

MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MULATO (PI): UMA ANÁLISE INTEGRADA

MAPPING OF ENVIRONMENTAL FRAGILITY IN THE MULATO RIVER WATERSHED (PI): AN INTEGRATED ANALYSIS

MAPEO DE FRAGILIDAD AMBIENTAL EN LA CUENCA DEL RÍO MULATO (PI): UN ANÁLISIS INTEGRADO

Karoline Veloso Ribeiro¹

Emanuel Lindemberg Silva Albuquerque²

RESUMO: Este artigo segue um modelo para determinar a fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Rio Mulato, estado do Piauí, por meio da análise integrada das variáveis: declividade, pluviometria, solos, uso e cobertura da terra. Fundamentado em conceitos que norteiam a ciência geográfica pelo viés sistêmico, a metodologia empregada considerou a proposta metodológica de Ross (1994), ao determinar as condições de estabilidade e instabilidade do ambiente, a partir do dinamismo configurado na paisagem. A pesquisa apontou um crescimento econômico relacionado à produção agrícola, e as variáveis utilizadas e analisadas explicam a correlação entre as classes de maior e menor fragilidade ambiental, frente aos usos estabelecidos pela ação antrópica. Conclui-se que a análise da fragilidade ambiental representa um importante instrumento de planejamento ambiental, pois identifica áreas prioritárias para o manejo conservacionista, visando elaborar diretrizes para o ordenamento territorial na área da bacia hidrográfica do Rio Mulato (PI).

Palavras-chave: Ambientes frágeis. Geotecnologias. Planejamento Ambiental.

ABSTRACT: This paper is based on a model to determine the environmental fragility in the Mulato River watershed, state of Piaui, through the integrated analysis of the variables: slope, rainfall, soils, land use/land cover. Based on concepts that guide Geography in a systemic bias, the methodology considered the methodological proposal of Ross (1994),

¹ Doutoranda em Geografia - Universidade Federal do Ceará. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2697-6098>. E-mail: karolvelosogeo@outlook.com.

² Professor do Curso de Geografia - Universidade Federal do Piauí. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3051-3301>. E-mail: lindemberg@ufpi.edu.br.

Agradecimento: À Capes, pelo financiamento dessa pesquisa.

Artigo recebido em março de 2022 e aceito para publicação em setembro de 2022.

determining the conditions of stability and instability of the environment, considering the dynamism configured in the landscape. The research pointed to an economic growth related to agricultural production, and the variables used and analyzed explain the correlation between the classes with greater and lesser environmental fragility, in face of the uses established by anthropic action. It's concluded that the analysis of environmental fragility represents an important instrument of environmental planning, once it identifies priority areas for conservation management, aiming to develop guidelines for spatial planning in the area of the Mulato River watershed (PI).

Keywords: Fragile environments. Geotechnologies. Environmental planning.

RESUMEN: Este artículo sigue un modelo para determinar la fragilidad ambiental en la cuenca del río Mulato, estado de Piauí, por medio del análisis integrado de las variables: pendiente, precipitación, suelos, cobertura del suelo y uso. A partir de conceptos que orientan la ciencia geográfica desde una perspectiva sistemática. Los lineamientos empleados consideran la propuesta metodológica de Ross (1994), al determinar las condiciones de estabilidad e inestabilidad del medio, a partir del dinamismo configurado en el paisaje. La investigación apuntó a un crecimiento económico relacionado con la producción agrícola, las variables utilizadas y analizadas explican la correlación entre las clases de mayor y menor fragilidad ambiental, en comparación a los usos establecidos por la acción antrópica. Se concluye que el análisis de fragilidad ambiental representa un importante instrumento de planificación ambiental, una vez que identifica áreas prioritarias para la gestión de la conservación, con el objetivo de desarrollar directrices para el ordenamiento del territorio en el área de la cuenca del Río Mulato (PI).

Palabras clave: Ambientes frágiles. Geotecnologías. Planificación ambiental.

INTRODUÇÃO

A humanidade, ao longo de seu processo histórico, encontrou na natureza as condições necessárias para o seu desenvolvimento. Assim, elaborou técnicas capazes de transformar os espaços naturais e extrair os recursos necessários para satisfazer suas necessidades (SANTOS, 2011).

Ao se apropriar do território e dos recursos naturais, a ação humana transforma rapidamente a paisagem natural, com muito mais intensidade que a ação da natureza, provocando alterações nos fluxos energéticos e gerando impactos no ambiente. Esses impactos podem atingir diferentes magnitudes de acordo com as características das áreas onde se processam as modificações e, assim, apresentar classes maiores de fragilidade em algumas porções do estrato geográfico (TROMBETA *et al.*, 2014).

Nesse viés, é de fundamental importância que haja uma preocupação por parte dos planejadores e gestores públicos, devendo-se atentar não apenas para as potencialidades

dos recursos, mas também às fragilidades dos ambientes naturais face as diferentes inserções do homem na natureza (ROSS, 1994). É necessário, ainda, que se faça um estudo integrado do ambiente, objetivando definir as áreas que requerem maior proteção ou que apresentem maiores restrições, quanto ao uso e ocupação, além daquelas que necessitam de ações diferenciadas para a gestão por parte dos órgãos governamentais.

Nesta acepção, a pesquisa objetivou analisar a fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Rio Mulato (BHRM), estado do Piauí, na perspectiva do planejamento ambiental, onde puderam ser delineadas, de forma integrada, a fragilidade dos ambientais naturais e antropizados na área em epígrafe.

Cabe destacar que o conceito de fragilidade ambiental levou em consideração as intervenções que transformam os ambientes naturais. Contudo, este conceito é uma medida da sensibilidade intrínseca dos ecossistemas às pressões ambientais, associadas a quaisquer ameaças que sejam capazes de perturbar o equilíbrio de um sistema (RATCLIFFE, 1971).

Dessa forma, a pesquisa é motivada pela importância que o tema apresenta no sentido de fornecer informações objetivas e precisas enquanto instrumento que tende a delinear um quadro sinóptico das diferentes classes de fragilidade ambiental da área, tendo em vista as limitações impostas pelo quadro natural.

Ao partir da interpretação do ponto de vista da relação sociedade-natureza, suscita profundas preocupações no seio da sociedade e no campo científico, ao pensar uma organização que contribui significativamente não apenas com o equilíbrio, mas também com a estabilidade desse espaço natural. Daí a necessidade de analisar os aspectos socioambientais de maneira integrada, fornecendo uma percepção mais ampla do meio natural e de seus condicionantes, sobretudo através de suas conexões.

METODOLOGIA

A escolha de uma metodologia além de constituir parte primordial para garantir confiabilidade numa pesquisa científica, deve atender aos seus objetivos propostos. Logo, esta pesquisa necessitou de uma abordagem que permitisse a integração dos componentes ambientais e sociais presentes na paisagem.

Dessa forma, a mesma encontra-se fundamentada em conceitos que norteiam a ciência geográfica pelo viés sistêmico, pautada em autores como Sotchava (1977), Tricart (1977), Ross (1994), Souza (2000), entre outros, possibilitando, assim, o estudo ambiental integrado e a compreensão da relação existente entre natureza e sociedade.

De posse desse instrumental teórico-metodológico, a Geografia assume um papel preponderante frente a esta temática, ao caracterizar-se como uma ciência de integração, pois precisa incluir a ação e o papel das sociedades na análise dos aspectos físicos da natureza. Nesse momento, a ideia de paisagem integrada emerge como conceito-chave, em face do inter-relacionamento dos diversos componentes que a constituem (MARQUES NETO, 2008).

Esta abordagem, considerada instrumento de aplicabilidade da Teoria Geral dos Sistemas, preconizado por Tricart (1977) na Geografia, é outro viés abordado na pesquisa,

ao determinar as condições de estabilidade e instabilidade do ambiente, a partir do dinamismo configurado na paisagem. Cabe mencionar que a aplicação dos pressupostos da Teoria Geral dos Sistemas, aos estudos geográficos, serviu para melhor focalizar as pesquisas e para delinear com mais clareza o campo de ação desta ciência, além de revigorar muitos dos seus conceitos tradicionais (CHRISTOFOLETTI, 1990).

A abordagem sistêmica oferece um conjunto sistemático de informações em perspectiva integrada, que norteia o desenvolvimento das investigações sobre a questão ambiental, cabendo à Geografia apontar as potencialidades e fragilidades do meio físico, cujas análises devem ser suficientemente abrangentes e capazes de avaliar as condições dos recursos naturais, sempre acentuando a importância de se considerar os aspectos socioeconômicos e de uso da terra.

Assim sendo, a ciência geográfica tem um papel de destaque, uma vez que estuda o ambiente numa perspectiva de totalidade, ou seja, sistêmica, ao envolver as condições bióticas, abióticas e as transformações ensejadas pelas sociedades humanas (GUERASIMOV, 1980). Nessa conjuntura, tem-se uma visão que concebe a natureza de forma integrada, onde nada pode ser entendido separadamente, em que vários campos de estudos podem ser não unificados, mas complementados (VALE, 2012).

Nesse viés, Sotchava (1977) propôs uma classificação baseada nos estudos sistêmicos, em que propõe a noção e o conceito de geossistema, baseado não apenas nos estudos dos componentes da natureza, mas também nas relações entre eles, utilizando os princípios da Teoria Geral dos Sistemas e a noção de paisagem integrada (MENDONÇA, 1989).

Dessa forma, é imprescindível a análise das relações estabelecidas entre os processos geoecológicos e sociais, na medida em que os efeitos desencadeados nos sistemas naturais, ensejados pelas intervenções das atividades socioeconômicas, afetam, sobremaneira, a estrutura e a dinâmica dos sistemas ambientais (SANTOS, 2011). Nesta perspectiva, Souza, et al. (2009) enfatizam que é somente mediante análises setoriais que se pode chegar à síntese de organização dos componentes ambientais.

Ao seguir os preceitos das Unidades Ecodinâmicas preconizadas por Tricart (1977), Ross (1994) propôs um método de análise empírica na determinação da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. Este sintetiza diferentes padrões de fragilidade em Unidades Ecodinâmicas Estáveis (Instabilidade Potencial) e Unidades Ecodinâmicas Instáveis (Instabilidade Emergente).

Destaca-se que a primeira são as que estão em equilíbrio dinâmico e foram poupadas da ação humana, encontrando-se, portanto, em seu estado natural. A segunda foi definida como sendo aquelas cujas intervenções antrópicas modificaram intensamente o ambiente natural, através dos desmatamentos e práticas de atividades econômicas diversas (ROSS, 1994).

Com base nesse princípio, os processos naturais e os processos socioeconômicos atuantes na bacia hidrográfica do Rio Mulato (PI), foram compreendidos na perspectiva sistêmica, no intuito de compreender o funcionamento e a dinâmica da paisagem, como forma de construir cenários de utilização mais adequados, e que visem à sustentabilidade do desenvolvimento.

MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL

O procedimento para a determinação e mapeamento da fragilidade ambiental consistiu em uma análise multicriterial que teve como base a metodologia proposta por Ross (1994). A aplicação do método se baseou na integração das variáveis ambientais, a saber: declividade, solos, pluviometria, uso e cobertura da terra. A partir da interpretação dos mapas temáticos foram definidos critérios para a classificação e hierarquização dos planos de informação e do grau de fragilidade ambiental, conforme o Quadro 1.

Quadro 1. Proposição de Ross (1994) para as classes de fragilidade.

Fragilidade	Qualitativa	Numérica
Fragilidade Potencial e Emergente	Muito Baixa	1
	Baixa	2
	Média	3
	Alta	4
	Muito Alta	5

Fonte: Ross (1994). Organização: autores (2022).

Para a criação da base de dados, primeiramente, realizou-se a delimitação da área da Bacia Hidrográfica do Rio Mulato (BHRM), por meio de cotas altimétricas, utilizando como base as curvas de nível com equidistância de 30 metros, no sentido de vetorizar/digitalizar as principais informações da bacia hidrográfica e de seus limites topográficos. Os dados foram obtidos junto ao Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), a partir da aquisição das imagens MDE (Modelo Digital de Elevação), da SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).

Em seguida, a pesquisa consistiu na aquisição de dados físico-ambientais para que fosse procedida à caracterização dos componentes ambientais (geologia, geomorfologia, recursos hídricos, solos, vegetação). Destarte, o levantamento das informações referentes à caracterização dos componentes ambientais e socioeconômicos foram obtidas em instituições públicas, sendo estes cruciais para a compreensão da realidade da BHRM, a saber:

- Delimitação da drenagem superficial: seguiu a modelagem hidrológica a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) e da compilação de dados já existente na área, além da interpretação visual de imagens de satélite, com auxílio de relevo sombreado. Na sequência, foi gerado um *raster* de direção de fluxo do escoamento hídrico, seguido pela vetorização da drenagem;
- Mapa Hipsométrico e clinográfico: dados obtidos junto ao Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2018), a partir da aquisição dos dados MDE, da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto. Desta forma, as classes de declividade seguiram a proposta de Ross (1994), conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2. Classes de declividade.

Relevo	Classes (%)	Categorias hierárquicas	Classes de Fragilidade
Plano	0 - 6	Muita fraca	1
Suave Plano	6 - 12	Fraca	2
Suave Ondulado	12 - 20	Média	3
Ondulado	20 - 30	Forte	4
Forte Ondulado	> 30	Muito forte	5

Fonte: Ross (1994). Organização: autores (2022).

A melhor compreensão do algoritmo utilizado para extrair a declividade da imagem matricial, considera a triangulação composta pela altura, base e declividade, podendo ser expressos, em aplicação prática, pela Equação 1:

$$D = \left(\frac{h}{b} \right) * 100 \quad (1)$$

Onde:

D: Declividade do terreno.

h: Altura entre dois pontos BC (equidistância vertical).

b: Distância horizontal entre dois pontos AC.

Atenta-se para o fato de que o cálculo da declividade em plataforma SIG é realizado com base nos valores altimétricos dos pixels adjacentes e segue o princípio da equação de declividade encontrada em Dunn e Hickey (1998). Após esta etapa, a informação de declividade foi reclassificada, o que permitiu delimitar os intervalos de classes de declividade, conforme a proposição de Ross (1994).

– Dados Pluviométricos fornecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA); com base na pluviometria média (mensal e anual) foi possível obter dados pluviométricos a partir de cinco postos que se encontram no interior e nas proximidades da área da bacia, seguindo uma escala temporal de onze anos (1992 a 2002).

Para a espacialização dos dados climáticos, realizou-se a conversão das linhas de isoietas em pontos. Assim, por meio dos pontos de referência pluviométrica, foi possível realizar a espacialização através do método *Inverse Distance Weighted* – IDW.

A respeito dessa variável (regime pluviométrico), é importante mencionar que esta, mesmo não incluída na metodologia original aplicada por Ross (1994), foi incluída por Spörl (2007) e validada por Ross em estudos posteriores. Neste sentido, seguem as características pluviométricas para compreender as classes de fragilidade (Quadro 3).

Quadro 3. Classes de fragilidade das características pluviométricas.

Classes de fragilidade		Pluviometria
Numérica	Qualitativa	
1	Muito baixa	Situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes não muito superiores a 1000 mm/ano.
2	Baixa	Situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes anuais não muito superiores a 2000 mm/ano.
3	Média	Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com períodos secos entre 2 e 3 meses de inverno, e no verão com maiores intensidades de dezembro a março.
4	Alta	Situação pluviométrica com 90% das chuvas durante o primeiro semestre do ano, nos meses de janeiro a abril, e irregularidade das precipitações, em decorrência da má distribuição das chuvas, nos meses que se seguem.
5	Muito Alta	Situação pluviométrica com distribuição regular, ou não, ao longo do ano, com grandes volumes anuais ultrapassando 2500 mm/ano; ou ainda, comportamentos pluviométricos irregulares ao longo do ano, com episódios de chuvas de alta intensidade e volumes anuais baixos, geralmente abaixo de 900 mm/ano (semiárido).

Fonte: Ross (1994). Organização: autores (2022).

- Dados de solos dados obtidos junto à Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE, 2014), seguindo as diretrizes propostas pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2013); no intuito de estimar as classes de fragilidade dos mesmos, conforme é retratado no Quadro 4.

Quadro 4. Tipos de solos e suas respectivas classes de fragilidade.

Classes de fragilidade		Tipos de Solos
Numérica	Qualitativa	
1	Muito baixa	Latossolo vermelho e Latossolo vermelho-amarelo de textura argilosa.
2	Baixa	Latossolo amarelo e vermelho-amarelo de textura média/argilosa.
3	Média	Chernossolos; Argissolo vermelho; Argissolo vermelho-amarelo de textura média/argilosa.
4	Alta	Argissolo vermelho-amarelo de textura média/arenosa.
5	Muito Alta	Argissolo com cascalho; Neossolo Litólico.

Fonte: Ross (1994). Organização: autores (2022).

– Mapa de uso e cobertura da terra: dados obtidos junto ao Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) a partir do uso de imagens do satélite *Landsat 8* do sensor *Operational Land Imager* – OLI, órbita 219/64, cenas 4, 5, 6 e 8, datadas de 28 de setembro de 2020.

O mapa de uso e cobertura da terra foi elaborado a partir da classificação das imagens do *Landsat 8*, sendo que este mapeamento foi realizado por quatro etapas principais, a saber: I) Pré-processamento; II) Realce; III) Classificação; e IV) Exatidão da classificação.

No processo de classificação, foi utilizada a Classificação Supervisionada pelo método da Máxima Verossimilhança (pixel a pixel). Primeiramente, há a criação das assinaturas de cada amostra, e na sequência empregou-se o algoritmo de classificação. Após esta etapa, converteu-se a informação classificada para um formato vetorial, já que a informação original se encontra em formato *raster*.

Com o uso desse algoritmo, obteve-se a correlação das informações entre os pontos classificados (suas classes) com os pontos do espaço amostral (70 pontos). Ressalta-se que para cada classe de uso e cobertura da terra foram obtidas coordenadas georreferenciadas *in loco*, com o uso de um aparelho GPS, as quais foram superpostas ao mapeamento.

A seguir, houve a geração da matriz de confusão (Tabela 1) por meio da correlação existente entre as amostras e a imagem classificada, calculando, assim, a matriz de confusão, a fim de obter os resultados do índice *kappa* (Equação 2) e de acurácia global (Equação 3).

Tabela 1. Matriz de confusão gerada e organizada no Excel.

Classes	A	B	C	D	E	F	G	Total
A	7	0	1	1	0	0	0	9
B	0	10	0	0	0	0	0	10
C	2	0	8	0	0	0	1	11
D	0	0	0	9	0	0	2	11
E	0	0	1	0	10	1	0	12
F	0	0	0	0	0	9	0	9
G	1	0	0	0	0	0	7	8
Total	10	10	10	10	10	10	10	70

Fonte: Organização dos autores (2022).

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^k x_{ii} - \sum_{i=1}^k (x_{i+} \cdot x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (x_{i+} \cdot x_{+i})} \quad (2)$$

$$= \left(\frac{\sum_{i=1}^k x_{ii}}{N} \right) \quad (3)$$

Acurácia Global

Onde:

$\hat{K}$: valor estimado do índice *Kappa*;

k : número de linhas da matriz de confusão;

x_{ii}^X : número de observações na linha i e coluna i ;

$\sum_{i=1}^k x_{ii}^X$: soma dos elementos da matriz em sua diagonal principal;

x_{i+}^X : soma total das observações para as linhas;

x_{+i}^X : soma total das observações para as colunas;

N : número de observações total.

Ressalta-se que os índices estatísticos de acurácia global e de *kappa* são tradicionalmente usados na validação de mapeamento temáticos. É obtido mediante a adoção de uma referência (matriz de confusão) para comparação dos mapeamentos produzidos; e retrata o grau de concordância dos dados, gerando, assim, um aspecto de confiabilidade e precisão dos dados classificados (PERROCA; GAIDZINSKI, 2003).

Recorreu-se, ainda, a classificação proposta por Landis e Koch (1977), que estabelece seis níveis de concordância para o Índice *Kappa* (Quadro 5).

Quadro 5. Qualificação do Índice *Kappa*.

Índice <i>Kappa</i>	Qualidade
0.00	Péssima
0.01 a 0.20	Ruim
0.21 a 0.40	Razoável
0.41 a 0.60	Boa
0.61 a 0.80	Muito boa
0.81 a 1.00	Excelente

Fonte: Landis; Koch (1977). Organização: autores (2022).

Desse modo, os índices estatísticos utilizados possibilitaram validar o mapeamento do uso e cobertura da terra gerado, demonstrando o grau de concordância entre as classes mapeadas e a realidade observada em campo, via registro de coordenadas geográficas. O resultado obtido pelo coeficiente *kappa*, varia no intervalo de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo a 1, melhor a qualidade dos dados classificados. De acordo com Guptill e Morrison (1995), o valor mínimo necessário para uma classificação ser aceitável é de 85%, em relação à exatidão global.

A escolha das classes de uso e cobertura da terra seguiu a proposta metodológica propugnada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a partir do Manual Técnico de Uso da Terra (BRASIL, 2013). Posteriormente à identificação das classes de

uso e cobertura da terra, a pesquisa seguiu os preceitos de Ross (1994), na perspectiva de estimar as classes de fragilidade para o uso da terra e cobertura vegetal (Quadro 6).

Quadro 6. Classes de fragilidade para o uso e cobertura da terra.

Classes de fragilidade		Uso e cobertura da terra
Numérica	Qualitativa	
1	Muito baixa	Vegetação florestal/Matas naturais; Corpos d'água.
2	Baixa	Formações arbustivas naturais com estrato herbáceo denso.
3	Média	Pastagem com baixo pisoteio; Silvicultura de eucalipto com sub-bosques de nativas; Culturas de ciclo longo e ciclo curto (Arroz, feijão, soja, milho, laranja).
4	Alta	Área urbana
5	Muito Alta	Áreas desmatadas e queimadas recente, Solo exposto por arado/degradação; solo exposto ao longo de caminhos e estradas; ausência de vegetação.

Fonte: Ross (1994); Brasil (2013). Organização: autores (2022).

– Censo demográfico e agropecuário obtido junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (BRASIL, 2011).

Dessa maneira, a modelagem das variáveis ambientais utilizadas nesse trabalho para o mapeamento da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Rio Mulato, em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas, deu-se pela aplicação do método booleano de combinação de mapas. Na análise integrada, consideram-se os seguintes parâmetros por ordem de importância: declividade/solo/clima - pluviometria/uso e cobertura da terra.

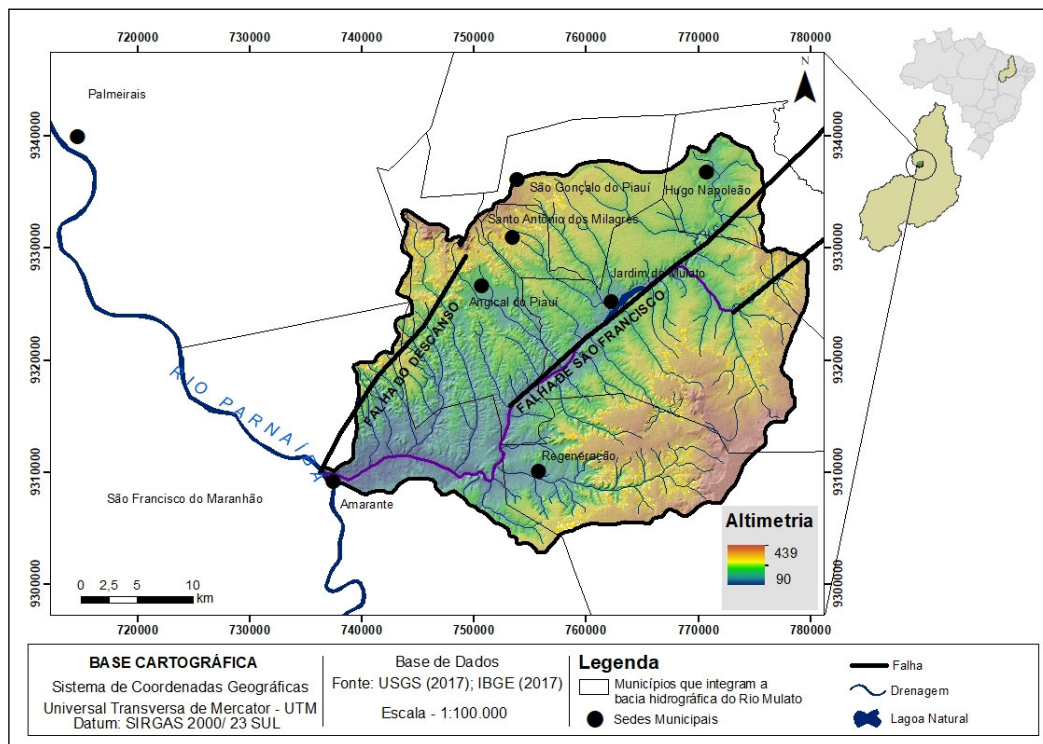
Do ponto de vista operacional, as geotecnologias constituíram instrumento de extrema relevância nesta análise, possibilitando, assim, a compilação, manipulação, integração e geração dos dados coletados em gabinete, e em atividades de campo.

Por fim, a combinação dos dados e informações levantadas e produzidas, a partir da integração por meio da concepção sistêmica, constitui a parte desta pesquisa de maior relevância, uma vez que envolve e aproveita a visão de conjunto, oferecida pelas informações, para elaborar diagnósticos e proporcionar análises úteis com vistas à utilização, principalmente, pelo planejador. Dessa forma, da interação dos indicadores físicos e socioeconômicos enfocados, resultou numa análise ampla da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Rio Mulato (PI).

Corroborar-se que os produtos cartográficos foram gerados no programa *ArcGis* 10.5, com licença na Universidade Federal do Piauí (UFPI). Destaca-se que o sistema de projeção adotado corresponde ao *Universal Transversa de Mercator* (UTM), tendo como referencial geodésico o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000), sendo este o Datum oficial adotado atualmente no Brasil. A área engloba do ponto de vista da Geodésia a zona 23 Sul do Sistema de Projeção adotado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A bacia hidrográfica do Rio Mulato (BHRM) engloba, no todo ou em parte, os municípios piauienses de: Amarante, Angical do Piauí, Hugo Napoleão, Jardim do Mulato, Palmeirais, Regeneração, Santo Antônio dos Milagres e São Gonçalo do Piauí, compreendendo uma área de 1.049,13 km² e um perímetro de 213,5 km (Figura 1). Está inserida na microrregião do Médio Parnaíba Piauiense e conta com uma população estimada em 70.001 habitantes (BRASIL, 2010).



Fonte: IBGE (2019). Geoprocessamento/Elaboração: autores (2022).

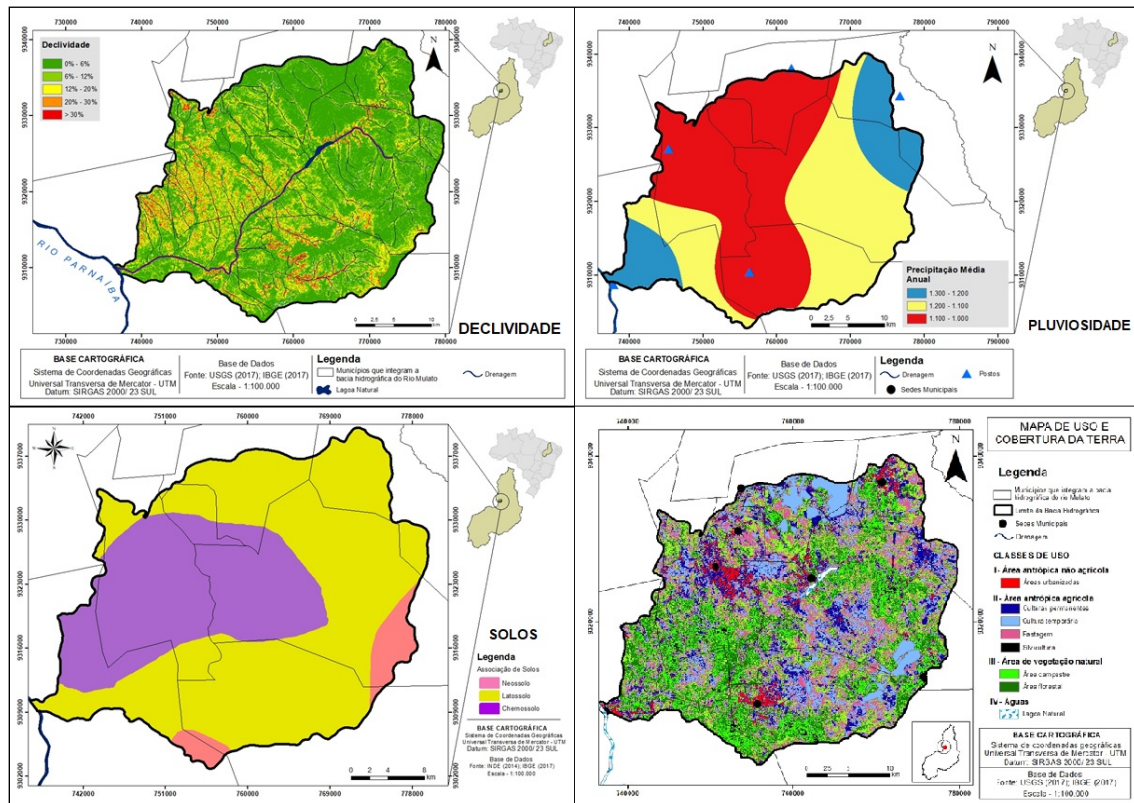
Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do Rio Mulato, Piauí.

A área que a BHRM ocupa tem sua gênese associada à dinâmica da litosfera, resultante do lineamento transbrasiliiano, e encontra-se alicerçada sobre um ambiente de estrutura sedimentar, com predomínio de formações geológicas que datam do Paleomesozoico, tais como as formações: Corda (38,21%), Pastos Bons (0,04%), Pedra de Fogo (11,87%), Piauí (33,70%) e formação Sardinha (16,17%).

No que diz respeito às formas e modelados da paisagem na BHRM, estes são decorrentes do desenvolvimento de falhas normais (São Francisco e do Descanso), as quais apresentam uma direção geral NE-SO junto aos municípios de São Francisco do Maranhão (MA) e Amarante (PI). A dinâmica dessas falhas separou dois blocos distintos, sendo que o bloco SE, em relação à falha, rebaixou-se em direção ao bloco NO, e pôs em contato na área dos municípios que integram a bacia hidrográfica do Rio Mulato as

Formações Piauí e Pedra de Fogo, gerando as linhas de fraqueza e os derramamentos vulcânicos (BRASIL, 1973).

Os demais atributos do terreno, utilizados como critérios para a determinação da fragilidade ambiental (potencial e emergente), são apresentados através de mapas temáticos, conforme a Figura 2.



Fonte: (IBGE, 2019; INDE, 2014; USGS, 2020). Elaboração: autores (2022).

Figura 2. Mapa das variáveis ambientais para determinação da fragilidade ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio Mulato.

Ao considerar a declividade da BHRM, predominam relevos planos a suave ondulado, sendo a classe de declividade de maior significância os setores com declive de 0 a 12%, sendo que sua distribuição ocorre por toda sua extensão. As declividades que se apresentam no intervalo de 12 a 30% também estão distribuídas em toda a área da bacia, principalmente próximas aos cursos d'água, sendo o declive de 20 a 30%, restrito a alguns pontos. Juntas, abrangem 60,51 km² da área total da bacia hidrográfica. Por fim, a classe superior a 30% é a que apresenta a menor área (1,46 km²), abrangendo apenas 0,14%. Quanto à descrição morfológica, classes de 0 a 6, observou-se terreno com superfície de topografia horizontal, onde os desníveis são quase inexistentes, ao longo das planícies fluviais. Quanto aos processos erosivos, não se observou perda de solos.

A classe de 6 a 20% correspondem a terrenos pouco movimentados, constituídos por planaltos rebaixados, com declive suave, apresentando início de solifluxão e, em alguns

setores, escoamento difuso e laminar. A classe correspondente a declive de 20 a 30% correspondem a terrenos pouco movimentados, no entanto, mais acentuado que a classe anterior, constituindo-se encostas de morros (elevações de 200 a 300 metros), predominando escoamento laminar, ravinamentos e em determinadas áreas movimentos de massa.

A classe acima de 30% constitui-se terrenos movimentados, com predomínio de formas acidentadas, usualmente constituídas de planaltos tabulares, variando de 300 a 400 metros, sendo comum a ocorrência de movimento de blocos.

A área apresenta isoietas de precipitação média anual que variam de 1.134mm em toda a extensão do médio curso, a 1.319mm entre o alto e baixo curso fluvial, considerando a série histórica de 11 anos (1992 a 2002) utilizada nesse estudo.

Na BHRM sobressaem os Neossolos, Chernossolos e Latossolos. Frisa-se que os Neossolos compreendem solos rasos e sua fertilidade está condicionada à soma de bases e à presença de alumínio, sendo neste mais limitada. Apresentam, portanto, baixa fertilidade natural (distrófico).

Os Latossolos amarelos que predominam na área em estudo, são solos desenvolvidos, bastante uniforme em textura, cor e estrutura; são profundos, bem drenados, mas de baixa fertilidade natural. Sua textura areno-argilosa imprime a este solo um maior grau de fragilidade quanto à ocorrência de ravinamentos, já que as partículas arenosas possuem maior facilidade de desagregação durante o período chuvoso. Predominam em áreas de relevo plano a suave ondulado, e suas principais limitações decorrem da forte acidez, além da pobreza de nutrientes, o que implica em um investimento inicial alto para a obtenção de boas colheitas, com uso de adubação e fertilizantes, a exemplo da prática de calagem (EMBRAPA, 2013).

Os Chernossolos são os mais férteis, uma vez que estes são resultantes da intemperização dos diques de diabásios, da Formação Sardinha. Em geral, são pouco desenvolvidos, no entanto, apresentam alto potencial agrícola em virtude de suas características químicas, tendo em vista seu elevado potencial nutricional (EMBRAPA, 2013).

O mapeamento de uso e cobertura da terra visou retratar os diferentes usos encontrados na BHRM, uma vez que o conhecimento e o monitoramento destes constitui elemento primordial para a compreensão dos padrões de organização do espaço.

O resultado obtido com o processo de classificação referente ao uso e cobertura da terra, considerando as modificações impostas pelas atividades socioeconômicas e a diferenciação das tipologias de uso, serviu para avaliar a pressão antrópica exercida na BHRM.

Em síntese, observa-se que as atividades agropecuárias (Área Antrópica Agrícola) ocupam 47,98% da área total da bacia. Por outro lado, as áreas de vegetação natural (Área Florestal e Área Campestre) correspondem a 44,82%, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2. Quantitativo por classes do uso e cobertura da terra, na bacia hidrográfica do Rio Mulato, Piauí.

Classes	Descrição	Área (km²)	% do total
Área Antrópica Agrícola	Pastagem	158,47	15,11
	Cultura temporária	195,34	18,62
	Cultura permanente	144,48	13,77
	Silvicultura	5,03	0,48
Área Antrópica Não-Agrícola	Área urbanizada	71,54	6,82
Área de Vegetação Natural	Área Florestal	174,71	16,65
	Área campestre	295,54	28,17
Corpos D'água	Rios, riachos e lagoas naturais	4,01	0,38
Total		1049,13	100,00

Fonte: IBGE (2013); Elaboração dos autores (2022).

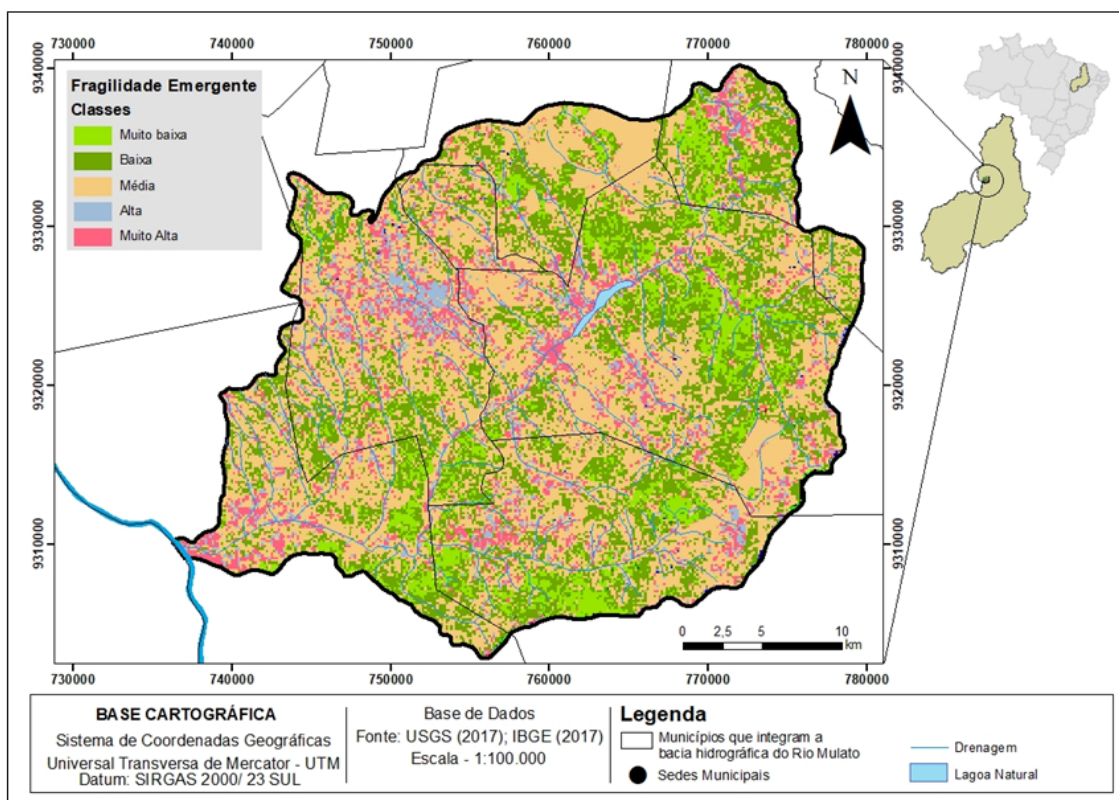
Para a determinação da fragilidade ambiental na BHRM, realizou-se o cruzamento dessas informações, de acordo com as classes de fragilidade. Sobre esta contextualização, são demonstrados a seguir os resultados obtidos para cada variável de maneira inter-relacionada, quantificadas a partir do cruzamento de informações referentes à declividade, solos, clima, uso e cobertura da terra, sendo estas determinadas em cinco classes, a saber: Muito baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta. Tais classes permitiram analisar se os usos estão sendo desenvolvidos de maneira organizada e produtiva diante da fragilidade natural dos ambientes, e se as atividades desenvolvidas estão potencializando os processos erosivos (Tabela 3).

Tabela 3. Fragilidade Ambiental da bacia hidrográfica do Rio Mulato, Piauí.

Classes de Fragilidade Emergente	Área (km²)	Porcentagem
Muito Baixa	95,04	9,06%
Baixa	290,10	27,65%
Média	468,14	44,62%
Alta	140,26	13,37%
Muito Alta	55,59	5,30%
Total	1.049,13	100%

Fonte: IBGE (2013); Elaboração dos autores (2022).

O mapa de Fragilidade Ambiental (Figura 3) oferece uma melhor validação dos processos erosivos aparentes, pois revela a influência das atividades antrópicas na estabilidade do ambiente, destacando a contribuição da cobertura vegetal que apresenta proteção às áreas de alto potencial natural à erosão, seja pelo fator declividade, solos ou pluviometria.



Fonte: (IBGE, 2019; USGS, 2020). Geoprocessamento/Elaboração: autores (2022).

Figura 3. Mapa da fragilidade ambiental na BHRM.

A classe de fragilidade emergente média prevalece na área de estudo, por abranger 468,14km², representando 44,62%. Ocorre em áreas onde a cobertura vegetal corresponde a Caatinga arbustiva aberta, podendo, ainda, ocorrer associadas às culturas temporárias (ciclos curtos), com destaque para a produção de arroz, feijão, mandioca, milho e soja; culturas permanentes (ciclos longos) como a castanha de caju e banana e, também, nas áreas de pastagens com baixo pisoteio, em virtude da pecuária extensiva, além das silviculturas.

Salienta-se, ainda, a utilização do carvão vegetal, resultante da queima da lenha, como fonte de energia. A quantidade produzida para o ano de 2017 foi de 2.712 toneladas na área em estudo, colaborando, deste modo, para a ampliação das áreas desmatadas. A depender da intensidade dos impactos, estas áreas tendem a reverter-se para um quadro de fragilidade emergente forte ou muito forte.

A retirada da cobertura vegetal constitui-se, nesse aspecto, como um excelente indicador para a identificação de áreas mais instáveis, enquanto a conservação desta exerce uma função de fundamental importância, principalmente, no fornecimento de água para o solo, além de protegê-lo do impacto da energia cinética das gotas da chuva, evitando, consequentemente, o carreamento desse material e o início dos processos erosivos.

Ao considerar este aspecto, as perdas de solo precisam ser levadas em consideração, visto que acarreta uma série de mudanças quanto à sua fertilidade natural, além de contribuir, em grande parte, no processo de assoreamento do Rio Mulato. Em dias chuvosos, pode

ser observada a grande presença de partículas de solos sendo transportadas pela água, em função da coloração que a mesma apresenta. Isso decorre do transporte de sedimentos das vertentes para dentro do leito do rio.

Na sequência aparece a fragilidade emergente baixa, distribuída por toda a área da bacia. Ocorre em áreas onde a cobertura vegetal corresponde a estratos arbustivos naturais e, em alguns setores, estrato herbáceo denso. Isto evidencia a importância da cobertura vegetal para a manutenção do sistema, por demandar ao quadro natural uma Instabilidade Potencial previsível face às suas características naturais e a sempre possível inserção antrópica. Observa-se que a fragilidade emergente muito baixa se encontra associada a esta classe, ao representar pouco mais de 9%, ocupando uma área de 95,04 km².

Tricart (1977) acrescenta, ainda, a importância da cobertura vegetal suficientemente espessa na manutenção dos declives muito acentuados, proporcionando, assim, relativa estabilidade. Esta ameniza ou impede o fluxo superficial hídrico e o transporte de detritos, favorecendo a restauração da vegetação, reconstituição do solo e, com estes, o processo de pedogênese.

As classes de fragilidade emergente alta (13,37%) e muito alta (5,30%) abrangem 195,85 km², correspondendo a 18,67% da área em estudo, com predominância das áreas urbanizadas, como as rodovias pavimentadas, as estradas em leito natural com ausência de vegetação, solo exposto (por arado/degradação) ao longo de caminhos e estradas, além de áreas desmatadas, queimadas recentes e àquelas destinadas ao pousio. Apesar de ocupar a menor área da bacia hidrográfica, ao relacionar com as demais classes de fragilidade emergente, é a que apresenta maior pressão antrópica.

Na BHRM observou-se que as práticas agrícolas utilizam técnicas rudimentares, como as queimadas, para a limpeza do terreno. No entanto, sabe-se que esta prática acelera os processos erosivos, acrescentando um maior grau de fragilidade. Além disso, o aumento da taxa de urbanização contribui significativamente para uma maior demanda a implantação de infraestruturas e equipamentos para atender a população. Como consequência, ampliam-se os impactos negativos, já que a intervenção antrópica modifica intensamente os ambientes naturais através de desmatamentos e práticas econômicas diversas.

Reforçam-se os aspectos positivos da atividade antrópica frente aos usos e ocupação da terra, desde que aconteça de forma planejada e condizente com a fragilidade dos ambientes, e que utilizem práticas conservacionistas. Esta constitui fator fundamental para conter os processos erosivos e para manter a qualidade agrícola dos solos.

Do ponto de vista geomorfológico, a fragilidade emergente média (de maior representatividade) encontra-se espacializada em um cenário que envolve um ténue limiar, ora com o favorecimento dos processos de pedogênese, ora com os processos de morfogênese. Tais processos podem atenuar ou intensificar vários outros processos que demandem ao sistema natural certa estabilidade/instabilidade no ambiente.

Atenta-se para o fato de que a declividade apresenta grande influência na determinação das áreas mais e menos frágeis. Dessa forma, é de fundamental importância o monitoramento contínuo para a identificação do avanço e/ou restauração desses setores, com via ao planejamento ambiental e a gestão do território.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fragilidade ambiental se relaciona tanto com a dinâmica dos elementos físico-naturais, bem como a maneira que o ser humano utiliza esse espaço natural. Ao realizar esta pesquisa, a observação dos elementos formadores do ambiente natural da Bacia Hidrográfica do Rio Mulato (PI) serviu para conhecer esta dinâmica, bem como seus processos atuantes, visto que a ação humana é, em muitos casos, o fator determinante para a estabilidade/instabilidade desse sistema.

Nesse viés, observou-se que nas áreas onde predomina a cobertura vegetal, a fragilidade ambiental é diminuta. Enquanto nas áreas mais íngremes associadas a solos mais suscetíveis ao processo erosivo, como os Neossolos, a vegetação tende a ser mais suprimida e, conseqüentemente, apresenta uma fragilidade ambiental mais acentuada. Com isso, verificou-se que as intensificações das áreas de fragilidade são resultantes das relações socioeconômicas que ocorrem ao longo do tempo.

No entanto, atenta-se para o fato de que, nem sempre, áreas que apresentam maior declividade, evidentemente, irão apresentar maior fragilidade e vice-versa, tendo em vista que diversas variáveis atuam e interagem de forma integrada. No caso da BHRM, tais resultados refletem de forma eficaz as condições da área estudada, uma vez que as classes espacializadas como fragilidade média apresentam condições propícias a processos erosivos significativos e de atividades que, por vezes, excedem a capacidade de suporte do ambiente. Portanto, é uma área que precisa ser constantemente monitorada.

Apesar da quase totalidade da bacia não ultrapassar a classe de fragilidade ambiental média, algumas considerações devem ser postas. No que se refere ao uso e ocupação da terra, cabe salientar que estas ocupam 54,5% da área total da bacia. Isso fica evidente a necessidade de medidas que visem à redução de perdas de solo, que acabam por interferir, diretamente, na produção agrícola. Sabe-se que as atividades relacionadas às práticas agropecuárias e ao extrativismo predominam na BHRM, o que potencializa os processos de degradação.

O mapeamento da fragilidade ambiental na BHRM expressou o cenário atual, já que o conhecimento das características naturais da bacia constituiu fator de extrema relevância nessa análise, uma vez que a dinâmica de uso e ocupação do solo determina o equilíbrio ou desequilíbrio do ambiente natural.

Nessa perspectiva, o mapeamento da fragilidade ambiental na BHRM expressa através dos mapas, é um instrumento que possibilita compreender e analisar o espaço de maneira integrada podendo, posteriormente, ser utilizado em estudos que visem o planejamento ambiental e o ordenamento do território na área de estudo. Destarte, possibilita, ainda, elaborar diretrizes para uma gestão territorial mais efetiva, levando em conta os diversos atores que estão inseridos, já que os processos decisórios necessitam de uma boa base de informações.

Ações de caráter preventivo, tomadas a partir do conhecimento da fragilidade ambiental, como técnicas agrícolas e silviculturais que perpassam práticas sustentáveis de conservação dos solos, são importantes ao configurarem-se em propostas de conservação, recuperação e uso sustentável dos recursos naturais. Dessa forma, atividades econômicas

mais comuns e recomendadas pauta-se na agricultura convencional para as áreas mais frágeis e reflorestamento, preferencialmente, destinada à conservação ambiental ou atividades que resultem em baixo impacto ambiental.

Portanto, a análise integrada dos aspectos físicos e humanos e o mapeamento temático, através das ferramentas de geoprocessamento, permitiram a elaboração de um produto com caráter de síntese, evidenciando, os níveis de fragilidade ambiental na área em análise. Assim, fica evidente que os estudos de fragilidade ambiental proporcionam melhor definição das diretrizes e ações a serem implantadas em um espaço físico-territorial, ao fornecer subsídios à gestão do território, além de servir como uma importante ferramenta para avaliações ambientais estratégicas, especialmente em casos de intervenção antrópica.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**. 2010. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 jan. 2018.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Uso da Terra**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2013.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Projeto Radam Brasil**: levantamento de recursos naturais, v. 2, folha SB-23 Teresina/folha 24 Jaguaribe. Rio de Janeiro, 1973.
- CHRISTOFOLETTI, A. A aplicação da abordagem em sistemas na geografia física. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 52, n. 2, p. 21-35, 1990.
- DUNN, M.; HICKEY, R. J. The effect of slope algorithms on slope estimates within a GIS. **Cartography**, v. 27, n. 1, p. 9-15, 1998.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Brasília: EMBRAPA, 2013.
- GUERASIMOV, I. P. Problemas metodológicos de ecologización de la ciência contemporânea. **La Sociedad El Medio Natural**. Moscou: Editorial Progreso, 1980.
- GUPTILL, S. C; MORRISON, J. L. **Elements of spatial data qualify**. Elsevier Sci., U.K. 1995.
- INDE. Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais. **Catálogo de metadados**. 2014. Disponível em: <<http://www.inde.gov.br/geo-servicos/catalogo-de-metadados>>. Acesso em: 22 fev. 2020.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, Texas, v.33, n.1, p. 159-174, 1977.
- MARQUES NETO, R. A abordagem sistêmica e os estudos geomorfológicos: algumas interpretações e possibilidades de aplicação. **Geografia**. v. 17, n. 2, p. 67-87, 2008.
- MENDONÇA, F. **Geografia física: ciência humana?** São Paulo: Contexto, 1989.
- PERROCA, M. G.; GAIDZINSKI, R. R. Avaliando a confiabilidade interavaliadores de um instrumento para classificação de pacientes - coeficiente Kappa. **Rev. Esc. Enferm**, v. 37, n.1, p.72-80, 2003.
- RATCLIFFE D. A. Criteria for the selection of nature reserves. **Advancement of Sciences**, n.27, p. 294-296, 1971.

- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia da USP**, n. 8, p. 63-74, 1994.
- ROSS, J. L. S. Geografia e as transformações da natureza: relação sociedade e natureza. In: LEMOS, Amália Inés Geraiges de; GALVANI, Emerson (Org.). **Geografia, tradições e perspectivas: interdisciplinaridade, meio ambiente e representações**. São Paulo: Expressão Popular, 2009. p. 119-138.
- SANTOS, Jader de Oliveira. **Fragilidade e riscos socioambientais em Fortaleza/CE: contribuições ao ordenamento territorial**. 2011. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- SOTCHAVA, V. B. O estudo de geossistemas. **Métodos em questão**, n.16, p. 2-52, 1977.
- SOUZA, M. J. N. Bases naturais e esboço do zoneamento geoambiental do estado do Ceará. In: SOUZA, M. J. N.; LIMA, L. C.; MORAIS, J. O. (Org.) **Compartimentação territorial e gestão regional do Ceará**. Fortaleza: Ed. FUNECE, 2000. p. 13-98.
- SOUZA, M. J. N.; NETO, J. M.; SANTOS, J. O.; GONDIM, M. S. **Diagnóstico Geoambiental do Município de Fortaleza: subsídios ao macrozoneamento ambiental e à revisão do Plano Diretor Participativo – PDPFor**. Fortaleza: Prefeitura de Fortaleza, 2009.
- SPORL, Christiane. **Metodologia para elaboração de modelos de fragilidade ambiental utilizando redes neurais**. 2007. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- TRICART, Jean. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREM, 1977.
- TROMBETA, L. R.; GARCIA, R. M.; NUNES, R. S.; GOUVEIA, I. C. M. C.; LEAL, A. C. Análise da fragilidade potencial e emergente do relevo da unidade de gerenciamento de recursos hídricos pontal do Paranapanema, São Paulo, Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**. n.36, p. 159-173, 2014.
- VALE, C. C. Teoria Geral do Sistema: histórico e correlação com a geografia e com o estudo da paisagem. **Entre-Lugar**. n. 6, p. 85-108, 2012.