

## Processamento analítico hierárquico no mapeamento da fragilidade ambiental à erosão do solo

### RESUMO

**Lizza Adrielle Nascimento Santos**

[Lizza\\_Adrielle@hotmail.com](mailto:Lizza_Adrielle@hotmail.com)

[orcid.org/0000-0001-5125-8747](https://orcid.org/0000-0001-5125-8747)

Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), Feira de Santana, Bahia, Brasil.

**Paulo Sérgio de Rezende Nascimento**

[psrn.geologia@gmail.com](mailto:psrn.geologia@gmail.com)

[orcid.org/0000-0002-4929-7337](https://orcid.org/0000-0002-4929-7337)

Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

**Glauber Vinicius Pinto de Barros**

[glauber.barros@hotmail.com](mailto:glauber.barros@hotmail.com)

[orcid.org/0000-0002-8324-1402](https://orcid.org/0000-0002-8324-1402)

Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió, Alagoas, Brasil.

Para análise espacial da vulnerabilidade à erosão do solo, as geotecnologias maximizam o tempo e minimizam os custos, dentre as quais se destacam o sensoriamento remoto e o geoprocessamento. O objetivo do presente estudo foi aplicar a análise multicriterial para determinar a fragilidade ambiental potencial e emergente e obter um diagnóstico para a tomada de decisão frente aos processos erosivos da Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba no estado de Sergipe. O principal procedimento técnico empregado foi o Processo Analítico Hierárquico (AHP), cujos critérios utilizados para a avaliação das fragilidades potencial e emergente foram: dissecação do relevo, precipitação, hipsometria, declividade e uso e cobertura do solo. Os resultados obtidos possibilitaram concluir que 13,44%, 71,45% e 15,11% da área de estudo apresentaram baixa, média e alta fragilidade ambiental emergente à erosão, respectivamente. A baixa fragilidade ambiental encontra-se em pequenas áreas esparsas compostas por florestas, mangues, praias e dunas e a média estende-se por toda a bacia. A alta fragilidade ambiental concentra-se na porção centro-norte das regiões semiárida e agreste em decorrência da conversão da vegetação natural em atividades agropecuárias. O produto cartográfico gerado retratou a gravidade decorrente da acentuada interferência humana quanto aos processos erosivos na área de estudo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise multicriterial. Inferência geográfica. Processo analítico hierárquico.

## INTRODUÇÃO

A intensificação do processo erosivo é uma das principais causas da degradação acelerada do solo, com perdas muito superiores às taxas naturais de reposição (NEEDELMAN, 2013). A erosão hídrica transporta sedimentos e agrotóxicos para rios, lagos e reservatórios causando o assoreamento, contaminação desses corpos d'água e extinção da biodiversidade (MERRITT et al., 2003). Destaca-se a perda da fertilidade precoce de terras produtivas que desencadeia o avanço das fronteiras agrícolas e aumentando a erosão do solo. Os processos erosivos naturais são condicionados pelo tipo de rocha/solo, precipitação, declividade, altitude e extensão da encosta e estrutura estratificada da vegetação (SANTOS et al., 2019). Embora seja um dos processos geológico-geomorfológicos mais estudados, a erosão do solo ainda não é compreendida em sua totalidade, em decorrência da complexidade entre as interações dos fatores condicionantes naturais e as intervenções antrópicas (ZANATTA et al., 2017). Estas intensificam os fluxos naturais de matéria e energia dos ambientes, aumentando os impactos erosivos (MENDONÇA et. al., 2020).

Uma das maneiras eficientes para a mitigar os impactos erosivos é a seleção de áreas prioritárias para a conservação da vegetação nativa e recuperação do solo erodido, definindo a potencialidade à erosão hídrica e as restrições do uso e ocupação da terra (GUIMARÃES; SANTOS, 2007; SANTOS; NASCIMENTO, 2019). Nesse contexto, a fragilidade ambiental consiste nos diferentes níveis hierárquicos da dinâmica natural ou induzida. Isso posto, a fragilidade ambiental é maior ou menor em função das características inerentes do meio e do tipo e grau de intervenção humana, classificada como fragilidade ambiental potencial e emergente, respectivamente (ROSS, 1994). A fragilidade potencial erosiva ocorre por fatores intrínsecos, como a dissecação do solo, declividade e altitude do terreno e precipitação. A fragilidade emergente de fatores extrínsecos, como o uso da terra. Nessa seara, as pesquisas tornaram-se importantes instrumentos de subsídio das ações de mitigação e contenção dos processos erosivos, em decorrência da interação entre a fragilidade natural e induzida nas bacias hidrográficas (MENDONÇA et al, 2020).

As bacias hidrográficas são as unidades básicas de gerenciamento socioambiental descentralizado de conservação e proteção do ambiente. No estado de Sergipe, de acordo com a Lei nº 3.870 de 25 de setembro de 1997, a bacia hidrográfica é a unidade territorial para a implementação de políticas públicas e para a gestão dos recursos hídricos descentralizada, integrada com os usos dos recursos naturais e propor alternativas de evolução das atividades produtivas e de modificações do uso e cobertura da terra (ESTADO DE SERGIPE, 1997). Em função do restrito dimensionamento espacial do estado sergipano e da lógica de dominação do capital e interesses econômicos, as bacias hidrográficas apresentam-se demasiadamente antropizadas (BARBOSA et al., 2019).

Desde o século XIX, o modo de produção rural no estado de Sergipe, em particular, na Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba (BHRJ), foi a criação de gado bovino e o cultivo de cana-de-açúcar de forma extensiva. Nessa condição histórica produtiva, vastas áreas florestadas foram desmatadas para dar lugar à agropecuária (NASCIMENTO et al., 2015). Nas últimas décadas, a exploração de petróleo/gás onshore e potássio tornou a BHRJ a principal bacia geoeconômica do estado de Sergipe. Por outro lado, propiciou o aumento do escoamento de

sedimentos nos cursos d'água, ocasionando o assoreamento. Diante desse cenário, é imperativo propor um mapa síntese da fragilidade ambiental à erosão hídrica, visando minimizar a geração, transporte e deposição de sedimentos nos corpos hídricos superficiais da BHRJ.

A obtenção da fragilidade ambiental de uma bacia hidrográfica pode ser realizada por meio de tecnologias eficientes que maximizem o tempo e minimizem os custos de mapeamento e análise espacial. Dessa forma, as geotecnologias vêm sendo amplamente utilizadas nas mais diversas áreas socioeconômicas e apresentam-se como ferramentas de suporte no diagnóstico e prognóstico ambiental (DIAS et al., 2014; FUSHITA et al., 2011; GONZALVES et al., 2016; PINESE JÚNIOR; RODRIGUES, 2012; RIBEIRO et al., 2016). Esses trabalhos destacam a relevância da utilização do Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process - AHP*), como suporte à tomada de decisão com múltiplos critérios com variáveis hierárquicas de solução.

Nesse contexto, o objetivo geral do presente estudo foi aplicar a análise multicritério empregando o método AHP para determinar a fragilidade ambiental potencial e emergente, frente aos processos erosivos da BHRJ, visando obter um diagnóstico para a tomada de decisão. Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos: elaborar a base de dados para aplicação do método AHP a partir da confecção dos mapas hipsométrico, declividade, precipitação, dissecação do relevo e uso e cobertura da terra da BHRJ; e avaliar as potencialidades e fragilidades ambientais da bacia através das características do meio biofísico e antrópico.

## PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO (AHP)

A Análise de Decisão Multicritérios (*Multi-Criteria Decision Analysis - MCDA*) é uma modelagem matemática de padronização e decisão para resolver problemas complexos nos quais existem diversos objetivos a serem alcançados simultaneamente (RUSSO; CAMANHO, 2015; SOUZA et al., 2018). Há variados métodos multicritérios de apoio à tomada de decisão, dentre eles o AHP, advindos da Teoria da Utilidade Multiatributo (*Multiple Attribute Utility Theory - MAUT*). Teoria fundamentada na agregação multicritério a partir da síntese de sistema de relações de preferência relativa de um atributo em relação ao outro.

Cabe ao decisor, a ponderação eficiente na escolha do atributo que receberá o maior ou menor peso com relação à sua importância na tomada de decisão (RAFFO, 2012; REIS; LÖBLER, 2012). No processo de decisão é fundamental definir e avaliar as alternativas e os critérios relevantes do problema e determinar a avaliação global de cada alternativa (SAATY; SHANG, 2011). O processo permite estruturar uma decisão em níveis hierárquicos, determinando uma medida global para cada uma das alternativas e priorizando-as. As variáveis de maior importância transmitem a sua maior influência para as variáveis menos importantes, em níveis hierárquicos inferiores, que por sua vez contribuem também com a funcionalidade e coerência nos níveis superiores.

A coerência nos julgamentos entre as variáveis é estabelecida pela razão de consistência menor do que 0,1, minimizando a subjetividade dos pesos relativos e atribuindo confiança nos resultados (SHAHABI et al., 2014). Caso a razão de consistência não seja satisfeita, o decisor retornará à reciprocidade hierárquica até

que se alcance a consistência necessária ao processamento (PINESE JÚNIOR; RODRIGUES, 2012). O AHP baseia-se em três princípios: decomposição (estruturação hierárquica), julgamentos comparativos (construção da matriz, verificação da consistência e pesos relativos) e síntese de prioridades (padronização das alternativas e classificação final) (ALPHONCE, 1997).

A seguir são descritas as equações da modelagem do método AHP (PINESE JÚNIOR; RODRIGUES, 2012; SAATY, 1990). Para a solução do problema, a matriz fornece a razão  $a_{ij} = w_m/w_n$ , e os elementos da matriz seguem a regra da recíproca positiva:  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ , onde  $a_{ij}$  são valores reais positivos;  $i$  é o índice que representa a linha;  $j$ , a coluna;  $w_m$  e  $w_n$  são os pesos referentes à linha e à coluna (Equação 1):

$$a_{11} = [(w_1/w_1)/\Sigma(w_m/w_n)] \dots a_{1n} = [(w_1/w_n)/\Sigma(w_m/w_n)] \quad (1)$$

Normaliza-se estes valores, onde a soma de cada linha da matriz encontrada ( $Aw$ ) é dividido pela ordem da matriz  $n$ , definido o valor do Peso Processado  $P$  (Equação 2). A somatória destes resultados encontrados deve ser 1,0.

$$P_1 = \Sigma a_{1n}/n \dots P_m = \Sigma a_{mn}/n \quad (2)$$

O cálculo do  $\lambda_{max}$  indica o valor máximo do autovalor  $\lambda$  (Equação 3):

$$\lambda_{max} = 1/n \Sigma [Aw]/w_1 \quad (3)$$

Onde:  $[Aw]$  é a matriz do produto de comparação pareada pela matriz dos pesos a serem processados ( $w_i$ ). Uma boa estimativa dos coeficientes da matriz implica um  $\lambda_{max}$  mais próximo de  $n$ , medido pelo Índice de Consistência (IC) (Equação 4):

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

Após o cálculo dos pesos de cada fator avalia-se a sua aceitabilidade ou Razão de Consistência (RC), que deve ser menor que 10% (Equação 5):

$$RC = IC/IR \quad (5)$$

O Índice Randômico (IR) é derivado de uma amostra de 500 matrizes recíprocas geradas de forma aleatória. O IR utiliza uma escala de 9 pontos e é extraído da tabela de valores para matrizes quadradas de ordem  $n$  (Tabela 1).

Tabela 1 - Valores de IR para matrizes quadradas de ordem  $n$

N	3	4	5	6	7	8	9
R	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

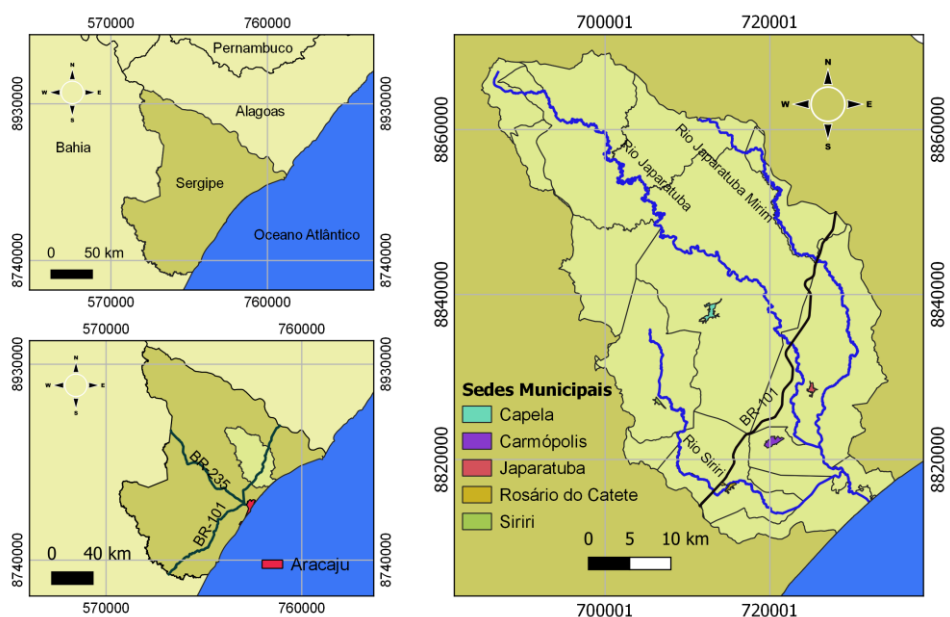
Fonte: Adaptado de Saaty (1990).

A precisão dos pesos não é uma condição *sine qua non*, mas um valor estimado, pois pela teoria de autovalores, o julgamento do decisor pode causar uma pequena perturbação em torno de um autovalor simples, mas o autovalor principal ainda é recíproco (SAATY, 1990).

## ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba (BHRJ) localiza-se entre os paralelos 10o13' e 10o47' de latitude sul e os meridianos 36o49' e 37o19' de longitude oeste no estado de Sergipe. O acesso principal, a pouco mais de 23km do centro da capital Aracaju, se faz pela Rodovia Federal BR-101. O seu rio homônimo tem uma extensão de 135km e drena uma área de 1.735km<sup>2</sup> com 248km de perímetro juntamente com seus 2 principais afluentes, os rios Siriri (margem direita) e o Japarutuba Mirim (margem esquerda). Apresenta uma população urbana e rural de 122.879 e 79.052 habitantes, respectivamente, distribuída em 20 municípios sergipanos com destaque para Capela, Carmópolis, Rosário do Catete e Siriri que representam 62,15% da população total da bacia (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de localização e acesso à Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba



Fonte: Autoria própria (2020).

Apresenta três regiões climáticas distintas: (i) Região Sub-úmida ou Megatérmico Úmido (30,18% da área), representada pelo litoral úmido, com temperatura entre 19oC e 32oC, evapotranspiração e pluviosidade médias anual de 1.200 mm e 1.500 mm, respectivamente; (ii) Região Agreste ou Megatérmico Sub-úmido (60,17% da área), com temperatura variando de 18oC a 33oC, com médias anual de evapotranspiração e pluviosidade de 1.400 mm e 900 mm, respectivamente; e (iii) Região Semiárida ou Megatérmico Sub-úmido Seco (9,63% da área), com temperatura entre 16oC e 36oC, evapotranspiração média anual de 1.500 mm e pluviosidade média anual de 700 mm (ESTADO DE SERGIPE, 2014).

As unidades geomorfológicas são compostas pelas planícies costeiras e flúvio-lagunar dos Depósitos Quaternários, tabuleiros costeiros do Grupo Barreiras, classificadas geologicamente como Coberturas Cenozoicas e pediplano sertanejo desenvolvido em uma variedade de rochas metamórficas e magmáticas proterozoicas da Faixa Dobramentos Sergipana (BRITO NEVES et al. 2014). Os neossolos quartzarênicos, espodosolos e gleissolos encontram-se associados aos sedimentos inconsolidados e arenitos das planícies e tabuleiros costeiros da região climática da faixa litorânea composta por resquícios de Mata Atlântica. Os

argissolos, latossolos, planossolos, vertissolos, chernozossolos e neossolos quartzarênico, flúvico e litólico estão associados às regiões semiárida e agreste constituídas por grande variedade de rochas cristalinas do pediplano sertanejo composto resquílios de Caatinga (ARAGÃO et al., 2011; EMBRAPA, 2014).

Em termos de uso e ocupação da terra, grande parte da bacia está relacionado à pastagem ou à área cultivada, principalmente com cana-de-açúcar, cultivo este tradicional na região. A área remanescente de floresta nativa é próxima a 6% do valor inicial e tende a diminuir com o avanço da área plantada de cana-de-açúcar ou do aumento da criação do gado (GOVERNO DE SERGIPE, 2014). As demais atividades econômicas são a exploração do petróleo, gás natural, sal gema, potássio, calcário, magnésio, turfa e areia, além do turismo e lazer, pesca e abastecimento humano. Destaca-se que a supressão da cobertura vegetal natural convertida em áreas agropecuárias vem intensificando os processos erosivos e de assoreamento, degradando os recursos hídricos, tanto no aspecto qualitativo como no quantitativo (ESTADO DE SERGIPE, 2014).

A BHRJ foi escolhida como área de estudo diante da relevante importância quanto a sustentabilidade econômica e ambiental da região, as reservas hídricas superficiais e subterrâneas são essenciais para o abastecimento público e atividades minerárias e agropecuárias representam fatores estratégicos na socioeconomia do estado de Sergipe. As características topográficas, pedológicas e pluviométricas e as mudanças de uso e ocupação do solo são fatores facilitadores do avanço do processo erosivo e compromete a sustentabilidade ambiental da bacia (ARAGÃO et al., 2011; SANTOS; NASCIMENTO, 2019).

## MATERIAL E MÉTODO

Os materiais necessários para o desenvolvimento desse trabalho foram os dados digitais do Estado de Sergipe nos formatos vetoriais (mapas da rede de drenagem e bacias hidrográficas) e matriciais (imagem Landsat-8 e Modelo Digital de Elevação - MDE) disponibilizados gratuitamente no Banco de Dados Georreferenciados do Atlas Digital, Sobre Recursos Hídricos de Sergipe e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); e o programa computacional de geoprocessamento QGIS da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo) de Código Aberto licenciado segundo a Licença Pública Geral (GNU).

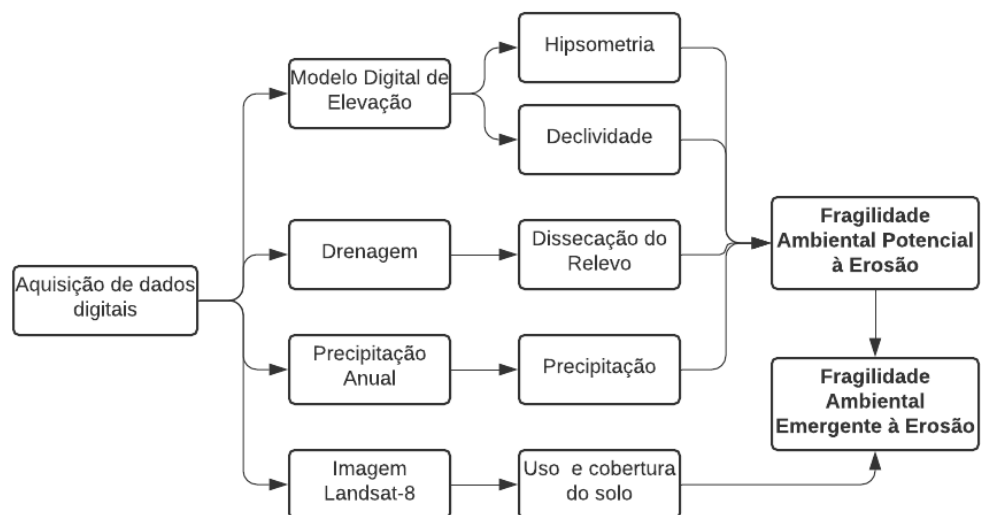
Uma das principais funcionalidades dos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) é a integração de dados em diversos formatos e escalas (CÂMARA, SOUZA; FREITAS, 1996). O avanço nas tecnologias de SIGs, envolvendo o problema da variabilidade de escala e resolução e da generalização cartográfica, amplamente difundidos por Allen; Starr (1982); Ruas; Lagrange (1995); Goodchild; Quattrochi (1997), estão cada vez mais robustas na análise espacial (MERCHANT; NARUMALANI, 2009; LIBÓRIO et al., 2020). Como as resoluções espaciais das imagens multiespectrais do Landsat-8 e do MDE são de 30 por 30 metros, a área mínima mapeável é de 30m<sup>2</sup> e a escala é de 1:100.000 (MIRANDA, 2005; SILVA, 2003). No entanto, a escala de apresentação dos mapas foi de 1:340.000.

O *software* QGIS fornece ferramentas para generalização cartográfica que permite alterar o nível de percepção do dado geográfico e compatibilizar a representação cartográfica com a escala, como por exemplo, a tolerância XY fornecida pelo usuário durante a criação ou importação da camada vetorial.

Maiores detalhes desses procedimentos podem ser vistos em Sampaio e Brandalize (2018). França et al. (2009) também utilizaram dados de diferentes fontes e escalas para aplicação do método AHP no zoneamento da fragilidade ambiental potencial e emergente de ecossistemas naturais e antropizados. A diferença mais significativa com o presente trabalho foi que os autores empregaram imagens do satélite RapidEye para mapear o uso e cobertura da do solo e dados MDE de 90 por 90 metros.

Os procedimentos metodológicos foram divididos em duas etapas (Figura 2): a primeira foi a confecção dos mapas de dissecação do relevo, precipitação, declividade, hipsometria e uso e cobertura do solo, por técnicas de sensoriamento remoto a partir da interpretação visual e automática de dados sensorizados; e a segunda etapa foi a realização, pelo método AHP, dos mapas de fragilidade ambiental potencial (intermediário) e emergente (síntese) à erosão hídrica.

Figura 2 – Fluxograma dos procedimentos operacionais



Fonte: Autoria própria (2020).

Para a confecção automática dos mapas das classes de hipsometria e de declividade foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) do Projeto Topodata. As classes hipsométricas foram definidas entre a 0 e 300m, com intervalo altimétrico de 50 m, considerando o erro vertical que varia de 4 a 6 m (RABUS et al., 2003). Os valores das classes de declividade adotados foram os sugeridos pela Embrapa (1979), relacionados aos aspectos do relevo (morfografia): 0 – 3% (plano); 3 – 8% (suave-ondulado); 8 – 20% (ondulado); 20 – 45% (forte-ondulado); 45 - 75% (montanhoso) e > 75% (forte-montanhoso).

O mapa de uso e cobertura do solo foi realizado pela interpretação visual da imagem do satélite Landsat-8 (órbita e ponto 215/67, passagem de 05 de dezembro de 2017, com cobertura de nuvens de apenas 1,18%). As classes definidas e digitalizadas manualmente foram: florestas, pastagem, cultivos agrícolas, manguezal, praias e dunas, corpos d'água e áreas construídas.

Os mapas das classes de dissecação do relevo e de precipitação foram realizados utilizando o interpolador de Kernel sobre a rede de drenagem e dos dados anuais de precipitação, respectivamente, da Superintendência de Recursos Hídricos do estado de Sergipe (SRH-SE). As classes de densidades de drenagem

foram: muito baixa, baixa, moderadamente baixa, moderadamente alta e muito alta e as precipitações foram entre 900mm e 1.700mm.

Burrough e Mcdonell (1999, p. 183) indicam a interpolação por Krigagem para variáveis regionalizadas e Nascimento et al. (2008) empregaram Krigagem ordinária para definir a vulnerabilidade à erosão pela densidade de drenagem. No entanto, a estimativa de densidade Kernel é uma forma não-paramétrica para estimar a função de probabilidade de uma variável aleatória (WAND; JONES, 1995; SILVERMAN, 1986; BARBOSA et al., 2014). A escolha do interpolador kernel para a confecção dos de dissecação de relevo e de precipitação decorreu de sua utilidade para fornecer uma visão geral da distribuição de primeira ordem dos eventos. Trata-se de um indicador de fácil uso e interpretação para analisar o comportamento de padrões em toda a região de influência pela distância do raio de cobertura, suavizando a superfície (CÂMARA; CARVALHO, 2004). Nascimento e Silva (2019) empregaram o estimador Kernel em lineamentos geológicos para avaliar a potencialidade de acumulação de água subterrânea em aquíferos fraturados no estado de Sergipe.

O mapa de fragilidade ambiental potencial foi confeccionado com a integração dos mapas de dissecação do relevo, precipitação, declividade e hipsometria. Esse mapa gerado foi integrado com o mapa de uso de cobertura do solo, finalizando no mapa síntese, fragilidade ambiental emergente à erosão hídrica. Para a integração dos mapas foi associado um valor (peso) para cada classe temática, cujos pesos variaram de 0 a 1 e foram determinados de acordo com o grau de contribuição de cada classe diante da fragilidade ambiental à erosão, definidos conforme as tabelas 1 e 2. O mapa de cobertura do solo foi reclassificado gerando um novo produto cartográfico composto por duas classes: áreas naturais e áreas antropizadas, onde as áreas naturais apresentam baixo grau de influência na fragilidade da bacia e as áreas antropizadas, um alto grau de influência.

Tabela 1 – Pesos atribuídos à declividade, hipsometria e dissecação do relevo

Declividade (%)	Peso	Hipsometria (m)	Peso	Dissecação do relevo	Peso
0 - 3	0,1	0 - 50	0,1	Muito baixa	0,1
3 - 8	0,3	50 -100	0,3	Baixa	0,3
8 - 20	0,5	100 – 150	0,5	Moderadamente Baixa	0,5
20 - 45	0,7	150 – 200	0,7	Moderadamente Baixa	0,7
45 - 75	0,9	200 - 250	0,9	Alta	0,9
> 75	1,0	250 - 300	1,0	Muito alta	1,0

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 2 – Pesos atribuídos à precipitação e uso e cobertura do solo

Precipitação (mm)	Peso	Uso e cobertura do solo	Peso
900	0,2	Áreas naturais	0,1
1.100	0,4		
1.300	0,6		
1.500	0,8	Áreas antropizadas	0,6
1.700	1,0		

Fonte: Autoria própria (2020).



Para geração do mapa de fragilidade ambiental potencial à erosão, aplicou-se o método AHP para ponderação das variáveis utilizadas, representadas pelos mapas de dissecação do relevo, hipsometria, declividade e precipitação, gerando a matriz de comparação pareada (Tabela 3) referente aos pesos atribuídos aos atributos conforme exposto nas tabelas 1 e 2.

Tabela 3 – Matriz de comparação pareada

Variáveis	Precipitação	Hipsometria	Declividade	Dissecação do relevo
Precipitação	1	1/3	1/5	1/7
Hipsometria	3	1	1/3	1/3
Declividade	5	3	1	1/3
Dissecação de relevo	7	3	3	1

Fonte: Autorial própria (2020).

A partir da matriz de comparação, obteve-se como produto os pesos para cada variável (Tabela 4) e os índices para verificação da confiabilidade dos dados foram:  $\lambda_{\max} = 4,137$ ; CI = 0,046 e RC = 0,051. Dessa forma, a consistência da matriz matemática AHP e a Razão de Consistência (RC), dentro dos limites aceitáveis (0,1), demonstraram que as comparações realizadas foram coerentes e geraram resultados confiáveis.

Tabela 4 – Pesos para os mapas utilizados para geração do mapa de fragilidade potencial

Variáveis	Pesos
Precipitação	0,057
Hipsometria	0,145
Declividade	0,281
Dissecação de relevo	0,516

Fonte: Autorial própria (2020).

Após a ponderação das variáveis, realizou-se a integração pela álgebra de mapas: fragilidade ambiental = (dissecação do relevo x 0,516) x (declividade x 0,281) x (hipsometria x 0,145) x (precipitação x 0,057). Para a geração do mapa de fragilidade ambiental emergente à erosão utilizou-se como variáveis o mapa de fragilidade ambiental potencial à erosão e o mapa de uso e cobertura do solo. A ponderação foi efetuada de forma empírica, a saber: fragilidade emergente = (fragilidade potencial x 0,6) x (uso e cobertura do solo x 0,9).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As classes de muito alta e alta densidade de drenagem estão concentradas na região central da bacia as quais possuem possível baixa permeabilidade do substrato por conta das rochas cristalinas da Faixa de Dobramentos Sergipana, induzindo ao fluxo superficial (Figura 3A). A classe medianamente alta está amplamente distribuída por toda a bacia hidrográfica. Essas áreas são fontes de sedimentos que irão se depositar nos rios, lagos, represas e no oceano Atlântico.

As bacias hidrográficas que possuem alta densidade de drenagem são compostas por solos impermeáveis e maior o escoamento superficial. A maior

densidade de drenagem representa o grau de dissecação do terreno decorrente dos escoamentos concentrados, ocasionando incisões no terreno (sulcos, ravinhas e voçorocas). Essas incisões são feições geomorfológicas oriundas dos processos erosivos que “aproveitam as fraquezas” intrínsecas e extrínsecas pedolíticas. Essas características podem ser estruturas tectônicas pré-existentes nas rochas e/ou assembleias mineralógicas dos solos mais susceptíveis à remoção, transporte e sedimentação (ARABAMERI et. al., 2020). Por outro lado, a baixa densidade de drenagem indica terrenos permeáveis que facilitam a infiltração da água e a predominância do processo pedogenético.

De acordo com Vitte e Villela Filho (2006), destacam que quanto maior a densidade de canais de primeira ordem, maior a fragilidade potencial do relevo, pois os processos morfodinâmicos, associados à dissecação do relevo, são mais intensos. Além disso, a instalação da drenagem de primeira ordem, e seu desenvolvimento, está relacionada às variações do perfil de equilíbrio do canal principal, ou mesmo às influências litoestruturais, estruturais e às variações climáticas ao longo do Quaternário.

De acordo com a Figura 3B, grande parte da BHRJ apresenta declives moderados, predominando as classes de declividade de 8 a 20% e 20 a 45%, caracterizadas por relevos ondulados a forte ondulados. Essas classes possuem susceptibilidade intermediária aos processos erosivos, quando comparadas as demais classes declividades. No entanto, possuem alta vulnerabilidade à erosão em decorrência do seu intenso uso pelo homem, pois nessas áreas concentram usina de álcool e açúcar e criação de gado (ARAGÃO et al., 2011).

As áreas com relevo plano a suave ondulado, representados pelas classes de declividade de 0 a 3% e 3 a 8%, respectivamente, englobam o entorno dos cursos d'água e são áreas receptoras de sedimentos, predominando o processo de sedimentação e de assoreamento dos recursos hídricos superficiais. As áreas com relevo montanhoso e forte montanhoso, com declividades maiores que 45%, são áreas pontuais e pouco expressivas na área de estudo. No entanto, são as que apresentam alta susceptibilidade aos processos erosivos, recomendando a manutenção da cobertura vegetal natural, além de serem áreas de preservação permanente - APPs (STRECK et al., 2008).

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2010), o volume e a velocidade das enxurradas estão relacionados ao grau de declividade do terreno. Assim, pode-se inferir que nessas condições, a velocidade de escoamento da água da chuva é grande, ocasionando menores taxas de infiltração e maior intensidade erosiva. O escoamento superficial irá percorrer pelas encostas até chegar à planície costeira, onde perderá sua força devido às baixas declividades. Esta mesma região é responsável por receber a maior quantidade de água precipitada na bacia. Logo, esses dois fenômenos associados condicionam às áreas costeiras a eventos de alagamentos, enchentes e inundações.

O mapa hipsométrico apresenta seis diferentes classes de elevação (Figura 3C), com maior representatividade para as classes de 0-40m e 150-200m. A classe de 250-300m representa parte da Serra da Boa vista onde está localizada a nascente do Rio Japarutuba. Em geral, nessas altitudes, há concentração de declividade maiores e as áreas mais altas sofrem intenso processo de erosão e, conseqüentemente, fornecem sedimentos para as áreas mais baixas (ROSSI; PFEIFER, 1999).

Analisando a Figura 3D, observou-se da tendência de aumento da precipitação no sentido montante - jusante da BHRJ, condizente com as características climáticas predominantes no semiárido, agreste e litoral (ESTADO DE SERGIPE, 2014). De acordo com Panagos et al. (2017), o principal fator erosivo em regiões tropicais ou subtropicais úmidas é a ação das chuvas. Os autores constataram que a movimentação de solos na faixa tropical do planeta, especialmente nos países da América do Sul é maior que  $3.700 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , sendo a maior parte dessas áreas estão localizadas no Brasil.

À medida que a aumenta a altimetria, a intensidade pluviométrica diminui, diminuindo a velocidade de escoamento da água da chuva, favorecendo a infiltração, prevalecendo, dessa forma, os processos pedogenéticos. No entanto, as regiões que apresentam intensidade da chuva e hipsometria intermediárias, localizadas no centro da bacia, são consideradas áreas potencialmente geradoras de sedimento, visto que são caracterizadas por períodos chuvosos curtos, bem definidos, intensos e concentrados, aumentando sua capacidade erosiva.

Ao observar a Figura 3E, percebe-se a predominância de áreas de pastagem e cultivo agrícola. A conversão da cobertura vegetal natural em atividades agropecuárias extensivas intensifica o processo erosivo laminar e linear e diminui a capacidade produtiva do solo. A supressão da mata ciliar do rio Japarutuba e de seus afluentes acarreta o assoreamento dos cursos d'água. O preparo do solo contribui para o aumento da abrangência dos processos erosivos, decorrente da compactação do solo que impede a infiltração e aumenta o escoamento superficial (FULLEN; REED, 1986). Dessa forma, o manejo inadequado do solo gera uma série de mudanças físicas, químicas, biológicas e hidrológicas, provocando o processo de degradação do solo e dos recursos hídricos (BARBOSA et al., 2019).

De acordo com Wadt et al. (2003), os sistemas de pastagens com práticas de manejo, como o sistema de rotação de pastos, o controle da taxa de lotação de animais e de queimadas, são coberturas vegetais apropriadas ao controle da erosão. Análises similares, na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco no estado de Sergipe, também foi constatada por Moura et. al. (2017).

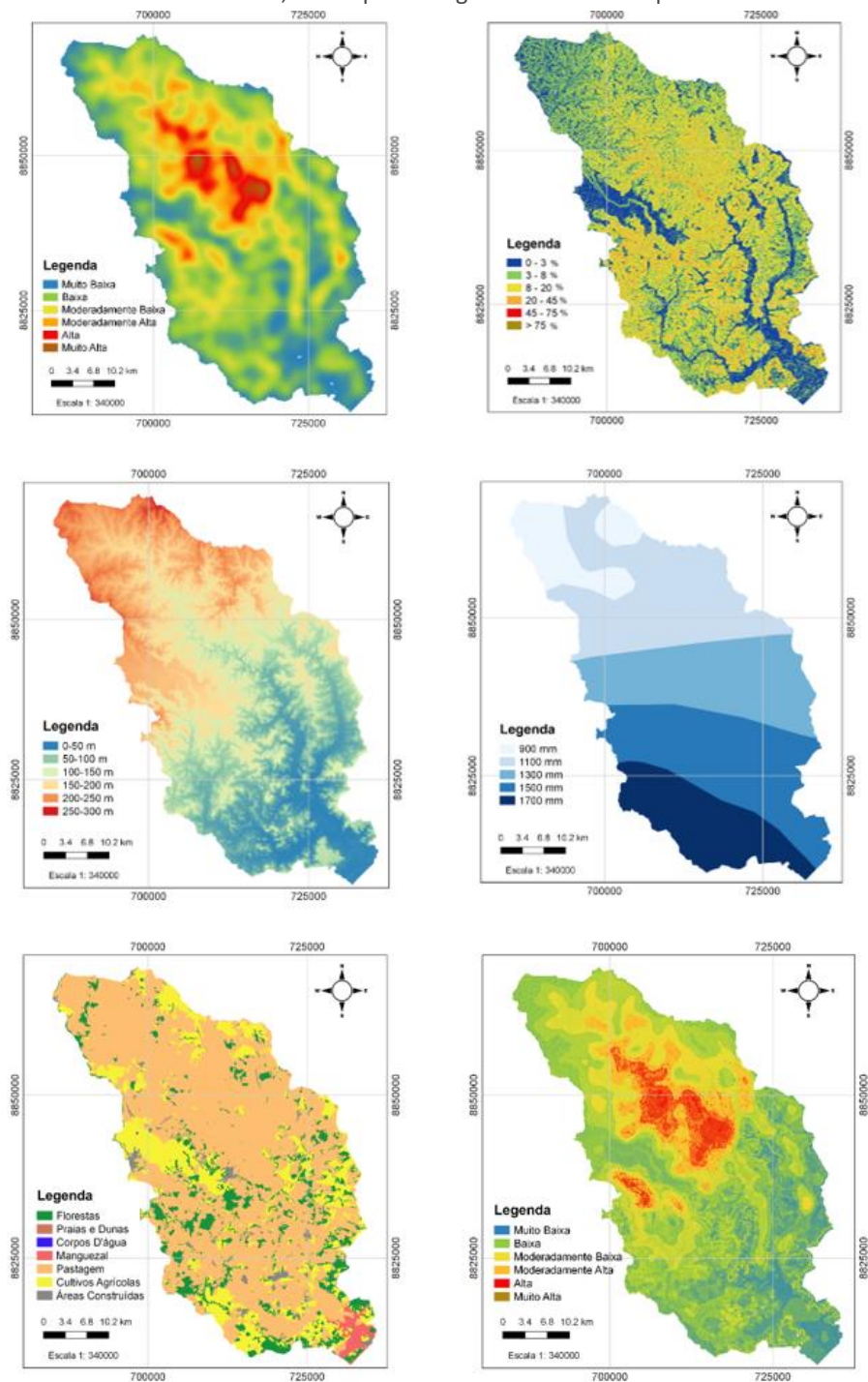
Por outro lado, os municípios de Japarutuba, Capela, Siriri e Rosário do Catete estão entre os 10 maiores produtores de cana-de-açúcar do estado de Sergipe, somando uma produção de 572.381 toneladas, representando 31,9% da produção total do estado (ESTADO DE SERGIPE, 2014).

Observando a Figura 3F, pode-se perceber a compartimentação da área de estudo em seis classes de fragilidade potencial à erosão hídrica: muito baixa (18,94%), baixa (22,94%), moderadamente baixa (36,90%), moderadamente alta (12,35%), alta (8,54%) e muito alta (0,33%). Apesar de 78,78% da área de estudo apresentar condições adequadas de fragilidade ambiental, as áreas de maior concentração dessas classes localizam-se em regiões de baixa declividade e altitude, ou seja, são áreas propícias à deposição de sedimentos e ao assoreamento. São áreas de baixa dissecação do relevo e alta precipitação, ou seja, áreas de recarga de água subterrânea. O aquífero dessa região é do tipo granular e representa a maior reserva de água subterrânea, em oposição aos aquíferos fraturados do Agreste e Semiárido da BHRJ.

Na região semiárida, a Caatinga, bioma exclusivamente brasileiro, encontra-se praticamente inexistente pela degradação da cobertura florestal relacionada com o modo de produção predominante. Na região litorânea, a ocupação do

Bioma Mata Atlântica, após a exploração do pau-brasil e criação de gado, atualmente a cobertura vegetal original foram convertidas em plantações de cana-de-açúcar, restando pequenas e esparsas manchas de manguezais, vegetação de restinga e remanescentes da floresta tropical úmida (SANTOS, 2009; LINO et al., 2009).

Figura 3 – Mapas temáticos da área de estudo: A - mapa de dissecação de relevo; B - mapa de declividade; C - mapa de hipsimetria; D – mapa de precipitação; E – mapa de uso e cobertura do solo; F – mapa de fragilidade ambiental potencial à erosão



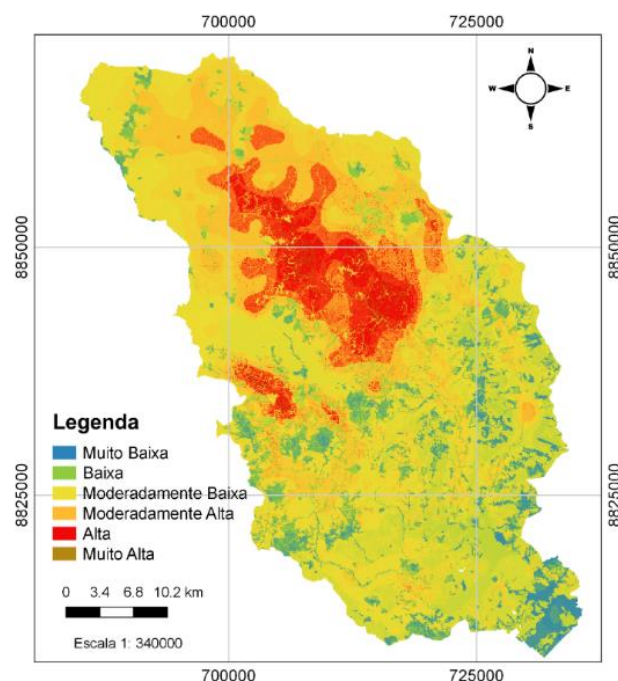
Fonte: Autoria própria (2020).

As áreas que apresentam fragilidade potencial moderadamente alta a alta (20,89% da bacia) são as que apresentaram os maiores índices de dissecação do relevo e declividade, apresentando um alto potencial erosivo. À medida que a declividade aumenta, cresce a velocidade de escoamento da água e a sua competência de carrear sedimentos, intensificando os processos erosivos. As áreas que apresentam fragilidade potencial muito alta, apesar de pouco expressivas, é imperativo mantê-las sem intervenção antrópica, pois representam alta susceptibilidade aos processos erosivos. Estão concentradas no interior da classe de fragilidade potencial alta. No entanto, são visualmente imperceptíveis no mapa de fragilidade potencial devido a escala de apresentação do mapa nesse trabalho.

Por meio da análise conjunta dos dados considerados importantes para determinar a fragilidade potencial ambiental, foi possível notar a interação que há entre os fatores utilizados. As áreas que possuem alta fragilidade potencial ambiental apresentam classes altas de dissecação do relevo e declividade (> 75%), altimetria que varia entre 100 a 200 m e precipitação entre 110 e 150mm. Como definido na metodologia, por meio da matriz de correlação, a precipitação e hipsometria são hierarquicamente inferiores à dissecação do relevo e declividade na determinação do mapa de fragilidade potencial.

Vale ressaltar que o método AHP, utilizado para relativizar a importância dos componentes da paisagem utilizados em relação à erosão, aliou o conhecimento consolidado sobre o processo erosivo da área de estudo e a influência de cada um dos componentes. Os resultados obtidos com este tipo de modelagem, servem para assinalar as áreas que merecem maior atenção quanto a estudos mais específicos e medidas mitigadoras a serem adotadas (PINESE JÚNIOR; RODRIGUES, 2012). Ao integrar o mapa de fragilidade ambiental potencial com o mapa de cobertura do solo, tem-se como resultado o mapa de fragilidade ambiental emergente (Figura 4).

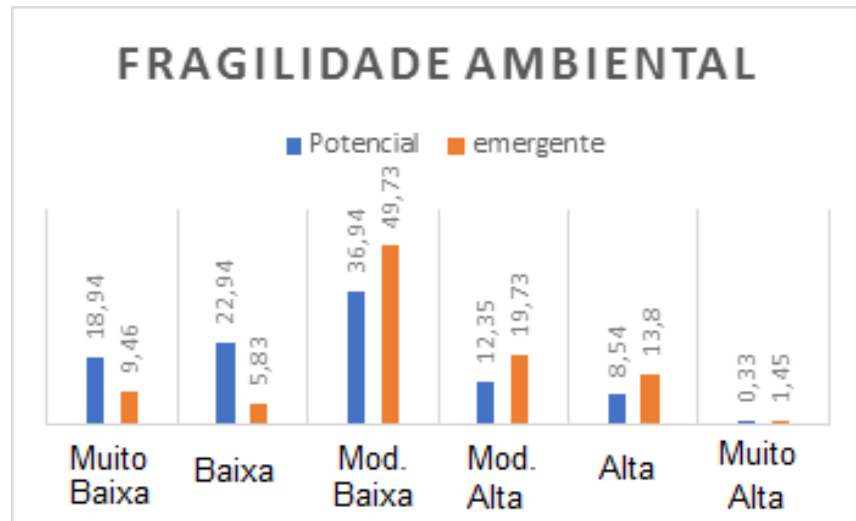
Figura 4 – Mapa fragilidade ambiental emergente à erosão da área de estudo



Fonte: Autoria própria (2020).

Pode-se perceber a influência da cobertura do solo na aceleração da erosão, ilustrada no gráfico da Figura 5. A ação antrópica as áreas com grau de fragilidade muito baixa e baixa diminuíram. Como consequência houve um aumento significativo nas áreas com grau de fragilidade moderadamente baixa, moderadamente alta e alta. Porém com um aumento incipiente da classe muito alta devido à vegetação nativa proteger o solo da erosão hídrica.

Figura 5 – Gráfico das áreas por classe de fragilidade ambiental potencial e emergente



Fonte: Autoria própria (2020).

As áreas utilizadas para pastagem e cultivo agrícola transformaram a fragilidade ambiental potencial muito baixa e baixa em classes mediana a alta fragilidade emergente. Já as áreas onde houve a manutenção da cobertura vegetal a fragilidade ambiental permaneceu muito baixa. Vale salientar que as áreas com susceptibilidade muito baixa e baixa são capazes de sustentar as apropriações do homem, no entanto, se faz importante o planejamento e o monitoramento ambiental para manter essas condições.

Somadas as classes de fragilidade emergente moderadamente alta, alta e muito alta (34,98%) possui grau relevante de instabilidade à erosão, predominando a morfogênese em relação à pedogênese. Desta forma, a exploração humana dos recursos naturais interfere no equilíbrio dinâmico da BHRJ, aumentando a fragilidade ambiental erosiva. As áreas com maior grau de fragilidade (Figura 8), representadas pela classe alta, estão localizadas mais a montante da bacia. São regiões com alta dissecação do solo, onde se concentram as maiores declividades e moderada precipitação e hipsometria. Apesar de representar uma parcela pequena da área total, necessitam de uma atenção maior, visto que causam os impactos mais graves ao ambiente e devem ser prioritários em termos de medidas mitigadoras.

A classe de fragilidade moderadamente baixa ocupa quase a metade da área da bacia e é a de maior extensão. Neste caso, a classificação foi influenciada sobretudo pelos valores associados às pastagens degradadas e aos canais em declividades medianas que facilitam a exploração humana. A partir deste cenário e com vistas a contribuir com o planejamento ambiental e a gestão territorial, podem ser feitas algumas considerações quanto à adequação dos usos do solo. As pastagens precisam ser manejadas adequadamente, com pastejo rotacional,

calagem dos solos e redução da pastagem. A agricultura é recomendada para os ambientes com características naturais mais estáveis. Já os solos expostos necessitam de manejos com cobertura adequada como forma de evitar a perda excessiva de solo (RIBEIRO et al., 2016).

As áreas de baixa fragilidade representam os meios estáveis, representando processos geodinâmicos externos de baixa intensidade, e caracterizadas pelas seguintes condições: (i) cobertura vegetal, controlando os processos mecânicos da morfogênese, predominando os processos pedogenéticos; e (ii) dissecação moderada, com evolução lenta dos processos morfogenéticos, possibilitando a formação lenta e gradual dos solos. Estes meios estáveis representam 13,44% da área de estudo e são áreas onde prevalecem suas coberturas naturais, composta por florestas, mangues, praias e dunas, as quais devem ser preservadas para assegurar a estabilidade da bacia.

As áreas que apresentam mediana fragilidade representam uma área de transição que permitem a passagem gradual do meio que apresenta baixa fragilidade para alta fragilidade. O que caracteriza esse meio é equilíbrio entre a morfogênese e a pedogênese, o qual pode ser facilmente rompido. São meios delicados e suscetíveis aos processos exógenos indesejáveis, como a erosão, transformando-os em meios instáveis. Estes meios representam 71,45% da BHRJ e estão distribuídos por toda área, são compostos por pastagens, cultivos agrícolas e áreas construídas.

É importante evitar a transição entre os meios de baixa fragilidade para alta fragilidade, a partir, por exemplo, a adoção de práticas conservacionistas, como implantação de sistemas agroflorestais, preservação e recomposição da cobertura vegetal ciliar e reflorestamento com espécies nativas. A vegetação nativa desempenha papel na estabilização das encostas, no equilíbrio dos mananciais, na proteção dos solos, na dinâmica externa e interna das águas e possibilita uma melhor capacidade de suporte das pastagens e cultivos agrícolas. O seu desmatamento compromete a qualidade e quantidade das águas dos rios e acelera os processos de erosão e assoreamento. É evidente que, para a recomposição da vegetação ciliar e reflorestamento com espécies nativas e melhoria da qualidade hídrica, faz-se necessário uma ação conjunta de envolvimento político, agricultores e a população em geral.

As áreas que apresentam alta fragilidade representam meios onde a morfogênese é o processo predominante, ou seja, são áreas mais susceptíveis aos processos erosivos. As áreas com alta fragilidade representam 15,11% da BHRJ e estão concentrados a montante da bacia. São áreas de alta sensibilidade, concentradas em regiões de maiores declividades e dissecação do relevo, onde os processos morfogenéticos são mais intensos e agravados pela supressão da vegetação natural, convertidas em pastagem.

De acordo com Gonzalez; Araújo; Imai (2016), o método AHP produziu resultados mais coerentes entre as classes de fragilidade ambiental com as observações de campo do que o método por operadores Fuzzy gama. O método AHP mostrou-se como é um instrumento adequado em análises ambientais, possibilitando inferir como cada fator natural e antrópico interfere nos processos erosivos da área de estudo.

## CONCLUSÕES

A área estudada é heterogênea, com regiões sujeitas a diferentes intensidades de processos erosivos. A intervenção antrópica aumentou significativamente a fragilidade ambiental da BHRJ, visto que a maior parte do território (71,45%) se encontra inserido em áreas com alta fragilidade, mostrando a urgência da busca por alternativas sustentáveis para o reestabelecimento do equilíbrio geodinâmico exógeno, a partir da adoção de práticas conservacionistas.

O uso da técnica AHP somada a álgebra de mapas para elaboração do mapeamento da fragilidade ambiental à erosão se mostraram eficazes, uma vez que o AHP minimiza a ocorrência de erros na determinação dos pesos para as variáveis utilizadas e a álgebra de mapas realizada em todo o processo de integração, o que facilitou a elaboração do produto final. O método AHP é uma importante ferramenta de auxílio à decisão que possibilita o reconhecimento e tratamento da subjetividade inerente aos processos decisórios.

Na utilização desta ferramenta o problema de decisão é modelado pela construção de hierarquias, nas quais são considerados múltiplos critérios e subcritérios de decisão. No AHP os resultados são apresentados sob a forma de prioridades. Isto permite que se possa avaliar o quanto uma alternativa é superior a outra, de um ponto de vista global. Também é possível estabelecer uma análise de consistência que permite avaliar o grau de consistência dos julgamentos. Esta é uma característica positiva e de extrema valia no tratamento de problemas de decisão, em especial daqueles que envolvam avaliações subjetivas.

Logo, a sistemática adotada foi promissora, gerando produtos cartográficos finais capazes de traduzir a realidade ambiental de maneira simples e de fácil compreensão, os quais podem ser considerados documentos técnicos-gerencias de subsídio de manejo, uso e ocupação do solo e dos recursos hídricos superficiais para a área de estudo. O produto final norteia a prevenção de processos de degradação na bacia, e desta forma apontam locais potenciais de intensificação dos processos erosivos e, conseqüentemente do assoreamento e contaminação dos recursos hídricos.

Visto que houve uma perda drástica de vegetação nativa, o que coloca em risco a estabilidade das variáveis ambientais. Dentre as técnicas que podem ser aplicadas para a conservação do solo e para a minimização da ação dos agentes erosivos podem ser citados: o terraceamento de encostas, a rotação de culturas, o recobrimento do solo com matéria orgânica morta e, principalmente, a recomposição da vegetação ciliar e o reflorestamento. Recomenda-se a recuperação dos biomas Mata Atlântica e Caatinga que foram convertidos, principalmente, em pastagens e cana-de-açúcar.

A aplicação do modelo deve ser utilizada nas fases de diagnóstico e prognóstico ambiental, pois não substitui as verificações de campo quando forem tomadas as decisões de forma pontual, mostrando, portanto, as áreas que merecem atenção especial. Por ser uma metodologia maleável, possibilita a adaptação de novos dados e escalas de detalhe, aumentando fazendo a modelagem final mais robusta e representativa da realidade *in situ*. Nesse sentido, é importante aumentar a escala de trabalho entre 1:25.000 e 1:5.000 na BHRJ, subdividindo-a em sub-bacias: Rio Alto Japaratuba; Rio Baixo Japaratuba, Rio Siriri e Rio Japaratuba Mirim.



# Hierarchical analytical processing in mapping environmental fragility to soil erosion

## ABSTRACT

For spatial analysis of vulnerability to soil erosion, geotechnologies maximize time and minimize costs, among which remote sensing and geoprocessing stand out. The objective of the present study was to apply multicriterial analysis to determine the potential and emerging environmental fragility and to obtain a diagnosis for decision making in the face of the erosive processes of the Japarutuba River Basin in the state of Sergipe. The main technical procedure employed was the Hierarchical Analytical Process (AHP), whose criteria used to assess potential and emerging weaknesses were relief dissection, precipitation, hypsometry, slope and land use and land cover. The results obtained made it possible to conclude that 13.44%, 71.45% and 15.11% of the study area presented low, medium and high environmental fragility emerging from erosion, respectively. The low environmental fragility is found in small sparse areas composed of forests, mangroves, beaches and dunes and the average extends throughout the basin. The high environmental fragility is concentrated in the central-northern portion of the semi-arid and rugged regions due to the conversion of natural vegetation into agricultural activities. The cartographic product generated portrayed the gravity resulting from the accentuated human interference in relation to erosive processes in the study area.

**KEYWORDS:** Multicriterial analysis. Geographic inference. Hierarchical Analytical Process.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, T. F. H.; STARR, T. B.. **Hierarchy**: perspectives for ecological complexity. Chicago: University of Chicago Press, 1982, 287 p.

ALPHONCE, C. B.. Application of the analytic hierarchy process in agriculture in developing countries. **Agricultural Systems**, v. 53, p. 97 – 112, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(96\)00035-2](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(96)00035-2).

ARABAMERI, A.; TIEFENBACHER, J.; BLASCHKE, T.; PRADHAN, B.; TIEN BUI, D.. Morphometric analysis for soil erosion susceptibility mapping using Novel GIS-Based Ensemble Model. **Remote Sensing**, v. 12, n. 5, p. 874 – 898, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12050874>.

ARAGAO, R.; ALMEIDA, J. A. P.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S.. Mapeamento do potencial de erosão laminar na bacia do rio Japarutuba, SE, via SIG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 7, p. 731 -740, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000700012>.

BARBOSA, A. M. F.; OLIVEIRA A. R.; SILVA L. C. S.; SOUZA R. M.; SANTOS, S. S. C.. Bacias hidrográficas e os conflitos pelos usos das águas no estado de Sergipe. **Confins**, v, 40, p. 34 – 45, 2019, <https://doi.org/10.4000/confins.20493>.

BARBOSA, N. F. M. STOSIC, B. D.; STOSIC, T.; LOPES, P. M. O.; MOURA, G. B. A; MELO, J. S. P. Kernel smoothing dos dados de chuva no Nordeste. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 7, p. 742-747, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662014000700011>.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F.. **Conservação do solo**. 7.ed. São Paulo: Ícone, 2010.

BRITO NEVES, B.; FUCK, R. A.; PIMENTEL, M. M.. The Brasiliano collage in South America: a review. **Brazilian Journal Geology**, v. 44, n.3, p. 493 – 518, 2014. <https://doi.org/10.5327/Z2317-4889201400030010>.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A.. **Principles of Geographical Information Systems**. Nova York: Oxford University Press. 1998. 333p.

CÂMARA, G.; CARVALHO, M. S.. Análise espacial de eventos. In: DRUCK, S; CARVALHO, S. M.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, M, A. V.. **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004. Cap. 2.

CAMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO J.. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395 - 403, 1996.

DIAS, V. S. B.; SILVA, A. BARROS.. AHP na modelagem da vulnerabilidade ambiental do Mini Corredor Ecológico Serra das Onças (BA). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 6, p. 1363 – 1377, 2014.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Base de dados para o Estado de Sergipe**: referenciais de solos para o desenvolvimento. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2014. (DVD).

ESTADO DE SERGIPE. **Elaboração dos planos das bacias hidrográficas dos rios Japaratuba, Piauí e Sergipe**: diagnóstico da Bacia Hidrográfica do Rio Japaratuba. Aracaju, SRH, 2014, 253p.

ESTADO DE SERGIPE. **Lei Estadual nº 3.870, de 25 de setembro de 1997**. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e cria o Fundo Estadual de Recursos Hídricos e o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

FRANÇA, L. C. J.; MUCIDA, D. P.; MORAIS, M. S.; CATUZZO, H.; ABEGÃO, J. L. R., PEREIRA, I. M.. Zoneamento da fragilidade ambiental de ecossistemas naturais e antropizados por meio de avaliação multicritério. *Nativa*, v. 7, n. 5, p. 589-599, 2019. <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v7i5.7300>

FULLEN, M.A.; REED, A.H.. Rainfall, run-off and erosion on bare arable soils in cost Shrosphire, England. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.11, p. 413-25, 1986. <https://doi.org/10.1002/esp.3290110407>.

FUSHITA, A.T., CAMARGO-BORTOLIN, L.H.G., ARANTES, E.M., MOREIRA, M.A.A., CANÇADO, C.J., LORANDI, R.. Fragilidade ambiental associada ao risco potencial de erosão de uma área da região geoeconômica médio Mogi Guaçu superior (SP). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63, p. 609 – 618, 2011.

GOODCHILD, M. F.; QUATTROCHI, D. A.. **Scale, multiscaling, remote sensing and GIS**. Boca Raton: CRC Press, 1997, 397p.

GONÇALVES, S. R. A.; ARAÚJO, R. R.; IMAI, N. N.. Mapeamento do grau de fragilidade com processo analítico hierárquico e operadores fuzzy gama na detecção áreas de fragilidade ambiental. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 2, Edição Especial Aplicações dos SIG, p. 327 – 337, 2016.

GOVERNO DE SERGIPE. **Panorama energético de Sergipe**. Aracaju: SUDEM/SE, 2014, 83p.

GUIMARÃES, L. J. R.; SANTOS, L. J. C. L.. Levantamento das áreas potenciais à erosão laminar como suporte à detecção das áreas-fonte ao assoreamento na barragem Piraquara1. **Revista Eletrônica Geografar**, v.2, n.2 p. 172 - 188, 2007. <http://dx.doi.org/10.5380/geografar.v2i2.12106>.

LEONOWICZ, A. M.; JENNY, B; HURNI, L.. Automatic generation of hypsometric layers for small-scale maps. **Computers & Geosciences**, v 35, p. 2074-2083, 2009.

LIBÓRIO, M. P.; MARTINUCI, O. S.; HADA, R. M.; SILVA, F. F. M. Procedimento para compatibilizar mapas em diferentes escalas e o problema da mudança de suporte espacial. **Revista Caminhos da Geografia**, v. 21, n. 74, p. 126 - 141, 2020. <http://doi.org/10.14393/RCG217449943>.

LINO, C. F.; DIAS, H.; ALBUQUERQUE; J. L. R. **Revisão da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica**. Fase VI/2009 - Revisão por região e por estado: Sergipe. São Paulo: CNRBMA, 2009, 61p.

MENDONÇA, A. F.; TEIXEIRA, T. M. A.; OLIVEIRA, O. A.; TEIXEIRA, A. C. O.. Mapeamento da vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Córrego Bandeirinha em Formosa-GO. **Geoambiente On-line**, n. 36, p. 19 – 42, 2020.

MERCHANT, J. W.; NARUMALANI, S.. Integrating remote sensing and geographic information. In: WARNER, T. A.; NELLIS, M. D.; FOOD, G. M. **The SAGE Handbook of Remote Sensing**. Thousan Oaks: SAGE Publications Inc. Cap. 18, p. 257 – 268, 2009.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J.. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, v. 18, p. 761 - 799, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00078-1).

MIRANDA, J. I.. **Fundamentos de Informações Geográficas**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005.

MOURA, M. M.; FONTES, C. S.; SANTOS, M. H.; ARAUJO FILHO, R. N.; HOLANDA, F. S. R. Estimativa de perda de solo no Baixo São Francisco Sergipano. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 18, n. 2, p. 126 - 135, 2017.

NASCIMENTO, M. K. S.; MOTA, P. V. M.; CRUZ, M. A. S.; ARAGÃO, R.. Análise da alteração do uso e cobertura da terra em dois períodos na Bacia do Rio Japarutuba,

SE. In: ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS DE SERGIPE, 8., 2015, Aracaju. **Anais...** Aracaju, UFS, 2015, p.16 – 20.

NASCIMENTO, P. S. R.; SILVA, N. P. C.. Aplicação de sensoriamento remoto e análise espacial em alinhamentos geológicos como indicador da potencialidade de acumulação de águas subterrâneas. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 7, n. 4, p. 204 - 222, 2019. .9879. <https://doi.10.3895/rbgeo.v7n4.9879>

NASCIMENTO, P. S. R.; PETTA, R. A.; GARCIA, J. G.. Confecção do mapa de densidade de drenagem através de geotecnologias visando definir a vulnerabilidade aos processos erosivos na Sub-bacia do Baixo Piracicaba (SP). **Estudos Geográficos**, v. 6, n. 1. P. 19-35, 2008.

NEEDELMAN, B. A.. What Are Soils? **Nature Education Knowledge**, v. 4, n. 3, p. 1 - 2, 2013.

PANAGOS, P. et al.. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. **Scientific Reports – Nature**. v. 7, n. 1, p. 4175, 2017. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>.

PINESE JÚNIOR, J. F.; RODRIGUES, S. C.. O método de análise hierárquica – AHP – como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Piedade (MG). **Revista do Departamento de Geografia**, v. 23, p. 4-26, 2012. <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0023.0001>.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R.. The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 47, p. 241-262, 2003 [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(02\)00124-7](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00124-7).

RAFFO, J. G. G.. O processo analítico hierárquico e seu uso na modelagem do espaço geográfico. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, Volume Especial, p. 26 – 37, 2012. <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0112.0002>.

REIS, E.; LÖBLER, M. L.. O processo decisório descrito pelo indivíduo e representado nos Sistemas de Apoio à Decisão. **RAC**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 3, art. 4, p. 397-417, 2012. <https://dx.doi.org/10.1590/S1415-65552012000300005>.

RIBEIRO, A. S.; MINCATO, R. L.; CURI, N.; KAWAKUBO, F. S.. Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica pelo processo analítico hierárquico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 1, p. 16-31, 2016. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.1.p016-031>.

ROSS, J. L. S.. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 8, p. 63 - 74, 1994. <https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>.

ROSS, M.; PFEIFER, R. M. Remoção de material erodido dos solos de pequenas Bacias Hidrográficas no Parque Estadual da Serra do Mar Em Cubatão (SP). **Bragantia**, v. 58, n. 1, p. 141-156, 1999. <https://doi.org/10.1590/S0006-87051999000100014>

RUAS, A.; LAGRANGE, J. P.. Data and knowledge modelling for generalization. In: MÜLLER, J. C.; LAGRANGE, J. P.; WEIBEL, R. **GIS and generalization: methodology and practice**. Londres: Taylor & Francis, 1995. Cap. 6, p. 73 - 90.

RUSSO, R. F. S. M.; CAMANHO. R.. Criteria in AHP: a Systematic Review of Literature. **Procedia Computer Science**, v. 55, p. 1123 – 1132, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.081>.

SAATY, T. L.. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, 1990. p. 9 - 26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I).

SAATY, T. L.. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83 – 98, 2008. DOI: [10.1504/IJSSCI.2008.017590](https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590).

SAATY, T. L.; SHANG, J.. An innovative orders-of-magnitude approach to AHP-Based Multicriteria Decision Making: prioritizing divergent intangible humane acts. **European Journal of Operational Research**, v. 214, n. 3, p. 703 – 715, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.05.019>

SAMPAIO, T; BRANDALIZE, M. C. B. **Cartografia geral, digital e temática**. Curitiba: UFPR, 2018, 210p.

SANTOS, A.L.C. **Diagnóstico dos fragmentos de mata atlântica de Sergipe através de sensoriamento remoto**. 74f, 2009. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2009.

SANTOS, L. A. N.; NASCIMENTO, P. S. R.. Espacialização da suscetibilidade erosiva a partir da densidade de drenagem pelo interpolador Kernel. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19. Santos, 2019. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2019, p. 27 – 30.

SANTOS, L. A. N.; NASCIMENTO, P. S. R.; BARROS, B. V. P.. Espacialização da potencialidade erosiva por estimador Kernel na Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba (SE). In: ZUFFO, A. M.. **Engenharia sanitária e ambiental: tecnologias para a sustentabilidade**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019, p. 123 – 131.

SHAHABI, H.; KHEZRI, S.; AHMAD, B. Bin; HASHIM, M.. Landslide susceptibility mapping at central Zab basin, Iran: a comparison between analytical hierarchy process, frequency ratio and logistic regression models. **CATENA**, v. 115, p. 55–70, abr. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.11.014>.

SILVA, A. B.. **Sistemas de informações geo-referenciadas: conceitos e fundamentos**. Campinas: Editora Unicamp, 2003.

SILVERMAN, B. W.. **Density estimation for statistics and data analysis**. Chapman & Hall/CRC. London. (1986).

SOUZA, A. B.; SANTOS, M. S.; CINTRA, M. A. C. T.. Análise de Decisão Multicritérios (MCDA): uma revisão rápida sobre os critérios utilizados na Avaliação de Tecnologias em Saúde. **Jornal Brasileiro de Economia e Saúde**, v. 10, n. 1, p. 64 – 74, 2018. [DOI: 10.21115/JBES.v10n1.p64-74](https://doi.org/10.21115/JBES.v10n1.p64-74).

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2.ed. Porto Alegre: Emater/RS, 2008.

WAND, M. P.; JONES, M. C.. **Kernel smoothing**. New York: Chapman & Hall/CRC, 1995.

WADT, P. G. S.; PEREIRA, R. C.; SOUZA, C. B. C.; ALVES, L. S.. **Práticas de conservação do solo e recuperação de áreas degradadas**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2003. 912p.

VITTE, A. C.; VILELA FILHO, L. R.. A urbanização, a fragilidade potencial do relevo e a produção do risco na bacia hidrográfica do Córrego Proença, município de Campinas, Brasil. **Territorium**, n. 13, p. 105-114, 2006.

ZANATTA, F. A.; LUPINACCI, C.; BOIN, M.; MORUZZI, R.. Antropogeomorfologia e problemática erosiva em área rural degradada, Marabá Paulista (SP). **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, Número Especial, p. 199-207, 2017. <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.132614>.

**Recebido:** 24 jun. 2020

**Aprovado:** 14 set. 2020

**DOI:** 10.3895/rbgeo.v8n4.12635

**Como citar:** SANTOS, L. A.; NASCIMENTO, P. S. R.; BARROS, G. V. P. Processamento analítico hierárquico no mapeamento da fragilidade ambiental à erosão do solo. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 8, n. 4, p. 275-298, out/dez. 2020. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

**Correspondência:**

Paulo Sérgio de Rezende Nascimento

Avenida Marechal Rondon, S/N, Jardim Rosa Elze, CEP 49100 000, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

**Direito autoral:** Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

