

Fragilidade ambiental de sistemas cársticos, uma proposta teórica-metodológica: as bacias cênicas de Mato Grosso do Sul

Rafael Brugnolli Medeiros¹
Charlei Aparecido da Silva²

Resumo. Esse trabalho vislumbra discutir e propor uma metodologia específica sobre fragilidade ambiental de áreas cársticas, trazendo variáveis e critérios estabelecidos que vão determinar com clareza e veracidade a real criticidade de uma região com tais particularidades. No Mato Grosso do Sul a área onde predomina o sistema cárstico padece de um massivo avanço de impactos ambientais, essencialmente diante das lavouras de soja que se utilizam das regiões planas e férteis, que derivaram da dissolução química da rocha e propiciaram o surgimento de solos ricos em carbonato de cálcio. Fatos associados a essa dinâmica desestabilizam a paisagem em meio a ambientes que, marcadamente, são reconhecidos pelo turismo de natureza. Propor uma metodologia que permita identificar a fragilidade em questão torna-se urgente e fundamental para fomentar tomadas de decisões nas esferas públicas e privadas, isso a fim de propor políticas públicas e ações adequadas e convergentes com o ambiente cárstico.

Palavras-chave: Sistemas Cársticos; Componentes da Paisagem; Geoprocessamento.

ENVIRONMENTAL FRAGILITY OF SCENIC SYSTEMS, A THEORETICAL-METHODOLOGICAL PROPOSAL: THE SCENIC BASINS OF MATO GROSSO DO SUL

Abstract. This study aims to discuss and propose a specific methodology for assessing the environmental fragility of karst areas, presenting well-defined variables and criteria to clearly and accurately determine the actual criticality of regions with these particularities. In Mato Grosso do Sul, areas dominated by the karst system are severely impacted by environmental degradation, primarily due to the expansion of soybean plantations. These crops occupy flat and fertile regions formed by the chemical dissolution of rocks, resulting in soils rich in calcium carbonate. This dynamic destabilizes the landscape, particularly in environments widely recognized for nature tourism. Therefore, proposing a methodology to identify the fragility of these areas becomes urgent and essential to support decision-making processes in public and private spheres. This effort aims to promote public policies and actions that are suitable and aligned with the preservation of karst environments.

Keywords: Karst Systems; Landscape Components; Geoprocessing.

¹ UFGD, rafaelmedeiros@ufgd.edu.br;

² UFGD, charleisilva@ufgd.edu.br.

Introdução

A abordagem da fragilidade ambiental é diversa e multifacetada, com várias metodologias e conceitos sendo aplicados para analisar a vulnerabilidade dos ambientes a mudanças naturais e antrópicas. A literatura existente demonstra que a fragilidade ambiental pode ser investigada a partir de diversos componentes, como rochas, clima, relevo, solos e uso da terra. A integração desses fatores é crucial para desenvolver uma compreensão precisa da fragilidade de um ambiente e produzir um documento de síntese que reflete a realidade do território estudado.

Tricart (1977) foi o pioneiro na análise integrada dos componentes ambientais, introduzindo a ideia de que a instabilidade das unidades ecodinâmicas resulta da dinâmica contínua dos fluxos de matéria e energia e das interdependências entre fenômenos naturais. Esse enfoque sistêmico revelou-se fundamental para interpretar problemas ambientais e formou a base para trabalhos subsequentes, como o de Ross (1994), que desenvolveu uma metodologia empírica para avaliar a fragilidade ambiental através de pesos baseados na propensão a causar desequilíbrios.

Outros autores, como Crepani et al. (2001) e Metzger et al. (2006), ampliaram o conceito, explorando a vulnerabilidade ambiental como uma consequência das atividades antrópicas. Goldsmith (1983) argumenta que a fragilidade é inerente aos componentes do sistema, enquanto Guimenes e Augusto Filho (2013) e Silveira et al. (2014) consideram que a fragilidade resulta de rupturas no equilíbrio dinâmico causadas por intervenções humanas.

Essas variações conceituais influenciam a abordagem dos estudos e a aplicabilidade das metodologias em diferentes contextos. Ross (1994) destaca que a fragilidade ambiental está associada aos graus de proteção oferecidos pelos diferentes tipos de uso e manejo da terra, e que o equilíbrio dinâmico dos ambientes naturais é frequentemente alterado por intervenções humanas. A análise da fragilidade ambiental, conforme proposta por Ross, utiliza uma metodologia hierárquica, classificada em categorias de fragilidade (Muito Baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta), que serve como um guia para a avaliação e manejo ambiental.

Neste sentido a análise da fragilidade ambiental e a cartografia de síntese são fundamentais para compreender e gerenciar os ecossistemas, e a adaptação das metodologias às características específicas das áreas de estudo é crucial para alcançar resultados precisos e aplicáveis. A metodologia tem evoluído ao longo dos anos, adaptando-se aos avanços tecnológicos em mapeamento e às variações teóricas que direcionam os pesquisadores a objetivos específicos. Conceitos como vulnerabilidade, fragilidade e suscetibilidade, cada um com seu método próprio, foram essenciais para o desenvolvimento de abordagens metodológicas adequadas à complexidade dos ambientes estudados.

No entanto, há desafios importantes a serem enfrentados devido às simplificações e adaptações excessivas ao longo do tempo. Em particular, a variável "relevo" muitas vezes é subestimada, apesar de seu papel crucial na redistribuição de matéria e energia no sistema ambiental. Ross e Fierz (2017), e Gouveia e Ross (2019) apontam que problemas relacionados a dificuldades técnicas e ao tempo gasto na elaboração de produtos cartográficos podem levar a uma representação insuficiente do relevo, um fator essencial para entender as dinâmicas ambientais. As planícies fluviais são frequentemente simplificadas em análises, resultando em uma subestimação da real fragilidade desses ambientes deposicionais. Apesar de sua aparente baixa inclinação, essas áreas são suscetíveis a erosão e inundações, problemas que são muitas vezes mascarados em documentos cartográficos e, consequentemente, levam a um uso inadequado do solo.

Quando associamos tal metodologia, ou mesmo a discussão sobre o relevo ao fenômeno cárstico, nota-se que há uma clara falta de métodos que associem os níveis de fragilidade aos elementos presentes no carste. Calcários, mármore, áreas de poljes, morros residuais, dolinas, solos férteis e frágeis, lavouras de soja, todos são elementos que se interagem e causam desestabilizações no modelado cárstico.

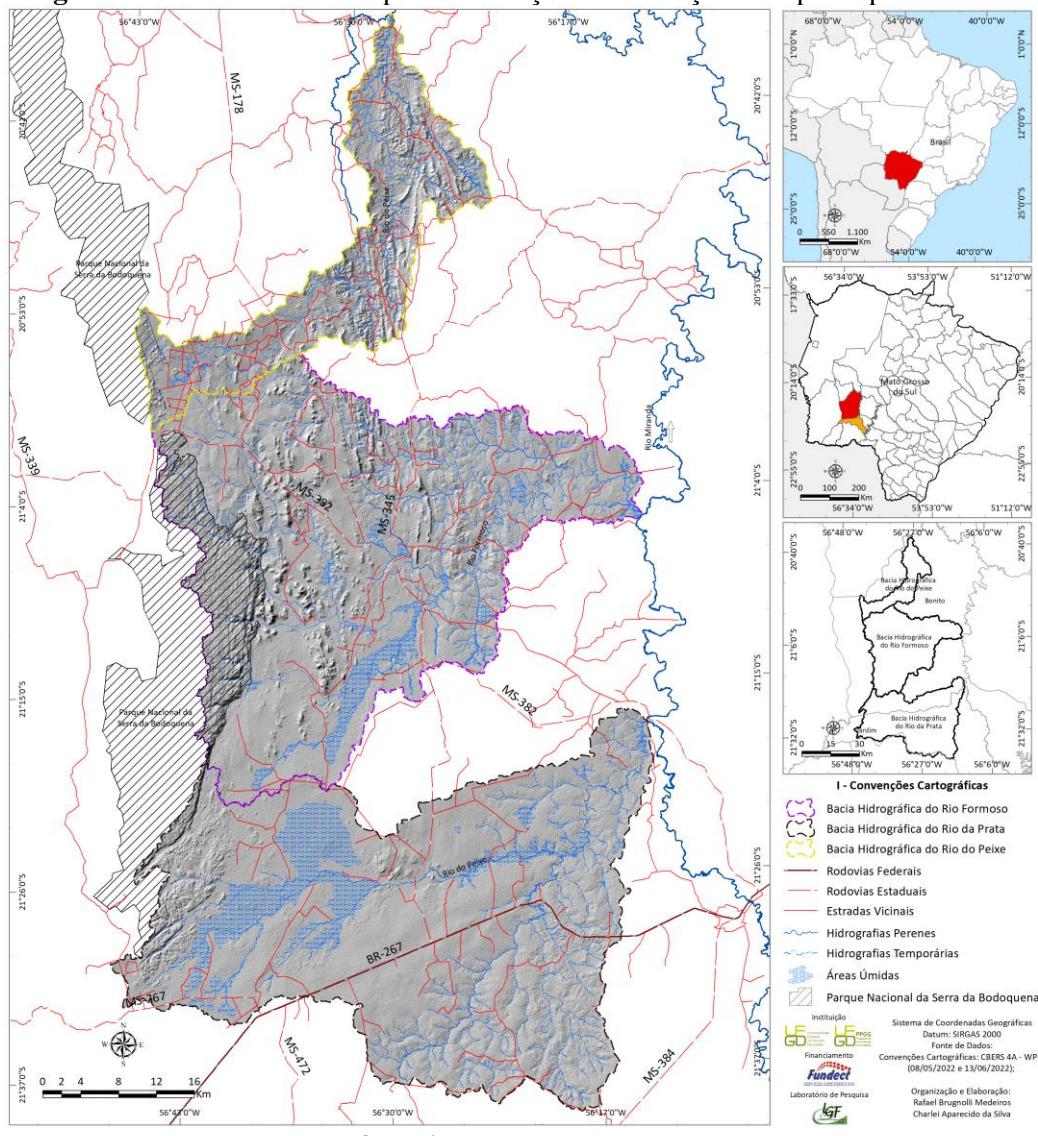
Parise, De Waele e Gutierrez (2009) e De Waele et al. (2011) afirmam que a ação antrópica vem ocorrendo desde os períodos pré-históricos, porém, hoje em dia, observa-se degradações constantes e progressivas até alcançar níveis drásticos, as alterações introduzidas pelo ser humano (como turismo, mineração, lavouras, dentre outras), resulta em um baixo nível de resiliência dos componentes da paisagem cárstica. Bigarella et al. (1994, p. 255) e Ford e Williams (2007) denominam que a “carstificação da paisagem”, sobretudo pela ação da água na superfície e subsuperfície terrestre podem resultar em pontos de afundamento/abatimento do terreno.

A experiência tem demonstrado que trabalhar com a fragilidade de ambientes cársticos é desafiador devido à sua complexidade e imprevisibilidade. A fragilidade ambiental, por sua natureza, envolve a análise dos processos erosivos e das interações entre os componentes físicos e o uso da terra, que afetam diretamente a paisagem e as bacias hidrográficas. Definir a fragilidade ambiental em sistemas cársticos requer uma abordagem sistêmica e a consideração de conceitos de especialistas, como Ross (1994), que discutem essas questões em detalhes, contudo, não aborda a fragilidade das rochas.

Neste ensaio, para definição da metodologia e dos pesos, utilizou-se como área piloto, uma região cárstica reconhecida mundialmente em razão de suas águas e o Turismo de Natureza realizado, a região de Bonito e Jardim, mais precisamente as bacias hidrográficas cênicas dos rios do Prata, Formoso e Peixe. Essas bacias são únicas por sua excepcional beleza, e uma relevante região cárstica brasileira. A principal característica da paisagem de Bonito e Jardim são seus rios e cachoeiras de águas cristalinas. As características hídricas locais e as rochas carbonáticas predominantes dão origem a importantes processos químicos de dissolução e deposição e à formação de um relevo cárstico particular e raro no Brasil. As principais nascentes desta bacia estão localizadas na Serra da Bodoquena, um importante maciço a oeste da bacia com grande valor geológico, biogeográfico e cultural. Entretanto, as atividades socioeconômicas desenvolvidas na bacia (especialmente a agricultura e a pecuária), juntamente com o turismo, geram importantes conflitos ambientais e sociais que devem ser levados em consideração para sua gestão no âmbito da necessária sustentabilidade regional (Brugnolli et al., 2022; Brugnolli e Silva, 2023; Salinas Chavez e Brugnolli, 2024).

O objetivo assim permeia justamente abordar uma metodologia que possa ser replicada nas áreas cársticas ou que seja uma norteadora para, a curto prazo, termos uma normativa específica que aborde o carste como uma área realmente frágil, pois grande parte dos documentos oficiais estaduais e federais, o abordam como áreas propícias aos avanços das monoculturas, no caso da área de estudo destinada a produção de soja, commodities largamente exportada, em alternância com o milho.

Figura 1: Localiza e critérios para a definição das distinções dos pesos para as rochas.



Organização: Os Autores (2024)

Materiais e Métodos

A definição desse mapeamento parte do pressuposto básico que a fragilidade soma-se os aspectos os aspectos físicos das bacias hidrográficas, isto é, a capacidade natural do ambiente em perder seu equilíbrio, seja por processos erosionais, precipitações, no caso do carste pela dissolução química das rochas, e pela própria declividade do terreno, que acaba por interferir nas potencialidades dos recursos naturais, com o uso e cobertura das terras, atribuindo a fragilidade real/actual do sistema ambiental.

No mapeamento da litologia buscou-se definir dados de unidades morfoestratigráficas mediante a base de dados vetoriais da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), contudo, diante da escala inicial da base (1:1.000.000), foi realizada uma averiguação com as

imagens de satélite CBERS 4A, Modelo Digital de Terreno (MDT) SRTM e com saídas de campo com a visualização de afloramentos rochosos e manuseio de rochas ao longo de estradas, margens de mananciais e em meio a pastagens e vegetações nas bacias hidrográficas, verificando a veracidade terrestre e alterando aquelas que apresentavam equívocos. Ajustes escalares são necessários nesse tipo de mapeamento.

O mapeamento dos solos passou pelos mesmos processos executados na litologia, isto é, a partir de uma base definida, que no caso foi o Geoportal da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) que realizou para a região sudoeste do estado do Mato Grosso do Sul, bases de dados na escala de 1:100.000, juntamente com arquivos do Pronasolos da EMBRAPA, foi feita uma averiguação das bases e sua correção seguindo o MDT SRTM, as imagens de satélite e saídas de campo para verificação terrestre

Destaca-se que nesse processo de análise por meio de uma imagem de satélite, as assinaturas espectrais destas são fundamentais para a identificação naquelas áreas de difícil acesso em campo. Solos característicos de matéria orgânica e/ou saturados em água, tendem a apresentar menor reflectância, absorvem mais a radiação e, com isso, são mais escuros. Solos mais arenosos (neossolo e latossolo) apresentam características mais claras, pela maior reflectância. Essas variações nos ajudam na classificação, lembrando que tal método deve ser atrelado à saída de campo.

Para o uso se utiliza de técnicas do sensoriamento remoto, como o processamento digital de imagens de satélite, e uso integrado de imagens de satélite e base cartográfica através de SIG's, em especial o ArcGis 10® e Spring 5.5.6. A ideia foi abordar o uso e cobertura das terras de 2023 de modo a responder, atualmente, como está o processo de ocupação territorial e, identificar de que medida este processo pressiona o meio natural, unidades de conservação, vegetações nativas e recursos hídricos. É importante apontar alguns critérios para a escolha das imagens de satélite, o primeiro deles diz respeito à cobertura de nuvens, em que se buscou imagens que não apresentassem qualquer cobertura que pudesse influenciar nas assinaturas espectrais e reflectâncias dos alvos/objetos da superfície. O segundo critério foram imagens datadas entre as estações seca e chuvosa do ano, isto é, verão e inverno são dois extremos que podem impactar e alterar a resposta espectral das imagens, inferindo em equívocos na classificação. E o terceiro critério diz respeito à qualidade das imagens, buscando imagens do satélite lançado recentemente *China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS 4A - Satélite de Recursos Terrestres China-Brasil)* que compreende imagens de boa resolução espectral e ainda uma imagem pancromática, que auxilia a classificar imagens, pois melhora a resolução espacial.

Levando em conta que para essa interpolação de mapas, todos precisam ser arquivos matriciais (imagem/raster) para que os pesos possam ser atribuídos, parte-se para a primeira etapa desse mapeamento, que é a transformação dos vetores em matrizes no caso da litologia, solos e uso e cobertura das terras. Em ambiente SIG ArcGis 10®, pode ser realizado pelo módulo *Conversion Tools* (Ferramentas de Conversão) > *To Raster* (Para Raster) > *Polygon to Raster* (Polígono para Raster). Especialmente a declividade, a mesma é heterogênea ao longo do terreno diante das ondulações das vertentes e muitas vezes dada em escala de detalhe que esse estudo não permite compreender, por isso, optou-se por uma definição de unidades de relevo ao longo da bacia hidrográfica, adotando divisões territoriais que tragam consigo uma verdadeira aplicabilidade da metodologia para a área de estudo. Diante disso, essas unidades (polígonos) também passaram pela conversão supracitada. Já a precipitação é um arquivo matricial, feito através de estações meteorológicas na área e em seu entorno, disponíveis no HidroWeb da Agência Nacional das

Águas. Logo, é feita uma interpolação dos dados das normais climatológicas das estações por meio da *Krigagem*.

Após os mapeamentos, entra-se na etapa de atribuição os pesos por meio do módulo *Spatial Analyst Tools* (Ferramentas de Análise Espacial) > *Reclass* > *Reclassify* (Reclassificação), em que todas as informações matriciais se transformaram em pesos. Para cada elemento define-se hierarquias de fragilidade potencial e ambiental, representadas pelas classes Muito Baixa (1), Baixa (2), Média (3), Alta (4) e Muito Alta (5); e tais pesos não são atribuídos aleatoriamente, seguem uma metodologia hierárquica de acordo com critérios básicos. Destaca-se que existem muitas metodologias já consagradas de análise da fragilidade, porém, muitas acabam por adotar elementos que não abrangem o ambiente cárstico, ou mesmo, não abrangem a litologia, outros não exibem a precipitação, portanto, buscou-se a elaboração pesos próprios à essas bacias hidrográficas cênicas e que possam ser (re)aplicados em outras áreas com as mesmas características (Quadro 1).

Quadro 1: Metodologias e critérios para a definição das distinções dos pesos para a identificação das fragilidades potencial e ambiental das bacias hidrográficas cênicas.

Componentes da Paisagem	Critérios para a atribuição dos pesos	Autores Utilizados
Rochas	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo geológico; • Estabilidade dos minerais; • Resistência das rochas. 	<ul style="list-style-type: none"> • CPRM (2006); • Sallun Filho et al. (2004); • Campanha et al. (2011).
Precipitação	<ul style="list-style-type: none"> • Índices das Chuvas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Crepani et al. (2001); • Zavattini (1992).
Relevo	<ul style="list-style-type: none"> • Topografia; • Inclinação das vertentes; • Relevo sombreado (amplitude). 	<ul style="list-style-type: none"> • Brugnolli et al. (2023)
Declividade	<ul style="list-style-type: none"> • Inclinação das vertentes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Crepani et al. (2001); • SIBCS (2018); • Ross (1994).
Solos	<ul style="list-style-type: none"> • Porosidade; • Textura; • Profundidade e Maturidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • SIBCS (2018); • Ross (1994).
Uso e cobertura das terras	<ul style="list-style-type: none"> • Porte dessa cobertura vegetal; • Proteção ao solo; • Densidade da Vegetação; 	<ul style="list-style-type: none"> • Crepani et al. (2001); • SIBCS (2018); • Ross (1994); • IBGE (2013).

Organização: Os Autores (2024)

Definidos e atribuídos os pesos, é necessário realizar a cartografia de síntese, que consistiu em dois mapeamentos de fragilidade, em ambos o módulo utilizado é o *Spatial Analyst Tools* (Ferramentas de Análise Espacial) > *Overlay* (Sobreposição) > *Weighted Overlay* (Sobreposição ponderada).

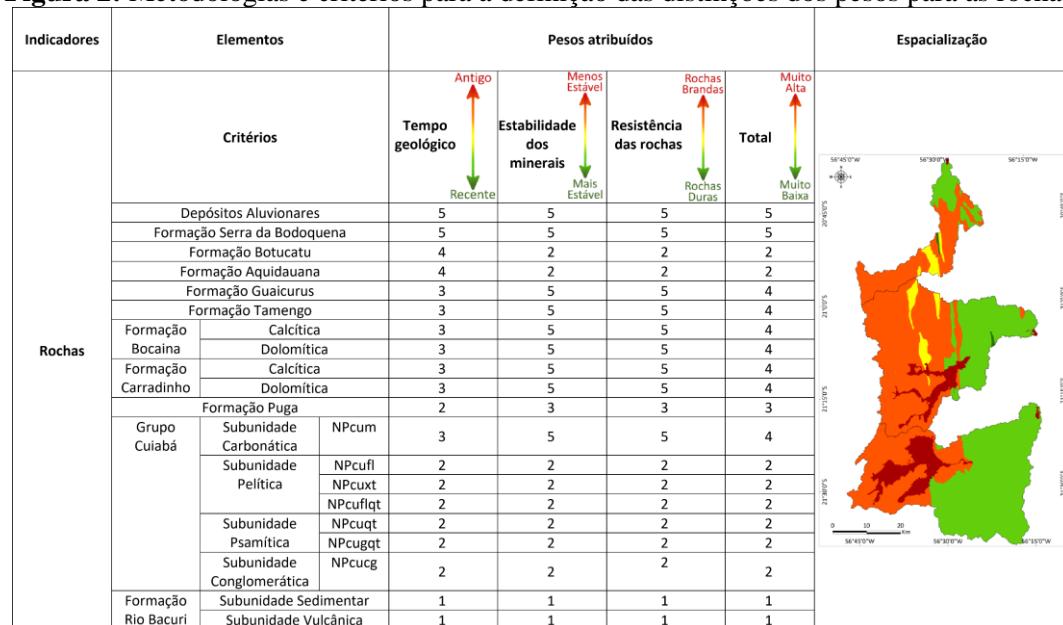
Resultados e Discussões

Quando se discute sobre caminhos metodológicos para alcançar determinadas cartografias de síntese, nota-se uma evolução dada pelo geoprocessamento, tecnologia e um conjunto de

metodologias já realizadas para descrever e avaliar níveis, multicritérios, interpoladores, entre outras métricas e estatísticas. Na fragilidade ambiental ou mesmo vulnerabilidade/susceptibilidade, aborda-se elementos da paisagem e espacializa-se ao longo de uma área de estudo. A área piloto para avaliar essa metodologia e adotar os pesos como critérios para essa e outras pesquisas futuras, foram as bacias cênicas dos rios Formoso, Peixe e Prata. Essa escolha se deu pela lógica de que estão em um sistema cárstico, com rochas e solos característicos de áreas ligadas ao carbonato de cálcio, bem como por possuírem partes de suas terras, com rochas terrígenas, como arenito, quartzo e filito, o que traz para a paisagem, aspectos únicos e distintos.

Portanto, ao avaliar as rochas, tem-se que considerar que todas padecem do intemperismo de um ambiente tropical, com estações bem definidas (úmida e de temperaturas altas na primavera e verão; e seca e de temperaturas amenas no outono e inverno). Fatos que consolidam os pesos para serem replicados em áreas semelhantes. As rochas, portanto, ficaram dispostas ao longo dos critérios de tempo geológico, estabilidade dos minerais e resistência das rochas (Figura 2).

Figura 2: Metodologias e critérios para a definição das distinções dos pesos para as rochas.



Organização: Os Autores (2024)

As rochas sedimentares e metamórficas, como o arenito, filito e calcário, que se localizam em maiores proporções nessas áreas, apresentam diferentes graus de fragilidade ambiental, influenciando a sua estabilidade e interação com o meio ambiente. O arenito é uma rocha sedimentar composta predominantemente por grãos de areia unidos por um cimento mineral, argila e ferro. A sua fragilidade ambiental se materializa principalmente através da erosão e o intemperismo físico pela falta de coesão entre os grãos de arenito diante de condições climáticas específicas (chuva/umidade e temperatura), resultando em desgaste. Contudo, ao associá-lo à fragilidade, apresenta maior resistência quando comparado aos calcários.

O filito, uma rocha derivada do xisto, apresenta uma estrutura laminar que confere à rocha uma fragilidade ambiental distinta. A presença de fraturas e fissuras na rocha aumenta sua suscetibilidade a deslizamentos de terra, especialmente em encostas íngremes. Por ter uma estrutura em folhelhos, é facilmente quebrada e mudanças rápidas na temperatura e umidade podem afetar

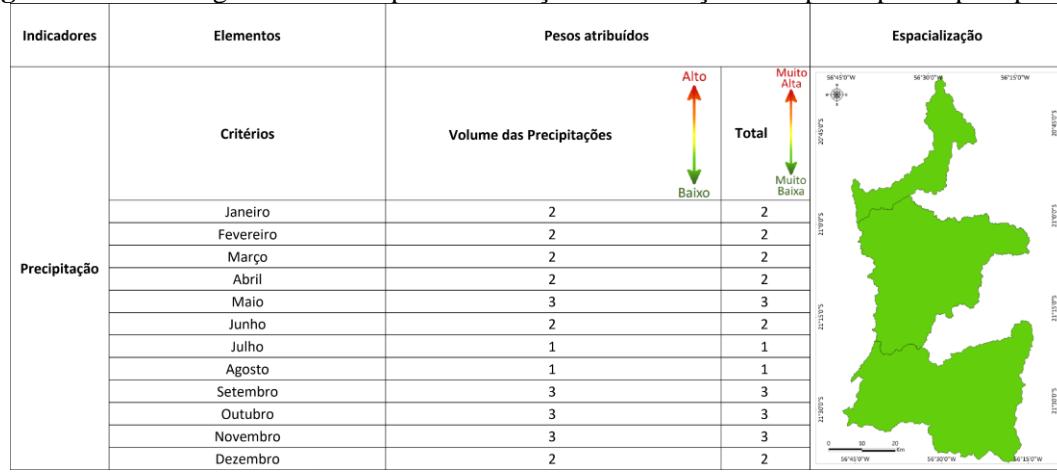
sua integridade, contudo, por ser uma rocha de tempo geológico mais antigo e por ser metamórfica, há uma estrutura que estabiliza o terreno.

O calcário, uma rocha sedimentar composta principalmente de carbonato de cálcio, é particularmente suscetível à dissolução em água ácida, um fenômeno conhecido como carstificação. A solubilidade do calcário resulta na formação de características cársticas, como cavernas e dolinas, que podem causar subsidência do solo e instabilidade. A erosão do calcário em regiões de alta precipitação pode comprometer a estabilidade do terreno, impactando em áreas como as bacias cênicas, com grandes extensões de agricultura.

É notório que a fragilidade das rochas deve levar em conta os demais elementos da paisagem, uma rocha calcária é menos suscetível se houver uma vegetação de porte elevado a protegendo contra as intempéries. Logo, quando pensamos em uma cartografia de síntese, a união desses elementos dará o aspecto sistêmico necessário para uma análise adequada e confiável.

Sistemas cársticos, atualmente, padecem dos avanços na utilização antrópica, lavouras e soja e outras monoculturas são destaques diante do relevo plano e fértil. Sem contar a mineração e pastagens que incidem de forma imprevisível no carste, as instabilidades do modelado são complexas e estão muito vinculadas ao grau de intensidade desse uso e a dinâmica, variabilidade e concentração das precipitações. A compreensão da relação das chuvas com o processo de dissolução química das rochas carbonatadas é fundamental, o resultado dessas relações faz com que a carstificação seja mais rápida nas regiões úmidas do que nas regiões secas, tornando o carste dessa região mais suscetível a eventuais impactos ambientais negativos (Figura 3).

Figura 3: Metodologias e critérios para a definição das distinções dos pesos para a precipitação.



Organização: Os Autores (2024)

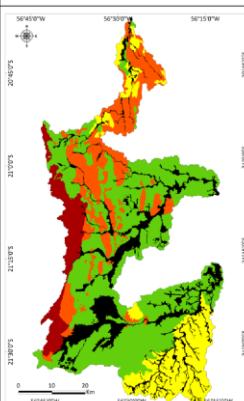
A precipitação e os aspectos climáticos são componentes essenciais dos sistemas ambientais, exercendo uma influência ainda mais profunda nos ambientes cársticos. Nessas regiões, a água da chuva não só contribui para a dissolução da rocha através do escoamento superficial, mas também penetra nas fissuras e fendas do calcário, promovendo processos de infiltração e percolação. Carvalho Júnior et al. (2008) destacam que a análise da interação entre precipitação e bacias hidrográficas cársticas é amplamente aplicada, especialmente quando se considera a presença dos aquíferos cársticos. Estes aquíferos desempenham um papel crucial no equilíbrio das águas superficiais, armazenando água durante os períodos de chuva devido à porosidade das rochas calcárias, e assim, contribuem para o abastecimento e regulação das águas.

O clima no Mato Grosso do Sul é classificado e regionalizado de acordo com estudos de diversos autores. Nesta análise, optou-se pela classificação de Zavattini (1992), em que o autor propôs uma classificação climática que visou um detalhamento e ofereceu uma ideia clara sobre as regiões climáticas sul-mato-grossenses. As bacias cênicas pertencem a um contexto de influência orográfica, em que a oeste tem-se a Serra da Bodoquena e, a leste, a Serra de Maracaju, formando um “corredor” caracterizado pelo contexto “Planalto da Bodoquena”, que é uma das feições climáticas individualizadas propostas pelo autor, com “índices anuais entre 1.200 e 1.400 mm, chuvas de primavera ligeiramente superiores às de verão e período outono-inverno com valores ao redor de 300 mm” (Zavattini, 1992, p.84). Notoriamente nessa região, há uma exceção histórica, que é o mês de maio com altas precipitações, próximas as existentes na primavera.

Por uma questão de escala, nota-se que as áreas estão presentes em apenas uma zona climática, o que não proporciona na paisagem maior ou menos magnitude de fragilidade, adotando um único peso para todos os elementos. Esses pesos de fragilidades são variáveis e é necessária uma abordagem qualitativa e de entendimento local, visto que as diferenças de precipitações só ocasionarão mudanças perceptíveis em escala regional até global.

O relevo, por outro lado, exibe impactos significativos sobre o nível de desgaste da rocha e do escoamento horizontal. Sua influência é notável tanto na definição dos padrões de uso do solo quanto nas atividades econômicas e sociais. A configuração do relevo orienta a distribuição das áreas urbanas e rurais, afeta o uso dos recursos naturais e direciona o desenvolvimento da infraestrutura, refletindo assim sua importância essencial na configuração e no desenvolvimento dos espaços humanos (Figura 4).

Figura 4: Metodologias e critérios para a definição das distinções dos pesos para o relevo.

Indicadores	Elementos	Pesos atribuídos				Especialização
		Topografia	Patamar Altimétrico	Amplitude do Terreno	Total	
Relevo	Critérios	Íngreme Plana	Alto Baixo	Alta Baixa	Uso Residuo Muito Alta Muito Baixa	
	Planície Alúvio-Terrígena	1	1	1	6	
	Planície Alúvio-Cárstica	1	1	1	6	
	Superfície Terrígena Aplainada a Suave Ondulada	2	2	2	2	
	Superfície Cárstica Aplainada a Suave Ondulada	2	2	2	2	
	Superfície Terrígena Ondulada	3	3	3	3	
	Superfície Cárstica Ondulada	3	3	3	3	
	Domínio de Morros Residuais	4	4	5	4	
	Domínio de Morros Residuais e Dolinas	4	4	5	4	
	Pavimentos Cársticos	5	5	5	5	

Organização: Os Autores (2024)

O que se destaca nesses pesos, foram as planícies, que recebem índices “6” que restringem seu uso diante dos conflitos pedológicos, geomorfológicos e geológicos que existem nessas áreas. São áreas que devem ser preservadas e que a restrição é fundamental para que a fragilidade ambiental não alcance níveis que comprometam a qualidade ambiental das áreas.

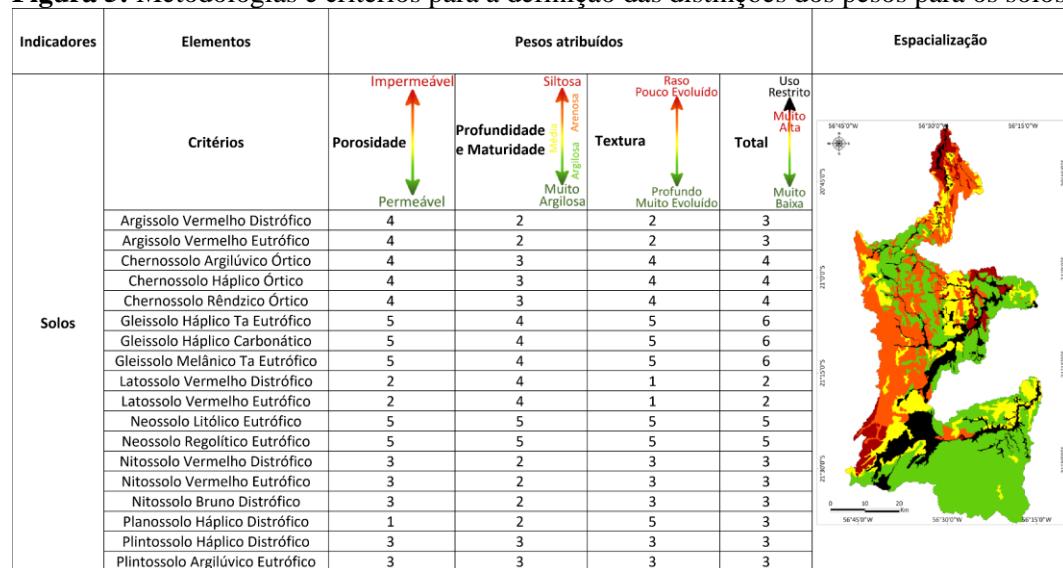
A região da Serra da Bodoquena, como já discutido, é cárstica e de morfologias e feições na paisagens distintas, sempre relacionadas aos relevo cárstico, e é notório na literatura que as

condições geomorfológicas, climáticas, fitogeográficas, atividades biológicas, zonas latitudinais e altitudinais interferem na propensão do desenvolvimento do carste, contudo, Christofoletti (1980), Kohler e Castro (2009) e Travassos (2019), relatam que a morfologia cárstica surge, principalmente, a partir da presença de rochas solúveis e precipitações moderadas e altitude acima do nível de base, o que possibilita a circulação da água. Logo, os compartimentos do relevo vão influenciar no processo e ditar os rumos da fragilidade ambiental.

No que diz respeito aos solos, atualmente, há pouco conhecimento sobre eles em terrenos carbonáticos brasileiros, com a maioria das pesquisas focando em aspectos geológicos, geomorfológicos e suas implicações para a paisagem e o turismo. O Carbonato de Cálcio e a argiluviação, processo pelo qual a argila se acumula no horizonte B do solo devido à ação da água da chuva, são fatores importantes nos sistemas cársticos. A presença de horizontes cárpicos e carbonáticos é comum. As rochas calcárias geram uma ampla variedade de solos e que a natureza e a velocidade da pedogênese dependem das impurezas nas rochas, como óxidos e dióxido de silício, que afetam sua solubilidade e, consequentemente, a formação dos solos.

Diante disso, percebe-se que as bacias cênicas exibem 19 solos distintos, classificados até sua terceira taxonomia segundo o SIBCS (2018). Destes, os há uma predominância do latossolo vermelho distrófico que está presente ao longo das três bacias cênicas, com maior destaque para as bacias dos rios da Prata e Formoso, sobretudo por exibirem superfícies de aplainamento nas faixas central e leste das bacias, áreas já com influência da depressão do rio Miranda, mas, sobretudo por serem áreas planas, intemperizadas, já desgastadas ao longo de ciclos de erosão e carreamento de sedimentos (Figura 5).

Figura 5: Metodologias e critérios para a definição das distinções dos pesos para os solos.



Organização: Os Autores (2024)

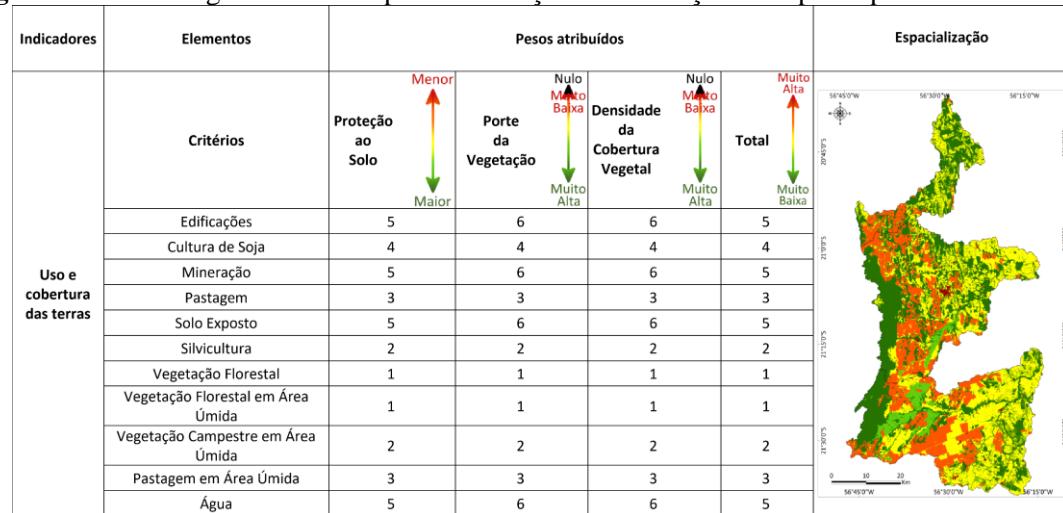
Em áreas planas e cársticas, os chernossolos e nitossolos padecem de processos erosivos laminares somente sob chuvas concentradas e intensas, o que não deixa de ser um alerta, pois os últimos casos, mesmo com chuvas em menor intensidade, tais solos já estão sendo carreados, pelo fato da movimentação intensa destes e do ressecamento e desprendimento pela baixa composição vegetacional. É preciso trazer à tona que o solo é suporte dos eco(geossistemas) e são imprescindíveis para a organização espacial da sociedade. Sua capacidade de suporte à sociedade é expressa na medida em todos exibem uma potencialidade ou limitação seja como elemento natural e/ou recurso produtivo. Quando ocorre um uso mais intensivo do que a capacidade do solo e do sistema como um todo é capaz de absorver, a paisagem passa a não cumprir com suas funções ecológicas, funcionais e geossistêmicas.

Logo, a porosidade, profundidade e textura dos solos admitem uma maior ou menor propensão à infiltração e escoamento, o que determinará os níveis de fragilidade. Nesse caso, os neossolos (por ser raso e pedregoso – silte na superfície) e o gleissolo por ser influenciado pelo nível freático e localizado em planície, ganham níveis mais altos e limitam seu uso para vários fins, até para que não apresentem fragilidades mais elevadas e perda das funções geoecológicas.

Quando vamos discutir o uso das terras, nota-se que as paisagens geográficas atuais praticamente pouco se têm das condições naturais, mesmo os remanescentes nativos padecem de influência antrópica pelo clima, relevo, mudança na variabilidade das chuvas, entre outros fatores. Logo, as paisagens atuais são resultado do processo ocupacional e de influência da sociedade, atividades agrícolas, urbanas e industriais, sociais e econômicas, fizeram com que as paisagens puramente naturais se desaparecessem. No contexto da Serra da Bodoquena, o processo de uso das terras é predominantemente agropecuária, contudo, é bem definido três processos que ocorrem nessas áreas: o primeiro é a preservação dos remanescentes nativos da Serra da Bodoquena; o segundo é a borda da serra cárstica, fértil e frágil, que exibe solos e relevo que propiciam o avanço antrópico, ou seja, as lavouras avançam no sentido sul-norte e seguindo para o Pantanal; o terceiro é que nas áreas terrígenas do planalto da Serra da Bodoquena as pastagens são massivas.

Diante dos inúmeros processos atuantes e que fragmentam a paisagem, a alteração do uso impera em barreiras econômicas, tornando propício que se entenda e analise o território sob a ótica de minimização dos problemas, visto que a dinâmica exercida em bacias hidrográficas dessa característica, é única e parece diante de recorrentes alterações. Extração do calcário, extração da água subterrânea, poluição da água, edificações e agricultura são os principais culpados por perturbar o carste, tanto na superfície como na subsuperfície, entre outros fatores que tornam essas áreas ainda mais frágeis (Figura 6).

Figura 6: Metodologias e critérios para a definição das distinções dos pesos para os usos da terra.

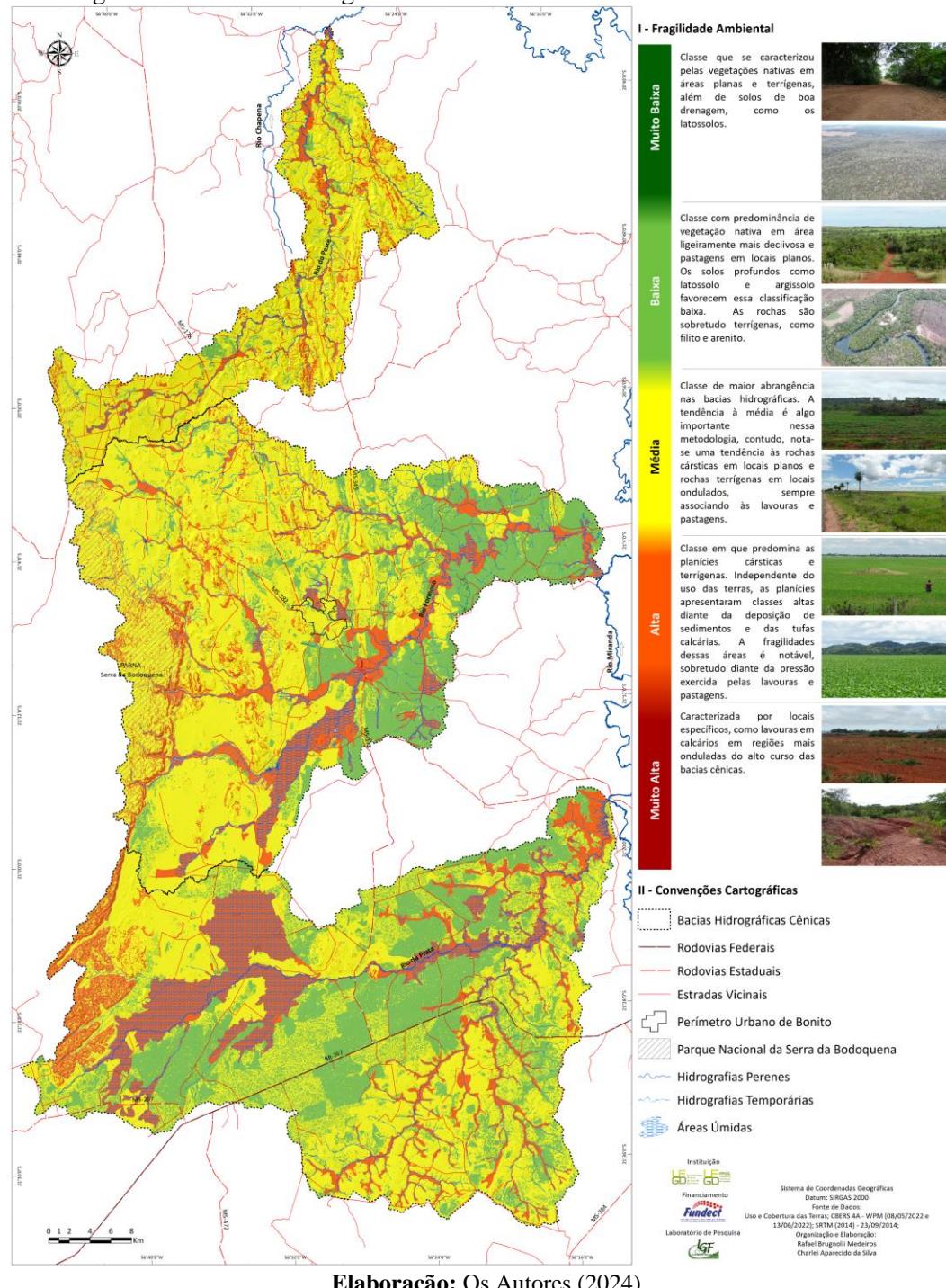


Organização: Os Autores (2024)

Portanto, as lavouras passam a contar com índices de fragilidade alta, diante da falta de proteção ao solo em determinadas épocas do ano. Mesmo que essas áreas apresentem manejo das terras mais adequado do que muitas pastagens, estas últimas ainda propiciam uma vegetação de porte baixo durante todo o ano, o que reduz o impacto direto das chuvas sobre o solo. Por outro lado, vegetação nativa, seja campestre e/ou florestal, são atribuídos índices mais baixos diante justamente dessa proteção contínua ao solo.

A fragilidade ambiental refere-se à suscetibilidade de um ambiente a perturbações naturais e antrópicas, que podem comprometer seu equilíbrio e funcionalidade. Entendê-la como uma cartografia de síntese é essencial para a visualização e análise sistêmica, integrando informações sobre diferentes componentes ambientais em mapas que destacam áreas de risco/crítica e a potencial fragilidade. Essa representação visual detalhada auxilia na tomada de decisões, planejamento territorial e implementação de medidas de conservação, promovendo um equilíbrio entre uso dos recursos e preservação ambiental (Figura 7).

Figura 7: Cartografia de Síntese da Fragilidade Ambiental das Bacias Cênicas de Mato Grosso do Sul.



Na região, as áreas com fragilidade ambiental variam amplamente, desde regiões de fragilidade muito alta, como a Serra da Bodoquena e o carste plano da sua borda, até áreas com fragilidade baixa, associadas as pastagens e rochas terrígenas. As fragilidades médias predominam em áreas de planaltos e solos profundos que, embora apresentem boas condições para drenagem e

menor capacidade erosiva, ainda requerem manejo cuidadoso para evitar o desequilíbrio ambiental. A avaliação detalhada dessas fragilidades e sua relação com o uso do solo é crucial para garantir a sustentabilidade e a resiliência dos ecossistemas na região.

Considerações Finais

A compreensão da fragilidade ambiental exige uma análise detalhada dos componentes físicos e antrópicos que inferem nos processos predominantes, ainda mais sobre áreas de bacias hidrográficas. No carste, essa fragilidade é acentuada pelas rochas carbonatadas, que interagem de maneira complexa com os sistemas fluviais, solos e relevo, através do intemperismo químico. Estudos metodológicos e/ou teóricos destacam a crescente degradação dos sistemas cársticos devido à atividade humana não planejada, especialmente em áreas sensíveis como sumidouros e dolinas.

Ao adotar ou formular uma metodologia temos que nos dar conta que ao mesmo tempo que ele pode ajudar a encontrar áreas críticas e que precisam de estratégias de gestão e manejo adequado, maximizando recursos e fornecendo informações valiosas para o planejamento ambiental; pode incorrer em erros diante da definição de critérios. Essa definição nunca pode ser arbitrária e esperando um resultado específico, deve ter embasamento teórico e metodológico para validação terrestre e para ter sucesso nos dados apresentados.

As metodologias de fragilidade ambiental sejam ferramentas valiosas para compreender e gerenciar a vulnerabilidade dos ecossistemas é essencial estar ciente de suas limitações, a integração de diferentes abordagens e a atualização contínua dos dados podem ajudar a superar alguns dos desafios, maximizando a eficácia e a aplicabilidade dessas metodologias. O presente ensaio destacou essas questões e procura apresentar com eficácia de uma metodologia que abranja componentes que exercem influência sobre um sistema ambiental e/ou cárstico, destacando pesos e características que devem ser ponderados na análise da fragilidade ambiental. Em sua essência a proposta visa auxiliar e se somar a outras metodologias que apresentam as características cársticas como base, que levam em consideração áreas de predomínio de calcários, declives acentuados contrastando com áreas planas, resultantes da dissolução da rocha (calcário), culturas, características de tipo de região e, por fim, solos argilosos e muito frágeis.

Tais fatos demonstram que mesmo com tais limitações, criar metodologias, sobretudo em áreas cársticas, é fundamental para ser base para outras pesquisas, ou mesmo começar a pensar na possibilidade de criar padrões de análise que levem em conta as particularidades desse sistema tão complexo, sensível e único no estado de Mato Grosso do Sul e no Brasil. O ensaio ora proposto permitiu identificar que as áreas mais frágeis têm uma associação direta com os canais de drenagem e/ou áreas úmidas, ao mesmo tempo, as três bacias analisadas quase na sua totalidade estão sob o predomínio de níveis médios o que requer atenção naquilo que refere o uso e ocupação.

Finalizamos, a eficácia está fortemente vinculada à qualidade e disponibilidade dos dados ambientais, e a falta de informações atualizadas ou precisas pode comprometer os resultados. Algumas metodologias podem simplificar/generalizar excessivamente a complexidade dos sistemas naturais, resultando em avaliações que não capturam todas as variáveis relevantes. Além disso, as condições ambientais e antrópicas estão em constante mudança, o que torna as avaliações rapidamente desatualizadas, exigindo atualizações frequentes que podem ser desafiadoras.

Medeiros, Rafael Brugnolli; Silva, Charlei Aparecido da. *Fragilidade ambiental de sistemas cársticos, uma proposta teórica-metodológica: as bacias cênicas de Mato Grosso do Sul*. Revista Pantaneira, V. 25, EDIÇÃO ESPECIAL XXIII ENSUL, UFMS, Aquidauana-MS, 2024.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT) para o desenvolvimento da pesquisa, através do projeto contemplado na Chamada Especial Fundect/UFGD 33/2022. O projeto foi desenvolvido na Universidade Federal da Grande Dourados, no Laboratório de Geografia Física - LGF (www.lgf-neef.com), o qual fornece o suporte físico e disponibiliza os softwares necessários para a execução desta pesquisa. O segundo autor agradece ao CNPq pela concessão da bolsa produtividade em pesquisa, interstício 2023-2025

Referências bibliográficas

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil) (ANA). **HidroWeb**: sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb>>. Acesso em: 31 maio 2017.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D; SANTOS, G. F. dos. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. v. 1, Florianópolis: Ed. UFSC. v. 1, 1994. 425p.
- BRUGNOLLI, R. M.; SALINAS CHAVEZ, E.; SILVA, C. A; BEREZUK, A. G. Geoecological diagnosis of landscapes of the Formoso River Watershed, Bonito/MS, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 81, n. 174. 2022. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10247-6>
- BRUGNOLLI, R. M.; SANTOS, L. C.; BEZERRA, J. F. R.; SILVA, Q. D.; MELO, S. N. Environmental Vulnerability of the Buriticupu River Water Basin, Maranhão - Brazil: The Relief as a Key Element. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 35, n. 1, 2023. DOI: 10.14393/SN-v35-2023-66679.
- BRUGNOLLI, R. M.; SILVA, C. A; **Atlas Geoambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Formoso, Bonito-Mato Grosso do Sul/Brasil, Bonito e Jardim-Mato Grosso do Sul**. Pedro & João Editores: São Carlos, 2023.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo, Edgard Blücher, 2ª edição, 1980. 188p.
- CPRM, COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Portal GeoBank**. Disponível em: <https://geoportal.cprm.gov.br/geosgb/>. Acesso em: 02 mai. 2021.
- CREPANI, E. M.; et. al. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento físico-territorial**. São José dos Campos INPE, 2001 (INPE-8454-RPQ72). 124p.
- DE WAELE, J. D.; GUTIÉRREZ, F.; PARISE, M.; PLAN, L. Geomorphology and natural hazards in karst areas: A review. **Geomorphology**, v.134, p. 1-8. 2011.
- EMBRAPA, EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3.ed. Brasília, 2018. 353p.
- ESRI 2011. **ArcGIS Desktop**: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- FORD, D.C. AND WILLIAMS, P. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. John Wiley, Chichester, 2007. 562p.
- GOLDSMITH, F. B. Evaluating Nature. In: A e Goldsmith F. B. (eds.) **Conservation in Perspective**. John Wiley and Sons, Chichestr, 1983, p. 233-246.
- GOUVEIA, I. C. M. C.; ROSS, J. L. S. Fragilidade Ambiental: uma Proposta de Aplicação de Geomorphons para a Variável Relevo. **Revista Do Departamento De Geografia**, São Paulo, v. 37, 2019.
- GUIMENES, F. B. Q; AUGUSTO FILHO, O. Mapas de fragilidade ambiental utilizando o processo de análise hierárquica – AHP e sistema de informação geográfica. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Foz do Iguaçu/PR, 2013, p. 6564-6571.
- IBGE, Instituto de Brasileiro de Geografia e Estatística. **Portal Geociências**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 02 mai. 2021.

Medeiros, Rafael Brugnoli; Silva, Charlei Aparecido da. *Fragilidade ambiental de sistemas cársticos, uma proposta teórica-metodológica: as bacias cênicas de Mato Grosso do Sul*. Revista Pantaneira, V. 25, EDIÇÃO ESPECIAL XXIII ENSUL, UFMS, Aquidauana-MS, 2024.

KOHLER, H.C.; CASTRO, J. F. M. Geomorfologia cárstica. In: Guerra, A.J.T.; Cunha, S.B. da. **Geomorfologia: Exercícios, Técnicas e Aplicações**. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, pp. 339-350. 2009.

METZGER, J. P., ALVES, L. F., GOULART, G., TEIXEIRA, A. M. G., SIMÕES, S. J. C., CATHARINO, E. L. M. Uma área de relevante interesse biológico, porém pouco conhecida: a Reserva Florestal do Morro Grande. **Revista Biota Neotropical**. v. 6, n. 2: 2006.

PARISE, M; DE WAELE, J.D; GUTIERREZ, F. Current perspectives on the environmental impacts and hazards in karst. **Environmental Geology**, v. 58, p. 235–237, 2009.

QGIS Development Team, 2022. **QGIS Desktop 3.22.5**. Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia**: ambiente e planejamento. São Paulo: Contexto, 1990. 88p.

ROSS, J. L. S. **Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados**. Revista do Departamento de Geografia/FFLCH/USP, n. 8, p. 63-73, 1994.

ROSS, J. L. S.; FIERZ, M. de S. M. Geomorfologia aplicada ao planejamento ambiental territorial: potencialidades e fragilidades In: MAGNONI JÚNIOR, L. *et al* (org.). **Redução do risco de desastres e a resiliência no meio rural e urbano**. Centro Paula Souza, São Paulo, 2017. p.58-77

SALINAS CHAVEZ, E.; BRUGNOLLI, R. M. Propuesta metodológica para la gestión de los paisajes de la cuenca del río Formoso, Ms/Brasil. **Entorno Geográfico**, n. 27, p. e23413330, 2024.

SILVEIRA, T.; REGO, A. C.; SANTOS, J. W. B. dos; ARAUJO, M. S. B. Qualidade da água e vulnerabilidade dos mananciais hídricos superficiais na definição das fragilidades potencial e ambiental de bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.7, n.4, 2014, p. 642-652.

SPÖRL, C. **Metodologia para elaboração de modelos de fragilidade ambiental utilizando redes neurais**. 2007. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SPRING. Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. Camara G, Souza RCM, Freitas UM, Garrido J Computers & Graphics, 20: (3) 395-403, May-Jun 1996.

TRAVASSOS, L. E. P. **Princípios de Carstologia e Geomorfologia Cárstica**. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBIO, 2019.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro. IBGE/SUPREN, 1977. 97p.

ZAVATINI, J.A. Dinâmica Climática no Mato Grosso do Sul. **Geografia**, Rio Claro, v. 17, n. 2. p. 65-91, 1992.