, C. (2019). Effect of temperature and relative humidity on the behavior of Capybaras (*Hydrochoerus hydrochaeris*) in an urban area. *Oecologia Australis*, v. 23, n. 4, p. 1109–1113. <https://doi.org/10.4257/oeco.2019.2304.32>
- Trolle, M.(2003). Mammal survey in the southeastern Pantanal, Brazil. *Biodiversity and Conservation*, v. 12, n. 4, p. 823–836. <https://doi.org/10.1023/A:1022489426920>
- Van Eck, N.J., & Waltman, L. (2007). VOS: A new method for visualizing similarities between objects. In: Decker, R, Lenz, H.J (eds). *Advances in data analysis: Studies in Classification, Data Analysis and Knowledge Organization*. Berlin, Heidelberg, Springer, p. 299-306. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-70981-7\\_34](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-70981-7_34)
- Vaz, L.F. (1996). Genetic classification of soils and rock weathering layers in tropical regions. *Solos e Rochas*, São Paulo, v. 19; n. 2, p. 117-136. [http://www.fec.unicamp.br/~persio/ic570/Vaz\\_1996.pdf](http://www.fec.unicamp.br/~persio/ic570/Vaz_1996.pdf)
- VOSviewer. (2020). VOSviewer version 1.6.15. Disponível em: <<https://www.vosviewer.com/download>> Acesso em: 13 de janeiro de 2020.
- Ward, B.M., Wong, C.I., Novello, V.F., Mcgee, D., Santos, R.V., Silva, L.C.R., Cruz, F.W., Wang, X., Edwards, R.L., & Cheng, H. (2019). Reconstruction of Holocene coupling between the South America Monsoon System and local moisture variability from speleothem  $\delta^{18}O$  and  $87Sr/86Sr$  records. *Quaternary Science Reviews*, v. 210, p. 51–63. <https://doi.org/10.1080/01916122.2017.1386843>
- Wray, R.A.L., & Sauro, F. (2017). An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites. *Earth-Science Reviews*, v. 171, p. 520-557. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.008>

Recebido em 18/ago./2021

Aceito em 14/mar./2024

Versão corrigida recebida em 06/mai./2024

Publicado em 17/ mai./2024