

# FRAGILIDADE AMBIENTAL DA PAISAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAMURUPIM, PIAUÍ, BRASIL

*Potential and emerging environmental fragility of the Camurupim River hydrographic basin landscape, Piauí, Brazil*

**Roneide Sousa**

Universidade Federal do Piauí, UFPI, Brasil

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

**Glairton Cardoso Rocha**

Instituto Federal do Piauí, IFPI, Brasil

[glairtongeo@ifpi.edu.br](mailto:glairtongeo@ifpi.edu.br)

Recebido: 22.03.2023

Aceito: 23.02.2024

## Resumo

O presente artigo teve por objetivo analisar a fragilidade ambiental potencial e emergente da paisagem da Bacia Hidrográfica do Rio Camurupim, no norte do estado do Piauí, a fim de determinar os diferentes níveis de fragilidade ambiental a processos de degradação. A metodologia baseou-se no método estabelecido por Ross, revisão de literatura, atividade de campo, processamento digital de imagens e análise geoespacial. Foram produzidos mapas temáticos de relevo (IDR e *Geomorphos*), geologia, solos, clima e uso e cobertura da terra e definidas classes e graus de fragilidade para cada critério geoambiental, posteriormente combinados por meio de álgebra de mapas. Os resultados demonstraram que para o mapa da FAP que analisou a integração dos condicionantes da paisagem obteve-se as classes muito baixa (2,07%), baixa (6,62%), média (15,32%) alta (28,41%) e muito alta (47,58%), revelando a alta fragilidade ambiental potencial da bacia. Já para o mapeamento da fragilidade ambiental emergente, que incluí as coberturas e usos antrópicos obteve-se as classes muito baixa (6,05%), baixa (74,36%), média (15,22%), alta (4,34%) e muito alta (0,03%). Conclui-se que embora a BHRC apresente sistemas ambientais frágeis no seu baixo curso, bem como atividades socioeconômicas associadas (pastagem e agricultura de subsistência), a mesma possui cobertura vegetal significativa que atenua os processos erosivos, bem como os solos com textura arenosa dificultam a diversificação produtiva na área, predominando a criação de gado, caprinos, suínos, ovinos entre outros. Destaca-se a necessidade de monitoramento da área para às futuras implantações de empreendimentos, visto a natureza frágil dos sistemas ambientais.

**Palavras-chave:** Unidade geoambiental, Álgebra de mapas, Análise geoespacial, Uso da terra.

## Abstract

This article aimed to analyze the potential and emerging environmental fragility of the landscape of the Camurupim River Basin in the north of the state of Piauí to determine the different levels of environmental fragility to degradation processes. The methodology was based on the method established by Ross, literature review, field activity, digital image processing and geospatial analysis. Relief thematic maps (IDR and *Geomorphos*), geology, soils, climate and land use and land cover, were produced, and classes and degrees of

fragility were defined for each geoenvironmental criterion, later combined through map algebra. The results showed that for the FAP map that analyzed the integration of landscape constraints, the classes obtained were very low (2,07%), low (6,62%), medium (15,32%), high (28, 41%) and very high (47,58%), revealing the high potential environmental fragility of the basin. As for the mapping of emerging environmental fragility, which includes coverage and anthropic uses, the classes obtained were very low (6,05%), low (74,36%), medium (15,22%), high (4,34%) and very high (0,03%). It is concluded that although the BHRC presents fragile environmental systems in its lower course, as well as associated socioeconomic activities (pasture and subsistence agriculture), it has significant vegetation cover that mitigates erosion processes, as well as soils with sandy texture make the productive diversification in the area, predominating the raising of cattle, goats, pigs, sheep, among others. Given the fragile nature of environmental systems, the need to monitor the area for future developments is highlighted.

**Keywords:** Geoenvironmental unit, Map algebra, Geospatial analysis, Land use.

---

## 1. INTRODUÇÃO

A compreensão da relação entre o desenvolvimento econômico e a natureza constitui um desafio para a gestão dos recursos naturais na atualidade. Isso se deve ao fato de que o uso inadequado da terra pode desencadear perturbações significativas nas paisagens, afetando tanto o meio biótico quanto provocando danos socioambientais.

A dinâmica das paisagens, resultante da conversão de ambientes naturais em áreas antropizadas, aliada à falta de planejamento e fiscalização por parte dos órgãos responsáveis, tem colocado em risco a qualidade de ecossistemas e áreas protegidas no território nacional (Cavalcante *et al.*, 2022).

Ross (1994) afirma que as condições genéticas dos elementos naturais das paisagens determinam suas fragilidades naturais diante das intervenções antrópicas. Rodriguez, Silva e Cavalcanti (2004) definem paisagem como um conjunto inter-relacionado de formações naturais e antropizadas, que possuem uma estrutura (forma e arranjo espacial), dinâmica e processo evolutivo próprio. Ainda segundo esses autores, a paisagem natural é sinônimo de Geossistema, considerada uma categoria de sistemas abertos, dinâmicos e hierarquicamente organizados (Sotchava, 1997).

A aplicação das geotecnologias, por meio da elaboração de produtos cartográficos relacionados à fragilidade do ambiente, difunde-se nas pesquisas geográficas, configurando um conjunto eficiente de ferramentas para a gestão territorial e promoção da qualidade da paisagem (Novo, 1998; Fitz, 2008). Dessa forma, as inferências geográficas tornaram-se importantes na análise de variáveis geoambientais para a tomada de decisão (Câmara *et al.*, 2001).

A adoção do recorte espacial de bacias hidrográficas nos estudos geográficos, especialmente nas análises ambientais, é consolidada entre os pesquisadores. Isso se deve à sua capacidade de permitir a análise integrada dos elementos físico-naturais e humanos (Guerra, 1978; Tucci, 1997; Christofolletti, 1980; 1999; Tundisi, 2003; Rodríguez *et al.*, 2011), sendo considerada uma unidade sistêmica e complexa, com intensas trocas de energia e matéria.

A bacia hidrográfica constitui um sistema natural equilibrado, no qual as alterações antrópicas podem comprometer sua fragilidade (Christofolletti, 1980). A Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, reconhece a bacia hidrográfica como uma unidade territorial essencial para o planejamento da gestão hídrica no Brasil. No âmbito do planejamento territorial, ela é considerada a unidade básica de análise, desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento de ações e medidas, tanto estruturais quanto não estruturais (Brasil, 1997). Isso visa promover a integração entre a gestão dos recursos hídricos e a gestão ambiental, conforme destacado por Carvalho (2020).

A pesquisa trata-se da compreensão da fragilidade ambiental da paisagem da Bacia Hidrográfica do Rio Camurupim (BHRC). A escolha deste recorte se justifica pela necessidade de aprofundar os estudos na área, conforme destacado por Sousa (2015, 2019). Essa região abrange um complexo estuarino com uma diversidade de funções e serviços ambientais, sendo também caracterizada pela constante fragmentação dos padrões espaciais e da estrutura da paisagem (Amorim; Sousa; Pirolli, 2021).

A fragmentação é evidenciada pela introdução de diques para a construção de piscinas destinadas à carcinicultura, atividades de mineração, desmatamento para fins de ocupação, práticas de agricultura de subsistência e áreas de pastos. Essas intervenções humanas têm causado impactos significativos, provocando alterações nos fluxos de matéria e energia dos sistemas ambientais, como ressaltado por Mereiles e Campos (2012) e Sousa (2019).

A pesquisa teve por objetivo analisar a fragilidade ambiental potencial e emergente da paisagem da Bacia Hidrográfica do Rio Camurupim, baseado no método prescrito por Ross (1994; 2012), a fim de determinar os diferentes níveis de fragilidade ambiental a processos de degradação. A análise da fragilidade ambiental da BHRC propicia o diagnóstico das diferentes classes de fragilidade dos sistemas naturais, além de constituir-se em importante instrumento no processo de planejamento ambiental, importante para tomada de decisão.

## 2. A FRAGILIDADE AMBIENTAL DAS PAISAGENS NATURAIS E ANTRÓPICAS

Diversas pesquisas têm discutido o conceito de fragilidade dos ambientes naturais, e o aplicado em diferentes recortes geográficos. No Brasil, o geógrafo pioneiro nesses estudos foi Jurandy Ross. Na década de 1990, a partir das concepções das Unidades Ecodinâmicas do meio ambiente, estabelecidas por Tricart (1977), Ross desenvolveu as abordagens de Fragilidade Ambiental Potencial (FAP) e Fragilidade Ambiental Emergente (FAE) (França *et al.*, 2022).

Segundo Ross (1994) a FAP permite avaliar a estabilidade/equilíbrio dinâmico natural do Geossistema e considera os elementos naturais da paisagem (relevo, solos, clima, vegetação etc.) e a FAE, resulta da combinação da fragilidade potencial e uso da terra, refletindo diretamente a ação antrópica sobre a paisagem. Esses parâmetros permitem avaliar quais áreas naturais frente às atividades humanas apresentam maior ou menor fragilidade ambiental.

Para Sporn (2007) a fragilidade ambiental representa a vulnerabilidade do ambiente ao sofrer intervenções, englobando processos erosivos, assoreamentos e inundações. Ainda segundo a autora, as condições de estabilidade do sistema, podem ser rompidas a partir da alteração de um dos componentes ambientais, gerando instabilidade, resultando na fragilização do sistema. A estabilidade de um sistema depende de como ele responde a um determinado regime de perturbações.

Os diferentes usos da terra, aliados às características genéticas dos sistemas naturais presentes nesses ambientes, resultam em diferentes níveis de fragilidade (Ross, 1994). O termo 'fragilidade' pode ser compreendido como a suscetibilidade do sistema ambiental a sofrer intervenções ou alterações, sendo influenciado tanto por processos naturais quanto por ações antrópicas.

Existem diversas metodologias adaptadas à proposta inicial que visam determinar as fragilidades. Crepani *et al.* (2001), em sua proposta teórica-metodológica de Zoneamento Ecológico-Econômico, utilizaram variáveis como índice de dissecação do relevo, geologia (rocha), solo e cobertura vegetal. No estudo da fragilidade, esses autores atribuíram importâncias iguais às variáveis ambientais.

É importante ressaltar que os diferentes modelos de análise de fragilidade terão impactos distintos ao serem aplicados em uma determinada área de estudo. Além disso, a escolha de um fator de ponderação em detrimento de outro também pode influenciar nos resultados, destacando a necessidade de adaptar as variáveis à realidade estudada.

Estudos recentes discutem a importância da análise da fragilidade ambiental em bacias hidrográficas, como Albuquerque e Medeiros (2017) no Ceará; Santos *et al.* (2021) para a bacia hidrográfica do rio Piracuruca no Piauí; Cavalcanti *et al.* (2022) estudou a fragilidade ambiental potencial e emergente da bacia do rio Mocajuba – PA, Lira *et al.* (2022) que procedeu com a classificação de fragilidade ambiental usando a lógica Fuzzy e método AHP para a bacia hidrográfica do Arroio Marreco, no Paraná.

No estado do Piauí, pesquisadores têm adotado a metodologia de Ross (1994) e Crepani (2001) para distintas áreas de estudo. França, Piuzana e Ross (2017) discutiram acerca da Fragilidade Ambiental Potencial e Emergente em núcleo de desertificação no semiárido brasileiro no município de Gilbués; Moraes e Sales (2017) avaliaram o potencial Natural de Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica do Alto Gurguéia; Santos (2018) avaliou a fragilidade ambiental do município de Castelo do Piauí; Ribeiro e Albuquerque (2021) analisaram a fragilidade potencial na bacia hidrográfica do Rio Mulato, no médio Parnaíba, entre outros artigos já produzidos.

Guirra *et al.* (2016) realizaram uma revisão bibliográfica acerca da evolução teórica e metodológica da fragilidade ambiental e suas adaptações em variados recortes de análise, a citar bacias hidrográficas, perímetros urbanos ou rurais. Os autores destacam a importância dos Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) que “permite a manipulação integrada de um grande número de variáveis, acessibilizando a geração de informações intermediárias e finais, ou a inclusão de outras variáveis não contempladas anteriormente” (Guirra *et al.*, 2016, p 240).

Gouveia e Ross (2019) propõem na análise da fragilidade ambiental o uso de parâmetros morfológicos (elementos de formas de relevo) extraídos automaticamente do MDE (geomorphos) e parâmetros morfométricos (declividade), este último recomendado por Ross (1994). Segundo os autores, a inserção de parâmetros morfológicos quanto as formas de relevo permitem determinar e delimitar os níveis de fragilidade de forma precisa e detalhada, além de evitar que áreas de planícies fluviais e de inundação sejam classificadas sem restrições do meio físico a ocupação.

Guirra *et al.* (2016) analisando as adaptações metodológicas apontaram para uma simplificação do elemento relevo da proposta inicial de Ross (1994), com o uso apenas da declividade como critério de análise. Segundo os autores, deve-se observar que para as escalas médias e pequenas (1:500.000, 1:100.000, 1:250.000) usa-se a base de informação os Padrões e Formas Semelhantes (3° táxon) com a rugosidade topográfica ou

os Índices de Dissecação do Relevo. Já para os recortes de maiores detalhes (1:25.000, 1:10.000) utiliza-se as Formas de Vertentes (5° táxon) e as classes de declividades.

Nesse sentido, Ross e Fierz (2017) afirmam que a análise empírica da fragilidade exige o estudo do relevo, da rocha, do solo, do uso da terra e do clima, onde a combinação dessas variáveis e seus respectivos graus possibilita a geração de um produto síntese, com diferentes fragilidades dos ambientes, definidas como potenciais ou emergentes. Sales e Nascimento (2019) e Medeiros *et al.* (2023), destacam a importância do relevo como critério essencial na avaliação da fragilidade ambiental em bacias hidrográficas.

Ross (2012) sistematizou uma hierarquia para a determinação da fragilidade ambiental: muito baixa (1), baixa (2), média (2), alta (4) e muito alta (5), tanto para a FAP e FAE. Estas numerações representadas pelos números arábicos de 1 a 5, estabelecem que cada variável seja organizada em 5 classes, conforme suas potencialidades e fragilidades. Para a classe muito baixa é indicada usos diversos e para as altas restringe-se aos usos produtivos ou atribui-se proteção e conservação ambiental.

Para Bacia Hidrográfica do Rio Camurupim (BHRC) tem-se definida a escala de 1:200.000, seguindo as orientações de Ross (1994; 2012) e Gouveia e Ross (2019). A abordagem adotada levará em consideração, para o critério relevo, o mapeamento automático das formas de relevo a partir dos *Geomorphons* e o Índice de Dissecação do Relevo (IDR) para a análise da Fragilidade Ambiental. Além disso, serão consideradas outras variáveis, como geologia, solos, clima, uso e cobertura das terras, as quais serão detalhadas nos tópicos seguintes.

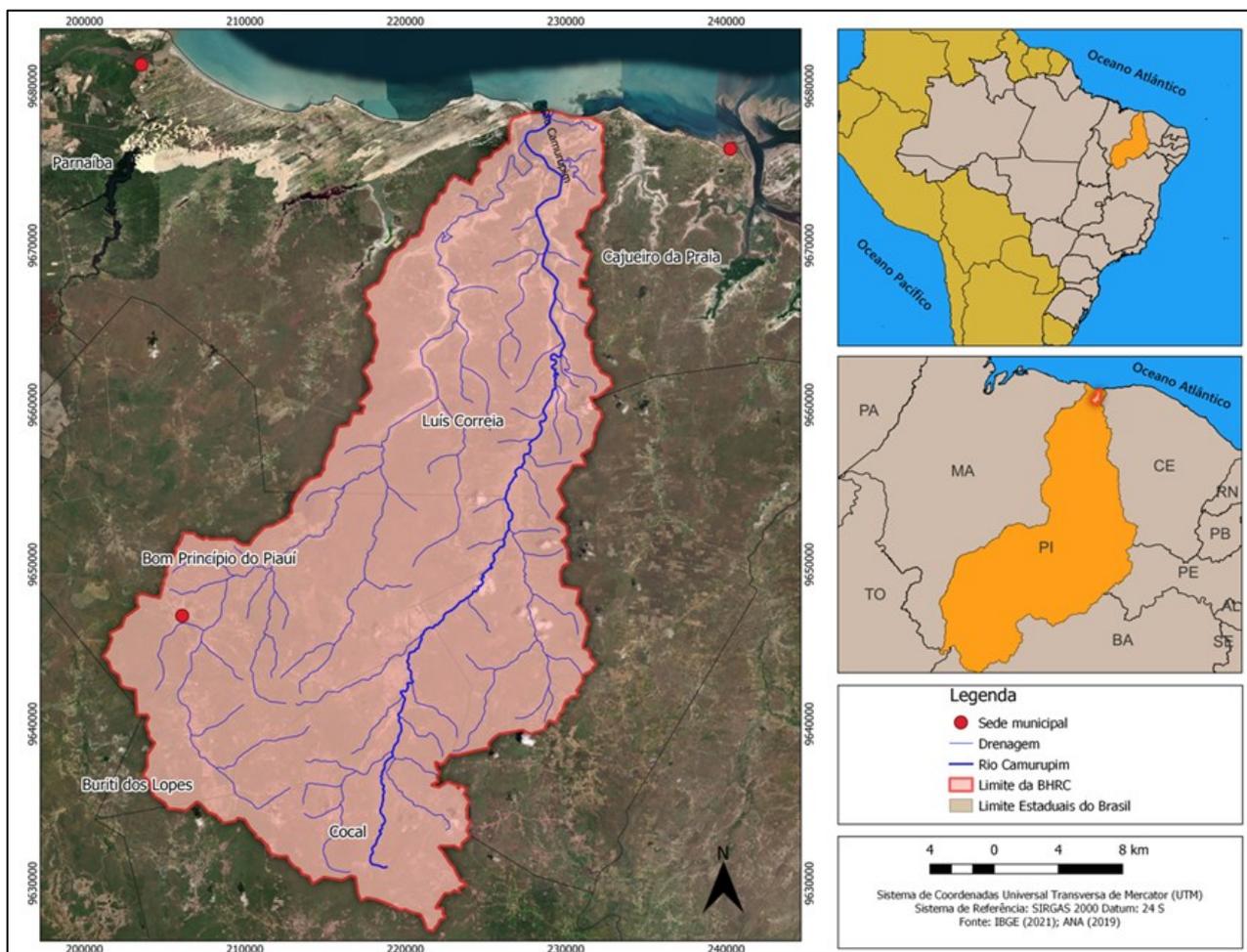
### 3. MATERIAL E MÉTODO

#### 3.1. Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Camurupim (BHRC), está localizada na região litorânea do Baixo Curso do Rio Parnaíba, entre as coordenadas 2° 54' 49' S de latitude e 41° 30' 26' O de longitude. É uma das seis sub-bacias costeiras do litoral piauiense (Lima, 2020). Com aproximadamente 820 km<sup>2</sup> de área, a BHRC compreende parte do território dos municípios de Luís Correia, Cajueiro da Praia, Bom Princípio do Piauí e Cocal (Figura 1). A área da bacia possui altitude que varia de 0m (jusante) a mais de 300 metros (montante).

A região onde se localiza a bacia possui um tipo climático semiárido, de acordo com a classificação climática do estado do Piauí, baseada em Thornthwaite (1948). Esse clima é caracterizado por baixa amplitude térmica anual, com precipitação e temperatura anual

variando entre 1.200 a 1.400 mm e 28°C a 30°C, respectivamente (Andrade Junior *et al.*, 2004).



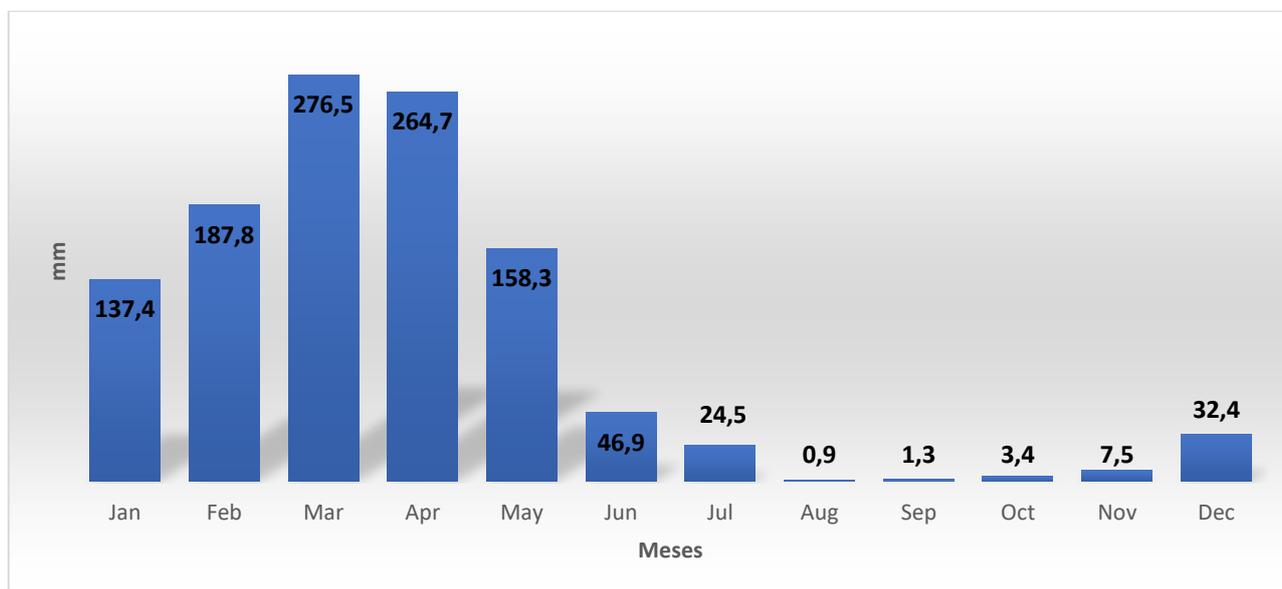
**Figura 1-** Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Camurupim

**Fonte:** Autores (2023)

Com base nos dados da média anual de precipitação (1981-2020) obtido pelo *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations* (CHIRPS) para a área da BHRC, observa-se o comportamento das chuvas, com a concentração do período chuvoso de dezembro a maio, e período seco de agosto a novembro. Silva *et al.* (2020), destacam a potencialidade do CHIRPS em reproduzir com boa precisão a variabilidade sazonal da precipitação (Figura 2).

A base geológica da bacia apresenta uma predominante estrutura sedimentar composta por sedimentos inconsolidados cenozoicos de origem marinha, fluvial, eólica ou combinada, caracterizados como Depósitos Quaternários (Sousa, 2019). Esses sedimentos são correlativos às superfícies de aplainamento do interior e compreendem os depósitos do Grupo Barreiras, datados do Plio-Pleistoceno. Eles incluem litotipos pertencentes à

sineclise do Parnaíba, contíguos aos sedimentos cenozoicos, além de áreas exumadas do embasamento cristalino (Fundação CEPRO, 1996). As unidades geológicas incluem o Grupo Barreiras, Depósitos Fluvio-marinhos, Aluviões Holocênicos, Grupo Serra Grande e Coberturas Detríticas Lateríticas. Em menor proporção, há a estrutura cristalina correspondente à unidade Suíte Intrusiva de Chaval e o Complexo Granja (Lima; Brandão, 2010; IBGE, 2019).



**Figura 2** - Distribuição média anual da precipitação da área da BHRC (1981 a 2020).

**Fonte:** Adaptado de CHIRPS.

Quanto às formas de relevo predominam superfícies planas e suaves ondulado das áreas litorâneas, os tabuleiros entalhados pela drenagem e dissecados em interflúvios, as superfícies pediplanadas e rochas do embasamento cristalinas exumadas pelos processos de morfogênese mecânica (FUNDAÇÃO CEPRO, 1996). A topografia rebaixada, do baixo curso do rio Parnaíba, contribui para a manutenção da umidade e precipitação da região, favorecendo os ambientes deposicionais, como as grandes planícies de inundação e planícies fluviomarinhas.

A Bacia Hidrográfica do Rio Camurupim (BHRC) apresenta unidades de paisagem em seu baixo curso, como a faixa de praia, dunas móveis e planícies fluviomarinhas. Esta última inclui subunidades como bosques de manguezais, apicuns e salgados, todas elas caracterizadas por uma alta vulnerabilidade ambiental natural às ações antrópicas (SOUSA, 2019).

As áreas mais altas na BHRC correspondem a montante da bacia, serras baixas, com 150 a 300m de altitude. Dentre as unidades de relevo tem-se a faixa de praia, planície de deflação eólica, planície fluviomarinha, planície fluvial, tabuleiros litorâneos e superfícies

aplainadas e dissecadas de Chaval (Sousa, 2019). Quanto aos tipos de solos apresentase, em geral, solos com Alta e muito Alta fragilidade aos processos erosivos, a citar: os Neossolo Quartzarênicos, Gleissolo Sáfico, Argissolo Amarelo, Argissolo Vermelho-Amarelo e os Planossolos (IBGE, 2019).

Os biomas arbóreos são reconhecidos na área, com a predominância da Caatinga arbustiva com mosaicos de espécies de cerrado, típicas de área de transição, além de extensos carnaubais, na região litorânea têm-se as restingas (Sousa, 2015). Quanto aos recursos hídricos, a BHRC se insere no contexto da Região Hidrográfica do Parnaíba, onde no litoral piauiense têm-se as bacias difusas, dentre elas a do Rio Camurupim, que tem como principais cursos d'água o Rio Camurupim e o Rio Cardoso, que formam uma única foz que desemboca no Oceano Atlântico, entre os municípios de Luís Correia e Cajueiro da Praia.

Os cursos dos rios Cardoso e Camurupim têm suas nascentes a leste do município de Bom Princípio do Piauí, em superfície de baixa elevação, em ambiente de relevos dissecados do Grupo Barreiras, que fazem contato com pedimentos conservados e dissecados do embasamento cristalino e formações paleomesozoica da Bacia do Parnaíba. O escoamento é condicionado pelo controle geológico de coberturas sedimentares (Barreiras) e falhas do embasamento cristalino por onde escoam o curso principal do rio Camurupim até a foz.

Quanto às formas de uso e ocupação da terra, a BHRC é essencialmente rural, dentre as principais atividades econômicas destacam-se a agropecuária, mesclando atividades de agricultura de subsistência e criação de bovinos e caprinos. Na área da bacia tem-se a sede do município de Bom Princípio do Piauí, que apresenta um baixo contingente populacional estimado em 5.670 habitantes, segundo o IBGE, 2021.

No baixo curso predominam atividades voltadas à produção de camarão (carcinicultura), pesca tradicional, mineração e ao turismo. A BHRC está parcialmente inserida na unidade de conservação da Área de Proteção Ambiental Delta do Parnaíba, cobrindo na área de estudo, a foz, a planície fluviomarina e parte dos tabuleiros costeiros recobertos por sedimentos quaternários (Brasil, 1996), a mesma é de uso sustentável dos recursos naturais (ICMBIO, 2020).

### **3.2. Procedimentos metodológicos**

A pesquisa foi dividida em três etapas: na primeira, foram realizadas pesquisas bibliográficas, principalmente em periódicos científicos, sobre a temática e aquisição de

dados cartográficos. Na segunda etapa, foram realizados levantamentos de campo com o uso de uma câmera fotográfica e do GPS Garmin para coleta de pontos de coordenadas, com o propósito de verificar *in loco* as características e atributos físicos e antrópicos da área de estudo. A terceira etapa consistiu na elaboração dos mapas e na modelagem para determinar a Fragilidade Ambiental Potencial e Emergente para a BHRC, com base na proposta de Ross (1994; 2012) e na literatura especializada.

Inicialmente realizou-se a estruturação e organização de um Banco de Dados Geográficos (BDG), em ambiente SIG. Os dados geográficos (vetores e *raster*) foram obtidos de forma gratuita, por meio de órgãos oficiais (ANA, IBGE, CPRM, MAPBIOMAS, IPEF, EMBRAPA, INPE). Em seguida, foram analisados, processados e refinados de forma combinada no software QGIS versão 3.22.9 e ArcGIS PRO (licença gratuita). O referencial geodésico utilizado na elaboração dos mapas temáticos foi o SIRGAS 2000, e o Sistema de Projeção *Universal Transversa Mercator* (UTM) para a zona 24S. Para os diferentes planos de informação (PIs) adotou-se a escala de 1:200.000.

Conforme Ross (1994; 2012) para cada critério foram estabelecidos pesos das classes de fragilidade ambiental, de acordo com a avaliação técnica de suas características: 1 (Muito Baixa), 2 (Baixa), 3 (Média), 4 (Alta) e 5 (Muito Alta).

A ponderação dos níveis de fragilidade para cada tema relaciona-se à resistência aos processos erosivos, sedimentação e risco de degradação, considerando características individuais de cada critério e dos fatores externos que podem influenciar na sua maior ou menor fragilidade.

Os pesos atribuídos para fragilidade ambiental dos critérios de cada camada foram implementados de acordo com fundamentação técnica e baseado na literatura especializada para cada tema: Geologia, Solos, Clima, relevo (*Geomorphons*, Índice de Dissecação do Relevo) e uso e cobertura da terra.

### 3.2.1. Geologia

Os dados de geologia em formato vetorial, foram adquiridos no banco de dados e informações espaciais (BDiA) do IBGE, com adaptação para a escala de 1:200.000. A área de estudo é representada pelas seguintes classes: Depósitos litorâneos, depósitos costeiros, depósitos de pântanos e mangues, depósitos fluviomarinhos, depósitos aluvionares, Serra Grande, Cobertura Detrítica Laterítica, Grupo Barreiras, Granja e Suíte intrusiva de Chaval, que foram hierarquizados em graus de Baixa a Muito Alta (Quadro 1).

A definição das classes e graus de fragilidade para o mapa de geologia se basearam em Ross (1994; 2012) e Franco *et al.* (2012).

**Quadro 1:** Classes de fragilidade para geologia da BHRC.

Peso	Classes de fragilidade	Geologia
1	Muito Baixa	-
2	Baixa	Suíte Intrusiva de Chaval Granja
3	Média	Grupo Barreiras
4	Alta	Cobertura Detrítica Laterítica Serra Grande
5	Muito Alta	Depósitos litorâneos
		Depósitos eólicos costeiros
		Depósitos de pântanos de mangues
		Depósitos fluviomarinhos
		Depósitos aluvionares

**Fonte:** Adaptado de Ross (1994;2012), Franco *et al.* (2012) e IBGE (2019).

### 3.2.2. Solos

Os dados de solos em formato vetorial, foram adquiridos no banco de dados e informações espaciais (BDiA) do IBGE, que tem por base mapeamentos pré-existentes do Projeto RADAMBRASIL, com adaptação para a escala de 1:200.000. A caracterização levou em consideração levantamentos pedológicos realizados na área (Cabral; Valadares; Aquino, 2020; Cabral *et al.*, 2019; Valladares *et al.*, 2019) e as diretrizes do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Embrapa, 2013).

A área de estudo é representada pelas seguintes classes: Argissolo Amarelo Distrófico, Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, Neossolo Litólico Distrófico, Neossolo Quartzarênico Órtico, Planossolo Háptico Eutrófico e os Gleissolo Sálico Sódico que foram hierarquizados em 2 classes de fragilidade Alta e Muito Alta (Quadro 2).

**Quadro 2:** Classes de fragilidade para solos da BHRC.

Peso	Classes de fragilidade	Classes de Solos	Textura
1	Muito Baixa	-	-
2	Baixa	-	-
3	Média	-	-
4	Alta	Argissolo Amarelo Distrófico	Arenosa/média
		Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	Arenosa/argilosa e Arenosa/média
5	Muito Alta	Neossolo Litólico Distrófico	Arenosa/Média
		Neossolo Quartzarênico Órtico	Arenosa
		Planossolo Háptico Eutrófico	Arenosa/argilosa e arenosa/média
		Gleissolo Sálico Sódico	Indiscriminada

**Fonte:** Adaptado de Ross e Fierz (2017), EMBRAPA (2020).

### 3.2.3. Clima

Os dados de clima levaram em consideração o mapa de classificação climática Köppen para o Brasil (Alvares *et al.*, 2014), do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais-IPEF, disponível em formato *raster* em (<http://www.ipef.br/geodatabase/>). Os tipos climáticos de Köppen são simbolizados por dois ou três caracteres, onde o primeiro indica a zona climática e é definido pela temperatura e precipitação, o segundo considera a distribuição das chuvas e, o terceiro, a variação sazonal da temperatura (Alvares *et al.*, 2014). A classificação estabelece para a região da BHRC o clima tropical (As) quente e úmido com chuvas de inverno, com distribuição desigual da precipitação com período seco entre 3 e 6 meses, conforme o quadro 3.

**Quadro 3** - Clima e comportamentos Pluviométricos da região da BHRC.

Classes de clima	Valor Raster (DN)	Situação da Precipitação Pluviométrica	Peso Novo (DN)	Fragilidade
<b>As</b>	10	Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com período seco entre 3 e 6 meses, alta concentração das chuvas no verão entre novembro e abril, quando ocorrem de 70 a 80% do total das chuvas	4	Alta

**Fonte:** Adaptado de Massa e Ross (2012).

### 3.2.4. Geomorfologia

A variável geomorfologia levou em consideração a identificação das formas de relevo a partir dos *Geomorphons*, conforme Jasiewicz; Stepinski, (2013) e do Índice de Dissecação do relevo (IDR), conforme Guimarães *et al.* (2015). Para a classificação automatizada do relevo da BHRC foi utilizado o MDE TOPODATA com resolução espacial de 30m, obtido na Divisão de Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (DSR, 2020).

Para o mapa das formas de relevo a partir do *Geomorphos*, utilizou-se o programa SAGA GIS, para a classificação automatizada do relevo (Amorim; Capoane, 2022). O módulo delinea 10 unidades de relevo (plano, pico, crista, ressalto, crista secundária, encosta, fosso, vale, base de encosta, e escavado), aplicando um algoritmo de reconhecimento padrão que se baseia em um raio de busca de vizinhança local a partir de

um ponto focal central (Jasiewiczza; Stepinski, 2013). Os pesos obtidos para os *Geomorphons* levaram em consideração Gouveia e Ross (2019) (Quadro 4).

**Quadro 4:** Classes de fragilidade para as formas de relevo *Geomorphos* da BHRC.

Peso	Classes de fragilidade	Geomorphos
1	Muito Baixa	
2	Baixa	Topos – picos (2), cristas (3), ressalto (4) e cristas secundárias (5)
3	Média	Vertentes convexas e plano convexas – encostas (6)
4	Alta	Planície fluvio-marinha – Plano (1)
5	Muito Alta	Vertentes côncava e plano-concavas -bases das encostas (9) e escavados (10) Planície Fluvial – fossos (7) e vales (8)

**Fonte:** Adaptado de Gouveia e Ross (2019).

O mapa do Índice de Dissecação do Relevo (IDR) corresponde a uma análise morfométrica e morfológica que avalia o grau de entalhamento do vale em relação à dimensão interfluvial média, utilizando os perfis dos vales que representam cada classe de dissecação da matriz de Ross (1994). O IDR é classificado hierarquicamente em muito fraca, fraca, média, forte e muito forte para fins de fragilidade ambiental (Guimarães *et al.*, 2017; Souza *et al.*, 2020) (Tabela 1). No caso da BHRC, observaram-se duas classes: forte e muito forte.

**Tabela 1:** Classes de Fragilidade com base no IDR.

Classe de Fragilidade	Matriz
Muito fraca	11
fraca	21, 22, 12
Média	31, 32, 33, 13, 23
Forte	41, 42, 43, 44, 14, 24, 34
Muito forte	51, 52, 53, 54, 55, 15, 25, 35, 45

**Fonte:** Adaptado de Ross e Fierz (2017).

### 3.2.5. Uso e cobertura das terras

Os dados *raster* do mapa de uso e cobertura da terra da BHRC foram obtidos por meio da plataforma do MapBiomias (2021), coleção 7. As classes foram reclassificadas usando a ferramenta “reclassificação por tabela” manipuladas no software QGIS, com adaptações para a área de interesse, com a inclusão de subclasses e agrupamento de outras.

Foram identificadas 11 classes de uso e cobertura da terra: formação florestal, formação Savânica, mangue, formação não florestal, apicum, agropecuária, duna, área urbanizada, outras áreas não vegetadas, rio e aquicultura, essas duas últimas classes foram atribuídas notas zero para os graus de fragilidade. A definição dos pesos das classes

de fragilidade levou em consideração Ross e Fierz (2017), quanto aos graus de proteção dos solos (Quadro 5).

**Quadro 5.** Classes de fragilidade para a cobertura vegetal e uso das terras da BHRC.

Peso	Classes de fragilidade	Uso e cobertura da terra (2021)
1	Muito Baixa	Formação Florestal
2	Baixa	Formação Savânica
		Mangue
3	Média	Formação Natural não Florestal
4	Alta	Apicum
		Agropecuária
5	Muito alta	Duna
		Área urbanizada
		Outras áreas não vegetadas
-	-	Rio
-	-	Aquicultura

Fonte: Adaptado de Ross e Fierz (2017) e Mapbiomas (2021).

### 3.2.6. Procedimento operacional para a análise da Fragilidade Ambiental

A produção dos mapas de FAP e FAE foram realizadas por meio de rotinas, partir da combinação dos planos de informação (método *booleano*), onde foram reclassificados e atribuídos os pesos para cada classe, posteriormente a procedeu-se com a conversão de dados vetoriais, mapas bases, em formato matricial (*raster*), com tamanho de célula de 30 m. Posteriormente, por meio de Álgebra de Mapas, foi utilizada a ferramenta *raster calculator* do ArcGIS para o desenvolvimento das operações.

A determinação da fragilidade ambiental potencial (FAP) e emergente (FAE) foi realizada utilizando as seguintes equações:

$$(Eq.1) FAP = ([G] + [S] + [C] + [R] + [IDR]) / 5$$

$$(Eq.2) FAE = [FAP] + [UT] / 2$$

Onde:

FAP: fragilidade ambiental potencial

FAE: fragilidade ambiental emergente

G: fragilidade das classes de geologia

S: fragilidade das classes de solos

C: fragilidade das classes de Clima

R: fragilidade das classes das formas de relevo

DR: fragilidade do índice de dissecação do relevo

UT: fragilidade das classes de uso e cobertura da terra

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A exploração dos recursos naturais, sobretudo por motivação econômica, vem comprometendo a estabilidade dos ambientes naturais e conseqüentemente degradando os solos (Santos, Marchioro, 2020). O conhecimento das classes de fragilidade dos ambientes e sua associação às intervenções humanas contribuem para prever cenários de impactos socioambientais decorrentes do uso inadequado da terra.

O uso e cobertura da terra em 2021 obtiveram-se para a área da BHRC, 11 classes: formação florestal (61,23%), formação Savânica (29,56%), mangue (1,73%), apicum (1,42%), formação florestal não natural (0,28%), agropecuária (1,65%), duna (0,91%), área urbanizada (0,15%), área não vegetada (0,81%), aquicultura (0,82%) e o rio (1,44%), este último representando os recursos hídricos superficiais.

A espacialização das classes para os anos de 1985 e 2021 é apresentada na Figura 3, onde se observa que, no intervalo de 36 anos, a área teve poucas alterações antrópicas. As classes de mangue e dunas (com uma pequena porção na bacia) mantiveram-se estáveis, enquanto a classe de aquicultura apresentou um crescimento de 4,82% em área. Por outro lado, a classe de apicum mostrou uma perda de 0,29% de área, relacionada diretamente ao aumento da classe de aquicultura, com a instalação de tanques de carcinicultura no baixo curso da BHRC.

A agropecuária é a principal atividade econômica da região, com um aumento de 1,13% de área. Essa classe envolve as subclasses de agricultura de subsistência e pastagem. A classe da área urbana teve um acréscimo de 0,10% na BHRC, correspondendo à sede do município de Bom Princípio do Piauí, uma cidade pequena com baixa estrutura urbana, e uma população essencialmente rural (68,82%), conforme IBGE (2021).

A tabela 2 complementa a análise com a quantificação de cada classe mapeada na área de estudo. Dessa forma, entender a dinâmica de uso é importante, pois permite avaliar de forma integrada quais são os principais agentes naturais e antrópicos presentes na paisagem e suas conexões.

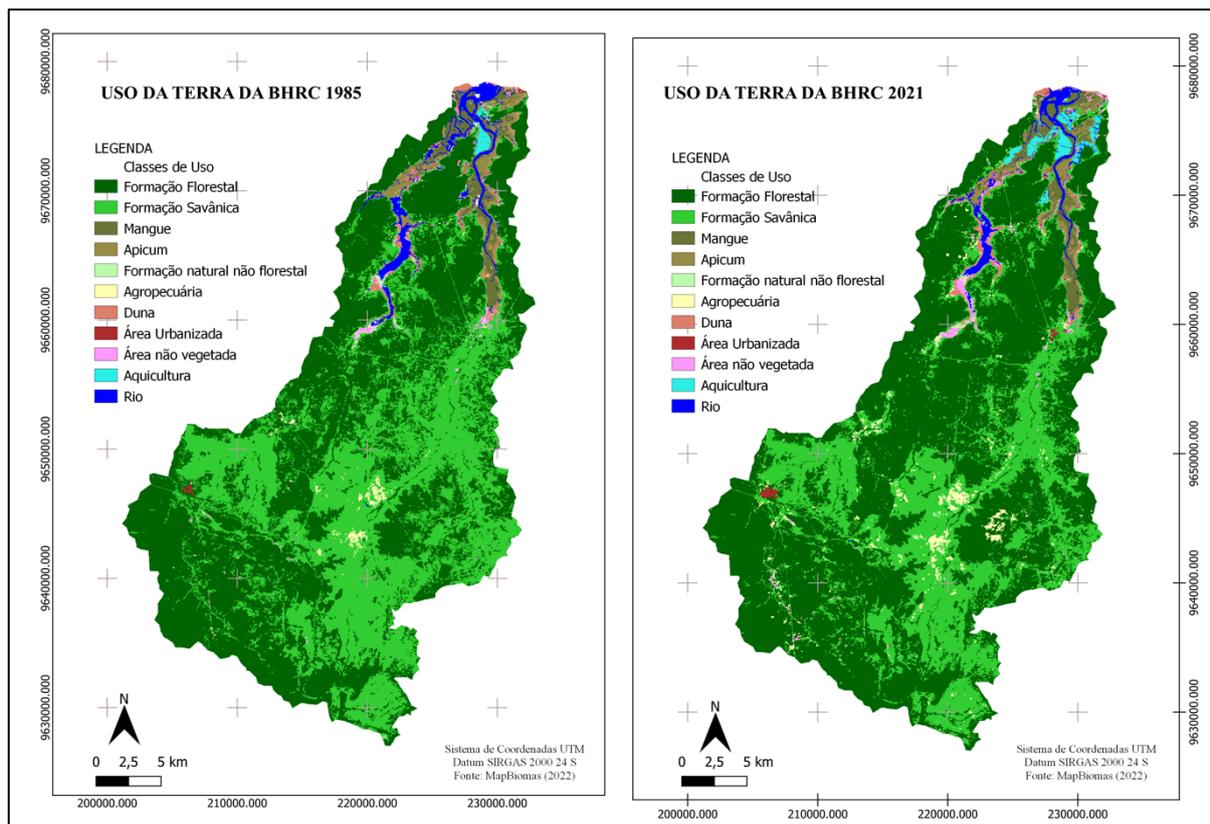


Figura 3 - Uso e ocupação da terra da BHRC (1985-2021).

Fonte: adaptado de MapBiomias (2022).

Tabela 2: Quantificação das classes de uso e ocupação da terra da BHRC.

Classes de uso e cobertura da terra	Área da Classe (km <sup>2</sup> ) 1985	Área da Classe (%) 1985	Área da Classe (km <sup>2</sup> ) 2021	Área da Classe (%) 2021	Ganho/Perda (%)
Formação Florestal	441,65	53,34	507,17	61,23	+7,89
Formação Savânica	321,95	38,88	244,85	29,56	- 9,32
Mangue	13,67	1,65	14,31	1,73	+0,08
Apicum	14,16	1,71	11,77	1,42	-0,29
Formação Natural não Florestal	1,91	0,23	2,36	0,28	+0,05
Agropecuária	4,29	0,52	13,66	1,65	+1,13
Duna	7,49	0,90	7,56	0,91	+0,01
Área urbanizada	0,44	0,05	1,22	0,15	+0,10
Outras áreas não vegetadas	4,30	0,52	6,75	0,81	+0,29
Aqüicultura	1,98	0,24	6,80	0,82	+0,58
Rio	16,16	1,95	11,90	1,44	+0,51

Fonte: Adaptado MapBiomias (2022)

A classe mais representativa foi a de formação florestal, que se manteve conservada devido à ausência de significativas atividades socioeconômicas. Entre os anos de 1985 e 2021, essa classe teve um aumento de 7,89% de área, indicando estabilidade e ausência de alterações. Essa classe desempenha um papel crucial como estabilizadora da paisagem, uma vez que protege o solo contra processos erosivos, facilita a distribuição,

infiltração e acúmulo das águas pluviais, e influencia nas condições climáticas do ambiente (Almeida; Cunha; Nascimento, 2012). A cobertura vegetal da área lembra fisionomicamente áreas de Caatinga ou transição Cerrado/Caatinga, com vegetação lenhosa de porte baixo (Figura 4). Nas proximidades da área, observam-se culturas agrícolas caracterizadas como atividade de agricultura familiar/subsistência.



**Figura 4** - Fisionomia de Savana Estépica Florestada associada a presença de Carnaúbas.

**Fonte:** Sousa (2022) (Foto: outubro de 2022).

A segunda classe mais representativa na área de estudo é a formação Savânica, caracterizada, segundo o Mapbiomas (2022), como um tipo de vegetação com predomínio de espécies de dossel semi-contínuo. Essa classe teve uma perda de área de 9,32%, possivelmente devido à supressão da cobertura para áreas de pasto. A área possui uma vegetação esparçada que permite o desenvolvimento de criação de animais como caprinos, ovinos, bovinos, suínos, etc. A limpeza do terreno é realizada pelas comunidades locais por meio de queimadas (Figura 5).



**Figura 5** - Área de solo exposto com vegetação típica de caatinga e presença de carnaúbas associada a pasto, zona rural de Luís Correia (PI). **Fonte:** Sousa (2022) (Foto: outubro de 2022).

As áreas mais altas da BHRC apresentam relevos ondulados com topos panos, compreendendo o alto curso (Figura 6). Apresenta solos rasos do tipo Neossolos Litólicos e presença de Argissolos Amarelo e Vermelho-Amarelo. A cobertura vegetal é típica de caatinga, e a geologia está associada ao Grupo Serra Grande (arenito, conglomerado, siltito, folhelho) em contato com a Suíte Intrusiva de Chaval (granito).



**Figura 6** - a) Serras baixas com topo plano associada a extensos vales com a supressão da cobertura vegetal através de queimada para pasto. b) morros com topo convexo com afloramento rochoso.

**Fonte:** Sousa (2022).

O uso e cobertura das terras representam parâmetros fundamentais no entendimento da fragilidade ambiental dos ecossistemas. Esse fator possui uma relação direta com os impactos gerados no solo, na cobertura vegetal e nos recursos da terra, sendo determinante para a maior ou menor fragilidade e risco de degradação ambiental (França; Mucida, 2022).

#### 4.1. Fragilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Camurupim (BHRC)

A partir da integração dos planos de informação do meio físico-natural e antrópico (uso e cobertura da terra), foram gerados os mapas de fragilidade ambiental potencial (FAP) e emergente (FAE) para a BHRC. Nessas análises, foram atribuídos parâmetros de classes de muito baixa a muito alta, conforme proposto por Ross (1994; 2012), além de pesos para cada variável analisada, levando em consideração a literatura especializada.

Para o mapa da FAP, que analisou a integração dos condicionantes da paisagem, obtiveram-se as seguintes classes: muito baixa (2,07%), baixa (6,62%), média (15,32%), alta (28,41%) e muito alta (47,58%). Já para o mapeamento da fragilidade ambiental que inclui as coberturas e usos antrópicos, obteve-se as classes: muito baixa (6,05%), baixa (74,36%), média (15,22%), alta (4,34%) e muito alta (0,03%), conforme a Figura 7.

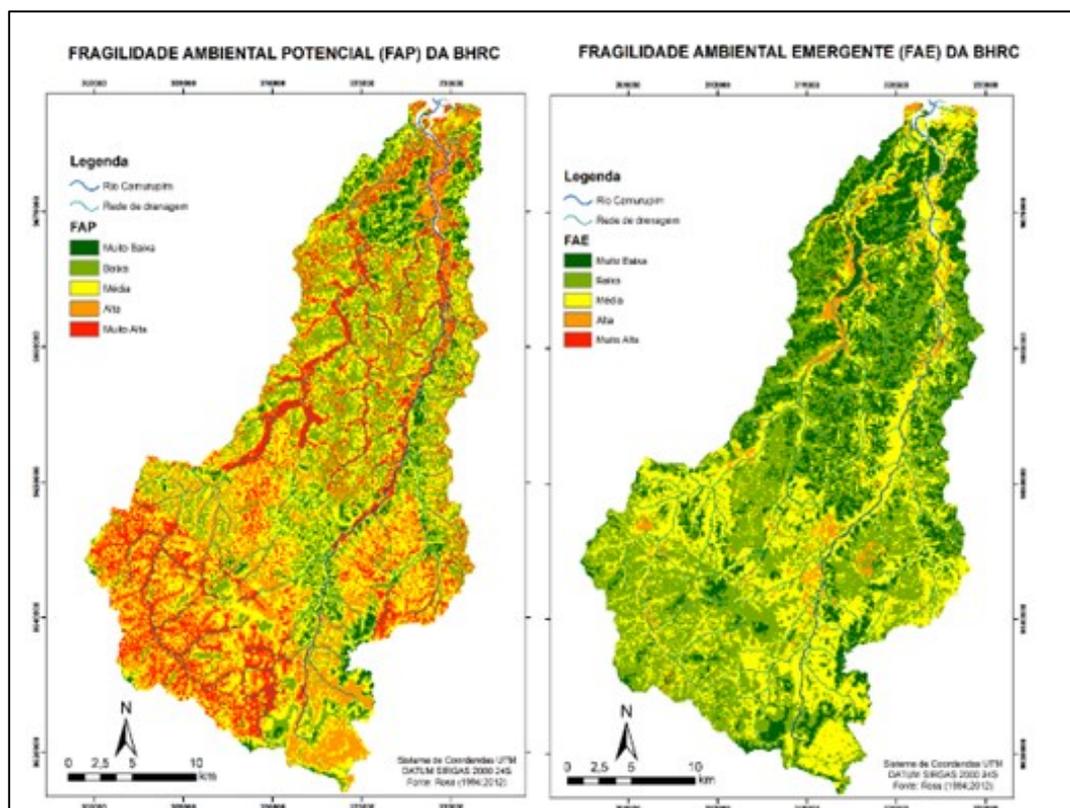
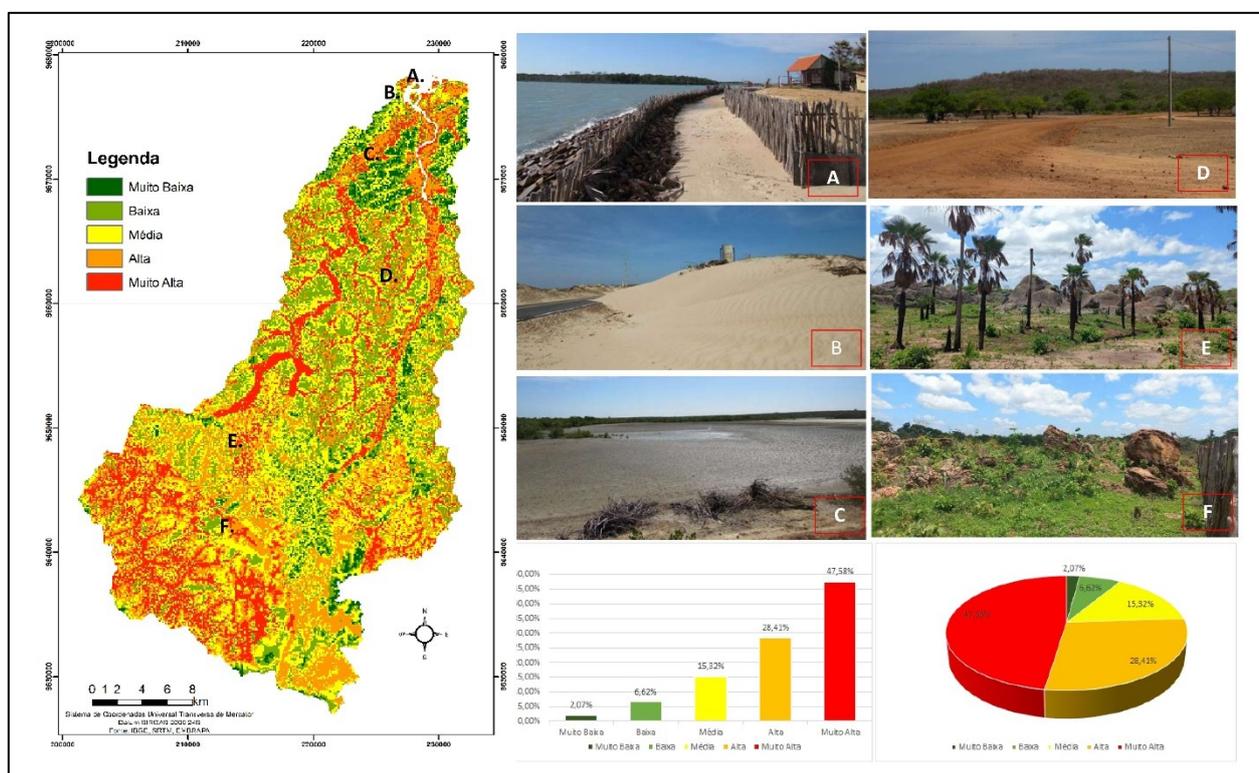


Figura 7 - Mapa de fragilidade ambiental potencial e ambiental para a BHRC.

Fonte: Sousa (2023).

O mapeamento da FAP evidencia a influência do relevo como um importante fator de condicionamento da fragilidade, destacando os vales e as áreas inundáveis da bacia, como as planícies fluvio-marinhas e fluviais, destacadas em vermelho no mapa (Figura 8). O mapa final de FAE, gerado a partir da sobreposição entre o mapa de FAP e o uso e cobertura da terra, reflete as possíveis classes de fragilidade frente aos impactos ambientais a serem provocados pelas ações antrópicas, o que influenciará tanto no meio biótico como social.

Observa-se que apenas 19,59% da área da bacia apresenta fragilidade ambiental emergente, que varia de média a alta. Essas classes correspondem principalmente às planícies fluviais e fluviomarinhas.



**Figura 8** – Espacialização das paisagens no mapa de fragilidade ambiental potencial da BHRC.

A) Estuário do rio Camurupim, com a presença de estacas e rochas de contenção da erosão costeira na praia de Macapá em Luís Correia (LC); B) Dunas ativas com avanço para a rodovia; C) Planície de apicum situado as margens do manguezal em LC; D) Área de solo exposto e relevo plano na comunidade rural de Campos (LC); E) afloramento de rochas graníticas intrusivas em área plana com presença de carnaubal; F) afloramento de rochas detríticas areníticas na zona rural de LC.

**Fonte:** Sousa (2023)

Segundo Santos e Marchioro (2020), a determinação da fragilidade ambiental potencial pode indicar o equilíbrio dinâmico natural sem a intervenção humana. Segundo os autores, predominam os processos pedogenéticos para as classes muito baixa a baixa, e os processos morfogenéticos para as classes alta e muito alta. Entende-se, na pesquisa, a FAP como sendo a estabilidade do meio físico-natural quanto às suas condições naturais, enquanto sistema aberto.

O mapeamento das classes de fragilidade permite compreender as interações dinâmicas que atuam sobre o sistema natural da bacia hidrográfica do Rio Camurupim e, assim, reconhecer as limitações a partir do uso da terra, visando à proteção ambiental das áreas mais vulneráveis.

Quanto às classes alta e muito alta da FAP, observou-se que correspondem à maior porção da área da bacia, totalizando 75,99%. Essas áreas compreendem a faixa costeira, as áreas da planície fluvio-marinha, bem como as planícies de inundação dos rios Cardoso/Camurupim e seus afluentes. De acordo com Gouveia e Ross (2019), as áreas de planícies de inundação configuram-se como de fragilidade alta e muito alta devido à instabilidade do terreno em relação aos riscos de inundação.

O relevo nesse setor é pouco dissecado, apresentando características planas e suavemente onduladas, correspondendo aos geomorfos plano (1), fossos (7) e vales (8). Os elementos de áreas planas caracterizam um relevo pouco movimentado na bacia hidrográfica, especialmente em sua porção norte, no baixo curso. Esse padrão predomina na planície costeira, composta por depósitos sedimentares quaternários associados a variações relativas do mar, e na planície de inundação. Os vales e fossos se associam aos canais de drenagem mais encaixados no relevo e aos processos fluviais.

Os parâmetros morfológicos permitiram identificar áreas de planícies, evitando a classificação dessas áreas como sem restrições do meio físico (Gouveia; Ross, 2019). Quanto ao IDR, nesses setores, apresentou o grau 4, considerado forte. Esse grau corresponde à morfometria com topos planos e convexos, amplos canais de forte entalhamento ou formas de topos planos ou convexos de pequena dimensão interfluvial e médio entalhamento dos canais (Ross, 2012).

Os solos dessa porção pertencem às classes de Gleissolos, Planossolos e Neossolos Quartzarênicos. De acordo com Cabral e Valladares (2015), embora situados em relevo plano, esses solos apresentam alta suscetibilidade aos processos erosivos devido ao seu gradiente textural. Gouveia e Ross (2019), assim como Souza *et al.*, (2020), estabelecem para essas classes de solos os níveis de fragilidade Alta e Muito Alta.

Cabral e Valladares (2015) realizaram a caracterização desses solos para avaliação de aptidão agrícola na planície costeira do estado do Piauí. Segundo os autores, há uma variabilidade de solos na zona costeira, indicando diferentes potenciais agrícolas e exigindo estratégias de manejo para conservação ambiental.

Quanto aos tipos de solos, os Gleissolos Sódico Sódico estão presentes na área da planície fluvio-marinha dos rios Cardoso/Camurupim. Encontrados em relevo plano, esses solos não apresentam potencialidade agrícola devido à presença de lençol freático elevado e ao risco de inundações ou alagamentos frequentes, com forte limitação ao uso de máquinas agrícolas (Figura 8). A concentração de sais solúveis no solo é alta, e a

dessalinização é inviável devido à proximidade com o mar, sendo recomendados para preservação ambiental (Embrapa, 2013).



**Figura 8** - Apicum associado à vegetação de mangue, com canal de maré, relevo plano, Gleissolos.

**Fonte:** Sousa (2022).

Devido à conexão direta com os cursos d'água, as paisagens desses solos constituem áreas vulneráveis que devem ser manejadas com cuidado, evitando a poluição e a retirada excessiva de água do sistema (Cabral; Valladares; Aquino, 2020). Esses solos estão associados à carcinicultura, que é implantada nessas áreas nas proximidades do ecossistema de Mangue. Essas atividades provocam impactos significativos, como aterramento e desmatamento da vegetação de mangue, além do lançamento de efluentes, entre outros (Fernandes *et al.*, 2018).

Os Planossolos Háplicos compreendem solos de muito alta fragilidade, localizados em áreas de relevo plano. Apresentam minerais que se caracterizam pela acentuada diferença textural entre o horizonte B plânico e o subjacente. Esses solos mostram condições de drenagem geralmente imperfeita ou má, com permeabilidade muito lenta, podendo ser responsáveis pela presença episódica de lençol freático suspenso.

Segundo Cabral e Valladares (2015), sua susceptibilidade à erosão é significativa devido ao acentuado gradiente textural e ao fato de a textura do horizonte superficial ser mais leve, o que resulta em menor retenção de água e nutrientes, menor agregação e, portanto, menor resistência aos processos erosivos. Apesar disso, esses solos podem ser aptos para culturas adaptadas ao eventual excesso de umidade.

Os Neossolos Quartzarênicos estão situados em áreas de relevo plano e suavemente ondulado, presentes na paisagem das planícies de deflação eólica e tabuleiros costeiros. Esses solos possuem baixa fertilidade, retenção natural e disponibilidade de água, sendo

caracterizados por altas taxas de infiltração. Cabral e Valladares (2015) descrevem-nos como solos arenosos, com elevada permeabilidade, porém apresentando baixa aptidão agrícola, o que pode resultar em baixas produtividades, destacando-se apenas para culturas de coqueiros e cajueiros. Na área de estudo, esses solos têm sido utilizados para pastagem, material de empréstimo e ocupados de forma desordenada.

Dentre os principais impactos ambientais encontrados no baixo curso da BHRC, destacam-se a prática de mineração, aquicultura, desmatamento, aterro inapropriado, caça e pesca irregular, uso agrícola acima da capacidade de suporte do solo, entre outras atividades que conduzem à degradação ambiental, incluindo a do solo (Valladares *et al.*, 2019).

A geologia dessas áreas está associada aos depósitos costeiros e depósitos aluvionares. Os depósitos costeiros e fluvio-aluviais quaternários, devido ao baixo grau de coesão e alta dinâmica, apresentam classe alta e muito alta de fragilidade. Por outro lado, os baixos graus de fragilidade ambiental referem-se ao alto grau de competência das rochas, sendo muito resistentes ao intemperismo e aos processos erosivos (Souza *et al.*, 2020; Campos *et al.*, 2021).

No alto curso da bacia, também se observou níveis de fragilidade alta e muito alta. Essa área é caracterizada por um relevo suave ondulado a escarpado, apresentando um conjunto de serras baixas associadas a extensos vales fluviais. Essas características correspondem aos Geomorphos de morros com vertentes côncavas e plano-côncavas - bases das encostas (9) e escavados (10). As encostas possuem declividade entre 8% e 20%, estando localizadas em áreas de interflúvio dos cursos fluviais, resultando em depósitos coluviais com leques aluviais quaternários.

Junto aos canais de drenagem, encontram-se elementos ligados ao padrão escavado, indicando áreas convergentes do relevo, geralmente associadas a canais de drenagem nas porções mais altas da encosta. Os solos dessa área são os Neossolos Litólicos, Argissolos Amarelos e Argissolos Vermelho-Amarelos. A geologia da área corresponde aos sedimentos do Grupo Serra Grande, às Coberturas Detríticas Lateríticas e aos afloramentos rochosos da Suíte Intrusiva de Chaval.

A determinação da FAE levou em consideração o estágio de estabilidade da paisagem em relação às atividades humanas, sendo o resultado da combinação das variáveis físico-naturais e antrópicas (uso e cobertura das terras). Para a BHRC, foi constatado que a classe baixa e muito baixa teve relação direta com as porções que indicaram classes média e alta nos resultados da fragilidade potencial. Assim como em Silveira e Oka-Fiori (2007), essas

áreas foram atenuadas em virtude da presença da significativa cobertura vegetal conservada ou que apresentaram mínimas alterações em relação às atividades humanas.

Segundo Santos e Marchioro (2020), essas áreas passam a amenizar a atuação de processos erosivos, movimentos de massa e inundação, caracterizando-se como áreas de estabilidade aos parâmetros naturais e antrópicos. Valle *et al.* (2016) destacam que a cobertura florestal garante a manutenção das relações ecológicas, auxiliando na redução da suscetibilidade à erosão dos solos e à inundação das planícies fluviais. Nesse sentido, as futuras alterações do uso da terra podem dinamizar essas mudanças, provocando aumentos dos processos físicos e, com a supressão da cobertura vegetal, levar a uma nova FAE.

BHRC, a classe alta representa as porções das áreas de planícies fluviais (inundação), a área de dunas, faixa de praia, a área urbana e as áreas que possuem de forma significativa a presença de agropecuária e/ou solo exposto.

A classe média representa as porções que correspondem diretamente à cobertura vegetal da área de estudo, como os bosques de mangues e a cobertura savânica florestada, o que contribui para a proteção do solo. Destaca-se que nessa classe existem atividades socioeconômicas integradas de pasto e agricultura de subsistência, principalmente nas margens das planícies fluviais, que precisam ser monitoradas. Contudo, as características de fragilidade predominante da FAE foram muito baixa, baixa e média, principalmente devido à presença da cobertura vegetal conservada associada às atividades socioeconômicas de pasto e à agricultura de subsistência.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A BHRC apresentou áreas com classes média (15,32%), alta (28,41%) e muito alta (47,58%) no mapeamento da FAP. Os dados revelam que a bacia possui elementos geoambientais naturalmente frágeis às atividades humanas, com apenas 2,07% e 6,62% para as classes baixa e muito baixa, respectivamente. As variáveis mais significativas para esses dados foram o relevo e os solos, ambos mostrando características que, somadas à paisagem semiárida, apresentam ambientes naturalmente frágeis à degradação dos solos.

Para a fragilidade ambiental emergente (FAE), predominaram as classes de áreas baixa (6,62%) e muito baixa (74,36%). Diante desse resultado, entende-se que, embora a BHRC apresente sistemas ambientais frágeis no seu baixo curso, bem como atividades socioeconômicas associadas (pastagem e agricultura de subsistência), ela possui uma cobertura vegetal significativa que atua como estabilizadora aos processos erosivos em

toda a bacia. Além disso, a maioria dos solos com textura arenosa dificulta a diversificação produtiva na área, predominando a agricultura de subsistência e pasto.

Observou-se também a necessidade de fiscalização nas áreas correspondentes aos apicuns, evitando que este ecossistema seja convertido em tanques de carcinicultura e altere a estabilidade dos bosques de manguezais, bem como a capacidade de resiliência do mesmo. Chama-se atenção às atividades de mineração, como a extração de areia e pedra, para que possam ser fiscalizadas e atenuem a degradação da paisagem.

As geotecnologias foram fundamentais para a realização da modelagem dos atributos físico-naturais e determinação das classes de fragilidade ambiental potencial e emergente, bem como as inspeções de campo para a conferência das classes de fragilidade e validação dos mapeamentos. Destaca-se a necessidade de monitoramento da área para futuras implantações de empreendimentos, dada a natureza frágil dos sistemas ambientais.

Por fim, espera-se que os resultados da pesquisa possam servir de subsídio para o planejamento ambiental integrado na área da bacia e prover outros estudos, a fim de discutir políticas públicas de ordenamento territorial, evitando que processos erosivos de degradação ambiental comprometam os recursos naturais

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a FAPEPI/CAPES pelo financiamento da pesquisa, concedendo a bolsa de pós-doutorado à primeira autora.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, E. L. S.; MEDEIROS, C. N. Vulnerabilidade socioambiental em bacias hidrográficas no Setor Leste Metropolitano de Fortaleza, Ceará. **Ateliê Geográfico**, v. 11, n. 1, p. 109–126, 2017.

ALMEIDA, N. V.; CUNHA, S. B. A cobertura vegetal e sua importância na análise morfodinâmica da bacia hidrográfica do rio Taperoá – nordeste do Brasil/Paraíba. **Revista Geonorte**, v. 3, n. 4, p. 365-378, 2012.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

AMORIM, A. T.; SOUSA, J. A. P.; PIROLI, E. L. O uso das métricas de ecologia da paisagem para análise dos padrões espaciais da Sub-Bacia hidrográfica do Ribeirão da Boa Vista. **Formação (Online)**, v. 28, n. 53, p. 625-642, 2021.

SILVA, E. R. M. *et al.* Análise do Desempenho da Estimativa de Precipitação do Produto CHIRPS para Sub-Bacia do Rio Apeú, Castanhal-PA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 1094-1105, 2020.

ANDRADE JUNIOR, A. S. *et al.* **Atlas Climatológico do Estado do Piauí**. Teresina: EMBRAPA Meio Norte, 2004. 151p.

BRASIL. **Decreto n.º 4.368, de 28 de agosto de 1996**. Dispõe sobre a criação da Área de Proteção Ambiental Delta do Parnaíba, nos Estados do Piauí, Maranhão, e Ceará, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil.html>. Acesso em: 15 out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm). Acesso em 15 out. 2022.

CABRAL, L. R. *et al.* Classificação dos solos da Planície do Delta do Parnaíba, PI. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 4, p. 1466-1483, 2019.

CABRAL, L. J. R. S.; VALLADARES, G. Potencialidade agrícola dos solos litorâneos do estado do Piauí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. 25., 2015. **Anais...** 2015.

CABRAL, L. J. R. S.; VALLADARES, G. S.; AQUINO, R. P. Caracterização pedológica da planície costeira do estado do Piauí. **Geografia: Publicações Avulsas**, Teresina, v. 2, n. 1, p. 82-104, 2020.

CÂMARA, G. *et al.* Técnicas de inferência geográfica. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. p. 241-288.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. (Eds.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro>. Acesso em: 15 out. 2022.

CAMPOS, J. A. *et al.* Environmental fragility and land use capacity as instruments of environmental planning, Caratinga River basin, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 80, n. 7, p. 1–13, 2021.

CAPOANE, V.; AMORIM, A. E. S. Classificação automatizada do relevo utilizando a ferramenta Geomorphons: estudo de caso para o município de Campo Grande – MS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 02, p. 750-766, 2022.

CARVALHO, A. T. F. Bacia hidrográfica como unidade de planejamento: discussão sobre os impactos da produção social na gestão de recursos hídricos no Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, v. 1, n. 42, p. 140-161, 2020.

CAVALCANTI, J. 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.  
CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 188p.

CREPANI, E. *et al.* **Sensoriamento Remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento Ecológico-Econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos

Campos: INPE, 2001. Disponível em: <http://sap.ccst.inpe.br/artigos/CrepaneEtAl.pdf>. Acesso em 15 out. 2022.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIAS. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos: 2013. 355p.

FERNANDES, R. T. V *et al.* Impacto da carcinicultura no manguezal do rio das Conchas, Porto do Mangue, Rio Grande do Norte. **Revista Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v. 30, n. 3, p. 64-84, 2018.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 160p.

FRANÇA, L. C. J.; MUCIDA, D. P. **A fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha em Minas Gerais**. Nova Xavantina: Pantanal Editora, 2022. 52p.

FRANÇA, L. C. J.; PIUZANA, D.; ROSS, J. L. S. Fragilidade Ambiental Potencial e Emergente em núcleo de desertificação no semiárido brasileiro, Gilbués, Piauí. **Revista ESPACIOS**, v. 38, n. 31, p. 21-38, 2017.

FRANCO, G. B. L. S. *et al.* Relação qualidade da água e fragilidade ambiental da Bacia do Rio Almada, Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 1, n. 42, p. 114-127, 2012.

GOUVEIA, I. C. M. C.; ROSS, J. L. S. Fragilidade Ambiental: uma proposta de aplicação de Geomorphons para a variável relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 37, p. 123-36, 2019.

GUERRA, A. T. **Dicionário geológico-geomorfológico**. Rio de Janeiro: IBGE, 1978. 240p.

GUIMARÃES, F. S. *et al.* Uma proposta para automatização do Índice de dissecação do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 18, n. 1, p. 155-167, 2017.

GUIRRA, A. M. P. *et al.* A evolução metodológica de Fragilidade Ambiental no Brasil e seu aspecto transdisciplinar In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE CIDADES PEQUENAS. 4., 2016, Ituiutaba. **Anais...** Ituiutaba, 2016. p. 234-250.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativa da população**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Banco de informações ambientais – Geologia**. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>. Acesso em: 1 jan. 2023.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Banco de informações ambientais – Geomorfologia**. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>. Acesso em: 1 jan. 2023.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Banco de informações ambientais - Solos**. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>. Acesso em: 1 jan. 2023.

ICMBIO – INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Plano de Manejo da Área de Proteção Ambiental do Delta do Parnaíba**. Brasília: ICMBio, 2020. 77p.

JASIEWICZ, J.; STEPINSKI, T. F. Geomorphons - a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. **Geomorphology**, n. 182, p. 147-156, 2013.

LIMA, I. M. M. F. **Levantamento de dados dos municípios por sub-bacia hidrográfica do rio Parnaíba e do litoral do Piauí**. Relatório final – resumo projeto de pesquisa, 2020.

LIRA, K. C. S.; FRANCISCO, S., K. C.; FEIDEN, A. Classificação de fragilidade ambiental em bacia hidrográfica usando lógica fuzzy e método AHP. **Sociedade e Natureza**, v. 34, n. 1, 2022.

MAPBIOMAS. **Coleção 7 da série anual de mapas de cobertura e uso de solo do Brasil**. 2021. Disponível em: <https://mapbiomas.org/o-projeto>. Acesso em: 15 out. 2022.

MASSA, E. M.; ROSS, J. L. S. Aplicação de um modelo de fragilidade ambiental relevo-solo na Serra da Cantareira, bacia do Córrego do Bispo, São Paulo-SP. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 24, p. 57-79, 2012.

MEDEIROS, R. B. *et al.* Vulnerabilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Buriticupu, Maranhão –Brasil: o Relevo como Elemento Chave. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 35, p. 1-16, 2023.

MEIRELES, A. J.; CAMPOS, A. A. Componentes geomorfológicos, funções e serviços ambientais de complexos estuarinos no nordeste do Brasil. **Revista da ANPEGE**, v. 6, p. 89-107, 2010.

MORAIS, R. C. S.; SALES, M. C. L. Estimativa do Potencial Natural de Erosão dos Solos da bacia hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí - Brasil, com uso de Sistema de Informação Geográfica. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v. 27, n. 1, p. 84-105, 2017.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: Princípios e Aplicações**. São Paulo: Ed. Blücher, 1998. 388p.

PFALTZGRAFF, P. A. S., TORRES, F. S. M.; BRANDÃO, R. L. Geodiversidade: adequabilidades/ potencialidades e limitações frente ao uso e ocupação. In: PFALTZGRAFF, P. A. S.; TORRES, F. S. M.; BRANDÃO, R. L. (Org.). **Geodiversidade do estado do Piauí**. Recife: CPRM, 2010. p. 115-136.

RIBEIRO, K. V.; ALBUQUERQUE, F. L. S. Mapeamento da fragilidade potencial na bacia hidrográfica do Rio Mulato, no médio Parnaíba piauiense. **Revista de Geografia**, v. 38, n. 3, p. 374-394, 2021.

RODRIGUEZ, J. M. M.; SILVA, E. V.; CAVALCANTI, A. P. B. **Geocologia das paisagens: uma visão geossistêmica da análise ambiental**. 2. ed. Fortaleza: Edições UFC. 2011. 222p.

ROSS, J. L. S. Landforms and environmental planning: Potentialities and Fragilities. **Revista do Departamento de Geografia**, v. esp., p. 38-51, 2012.

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

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

SALES, L. B. **Fragilidade ambiental no baixo curso da bacia hidrográfica do Rio Aracatiaçu - Ceará**. 2019. 108 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SANTOS, F. A. Fragilidade ambiental no município de castelo do Piauí, nordeste do estado do Piauí. **Formação (Online)**, v. 25 n. 45, P. 51-66, 2018.

SANTOS, F. de A.; MENDES, L. M. S.; CRUZ, M. L.B. Suscetibilidade biofísica a inundações da Sub-Bacia Hidrográfica do rio Piracuruca. **Ateliê Geográfico**, v. 15, n. 1, p. 266–285, 2021.

SANTOS, J. R. U.; MARCHIORO, E. Análise empírica da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Duas Boas, Espírito Santos, Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 39, 2020.

SILVEIRA, C. T.; OKA-FIORI, C. Análise Empírica da Fragilidade Potencial e Emergente da Bacia do rio Cubatãozinho, Estado do Paraná. **Caminhos da Geografia**, v. 8, p. 1-17, 2007.

SOTCHAVA, V. B. **O estudo de geossistemas**. São Paulo: Ed. Lunar, 1977. 51p.

SOUSA, R. S. **Planície Costeira do Estado do Piauí: Mapeamento das Unidades de Paisagem, Uso e Cobertura da Terra e Vulnerabilidade Ambiental**. 2015. 190 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2015.

SOUSA, R. S. **Zoneamento geoecológico do complexo fluviomarinho dos rios Cardoso/Camurupim e porção costeira adjacente, litoral leste piauiense**. 2019. 153 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SOUZA, M. M.; COSTA, L. H.; CARVALHO, D. A. S. Utilização de ferramentas de geoprocessamento para mapear as fragilidades ambientais na área de influência direta da UHE de Belo Monte, no estado do Pará. **Espaço Plural**, São Paulo, n. 25, p. 73-85, 2011.

SPÖRL, C. **Metodologia para elaboração de modelos de fragilidade ambiental utilizando redes neurais**. 2007. 190 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

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

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997. 944p.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. São Carlos: RIMA Editora, São Carlos, 2003. 260p.

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.

Recebido: 22.03.2023

Aceito: 23.02.2024