



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Uso de geotecnologia para estudo de vulnerabilidade Ambiental na bacia hidrográfica do rio Tarumã-Mirim em Manaus, Amazonas

Luciomar da Silva Almeida Filho¹, João Cândido André da Silva Neto²

¹Mestre em Geografia pela Universidade Federal do Amazonas, Estudante de Doutorado na Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT/UNESP), rua Roberto Simonsen, 305 - Centro Educacional, CEP 19060-900, Presidente Prudente/SP, (18) 3229-5300, luciomar.almeida13@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-4924-6058>); ²Doutor em Geografia, Professor Adjunto na Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Avenida General Rodrigo Otávio, s/n, Petrópolis, CEP 69067005, Manaus/AM, (92) 33433461, joaocandido@ufam.edu.br (<https://orcid.org/0000-0001-7313-9837>)

Artigo recebido em 10/07/2024 e aceito em 30/03/2025

RESUMO

As mudanças ambientais têm exigido abordagens metodológicas que permitam uma visão holística dos problemas da sociedade urbano-industrial relacionados ao ambiente. Devido a isso, as geotecnologias se tornaram imprescindíveis para o conhecimento da dinâmica dos ecossistemas e das sociedades em todas as escalas. O objetivo desse artigo é identificar os graus de vulnerabilidade ambiental na bacia hidrográfica do rio Tarumã-Mirim a partir do emprego do método AHP e da álgebra de mapas. Os resultados evidenciam que a variável uso e cobertura da terra exerce influência predominante na definição da vulnerabilidade ambiental da bacia do Tarumã-Mirim. A análise espacial revelou uma variação dos graus de vulnerabilidade ambiental, oscilando entre fraco e alto. A principal conclusão do estudo indica que, embora a presença de cobertura vegetal preservada contribua para a redução da vulnerabilidade, essa condição, por si só, não é suficiente para garantir baixos níveis de risco ambiental. Fatores como relevo e tipo de solo também desempenham papel significativo, sendo indispensável sua consideração nos processos de zoneamento e na elaboração da carta de vulnerabilidade ambiental da bacia.

Palavras-chave: Análise multicritério, Meio Ambiente, Amazônia, AHP.

Using geotechnology to study environmental vulnerability in the Tarumã-Mirim river basin in Manaus, Amazonas, Brazil

ABSTRACT

Environmental changes have required methodological approaches that allow for a holistic view of urban-industrial society's problems related to the environment. As a result, geotechnologies have become indispensable for understanding the dynamics of ecosystems and societies at all scales. The objective of this article is to identify the degrees of environmental vulnerability in the Tarumã-Mirim river basin using the AHP method and map algebra. The results show that the variable land use and land cover has a predominant influence on the definition of environmental vulnerability in the Tarumã-Mirim basin. Spatial analysis revealed a variation in the degrees of environmental vulnerability, ranging from low to high. The main conclusion of the study indicates that, although the presence of preserved vegetation cover contributes to reducing vulnerability, this condition alone is not sufficient to guarantee low levels of environmental risk. Factors such as relief and soil type also play a significant role and must be taken into account in zoning processes and in the preparation of the basin's environmental vulnerability map.

Keywords: Multicriteria analysis, Environment, Amazon rainforest, AHP.

Introdução

O conhecimento da relação sistêmica dos elementos da paisagem por meio da cartografia e de técnicas de representação espacial possibilitam o diagnóstico e o levantamento de informações sobre áreas suscetíveis a riscos socioambientais (Rizato, et al., 2023).

Conforme nos aprofundamos na compreensão dos problemas da nossa época mais fica claro que eles não podem ser entendidos isoladamente, a preocupação com o meio ambiente, extinção de espécies, redução da desigualdade, problemas macroeconômicos, todos estão

interligados e interdependentes, são faces da mesma crise, uma crise de percepção (Capra, 1996).

Tricart (1977) escreve que o conceito de sistema é o melhor instrumento lógico para se pensar os problemas do meio ambiente uma vez que possibilita um posicionamento dialético capaz de criar uma visão de conjunto e melhorar as reflexões sobre o ambiente, principalmente porque o meio ambiente é um conjunto de elementos vivos e não vivos com dinâmica própria e mutuamente dependentes.

O avanço das atividades econômicas, com base em um modelo de produção e consumo em massa, tem sujeitado o ambiente natural a pressões de diversos agentes que por vezes não consideram os impactos negativos a longo prazo e a capacidade dos ecossistemas de se regenerarem ante a alterações do equilíbrio dinâmico dos sistemas que o integram (Silva et al., 2021), isso se torna ainda mais significativo se considerarmos grandes extensões de áreas florestadas como a Amazônia.

Cada vez mais as intervenções das sociedades na superfície da Terra têm ganhado área e se tornado mais extensas. Diante desse contexto as imagens de satélites aparecem como ferramenta indispensável, pois, proporcionam uma visão de conjunto e de dinâmica da superfície Terrestre. Seu emprego permite observar impactos de fenômenos naturais e humanos no espaço ao longo do tempo reforçando o potencial dos produtos de sensoriamento remoto e a integração das geotecnologias na análise dos problemas socioambientais (Florenzano, 2011).

O estudo dos problemas em torno do meio ambiente parte do entendimento de que a gestão adequada do território pode oferecer caminhos para uma relação entre sociedade e natureza menos predatória e com aproveitamento mais eficaz da potencialidade da paisagem.

A metodologia proposta por Crepani et al., (1996; 2001; 2008) permite uma visão holística da paisagem pautada nos produtos de sensoriamento remoto para subsidiar o zoneamento ecológico-econômico principalmente na Amazônia. Dessa forma, a metodologia permite que sejam constantemente renovadas as aplicações conforme novos produtos orbitais são disponibilizados.

Estudos que utilizam a metodologia de Crepani et al. (1996, 2001) com a finalidade de integrar a análise ambiental ao tema da vulnerabilidade a perda de solos incluem os de Lopes & Saldanha 2016; Cruz et al., 2016; Santos

& Martins, 2018; Weiss & Pippi, 2019; Cruz & Moreira, 2022, entre outros.

O uso das geotecnologias implica considerar metodologias capazes de trazer algum contato com o processo decisório, que pode ser entendido como o encadeamento de ações que tragam a possibilidade de escolha por um ou outro direcionamento em um contexto em que há várias opções existentes, com a finalidade de criar segurança para evitar resultados desagradáveis (Fitz, 2008).

Descrever e sistematizar a análise de fatores ambientais e antrópicos de maneira lógica e estruturada pode ser feita por meio de técnicas que ponderem do jeito mais adequado assuntos de ordem técnica, econômica e ambiental.

Um dos caminhos é dado pelo método *Analytic Hierarchy Process (AHP)* que serve de suporte a tomada de decisão quando se envolve problemas complexos e busca-se expressar a importância relativa dos elementos do processo por meio de uma hierarquia (Schmidt & Barbosa, 2016).

Sendo assim, o objetivo deste artigo é identificar os graus de vulnerabilidade ambiental na bacia hidrográfica do rio Tarumã-Mirim por meio da relação entre morfogênese e pedogênese a partir do emprego da análise multicritério e da álgebra de mapas.

Entender as características físicas e ambientais da bacia do Tarumã-Mirim vai para além de uma lacuna existente. É importante porque a bacia está inserida em área protegida pelo Estado e mesmo com o aparato legal ocorre o avanço da ocupação humana para atividades econômicas, ressaltando a importância de um zoneamento ecológico-econômico para o Amazonas e planos de manejo para as unidades de conservação (UC) do estado.

Área de estudo

A bacia hidrográfica do Tarumã-Mirim está inscrita no município de Manaus e se localiza a oeste da cidade (Figura 1), corresponde à bacia do rio de mesmo nome que é um afluente da margem esquerda do Rio Negro, possui uma área de aproximadamente 495,65 km² segundo dados da Agência Nacional de Águas (ANA, 2019).

A bacia está sobre a formação Alter do chão, datada do cretáceo, formada por depósitos continentais e marinhos é composta por argilitos, folhelhos, siltitos, arenitos e conglomerados

siliciclásticos vermelhos, com rochas que podem atingir profundidade de 1.200 metros. Na geologia da área de estudo também ocorre depósitos de terraços aluvionares, datados do pleistoceno, compostos por siltes argilosos/arenosos, argilas sílticas/arenosas e areias argilosas/sílticas (Silva & Bonotto, 2000; CPRM, 2016; Miranda, 2017).

O clima é equatorial quente super-úmido, com temperaturas médias sempre acima dos 18 °C ao longo de todo o ano, a precipitação pluvial acumulada anual varia em torno dos 2.362,4 mm,

com temperatura média variando entre 24,0 °C e 32,3 °C, a umidade relativa do ar média varia ao longo do ano de 74 a 86% de acordo com informações do Instituto Brasileiro de geografia e Estatística e o Instituto Nacional de Meteorologia (IBGE, 2002; INMET, 2020).

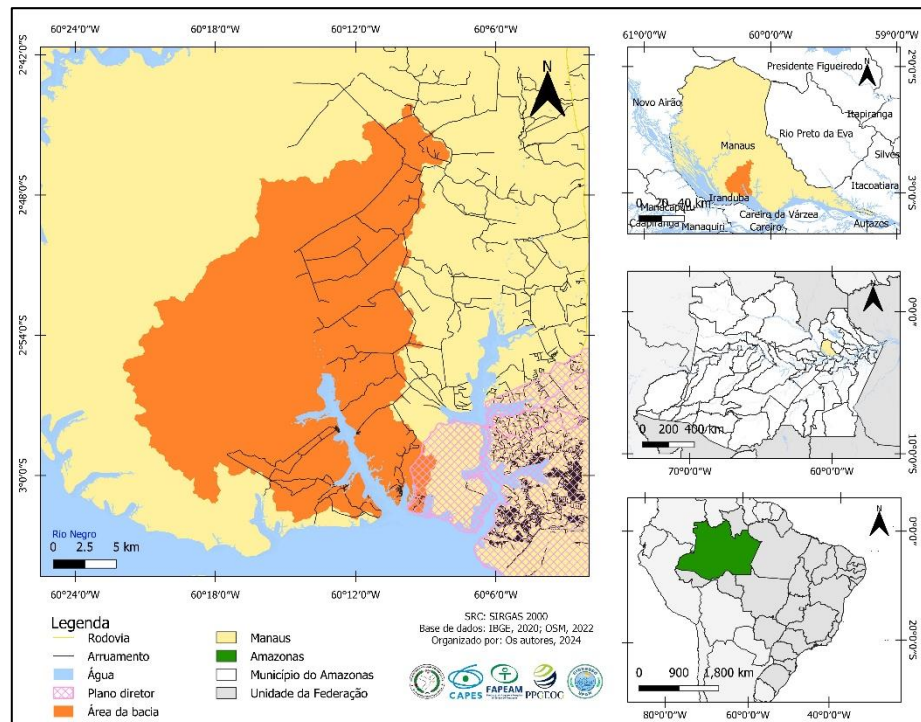


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do rio Tarumã-Mirim, Manaus - AM

De acordo com dados de informações ambientais do IBGE (2010) os solos da bacia são do tipo latossolo amarelo distrófico típico, caracterizados por serem muito argilosos que ocorrem em relevo suave ondulado, e espodossolo humilúvico hidroperepesso, caracterizados por apresentarem textura arenosa desde a superfície até uma profundidade superior a 100 cm. A área se localiza no planalto do Uatumã-Jari, o relevo da região da bacia caracteriza-se por modelados de dissecação homogêneos onde predominam colinas e interflúvios tabulares e padrão de drenagem dendrítico, quanto às formas de topo o relevo da bacia é de feições de rampas suavemente inclinadas e lombadas, vales rasos e vertentes de pequena e média declividade. Ocorrem vegetação do tipo Floresta Ombrófila densa de terras baixas, que ocupam os platôs e os vales de sedimentação

terciária fora das várzeas em terrenos com altitude menor que 100 metros onde predominam árvores grandes e emergentes, a vegetação secundária da bacia se localiza nas margens dos rios.

A análise do contexto fundiário mostrou que a bacia está sobreposta com três unidades de conservação, sendo uma estadual: Área de Proteção Ambiental (APA) Margem esquerda do Rio Negro setor Tarumã-Açu/Tarumã-Mirim; e duas municipais: Reserva de Desenvolvimento Sustentável (RDS) do Tupé e Puranga Conquista. Além das áreas protegidas, a bacia comporta um mosaico de imóveis rurais, a maioria compreende áreas assentadas do projeto de Assentamento Tarumã-Mirim do Instituto Nacional Colonização e Reforma Agrária, conforme o mapa da Figura 2 (ICMBio, 2023; INCRA, 2017).

Material e métodos

O percurso metodológico da análise da vulnerabilidade ambiental na bacia do Tarumã-Mirim parte da proposta metodológica de Crepani et al. (2001) que foi elaborada fundamentada no conceito de Ecodinâmica de Tricart (1977) e no potencial do uso de produtos advindos do sensoriamento remoto nos estudos da paisagem.

As etapas da metodologia consistem em obter/interpretar informações temáticas disponíveis a partir do sensoriamento remoto associados a dados de pluviosidade para compor o que os autores chamam de planos de informações temáticas georreferenciadas (PI), a intersecção

destes definem os mapas de unidades territoriais básicas (UTB) que são a integração das unidades de paisagem natural com os polígonos de intervenção humana (Crepani, et al., 2001).

Para Tricart (1977) a morfogênese é a componente mais importante da dinâmica da superfície terrestre porque são seus processos que geram instabilidade da superfície. A dinâmica do meio ambiente dos ecossistemas é fundamental para a conservação dos recursos ecológicos, uma unidade ecodinâmica representa a dinâmica do meio que repercute de forma mais intensa ou não sobre os seres vivos.

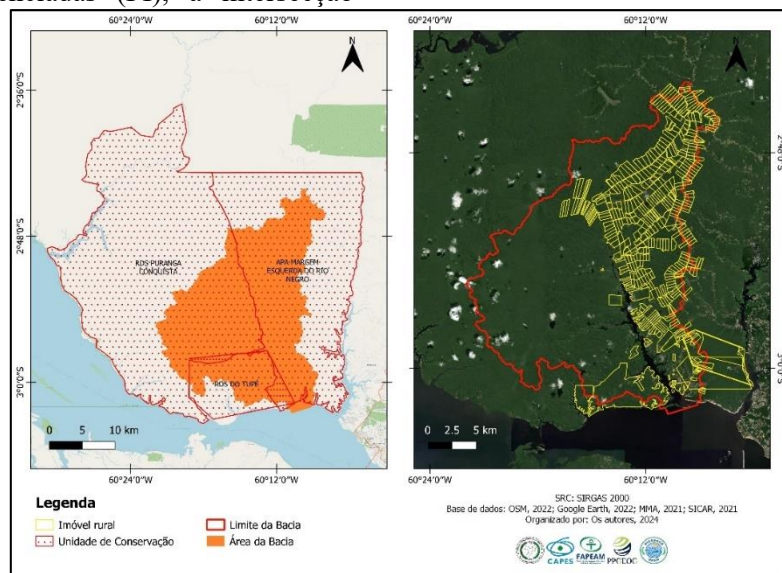


Figura 2. Contexto fundiário da bacia hidrográfica do rio Tarumã-Mirim

Assim, a vulnerabilidade é definida, conforme a Tabela 1, de maneira relativa e empírica com base em informações do meio físico e de uso da terra que criam condições que favorecem a perda do solo, levando em conta os processos de morfogênese e pedogênese para categorizar o grau de vulnerabilidade em uma escala de 0 a 3, valores que representam os três tipos de meios morfodinâmicos de Tricart (1977).

Tabela 1. Avaliação da estabilidade das categorias morfodinâmicas. Fonte: Crepani, et al., 2001

Categoria morfodinâmica	Relação pedogênese/morfogênese	Valor
Estável	Prevalece a pedogênese	1
Intermediária	Equilíbrio Pedogênese/morfogênese	2
Instável	Prevalece a morfogênese	3

Crepani et al. (2001) buscaram estabelecer uma maior variedade de categorias morfodinâmicas para construir uma escala de vulnerabilidade para situações de ocorrência natural, ou seja, sem a intervenção humana. O modelo proposto contempla 21 classes de vulnerabilidade a perda do solo que perpassam valores de 1 a 3, de modo que as cores quentes são associadas a emergências e as cores frias a situações de tranquilidade.

Para possibilitar aplicação do método AHP os pesos atribuídos foram adequados para uma escala de 0 a 1, de acordo com Silva Neto (2013) (Tabela 2).

A ideia geral do modelo é que quanto mais próximo de 1 (0) mais estável é a unidade de paisagem prevalecendo processos de formação do solo e quanto mais próximo de 3 (1), mais

vulnerável é a unidade de paisagem predominando processos erosivos que modificam as formas do relevo, assim, quando há o aumento da vulnerabilidade ocorre a diminuição da estabilidade.

O modelo é aplicado individualmente para cada tema que compõe a unidade territorial e ao final para situar a unidade da paisagem na escala de vulnerabilidade é calculada uma média aritmética dos valores individuais por meio da equação empírica:

$$V = \frac{(G + R + S + Vg + C)}{5} \quad (1)$$

Onde:

V = vulnerabilidade

G = vulnerabilidade da geologia

R = vulnerabilidade do relevo

S = vulnerabilidade dos solos

Vg = vulnerabilidade da vegetação ou uso e cobertura da terra

C = vulnerabilidade para o tema clima

Tabela 2. Escala de vulnerabilidade das Unidades territoriais básicas

Unidade de paisagem	Escala peso 3 Crepani <i>et al.</i> (1996)	Escala peso 1 (Silva Neto, 2013)	Vulnerabilidade da paisagem à perda de solos
U1	3,0	1,00	Muito forte
U2	2,9	0,95	
U3	2,8	0,90	
U4	2,7	0,85	
U5	2,6	0,80	
U6	2,5	0,75	Forte
U7	2,4	0,70	
U8	2,3	0,65	
U9	2,2	0,60	
U10	2,1	0,55	Moderada
U11	2,0	0,50	
U12	1,9	0,45	
U13	1,8	0,40	
U14	1,7	0,35	
U15	1,6	0,30	Fraca
U16	1,5	0,25	
U17	1,4	0,20	
U18	1,3	0,15	
U19	1,2	0,10	Muito fraca
U20	1,1	0,05	
U21	1,0	0,00	

Crepani, et al. (2001) ao descreverem como cada variável vai influenciar no conjunto da análise colocam que ao considerar a geologia estamos tratando da evolução geológica do espaço onde a unidade se encontra e do grau de coesão das rochas relacionados ao processo de denudação (intemperismo + erosão), nas unidades litológicas pouco coesas prevalecem processos de morfogênese, por outro lado, nas rochas mais coesas prevalecem processos de formação de solos. O relevo vai quantificar a energia potencial para o escoamento superficial da água no sistema, são considerados informações referentes a declividade, amplitude do relevo e graus de dissecação, baixos valores de inclinação indicam predomínio de processos pedogenéticos. Os solos funcionam como régua na escala gradativa da ecodinâmica

porque a maturidade dos solos é determinada pelo balanço morfogênese/pedogênese, com isso temos que solos mais maduros indicam prevalência de pedogênese, solos mais jovens indicam a atuação de processos erosivos formadores do relevo. Ao abordar o plano de informação da cobertura da terra o principal indicador nessa camada se refere a cobertura vegetal porque trata da defesa da unidade da paisagem contra processos erosivos, ambientes onde a vegetação é mais densa favorecem o desenvolvimento e maturação do solo, o contrário, onde a densidade da vegetação é menor a morfogênese é predominante. Por fim, informações relacionadas a pluviosidade definem de forma empírica o grau de risco a que uma unidade da paisagem está submetida sendo o oposto da cobertura da terra. Nesse tema é importante conhecer a intensidade e a duração do período

chuvoso. Isso representa o potencial da chuva em transformar-se em energia cinética responsável pela erosividade, assim podemos afirmar que quanto maior é a intensidade pluviométrica, mais erosiva a chuva se torna.

Mapeamento da vulnerabilidade

A delimitação da bacia foi obtida por meio das informações do território disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2019). A elaboração do mapa de vulnerabilidade ambiental foi realizada a partir de álgebra de mapas, com os planos de informações temáticos ponderados e hierarquizados: uso e cobertura da terra,

declividade, pedologia, geologia e precipitação pluviométrica, de acordo com o fluxograma da Figura 3.

Para a variável uso e cobertura da terra (Vg), foram utilizados dados do projeto MAPBIOMAS da coleção 8 do ano de 2022, os dados são produzidos por meio da classificação pixel a pixel de imagens dos satélites Landsat, os dados possuem resolução espacial de 30 metros (MAPBIOMAS, 2023).

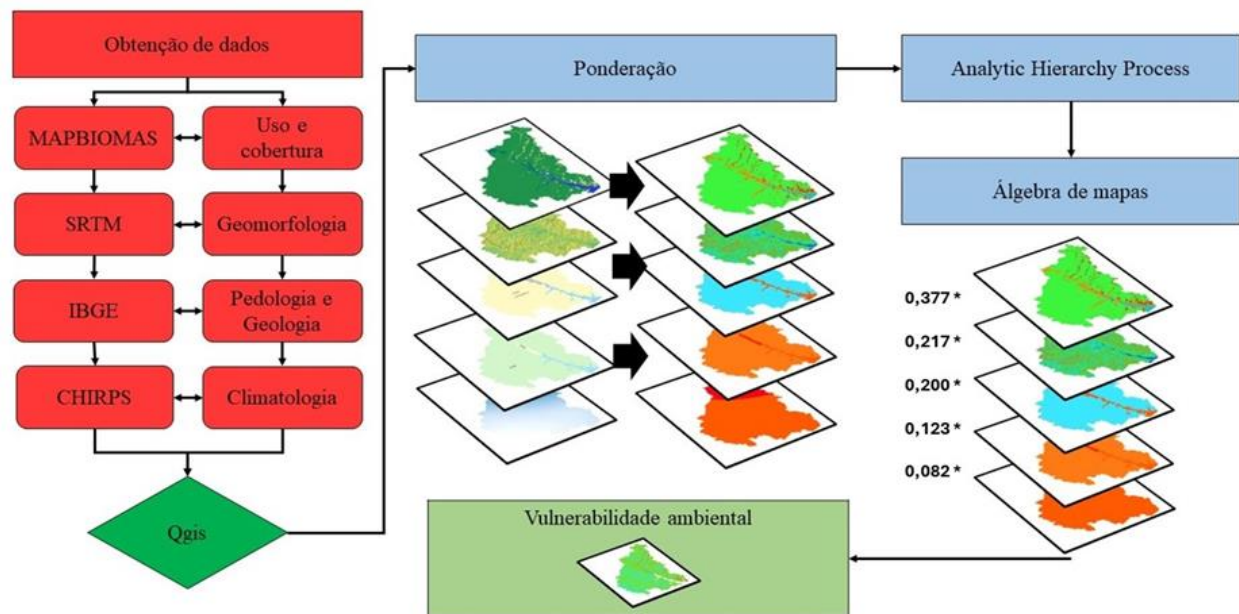


Figura 3. Percurso metodológico para elaboração da vulnerabilidade ambiental no rio Tarumã-Mirim

A análise temporal da cobertura da terra para verificar as mudanças ocorridas entre 1985 e 2022 foi realizada a partir da reclassificação das classes de uso do projeto MAPBIOMAS para definir as classes cobertura natural (1), uso antrópico (2) e água (3). Assim, as classes do mapeamento do projeto referente a Floresta, Floresta alagável, campo alagado e formação campestre foram convertidas para o valor 1 de uso, as classes pastagem, área urbana e lavoura temporárias foram reclassificadas para a classe 2 de uso e Água para a classe 3 de cobertura da terra.

Em seguida, foi realizada a classificação cruzada no plugin *Semi-Automatic Classification* do Qgis (Congedo, 2021), onde os valores dos pixels de um raster (cobertura da terra em 2022) são comparados com os valores dos pixels de um raster

de referência (cobertura da terra em 1985), isso permite verificar a área para combinação das classes e onde uma foi convertida em outra a partir da assimilação da Tabela 3.

Tabela 3. Classificação cruzada das classes MAPBIOMAS entre 1985 e 2022 para o rio Tarumã-Mirim

Uso (1985)	Uso (2022)	Classe
1	1	Preservado
2	1	Regenerado
3	1	Regenerado
1	2	Desmatado
2	2	Desmatado
3	2	Desmatado
1	3	Água
2	3	Água
3	3	Água

Os dados das componentes solo (S) e geologia (G) foram obtidas por meio do Banco de Dados e Informações Ambientais (BDIA) do IBGE que disponibiliza dados em formato vetorial de recursos naturais do país para os temas geologia, geomorfologia, pedologia e vegetação produzidos pelo IBGE em escala de 1:250.000 através de levantamentos, coletas em expedições de campo, vetorização manual, interpretação visual de imagens de sensores orbitais, entre outros (IBGE, 2023).

Para o tema geomorfologia (R) foi realizado o cálculo da declividade (%) com uso de modelo digital de elevação (MDE) da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 metros (EMBRAPA, 2020).

Para a componente clima (C) foi calculado o índice de erosividade para a área da bacia (Rodrigues, 2015), os dados de precipitação pluvial foram obtidos a partir do projeto *Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station* (CHIRPS), uma iniciativa de cientistas do Centro de Observação e Ciência de Recursos Terrestres (EROS) do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) que tem o objetivo fornecer dados completos de precipitação pluvial global associando estimativas baseadas em satélite, climatologia de precipitação global e observações *in-situ* (Chirps, 2023; Rabelo et al., 2022).

Foram usados dados de precipitação pluvial em escala mensal e anual de 1991 a 2020 para se obter a média climatológica do período, em seguida na calculadora raster do Qgis para cálculo do valor médio de erosividade mensal foi utilizado a equação 2, proposta por Lombardi Neto & Moldenhaer (1992):

$$EI = 67,355 * \left(\frac{r^2}{P} \right)^{0,85} \quad (2)$$

Onde:

EI = média mensal do índice de erosividade em MJ/ha.mm

r = média mensal de precipitação em mm

P = média anual de precipitação em mm

A determinação da erosividade anual (R) é feita a partir do somatório dos valores mensais médios de erosividade (Equação 3), assim:

$$R = \sum EI \quad (3)$$

Onde:

R = erosividade da chuva em MJ/ha.mm/ano

EI = média mensal do índice de erosividade em MJ/ha.mm

Os dados do CHIRPS são disponibilizados em grades de 0,5° x 0,5° próximo ao equador, em termos de resolução espacial isso equivale a aproximadamente 5 km x 5 km, tornando necessário adequação da resolução para 30 metros, para que possa ser realizada a álgebra de mapas.

Para geração de um raster com estimativa de precipitação pluvial com melhor resolução espacial foi utilizado o interpolador Krigagem ordinária, que é baseado na autocorrelação espacial das variáveis regionalizadas desenhada em um semivariograma que representa a variância amostral a partir da distância entre os dados mensurados (Farias et al., 2022) isso possibilita a espacialização do dado por toda a bacia e consequente adequação a grade das demais componentes.

Na interpolação por krigagem as informações no semivariograma são usadas para encontrar os pesos ótimos para serem associados as amostras conhecidas para estimar os dados em pontos desconhecidos, basicamente o interpolador faz uma série de análises de regressão que busca minimizar a variância estimada por meio de um modelo prévio que considera a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço, a krigagem ordinária utiliza a média móvel ou flutuante por toda a área (Landim & Sturaro, 2002). A interpolação foi realizada a partir dos centroides extraídos após a vetorização do raster de erosividade anual (Figura 4).

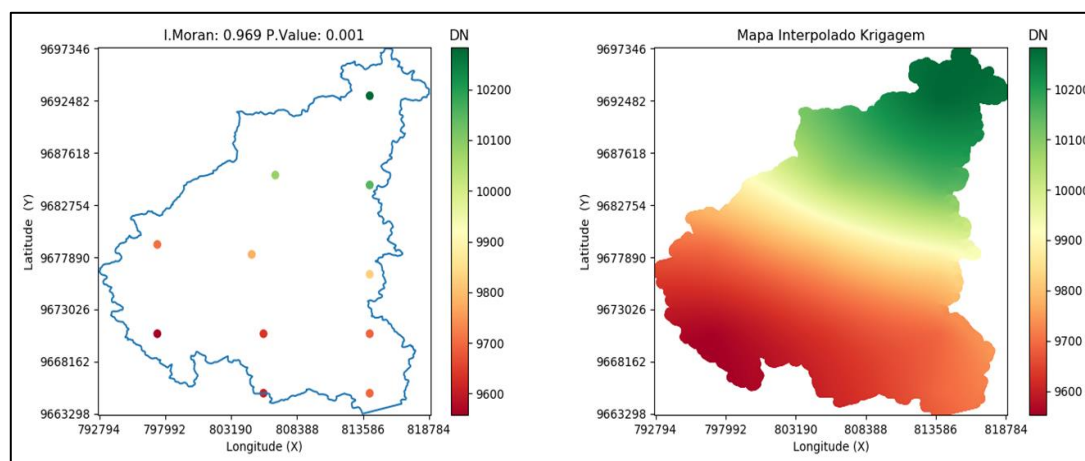


Figura 4. Interpolação dos dados CHIRPS para a bacia do Tarumã-Mirim

Os procedimentos foram realizados utilizando o software Qgis 3.28.13 Firenze, após a organização dos dados temáticos estes foram ponderados tomando como base os pesos da escala de vulnerabilidade a perda de solo em uma escala de 0 a 1 (Tabela 4), dados vetoriais foram

ponderados por meio da calculadora de campo na tabela de atributos e em seguida rasterizados, dados raster foram ponderados por meio da reclassificação por tabela.

Tabela 4. Pesos aplicados na ponderação dos atributos considerados.

CLASSE		VALORES DE VULNERABILIDADE (Crepani, <i>et al.</i> , 2001)	VALORES DE VULNERABILIDADE (Silva Neto, 2013)
TIPOS DE SOLO (S)			
LAd	Latossolo amarelo distrófico	1	0,3
EKgu	Espodossolo Humilúvico	2,0	0,6
UNIDADES LITOLÓGICAS (G)			
K2ac	Formação Alter do chão	2,4	0,8
N4a2	Depósitos aluvionares	3	1
VULNERABILIDADE DO RELEVO (R) - DECLIVIDADE (%)			
Muito baixa	< 2	1	0,2
Baixa	2 – 6	1,5	0,4
Média	6 – 20	2,0	0,6
Alta	20 – 50	2,5	0,8
Muito Alta	> 50	3	1
MAPBIOMAS			
USO DA TERRA (Vg)			
33	Água	0	0,1
3	Floresta	1	0,2
11	Campo alagado	1,4	0,6
12	Formação campestre	1,4	0,6
15	Pastagem – desmatamento	2,8	0,8
41	Lavoura Temporária	3	0,9
24	Área urbanizada	3	1
EROSIVIDADE (MJ/mm.ha/ano) (C)			
Muito baixa	R < 2.500		0,2
Baixa	2.500 < R < 5.000		0,4
Média	5.000 < R < 7.000		0,6
Alta	7.000 < R < 10.000		0,8
Muito Alta	R > 10.000		1

Método AHP

O método AHP foi elaborado para dar apoio consistente a tomadas de decisões. Seu uso parte do pressuposto da organização de problemas complexos a partir das partes que o constituem para gerar prioridades permitindo uma avaliação em que cada critério será considerado a partir da relativa importância no processo analisado e ainda possibilita a mensuração da consistência do julgamento (Soares Júnior, 2020).

Quando se trata de tomar decisões a tarefa criativa nessa ação consiste na escolha dos fatores importantes, no AHP uma vez que os fatores são escolhidos, eles são organizados em uma estrutura hierárquica que estão ligados a um objetivo geral, critérios, subcritérios, e assim sucessivamente. O objetivo da construção da hierarquia inclui fornecer visão global das relações complexas e auxiliar na observação se as questões em cada nível estão na mesma ordem de grandeza (Saaty, 1990).

A estruturação da aplicação do modelo consiste em três etapas, que são a hierarquização das camadas delimitadas: nível 1 – Objetivo a ser alcançado; nível 2 – Critérios; e nível 3 – alternativas (Saaty, 1977).

Neste trabalho os graus hierárquicos compreendem: nível 1 – estabelecer a vulnerabilidade ambiental; nível 2 – compreender as variáveis utilizadas e seus pesos; e nível 3 – a ponderação dos atributos.

Na prática, a rotina do método faz uma comparação pareada entre os fatores (critérios) e o especialista atribui valor em uma comparação entre

pares de dados, devido a isso a entrada de dados é na forma de uma matriz dominante (Tabela 5), que é dividida em dois triângulos, separados pela diagonal unitária, um triângulo recebe a ponderação direta e o do lado oposto os elementos são o inverso da ponderação de mesmo par (Schmidt & Barbosa, 2016).

Tabela 5. Matriz de comparação pareada

Fatores	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4
Fator 1	1	1/P2	1/P3	1/P4
Fator 2	P2	1	1/2	1/3
Fator 3	P3	P2	1	½
Fator 4	P4	P3	P2	1

As linhas e as colunas recebem os valores relativizados pelos especialistas, cada cruzamento recebe um valor relativo que varia entre 1 (igual importância) e 9 (importância absoluta), conforme Tabela 6, como julgamento para o relacionamento entre os critérios considerados a partir do conhecimento do comportamento dos atributos na área de estudo (Dias & Silva, 2014).

Depois de definidos os valores pareados, cada elemento da coluna é dividido pelo somatório da coluna a qual pertence (Tabela 7), a média aritmética dos valores obtidos em cada linha é apresentada na coluna à direita e representam os pesos normalizados que são denominados de prioridade do parâmetro, logo, o peso inicial do parâmetro na análise.

Tabela 6. Escala AHP para comparação de critérios

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	Os dois fatores contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada	Um fator é ligeiramente mais importante que o outro
5	Importância essencial	Um fator é claramente mais importante que o outro
7	Importância demonstrada	Um fator é fortemente favorecido e seu domínio é demonstrado na prática
9	Importância absoluta	A evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre julgamentos	Possibilidade de compromissos Adicionais

Cada valor apresentado na coluna de pesos é a ponderação que deve ser atribuído na criação dos mapas em SIG, como são normalizados, variam de 0 a 1 e a somatória de todos os pesos deve ser igual a 1 (Schmidt & Barbosa, 2016).

Saaty (1990) coloca que a construção da hierarquia necessita da consideração de

pormenores relevantes suficientes para representar o problema de maneira completa, entretanto faz a ressalva de que o uso de muitas variáveis pode ocasionar a perda da sensibilidade do modelo em relação às mudanças nos elementos.

Tabela 7. Generalização de determinação de pesos

Fatores	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Pesos
Fator 1	$F1/\sum \text{ Coluna 1}$	$F1/\sum \text{ Coluna 2}$	$F1/\sum \text{ Coluna 3}$	$F1/\sum \text{ Coluna 4}$	$\sum \text{ Linha 1/n}$
Fator 2	$F2/\sum \text{ Coluna 1}$	$F2/\sum \text{ Coluna 2}$	$F2/\sum \text{ Coluna 3}$	$F2/\sum \text{ Coluna 4}$	$\sum \text{ Linha 1/n}$
Fator 3	$F3/\sum \text{ Coluna 1}$	$F3/\sum \text{ Coluna 2}$	$F3/\sum \text{ Coluna 3}$	$F3/\sum \text{ Coluna 4}$	$\sum \text{ Linha 1/n}$
Fator 4	$F4/\sum \text{ Coluna 1}$	$F4/\sum \text{ Coluna 2}$	$F4/\sum \text{ Coluna 3}$	$F4/\sum \text{ Coluna 4}$	$\sum \text{ Linha 1/n}$
Somatório das colunas	$\sum \text{ Coluna 1}$	$\sum \text{ Coluna 2}$	$\sum \text{ Coluna 3}$	$\sum \text{ Coluna 4}$	$\sum \text{ pesos} = 1$

Para garantir que a matriz seja recíproca, positiva e consistente é preciso considerar as inconsistências e isso é realizado por meio do índice de consistência (*IC*), que é calculado através de uma aproximação do autovalor dos pesos obtidos ($\lambda_{\max}$) e o número de fatores, a matemática do índice é dada pela equação 4:

$$IC = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} \quad (4)$$

Onde:

n = número de fatores usados (número de colunas ou linhas)

$\lambda_{\max}$ = autovalor do resultados da análise da matriz dominante.

Ao dividir o valor *IC* pelo índice aleatório ou índice randômico (*IR*), obtém-se um índice chamado de razão de consistência (*CR*), o índice aleatório vai variar de acordo com o número de fatores na matriz (n) (Tabela 8).

Tabela 8 – Valores de IR para matriz de ordem n

n	2	3	4	5	6	7	8
IR	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41

Fonte: Saaty, 1990; Rodrigues, 2015; Lira, 2022

A interpretação do teste indica que se valor de *CR* for acima de 0,1 (10%) indica que os

juízos realizados podem não ser confiáveis, tornando necessário avaliar o entendimento e a estruturação do problema para nova ponderação (Saaty, 1990; Schmidt & Barbosa, 2016).

Os pesos atribuídos na matriz de comparação pareada para a bacia do Tarumã-Mirim (ver Tabela 8) foram considerados a partir da consulta a estudos de caso que aplicaram a metodologia de Crepani et al. (2001) juntamente com o método AHP, principalmente com áreas de estudo localizadas na Amazônia.

Sendo assim, a partir da consideração da aplicação nos trabalhos de Pinese Júnior e Rodrigues (2012); Dias & Silva (2014), Silva Neto (2013), Rodrigues (2015), Weiss & Pippi (2019), Lopes (2019), Fernandes et al. (2019), Rodrigues; Nunes & Silva (2019), Soares Junior (2020), Araújo Júnior & Tavares Júnior (2020), Castro (2021), Silva; Ferreira & Loureiro (2021), França (2022), Franco (2021), Lira (2022), Colares et al. (2022); Fushimi et al. (2012); e Silva (2022) foram verificados os fatores que receberam maior importância relativa nas análises de vulnerabilidade ambiental e suas justificativas, que são em ordem decrescente: uso da terra, relevo, solo, geologia e clima (Tabela 9).

Tabela 9. Matriz de comparação pareada da bacia do Tarumã-Mirim

Fatores	Uso da terra	Declividade	Solo	Geologia	Clima
Uso da terra	1	2	2	3	4
Declividade	0,5	1	1	2	3
Solo	0,5	1	1	2	2
Geologia	0,3	0,5	0,5	1	2
Clima	0,2	0,3	0,5	0,5	1

A partir da normalização dos valores da matriz de decisão para aplicação dos pesos dos fatores considerados, os resultados obtidos são

apresentados na Tabela 10, na coluna ‘pesos’ estão em porcentagem a contribuição de cada fator na vulnerabilidade ambiental da bacia do Tarumã-Mirim.

Tabela 10. Determinação dos pesos dos fatores para a bacia do Tarumã-Mirim

Fatores	Uso da terra	Declividade	Solo	Geologia	Clima	Pesos
Uso da terra	0,39	0,41	0,40	0,35	0,33	0,377
Declividade	0,19	0,21	0,20	0,24	0,25	0,217
Solo	0,19	0,21	0,20	0,24	0,17	0,200
Geologia	0,13	0,10	0,10	0,12	0,17	0,123
Clima	0,10	0,07	0,10	0,06	0,08	0,082
$\sum$ colunas	1	1	1	1	1	1

O índice de consistência (*IC*) e a razão de consistência (*IR*) foram obtidos por meio da aplicação web AHP-OS, uma calculadora de prioridade online para comparação de pares baseadas no método AHP (Goepel, 2018), com os pesos atribuídos a calculadora retornou um valor de 0,00019 (1,90%) de razão de consistência, índice menor que 0,1 (10%), apontando para uma matriz consistente e positiva, com atribuições de pesos significativos e coerentes, viabilizando a aplicação da ponderação no mapeamento da vulnerabilidade ambiental no Tarumã-Mirim de acordo com a equação 5.

$$V = (0.377 * Vg) + (0.217 * R) + (0.200 * S) + (0.123 * G) + (0.082 * C) \quad (5)$$

Resultados e discussão

O uso da terra é a variável com maior peso para a vulnerabilidade, porque a ação do ser humano favorece para a aceleração de processos erosivos e porque a cobertura do solo com vegetação representa o controle desses processos. Remoção da vegetação e manejo inadequado criam um ambiente propício ao início de processos erosivos que na Amazônia representa algo significativo pela alta pluviosidade (Rodrigues, 2015; Colares et al., 2022).

Ao se comparar as classes de cobertura da terra de 1985 e 2022 é possível evidenciar o incremento do polígono de intervenção humana. Em 38 anos, além de saltar de uma classe para três, houve aumento de 0,90% para 4,47% da área destinada a usos na bacia (Figura 5).

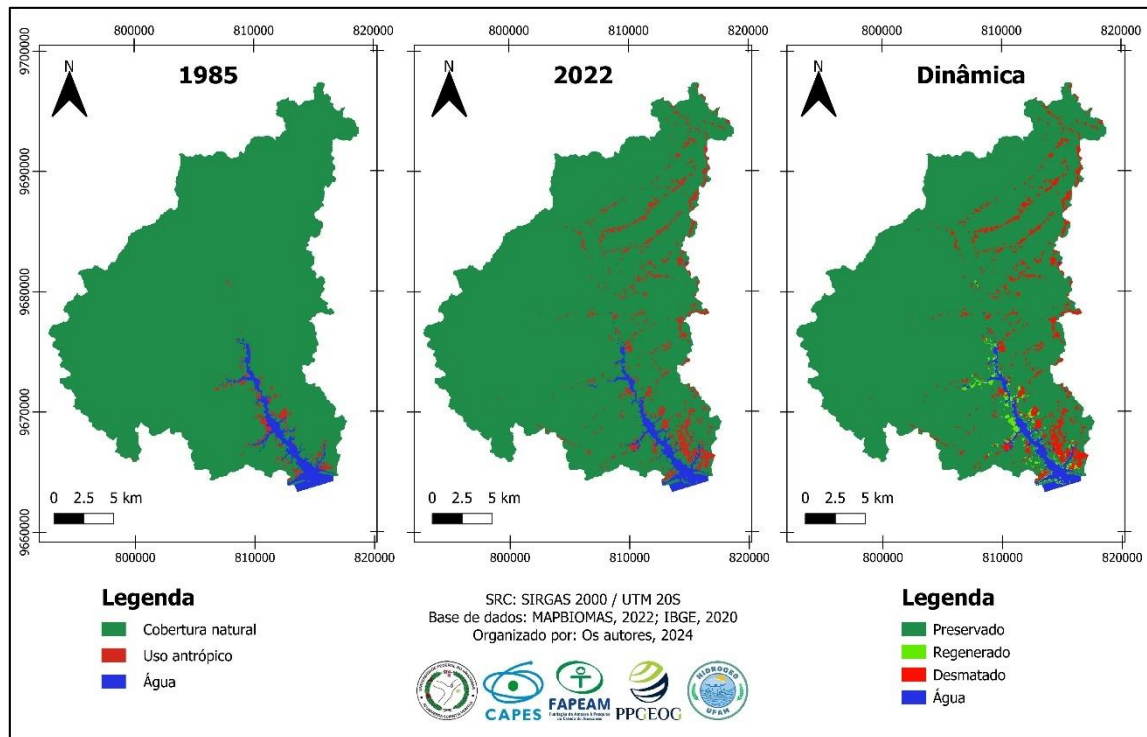


Figura 5. Dinâmica do uso da terra na bacia do rio Tarumã-Mirim de 1985 a 2022

Dados do MAPBIOMAS apontaram que em 2022 oito (8) classes de cobertura da terra foram observadas na bacia do Tarumã-Mirim, sendo cinco (5) de unidade paisagem natural e três (3) de características de polígonos de intervenção humana, o que indica que 93,37% da bacia se encontra em bom estado de conservação, as classes mapeadas como urbano, lavoura temporária e pastagem representam 0,13%, 0,004% e 4,35%, respectivamente.

O mapeamento da vulnerabilidade para uso e cobertura da terra apontou uma variação no índice que vai de 0,2 a 1,0 sendo a menor vulnerabilidade para a classe de floresta e água e a mais alta na classe de área urbana e lavoura temporária (Figura 6), o que colabora para o entendimento do papel da vegetação como agente protetor da paisagem à perda de solos, é neste tema que a intervenção humana mostra a capacidade de aumentar a instabilidade para surgimento de novas classes de vulnerabilidade (Rodrigues, 2015).

A declividade tem a capacidade de transformar a energia potencial da chuva em energia cinética, com isso, temos que quanto maior a declividade maior é a velocidade que as massas de água em deslocamento podem atingir e consequentemente aumenta sua capacidade de transporte, que por sua vez é o que resume o processo de erosão, quanto maiores são os interflúvios, menor é o valor de vulnerabilidade (Crepani et al., 2001).

O tamanho e a quantidade de material que pode ser arrastado pela água estão ligados a velocidade do escoamento superficial, que por sua vez, é resultado do comprimento do lançante e do grau de declividade do terreno. Se o declive do terreno aumenta quatro vezes, a velocidade do escoamento aumenta duas vezes e a capacidade de erodir é quadruplicada (Bertoni & Lombardi Neto, 2017; Ribeiro et al., 2016), devido a isso, na ponderação recebeu peso de importância essencial.

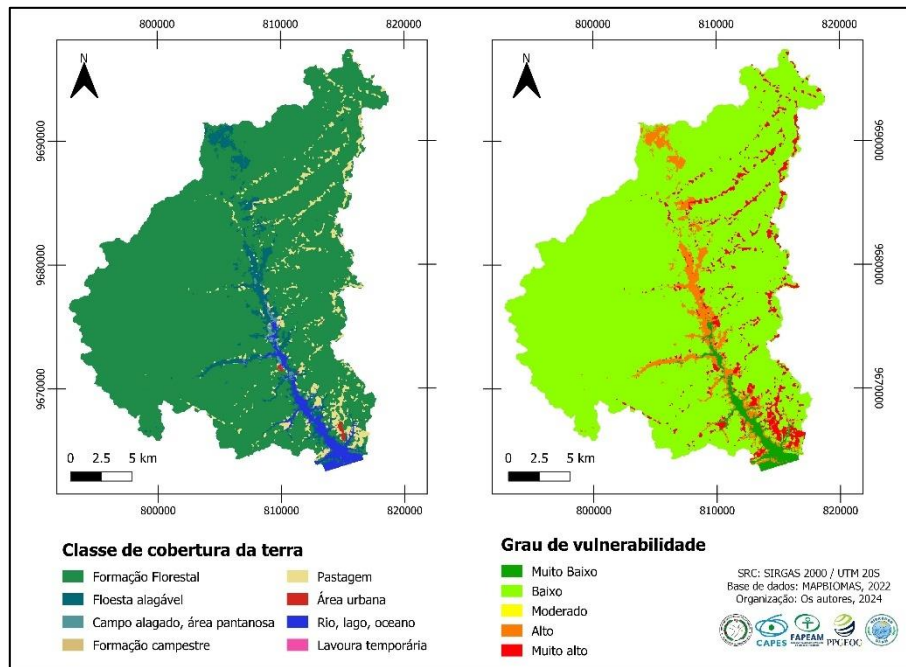


Figura 6. Vulnerabilidade da bacia do rio Tarumã-Mirim para o tema uso e cobertura da terra

A vulnerabilidade no tema relevo variou de baixa a muito alta. A declividade do relevo alcança valores máximos de até 47% representando as encostas nas áreas mais elevadas da bacia, 7,81% da área está sob vulnerabilidade baixa, enquanto 8,44% moderada, 50,61% alta e 33,05%

apresentam vulnerabilidade muito alta. É possível observar uma relação direta da altitude e da declividade com o mapa ponderado de vulnerabilidade (Figura 7).

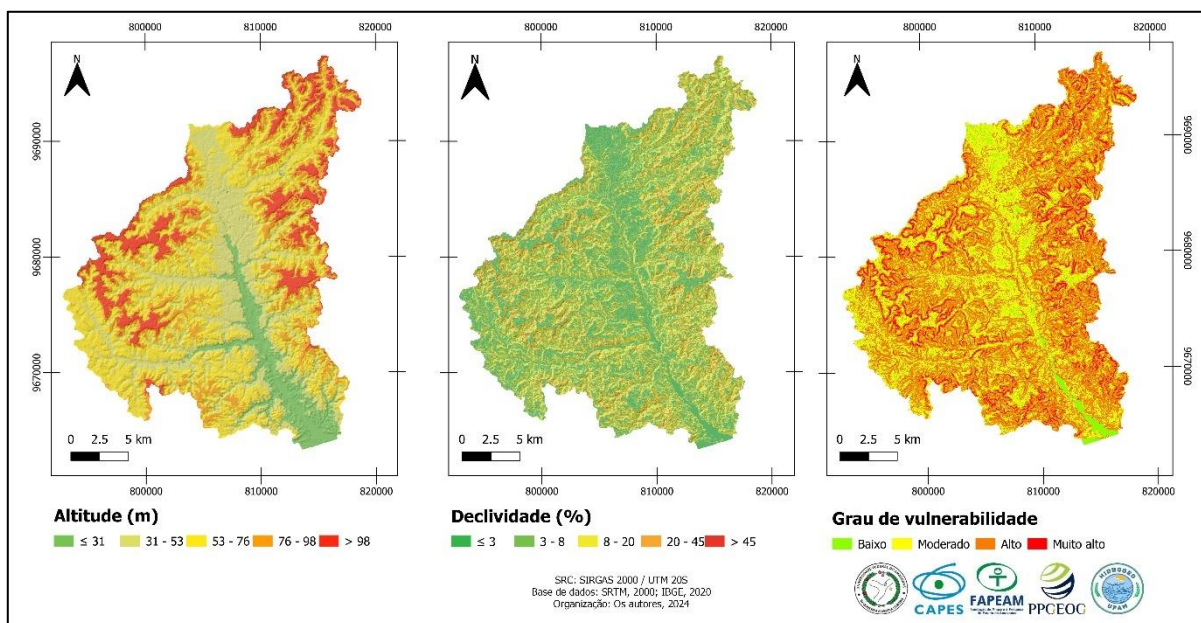


Figura 7. Altitude, declividade e vulnerabilidade da bacia do rio Tarumã-Mirim para o tema relevo

A importância relativa dos solos consiste por esse tema ser afetado diretamente pelos processos erosivos, juntamente com a geologia

determina a capacidade de infiltração. Devido a maior ocorrência de latossolo amarelo na bacia, que possuem baixa suscetibilidade a erosão se considerado as propriedades de agregação das

partículas, essa variável recebeu peso de importância moderada (Bühning, 2010; Colares et al., 2022; Bertoni & Lombardi Neto, 2017).

Os fatores importantes para determinar a vulnerabilidade da paisagem no tema solo se refere a estrutura do solo, tipo e quantidade de argilas, permeabilidade e profundidade do solo, a capacidade do solo em resistir a erosão é estipulada a partir da composição mineralógica e granulométrica somadas a características físicas e químicas. Foram classificados dois grupos de vulnerabilidade ponderados para a bacia do Tarumã-Mirim, 89,60% da bacia é composta por latossolo amarelo distrófico que confere grau baixo de vulnerabilidade, por ser um solo bem desenvolvido é, portanto, profundo e poroso devido ao intenso processo de intemperismo e lixiviação

na sua formação esses solos são pobres em minerais facilmente intemperizáveis o que confere a unidade da paisagem baixo grau de vulnerabilidade (Crepani et al., 2001).

Em 7,22% da bacia ocorre o espodossolo humilúvico próximo ao curso d'água principal da bacia, caracterizados por serem solos pouco desenvolvidos em fase inicial de desenvolvimento, no caso da área da bacia porque ainda estão em fase inicial da maturação do material de origem recentemente depositado conferindo ao trecho onde ocorrem uma vulnerabilidade alta, na Figura 8 está representado a distribuição dos tipos de solo e da vulnerabilidade ponderada para o plano pedologia.

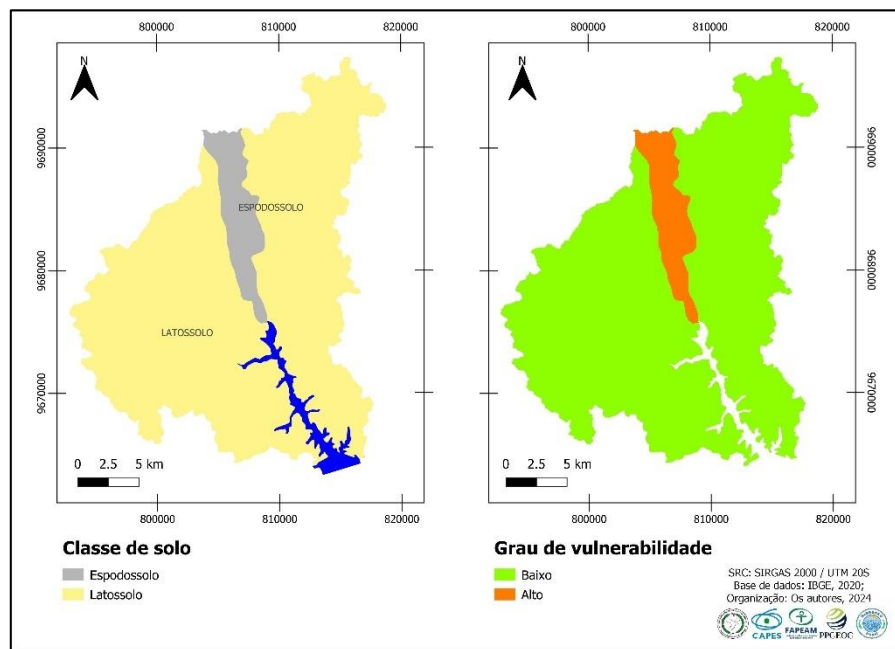


Figura 8. Vulnerabilidade da bacia do rio Tarumã-Mirim para o tema pedologia

A geologia possui peso inferior as demais por não interagir diretamente com a perda de solo porque é coberta pelas camadas superficiais, é importante frisar que a litogia que determina as características do solo (Colares et al., 2022). A geologia da área possui base na formação Alter do Chão, originada a partir de depósitos fluviolacustres a partir de um sistema fluvial de alta energia do cretáceo (Horbe et al., 2006).

Um dos pontos na questão geológica diz respeito a vulnerabilidade de aquíferos a contaminação, que está ligada ao tempo de percolação da água da superfície até a subterrânea, capacidade dos materiais geológicos de atenuação

dos contaminantes e quantidade dos contaminantes que podem alcançar o aquífero. Destarte, o risco de contaminação dos aquíferos consiste na probabilidade da parte superior da água de atingir graus de contaminação acima do permitido em decorrência de atividades humanas realizadas na cobertura do solo (Miranda, 2017).

Apesar de terem sido formadas a partir da estabilidade e resistência a erosão das suas partículas constituintes, os agregados gerados são friáveis ou físeis, o que resulta em uma resistência das rochas que pode ser alterada significativamente quando o agente intemperizador agrega substância cimentantes ou produz dissolução, fatores como granulometria, seleção, maturidade, diagênese e

litificação devem ser considerados para determinar a resistência das rochas ao intemperismo e a erosão (Crepani et al., 2001), somado a isso os depósitos

aluvionares sujeitam a bacia a uma vulnerabilidade moderada (96,70%) e alta 1,12%, respectivamente (Figura 9).

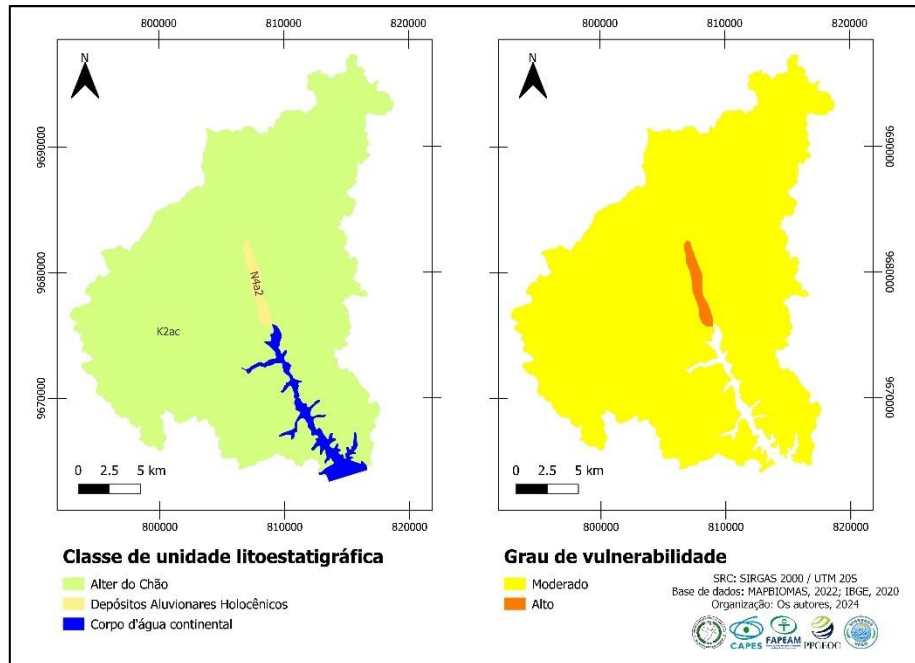


Figura 9. Vulnerabilidade da bacia do rio Tarumã-Mirim para o tema geologia

A vulnerabilidade no tema clima foi determinada com base no índice de erosividade, ao longo da bacia a distribuição anual de precipitação pluvial cria duas grandes áreas onde os índices de erosividade variam de 7 mil a mais de 10 mil MJ/mm.ha/ano, em decorrência dos elevados

acumulados anuais de chuva da região amazônica, devido a isso a bacia do Tarumã-Mirim está dividida em vulnerabilidade moderada e alta a partir da ponderação da vulnerabilidade no tema clima (Figura 10).

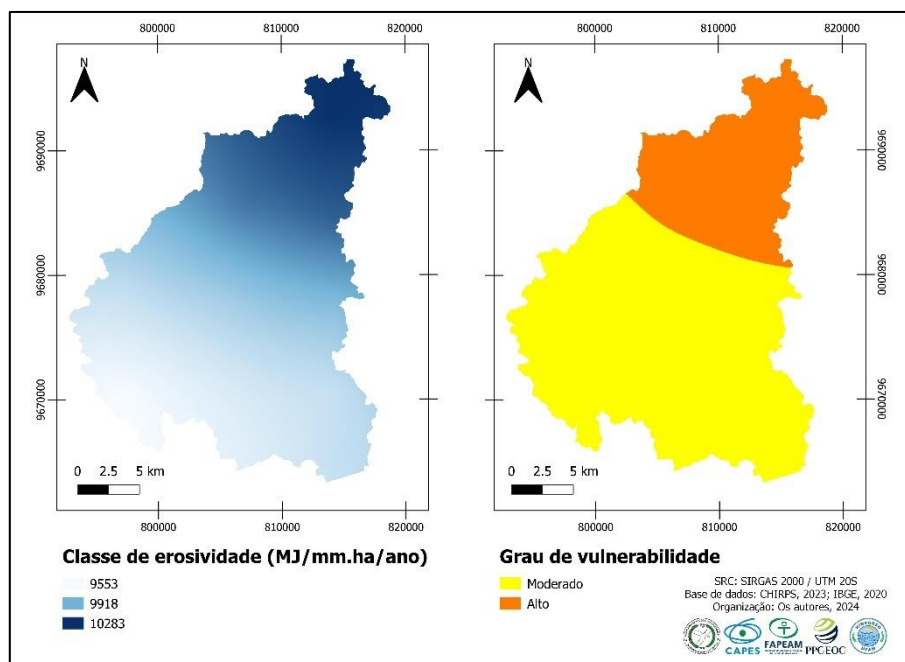


Figura 10. Vulnerabilidade da bacia do rio Tarumã-Mirim para o tema clima

O clima possui peso de menor importância porque mesmo com elevados valores de erosividade foi possível a formação de solos espessos, demonstrando certa estabilidade entre morfogênese e pedogênese quando desconsiderados fatores antrópicos (Silva Neto & Aleixo, 2020; Ribeiro et al., 2016).

O intemperismo é controlado pelo clima por meio da temperatura e da precipitação pluvial. No processo erosivo a atuação da chuva será qualificada por meio da intensidade e da duração do período chuvoso, quanto maior o volume de chuva e menor o período sazonal chuvoso, maior será a capacidade da precipitação de erodir o solo. Esse fator é regulado indiretamente pelo tipo de vegetação que cobre a paisagem (Crepani et al., 2001).

Vulnerabilidade ambiental da bacia do Tarumã-Mirim

A maior parte da bacia (86,46%) está sujeita a uma vulnerabilidade baixa em relação a perda de solos, 9,13% da área da bacia se encontra sob um grau de vulnerabilidade moderado ou alto, conforme gráfico da Figura 11.

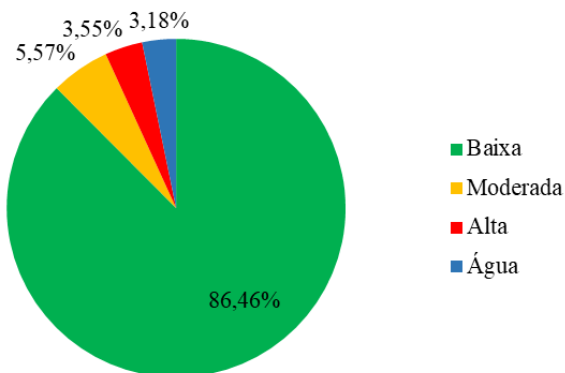


Figura 11. Vulnerabilidade a perda de solo da bacia do rio Tarumã-Mirim

A configuração evidenciada da vulnerabilidade no Tarumã-Mirim se dá pela vegetação densa e características dos solos que reduzem o grau de vulnerabilidade na bacia. O latossolo amarelo é mais estável em relação ao intemperismo por conta da elevada concentração de óxidos de ferro e alumínio, a maturidade do solo associada a uma considerável cobertura de vegetação é frequentemente associada a uma vulnerabilidade reduzida (Kubota, 2019; Colares et al., 2022).

Os solos arenosos são mais suscetíveis a erosão e são constantemente alagados dada a

dinâmica de subida e descida dos rios na Amazônia, são menos profundos, menos estáveis e menos intemperizados se comparados com latossolos (Crepani et al., 2001; Rodrigues et al., 2019).

O relevo por apresentar baixa declividade cria condições para menor energia potencial de deslocamento de partículas em superfície, associada a isso a cobertura vegetal densa cria um ambiente que favorece a pedogênese, a localização das áreas mais vulneráveis está onde ocorreu a retirada da vegetação para atividades humanas, demonstrando o papel preponderante do tema cobertura da terra na determinação da vulnerabilidade ambiental a perda do solo na bacia do rio Tarumã-Mirim.

Diante do exposto, foi possível identificar as áreas da bacia mais vulneráveis à perda de solos a partir dos temas considerados e como estes se relacionam, o que pode orientar medidas conservacionistas e evidenciar as potencialidades de uso dos recursos ecológicos, principalmente para controle da expansão das atividades humanas e consequente derrubada de vegetação primária (Silva Neto, 2013; Ribeiro et al., 2016).

A determinação da vulnerabilidade por tema possibilita demonstrar a fragilidade dos ecossistemas mesmo onde não há significativas mudanças na cobertura da terra indicando onde estão as áreas passíveis a proteção tendo em vista a suscetibilidade natural a perda do solo (Silva et al., 2021).

Os resultados demonstram o papel da influência da retirada da vegetação na degradação, tendo em vista que essa prática expõe o solo diminuindo o grau de proteção do meio, o que acarreta escoamento superficial e consequente erosão, tornando as unidades da paisagem natural instáveis e favoráveis a morfogênese (Amaral & Ross, 2009; Braga et al., 2017; Silva et al., 2021).

Os resultados apontam ainda que a bacia hidrográfica do Tarumã-Mirim, por suas características biofísicas e dinâmica de uso, possui uma vulnerabilidade ambiental a perda de solo que varia de baixa a alta, demonstrando que toda a extensão da bacia apresenta algum grau de vulnerabilidade. Os valores mais elevados de vulnerabilidade coincidem com as áreas de uso antrópico, declividade acentuada e ocorrência de espodosolos, isso representa uma área de 45,24 km² (Figura 12).

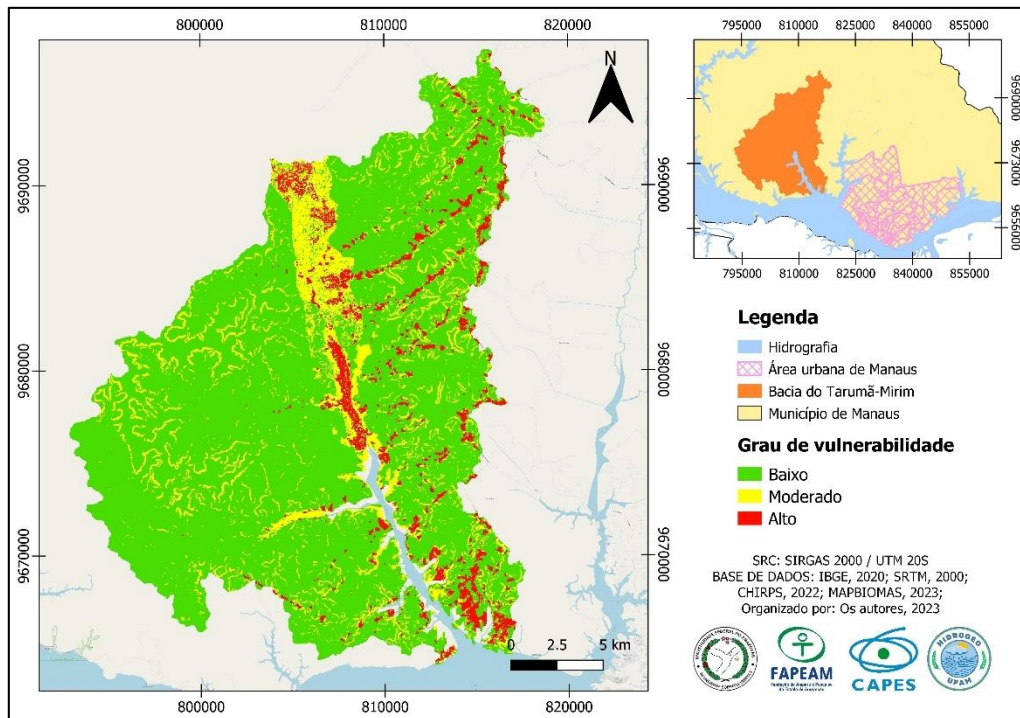


Figura 12. Vulnerabilidade ambiental da bacia do rio Tarumã-Mirim

Conclusão

A partir da aplicação da metodologia foi possível verificar que, pelas suas características físicas, a bacia hidrográfica do rio Tarumã-Mirim encontra-se com áreas de vulnerabilidade a perda de solos que varia de baixa a alta, sendo que maior parte da área da bacia (86,46%) está sob a classe baixa e 3,55% foi classificada como vulnerabilidade alta.

Os resultados demonstram o papel da cobertura da terra, do relevo e da maturidade do solo na morfodinâmica e na conservação dos recursos ecológicos, tendo em vista que os valores de alta vulnerabilidade foram observados onde a vegetação densa foi suprimida para atividades econômicas e de habitação e no restante da bacia o solo e o relevo contribuem para uma vulnerabilidade moderada da unidade da paisagem natural.

Os resultados da dinâmica da cobertura apontam para um avanço gradativo dos polígonos de intervenção humana nos últimos 38 anos na bacia, mesmo estando localizada em área legalmente protegida como verificado na análise de contexto fundiário, situação que pode ser explicada pela ausência de uma plano de manejo e falta de articulação dos órgão de proteção ambiental e os de regularização fundiária.

Por fim, as geotecnologias associadas a uma metodologia que auxilie na tomada de decisão são importantes para aplicação na análise de questões ambientais, o que pode auxiliar na elaboração de argumentos e tomada de decisão em planos de zoneamento e gestão ambiental, ressalta-se a importância de se considerar em trabalhos futuros as dinâmicas sociais existentes uma vez que a sociedade é dinâmica tal como os ecossistemas e a integração de dados socioeconômicos podem oferecer melhores caminhos para destinação de áreas e um zoneamento mais eficaz considerando as potencialidades do lugar.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM).

Referências

- Amaral, R., & Ross, J. L. S. (2009). As unidades ecodinâmicas na análise da fragilidade ambiental do parque estadual do morro do diabo e entorno, teodoro Sampaio/SP. *GEOUSP Espaço e Tempo (Online)*, 13 (2). <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2009.74128>
- ANA. (2019). Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2017 (BHO 2017). <https://metadados.snirh.gov.br/>

- Araújo Júnior, A. C. R. A., & Tavares Júnior, S. S. (2020). Analytic hierarchy process (AHP): uma definição do risco à inundação para a amazônia setentrional. *Acta Geográfica*, 14 (35). <https://doi.org/10.18227/2177-4307.acta.v14i35.6473>
- Bertoni, J., & Lombardi Neto, F. (2017). *Conservação do solo*. São Paulo: Ícone, 10 ed., 2017.
- Braga, C. C., Cabral, J. B. P., Lopes, S. M. F., & Batista, D. F. (2017). Mapeamento da Fragilidade Ambiental na Bacia Hidrográfica do Reservatório da UHE CAÇU - Goiás. *Ciência e Natura*, 39, 81–98. <https://doi.org/10.5902/2179460X26978>
- Bühning, R. (2010). *Estudo da dinâmica de uso do solo e cobertura vegetal e elaboração de uma proposta de zoneamento para a Bacia Hidrográfica do Tarumã, Manaus, Amazonas*. <https://tede.ufam.edu.br/browse?type=author&value=B%C3%BChring%2C+Ricardo>
- Capra, F. (1996). *A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos*. Editora Cultrix.
- Castro, L. F. (2021). *O uso da terra e a vulnerabilidade ambiental na bacia hidrográfica do rio Sanabani no município de Silves—AM*. <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/8367>
- CHIRPS. (2023). *Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations*. Climate Hazard Center –UC. https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_annual/tifs/.
- Colares, I. S., Junior, J. C. F., Rodrigues, L.S., et al. (2022). Suscetibilidade do solo à erosão na bacia hidrográfica do rio Tarumã-Açu (Amazonas – Brasil). *Caminhos de Geografia*, 23 (89), p. 367–38. <https://doi.org/10.14393/RCG238960655>
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: a python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open-Source Software*, 6 (64). <https://doi.org/10.21105/joss.03172>
- CPRM. (2016). *Geologia e recursos minerais da região metropolitana de Manaus*. Silvio Roberto Lopes Riker (Org.), Manaus: CPRM. em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/17852>. Acesso: 24 dez. 2023.
- Crepani, E., Medeiros, J. S., Azevedo, L. G., Hernandez Filho, P., Florenzano, T. G., & Duarte, V. (1996). *Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico*. São José dos campos: INPE. <http://mtc-m12.sid.inpe.br/rep/6qtX3pFwXQZ3ukuKE/C98tB>. Acesso: 18 dez. 2023.
- Crepani, E., Medeiros, J. S., Hernandez Filho, P. H., Florenzano, T. G., Duarte, V., & Barbosa, C. C. F. (2001). *Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial*. São José dos Campos: INPE. <http://sap.ccst.inpe.br/artigos/CrepaneEtAl.pdf>. Acesso: 18 dez. 2023.
- Crepani, E., Medeiros, J. S., Palmeira, A. F., & Silva, E. F. (2008). Zoneamento ecológico-econômico. In.: Florenzano, T. G. (org.). *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Cruz, E. F., & Moreira, A. A. M. (2022). A vulnerabilidade ambiental da bacia do rio Piracicaba/MG: Uma abordagem geográfica multicriterial. *Geo UERJ*, 41. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2022.52633>
- Cruz, E. F., Neiva, J. A. de F., Inácio, R. D., Costa, P. S. F., & Moreira, A. A. M. (2016). Avaliação da Vulnerabilidade Ambiental do Distrito de Glaura—Município de Ouro Preto/MG. *Caderno de Geografia*, 26 (1), 35–49.
- Dias, V. S. B., & Silva, A. B. (2014). AHP na modelagem da vulnerabilidade ambiental do mini corredor ecológico Serra das Onças (BA). *Revista Brasileira de Cartografia*, 66 (6). <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44719>. Acesso em: 18 dez. 2023.
- EMBRAPA. (2020). Satélites de monitoramento. <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/srtm>.
- Farias, O. G., Francisco, C. N., Oliveira-Júnior, J. F., Silva, M. S., & Pimentel, L. C. (2022). Interpoladores híbrido e não híbrido aplicados na distribuição espacial das chuvas na região montanhosa costeira fluminense. *Revista Brasileira de Climatologia*, 31, 434–456. <https://doi.org/10.55761/abclima.v31i18.15788>
- Fernandes, J. C., Peixoto, R. de A. O., Schmidt, M. A. R., & Pereira, C. E. (2019). Análise multicritério com uso da AHP para avaliação temporal na vulnerabilidade ambiental: estudo de caso na bacia hidrográfica do uberabinha, MG. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 8 (3), 141–158. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v8e32019141-158>
- Fitz, P. R. (2008). *Geoprocessamento sem complicação*. Oficina de Textos.

- Florenzano, T. G. (2011). *Iniciação em Sensoriamento Remoto* 3 ed. Oficina de textos.
- França, L. C. J., & Mucida, D. P. (2022). *A fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha em Minas Gerais*. Pantanal Editora.
<http://acervo.ufvjm.edu.br/jspui/handle/1/1585>. Acesso em: 18 dez. 2023.
- Franco, A. C. S. (2021). *Modelagem ambiental e indicadores de pressão nos recursos hídricos da alta bacia do Rio Vermelho (Goiás)*. [Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Goiás]. BDTD.
<https://www.bdttd.ueg.br/handle/tede/810>. Acesso em: 18 dez. 2023.
- Fushimi, M., Ribeiro, D. de Q., & Nunes, J. O. R., (2022). Vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos lineares da bacia hidrográfica do rio dos Cachorros, Amazônia Oriental. *Revista do Departamento de Geografia*, 42.
<https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2022.193453>
- Goepel, K. D. (2018). Implementation of an online software tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 10.
- Horbe, A. M. C., Vieira, C. L., & Nogueira, A. C. R. (2006). Geoquímica de camadas vermelhas bioturbadas da Formação Alter do Chão, Cretáceo da bacia do Amazonas. *Revista Brasileira de Geociências*, 36 (3), p. 396-402.
<http://bjg.siteoficial.ws/2006/n.3/2.pdf>.
- IBGE (2010). *Geomorfologia e vegetação por estado*.
<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geomorfologia/16028-geomorfologia-do-estado-de-ro-rr-to-ac-am-ma-mt-e-pa.html?=&t=downloads>.
- IBGE. (2002). *Mapa de clima do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE. Escala 1:5 000 000. em: <http://mapas.ibge.gov.br/tematicos.html>.
- IBGE. (2010). *BDIA - Banco de Dados e Informações Ambientais*. em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>.
- ICMBio. (2023) *Educação Ambiental SNUC*. <https://www.icmbio.gov.br/educacaoambiental/politicas/snuc.html>
- INCRA. (2017). *Informações gerais sobre os assentamentos da Reforma Agrária*. Brasília: INCRA.
<http://painel.incra.gov.br/sistemas/index.php>.
- INMET. (2020). Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa - BDMEP. Brasília.
<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>.
- Kubota, N. A., Prata, T. C., & Lima, I. F. (2019). Hidrogeomorfologia e susceptibilidade a erosão da bacia do rio Gurupi (PA-MA). *Revista Geográfica Acadêmica*, 13 (2), p. 67–89.
<http://orcid.org/0000-0002-0594-0187>.
- Landim, P. M. B., & Sturaro, J. R. (2002). Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. *Geomatemática*, 6 (19).
<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>.
- Lira, K. C. S. (2022). *Fragilidade ambiental, distribuição espacial de viveiros e estimativa de potencial produtivo da tilápia do Nilo (Oreochromis niloticus) na bacia hidrográfica do Arroio Marreco utilizando SIG*. [Tese de Doutorado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná].
<https://tede.unioeste.br/handle/tede/6142>.
- Lombardi Neto, F., & Moldenhauer, W. C. (1992). *Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP)*. Bragantia, 51 (2).
- Lopes, M. S. (2019). *Deteção de mudanças e proposta metodológica para delimitação de zona de amortecimento no Parque Estadual do Rio Canoas-SC*. [Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul].
<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/202382>.
- Lopes, M. S., & Saldanha, D. L. (2016). Análise de vulnerabilidade natural à erosão como subsídio ao planejamento ambiental do oeste da bacia hidrográfica do Camaquã - RS. *Revista Brasileira de Cartografia*, 68 (9).
<https://doi.org/10.14393/rbcv68n9-44437>.
- Miranda, J. S. N. (2017). *Caracterização da vulnerabilidade intrínseca do Aquífero Alter do Chão na cidade de Manaus - AM*. [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Amazonas].
<https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/5565>
- Pinese Júnior, J. F., & Rodrigues, S. C. (2012). O método de análise hierárquica – AHP – como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio piedade (MG). *Revista do Departamento de Geografia*, 23, 4–26.
<https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0023.0001>
- Rabelo, D. R., Santos, M. R. da S., & Filho, M. R. P. D. S. (2022). Análise comparativa dos dados pluviométricos de satélite e de superfície em bacia hidrográfica semiárida. *Revista Brasileira*

- de Sensoriamento Remoto, 3 (1). <https://rbsr.com.br/index.php/RBSR/article/view/72>
- Ribeiro, A. S., Mincato, R. L., & Curi, N. (2016). Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma Sub-Bacia Hidrográfica pelo Processo Analítico Hierárquico. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9 (1), p. 016–031. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.1.p016-031>.
- Rizato, M.; Zacharias, A. A.; Ventorini, S. E. (2023). Álgebra de mapas e a modelagem cartográfica das estruturas verticais e horizontais da vulnerabilidade social e ambiental no município de Atibaia, SP, Brasil. In *As paisagens dos riscos sociais: educar para diminuir a vulnerabilidade*. Castro, F. V.; Zacharias, A. A.; Oliveira-Costa, J. L.; Moreira, T. (Orgs.). Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança. <https://www.riscos.pt/>.
- Rodrigues, T. B, Nunes, D. D., & Silva, S. M. A. (2019). Dinâmicas socioeconômicas e vulnerabilidade à erosão na bacia. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*. <https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/08/ero-sao-bacia-hidrografica.html>.
- Rodrigues, T. B. (2015). *Caracterização e análise do uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Igarapé do Contra, Porto Velho-RO: Implicações a partir da vulnerabilidade à erosão*. [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Rondônia]. RIUNIR. <https://ri.unir.br/jspui/handle/123456789/1061>.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48 (1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Saaty, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures (1977). *Journal of Mathematical Psychology*, 15 (3), 234–281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Santos, P. T., & Martins, A. P. (2018). Análise da Vulnerabilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Claro (GO) Utilizando Geotecnologias. *Revista do Departamento de Geografia*, 36, 155–170. <https://doi.org/10.11606/rdg.v36i0.143665>
- Schmidt, M. A. R., & Barbosa, G. R. (2016). Uso de redes neurais artificiais na ponderação inicial da técnica ahp em análises de vulnerabilidade de bacias hidrográficas. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 22, 511–525. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702016000300029>
- Silva Neto, J. C. A. (2013). *Zoneamento ambiental como subsídio para o ordenamento do território da bacia hidrográfica do Rio Salobra, Serra da Bodoquena – de MS*. [Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”]. RIU Unesp. <http://hdl.handle.net/11449/105078>.
- Silva Neto, J. C. A., & Aleixo, N. C. R. (2020). Erosividade da chuva na região do médio Solimões, Amazonas, Brasil. *Revista Caminhos de Geografia*, 21 (77). <http://doi.org/10.14393/RCG217747117>.
- Silva, J. F. (2022). *Risco hidrometeorológicos em área urbana do município de São Luís - MA: vulnerabilidade, perigo e suscetibilidade associados*. [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Maranhão]. TEDE. <http://tede.ufma.br:8080/jspui/handle/tede/4279>.
- Silva, K. N., Ferreira, E. C., & Loureiro, G. E. (2021). Fragilidade ambiental da sub-região Hidrográfica Itacaiúnas (SRHI). *Research, Society and Development*, 10 (3). em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i3.13215>.
- Silva, M. L. da, & Bonotto, D. M. (2000). *Caracterização hidrogeoquímica na formação Alter do Chão, município de Manaus (AM). Águas Subterrâneas*. <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterranea/s/article/view/24334>
- Soares Júnior, C. J. R. (2020). Utilização da técnica AHP nos índices de vulnerabilidade natural a erosão na bacia hidrográfica do Igarapé São Francisco como suporte para o ordenamento territorial. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 11, p. 694–704. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.005.0061>.
- Tricart, J. (1977). *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro: IBGE. <https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo.html?id=29679&view=detalhes>.
- Weiss, R., Pippi, L. G. A. (2019). Análise multicritério na definição de vulnerabilidade ambiental. *Terra Plural*, 13 (3). <https://revistas.uepg.br/index.php/tp/article/view/1>.