



FRAGILIDADE AMBIENTAL EMERGENTE DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SOBRADO, SUDESTE DO TOCANTINS

EMERGING ENVIRONMENTAL FRAGILITY OF THE SOBRADO RIVER WATERSHED, SOUTHEAST OF TOCANTINS

Heloísa Rodrigues Nascimento – IFTO – Palmas – Tocantins – Brasil
heloisa@ifto.edu.br

Fernando de Morais – UFT – Palmas – Tocantins – Brasil
morais@mail.uft.edu.br

RESUMO

As modificações produzidas pelas intervenções antrópicas nas paisagens naturais podem gerar impactos ambientais em diferentes níveis. Ao considerar a bacia hidrográfica como um sistema ambiental onde natureza e sociedade interagem, torna-se necessário compreender como os fatores naturais e antrópicos interferem nos níveis de fragilidade ambiental. O objetivo deste trabalho foi identificar a fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Sobrado, localizada no sudeste do estado do Tocantins, caracterizada pela presença de paisagem cárstica. Para tanto, a metodologia consistiu na elaboração do mapa de precipitação pluviométrica, do mapa de declividade e do mapa sobre os tipos de solos. O mapa de uso e cobertura da terra foi elaborado a partir da interpretação e do processamento digital das imagens Landsat 8/OLI, classificação supervisionada pelo método *battacharya*, no *software* SPRING. Realizou-se a sobreposição das informações para obtenção da fragilidade ambiental emergente. Os resultados apontaram para identificação da classe baixa que se mostrou predominante na bacia, incluindo as formas de uso e áreas de cobertura vegetal nativa. A classe média ocupou a segunda posição, influenciada pela combinação dos fatores físicos e antrópicos, incluindo os tipos de solos, pastagens e cobertura vegetal nativa. E a classe alta ocupa uma pequena área, incluindo a localização dos afloramentos rochosos e áreas com maiores declives. Pode-se concluir ainda que a área com a maior concentração de cavernas está sob a influência da classe média fragilidade ambiental, despertando a necessidade da elaboração de diretrizes para planejamento ambiental e uso adequado da terra.

Palavras-chave: geotecnologias, área cárstica, uso e cobertura da terra.

ABSTRACT

The modifications produced by human interventions in natural landscapes can generate environmental impacts at different levels. When considering the watershed as an environmental system where nature and society interact, it becomes necessary to understand how natural and anthropic factors interfere with the levels of environmental fragility. The objective of this work was to identify the environmental fragility of the watershed of the Sobrado river, located in the southeast of the state of Tocantins, characterized by the presence of a karstic landscape. Therefore, the methodology consisted of the elaboration of the rainfall map, slope map, and map on the types of soils. The land use and the land cover map were prepared from the interpretation and digital processing of

Landsat 8/OLI images, classification supervised by the *battacharya* method, in the *SPRING software*. The information was superimposed to obtain the emerging environmental fragility. The results pointed to the identification of the lower class predominant in the basin, including the forms of use and areas of native vegetation cover. The middle class occupied the second position, influenced by the combination of physical and anthropic factors, including soil types, pastures, and native vegetation cover. In addition, the upper class occupies a small area, including the location of rocky outcrops and areas with steeper slopes. It can also be concluded that the area with the highest concentration of caves is under the influence of the middle class with environmental fragility, raising the need for the elaboration of guidelines for environmental planning and adequate land use.

Keywords: geotechnologies, karstic area, land use and land cover.

INTRODUÇÃO

As modificações das paisagens naturais são resultantes de uma complexa interação entre os componentes físicos, biológicos e antrópicos, que ocorre mediante as trocas de energia e matéria e, por sua vez, interferem no estado de equilíbrio, promovendo impactos em diferentes níveis, em função das características intrínsecas desse ambiente, ou seja, de sua fragilidade ambiental (ROSS, 1994, 2006).

Nessa perspectiva, estão inseridos os estudos de análise e planejamento ambiental, pois, para cada ambiente natural, são necessárias ações que visem ao ordenamento territorial. Para isso, é desejável compatibilizar o desenvolvimento das atividades produtivas de acordo com as suas potencialidades e o limite destas, respeitando áreas passíveis de fragilidade ambiental (ROSS, 2006).

A adoção da bacia hidrográfica como unidade de análise e planejamento ambiental tem se destacado em diversos trabalhos científicos envolvendo a temática fragilidade ambiental (*e.g.* GONÇALVES *et al.*, 2011; VALLE; FRANCELINO; PINHEIRO, 2016; MIGUEL; MEDEIROS; GOMES, 2018; VIEIRA *et al.*, 2021; CAVALCANTE *et al.*, 2022).

A compreensão da fragilidade ambiental representa uma ferramenta essencial para fundamentar diagnósticos, propiciar informações sobre o cenário ambiental e fornecer subsídios para formulação de políticas públicas, implantação de estratégias de desenvolvimento local e elaboração de modelos de ordenamento físico-territorial (BACANI *et al.*, 2015; VIEIRA *et al.*, 2021).

Para compreender a fragilidade ambiental de uma bacia hidrográfica, é importante avaliar, de forma integrada, suas características naturais e as intervenções

humanas, com objetivo de identificar áreas passíveis de maior proteção ou que apresentam maiores restrições, a fim de viabilizar um efetivo gerenciamento ambiental (TROMBETA *et al.*, 2014; VALLE; FRANCELINO; PINHEIRO, 2016).

A proposta metodológica para avaliação empírica dos níveis de fragilidade ambiental, elaborada por Ross (1994), foi desenvolvida com base no conceito de Ecodinâmica e tem como um dos seus precursores Tricart (1977). A partir dessa concepção ecológica, o ambiente é analisado sob a perspectiva da Teoria Geral dos Sistemas e apresenta como princípio básico de que na natureza os fluxos de energia e matéria ocorrem por meio de relações em equilíbrio dinâmico (ROSS, 2010). No entanto, as diferentes intervenções antrópicas na natureza promovem desequilíbrios que resultam em impactos temporários ou até mesmo irreversíveis (AMARAL; ROSS, 2009).

A avaliação sistêmica de um ambiente natural está baseada no estudo integrado da relação intrínseca entre os seus componentes físicos, bióticos e atividades humanas, possibilitando o monitoramento de processos que comprometem a funcionalidade do sistema como características relacionadas à erosão do solo, ao assoreamento de cursos d'água, entre outros (SPÖRL; ROSS, 2004). Assim, o mapeamento dos níveis de fragilidade de uma bacia hidrográfica possibilita uma visão mais ampla sobre as escolhas mais adequadas para o uso da terra.

A bacia hidrográfica do rio Sobrado – BHRS, localizada na região sudeste do estado do Tocantins, foi selecionada por estar inserida em uma paisagem cárstica. As paisagens cársticas desenvolvem-se em rochas carbonáticas, com presença de nascentes e fontes de água subterrânea, abrigam uma biodiversidade singular, apresentando elevada taxa de endemismo. Além disso, as cavernas preservam remanescentes paleontológicos e arqueológicos (PILÓ; AULER, 2019).

A paisagem cárstica é um ambiente extremamente vulnerável do ponto de vista ambiental e merece uma atenção especial no que se refere a políticas de uso e ocupação (HARDT, 2008; SOUZA; AULER, 2018). Consideradas ambientes frágeis, as áreas cársticas possuem algumas peculiaridades, entre elas, o contexto geológico, que possibilitou sua formação, e o sistema hidrológico, que é predominantemente subterrâneo, constituído de canais e com a ausência de camadas para filtrar a água, antes da sua chegada aos

aquíferos. Essa condição potencializa a propagação de poluentes que porventura possam atingir esses reservatórios, se comparada com o sistema de drenagem superficial (PILÓ; AULER, 2013; FERREIRA; MORAIS, 2017).

A região sudeste do Tocantins, onde se localiza a BHRS, foi indicada pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), no ano de 2018, como área prioritária para a conservação do patrimônio espeleológico, considerando características do meio físico, biótico e histórico-cultural (CECAV, 2018). Isso demonstra a necessidade de estudos integrados sobre o meio físico e influências da ação humana, a fim de subsidiar informações para o planejamento ambiental dessa área, adequando o uso racional dos recursos e as limitações impostas pela fragilidade ambiental (PACHECO; CASTRO, 2022).

Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas em áreas cársticas para compreender os fatores que promovem a erosão do solo e suas consequências, por se tratar de um problema ambiental grave (FENG *et al.*, 2021; LIANG *et al.*, 2021; LUO *et al.*, 2021).

Em face ao exposto, esta pesquisa teve como objetivo identificar a fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Sobrado, a partir das análises de diversos parâmetros como declividade, pedologia, precipitação e uso e cobertura da terra, conforme metodologia proposta por Ross (1994) e adaptada por Crepani *et al.* (2001), com a finalidade de subsidiar informações relevantes para um planejamento físico e ambiental.

ÁREA DE ESTUDO

A BHRS está localizada na região sudeste do Tocantins (Figura 1). Está inserida na bacia hidrográfica do rio Palma, que deságua no rio Paranã, sendo este último afluente da margem direita do rio Tocantins (TOCANTINS, 2007). A área da bacia corresponde a 1.103,266 km² e abrange quatro municípios, dois deles localizados no estado do Tocantins: Taguatinga (56,48%) e Aurora do Tocantins (31,24%); e uma pequena parte em dois municípios no estado da Bahia: Luís Eduardo Magalhães (8,94%) e São Desidério (3,34%).

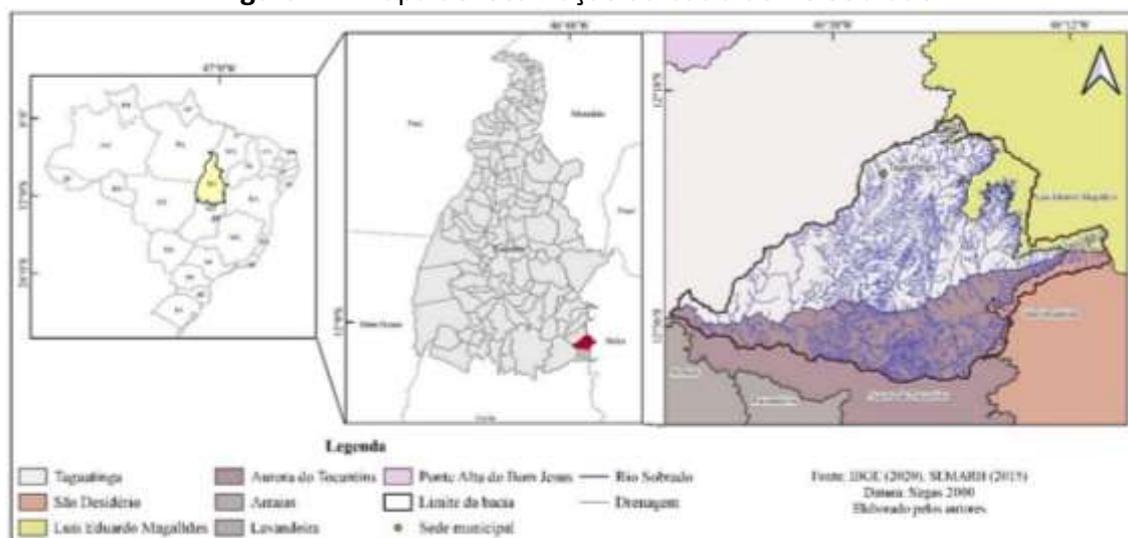
Na área de abrangência da BHRS, tem-se a presença de 51 cavernas, 12 delas localizadas no município de Taguatinga, e 39, no município de Aurora do Tocantins (CECAV, 2022).

No âmbito da BHRS, há importantes atrativos turísticos, entre eles, destaca-se o rio Azuis, que está situado no município de Aurora do Tocantins e é caracterizado como uma surgência cárstica. Com uma extensão de 137 metros, é conhecido por ser o menor rio do Brasil e atrai turistas de diversos locais do país (ALVES; MORAIS, 2017).

A bacia do rio Sobrado possui duas classes de precipitação média anual. A mais predominante fica entre 1300-1400 mm, e a outra, 1400-1500 mm. A temperatura média anual é 25°C (SEPLAN, 2012).

As classes de vegetação presentes são: savana arborizada, savana parque, floresta estacional decidual e floresta estacional semidecidual (IBGE, 2020).

Figura 1 – Mapa de localização da bacia do rio Sobrado



PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a elaboração do mapa de fragilidade ambiental da BHRS, inicialmente, fez-se necessária a seleção das variáveis que caracterizam a área de estudo, de acordo com a metodologia proposta por Ross (1994) e adaptada por Crepani *et al.* (2001), sendo elas: solos, precipitação pluviométrica, declividade e uso e cobertura da terra para o ano de 2020.

Para a obtenção dos tipos de solos que compõem a BHRS, realizou-se a consulta ao Banco de Informações Ambientais (BDiA), produzido pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), na escala 1:250.000, em formato *shapefile*. Em seguida, com a utilização do *software* QGIS, versão 3.16 Hannover, realizou-se o recorte do plano de informações, tendo como referência o limite da bacia do rio Sobrado e a reprojeção dos dados ao datum SIRGAS 2000, coordenadas planas UTM, fuso 23 Sul.

A componente declividade foi obtida a partir de dados das imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), resolução espacial 30 metros, modeladas pelo Projeto Topodata (INPE, 2008). Para tanto, foram usadas duas folhas para caracterização da bacia do rio Sobrado, sendo elas a 12s48 e a 12s465. Realizou-se o mosaico das duas folhas, a reprojeção para o datum SIRGAS 2000, projeção UTM, zona 23 Sul. Após essa etapa, efetuou-se o recorte da área de estudo por meio do plano de informação do limite da bacia, utilizou-se o menu Raster → Análise → Declive, no *software* QGIS, e obteve-se o valor da declividade em porcentagem para a área de estudo. Em seguida, foi aplicado o processo de reclassificação do raster, considerando a classificação de Ross (1994).

Os dados para a elaboração do mapa de precipitação pluviométrica foram adquiridos no portal Agritempo (Sistema de Monitoramento Agrometeorológico), mantido pela Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e pelo CEPAGRI/UNICAMP (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas aplicadas à Agricultura), a partir das estações listadas no Quadro 1, que utilizam dados obtidos de imagens do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM).

Quadro 1 – Estações utilizadas para a elaboração do mapa de precipitação

Município	Estação	Período
Aurora do Tocantins	TRMM 4155	2001 a 2021
Taguatinga	TRMM 4153	2001 a 2021
Luís Eduardo Magalhães	TRMM 4262	2001 a 2021
São Desidério	TRMM 3860	2001 a 2021

Fonte: Portal Agritempo, *on-line*, consulta realizada entre os dias 18/01/2022 a 24/01/2022

O mapa de precipitação foi elaborado a partir da interpolação dos dados adquiridos pelo método *Inverse Distance Weighted* (IDW), disponível na barra de ferramentas *Geostatistical Analyst* do *software* ArcGIS. O dado foi gerado em formato

raster e, em seguida, foi realizado o recorte considerando o limite da bacia do rio Sobrado e, finalmente, a definição do intervalo e cores da simbologia.

Para elaboração do mapa de uso e cobertura da terra, foram utilizadas as imagens do satélite Landsat 8/OLI, adquiridas na página do *United States Geological Survey* (USGS, 2019), referentes à data 07/06/2020 e 14/06/2020, órbita/ponto 220/69 e 221/69. O processamento inicial se deu a partir da aplicação do método DOS (*Dark Object Subtraction*), usando o *plugin SCP (Semi-Automatic Classification Plugin)* no *software* QGIS. Depois, as imagens foram importadas para o *software* SPRING, em que se realizou o mosaico das duas cenas, aplicação da composição colorida (6R5G4B) e recorte da área de estudo.

O método utilizado foi a classificação supervisionada por regiões, classificador *Battacharya*, com limiar de aceitação 99,9%. A definição das classes para a elaboração do mapa de uso e cobertura da terra da BHRS foram: Afloramento Rochoso, Agricultura, Área Urbana, Formação Campestre, Formação Florestal, Formação Savânica, Pastagem e Solo Exposto.

Para a obtenção do mapa de fragilidade ambiental, o mapa de solo e o mapa de uso e ocupação da terra, que estavam no formato vetorial, foram convertidos para o formato raster, no *software* ArcGIS. Em seguida, os dados referentes à declividade, à precipitação pluviométrica, aos solos e ao uso e cobertura da terra foram reclassificados de acordo com seus respectivos pesos e classificação proposta pela metodologia de Ross (1994) e Crepani *et al.* (2001), para obtenção dos índices de fragilidade ambiental, representados pelas classes: muito baixa (1), baixa (2), média (3), alta (4) e muito alta (5), de acordo com o grau de fragilidade.

Por fim, os dados em formato raster e reclassificados de acordo com os pesos foram importados para o *software* ArcGis, seguindo-se à sobreposição dos dados de declividade, precipitação pluviométrica, solos e uso e cobertura da terra, com uso da ferramenta *Spatial Analyst Tools* → *Overlay* → *Weighted Overlay*, e foram inseridas todas as variáveis para a obtenção do mapa de fragilidade ambiental.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os solos representam a base do ecossistema e das atividades humanas, e entender as suas características permite explicar a suscetibilidade à ocorrência de processos de erosão e assoreamento, informações importantes para o planejamento da ocupação (SANTOS, 2004).

Na bacia hidrográfica do rio Sobrado (BHRS), predomina o tipo de solo Neossolo (Litólico e Quartzarênico), conforme Figura 2 e Tabela 1. Os Neossolos Litólicos estão presentes em diversas regiões do Brasil, em áreas que apresentam declives fortes e relevos acentuados, possuem limitações para o uso agrícola, por apresentar pouca profundidade, frequente ocorrência de fragmentos rochosos ou pedregosos (LEPSCH, 2010). Já o Neossolo Quartzarênico, por apresentar predominância de areia, possui baixa capacidade de armazenar água e nutrientes para as plantas (LEPSCH, 2010). Ambos possuem alto grau de suscetibilidade à erosão.

Tabela 1 – Classes de solos e peso de fragilidade na bacia hidrográfica do rio Sobrado

Solos	Peso de fragilidade	Área (km ²)	Percentual (%)
Afloramento rochoso	5	17,238	1,57
Cambissolo	4	289,162	26,21
Gleissolo	5	17,639	1,60
Latossolo vermelho-amarelo	2	184,993	16,77
Nitossolo vermelho	3	97,689	8,85
Neossolo Litólico	5	318,425	28,86
Neossolo Quartzarênico	5	178,120	16,14
		1.103,266	100

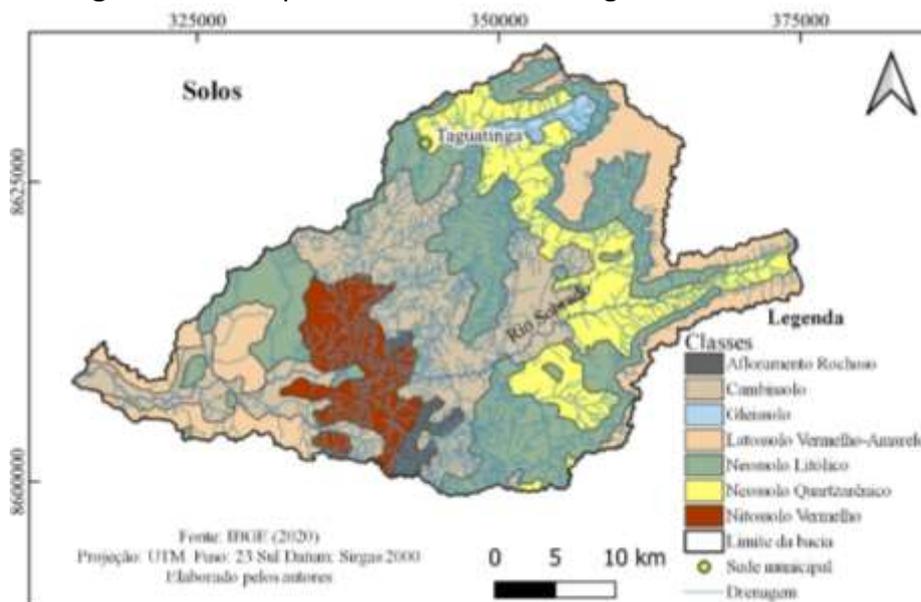
Fonte: Adaptada de Ross (1994)

O Cambissolo ocupa 26,21% da bacia do rio Sobrado. É considerado um tipo de solo pouco desenvolvido, a profundidade varia de raso a profundo e possui baixa permeabilidade (JARBAS *et al.*, 2006; ZARONI; SANTOS, 2006). Em áreas com declives mais acentuados, é muito utilizado para a prática de pastagens ou reflorestamento e apresenta alta fragilidade (LEPSCH, 2010).

O Latossolo vermelho-amarelo está presente na Serra Geral, situada na divisa entre os estados do Tocantins e Bahia, em áreas de declividade plana e destinada, em sua

maior parte, à agricultura temporária (soja e milho). Possui boa permeabilidade, é solo profundo e apresenta baixo grau de fragilidade (SOUSA; LOBATO, 2006). Pode ser encontrado no baixo curso da bacia, em áreas onde predominam uso da pastagem e áreas com baixa declividade.

Figura 2 – Solos presentes na bacia hidrográfica do rio Sobrado

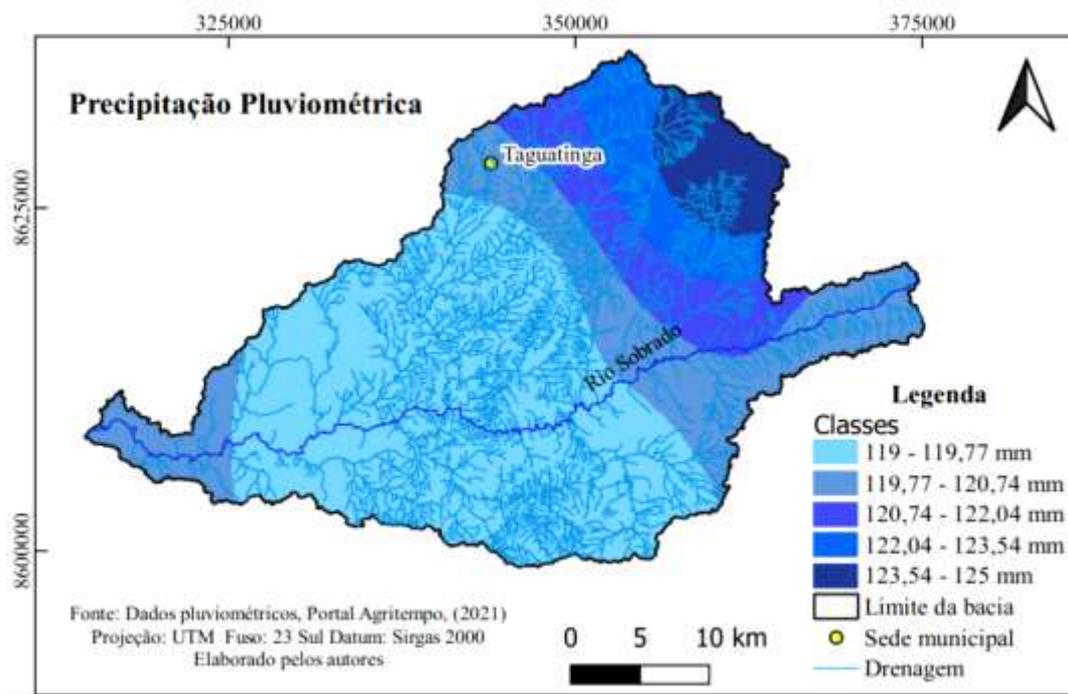


O Nitossolo apresenta textura argilosa ou muito argilosa em sua composição, constitui solos profundos, bem drenados e com média fragilidade, ocupa 8,85% da área da bacia. Já o Gleissolo ocupa 1,60% da área, apresenta fragilidade muito alta, tem, em sua composição, argila, argila-arenosa e areia, compreende solos mal drenados e ocupa geralmente ambientes de várzeas (OLIVEIRA NETO; SILVA, 2006; FONTANA; BALIEIRO, PEREIRA, 2021). O afloramento rochoso ocupa 1,57% da área e possui fragilidade alta.

Em relação aos dados da precipitação pluviométrica média mensal (Figura 3), verificou-se uma pequena variação de 119 mm até 125 mm, sendo adotado o peso 1, nível de fragilidade muito baixa, de acordo com a classificação de Crepani *et al.* (2001).

Na área de estudo, as chuvas ocorrem no período de outubro a abril, enquanto o período de seca compreende o intervalo de maio a setembro. Percebe-se que a parte leste da bacia apresenta maiores níveis de precipitação, e essa diferença não é muito significativa em relação à parte central e oeste, pois a variação numérica equivale a 6 mm.

Figura 3 – Mapa de precipitação pluviométrica média mensal da bacia do rio Sobrado



A declividade é um dos fatores condicionantes na análise da fragilidade ambiental, pois áreas que apresentam declividade acentuada contribuem para o aumento do volume e a velocidade do escoamento superficial e, por consequência, a intensidade dos processos erosivos e diminuição da infiltração de água no solo (CREPANI *et al.*, 2001).

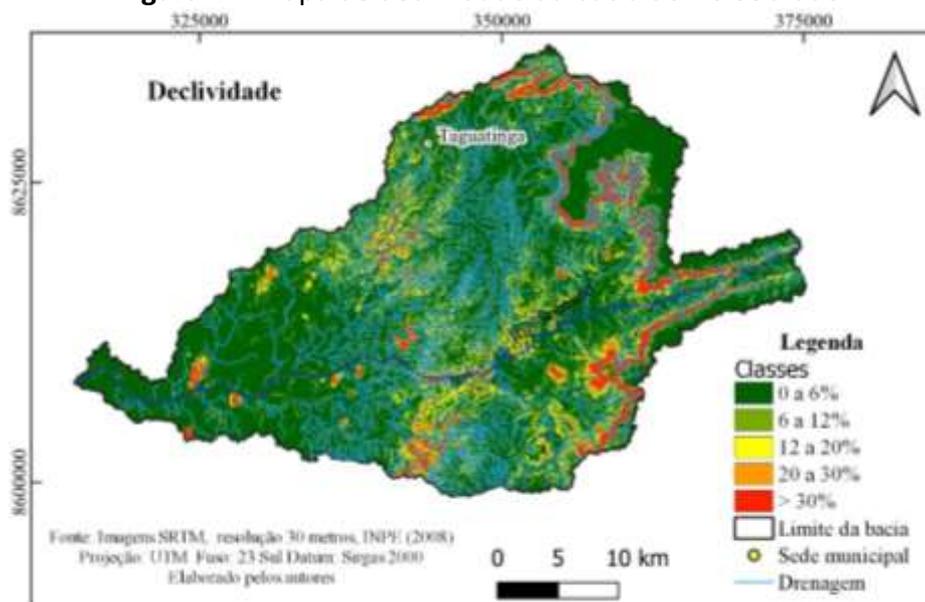
Observou-se o predomínio das áreas planas na área de estudo, ocupando 64,09%, seguida por áreas em que o declive varia de 6 a 12%, equivalente a 19,44% da área (Tabela 2). As áreas com declives mais acentuados estão distribuídas no médio curso da bacia e nas encostas da Serra Geral (Figura 4).

Tabela 2 – Classes de declividade e peso de fragilidade na bacia do rio Sobrado

Declividade	Peso de fragilidade	Área (km ²)	Percentual (%)
0 a 6%	1	707,46	64,09
6 a 12%	2	214,467	19,44
12 a 20%	3	79,268	7,18
20 a 30%	4	39,046	3,54
Acima de 30%	5	63,439	5,75
		1.103,266	100

Fonte: Adaptada de Ross (1994)

Figura 4 – Mapa de declividade da bacia do rio Sobrado



Na área de estudo, predominam áreas com a presença de cobertura vegetal, incluindo Formação Campestre, Formação Florestal e Formação Savânica, que representa 60,56% da área (Figura 5).

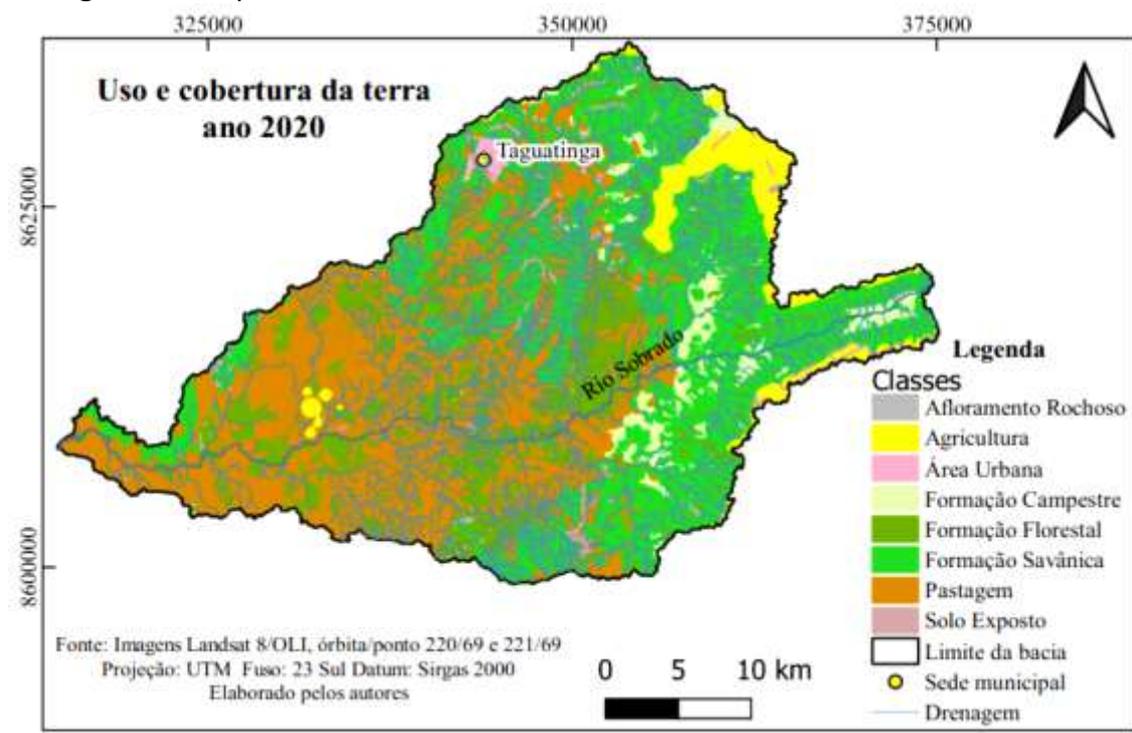
Nas atividades antrópicas, o destaque é para a classe pastagem, que ocupa 32,11%. A agricultura foi identificada em áreas localizadas na chapada da Serra Geral, no espaço compreendido pelos municípios de Luís Eduardo Magalhães e São Desidério, destaques na produção agrícola brasileira, abrangendo 5,48%, em áreas de declividade plana e latossolo vermelho-amarelo. No baixo curso da bacia, identificou-se a presença de áreas com a implantação de pivôs de irrigação de monocultura (Tabela 3).

Tabela 3 – Classes de uso e cobertura da terra e peso de fragilidade na bacia do rio Sobrado (ano 2020)

Uso e cobertura da terra	Peso de fragilidade	Área (km ²)	Percentual (%)
Afloramento Rochoso	5	9,894	0,90
Agricultura	4	60,508	5,48
Área Urbana	5	4,246	0,38
Formação Campestre	2	66,824	6,06
Formação Florestal	1	284,280	25,77
Formação Savânica	2	316,958	28,73
Pastagem	3	354,239	32,11
Solo Exposto	5	6,317	0,57
		1.103,266	100

Fonte: Adaptada de Ross (1994)

Figura 5 – Mapa de uso e cobertura da terra na bacia do rio Sobrado – ano 2020



O solo exposto ocupa uma pequena parte da área da bacia (0,57%), incluindo estradas e áreas sem cobertura vegetal nativa. No âmbito da BHRS, encontra-se a área urbana do município de Taguatinga, representando 0,38%. E 0,90% equivale a áreas identificadas com a presença de afloramentos rochosos. Todas essas áreas apresentam um alto nível de fragilidade.

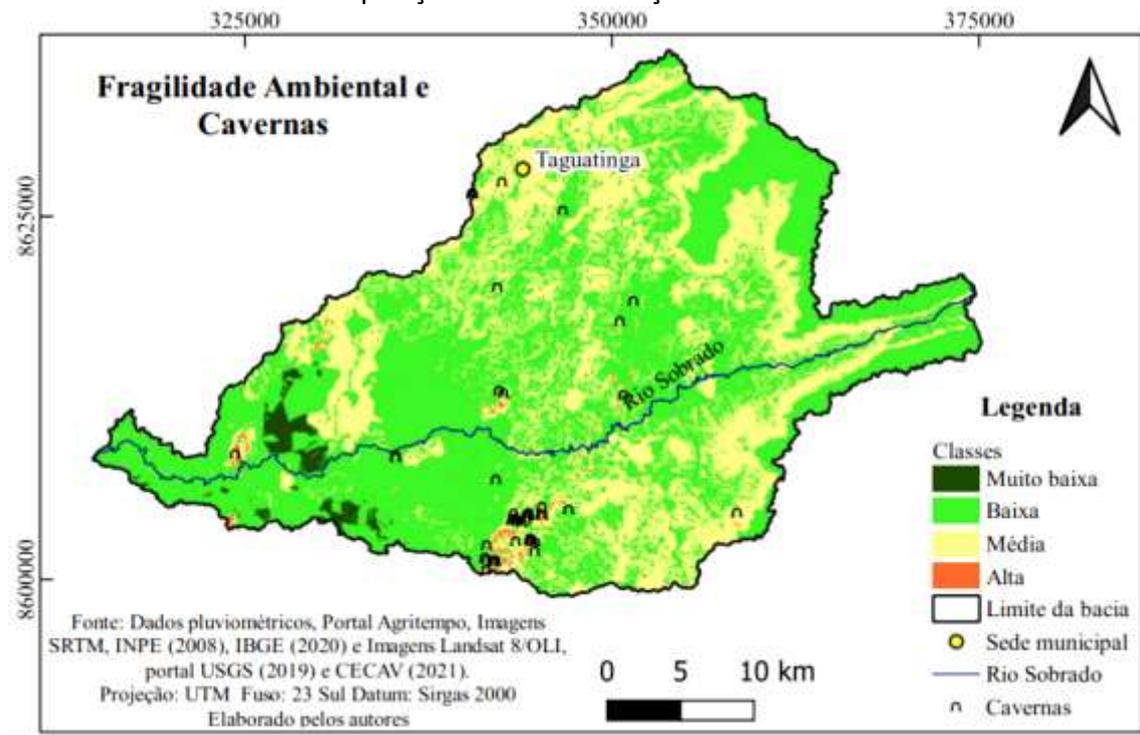
A partir da sobreposição dos dados contendo as variáveis que caracterizam a área de estudo (solos, declividade, precipitação pluviométrica e uso e cobertura da terra), foi possível identificar quatro classes de fragilidade ambiental: 1) Muito Baixa, 2) Baixa, 3) Média e 4) Alta, conforme Figura 6 e descritas na Tabela 4.

Tabela 4 – Fragilidade ambiental e suas respectivas classes e valores de ocupação em km² e % identificadas na bacia do rio Sobrado

Classes	Área (km ²)	Área (%)
Muito Baixa	18,911	1,71
Baixa	692,703	62,79
Média	383,178	34,73
Alta	8,474	0,77
	1.103,266	100

Fonte: Adaptada de Ross (1994)

Figura 6 – Mapa de fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Sobrado e sobreposição com a localização das cavernas



Os dados mostram a presença de 1,71% da área pertencente à classe de fragilidade muito baixa em locais onde se tem a presença de fragmentos da classe Formação Florestal. Silva e Machado (2014) citam que as formações florestais proporcionam maior cobertura do solo e, com isso, minimizam a intensidade e as consequências dos processos erosivos. Cavalcante *et al.* (2022) observaram que a presença da cobertura vegetal auxilia na manutenção dos baixos níveis de fragilidade ambiental em determinadas áreas.

A classe baixa se mostrou predominante na bacia, representando 62,79%. Isso se deve à influência da variável declividade, que apresenta uma área expressiva da classe plano e suave ondulado, além da existência da cobertura vegetal nativa distribuída na área da bacia, equivalente a 60,56%. Barros *et al.* (2019) observaram que a baixa fragilidade ambiental se destacou na bacia hidrográfica do ribeirão Periquito, no estado do Mato Grosso do Sul, em função das áreas de vegetação densa e rala e de áreas de uso da classe pastagem, em condição semelhante aos valores identificados na bacia do rio Sobrado.

Apesar de a classe fragilidade baixa ser abrangente na área de estudo, algumas medidas devem ser realizadas para minimizar os fatores desencadeadores de problemas ambientais. A primeira delas se refere à presença dos solos suscetíveis à ocorrência de processos erosivos (Neossolo Litólico e Quartzarênico) em grande parte da área, os quais apresentam grau de fragilidade muito alta. E a segunda se trata da existência de áreas com declividade superior a 12%, pois é um fator limitante para a execução de atividades como agricultura mecanizada e, portanto, identifica áreas restritas para essa prática e indica a manutenção da cobertura vegetal nativa.

A existência da classe de fragilidade média (34,73%) na bacia é decorrente das formas de uso da terra e cobertura vegetal, porém esse valor é incrementado pela alta fragilidade do tipo de solo (Neossolo Litólico e Quartzarênico), predominantes na bacia, e as áreas de relevo acentuado e maiores altitudes, incluindo as áreas de encostas da Serra Geral.

A classe de fragilidade alta ocupa uma pequena área, 0,77%, destacando-se nas áreas onde estão presentes os afloramentos rochosos, considerada como áreas não vegetadas e mais suscetíveis à erosão, e a declividade acentuada contribui para identificar esse nível de fragilidade.

Ao realizar a sobreposição da localização das cavernas presentes na bacia do rio Sobrado com o mapa de fragilidade (Figura 6), foi possível observar que, de um total de 51 cavernas, 17 estão distribuídas na classe baixa, 16 na classe média e 18 na classe de alta fragilidade ambiental.

A combinação das classes referentes à declividade, tipo de solo e o uso da terra contribuíram para a identificação da classe de fragilidade média e alta, sendo as áreas situadas na proximidade da localização das cavernas na área de estudo. O padrão verificado de ocupação das terras destaca a necessidade de planejamento da bacia como um todo, pois a substituição de áreas de cobertura vegetal nativa por pastagem promove desequilíbrio no sistema.

Além de se tratar de uma importante fonte de recursos hídricos, a BHRS está inserida em um ambiente cárstico. Esses ambientes estão cada vez mais pressionados pelas atividades humanas, resultando efeitos negativos acima e abaixo do solo, como o

desmatamento acompanhado pelas mudanças no uso da terra, que reflete prejuízos como perda de biota e alteração na dinâmica dos recursos hídricos (WILLIAMS, 1993; CALÒ; PARISE, 2006). A prática da pecuária pode contribuir para erosão do solo e destruição do epicarste (PARISE; GUNN, 2007; MÓGA *et al.*, 2017).

A manutenção da cobertura vegetal nativa nas áreas entorno das cavernas tem uma função ecossistêmica essencial para evitar processos erosivos e manter o equilíbrio do sistema hidrológico (FENG *et al.*, 2021).

A BHRS integra a área indicada como prioritária para conservação do Patrimônio Espeleológico brasileiro, porém, ainda não foi contemplada por políticas ambientais no tocante à criação de unidades de conservação e carece de ações de planejamento voltadas para a conservação dessas áreas. Uma informação relevante é que dados divulgados pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), em 2021, mostram que apenas 33% das cavernas no Brasil registradas no CANIE (Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas) estão localizadas em áreas protegidas, e que poucas unidades de conservação foram criadas com o propósito de proteger o Patrimônio Espeleológico (SOUZA; AULER, 2018; CECAV, 2022).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A bacia do rio Sobrado possui, em sua abrangência, uma ocupação de 37,97% equivalente às áreas antropizadas (agricultura, área urbana e pastagem), entretanto, uma área que totaliza 60,56% ainda engloba cobertura vegetal nativa, representada por Formação Florestal, Formação Savânica e Formação Campestre, que contribuem para diminuir o grau de fragilidade ambiental em relação à erosão.

A predominância das classes de declividade, variando de 0 a 12%, propiciam a expansão das atividades antrópicas. Nessa área, destaca-se a pastagem. Os tipos de solos contribuíram para a identificação do nível de fragilidade média, juntamente com a presença das classes de pastagem e área urbana.

A combinação de fatores (declividade, solos, precipitação e uso e cobertura da terra) evidenciou os níveis de fragilidade da bacia do rio Sobrado. Desse modo, por se

tratar de uma área inserida em um ambiente cárstico, caracterizado por sistema ambiental complexo, com presença de diversos elementos relevantes, como cavernas, surgência cárstica e rede de drenagem subterrânea, torna-se imprescindível a utilização das informações geradas por esta pesquisa, a fim de oferecer suporte para o planejamento dessa paisagem e manutenção de sua qualidade ambiental.

É necessário reconhecer que cada sistema ambiental, a partir do arranjo de seus atributos físicos e bióticos, apresenta uma resposta diante da dinâmica e da evolução das formas de uso e ocupação. Por isso, são importantes o planejamento e a gestão que requerem maior proteção ou que possuem maiores restrições.

REFERÊNCIAS

ALVES, L. R. F.; MORAIS, F. de. Análise do uso e ocupação do solo no entorno do rio Azuis – Tocantins. **Os desafios da Geografia Física na fronteira do conhecimento**, v. 1, p. 7353-7365, 2017.

AMARAL, R. do; ROSS, J. L. S. As unidades ecodinâmicas na análise da fragilidade ambiental do Parque Estadual do Morro do Diabo e Entorno, Teodoro Sampaio/SP. **GEOUSP – Espaço e Tempo**, São Paulo, n. 26, p. 59-78, 2009.

BACANI, V. M. *et al.* Sensoriamento remoto e SIG aplicados à avaliação da fragilidade ambiental de bacia hidrográfica. **Mercator**, Fortaleza, v. 14, n. 2, p. 119-135, maio/ago. 2015.

BARROS, M. H. de S. *et al.* Geotecnologias aplicadas à análise da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do ribeirão Periquito (MS). **Ciência Geográfica**, Bauru, ano XXIII, n. 1, jan./dez. 2019.

CALÒ, F.; PARISE, M. Evaluating the human disturbance to karst environments in Southern Italy. **Acta Carsologica**, v. 35, n. 2, p. 47-56, 2006.

CAVALCANTE, J. da C. *et al.* Fragilidade ambiental potencial e emergente da bacia do rio Mocajuba – PA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 3, p. 1417-1433, 2022.

CAVALCANTI, L. C. de S. **Cartografia de paisagens: fundamentos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

CECAV – Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. **Anuário Estatístico do Patrimônio Espeleológico Brasileiro 2021**. 2022. Disponível em:

https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/downloads/Anuario/CECAV_-_Anuario_estatistico_espeleológico_2021.pdf. Acesso em: 22 mar. 2022.

CECAV – Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. **Áreas prioritárias para a conservação do Patrimônio Espeleológico**. 2018. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/Areas_Prioritarias_Patrimonio_Espeleologico_2018.pdf. Acesso em: 1 jun. 2020.

CREPANI, E. *et al.* **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: Inpe, jun. 2001.

FENG, S. *et al.* Forestation does not necessarily reduce soil erosion in a karst watershed in southwestern China. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 45, n. 01, p. 82-97, 2021.

FERREIRA, Z. A.; MORAIS, F. Diagnóstico físico-conservacionista do ambiente cárstico da Bacia do Córrego Cana-Brava, Aurora do Tocantins (TO, Brasil). **Caderno de Geografia**, v. 27, n. 50, p. 244-278, 2017.

FONTANA, A.; BALIEIRO, F. de C.; PEREIRA, M. G. **Pôster Classes de Solos do Brasil: Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil>. Acesso em: 3 mar. 2021.

GONÇALVES, G. G. G. *et al.* Determinação da fragilidade ambiental de bacias hidrográficas. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 4, p. 797-808, out./dez. 2011.

HARDT, R. Sistema cárstico e impactos antrópicos: considerações sobre o manejo. *In*: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1., 2008, Rio Claro - SP. **Anais [...]**. São Paulo: UNESP, 2008. p. 1295-1309.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Informações ambientais: pedologia e vegetação**. 2020. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>. Acesso em: 25 fev. 2021.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Topodata: banco de dados geomorfométricos do Brasil. Variáveis geomorfométricas locais**. São José dos Campos, 2008. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>. Acesso em: 30 jun. 2020.

JARBAS, T. *et al.* **Cambissolos**. 2006. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma_caatinga/arvore/CONT000g798rt3o02wx5ok0wtedt3n5ubswf.html. Acesso em: 25 mar. 2021.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

LIANG, B. *et al.* Analysing and simulating spatial patterns of crop yield in Guizhou Province based on artificial neural network. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 45, n. 1, p. 33-52, 2021.

LUO, Y. *et al.* Modeling soil erosion between 1985 and 2014 in three watersheds on the carbonate-rock dominated Guizhou Plateau, SW China, using WaTEM/SEDEM. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 45, n. 1, p. 53-81, 2021.

MIGUEL, A. E. S.; MEDEIROS, R. B.; GOMES, W. M. Emprego do Sensoriamento Remoto e Sistema de Informação Geográfica na avaliação da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do ribeirão São Pedro, Santa Rita do Pardo/MS. **Revista Cerrados**, Montes Claros, v. 16, n. 2, p. 31-50, ago./dez. 2018.

MÓGA, J. *et al.* Changes of the karst landscape and epikarst system in the area of the Tapolca karst terrains, North-West Balaton Highlands, Hungary. **Forum Geografic**, v. XVI, n. 1, p. 12-25, 2017.

OLIVEIRA NETO, M. B. de; SILVA, M. S. L. da. **Gleissolos**, 2006. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambucana/arvore/CONT000gt7eon7k02wx7ha087apz2kfhpkns.html#. Acesso em: 25 mar. 2021.

PACHECO, F. F.; CASTRO, J. F. M. A fragilidade ambiental como instrumento de planejamento ambiental em unidades de conservação: o caso da APA Serra da Piedade-MG. **Entre Lugar**, v. 13, n. 25, p. 117-152, 2022.

PARISE, M.; GUNN, J. Natural and Anthropogenic Hazards in Karst Areas: Recognition, Analysis and Mitigation. **Geological Society**, London, Special Publications, n. 279, p. 1-3, 2007.

PILÓ, L. B.; AULER, A. S. **Introdução à Espeleologia**. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/336831313_Introducao_a_espeleologia/citation/download. Acesso em: 23 abr. 2020.

PILÓ, L. B.; AULER, A. Introdução à Espeleologia. *In*: ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **IV Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. 2013. p. 7-24. Disponível em: <https://www.terrabrasil.org.br/ecotecadigital/index.php/estantes/espeleologia/2196-iv-curso-de-espeleologia-e-licenciamento-ambiental>. Acesso em: 1 dez. 2020.

PORTAL AGRITEMPO – Sistema de Monitoramento Agrometeorológico. **Dados imagens TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)**. 2021. Disponível em: <https://www.agritempo.gov.br/agritempo/index.jsp>. Acesso em: 16 jan. 2022.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 8, p. 63-74, 1994.

ROSS, J. L. S. **Ecogeografia do Brasil**: subsídios para o planejamento ambiental. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

ROSS, J. L. S. Geomorfologia aplicada aos EIAs-RIMAs. *In*: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da (org.). **Geomorfologia e meio ambiente**. 9. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. p. 291-336.

SANTOS, R. F. dos. **Planejamento ambiental**: teoria e prática. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SILVA, V. C. B.; MACHADO, P. S. SIG na análise ambiental: susceptibilidade erosiva da bacia hidrográfica do córrego Mutuca, Nova Lima – Minas Gerais. **Revista de Geografia**, v. 31, n. 2, p. 66-87, 2014.

SEPLAN – Secretaria do Planejamento e da Modernização da Gestão Pública. **Atlas do Tocantins**: subsídios ao planejamento da gestão territorial. 6. ed. Palmas: SEPLAN, 2012. Disponível em: http://zoneamento.sefaz.to.gov.br/TO_AtlasTocantins2012_1/Atlas_do_Tocantins_2012.pdf. Acesso em: 5 maio 2020.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. **Latossolos**. 2006. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_96_10112005101956.html. Acesso em: 25 mar. 2021.

SOUZA, T. A. R.; AULER, A. S. (org.). **O Carste de Vazante-Paracatu-Unai**: revelando importâncias, recomendando refúgios. Belo Horizonte: Carste, Ciência e Meio Ambiente, 2018.

SPÖRL, C.; ROSS, J. L. S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. **Revista GEOUSP – Espaço e Tempo**, São Paulo, n. 15, p. 39-49, 2004.

TOCANTINS. Secretaria de Recursos Hídricos e Meio Ambiente. **Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Palma**. 2007. Disponível em: <https://central3.to.gov.br/arquivo/269425/>. Acesso em: 25 jun. 2020.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977.

TROMBETA, L. R. *et al.* Análise da fragilidade potencial e emergente do relevo na unidade de gerenciamento de recursos hídricos Pontal do Paranapanema, São Paulo, Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, n. 36, v. especial, p. 159-173, 2014.

USGS – *United States Geological Survey*. **Landsat Collection 1**. 2019. Disponível em: https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-collection-1?qt-science_support_page_related_con=1#qt-science_support_page_related_con. Acesso em: 5 ago. 2021.

VALLE, I. C.; FRANCELINO, M. R.; PINHEIRO, H. S. K. Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia do rio Aldeia Velha, RJ. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 295-308, 2016.

VIEIRA, R. dos S. *et al.* Fragilidade ambiental emergente da bacia hidrográfica do rio Santa Maria do Doce - ES, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p. 1253-1267, 2021.

WILLIAMS, P. W. Karst Terrains, Environmental Changes and Human Impact: Cremlingen-Destedt, Germany. **Catena Supplement**, n. 25, 1993.

ZARONI, M. J.; SANTOS, H. G. dos. **Cambissolos**. 2006. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_8_2_212200611538.html. Acesso em: 25 mar. 2021.

Heloísa Rodrigues Nascimento – Doutoranda em Ciências do Ambiente pela Universidade Federal do Tocantins. Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO), *Campus* Palmas, Tocantins, Brasil.

Fernando de Moraes – Doutor em Evolução Crustal e Recursos Naturais pela Universidade Federal de Ouro Preto. Pós-doutorado pela Universidad de Zaragoza, Espanha. Professor Associado IV da Universidade Federal do Tocantins (UFT), *Campus* de Porto Nacional, Tocantins, Brasil.

Recebido para publicação em 16 de dezembro de 2022.

Aceito para publicação em 03 de abril de 2023.

Publicado em 01 de maio de 2023.