



VULNERABILIDADE NATURAL DA FOLHA MONTES CLAROS - MG: PATRIMÔNIO GEOMORFOLÓGICO CÁRSTICO

Francielle Gonçalves Caminhas
Universidade Federal de Goiás

Davy Alves Caminhas
Universidade Federal de Minas Gerais

Expedito José Ferreira
Universidade Estadual de Montes Claros

RESUMO

Os patrimônios geomorfológicos são importantes ocorrências de formas de relevo que devem ser preservadas e incorporadas às ações relativas ao desenvolvimento econômico e sustentável. Na análise de patrimônio geomorfológico, o relevo cárstico deve ser entendido como um sistema aberto composto por dois subsistemas: hidrológico e geoquímico, intimamente integrados, que agem sobre rochas solúveis. Essa paisagem apresenta recursos naturais abundantes (p.ex. a água subterrânea e a própria rocha) que precisam ser conservados e manejados adequadamente. Neste contexto, este estudo tem por objetivo analisar e mapear a vulnerabilidade natural do patrimônio geomorfológico cárstico da Folha Montes Claros/MG. Os procedimentos metodológicos consistem na aplicação da metodologia de análise da vulnerabilidade natural por meio do Índice de Concentração e Rugosidade (ICR) e Análise Multicritério. Os resultados apontam que aproximadamente 50% da área se insere em alto e muito alto Índice de Vulnerabilidade Natural (IVN), o pode estar relacionado a própria fragilidade do relevo cárstico, e/ou à lito-dependência e pedo-dependência. Deste modo, as áreas com substratos geológicos mais vulneráveis mantiveram esse caráter quando combinadas com cambissolos e solos litólicos. Logo, as áreas com litologia mais vulnerável, combinadas com solos mais desenvolvidos e estáveis, latossolos, por exemplo, mostraram-se menos vulneráveis. A metodologia empregada mostrou-se satisfatória, pois a manipulação das variáveis no modelo com base na análise multicritério, permitiu uma análise sistemática, integrada, e possibilitou a espacialização das classes de vulnerabilidade do patrimônio geomorfológico – cárstico.

Palavras-chave: Geomorfologia, vulnerabilidade, geodiversidade, patrimônio, carste.

NATURAL VULNERABILITY OF THE MONTES CLAROS LEAF - MG: KART GEOMORPHOLOGICAL HERITAGE

ABSTRACT

The Geomorphological heritage are an important occurrence of landforms that must be preserved and incorporated into actions related to economic and sustainable development.

In the analysis of geomorphological heritage, karst relief should be understood as an open system composed of two subsystems: hydrological and geochemical, closely integrated, which act on soluble rocks. This landscape has abundant natural resources (eg groundwater and the rock itself) that need to be conserved and managed properly. In this context, this study aims to analyze and map the natural vulnerability of the karst geomorphological heritage of Folha Montes Claros/MG. The methodological procedures consist of applying the methodology for analysis natural vulnerability through the Concentration and Roughness Index (ICR) and Multicriteria Analysis. The results show that approximately 50% of the area is inserted in a high and very high Natural Vulnerability Index (NVI), which may be related to the very fragility of the karst relief, and/or to the lito-dependence and pedo-dependence. In this way, the areas with the most vulnerable geological substrates maintained this character when combined with cambisols and litolic soils. Therefore, the areas with the most vulnerable lithology, combined with more developed and stable soils, oxisols, for example, were less vulnerable. The methodology employed proved to be satisfactory, since the manipulation of variables in the model based on multicriteria analysis, allowed for a systematic, integrated analysis, and made it possible to spatialize the vulnerability classes of the geomorphological - karst heritage.

Keywords: Geomorphology, vulnerability, geodiversity, heritage, karst.

INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta uma excêntrica diversidade, no que se refere à sua componente biótica (biodiversidade) e abiótica (geodiversidade). A extensão territorial, a riqueza de recursos naturais, a complexidade geológica, geomorfológica e hidrográfica, conferem à geodiversidade brasileira (geosítios com seus inúmeros tipos de minerais, rochas, cachoeiras, montanhas, feições ruiformes, fósseis, entre outros) uma beleza singular.

Os estudos científicos sobre geodiversidade, geoconservação e geoturismo dizem respeito a uma tríade conceitual relativamente nova nas geociências. Conforme Gray (2004), o termo geodiversidade começou a ser usado por geólogos e geomorfólogos nos anos 1990. A princípio o termo era voltado para descrever a variedade da natureza abiótica. Contudo, maior atenção ao longo da história da conservação vem sendo dada à biodiversidade e à conservação da vida selvagem. Essa atenção reforça o desequilíbrio de longa data dentro da política e prática de conservação da natureza entre os elementos bióticos e abióticos (GRAY, 2004; 2005; BRILHA, 2005; DO NASCIMENTO, RUCHKYS, MANTESSO-NETO, 2008). No que diz respeito ao geoturismo, Brilha (2005) o define como uma atividade que se baseia na geodiversidade. No entanto, nem todas as definições de geoturismo estão relacionadas à geodiversidade, ou fazem menção a ela. Por exemplo, aquelas situações em que o atrativo e/ou geossítio é relacionado à biodiversidade, apesar da biodiversidade ser um elemento da geodiversidade.

É necessário compreender que geodiversidade e geoconservação não são sinônimos. Conforme Pereira et al. (2013), o conceito de geodiversidade não é amplamente aceito e usado como o da biodiversidade. O conceito é frequentemente mencionado apenas como uma abordagem teórica sem relevância ou aplicação particular, associada geralmente ao patrimônio geológico e à geoconservação. Gray (2004; 2005), define a geodiversidade pela variação natural de aspectos geológicos, geomorfológicos e pedológicos, o que incluem suas composições, relações, propriedades, interpretações e sistemas. Portanto, corresponde a toda variedade abiótica da natureza. Enquanto o patrimônio geológico é um conjunto dos elementos da geodiversidade, a geoconservação é o termo geral que abrange a conservação do patrimônio geológico (GRAY, 2004; 2005; BRILHA, 2005). Desta forma, a geoconservação tem como objetivo conservar a diversidade natural, com intuito de garantir a história de sua evolução (SHARPLES, 2002).

Para Brilha (2005; 2016), o patrimônio geológico engloba todos os elementos que constituem a geodiversidade: Patrimônio Paleontológico, Patrimônio Mineralógico, Patrimônio Geomorfológico, Patrimônio Petrológico, Patrimônio Hidrogeológico, entre outros. O Patrimônio Geomorfológico, neste estudo, está relacionado à concepção de formas resultantes dos agentes endógenos (internos) e exógenos (externos), correspondem a tempos geológicos pretéritos, ou tempos atuais, com diferentes níveis de intensidade. Neste sentido, a geomorfologia tem um papel central na compreensão da geodiversidade (THOMAS, 2012; JORGE et al., 2016). Especialmente, pelo seu aspecto de análise linear da paisagem, que lhe confere uma abrangência multiescalar e temporal. O patrimônio geomorfológico apresenta grande vulnerabilidade, sobretudo pela sua constituição fundamental, base sobre a qual se desenvolvem as atividades humanas (VIEIRA e CUNHA, 2006), sendo a expressão física das condições de equilíbrio reinantes na litosfera (SAADI, 1997).

No contexto de patrimônio geológico, Vieira (2014), define o patrimônio geomorfológico por sítio geomorfológico, ou geomorfossítio. Logo, formas de relevo, ou geoformas (elaboradas pelos respectivos processos morfogenéticos passados ou atuais) em que um determinado valor (científico, estético, cultural, ecológico e econômico) pode ser atribuído. Corroboram essa definição Panizza (2001); Panizza & Piacente (2003); e Brilha (2016), que enfatizam o valor científico, educacional, estético e cultural do patrimônio.

O Patrimônio Geomorfológico das paisagens características do carste, e/ou relevo cárstico apresentam grande importância e atrativo para geodiversidade brasileira. O termo *Karst* se origina no planalto da região de Kras, área de ocorrência de rochas carbonáticas, entre a Eslovênia e a Itália. O termo clássico *karst* passou a ser incorporado por volta de 1840, por estudos científicos que tiveram o objetivo de identificar o tipo específico de relevo. Por ser o carste uma feição atribuída especificamente a uma região calcária, a utilização deste termo deve estar condicionada a esta litologia. Portanto, é incorreta a atribuição do termo à dissolução que ocorre em outros tipos de rochas (TRAVASSOS, 2010).

Os principais atrativos, específicos dessa feição do relevo, são as próprias rochas carbonáticas, além das cavernas e feições superficiais ou subterrâneas típicas. Dentre as feições: espeleotemas, lapiás, caneluras, dolinas, uvalas, poljes, vales fechados, paredões calcários, torres e pontes de pedra. Estas feições do relevo cárstico integram o patrimônio geológico e geomorfológico. Cabe salientar que os geomorfossítios constituem a base sobre a qual as atividades humanas se desenvolvem. Por isso, se tornam bastante vulneráveis aos impactos das ações antrópicas. Portanto, a análise da vulnerabilidade pode ser considerada uma das metodologias a ser utilizada para auxiliar na identificação de áreas prioritárias para geoconservação.

Brilha (2005) afirma que a estratégia de conservação deve considerar a avaliação de cada geossítio, e mensurar a sua vulnerabilidade à degradação ou à perda de fatores naturais e/ou antrópicos. Deste modo, podem-se conhecer os geossítios que se encontram em maior ou menor risco para, de acordo com sua relevância, definir as estratégias de conservação. Para geossítios e/ou geomorfossítios que apresentam baixa vulnerabilidade à degradação, mesmo sendo de relevância baixa, é recomendável que sejam integrados aos roteiros (geo)turísticos. Além disso, devem ser incorporados aos programas de educação ambiental ou geocientífico. Por outro lado, os geossítios de alta vulnerabilidade, devem ser divulgados após estarem asseguradas as necessárias condições de conservação.

A partir destas considerações, o presente trabalho tem como objetivo analisar e mapear a vulnerabilidade natural do patrimônio geomorfológico - cárstico da Folha Montes Claros/MG (que abrange parte de oito municípios). E, por fim, apresenta a distribuição espacial da vulnerabilidade natural da região de geomorfossítios cársticos, gerados por meio do Índice de Concentração de Rugosidade - ICR, e análise multicritério.

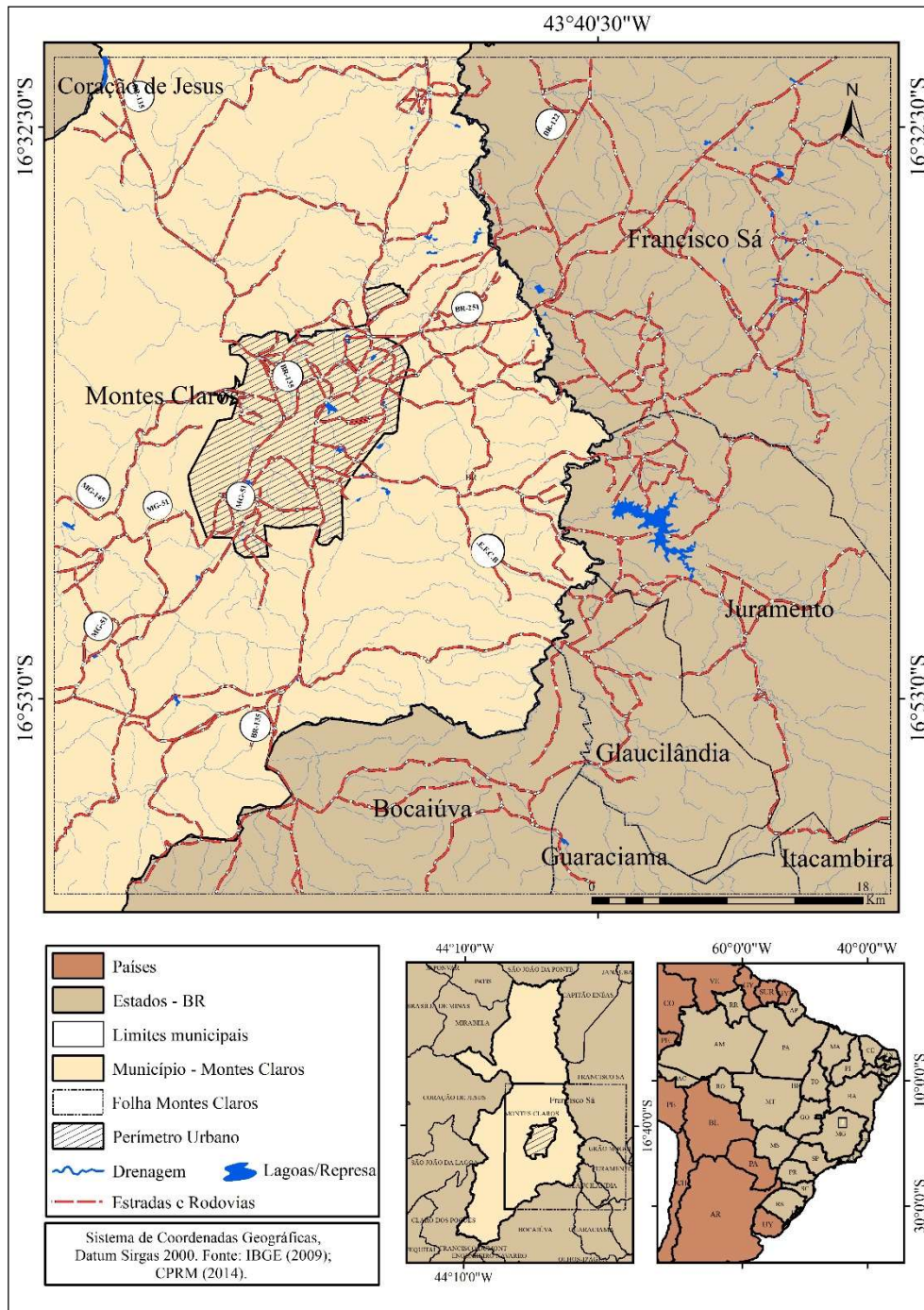
A vulnerabilidade natural corresponde a pré-disposição do ambiente no que diz respeito às variáveis físicas: geológicas, geomorfológicas, pedológicas, climáticas etc. Em estudo sobre a vulnerabilidade natural a perda de solo, em que Crepani et al., (2008) se baseia em Becker e Egler (1997), afirma que a avaliação da vulnerabilidade natural diz respeito a análise do meio físico (abiótico) e biótico. Neste contexto, deve-se considerar a ocupação racional e o uso sustentável dos recursos naturais. O que inclui o uso associado aos dados de potencialidade social e econômica, que oferecem subsídio à gestão territorial. Neste estudo, opta-se pela terminologia vulnerabilidade ao invés de fragilidade natural, por se tratar de um sistema vulnerável do ponto de vista abiótico e biótico. Embora o trabalho faça menção, especificamente, ao contexto abiótico, a função atribuída ao uso - potencial paisagístico incorporado às atividades turísticas e suas consequências, são levadas em considerações nas análises.

MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo (Figura 1) está inserida na Mesorregião Norte de Minas, Minas Gerais. Abrange parte dos municípios de Montes Claros, Bocaúva, Coração de

Jesus, Juramento, Francisco Sá, Glauclândia, Itacambira e Guaraciama. O município de Montes Claros localiza-se na microrregião homônima, inserida na Depressão Periférica do São Francisco, Bacia do Alto Médio São Francisco.

Figura 1 – Localização da área de estudo



Fonte: Autores (2020).

Conforme Chaves e Andrade (2014), a geologia da área de estudo é constituída, em maior parte, pelas formações do Grupo Bambuí (Neoproterozoico), caracterizada por uma sequência de rochas carbonática (calcárias) intercaladas a sedimentos. Essa sequência é constituída por três formações: Serra de Santa Helena (inferior), Lagoa do Jacaré (intermediária) e Serra da Saudade (superior). A Formação Serra de Santa Helena é encontrada principalmente em uma larga faixa na região central da folha, entorno de 28% da área. Essa faixa central possui cotas, em geral, mais baixas, e representa o entalhamento do relevo pela formação do vale do Rio Verde Grande. A unidade inclui uma monótona sequência de metassiltitos rosados com intercalações locais, submétricas, de folhelhos ardosianos. A Formação Lagoa do Jacaré ocorre margeando em ambos os lados e em contraste morfológico realçado em relação à unidade inferior (Formação Serra de Santa Helena). Ocorrem duas subunidades (Metassiltitos Rítmicos e Calcários), a primeira ocupa cerca de 22% da Folha Montes Claros, e constitui a segunda de maior expressão de mapeamento em termos superficiais.

A litologia que predomina largamente é um metassiltito que alterna níveis milimétricos a centimétricos de um material cinza-claro, de caráter síltico, com níveis, em geral, mais finos (<2 mm), síltico-argilosos e localmente ricos em carbonato. Os calcários ocorrem em duas faixas (leste e oeste), ambas embutidas na subunidade de metassiltitos rítmicos da mesma formação. Ocupam cerca de 15% da área da folha, e constituem a terceira de maior expressão em termos superficiais. Em muitos locais, as drenagens são praticamente ausentes, e diversas dolinas ou mesmo cavernas desenvolvem-se nos locais, algumas de grande porte. Os calcários variam em coloração de cinza claros (mais comuns) até escuros, por vezes, quase pretos. Essas rochas variam continuamente de calcarenitos a calcilutitos (CHAVES & ANDRADE, 2014).

A Formação Serra da Saudade corresponde a uma única faixa principal, segmentada em três setores na parte oeste, e abrange cerca de 8% da folha. Em geral, constitui uma região de relevo mais alto do que a Formação Lagoa do Jacaré (subunidade calcários), embora ambas possuam expressões morfológicas muito semelhantes. A principal litologia da Formação Serra da Saudade é um metargilito amarelo a róseo claro, por vezes, arroxeadado, que pode ainda conter níveis métricos de metassiltitos com as mesmas colorações (CHAVES & ANDRADE, 2014).

Conforme relatório técnico da Folha Montes Claros (CHAVES & ANDRADE, 2014), nessa região, predominam largamente litologias proterozoicas suavemente dobradas, pertencentes ao Supergrupo São Francisco (Neoproterozoico). Além de pequenas porções constituídas por unidades fanerozoicas representadas por rochas sedimentares cretácicas (formações Abaeté e Urucuia) e coberturas sedimentares inconsolidadas do Cenozoico. A área apresenta extensas áreas aplainadas com cotas mais baixas, resultante do trabalho de escavação erosiva do vale do Rio Verde Grande. Áreas dissecadas, superfícies onduladas, colinas e áreas de relevo cárstico (dolinas e uvalas), desenvolvidas, em sua maior parte, sobre rochas pertencentes ao Grupo Bambuí, são representadas pela rugosidade

contrastante. Além disso, essas áreas possuem cotas mais altas, onde se encontram rochas metapelíticas e/ou carbonáticas das formações Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade.

Segundo Silva (2016), a região apresenta distintas classes de solos, resultante do intemperismo combinado aos processos pedogenéticos gerais (latolização, hidromorfismo, dentre outros). Na área de estudo, os latossolos e suas subordens ocupam a maior área, seguido dos cambissolos. A área apresenta quadro fitoecológico de transição do domínio morfoclimático cerrado para o da caatinga. Em decorrência disso, possui rica biodiversidade com inúmeras fitofisionomias inseridas nos dois grandes biomas. Destacam-se na região as fitofisionomias: cerrado, o cerradão, a vereda, as matas ciliares e de galeria, a caatinga arbustiva, a caatinga arbórea e a floresta estacional decidual.

A principal bacia hidrográfica da área de estudo é a do rio Verde Grande, afluente do rio São Francisco pela margem direita; sua bacia hidrográfica está localizada entre os paralelos 14°20' e 17°14' de latitude sul e os meridianos 42°30' e 44°15' de longitude oeste. Limita-se a leste com bacias hidrográficas de rios que nascem na vertente leste da serra do Espinhaço. O Verde Grande nasce no município de Bocaiúva/MG; corre no sentido norte até a confluência de seu afluente, o rio Verde Pequeno, e desse ponto, faz inflexão no sentido noroeste até desembocar no rio São Francisco no município de Malhada, Bahia. Seus principais afluentes pela margem direita são os rios: Juramento, Vieira, Quem-Quem, Gorutuba, Verde Pequeno. Pela margem esquerda fluem o ribeirão do Ouro, rio Arapoim e córrego Macaúbas. O rio Verde Pequeno e o Verde Grande, após a confluência do primeiro, servem de divisa entre Minas Gerais e Bahia (ANA, 2013).

Do ponto de vista climático, segundo a classificação de Köppen, predomina amplamente o tipo Aw - clima tropical quente e úmido, com estação seca bem acentuada. O regime pluviométrico é caracterizado por dois períodos bem distintos: (i) a estação chuvosa se estende de outubro a março, quando ocorre cerca de 93% da chuva anual, e; (ii) a seca, de abril a setembro. A precipitação média anual fica em torno de 1.000 mm. Os mais altos índices atingem 1.030 mm/ano no sul da região, e vão diminuindo gradualmente em direção ao extremo norte do estado, até atingir valores inferiores a 750 mm/ano (ANA, 2013).

Procedimentos metodológicos

O procedimento metodológico adotado no estudo para análise do Índice de Vulnerabilidade Natural (IVN) foi a integralização do Índice de Concentração de Rugosidade (ICR) e a Análise Multicritério em ambiente SIG (Sistema de Informações geográficas) por meio da operação álgebra de mapas. Os dados foram mensurados através de Média Ponderada (1), em que foram definidos uma escala de valores (pesos) de 0-10 para as componentes das variáveis e de influências em porcentagem de 1-3 para cada variável (plano de informação), conforme Figura 2.

Figura 2 - Quadro – Notas atribuídas à vulnerabilidade do patrimônio cárstico

Classes de Vulnerabilidade	Geologia		Geomorfologia	Pedologia	Intensidade Pluviométrica	Potencial Ocorrência Caverna
	Unidade	Litotipo				
Muito pouco vulnerável	Depósitos aluvionares	Areia, Argila, Cascalho, Silte	Predomínio de ICR muito baixo a baixo	Predomínio de Neossolos Flúvicos	Entre 995 a 1.089 e 903 a 994 mm/ano	Ocorrência Improvável
	Depósitos eluviais e coluviais	Areia, Cascalho, Sedimento elúvio-coluvionar, Laterita		Predomínio de Podzólico Vermelho-Escuro		
	Depósitos detrítico-lateríticos	Sedimento detrítico-laterítico				
Pouco vulnerável	Serra de Santa Helena	Argilito, Folhelho, Siltito, Marga	Predomínio de ICR baixo a médio		Predomínio de 995 a 1.089 mm/ano	Médio
	Urucuia	Arenito, Arenito conglomerático, Pelito	Predomínio de ICR médio a alto	Predomínio de Latossolo Vermelho-Amarelo		
Moderadamente vulnerável	Serra da Saudade	Arenito, Metargilito, Metassiltito		Predomínio de Latossolo Vermelho-Amarelo		
Vulnerável	Abaeté	Conglomerado polimítico	Predomínio de ICR alto	Predomínio de Solos Litólicos	Predomínio de 995 a 1.089 mm/ano	Médio
	Duas Barras	Metaconglomerado Metarenito		Predomínio de Solos Litólicos		
	Serra do Catuni	Quartzito, Metadiamicrito, Metassiltito	Predomínio de ICR muito alto	Predomínio de Solos Litólicos		
Muito vulnerável	Lagoa do Jacaré, metacalcário	Metacalcário	Predomínio de ICR alto a muito alto	Predomínio de Podzólico Vermelho-Escuro e Solos Litólicos	Entre 995 a 1.089 e 903 a 994 mm/ano	Muito alto
	Lagoa do Jacaré, metassiltito	Metassiltito		Predomínio de Podzólico Vermelho-Escuro e Cambissolos		Alto

Fonte: Autores (2020).

Para o ICR, utilizou-se a metodologia proposta por Sampaio e Augustin (2014), que tem como base a análise numérica do terreno, e como parâmetro a declividade. Conforme Valeriano (2008), a declividade é indispensável na análise morfométrica do terreno. O ICR representa as ondulações do terreno, influenciadas pela sua capacidade de reter e armazenar água e sedimentos na superfície. Logo, auxiliar no processo de absorção de água pelo solo, gerando um intenso processo de dissolução. Conforme Sampaio e Augustin (2014), o ICR foi empregado por Nascimento (2009) e Nascimento et al., (2010) na análise dos padrões espaciais de cavernas e níveis de exposição do sistema carste. Esse estudo possibilitou identificar e associar os padrões observados às unidades de relevo delimitadas pelo referido índice. São consideradas, neste trabalho, as observações dos autores (op. cit), e incluída a associação do ICR à variável geomorfologia, uma vez que se associam às unidades do relevo.

Sampaio e Augustin (2014), aplicaram a referida metodologia de classificação morfométrica à representação das unidades homogêneas da dissecação do relevo. Conforme os autores (op. cit.), essa técnica permite através da utilização de dados de declividade a identificação de unidades geomorfológicas homogêneas, a partir, de padrões morfométricos e de dissecação e/ou padrões de rugosidade.

Portanto, o ICR derivou do Modelo Digital de Elevação (MDE), gerado por manipulação estatística algorítmica, via extensão Densidade de Kernel, representativo da variável geomorfologia. Desta forma, o IVN resultou do cruzamento algoritmo das variáveis selecionadas, com atribuição de pesos por Análise Multicritério (Fig. 2), com base no procedimento realizado por Santos et al., (2014) e Silva (2017), que integralizaram as variáveis por álgebra de mapas. Os produtos foram gerados no software ArcGIS 10.2.1.

A primeira etapa do estudo corresponde a execução da metodologia e seleção das variáveis a serem utilizadas para geração do mapa de índice de vulnerabilidade natural, conforme proposto por Silva (2017), com base nos trabalhos de Guerra et al., (2009) e Silveira et al., (2014). Destaca-se que as variáveis foram adaptadas a temática estudada, e seguiram os procedimentos adotados por Santos et al., (2014). Foram selecionadas as variáveis: geologia, pedologia, geomorfologia, potencial de ocorrência de cavernas e clima (intensidade pluviométrica).

O método utilizado para selecionar e hierarquizar as variáveis foram o Delphi e o método AHP. O método Delphi constitui na escolha de um corpo multidisciplinar (especialistas) para a ponderação de escala de pesos para uma tomada de decisão (MOURA, 2007). Enquanto o método AHP (*Analytical Hierarchy Process*), desenvolvido por Saaty em 1977, conhecida também como árvore de decisão, consiste em técnica baseada na escolha lógica de comparação entre variáveis por plano de informações (MOURA, 2007). Neste estudo, os especialistas

A ponderação dos valores e pesos das componentes das variáveis foram atribuídas com base na adequação da metodologia Delphi, semelhante a proposta adotada

por Do Carmo et al., (2016). Desta forma, a equipe de especialistas foi computada pelos próprios autores, em consideração a bibliografia vigente que adotam propostas similares, e nos seus conhecimentos em relação a temática e as variáveis envolvidas. Quanto ao emprego do método AHP foram definidas as influências (em porcentagem) para cada variável integrada no cálculo que resultou no índice de vulnerabilidade natural do patrimônio geomorfológico. Logo, atribuiu-se, sucessivamente, maior porcentagem a variável de maior contribuição na definição da vulnerabilidade natural.

Os planos de informações foram convertidos em formato *raster* e reclassificados em células de 30x30m. Atribuíram-se notas (1 - 3) para cada categoria analisada, que representam as ponderações relativas ao modelo. E considerou-se a relevância das classes de cada feição do modelo na mensuração da vulnerabilidade natural (GUERRA et al., 2009; SILVEIRA et al., 2014; SANTOS et al., 2014; SILVA, 2017).

Na metodologia apresentada por Santos et al., (2014), o peso atribuído à geologia é maior. Neste estudo optou-se pelo mesmo procedimento, que parte do contexto de Patrimônio Geomorfológico, e que se encaixa dentro da classificação de Patrimônio Geológico (BILHA, 2005). As feições litológicas da variável geologia são distribuídas em 11 classes. De acordo com o quadro (Fig. 2, acima), são levados em consideração na avaliação da vulnerabilidade o grau de coesão das rochas (intensidade da ligação entre minerais e partículas constituintes), segundo sugere Crepani et al. (2008).

Os ICRs e a atribuição da sua vulnerabilidade estão representados no quadro (acima, fig. 2). Os pesos foram atribuídos com base na declividade e nos índices de dissecação do relevo (CREPANI et al., 2008). Foram geradas cinco classes de feições associadas aos diferentes tipos de solo para a variável pedologia (Fig. 2 acima). Segundo Crepani et al. (2008), solos mais jovens são pouco desenvolvidos, rasos e suscetíveis aos processos erosivos, enquanto solos mais desenvolvidos, maduros e profundos (lixiviados), apresentam maior estabilidade.

A Intensidade Pluviométrica (IP) é considerada por Crepani et al., (2008), como a principal característica física da chuva, envolvida nos processos erosivos. Essa variável representa uma relação entre outras duas características importantes: quantidade e período de distribuição. A Intensidade Pluviométrica é o resultado da divisão do valor da pluviosidade média anual, em mm, pela duração do período chuvoso em meses. Logo, o poder erosivo da chuva é proporcional à perda de solo resultante dos valores de IP (Fig. 2 acima).

A atribuição no modelo da variável potencial de ocorrência de cavernas, tem por base o estudo de Jansen et al., (2012) e Santos et al., (2014), que classificam as suas áreas de estudos com base, principalmente, nas características geológicas. Nesse caso, a geologia também é representativa das características cársticas da região

O mapa de Índice de Vulnerabilidade Natural (IVN) gerado da análise integrada da Geologia, Geomorfologia, Solos, Clima (Intensidade Pluviométrica) e potencial para ocorrência de cavidades, é o resultado dessa matriz de relacionamento, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Notas atribuídas ao Índice de Vulnerabilidade Natural – IVN

Variáveis (Temas)	Vulnerabilidade (notas)
Geologia	3.0
Geomorfologia	2.0
Potencial de ocorrência de cavidades	2.0
Pedologia	2.0
Clima (Intensidade Pluviométrica)	1.0

Fonte: Baseado em Crepani et al., (2008). Org. Autores (2020).

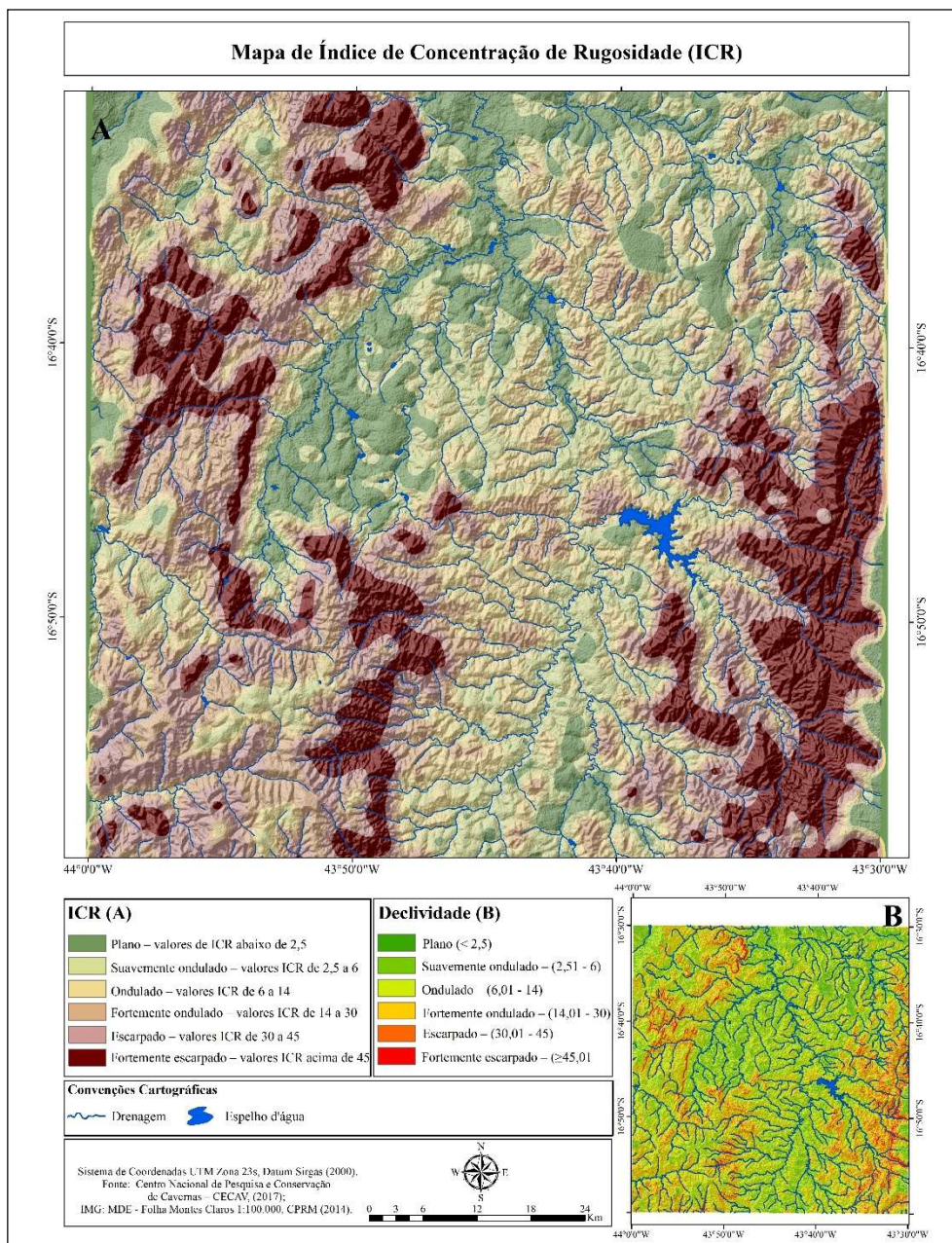
O modelo apresentado foi adaptado de Santos et al., (2014), e gerado através de álgebra de mapas. Desta forma, cada classe do índice (IVN) representa um polígono no mapa, com o valor da classe correspondente. A partir dessa matriz de relacionamento, cada resultado da sobreposição foi enquadrado em uma classe de IVN. Este exercício resultou em cinco (5) níveis de vulnerabilidade: Muito Baixa, Baixa, Média, Alta, Muito Alta.

Para a gerar o modelo (Mapa de Índice de Vulnerabilidade Natural - IVN) foram utilizadas as seguintes bases de dados: (i) Modelo Digital de Elevação – MDE (SRTM) 30 m; (ii) geologia (CPRM/SBG, 2014; CHAVES & ANDRADE 2014) em escala 1:100.000; (iii) solos (CPRM/SBG, 2009) em escala 1:100.000; (iv) clima (IBGE em escala de 1:1.000.000); (v) potencialidade de ocorrência de cavernas (Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – CECAV, 2017).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro produto gerado, representativo das feições morfológicas da área de estudo, foi o ICR, produzido a partir da manipulação do MDE em valores de declividade em porcentagem (%). Neste sentido, com os atributos e valores de declividades convertidos para o formato de pontos (vetorial), foi possível a aplicação do Estimador de Densidade por Kernel (a conversão foi necessária, pois o Kernel não atua sobre arquivos matriciais). O resultado foi um novo arquivo matricial gerado, no qual cada pixel representa a soma dos valores de declividade de todos os pixels com distância inferior ao raio definido - dividido em ICR Global. A seguir apresenta-se o produto decorrente da declividade, e que corresponde ao Índice de Concentração de Rugosidade – ICR (Figura 3).

Figura 3 – Índice de Concentração de Rugosidade – ICR



Fonte: Autores (2020). Índice de Concentração de Rugosidade – ICR (A) gerado a partir de da declividade (B).

Para composição do ICR, utilizou-se de modelos matemáticos e estatísticos, onde o relevo é trabalhado como uma variável numérica, através do manuseio e tratamento de imagens MDE em softwares de Sistema de Informação Geográfica - SIG. Neste estudo, o SIG utilizado foi o ArcGIS, versão 10.2.1. A metodologia ICR apresenta menor subjetividade, pois permite uma leitura tridimensional dos dados

geomorfológicos, a partir de uma classificação morfométrica do relevo, conforme salienta Sampaio e Augustin (2014).

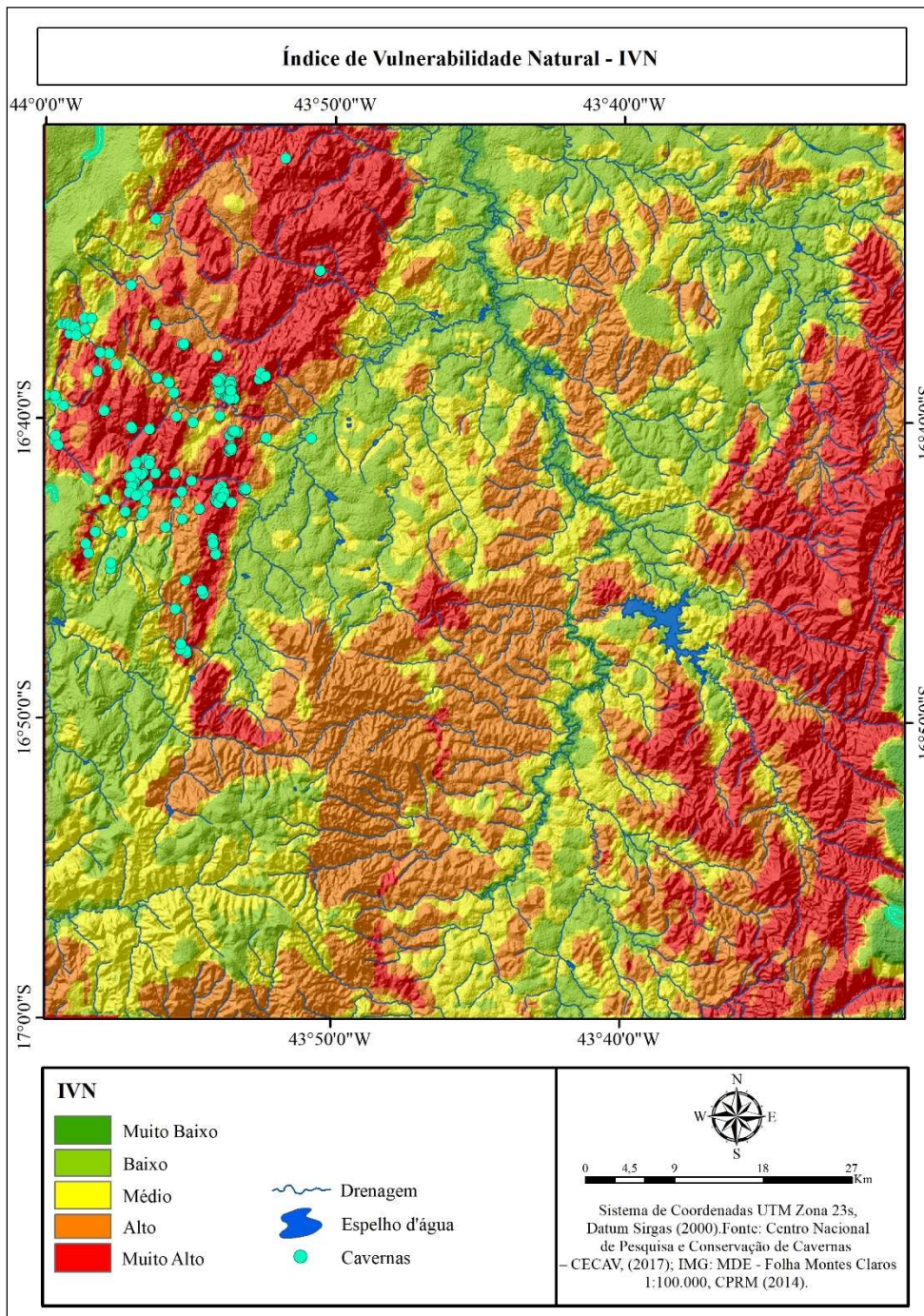
Segundo Valeriano (2008), de maneira geral, os métodos de análise territorial, baseados em modelagem numérica do meio físico ou em decisões lógicas, lidam com a variável declividade e seus gradientes (curvaturas). Eles podem ser incorporados às metodologias tradicionais ou servem de base para a elaboração de novas propostas. A declividade e seus subprodutos exercem influência e estão associados ao balanço hídrico, e ao equilíbrio entre os processos de pedogênese e morfogênese.

A geomorfologia, analisada com base na concentração da rugosidade (Fig. 3), foi determinante para a análise da vulnerabilidade natural do patrimônio geomorfológico-cárstico da área. Observou-se um comportamento análogo à base geológica, onde as áreas de maior rugosidade do terreno apresentam rochas mais suscetíveis aos efeitos do intemperismo.

A variável intensidade pluviométrica distribui-se de forma praticamente homogênea em toda a área de estudo, variando entre 160 a 240 mm/mês. Embora o papel exercido pela água, através dos processos de intemperismo químico, seja imprescindível nas análises de fragilidades erosivas, quando comparada às outras variáveis não se constitui um fator de destaque. A variável potencial de ocorrência de cavernas foi analisada com base na constituição geológica do terreno e, portanto, reforçou a variável geologia. Entretanto, a cobertura pedológica apresentou comportamento interessante na avaliação da vulnerabilidade. Observou-se que as áreas que apresentaram uma base geológica mais vulnerável, mantiveram este caráter quando combinadas com cambissolos e solos litólicos. Por outro lado, áreas com litologia mais vulnerável, combinadas com solos mais desenvolvidos e estáveis, latossolos, mostraram-se menos vulneráveis.

A análise conjunta dessas variáveis (geologia, geomorfologia, pedologia, clima – intensidade pluviométrica, e potencial de ocorrência de cavernas) de forma integrada, resultou no Índice de Vulnerabilidade Natural (IVN) do Patrimônio Geomorfológico Cárstico (IVNPG-C), que sintetiza a fragilidade natural da área de estudo a possíveis ameaças naturais e/ou antrópicas (Fig. 4).

Figura 4 – Mapa de Índice de Vulnerabilidade Natural do Patrimônio Geomorfológico - Cárstico – IVNPG-C



Fonte: Autores (2020).

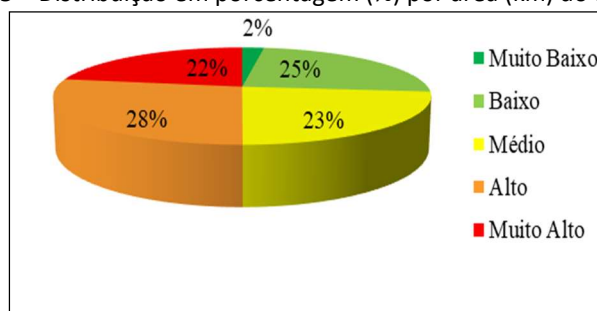
Conforme leitura do Mapa de Índice de Vulnerabilidade Natural – IVN (Fig. 4), os índices se distribuem de forma geral por toda a folha. As áreas com os maiores índices de vulnerabilidade natural, estão circunscritas às porções noroeste-norte,

nordeste-leste e sudeste. Enquanto os demais índices se distribuem de forma geral pela Folha Montes Claros. As cavernas de maiores expressões catalogadas, estão localizadas nas porções oeste e noroeste-norte da área, que correspondem também a uma extensa área de IVN – Muito Alto e IVN – Alto. Outro ponto a salientar é que essa área corresponde à importantes cabeceiras de drenagens da cidade de Montes Claros.

Neste contexto, o Mapa de Índice de Vulnerabilidade Natural permite indicar regiões onde o patrimônio geomorfológico, e no caso específico, geomorfológico cárstico, está mais vulnerável. Esse dado pode contribuir para o estabelecimento de políticas de proteção específica nessas áreas.

Conforme análise do mapa e do gráfico (Figura 5), a classe que apresenta maior porcentagem de IVN do Patrimônio Geomorfológico Cárstico (IVNPG-C), é a classe de Alto IVN (28%), seguido por Baixo IVN (25%), Médio IVN (23%), Muito Alto IVN (22%), e Muito Baixo IVN (2%).

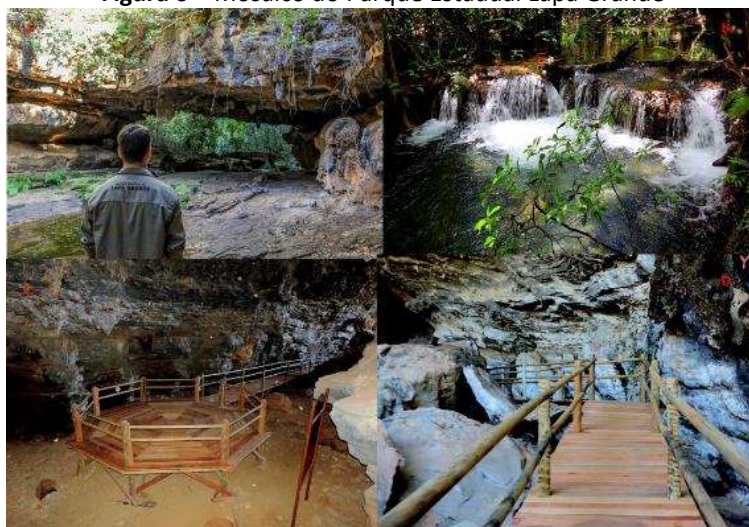
Figura 5 – Distribuição em porcentagem (%) por área (km) do IVNPG-C



Org.: Autores (2020).

Observa-se no mapa (Fig. 4) e gráfico (Fig. 5) apresentados, que as classes de Alto e Muito Alto índice de vulnerabilidade natural do patrimônio geomorfológico – cárstico somam 50% da área, enquanto as classes de Muito Baixo, Baixo e Médio IVNPG-C somam os outros 50% da área. Os valores são justificados pelo fato de a área apresentar relevo cárstico, sobre rochas do Grupo Bambuí, depressão do médio rio São Francisco. O relevo foi desenvolvido em região calcária (litotipo de muito alta vulnerabilidade), pelo trabalho de dissolução pelas águas subterrâneas e superficiais.

As localizações das cavernas coincidem com o modelo gerado, fato esse que corrobora sua validação. Esse complexo de cavernas corresponde, em grande parte, às cavernas do Parque Estadual da Lapa Grande, unidade de conservação criada com objetivo de proteger e conservar o complexo de grutas e abrigos da Lapa Grande (Fig. 6), e demais atrativos da geodiversidade (outras cavernas, geofomas, inscrições rupestres, etc.).

Figura 6 – Mosaico do Parque Estadual Lapa Grande

Elaborado pelos autores (2020). Parque da Lapa Grande. Foto (A) Ponte de pedra; Foto (B) Queda d'água; Foto (C) Passarela de acesso às cavernas; Foto (D) Mirante. Fotos: Eduardo Gomes, julho (2018).

Conforme a Figura 6, a geodiversidade apresentada pelo parque (cavernas, geoformas, inscrições rupestres, cachoeiras, tufas calcárias, etc.) têm atraído geoturistas, e suscitado a necessidade de criação de infraestruturas para atender à demanda (Foto C e D). A incorporação de estruturas para atender ao geoturismo pode ser visualizada no mosaico de fotos: instalação de trilhas, passarelas, mirantes, para facilitar o acesso do geoturista e proteger a geodiversidade.

Soma-se a importância da geoconservação do potencial espeleológico (maciços calcários, dolinas, arcos, pontes, torres, abrigos com vestígios arqueológicos e outros), o fato da região abrigar diversos mananciais e nascentes (sumidouros e ressurgências), que são responsáveis por cerca de 40% do abastecimento de água da cidade de Montes Claros. Considerando o panorama apresentado, enfatiza-se, novamente, a importância dos estudos sobre a vulnerabilidade da geodiversidade dos patrimônios geológico, geomorfológico e especificamente nesse estudo, do relevo cárstico. É importante salientar, também, que as cavernas são protegidas por legislação vigente (Resolução CONAMA nº 347 de 10 de setembro de 2004, que dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico).

O Parque Estadual da Lapa Grande, com sua geodiversidade, é gerido pelo Instituto Estadual de Florestas do Estado de Minas Gerais (IEF), em parceria com a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA). Conforme salientado, a região é de grande importância pelos recursos hídricos que nascem e drenam a área, responsável pelo abastecimento e fornecimento de água para Montes Claros.

A metodologia adotada neste estudo mostrou-se aplicável para a avaliação da vulnerabilidade do patrimônio geomorfológico cárstico. Por meio da análise multicritério integrada, realizada em ambiente SIG, foi possível, indicar regiões onde o patrimônio geomorfológico cárstico está mais vulnerável. Desta forma, os resultados podem contribuir para o estabelecimento de políticas de proteção específicas para a conservação do patrimônio geomorfológico – cárstico.

Em relação a escolha da análise multicritérios, apesar da dificuldade na definição das variáveis preponderantes, e o quanto isso interferiria no resultado, utilizou-se o método AHP, que assim como outros métodos, auxilia na ponderação dos valores de contribuição das componentes envolvidas no estudo.

O maior peso dado a variável geologia não significou, em absoluto, que seja a mais importante no processo dinâmico de transformação da paisagem, e sim, pela sua ação condicionante na recorrência de estruturas cársticas. A utilização dos dados da rugosidade do terreno (ICR), deu-se pela operacionalidade e precisão na setorização geomórfica, o que possibilitou operacionalizar a metodologia, mesmo com defasagem de informações associadas ao detalhamento do meio físico. Os dados do modelo mantiveram o caráter estrutural do relevo da área de estudo (acentuando os processos de agradação e degradação). Os resultados, associados aos dados de solos rasos, rochas mais solúveis, índices pluviométricos e potencial de ocorrência de cavernas geraram o panorama da vulnerabilidade natural do patrimônio geomorfológico (cárstico) da Folha Montes Claros, o que possibilitou a estimação das áreas de uso mais restritivo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No contexto da geodiversidade, os patrimônios geomorfológicos se enquadram no escopo de análise de patrimônio geológico. Neste estudo, optou-se pela designação de patrimônio geomorfológico, por se tratar especificamente do contexto abiótico do sistema cárstico (Relevo Cárstico). Esta terminologia se insere melhor no contexto de patrimônio geomorfológico, do que de patrimônio geológico e/ou espeleológico. Posto que o foco desse estudo são os aspectos litológicos, geomórficos e pedológicos, com ênfase na declividade e sua variância – o Índice de Concentração de Rugosidade (ICR).

No que concerne à vulnerabilidade, a área de estudo apresenta aproximadamente 50% da área inserida em alto e muito alto índice de vulnerabilidade natural. É possível que o percentual indicado esteja relacionado a própria fragilidade do relevo cárstico - sujeito a suscetibilidade proveniente do abatimento e afundamento de seus terrenos. Deste modo, o modelado cárstico, em seu aspecto geomorfológico e litológico, está associado à lito-dependência e pedo-dependência. Por conseguinte, as áreas com substratos geológicos mais vulneráveis mantiveram esse caráter quando combinadas com cambissolos e solos litólicos. Contudo, áreas com litologia mais vulnerável, combinadas com solos mais

desenvolvidos e estáveis, latossolos, por exemplo, mostraram-se menos vulneráveis.

Em última análise, os estudos relacionados à vulnerabilidade dos elementos da geodiversidade são relevantes para geoconservação e geoturismo, por propiciar, quando bem gerido, a manutenção, conservação e utilização sustentável dos patrimônios da geodiversidade. Esses estudos, também podem auxiliar na tomada de decisões e na melhoria da compreensão sobre a dinâmica natural. Em síntese, a geodiversidade, essencialmente em seu caráter abiótico, é suporte para a vida na Terra, sendo munida de um valor científico e educativo inegável, quer seja em atividades educativas formais ou não formais.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Serviço Geológico do Brasil – CPRM por disponibilizar a base de dados referente a Folha Montes Claros/MG, e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) por fomentar a pesquisa de doutorado do qual procede a linha de estudo.

REFERÊNCIAS

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - Brasil. *Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Verde Grande*. Agência Nacional de Águas. Brasília: 2013, 182 p.: il.

BRASIL. *Resolução CONAMA nº 347*, de 10 de setembro de 2004, que dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico. 2004.

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

BRILHA, J. Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: a Review. *Geoheritage*. 2016. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/32896>> Acesso em: 11 mai. 2018.

CEVAC, Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – CECAV. Potencialidade de ocorrência de cavernas. *Banco de dados*. 2017. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/>. Acesso em mar. 2018.

CHAVES, M. L. S. C.; ANDRADE, K. W. *Geologia e recursos minerais da folha Montes Claros SE.23-X-A-VI: Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte: CPRM, 2014, 80p.

CREPANI, E; MEDEIROS, J. S; PALMEIRA, A. F; SILVA, E. F. Zoneamento Ecológico-Econômico. In. FLORENZANO, T. G. (org). *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*. São Paulo: oficina de texto, 2008, p. 285 - 318.

CPRM/SBS, Serviço Geológico do Brasil. *Geobank: Geologia e recursos minerais da folha Montes Claros SE.23-X-A-VI: Estado de Minas Gerais*. 2014. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br>. Acesso em 10/2016.

_____. *Geobank: Mapas de Geodiversidade Estaduais: Estado de Minas Gerais*. 2009. Acesso em 10/2016. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br>.

DO CARMO, A. M; SOUTO, M. V. S; DUARTE, C. R; LOPES, P. S; SABADIA, J. A. B. Avaliação de susceptibilidade de risco à erosão, utilizando as variáveis morfométricas, para as serras da porção sul do maciço central do ceará. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 68, n. 9, 2016.

DO NASCIMENTO, M. A. L; 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, 84 p.

GUERRA, A. J. T; MENDONÇA, M. B. De; LOPES, P. B. M; LIMA, F. S; JORGE, M. C. O; MENDES, B. R. (2009, dezembro). Criação de um sistema de previsão e alerta de riscos a deslizamentos e enchentes, visando minimizar os impactos sócio-ambientais no bairro quitandinha, bacia do rio Piabanha (afluente do Paraíba do Sul), Município de Petrópolis-RJ. *Anais II Seminário de recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: Recuperação de áreas degradadas, serviços ambientais e sustentabilidade*, Taubaté, Brasil, 09-11, IPABHi, 2009, p. 785-824.

GRAY, M. *Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic*. Nature, England: J. Wiley, 2004, 434 p.

_____. *Geodiversity and Geoconservation: what, why, and how? Geodiversity & Geoconservation*, 2005, p. 4-12. Disponível em: < <http://www.georgewright.org/223gray.pdf>>. Acesso em: 11 mai.2018.

JANSEN, D. C; Cavalcanti, L. F; LAMBLÉM, H. S. Mapa de potencialidade de ocorrência de cavernas no Brasil, na escala 1: 2.500. 000. *Revista Brasileira de Espeleologia*, 2012, v. 1, n. 2, p. 42-57.

JORGE, M. C. O; GUERRA, A. J. T; FULLEN, M. A. Geotourism, Geodiversity and Geoconservation in Ubatuba Municipality, São Paulo State, Brazil. *Geography Review*, v. 29, p. 26-29, 2016.

MOURA, A, C, M. Reflexões metodológicas como subsídio para estudos ambientais baseados em Análise de Multicritérios. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil, 2007: 21-26.

PEREIRA, D; PEREIRA, P; BRILHA, J; SANTOS, L. Geodiversity assessment of Paraná State (Brazil): an innovative approach. *Environmental Management*. 2013, 52, 541-552.

PANIZZA, M. Geomorphosites: concepts, methods and examples of geomorphological survey. *Chinese Science Bulletin*. 2001, n.46, vol. 4-6, p. 4-5, dezembro.

_____; PIACENTE, S. *Geomorfologia Culturale*. Bologna: Pitagora Editrice, 2003, 360 p.

SAADI, A. A Geomorfologia como ciência de apoio ao planejamento urbano em Minas Gerais. *Geonomos*, 1997.

SAMPAIO, T. V. M; AUGUSTIN, C. H. R. R. Índice de concentração da rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2014, v. 15, nº 1.

SANTOS, D. J; RUCHKYS, Ú; GOMES, M. Avaliação Multicritério da vulnerabilidade ambiental e natural na identificação de áreas prioritárias para conservação do Patrimônio Espeleológico. Campinas, SeTur/SBE. Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas, 2014, 7(1/2).

SHARPLES, C. *Concepts and Principles of Geoconservation*. Tasmanian Parks & Wildlife Service, 2002.

SILVA, F. G. Risco a movimentos de massa na cidade de Montes Claros - MG: estudo de caso da Vila São Francisco de Assis. 2017, 176f. *Dissertação* (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Montes Claros (Unimontes). Montes Claros, Minas Gerais.

SILVA, M. L. Mapeamento de superfícies aplainadas no norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 2016, V. 09 N. 02, p 526-545.

SILVEIRA, C. T; FIORI, A. P; SCHILIPACK, P., Dias, S. M. Mapeamento Preliminar da Suscetibilidade Natural a Movimentos de Massa da Serra do Mar Paranaense. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, São Paulo, 2014, v.15, n.1, (Jan-Mar) p.3-22.

THOMAS, M. F. A geomorphological approach to geodiversity — its applications to geoconservation and geotourism. *Quaestiones Geographicae*, 2012, v. 31, n. 1, p. 81-89.

VALERIANO, M. M. Dados Topográficos. In. FLORENZANO, T. G. (org). *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*. São Paulo: oficina de texto, 2008, p. 72 - 104.

VIEIRA, A. O patrimônio geomorfológico no contexto da valorização da geodiversidade: sua evolução recente, conceitos e aplicação. *Cosmos*, 2014, n. 7, p. 1, p. 28-59.

_____; CUNHA, L. Património geomorfológico — de conceito a projecto. O Maciço de Sicó. *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, 2006, v. 3, p. 147-153. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/37688>. Acesso em: 10 set. 2019.

Contato com o autor: franciellegonsi@gmail.com

Recebido em: 29/11/2021

Aprovado em: 10/10/2023