

MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO APODI-MOSSORÓ

MAPPING OF THE ENVIRONMENTAL FRAGILITY OF THE APODI-MOSSORÓ RIVER WATERSHED

 Albergma Estevão de Queiroz Magalhães Cavalcante ¹

 Alfredo Marcelo Grigio ¹

 Marco Antônio Diodato ²

 Wesley Misael Bezerra Damasio ¹

 Lara Beatriz de Araujo Dantas ¹

¹ Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN), Mossoró, RN, Brasil

² Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, RN, Brasil

Resumo

A bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró tem uma importante influência no desenvolvimento econômico da região. A falta de análise do espaço físico e o manejo inadequado do uso do solo promovem impactos no sistema ambiental, como erosão e assoreamento do sistema de drenagem, dentre outros fatores. O objetivo geral deste estudo é explorar como as características climáticas, a declividade do solo e os diferentes usos da terra influenciam os níveis de fragilidade potencial e emergente, proporcionando uma compreensão aprofundada dos processos de degradação ambiental na bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró – RN. Assim, o mapeamento da fragilidade potencial e emergente se torna importante ferramenta na identificação de áreas com níveis de fragilidade, fornecendo subsídios para o desenvolvimento sustentável dessas áreas. Nos trabalhos de laboratório, foram utilizados arquivo, em formato de shapefile, para os tipos de solos da bacia, Modelo Digital de Elevação e Imagens de Satélite. Por meio do mapeamento, foi possível avaliar e quantificar os níveis de fragilidade da bacia hidrográfica, de modo que o nível predominante na bacia é o de fragilidade média, sendo superior a 50%, seguido de fragilidade alta com 38,4%. A cobertura vegetal nas áreas de maiores declividades foi importante na mitigação de áreas com fragilidade potencial muito alta e alta.

Palavras-chave: Geotecnologias; Degradação; Sistema Ambiental.

Abstract

The hydrographic basin of the Apodi-Mossoró river has an important influence on the economic development of the region. Thus, the lack of analysis of the physical space and the inadequate management of land use promote impacts on the environmental system, such as erosion and silting up of the drainage system, among other factors. The present work aims to present, through the mapping, how the different types of land use influence levels of environmental fragility to understand the degradation processes of the hydrographic basin of the Apodi-Mossoró River - RN. Thus, the mapping of fragility becomes an important tool in the identification of areas with fragility levels, providing subsidies for sustainable development in it. In the laboratory works, a shapefile file for the types of soil in the basin, Digital Elevation Model and satellite images will be used. Through the mapping it was possible to evaluate and quantify the fragility levels of the hydrographic basin, so that the predominant level in the basin is of medium fragility, being higher than 50%, followed by high fragility. Vegetation cover in the areas with the greatest declivity was important in mitigating areas with very high and high potential fragility.

Keywords: Geotechnologies; Degradation; Environmental System.

Recebido em: 03/03/2024 | 15/09/2025

Correspondência para: Wesley Misael Bezerra Damasio (wesleymisael@gmail.com)

INTRODUÇÃO

Localizada na região oeste do estado do Rio Grande do Norte, a Bacia Hidrográfica do rio Apodi-Mossoró, inserida em ambiente semiárido, desempenha um papel crucial no





desenvolvimento econômico destacando-se por seu potencial para atividades como agricultura, extração de petróleo, fruticultura irrigada, produção salineira e carcinicultura. Contudo, este cenário promissor é marcado por desafios ambientais significativos, resultantes da falta de observação do espaço físico e do manejo inadequado do solo.

A ausência de um planejamento territorial integrado, aliada ao uso inadequado do solo e à desconsideração das características físicas da bacia, tem intensificado processos de degradação, como a salinização, a erosão e a perda de qualidade da água. Tais fatores aumentam a fragilidade dos sistemas físico e a vulnerabilidade das populações locais, sobretudo diante das condições climáticas adversas que marcam o semiárido.

A interação complexa entre fatores naturais e ação humana tem gerado impactos consideráveis no sistema ambiental da bacia, manifestando-se principalmente através de processos erosivos e de assoreamento. Esses fenômenos justificam a escolha da bacia do Rio Apodi-Mossoró como área de estudo, pois sua importância econômica contrasta com sua vulnerabilidade ambiental, tornando o mapeamento da fragilidade uma ferramenta essencial para o planejamento sustentável da região.

A fragilidade ambiental, conceituada à luz dos princípios da ecodinâmica de Tricart (1977), destaca-se como um elemento crucial na compreensão dos desafios enfrentados pela bacia. A intensidade da ação antrópica, como a morfogênese do ambiente, influencia diretamente a fragilidade, sendo a cobertura vegetal um agente mitigador essencial dos efeitos da morfodinâmica.

No contexto das cinco categorias de fragilidade propostas por Ross (1994) — muito fraco, fraco, médio, alto e muito alto —, torna-se imperativo analisar e mapear a fragilidade potencial e emergente. Este mapeamento não apenas destaca áreas suscetíveis que demandam maior atenção, mas também orienta efetivamente o planejamento do uso e ocupação da terra, visando mitigar os impactos relacionados à erosão, assoreamento e perda de biodiversidade.

A abordagem de Trombeta e Leal (2016), que associa a análise do ambiente à geoecologia das paisagens, oferece uma base sólida para o planejamento e gestão ambiental, centrando-se nas unidades da paisagem. Nesse sentido, as bacias de drenagem emergem como unidades mensuráveis, permitindo a avaliação de indicadores geomorfológicos relevantes.

Este trabalho propõe-se a ir além da percepção tradicional da utilização dos recursos naturais, abraçando uma abordagem holística. O planejamento da bacia do rio Apodi-Mossoró, conforme Padilha (2008), deve considerar não apenas as potencialidades hídricas, mas também aspectos como turismo, fauna, flora, características geológicas e de produção, além dos impactos decorrentes da ação antrópica.

Neste contexto, as metas da Agenda 2030 das Nações Unidas – ONU (2015) ganham relevância, especialmente o Objetivo 6, que busca assegurar água potável e saneamento para todos, e o Objetivo 15, voltado para a proteção e promoção do uso sustentável dos ecossistemas. A mensuração do alcance dessas metas é facilitada pelo uso do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e técnicas de sensoriamento remoto, destacando-se como ferramentas essenciais para análises ambientais integradas.

Este estudo visa, portanto, explorar como as características climáticas, a declividade do solo e os diferentes usos da terra influenciam os níveis de fragilidade potencial e



emergente, proporcionando uma compreensão aprofundada dos processos de degradação ambiental na bacia do rio Apodi-Mossoró, Rio Grande do Norte.

Considerando o exposto, a hipótese central deste estudo é que as características climáticas, a declividade do solo e os diferentes usos da terra interagem de maneira complexa, influenciando os níveis de fragilidade potencial e emergente na bacia do rio Apodi-Mossoró, Rio Grande do Norte. Através da análise integrada de informações geográficas, espera-se revelar padrões e relações que fornecerão insights valiosos para o entendimento aprofundado dos processos de degradação ambiental nesta região específica.

Dessa forma, torna-se essencial compreender e analisar a Bacia do Apodi-Mossoró não apenas como espaço de exploração econômica, mas também como território que exige práticas de manejo sustentável e políticas públicas eficazes. Esse olhar integrado possibilita equilibrar o uso produtivo com a conservação dos recursos naturais, assegurando a continuidade dos serviços ecossistêmicos e a promoção do desenvolvimento regional sustentável.

ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica Apodi-Mossoró (Figura 01), inserida no estado do Rio Grande do Norte, ocupa uma área de 14.276 km², na qual estão inseridos 52 municípios. O rio tem sua nascente no município Luiz Gomes (RN), na serra de São José, e a sua foz nos municípios de Areia Branca (RN) e Grossos (RN), onde da nascente à foz, faz um percurso de aproximadamente 150 km (OLIVEIRA; QUEIROZ 2008).

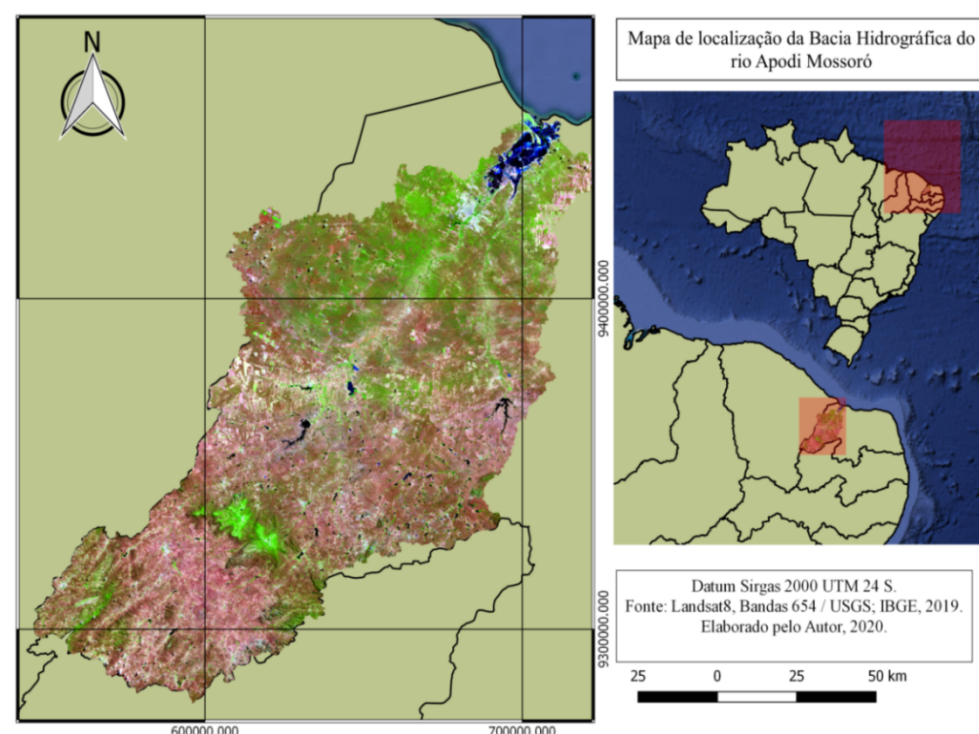
Há dois tipos de predominância climática, de acordo com a classificação de Koppen, são eles: BSh', caracterizado por ser quente e semiárido, em que se encontra formações florestais de caatinga hipoxerófila e hiperxerófila, e Aw', com clima tropical chuvoso e verão seco, de modo que a média de precipitação pluviométrica varia de 600mm, no entorno da foz e região leste, enquanto na região de Martins pode chegar a 1100mm ao ano. (ALVARES et al., 2014).

Eventualmente, em condições favoráveis de brisa marítima (ondas de leste), verificam-se eventos de precipitação nos meses de maio e junho. Os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN's), esporadicamente, contribuem com eventos pluviométricos, uma vez que, no inverno, ele fica mais afastado do Nordeste, no oceano Atlântico, enquanto no verão, ele se move em direção ao continente, já a partir do mês de dezembro (REBOITA et al. 2017).

Quanto aos aspectos geológicos e geomorfológicos, a bacia hidrográfica Apodi-Mossoró se divide em dois principais ambientes que, de acordo com Maia e Bezerra (2012), tratam-se do embasamento cristalino do período Pré-Cambriano na porção superior da área de estudo e formação sedimentar do período Mesozoico, Tercio-Quaternário e Quaternário na área médio e inferior da área de estudo, em que, como apontam Diniz et al. (2017), a Bacia Potiguar que se desenvolveu a partir do Cretáceo Inferior com a abertura do *Rift* Potiguar.



Figura 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do rio Apodi-Mossoró



Fonte: Elaborado pelos autores

Também de acordo com Maia e Bezerra (2012), observa-se na bacia a predominância de maciços residuais decorrentes do aplainamento da depressão sertaneja, na porção superior da bacia, já na parte inferior da bacia predomina a chapada do Apodi, tabuleiro costeiro e planícies fluviais e fluviomarinho.

METODOLOGIA

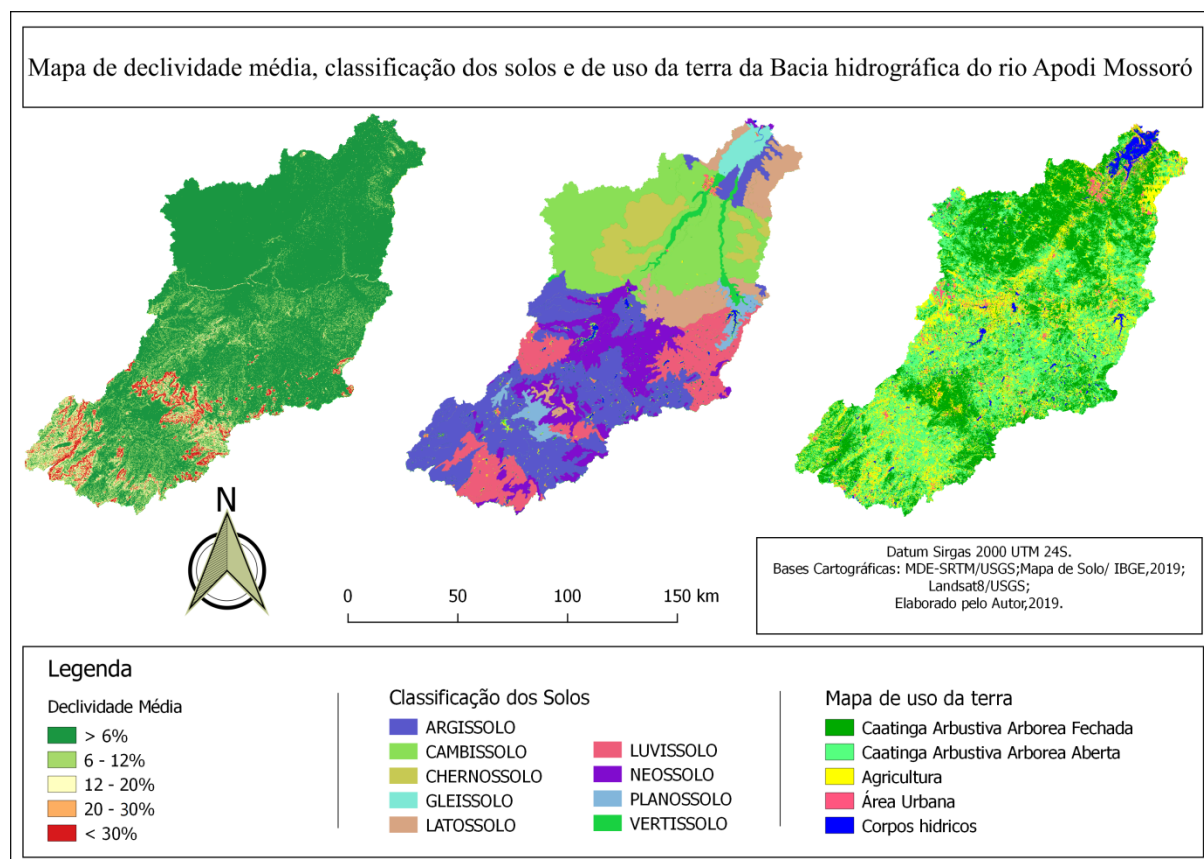
Nos trabalhos de laboratório foi utilizado arquivo em formato de shapefile, para os tipos de solos da bacia, em escala 1:250.000, disponíveis no site do IBGE, Modelo Digital de Elevação do projeto Topo data do INPE, com resolução de 30m e imagens de satélite, no formato Landsat 8 – OLI, disponíveis no site do *United States Geological Survey* - Serviço Geológico dos Estados Unidos - (USGS). Tais produtos serviram como base de dados para geração de planos de informação em ambiente SIG por meio do Software QGis 2.18 ‘Las Palmas’ (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2019).

A delimitação da bacia hidrográfica, realizada de forma automática por meio do *Algoritmo R.Watershed* (GRASS), é disponibilizada, como complemento, dentro do QGis 2.18 Las Palmas. O produto é baseado nas características específicas do Modelo Digital de Elevação. A figura 2 representa os planos de informações que foram trabalhados, de modo que, no referente ao relevo, a área é predominantemente plana, apresenta nove classes de solos, sendo de maior ocorrência os argissolos, cambissolos e luvisolos, e o mapa de uso da



terra, classificando as áreas de cobertura florestal, campestre, agricultura, urbanização e corpos hídricos.

Figura 2 – Mapa de declividade média, classificação dos solos e de uso da Bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró



Fonte: Elaborado pelos autores

A distribuição e a intensidade da precipitação pluviométrica atuam na dinâmica do solo, principalmente no que se refere ao intemperismo. Desse modo, Tabela 1 traz a classificação da fragilidade, de acordo com a classificação de Ross (2012)

Com base no MDE, disponibilizado pelo site do Inpe por meio do projeto Topodata, foi elaborado o mapa de declividade que auxiliou na obtenção de dados morfométricos. Para a geração do mapa de declividade, com suas respectivas classes, foi utilizando o algoritmo “r.slope.aspect”, do complemento GRASS, vinculado ao QGis 2.18 ‘Las Palmas’, no qual foi expressa a declividade em porcentagem. Como afirma Stoqui (2018), a classificação da declividade é fundamental na determinação da fragilidade por contribuir em processos erosivos e movimentos de massa. A declividade classificada quanto ao seu grau (Tabela 2) foi atribuída a níveis de fragilidade (ROSS, 1994).



Tabela 1 – Classificação da fragilidade de acordo com a variável pluviosidade de Ross (2012)

Classes Pluviométricas	Classe	Nível
Precipitação regular e volume de aproximadamente 1000mm/ano;”	Muito Fraco	1
Precipitação regular, e volume de aproximadamente de 2000mm/ano;	Fraco	2
Precipitação desigual, com períodos secos de 2 a 3 meses no inverno e no verão com maior intensidade;	Médio	3
Precipitação desigual, com períodos secos de 3 a 6 meses no Inverno e no verão com maior intensidade;	Forte	4
Precipitação regular, ou não, volumes que ultrapassam 25000mm/ano; ou irregular com altas intensidades e volumes anuais baixo não passando de 900 mm/ano (semiárido).	Muito Forte	5

Fonte: Ross (2012)

Tabela 2 – Classificação da fragilidade de acordo com a declividade, segundo Ross

Classes de Declividade	Classes de Fragilidade	Nível
Até 6%	Muito Baixo	1
De 6 a 12%	Baixo	2
De 12 a 20%	Médio	3
De 20 a 30%	Alto	4
Acima de 30%	Muito Alto	5

Fonte: Ross (1994)

Assim, como o mapeamento dos solos também é um produto fundamental, em que, por meio do tipo de solo, é classificado quanto à erodibilidade natural, baseando-se em critérios como, estrutura, textura, profundidade e características de escoamento (ROSS, 1994) (Tabela 3).

Tabela 3 – Classes de fragilidade do solo de acordo com Ross (1994)

Classes de fragilidade	Tipos de solo	Pesos
Muito baixa	Latossolo roxo, latossolo vermelho escuro e vermelho amarelo textura argilosa.	1
Baixa	Latossolo amarelo e vermelho amarelo textura média/argilosa.	2
Média	Latossolo vermelho amarelo, Luvisolo, Argissolo vermelho amarelo textura média/argilosa.	3
Forte	Argissolo vermelho amarelo textura média/arenosa, Cambissolos.	4
Muito forte	Podzolizados com cascalho, Litólicos e areias quartzosas.	5

Fonte: Ross (1994)



A geração do plano de uso e cobertura do solo foi baseada em classificação supervisionada de imagens, do satélite Landsat 8. A rotulação das manchas homogêneas (temas) foi fundamentada em amostras de no mínimo 100 pixels para cada rotulo (SANTOS; RIBEIRO; SILVA, 2016). Portanto, foram classificadas as principais tipologias de uso da terra, dentre elas, Caatinga Arbustiva Arbórea Fechada (CAAF), que tem como característica principal a cobertura florestal densa; Caatinga Arbustiva Arbórea Aberta (CAAA), caracterizada pela vegetação arbórea e arbustiva esparsa e a predominância de estrato herbáceo; Agricultura; Area Urbana e Corpos hídricos (Tabela 4).

Tabela 4 – Classes de proteção dos usos e coberturas da terra proposto por Ross (1994)

Tipo de cobertura	Classe de Fragilidade	Peso
CAAF	Muito Baixo	1
CAAA	Baixo	2
Corpos Hídricos	Médio	3
Agricultura	Alto	4
Urbanização	Muito Alto	5

Fonte: Adaptada de Ross (1994)

Com base na aplicação de Valle, Francelino e Pinheiro (2016), a fragilidade ambiental (Tabela 5) é formada a partir de uma álgebra de mapas do diagnóstico e mapeamento de vulnerabilidade associada às características do terreno. Para elaborar o mapa de fragilidade potencial foi necessário sobrepor as informações de pluviosidade, declividade do terreno e tipo de solo. A sobreposição do resultado da fragilidade potencial com as classes de uso e ocupação resultou no mapa fragilidade emergente.

Tabela 5 – Soma das pontuações (A = Pluviosidade; B = Declividade; C = Pedologia; D = Uso e ocupação da terra) e definição das classes de Fragilidade Potencial e Emergente

Pontuações A + B + C			=Fragilidade Potencial	+ D	=Fragilidade Emergente	Descrição das classes
1	1	1	03	1	04	Muito Baixa
2	2	2	04 a 06	2	05 a 08	Baixa
3	3	3	07 a 09	3	09 a 12	Média
4	4	4	10 a 12	4	13 a 16	Alta
5	5	5	13 a 15	5	17 a 20	Muito Alta

Fonte: Elaborado pelos autores

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados, baseada nas variáveis propostas por Ross (1994) e Spröl e Ross (2006), que englobam clima, relevo, solo, vegetação e recursos hídricos, permitiu um diagnóstico integrado da fragilidade em diferentes categorias de hierarquia. A abordagem, fundamentada no levantamento dos planos de informações de cada parâmetro e na aplicação da álgebra de mapas, revelou os níveis de fragilidade potencial e emergente.



No âmbito climático, atribuiu-se o valor 5, indicativo de um nível de fragilidade muito forte (Tabela 6). Este fator foi identificado como limitante, corroborando observações de Santos, Silva e Srinivasan (2007), que destacam a erosão hídrica como fenômeno comum e impactante no semiárido. A intensidade e irregularidades dos períodos chuvosos foram associadas à exploração inadequada dos recursos, evidenciando a importância estratégica desse componente.

Esses resultados ganham relevância à luz de publicações recentes que aprofundam a compreensão dos fenômenos climáticos na região. Trabalhos como os de (APS et al., 2018; SAHOO; DHAR; KAR, 2016). corroboram a influência crítica do clima na dinâmica da fragilidade ambiental, ressaltando a necessidade de estratégias adaptativas diante das mudanças observadas.

Além do clima, as variáveis de relevo, solo, vegetação e recursos hídricos também desempenharam papéis fundamentais na caracterização da fragilidade. A sinergia entre esses elementos revelou padrões complexos de interação, delineando áreas mais suscetíveis aos processos de degradação ambiental.

Contribuições recentes da literatura, como (APS et al., 2018) e (SAHOO; DHAR; KAR, 2016), enriquecem a compreensão sobre a relação entre esses fatores e os processos de fragilização ambiental. Destacam-se, especialmente, as abordagens inovadoras de modelagem que integram dados de sensoriamento remoto e técnicas avançadas de análise espacial, fornecendo insights valiosos para a gestão sustentável da bacia do rio Apodi-Mossoró.

Em suma, a discussão dos resultados, enriquecida pelas contribuições recentes da literatura, ressalta a complexidade da fragilidade ambiental na bacia do rio Apodi-Mossoró. Essa abordagem integrada, considerando as variáveis climáticas e outros elementos ambientais, é essencial para orientar estratégias de manejo e preservação, alinhadas com os princípios do desenvolvimento sustentável.

Tabela 6 – Classe de fragilidade para variável climática

Classe Pluviométrica	Classe	Nível
Precipitação regular ou não, volumes que ultrapassam 2500 mm/ano; ou irregular com altas intensidades e volumes anuais baixos, não passando de 900 mm/ano (semiárido)	Muito Forte	5

Fonte: Ross (1994)

A declividade média foi desenvolvida a partir dos critérios de Ross (1994), e se caracteriza por ser predominantemente plana, com baixa fragilidade ambiental. A declividade média da bacia hidrográfica tem influência direta nos processos erosivos (Tabela 7).



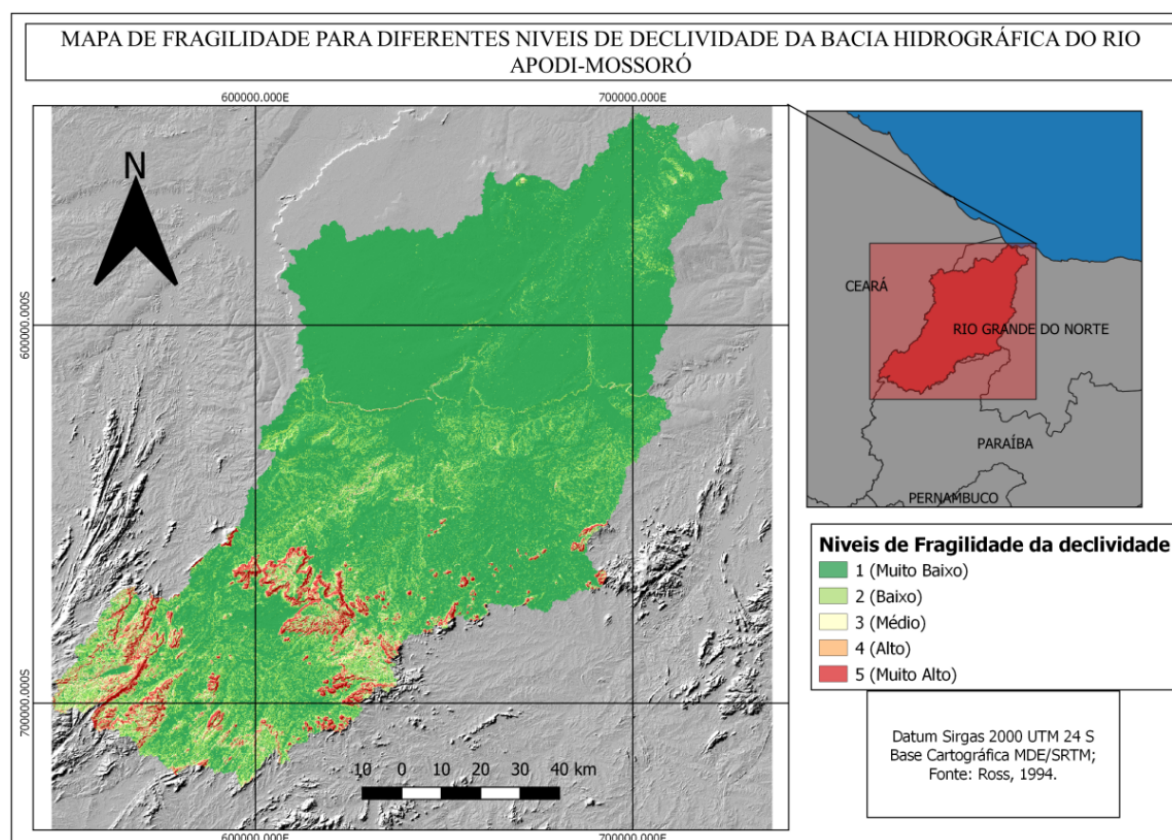
Tabela 7 – Classificação e quantificação da declividade predominante na bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró

Classes de Declividade	Classe de Fragilidade (Peso)	Área
Até 6%	Muito Baixo (1)	76,49%
De 6 a 12%	Baixo (2)	14,53%
De 12 a 20%	Médio (3)	3,81%
De 20 a 30%	Alto (4)	2,34 %
Acima de 30%	Muito Alto (5)	2,80%

Fonte: Ross (1994)

As regiões de Martins e Portalegre apresentaram as maiores taxas de declividade. Maia, Bétard, Bezerra (2016) cita que essa região sofreu processos endógenos na formação do relevo, como o soerguimento epirogênico. Áreas que apresentaram alta fragilidade quanto à declividade são descritas, por Ross (1994), como suscetíveis a processos geomorfológicos, o que Tricart (1977) classificou como meios instáveis (Figura 3).

Figura 3 – Declividade média da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró



Fonte: Elaborado pelos autores



O nível de fragilidade e sua área de cobertura indicam o predomínio do nível de fragilidade média, somando 37,03% da área, e o nível de fragilidade alto, com 33,78% (Tabela 8). Os tipos de solo com fragilidade muito alta representam 16,52% da bacia, a saber: gleissolos, que são formados por meio de processos de inundação, localizado na foz; vertissolos, ao longo dos principais afluentes; e neossolo, na porção central da bacia (Figura 4).

Tabela 8 – Classificação e quantificação dos tipos de solos da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró

Tipo de Solo	Classe de Fragilidade (Peso)	Área%
Cambissolo	Médio (3)	22,95%
Gleissolo	Muito Alto (5)	1,94%
Planossolo	Médio (3)	2,69%
Vertissolo	Muito Alto (5)	1,76%
Latossolo	Muito Baixo (1)	8,52%
Luvissolo	Alto (4)	13,65%
Neossolo	Muito Alto (5)	12,82%
Chernossolo	Alto (4)	7,04%
Argissolo	Alto (4)	17,26%
Argissolo	Médio (3)	11,39%

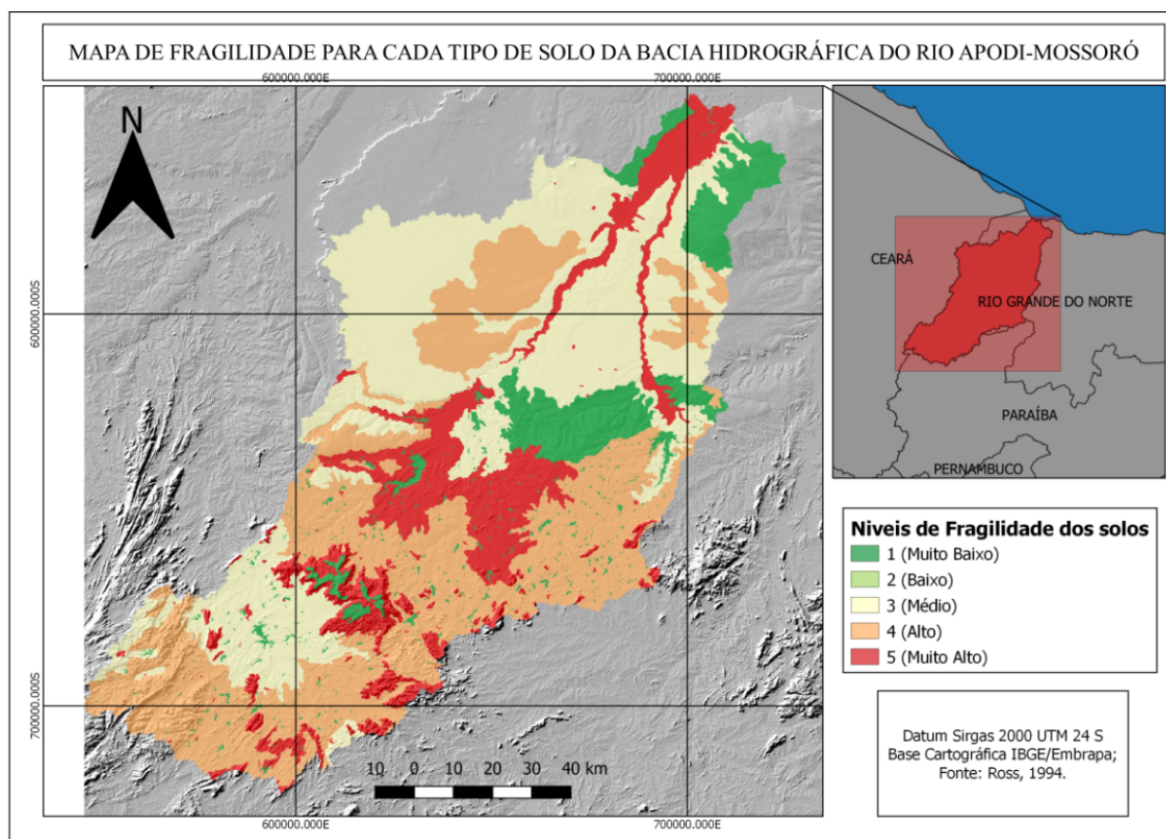
Fonte: Elaborado pelos autores

A fragilidade de cada tipo de solo é relacionada com as propriedades físicas, como textura, profundidade e relevo, e com as características de mecanização. Carlos Júnior (2016) aponta que os luvisolos e neossolos, da parte central da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró, apresentam impedimento devido à forte declividade, por serem solos rasos e pedregosos.

De acordo com Medeiros, Jesus e Alves (2019), os chernossolos apresentam característica de alta fertilidade, ricos em matéria orgânica, devido sua ocorrência em terrenos suave-ondulados, e são mais suscetíveis a processos erosivos. Os argissolos expressam dois níveis de fragilidade distintos, cujos critérios para tal distinção são a textura, pedregosidade e relevo.



Figura 4 – Nível de fragilidade com base nos tipos de solo presentes na bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró

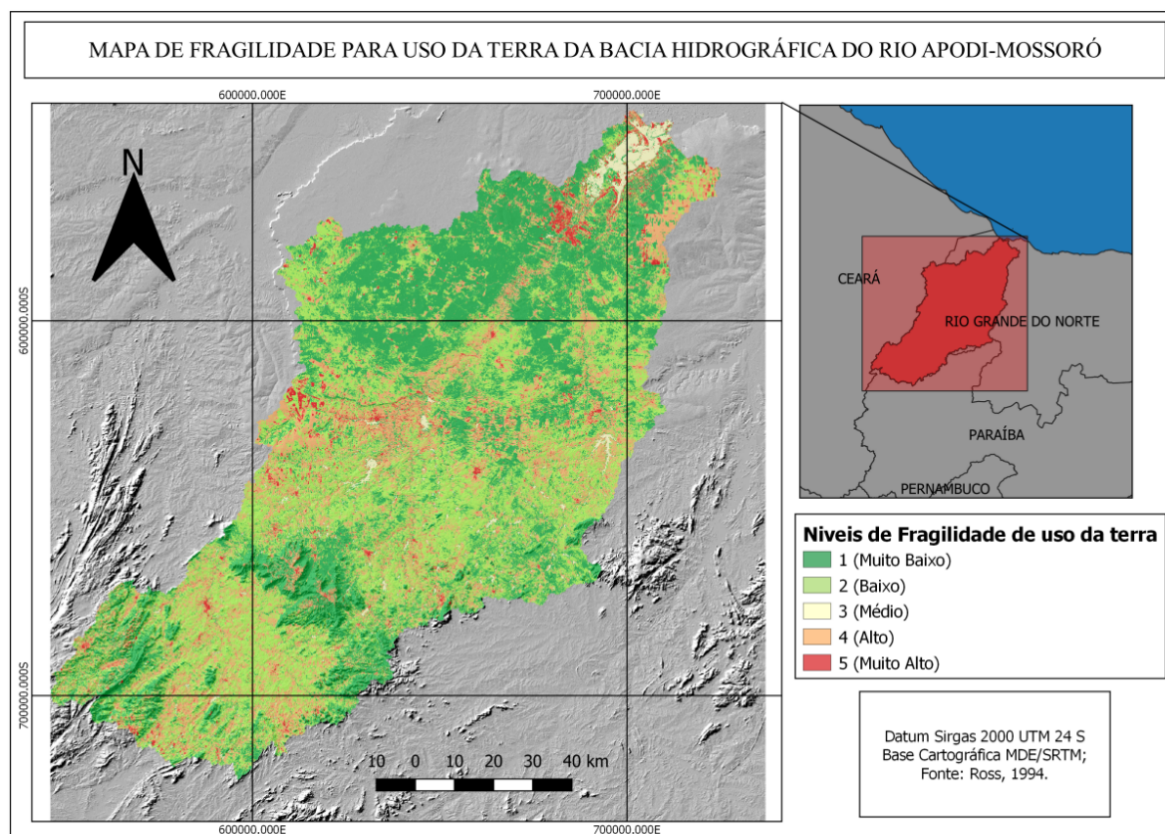


Fonte: Elaborado pelos autores

A Figura 5 representa os níveis de fragilidade com relação aos tipos de uso da terra, os quais foram classificados pelo método *minimum distance*, em 05 tipologias distintas, de modo que pra cada uma foi atribuído um peso e seu respectivo nível de fragilidade (Tabela 9). O índice Kappa, para esta classificação, apresentou acurácia satisfatória de 0,72, indicando forte concordância.



Figura 5 – Espacialização da cobertura e uso da terra na bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró



Fonte: Elaborado pelos autores

A partir dessa classificação, foram quantificadas as unidades de caatinga arbustiva arbórea fechada (CAAF), caatinga arbustiva arbórea aberta (CAAA), corpos hídricos, agricultura e áreas urbanas. No que se refere aos níveis de fragilidade de uso e cobertura da terra, pode-se constatar que, pouco mais de 74% da bacia hidrográfica, é representada pelos níveis muito baixo e baixo (Tabela 9).

Tabela 9 – Classificação e quantificação dos tipos de cobertura da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró

Tipo de cobertura	Classe de Fragilidade	(Peso)	Área (%)
Área Florestal	Muito Baixo	1	40,3
Área Campestre	Baixo	2	33,4
Corpos Hídricos	Médio	3	1,26
Área Agrícola	Alto	4	19,8
Urbanização	Muito Alto	5	2,3

Fonte: Elaborado pelos autores



Santos et al. (2000) afirmam que a cobertura de caatinga nativa apresenta funções como a diminuição significativa da produção de sedimentos, que é importante no controle de erosão. Porém, a caatinga aberta não apresenta o mesmo nível de proteção, como afirmam Francelino et al. (2003), cuja predominância é de espécies de pequeno porte e herbáceas, que devido ao baixo índice de cobertura, ocorrem em solos rasos e pedregosos, além da ocorrência de atividades silvipastoris.

A fragilidade potencial (Figura 6) é baseada nos parâmetros de clima, pedologia e declividade média. Na bacia hidrográfica, predominam os níveis médio e alto somando pouco mais de 96% (Tabela 10). A fragilidade de nível muito alta ocorre, principalmente, na região serrana de Portalegre e Martins, influenciada, sobretudo, pelas características da declividade média elevada. O que corrobora com os resultados observados por Silva et al. (2020), que apontam, na região sul da bacia, as taxas de Erosividade mais elevadas da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró.

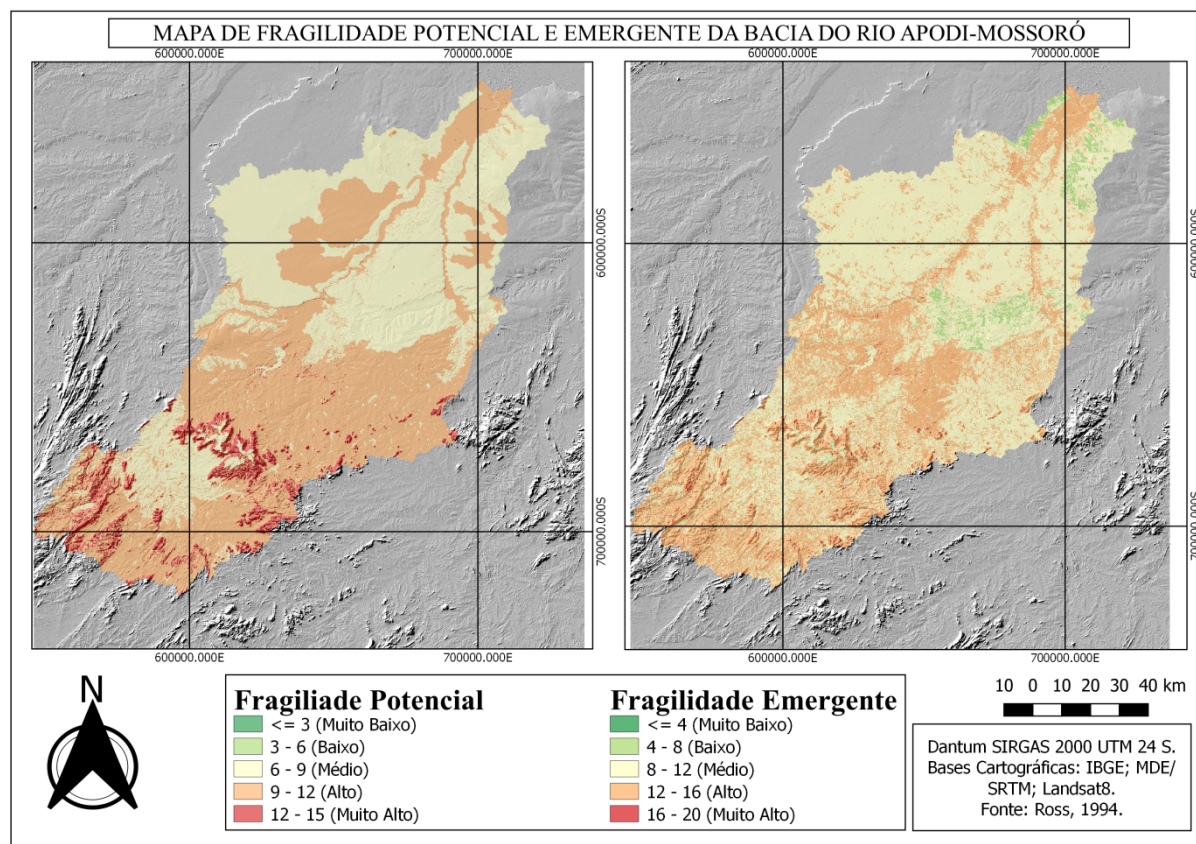
Dessa forma, A predominância das classes de fragilidade média e alta, que juntas somam mais de 90% da área da bacia, demonstra um quadro de vulnerabilidade ambiental que exige ações imediatas de planejamento territorial. Este resultado evidencia que, apesar da aparente estabilidade em algumas porções da bacia, os fatores climáticos e pedológicos exercem uma pressão constante sobre o equilíbrio do sistema

Pires et al. (2015) e Santos e Marchioro (2020) apontam que a relação entre a declividade e os eventos de precipitação se configura como ambiente naturalmente frágil. Ainda de acordo com Santos e Marchioro (2020), o relevo montanhoso e escarpado possui declividades superiores a 30%, que, atrelado a solos como Cambissolos e Neossolos, tem, como característica, níveis de fragilidade alta e muito alto. Ramos e Coelho (2019) afirmam que os níveis de fragilidade média e alta tem correlação com áreas urbana e encostas de tabuleiros.

A fragilidade emergente (Figura 6) é resultante da soma da fragilidade potencial ao parâmetro de uso da terra com a fragilidade potencial. A cobertura vegetal foi importante na redução das áreas de fragilidade muito alta, que foi de 5,11% para 0,67%, e alta, partindo de 42,74% para 40,45% (Tabela 10). Barros et al. (2019) indicam que a cobertura florestal ocorre principalmente em áreas de baixa fragilidade ambiental. Neste sentido, Santos e Marchioro (2020) afirmam que o uso da terra com mata nativa se apresenta como fator atenuante da fragilidade. Diodato et al. (2019) corroboram sobre o efeito atenuante da vegetação, que ocorre, principalmente, na área serrana, porção superior da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró.



Figura 6 – Mapa de fragilidade potencial e emergente da Bacia do rio Apodi-Mossoró



Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 10 – Soma das pontuações (A = Pluviosidade; B = Declividade; C = Pedologia; D = Uso e ocupação da terra) e definição das classes de Fragilidade Potencial e Emergente

Pontuações A + B + C			= Fragilidade Potencial	(Área)	+ D	= Fragilidade Emergente	(Área)	Descrição das classes
1	1	1	03	-	1	04		Muito Baixa
2	2	2	04 a 06	-	2	05 a 08	5,4%	Baixa
3	3	3	07 a 09	42%	3	09 a 12	55,3%	Média
4	4	4	10 a 12	51,9%	4	13 a 16	38,4%	Alta
5	5	5	13 a 15	6,5%	5	17 a 20	0,70%	Muito Alta

Fonte: Elaborado pelos autores

De acordo com Pires et al. (2015), o mapeamento da fragilidade ambiental se configura como ferramenta fundamental na elaboração das diretrizes para um melhor aproveitamento do território. Barros et al. (2019) ressaltam a importância da análise para o



auxílio no ordenamento e preservação da unidade de planejamento. Ramos e Coelho (2019) afirmam que esta análise auxilia no manejo de bacias hidrográficas, bem como na execução de Plano Diretor Municipal.

Os dados obtidos demonstram que as características geomorfológicas, combinadas às variações climáticas do semiárido, atuam de forma sinérgica no aumento da suscetibilidade à erosão e ao assoreamento. Isso permite afirmar que a fragilidade ambiental não pode ser compreendida isoladamente, mas sim como resultado da interação entre múltiplos fatores biofísicos e antrópicos.

A análise da fragilidade mostra que cada parte da bacia reage de forma diferente: nas áreas serranas, a inclinação do terreno traz riscos mais evidentes, enquanto nas áreas centrais e baixas os maiores desafios vêm do tipo de solo e do uso agrícola intenso. Reconhecer essas diferenças não é apenas um exercício acadêmico, mas um caminho estratégico para orientar práticas de manejo ambiental mais justas e eficazes.

Além disso, esses resultados não ficam restritos ao campo da pesquisa: eles oferecem apoio direto à construção de políticas públicas e planos diretores municipais. Ao destacar os setores mais vulneráveis, o estudo mostra onde os esforços de conservação e redução de riscos podem ser mais urgentes. Diante disso, Integrar essas informações à gestão territorial significa diminuir a fragilidade e a vulnerabilidade da bacia e tornar o planejamento mais próximo da realidade vivida pelas comunidades locais.

Sendo assim, o mapeamento da fragilidade ambiental vai além da teoria: ele se torna uma ferramenta prática para o Comitê de Bacia Hidrográfica e para gestores públicos municipais. Identificar as áreas críticas e compreender sua relação com os diferentes usos do solo abre caminho para intervenções mais eficientes, capazes de equilibrar produção, conservação e qualidade de vida no ambiente da bacia hidrográfica.

CONCLUSÕES

Os modelos cartográficos indicam como resultado da fragilidade potencial, destacada pelos aspectos físicos da bacia hidrográfica, níveis de fragilidade elevada, sobretudo, devido aos parâmetros de declividade, condições climáticas e tipos de solo.

Por meio do mapeamento, foi possível avaliar e quantificar os níveis de fragilidade da bacia hidrográfica, de modo que o nível predominante na bacia é o de fragilidade emergente média, seguido de fragilidade alta.

Com relação aos tipos de uso, especialmente, no que se refere à importância da cobertura florestal, que predomina em áreas de maior fragilidade potencial, apresenta como característica seu efeito atenuante na quantificação da fragilidade emergente. Em suma, a pesquisa atendeu seu objetivo de apresentar de que forma os diferentes tipos de uso da terra influenciam nos níveis de fragilidade, para o entendimento dos processos de degradação da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró – RN.



Com o auxílio de ferramentas SIGs, aliando técnicas de sensoriamento remoto com a metodologia de fragilidade ambiental, com base na álgebra de mapas, a partir dos planos de informações referentes as características climáticas, de declividade, de solo e de uso da terra, produziu resultados importantes relacionados aos aspectos ambientais de bacias hidrográficas, os quais podem servir como subsídios para o manejo da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró, bem como, o planejamento de políticas públicas junto ao comitê de bacia hidrográfica.

A força da pesquisa também se confirma ao ser confrontada com estudos recentes da literatura nacional e internacional. Essa validação revela que os padrões encontrados na bacia Apodi-Mossoró dialogam com experiências de outras regiões semiáridas do mundo, o que fortalece a credibilidade científica e mostra que os desafios locais fazem parte de um cenário mais amplo de vulnerabilidade ambiental.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou avaliar e quantificar o percentual de degradação, a partir da espacialização dos planos de informações, identificando as áreas de conflitos e de maior fragilidade.

Os parâmetros morfométricos, obtidos a partir do primeiro artigo, fornecem informações relevantes sobre a suscetibilidade, das sub-bacias, a enchentes. Apesar das sub-bacias 03, 11, 13 e 18 apresentarem um formato achatado, em condições pluviométricas normais, não apresentam suscetibilidade a enchentes (Cavalcante, Grigio; Diodato, 2021).

Ainda de acordo com os resultados do primeiro artigo, a partir da aplicação do DFC, foi possível determinar o grau de deterioração de cada sub-bacia. O total da deterioração das sub-bacias estudadas é classificado como alta com, 27,77%, em que, nas sub-bacias 01 e 02, apresentaram os maiores percentuais no grau de deterioração sendo indicadas como áreas prioritárias na atenção do poder público.

A avaliação e quantificação dos níveis de fragilidade potencial e emergente da bacia hidrográfica apresentaram resultados significativos, de modo que, o percentual do nível predominante de fragilidade resultou na categoria média, seguido da categoria alta. A cobertura vegetal nas áreas de maior fragilidade potencial, como áreas com altas declividades, foi importante na mitigação da fragilidade muito alta e alta.

A aplicação de técnicas de geoprocessamento é uma etapa fundamental na gestão de sistemas ambientais, como é o caso das bacias hidrográficas, visto que possibilita, por meio do uso de técnicas, facilitar a análise da morfometria, auxiliar no diagnóstico físico-conservacionista - DFC e no levantamento da fragilidade ambiental, proporcionando uma visão detalhada das áreas prioritárias, quanto ao grau de deterioração, e das áreas mais frágeis, criando maiores possibilidades e subsídios, junto ao Comitê de Bacia Hidrográfica, na construção de políticas públicas que venham a manejar de forma adequada essas áreas, principalmente por se tratar de uma bacia hidrográfica de grande importância para o desenvolvimento local, regional e do Rio Grande do Norte.



Por fim, ambos os artigos apresentam relevância no estudo da degradação ambiental, possibilitando assim, como objetivo da pesquisa, a quantificação do grau de degradação da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró, por meio de parâmetros biofísicos, tendo como benefício a espacialização e quantificação das áreas de conflitos e de maior fragilidade ambiental, e, dessa maneira, fornecendo subsídios para atenuação dos processos de degradação na bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró-RN.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- APS, R.; DEEGAN, B.; GIBSON, C.; KILILAN, M.; O'MAHONY, C. Marine environmental vulnerability and cumulative risk profiles to support ecosystem-based adaptive maritime spatial planning. *ICES Journal of Marine Science*, v. 75, n. 7, p. 2488-2500, 2018.
- CARLOS JÚNIOR, A. A. Mapeamento das áreas mecanizáveis da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró aplicando avaliação multicriterial. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Semi-Árido, Programa de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água, Mossoró, 2016.
- CAVALCANTE, A. E. Q. M.; GRIGIO, A. M.; DIODATO, M. A. Morfometria e diagnóstico físico conservacionista (dfc) em 19 sub-bacias da bacia hidrográfica Apodi Mossoró. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.14, n.7, p. 3891-3909, 2021.
- DINIZ, M. T. M. OLIVEIRA, G. P. MAIA, R. B. FERREIRA, B. Mapeamento geomorfológico do estado do Rio Grande do Norte. *Rev. Bras. Geomorfol.* (Online), São Paulo, v.18, n.4, (Out-Dez) p.689-701, 2017
- DIODATO, M. A., GRIGIO, A. M., PARANHOS FILHO, A. C. ; SILVA, K. E. F. ; SILVA, R. S. Mapeamento da densidade e da cobertura vegetal da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró-RN. In: VI Congresso Nordestino de Engenharia Florestal II Workshop do Projeto Caatinga, 2019, Mossoró. Engenharia Florestal no Nordeste: Identidade e Desenvolvimento. Mossoró: Queima Bucha, 2019. p. 260-266.
- FRANCELINO, M. R.; FILHO, E. I. F.; RESENDE, M., LEITE, H. G. Contribuição da caatinga na sustentabilidade de projetos de assentamentos no sertão norte-rio-grandense. *Rev. Árvore*, Viçosa, MG, v. 27, n. 1, p. 79-86, fev. 2003.
- MAIA, R. P. e BEZERRA, F. H. R. Geomorfologia e neotectônica da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró – NE/Brasil. *Mercator*, Fortaleza, CE, v. 11, n. 24, p. 209-228, jan./abr. 2012.
- MAIA, R. P.; BÉTARD, F.; BEZERRA, F.H.R. Geomorfologia dos Maciços de Portalegre e Martins – NE do Brasil: Inversão do relevo em análise. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. v 17. n 2, 2016.
- MEDEIROS, R. B. JESUS, C. S. ALVES, L. B. Fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do córrego formoso, Bonito/Mato Grosso do Sul. *A Geografia Brasileira na Ciência-Mundo: produção, circulação e apropriação do conhecimento*. In: ENANPEGE, 12., 2019, São Paulo, SP, Anais... São Paulo, SP, 2019.
- OLIVEIRA, M. A.; QUEIROZ, R. A. C. A poluição do rio Mossoró (RN) e a ação intervencionista do Ministério Público. In: ENCONTRO NACIONAL DA ANPPAS, 6., 2008, Brasília, DF, Anais. Brasília, DF. 2008.
- ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Brasília, DF, 2015. Disponível em: <https://bit.ly/2vsiWQq>. Acesso em: 22 nov. 2023.
- PIRES, L. C.; PESSÔA, V. D. de A.; SANTIAGO, A. D. de; BAPTISTA, D. S. Análise da fragilidade ambiental do município de Aquidauana-MS. *Caderno de Geografia*, v.25, n.43, 2015.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Versão 2.18. 2019. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>.
- RAMOS, A. L. D.; COELHO, A. L. N. Avaliação da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do rio Jacaraípe e APA da Lagoa Jacuném, Serra – ES. *Ciência Geográfica*. Bauru, SP, v. 23, 2019.



REBOITA, M. S., CAMPOS, B., SANTOS, T., GAN, M. A., & CARVALHO, V. Análise sinótica e numérica de um VCAN no Nordeste do Brasil (Synoptic and numerical analysis of a VCAN in the Brazilian Northeast). *Revista Brasileira De Geografia Física*, 10(1), 041–059. 2017. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20170004>.

ROSS, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. *Revista do Departamento de Geografia*, São Paulo, SP, n. 8, p.63-74, 1994.

_____. Landforms and environmental planning: Potentialities and Fragilities. *Revista do DG-USP*, São Paulo, SP, p. 38-51, 2012.

SAHOO, S.; DHAR, A.; KAR, A. Environmental vulnerability assessment using Grey Analytic Hierarchy Process based model. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 56, p. 145–154, 2016.

SANTOS, C. A. G. et al SANTOS, Carlos de Oliveira; SOARES, José da Costa; SILVA, José dos Santos. Influência do tipo da cobertura vegetal sobre a erosão no semi-árido Paraibano. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.*, Campina Grande, PB, v. 4, n. 1, p. 92-96, apr. 2000.

SANTOS, C. A. G; SILVA, R. M; SRINIVASAN, V. S. Análise das perdas de água e solo em diferentes coberturas superficiais no semi-árido da Paraíba. *Revista OKARA: Geografia em debate*, João Pessoa, PB, v.1, n.1, p. 1-152, 2007.

SANTOS, J. U.; MARCHIORO, E. Análise empírica ambiental da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, Espírito Santo, Brasil. *Revista do Departamento de Geografia*, São Paulo, SP, v, 39, 2020.

SANTOS, L. L. RIBEIRO, V. O. SILVA, J. L. A. Aplicação de geotecnologias gratuitas e livres na delimitação e análise do uso e cobertura do solo na da Bacia Hidrográfica do córrego Laranja Doce. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS DO PANTANAL, 6., 2016, Cuiabá, MT, Anais... Cuiabá, MT 2016, p. 936-945. Disponível em: <https://www.geopantanal.cnptia.embrapa.br/2016/cd/pdf/p100.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2022

SILVA, B. Kalis de N., LIMA, V. P. de, LIMA, A. S., ANDRADE, E. G., SOUSA, F. de A. Avaliação de Extremos de Erosividade Causados pela Precipitação na Bacia do Rio Apodi/Mossoró-RN. *Rev. bras. meteorol.*, São Paulo, SP, 2020.

SPRÖL, C.; ROSS, J. Análise Comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. *GEOUSP Espaço e Tempo (Online)*, n. 15, p. 39-49, jun. 2006.

STOQUI, V B. Fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Córrego da Cascata - Presidente Prudente/SP-BR. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, 2018.

TRICART, J. Ecodinâmica. Série recursos naturais e meio ambiente. Rio de Janeiro: IBGE, 1977.

TROMBETA, L. R; LEAL, A. C. Planejamento ambiental e geocologia das paisagens: contribuições para a bacia hidrográfica do córrego guaiçarinha, município de Álvares Machado, São Paulo, Brasil. *Revista Formação (online)*, vol. 3; n.23, p. 187-216, mai./ago. ISSN: 2178-7298. ISSN-L: 1517-543X, 2016.

VALLE, I. C. FRANCELINO, M. R. PINHEIRO, H. S. K. Mapeamento da Fragilidade Ambiental na Bacia do Rio Aldeia Velha, RJ. *Floresta e Ambiente* 2016; 23(2): 295-308. ISSN 2179-8087 (online). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.107714>. Acesso em: 18 ago 2023