

ANÁLISE DAS VULNERABILIDADES NATURAL E AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE (RN)

ANALYSIS OF NATURAL AND ENVIRONMENTAL VULNERABILITIES OF DOCE RIVER
HYDROGRAPHIC BASIN (RN, BRAZIL)

**Franklin Roberto da COSTA¹, Raquel Franco de SOUZA²,
Sebastião Milton Pinheiro da SILVA³**

¹Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente e Departamento de Geografia. Br 405, Km 3, Arizona – RN. E-mail: franklincosta@uern.br

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Departamento de Geologia. Avenida Senador Salgado Filho, 3000 - Lagoa Nova, Natal – RN. E-mail: raquel.franco@ufrn.br

³Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente e Departamento de Geografia. Avenida Senador Salgado Filho, 3000 - Lagoa Nova, Natal – RN – RN. E-mail: sebastiaomilton@gmail.com

Introdução
Metodologia
Área de estudo
Organização e processamento dos dados
Procedimentos metodológicos
Elaboração das cartas temáticas com valores de vulnerabilidade natural e ambiental
Resultados e discussão
Vulnerabilidade para cada tema
Análise das vulnerabilidades natural e ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Doce
Vulnerabilidade natural
Vulnerabilidade ambiental
Conclusões
Referências

RESUMO - O presente estudo teve como objetivo analisar as vulnerabilidades natural e ambiental da bacia hidrográfica do Rio Doce – RN. Os mapas de vulnerabilidade natural e ambiental foram elaborados no Sistema de Informações Geográficas QGIS Essen 2.14. Os resultados mostraram que a vulnerabilidade natural apresentou uma média de 2,1 (Medianamente Estável/Vulnerável) e a vulnerabilidade ambiental 2,4 (Moderadamente Vulnerável). A interferência antrópica impacta fortemente a bacia em áreas urbanas, com atividades agropecuárias e de mineração, totalizando 271,87 km² (68,53%), principalmente na porção centro-leste da bacia. A bacia se apresenta vulnerável e sugere-se a realização de estudos detalhados visando o reordenamento territorial para fins de sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Vulnerabilidade. SIG. Bacia Hidrográfica. Impactos Ambientais. Mapas.

ABSTRACT - The present study aimed to analyze the natural and environmental vulnerabilities of the Doce River basin-RN. The natural and environmental vulnerability maps were prepared with Geographic Information System QGIS Essen 2.14. The results showed that natural vulnerability presented an average of 2.1 (Stable/Moderately Vulnerable) and environmental vulnerability 2.4 (Moderately Vulnerable). Human interference impacts heavily the basin in urban areas, cattle raising and mining activities, a total of 271.87 km² (68.53%), mainly in the central-eastern portion of the basin. The basin is vulnerable and detailed studies aiming the territorial reorganization for environmental sustainability are suggested.

Keywords: Vulnerability. GIS. Basin. Environmental Impacts. Maps.

INTRODUÇÃO

Os estudos integrados de um determinado território pressupõem o entendimento do funcionamento do ambiente natural com ou sem intervenções humanas (Ross, 2001). Neste sentido, a construção do Zoneamento Ambiental parte de metodologias baseadas na compreensão das relações existentes entre os dados do meio físico e antrópico, integrando diversas áreas do conhecimento. Importante destacar que o mapeamento das unidades de paisagens, sob a perspectiva da vulnerabilidade ambiental, torna-se um importante material para gestão/ordenamento territorial. Assim, para a análise da vulnerabilidade ambiental,

é necessário que os conhecimentos relativos às potencialidades do meio físico e antrópico (solos, relevos, rochas, hidrografia, clima, uso e cobertura da terra) sejam avaliados de forma integrada, pois esses elementos funcionam de maneira intrínseca, constituindo a continuidade dos fluxos de matéria e energia.

De acordo com Oliveira et al. (2009), isso pode ser realizado a partir da divisão de uma área em zonas de ocupação do solo, baseado no conhecimento das áreas críticas e/ou vulneráveis ambientalmente.

A metodologia utilizada por Tricart (1977)

baseia-se no fluxo de matéria e energia para demonstrar que, na natureza, esse processo se dá pelas relações de equilíbrio dinâmico sobre a lógica da Teoria dos Sistemas. No entanto, esse equilíbrio é frequentemente alterado pelas intervenções do homem na natureza, podendo gerar desequilíbrios temporários e/ou permanentes. Diante destas situações, Tricart (1977) definiu que os ambientes em equilíbrio dinâmico são considerados estáveis, e quando em desequilíbrio, instáveis.

Para Crepani et al. (2001), a análise da vulnerabilidade ambiental passa, obrigatoriamente, por levantamentos de campo, serviços de laboratório, gerando produtos cartográficos temáticos de Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Climatologia, Uso e Ocupação do Solo e Vegetação. Esses temas são responsáveis pela avaliação da “Vulnerabilidade Natural à Erosão”. Inicialmente se avalia o grau de vulnerabilidade para cada tema, atribuindo-lhes valores que variam de acordo com o seu estado ecodinâmico. Para as áreas consideradas ecodinamicamente estáveis são associados valores próximos a 1 (um); para áreas intermediárias valores próximos a 2 (dois) e, em áreas instáveis, valores próximos a 3 (três).

A metodologia criada por Crepani et al. (2001) vem sendo aplicada em diferentes regiões no país. Em bacias hidrográficas, recorte geográfico do presente trabalho, podem-se citar vários autores, tais como Barbosa & Lorandi (2012), Mota & Valadares (2011), Mesquita et al. (2010), Ribeiro & Campos (2007).

Barbosa & Lorandi (2012) realizaram um estudo de vulnerabilidade à perda do solo na bacia hidrográfica do ribeirão do Pântano, sub-bacia do rio Mogi-Guaçu, englobando parte dos municípios de Analândia, Descalvado e São Carlos, na área central do estado de São Paulo. Como resultado, observaram que os dados obtidos trazem subsídios para gestão do meio físico, proporcionando o desenvolvimento regional, tendo as técnicas de geoprocessamento como ferramentas eficientes para o planejamento ambiental.

Mota & Valadares (2011) elaboraram um mapa de vulnerabilidade à degradação dos solos da bacia do rio Acaraú/CE, com o emprego de Sistemas de Informações Geográficas – SIG e da metodologia multicritério aditivo. Essa metodologia é definida por Silva & Zaidan (2004) como média ponderada. Como resultado, mostraram a viabilidade da aplicação do método para elaboração do mapa de vulnerabilidade ambiental e sua aplicação na gestão do território da bacia do

Rio Acaraú.

Mesquita et al. (2010) realizaram estudo relativo a vulnerabilidade natural a perda de solos da bacia do rio Sagrado/PR, através da análise integrada das características do meio físico. Como resultado, observaram que o elemento uso e cobertura da terra é um indicador da real exposição das UTBs em relação aos processos erosivos, e que a cobertura vegetal é um fator relevante para o equilíbrio da paisagem.

Ribeiro & Campos (2007) aplicaram a metodologia de Crepani et al. (2001) para a análise da Vulnerabilidade à erosão do solo da bacia do Alto Rio Pardo, Pardiniho/SP. Os resultados mostraram a eficiência do SIG na execução do mapeamento de vulnerabilidade ambiental, bem como da metodologia adotada para o uso posterior no zoneamento ecológico da bacia.

Além de bacias hidrográficas, no Estado do Rio Grande do Norte, tem-se os exemplos dos trabalhos de Grigio (2003), Costa et al. (2006), Oliveira (2011) e Silva (2013) que aplicaram, total ou parcialmente, a metodologia adotada por Crepani et al. (2001). O trabalho de Grigio (2003) teve como objetivo identificar, mapear e interpretar a evolução do uso e ocupação do solo e a vulnerabilidade ambiental do Município de Guamaré (RN), tendo como base o uso da interpretação multitemporal de imagens orbitais em ambiente SIG. Como resultado, observou-se a ativa participação das atividades antrópicas na modificação da paisagem local.

Costa et al. (2006) realizaram um estudo em uma área conhecida como de exploração de petróleo, nas proximidades do município de Macau (RN). O objetivo foi gerar mapas de vulnerabilidade natural e ambiental a partir de mapas base de geologia, solos, vegetação, geomorfologia e de uso e ocupação do solo.

Oliveira (2011) objetivou identificar analiticamente os impactos ambientais negativos e o grau de vulnerabilidade ambiental existentes no litoral sul do Estado do Rio Grande do Norte. As classes de vulnerabilidade ambiental foram determinadas a partir de modelamentos por álgebra de mapas e mostraram que os impactos ambientais analisados foram configurados nos campos de dunas, manguezais, faixas de praia e remanescentes de Mata Atlântica.

Silva (2013) trabalhou no Estuário do rio Curimataú/Cunhaú, localizado nos municípios de Baía Formosa e Canguaretama/RN. O objetivo principal foi analisar a vulnerabilidade ambiental,

enfocando as inter-relações entre o uso e ocupação do solo, os impactos ambientais e as suas mudanças espaciais na paisagem, bem como identificar e analisar os espaços de vulnerabilidade ambiental ao considerar os condicionantes naturais e antrópicos.

Em comum, observou-se que estes trabalhos obtiveram êxitos na execução, tendo como resultado mapas de vulnerabilidade natural à erosão do solo e a vulnerabilidade ambiental, servindo, principalmente, como fonte de dados para a execução de planejamentos ambientais, em diferentes recortes espaciais, entre eles, as bacias hidrográficas.

Neste sentido, o presente artigo teve como objetivo a elaboração de mapas base de vulnerabilidade do meio físico e do uso e cobertura da terra da Bacia Hidrográfica do Rio Doce/RN (BHRD) que serviram de base para a elaboração dos mapas de vulnerabilidade natural e ambiental, tendo como suporte o uso das Geotecnologias.

A escolha da bacia se deu por ser considerada de importância estratégica para Região Metro-

litana de Natal (RMN), principalmente para a Zona Norte da cidade de Natal, uma vez que nela está localizada a sua maior fonte de abastecimento de água: a Lagoa de Extremoz. Além disso, está em uma das regiões mais populosas do estado, principalmente na sua porção leste, com diversas formas de ocupação, desde atividades agroindustriais (cana de açúcar), agropastoril (gado leiteiro e de corte, granjas), passando por atividades da pesca, parques fabris, indústrias diversificadas, mineração, além de ocupações urbanas em Zonas de Proteção Ambiental.

Importante destacar, também, que não se teve a pretensão de subsidiar políticas públicas, pois a escala de trabalho não possibilita qualquer tipo de aproximação, por exemplo, com um plano diretor, que exigiria gerar informações em escala muito grande, ou ainda detalhamentos, por exemplo, de áreas para reflorestamento, saneamento ambiental, contenção de encostas, retificação de malha viária. Este trabalho é de cunho regional, na escala 1:100.000, ou seja, de reconhecimento das características em escala regional.

METODOLOGIA

Área de estudo

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do Rio Doce/RN, localizada na porção leste do Estado do Rio Grande do Norte, entre as coordenadas geográficas 05°48' e 05°36' S e 035°42' e 035°36' W Gr., abrangendo uma área de 396,7 km² (Costa et al., 2016) (Figura 1).

As cotas altimétricas variam de 0 a 139 metros e a declividade média é de aproximadamente 4,4%. A BHRD compreende rochas sedimentares e ígneas, dos terrenos do Domínio Rio Grande do Norte, tendo como principais unidades as Coberturas Fanerozoicas e os Granitoides Neoproterozoicos (Jardim de Sá, 1994). As rochas sedimentares Fanerozoicas são predominantes na BHRD, ocupando toda a parte centro-leste. Na porção oeste da BHRD ocorrem as rochas pertencentes ao Domínio Rio Grande do Norte e os Granitoides Neoproterozoicos, ocupando 18,23% da BHRD (Costa et al., 2019).

As coberturas continentais cenozoicas dominam no extremo leste da bacia, sendo representadas por rochas do Grupo Barreiras do Paleógeno e por Depósitos aluvionares, eólicos litorâneos e paleodunas, flúvio-marinhos, de mangues, flúvio-lacustrinos e cólvio-aluviais do Neógeno (Angelim et al., 2006). Em termos de geomorfologia, a BHRD é formada por 06

unidades: Tabuleiros, Depressão Sertaneja, Planície de Inundação Fluvial, Dunas Fixas, Dunas Móveis e a Planície Flúvio-Marinha (IDEMA, 2005). A área urbana ocupa o equivalente a 7,08% de toda a bacia, concentrando-se, principalmente, na sua porção leste, nos municípios de Natal, São Gonçalo do Amarante e Extremoz, e na porção centro-norte, no município de Ceará-Mirim.

As classes de solos predominantes na bacia são, de acordo com o IBGE (2014): Latossolo Amarelo Distrófico (46,40%), Argissolo Amarelo Distrófico (21,72%), Planossolo Háptico Eutrófico (15,20%), Neossolo Quartzarênico Órtico (5,54%), Gleissolo Tiomórfico Órtico (0,84%), Argissolo Vermelho Eutrófico (0,03%). O restante da área da bacia compreende as áreas urbanas e os corpos d'água existentes.

Em relação à hidrografia, existem 3 sub-bacias hidrográficas que compõem a BHRD: Sub-bacia do Rio do Mudo, Sub-bacia do Rio Guajirú e Sub-bacia do Rio Doce. Dessas, apenas o Rio Doce apresenta seu rio perenizado. Isto porque o rio Doce nasce da confluência dos rios Guajirú e do Mudo, e sua perenização se dá pelo Aquífero Barreiras (Castro, 2000). Os rios do Mudo e Guajirú, atualmente, são considerados rios intermitentes, em todas as suas extensões (Costa et al., 2019).

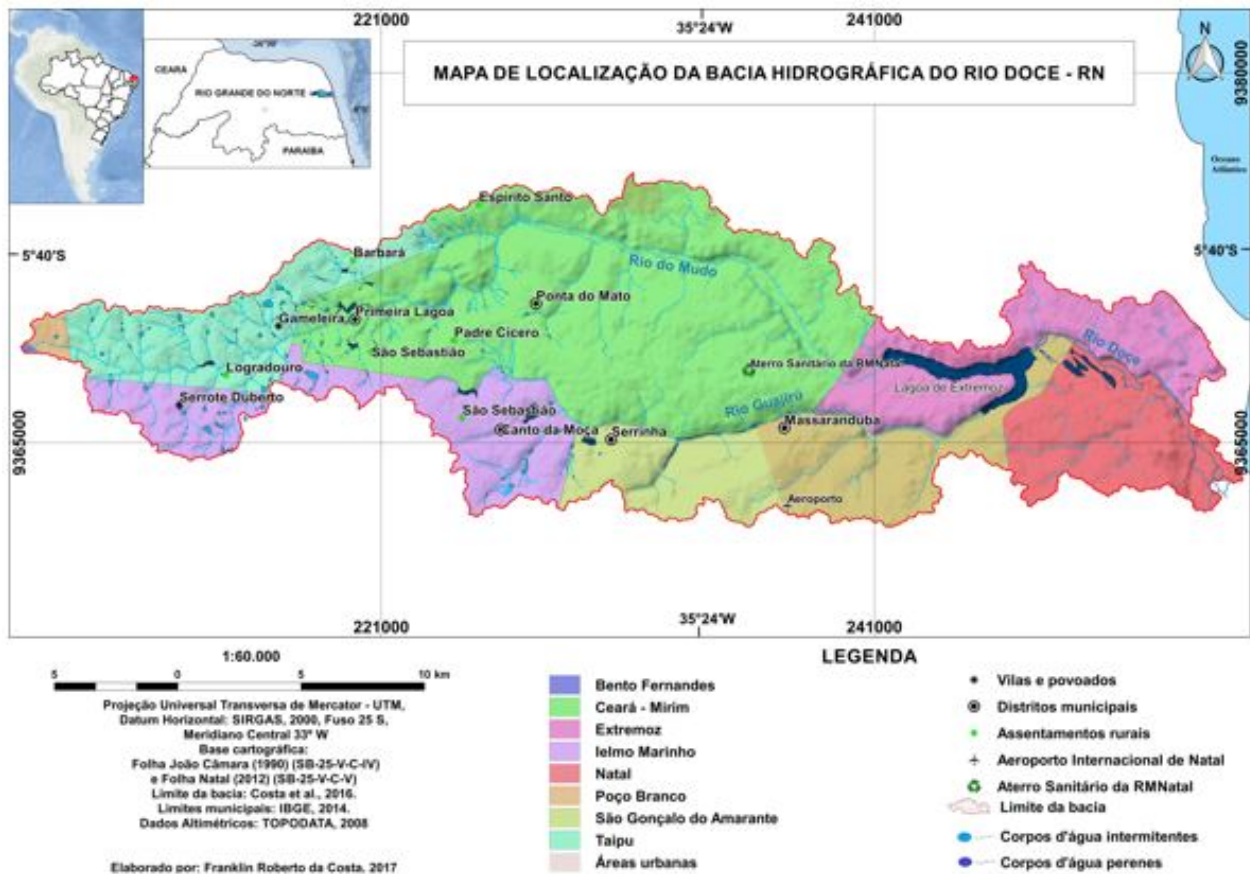


Figura 1 - Mapa de localização geográfica da área em estudo.

Em termos de clima, e segundo a classificação de Köppen, a BHRD é caracterizada como predominantemente do tipo As' – Clima Tropical Chuvoso com Verão Seco. A estação chuvosa se aproxima no período do outono (entre março e junho). As chuvas anuais médias crescem do interior para o litoral, passando de 700 milímetros nas cabeceiras para 1.400 milímetros na foz (SEMARH, 2000). A temperatura média na bacia é de 26°C, com variações de 24°C a 27°C e amplitude térmica de 3°C. Em toda a bacia, os meses mais quentes são dezembro, janeiro e fevereiro e os mais frios são julho, agosto e setembro (Castro, 2000).

Costa et al. (2020) utilizaram os dados de pluviometria obtidos da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio Grande do Norte – EMPARN (2017) e mostraram que a média pluviométrica anual da bacia, entre os anos de 1997 a 2016, foi de 1.036,10 milímetros (mm). Natal, localizada a leste da bacia, possui a maior média anual, com 1.720,31 mm. A zona de transição entre as áreas de maior e menor precipitação anual está na porção central da bacia, com uma média anual de 1.199,2 mm.

A porção oeste apresentou uma média anual de 735,7mm. A soma das chuvas diárias, no período

de um ano, apresentou uma média de 81 dias, equivalentes a aproximadamente 3 meses por ano. Os municípios com mais meses chuvosos no período de 01 (um) ano foram Natal (06 meses), seguido de Extremoz, São Gonçalo do Amarante e Ceará-Mirim (3 meses) enquanto os demais municípios apresentaram menos de 3 meses de chuvas por ano e Taipu foi o menos chuvoso, com a média de 34 dias de chuvas por ano (Costa et al., 2020). As formações vegetais encontradas na BHRD pertencem ao Domínio fitogeográfico Caatinga e uma pequena parte, mais a leste da bacia, ao Domínio Mata Atlântica. Tendo como base a classificação do IBGE (2014), Costa et al. (2019) identificaram na BHRD as seguintes formações com respectivos percentuais de áreas: Savana Estépica Arborizada (9,79%), Savana Arborizada (6,21%), Floresta Estacional Decidual de Terras Baixas (1,57%) e Formações Pioneiras com Influência Fluvial e/ou Lacustre (1,86%) e Fluviomarinha (Mangue) (0,57%). O restante da bacia é formado por atividades antrópicas (agropecuária) e dunas não vegetadas.

O uso e cobertura da terra decorre das ações antrópicas que modificaram a paisagem local para dar lugar a áreas de cultivo sazonal e perene, pastagem, extração mineral e áreas urbanas.

Organização e processamento dos dados

O presente trabalho se baseia no uso de bases de dados espaciais secundárias em escalas variadas

obtidas de órgãos públicos federal, estadual, bem como de dados primários obtidos em laboratórios e em campo (Figura 2).

Produto	Órgão	Escala	Ano Publicação
Cartas topográficas	SUDENE	1:100.000	1982
TOPODATA	INPE	1:50.000	2008
Geologia (Folha Natal - SB.25-V-C-V)	CPRM	1:100.000	2012
Geologia (João Câmara - SB.25-V-C-IV)	CPRM	1:100.000	1990
Geomorfologia (Folha Natal - SB.25-V-C-V)	CPRM	1:100.000	2012
Geomorfologia (João Câmara - SB.25-V-C-IV)	CPRM	1:100.000	1990
Pedologia	IBGE	1:250.000	2015
Clima	EMPARN	1:50.000	1997 – 2016
Vegetação	IBGE	1:250.000	2014
Hidrografia*	Autor	1:50.000	2017
Uso e ocupação*	Autor	1:50.000	2017
Dados censitários	IBGE	Não definida	2010
Limites territoriais*	IBGE	Não definida	2015

* Dados e bases de dados espaciais atualizadas e complementadas por interpretação visual e digital em ambiente SIG.

Figura 2 - Dados e bases de dados espaciais com indicação de órgão fonte, escala e ano de publicação.

A principal fonte de informações do meio físico foi o Serviço Geológico do Brasil – CPRM, além do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Os dados censitários foram obtidos no IBGE para o ano de 2010, sendo esse o último censo realizado no país.

Os dados referentes à hidrografia e ao uso e cobertura da terra na bacia foram extraídos por análise visual a partir da interpretação de imagens orbitais disponibilizadas pela empresa Digital Globe no Google Earth, com resolução espacial que varia entre 5 metros e 0,61 centímetros. As imagens foram abertas no SIG QGIS Essen 2.14, através do plugin Open Layers plugin, sobre as quais operou-se o traçado da rede hidrográfica em escala de maior detalhe 1:50.000, após o que se sucederam visitas a campo para observação de áreas que apresentaram dúvidas na interpretação em laboratório e compatibilização com a rede hidrográfica de referência que é a da Carta Topográfica da SUDENE, Folhas Natal SB.25-V-C-V e João Câmara SB.25-V-C-IV, na escala 1:100.000, do ano de 1971.

Todos os dados obtidos (Figura 2) foram integrados e processados no SIG QGIS Essen 2.14.18, no formato *shapefile*, para subsidiar a elaboração dos mapas de Vulnerabilidade Natural e Ambiental da BHRD.

O processamento se deu pela valoração das características da área de estudo, considerando e

classificando cada tema analisado segundo as condições e cenários atuais de estabilidade em relação ao nível de base da bacia, independentemente da caracterização dos processos de pedogênese e/ou de morfogênese atuantes, muito embora este último seja bem destacável, pois a interferência humana vêm alterando fortemente a fisiografia da BHRD (os citados anteriormente), mediante o desmatamento, os cortes e aterros, a retificação de canais de rios, as perfurações indiscriminadas de poços, as edificações industriais e condominiais sobre áreas de APPs e a mineração, dentre outras ações antropogênicas visualmente transformadoras e impactantes da paisagem.

Desse modo, e adotando a metodologia proposta por Crepani et al. (2001), os dados foram classificados em uma escala de 1,0 a 3,0, de acordo com as condições predominantes de estabilidade pedogenética (valores atribuídos são próximos a 1,0) ou de alterações morfogenéticas (são atribuídos valores próximos a 3,0). Para as situações intermediárias, de suposto equilíbrio ecodinâmico entre esses quadros ambientais são atribuídos valores próximos a 2,0.

Para Crepani et al. (2001), o modelo visa elaborar o mapa de vulnerabilidade natural à perda ao solo, calculada a partir da seguinte equação:

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

Onde:

V = Vulnerabilidade

G = vulnerabilidade do tema Geologia
 R = vulnerabilidade para o tema Geomorfologia
 S = vulnerabilidade para o tema solos
 Vg = vulnerabilidade para o tema Vegetação
 C = vulnerabilidade para o tema Clima

Dispondo-se do mapa de vulnerabilidade natural, pode-se calcular e elaborar o mapa de vulnerabilidade ambiental, tendo-se como referência as metodologias aplicadas por Grigio

$$(0,2x[\text{Tema 1}] + 0,2x[\text{Tema 2}] + 0,05x[\text{Tema 3}] + 0,05x[\text{Tema 4}] + 0,1x[\text{Tema 5}] + 0,4x[\text{Tema 6}])$$

Onde:

Tema 1: Mapa da Vulnerabilidade para Geologia
 Tema 2: Mapa da Vulnerabilidade para Geomorfologia
 Tema 3: Mapa da Vulnerabilidade para Solos
 Tema 4: Mapa da Vulnerabilidade para Clima
 Tema 5: Mapa da Vulnerabilidade para Vegetação
 Tema 6: Mapa da Vulnerabilidade para Uso e cobertura do solo

Após a realização de visitas e levantamento de

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Elaboração das cartas temáticas com valores de vulnerabilidade natural e ambiental

A geração das cartas temáticas referentes aos valores de Vulnerabilidade Natural e Ambiental se deram a partir das classes temáticas existentes para cada variável trabalhada na equação, seguindo a escala de vulnerabilidade aplicada por Crepani et al. (2001), para os dados do meio físico e de uso e ocupação do solo.

Para estabelecer os valores de vulnerabilidade para o tema Geomorfologia, foram utilizados os índices morfométricos do terreno: densidade de drenagem, amplitude altimétrica e declividade.

De acordo com Horton (1945), a densidade de drenagem (DD) é calculada pela razão entre o comprimento total de todas as drenagens (ΣL) pela área da bacia, em quilômetros (A). É expressa pela seguinte equação:

$$DD = \frac{\Sigma L}{A}$$

A amplitude altimétrica é calculada, segundo Schumm (1956), pela diferença entre a foz (Hmin) e a maior altitude situada em qualquer ponto da bacia (Hmax), indicando a média do desnível da bacia. A equação utilizada foi:

$$Hm = Hmax - Hmin$$

Segundo Crepani et al. (2001), a declividade (D) entre dois pontos no terreno é obtida pela relação entre a distância vertical (Dv) e a

(2003) e Oliveira (2011). O objetivo de se calcular o mapa de vulnerabilidade ambiental foi compreender como a bacia se mostra diante das vulnerabilidades decorrentes das ações antrópicas, que fundamentalmente implicam nas alterações da paisagem. Com base em Grigio (2003) e Oliveira (2011), para se obter o mapa de vulnerabilidade ambiental deve-se atribuir os pesos para os temas com emprego da equação abaixo:

dados em campo, partiu-se para pontuar os temas e testar a equação. O tema uso e cobertura da terra recebeu maior peso devido à pressão antrópica exercida sobre a bacia, ocorrendo em áreas onde há confluência de atividades econômicas de potencial risco ambiental e conflitantes entre si (Oliveira, 2011), e atua como modeladora da paisagem, enquanto geologia, pedologia e geomorfologia, pelas condições naturais de estabilidade, receberam pesos mais conservadores.

distância horizontal (Dh) de um determinado ponto na superfície. É obtido a partir da fórmula:

$$D = \frac{Dv}{Dh}$$

De posse desses dados, realizou-se a equação abaixo:

$$Ge = (DD + Hm + D)/3$$

Onde:

Ge = Vulnerabilidade para o tema Geomorfologia;

DD = Vulnerabilidade para a variável Densidade de Drenagem;

Hm = Vulnerabilidade para a variável Amplitude Altimétrica;

D = Vulnerabilidade para a variável Declividade.

No tema vegetação, realizou-se uma atualização dos tipos de vegetação categorizadas pelo IBGE (2014), a partir da ampliação e diminuição de alguns polígonos e, posteriormente, a inserção dos valores de vulnerabilidade para o referido tema. O tema solos (pedologia) foi extraído do IDEMA (2005), atualizado e reinterpretado.

Os valores de vulnerabilidade para o tema clima foram organizados de acordo com a metodologia adotada por Crepani et al. (2001), destacando a intensidade pluviométrica como o principal indicador da vulnerabilidade à erosão do solo. A base de dados foi extraída da EMPARN (2017).

O alto grau de antropização na BHRD permite um destaque especial na quantificação da vulnerabilidade ambiental existente, pois retrata bem as características da paisagem observada nos dias atuais. No caso da BHRD, adicionou-se a variável afloramento rochoso com grau de vulnerabilidade (3), pois compreende as áreas com exposição de stocks e batólitos de rochas graníticas pertencentes à Suíte intrusiva Dona Inês,

desprovidas de cobertura vegetal e largamente utilizadas pela atividade de exploração mineral mecanizada e também de modo artesanal, voltada para a construção civil (Figuras 3a e 3b).

É uma atividade com forte impacto ambiental causado pela poluição do ar e pelo elevado nível de ruído de máquinas e explosões para desmonte de rochas próximas de comunidades distritais e assentamentos rurais.

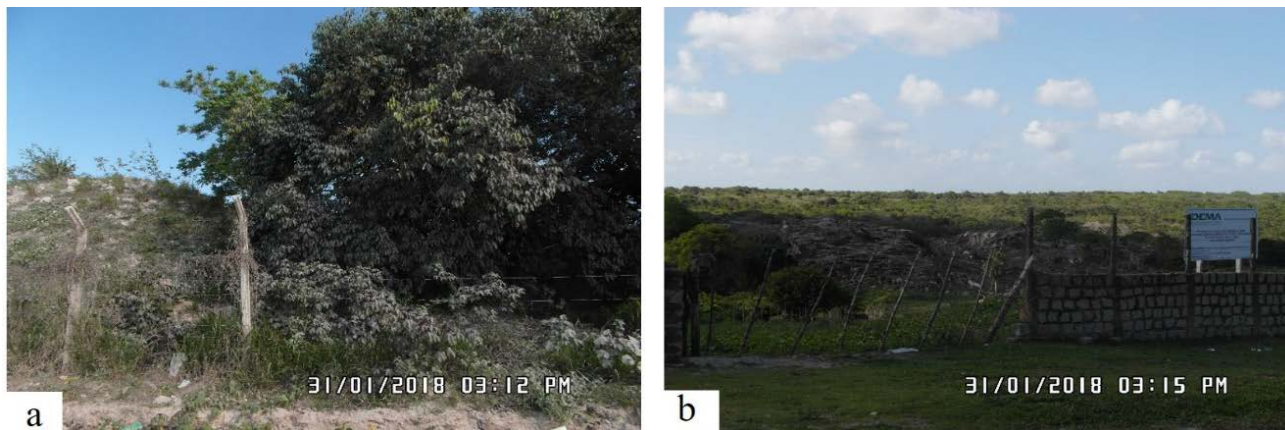


Figura 3 - a) Vegetação coberta pelo pó proveniente das explosões das mineradoras; b) Área mineradora nas proximidades da comunidade Massaranduba.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Vulnerabilidade para cada tema

Os valores de vulnerabilidade obtidos para cada tema foram organizados separadamente em mapas, visando apresentar as tendências de maior e menor estabilidade/vulnerabilidade existentes em cada um deles (Figura 4). Foram construídos tendo como referência os mapas temáticos da caracterização geoambiental da bacia (Costa et al., 2020).

Observou-se que 17,58% da área da BHRD é dominada por rochas ígneas e metamórficas, representadas pela Suíte Intrusiva Dona Inês (1,7), pela Formação Seridó (1,7), pelo Complexo João Câmara (1,3) e por diques e enxames de quartzo (1,2). Esses dois últimos se apresentam no extremo oeste da bacia, com uma área territorial reduzida, em relação às demais unidades geológicas.

Na porção central da bacia, percebe-se uma tendência ao aumento da vulnerabilidade, destacando-se o Grupo Barreiras (2,5), os Depósitos Marinheiros e Continentais Antigos (2,4) e a Formação Açú (2,4). Essas unidades representam 23,03% da bacia e possuem como rocha típica dominantes as frações clásticas do Grupo Barreiras e os arenitos quartzosos das demais unidades geológicas.

A porção centro-leste da bacia apresenta os maiores níveis de vulnerabilidade. É uma área

densamente ocupada sobre sedimentos arenosos, pouco consolidados a inconsolidados, friáveis, em contínuo processo de impactos e alteração devido a aterros e cortes para suprimento da construção civil, retificação de canais para implantação de malha viária, impermeabilização de solos com pavimentação de logradouros que, de acordo com Crepani et al. (2001), pelas suas características mineralógicas, são considerados vulneráveis, alcançando na escala de vulnerabilidade à erosão (valor 3).

As unidades geológicas constituídas por Depósitos Aluvionares de Canal, Depósitos Flúvio-Marinhos, Depósitos eólicos litorâneos vegetados e não vegetados, Sedimentos Aluvionares e Depósitos Aluvionares Antigos, juntos representam 59,39% do território da bacia.

Na perspectiva da avaliação geomorfológica, e de acordo com Crepani et al. (2001), as áreas urbanas, as Dunas Fixas e Móveis e a Planície Flúvio-marinha são unidades que apresentam estabilidade e no caso da bacia em tela têm uma média a maior estabilidade para a bacia, com uma média de 1,3 na escala de vulnerabilidade. As Dunas Móveis e Fixas apresentaram um valor de vulnerabilidade medianamente estável/vulnerável para o item Declividade, mas para o item Densidade de Drenagem apresentou-se estável (1,0).

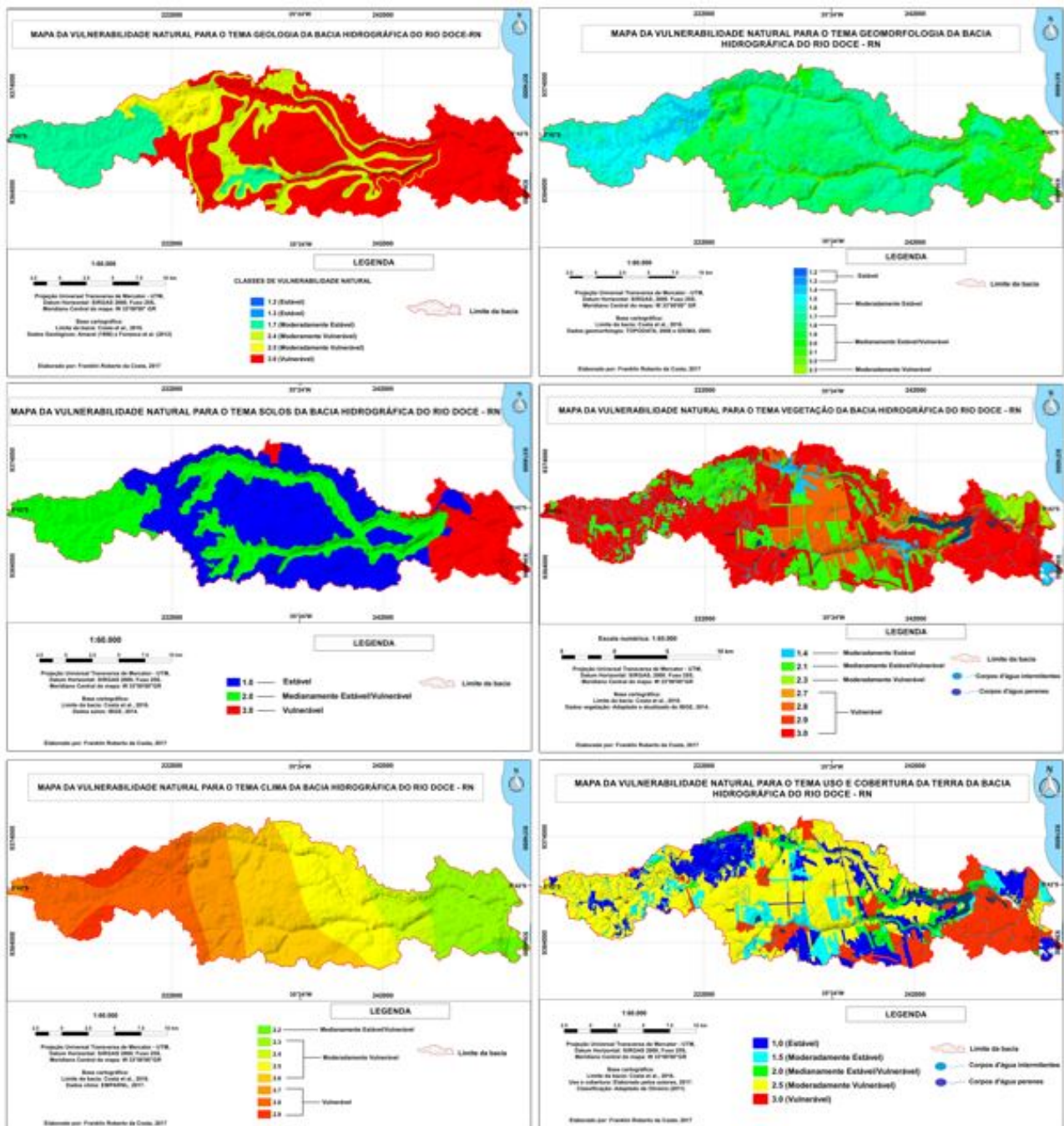


Figura 4 - Mapa da vulnerabilidade natural e de ação antrópica por temas (Geologia, Geomorfologia, Solos, Vegetação, Clima e Uso e Cobertura da terra).

Na perspectiva da avaliação geomorfológica, e de acordo com Crepani et al. (2001), as áreas urbanas, as Dunas Fixas e Móveis e a Planície Flúvio-marinha são unidades que apresentam estabilidade e no caso da bacia em tela têm uma média a maior estabilidade para a bacia, com uma média de 1,3 na escala de vulnerabilidade. As Dunas Móveis e Fixas apresentaram um valor de vulnerabilidade medianamente estável/vulnerável para o item Declividade, mas para o item Densidade de Drenagem apresentou-se estável (1,0).

As áreas urbanas também acompanharam os valores das Dunas Móveis para o item densidade de drenagem, mas a amplitude altimétrica

apresentou-se moderadamente estável. No entanto, apresentou uma declividade menor que as demais unidades geomorfológicas, assim como a Planície Flúvio-Marinha. Essa última apresentou a menor amplitude altimétrica da bacia.

A Unidade Depressão Sertaneja apresentou uma média de 1,6 para a escala de vulnerabilidade a erosão, que a coloca como Moderadamente Estável. A unidade compreende um diversificado conjunto de padrões de relevo com amplo domínio de superfícies aplainadas com relevo plano e suavemente ondulado (IBGE, 2009). Apresentou a maior amplitude altimétrica, colocando-a na escala de vulnerabilidade Media-

namente Estável/Vulnerável (1,9). Para as variáveis Densidade da Drenagem (1,4) e Declividade (1,5) apresentou valores que a caracterizaram, de um modo geral, como Moderadamente Estável (1,6).

A unidade considerada mais vulnerável na bacia, em relação a Geomorfologia, é a Planície de Inundação Fluvial. Caracterizada como uma área Medianamente Estável/Vulnerável, apresentou os maiores valores de densidade de drenagem (2,0) e declividade (1,8) e a segunda maior para Amplitude Altimétrica (1,9).

De um modo geral, a geomorfologia da bacia se apresenta, pela média dos indicadores morfométricos, como uma área majoritariamente aplainada, com algumas áreas onduladas mais próximas ao leito dos rios e baixa densidade de drenagem. A ausência de relevos residuais e a predominância dos tabuleiros explicam a baixa amplitude altimétrica.

Crepani et al. (2001) afirmam que a principal característica considerada para estabelecer as 21 classes de vulnerabilidade para o tema solos é o grau de desenvolvimento ou maturidade do solo. No entanto, a variável solos apresenta apenas 4 classes (1,0; 2,0; 2,5; 3,0). Na BHRD encontram-se 3 (três) classes.

De acordo com Crepani et al. (2001), os Latossolos possuem maior estabilidade em relação a vulnerabilidade do solo pois são considerados desenvolvidos, com grande profundidade e porosidade. Além disso, possuem permeabilidade à água e ao ar; friáveis e de baixa plasticidade.

São poucos suscetíveis aos processos erosivos e ocorrem, geralmente, em topografias mais suaves. Na BHRD, os Latossolos se encontram na porção central, sendo a unidade mais presente na área, com o total de 189,31 km², o que representa 47,72% da bacia. No nível intermediário estão os Argissolos Amarelo Distrófico e o Vermelho Eutrófico, além do Planossolo Háptico Eutrófico.

O solo Argissolo Amarelo Distrófico é encontrado em praticamente toda extensão da bacia, seguindo os cursos principais dos rios. De acordo com o IBGE (2014), são solos constituídos por material mineral, que tem como características a presença de horizonte B textural de argila de atividade baixa, ou alta conjugada com saturação por bases baixa. O horizonte B textural encontra-se abaixo de qualquer horizonte superficial. Para Crepani et al. (2001), a diferença de textura entre os horizontes A e B dificulta a

infiltração de água no perfil. Essa condição poderá favorecer processos erosivos atuantes na falta de uma cobertura vegetal primária ou secundária em condições suficientes de minimizar os impactos decorrentes dos níveis elevados de precipitação comuns nessa região, independentemente do material fonte desses argissolos.

O solo do tipo Planossolo Háptico Eutrófico é um solo mineral imperfeitamente ou mal drenado, com horizonte superficial ou subsuperficial eluvial, textura mais leve, que contrasta abruptamente com o horizonte B ou com transição conjugada. Geralmente com acentuada concentração de argila e permeabilidade lenta a muito lenta (IBGE, 2014). Os Latossolos, os Argissolos Amarelo Distrófico e os Planossolos Háptico Eutrófico compreendem 146,57 km², ou seja, 36,95% da área da bacia.

Os tipos de solos vulneráveis da bacia são aqueles considerados jovens e pouco desenvolvidos, ou seja, pequena evolução dos perfis de solo. Segundo Crepani et al. (2001), nestes solos, o horizonte A está assentado diretamente sobre o horizonte C, ou diretamente sobre a rocha matriz. São considerados jovens, pois ainda estão se desenvolvendo a partir de materiais de origem recentemente depositados.

Na BHRD, os tipos de solos existentes foram o Gleissolo Tiomórfico Órtico e o Neossolo Quartzarênico Órtico. Os solos do tipo Neossolo Quartzarênico Órtico são constituídos por material mineral, não hidromórfico, ou por material orgânico pouco espesso e não apresentam alterações expressivas em relação ao material originário devido à baixa atuação dos processos endogenéticos (IBGE, 2014).

O solo Gleissolo Tiomórfico Órtico é pouco espesso, lamacento, escuro e com alto teor de sais provenientes da água do mar, formados em ambientes de mangues, a partir de sedimentos flúvio-marinho recentes, misturados com detritos orgânicos. Segundo Jacomine (2008), são decorrentes da deposição pelas águas dos rios quando se encontram com as águas do oceano, em condição de baixa energia. Esses solos estão localizados na porção leste da bacia e ocupam 8,89 km², representando 6,38% da bacia.

O tema vegetação é considerado um dos mais importantes para análise da vulnerabilidade a perda do solo. Acredita-se que coberturas vegetacionais densas são consideradas mais estáveis, em detrimento de solos mais desnudos. Utilizando-se como base o mapa de vegetação do

IBGE e a escala de vulnerabilidade para o tema vegetação de Crepani et al. (2001), elaborou-se o mapa de vulnerabilidade para o tema.

A partir do mapa de vulnerabilidade para o tema vegetação, observa-se que as áreas mais estáveis estão localizadas próximo ao litoral, representada pelas Formações Pioneiras com Influência Fluviomarina (Mangue) (1,4), considerada Moderadamente Estável.

A vegetação do tipo Savana Estépica Arborizada e a Savana Arborizada estão distribuídas ao longo de toda a bacia, principalmente na parte central e norte-sul. Caracteriza-se como uma vegetação mais densa, associadas a Formação Flúvio-Lacustre arbóreo ao longo dos rios do Mudo e Guajirú, ao noroeste com as Florestas Estacionais Deciduais de Terras Baixas (onde se encontra a vegetação mais preservada) e nas proximidades do Aeroporto Internacional Augusto Severo. De acordo com a escala de vulnerabilidade, esses tipos de vegetação são considerados Medianamente Estáveis/Vulneráveis.

A vegetação do tipo Formações Pioneiras com Influência Fluvial e/ou Lacustre está distribuída ao longo de toda a bacia, principalmente próximo dos rios do Mudo, Guajirú e Doce. No entanto, percebeu-se que a influência antrópica não permitiu avaliá-lo de maneira isolada. Segundo Crepani et al. (2001), onde não é possível definir espacialmente as unidades de vegetação que se compõe o contato, calcula-se a média aritmética dos tipos de vegetação que estão nele contidos.

No caso da BHRD, a intensa atividade antrópica ao longo dos leitos dos rios acarretou a obtenção de médias que, em alguns casos, foram superiores ao valor de vulnerabilidade para o tipo de vegetação isoladamente. Por esse motivo, as Formações Pioneiras com Influência Fluvial e/ou Lacustre que, na escala de vulnerabilidade é considerada Moderadamente Vulnerável, em algumas áreas próximas dos rios apresentou-se vulnerável.

Segundo Crepani et al. (2001), as coberturas superficiais são os principais responsáveis pela vulnerabilidade à perda do solo. São representadas por áreas antropizadas, de pastagens, de culturas perenes e culturas anuais sazonais são classificadas com valores 2,8; 2,9; 3,0 e 3,0, respectivamente, e na BHRD elas correspondem conjuntamente a 201,79 km², o equivalente a 50,87% da cobertura da terra.

Somados a área urbana (56,79 km² ou 14,32%) e às áreas antropizadas (20,98 km² ou 5,29%), a escala vulnerável representa 70,48%

de toda a área da BHRD para o tema vegetação. Silva et al. (2007) afirmam que a intensidade pluviométrica está diretamente ligada à erosividade, que se caracteriza pelo poder que a chuva tem em causar a erosão dos solos, sendo a variável empregada por Crepani et al. (2001) para o tema clima.

Ainda que haja uma boa quantidade de chuvas e uma distribuição regular, ao longo do ano, para a porção leste da bacia, percebe-se que, de uma maneira geral, a intensidade pluviométrica é considerada um dos itens mais impactantes à erosão dos solos, destacando-se que 329,42 km², ou 83,04% da área de bacia, está entre Moderadamente Vulnerável a Vulnerável na escala de Vulnerabilidade natural adotada por Crepani et al. (2001).

O mapa de uso e cobertura da terra teve como base metodológica o Manual Técnico de Uso da Terra, elaborado pelo IBGE (2013), e como base cartográfica o mapa de vegetação, elaborado a partir da interpretação de imagens orbitais disponibilizadas pela empresa Digital Globe no Google Earth, com resolução espacial que varia entre 5 metros e 0,61 centímetros, que foi aberto no SIG QGIS Essen 2.14, através do plugin Open layers, assim como algumas visitas a campo.

O mapa de uso e cobertura da terra representa o nível de antropização que a bacia vem sofrendo ao longo dos anos. As áreas consideradas estáveis e medianamente estáveis foram aquelas que apresentaram uma vegetação mais preservada, com florestas e áreas campestres, distribuídas de maneira isolada ao longo de toda a bacia. Ocupam uma área de 110,35 km², representando 27,82% de toda a bacia. Destas, 73,95 km² (18,64%) foram classificadas como áreas florestais e 36,40 km² (9,18%) como áreas campestres.

As áreas florestadas na bacia estão diminuindo, devido às ações antrópicas que vem, ao longo dos anos, retirando a vegetação para diferentes formas de ocupação (Castro, 2000; Faustino et al., 2014). O cultivo perene ocupa uma área de 20,25 km², representando 5,15% de toda a área da bacia. É caracterizada pelo cultivo de frutas, tais como a banana, o coco e o caju. Concentra-se em áreas onde há maior disponibilidade de águas, ou seja, próximo dos leitos dos rios. Observou-se, em alguns locais, o avanço da produção para o leito menor do rio.

A classe Vulnerabilidade Moderadamente Vulnerável é a mais representativa na bacia e se caracteriza por áreas utilizadas para a prática da cultura temporária e a pastagem/criação de gado.

Ocupa uma área de 173,7 km², o que representa 43,79% de toda a bacia. Os principais cultivos, que representam 116,51 km² (29,30%) da bacia, estão associados à cana de açúcar na parte centro-leste e ao cultivo misto realizado nas áreas dos assentamentos rurais e de pequenos proprietários na parte centro-oeste da bacia. Em muitas dessas áreas, a atividade da pecuária aparece consorciada com a cultura temporária.

Na área em estudo há uma cultura temporária mecanizada, consorciada com uma criação de gado, ocupando todo o leito do rio. A proximidade com a área urbana em expansão na direção desse setor poderá acarretar um aumento no grau de vulnerabilidade para essas áreas que se apresentam em processo de prevalência da morfogênese.

Por fim, a classe Vulnerável representa as áreas onde há o predomínio de atividades antrópicas que transformaram (e ainda transformam) a paisagem, alterando de maneira irreversível. As principais características que a concebem são as áreas urbanizadas e as áreas de mineração, onde estão localizados os afloramentos rochosos. A área possui 88,31 km², representando 22,26% da bacia. Desses, 86,70 km² (20,53%) são áreas urbanizadas e o restante, 1,61 km² (0,41%), foram classificados como afloramentos rochosos.

As áreas urbanizadas se concentram na Zona

Norte da cidade de Natal, na porção sul da área urbana de Ceará-Mirim, na porção sul da área urbana de Extremoz, na porção nordeste da cidade de São Gonçalo do Amarante. Além das áreas urbanas consolidadas e em expansão, nas porções centro e leste da bacia, outras aglomerações populacionais também foram consideradas áreas urbanizadas, como distritos, povoados, comunidades e agrovilas, distribuídas ao longo da bacia, principalmente no sudoeste, onde se concentram 6 (seis) assentamentos rurais

Os afloramentos rochosos estão associados a atividades mineradoras. As extrações minerais (granito) mecanizadas estão localizadas ao longo do rio Guajiru, próximo ao distrito de Serrinha, município de São Gonçalo do Amarante, e mais a montante, próximo a porção sul da nascente do rio do Mudo.

As áreas vulneráveis presentes na bacia apresentam, de uma maneira geral, danos ambientais relevantes, tais como o assoreamento, a mudança e interdição das drenagens dos rios, retirada da vegetação para uso antrópico (plantio e moradia) e a extração mineral, irreversíveis. Neste caso, se faz necessário dialogar com a sociedade, perspectivas de ajustes na forma de uso e ocupação desses espaços, visando manter a sustentabilidade local, minimizando os impactos decorrentes da alteração acelerada da paisagem da bacia.

ANÁLISE DAS VULNERABILIDADES NATURAL E AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE

Vulnerabilidade natural

O mapa de Vulnerabilidade Natural da bacia hidrográfica do Rio Doce/RN é mostrado na figura 5.

As classes de vulnerabilidade natural foram definidas de modo que as unidades com valores de 1,0 a 1,3 foram classificadas como *Estáveis*; as que apresentaram de 1,4 a 1,7 foram definidas como *Moderadamente Estável*; de 1,8 a 2,2 classificadas como *Medianamente Estável/Vulnerável*; de 2,3 a 2,6 classificadas como *Moderadamente Vulnerável*; e de 2,7 a 3,0 classificadas como *Vulnerável*. Além das classes, fez-se também a divisão das classes por nível de vulnerabilidade, por entender que há escalas maiores e menores de vulnerabilidade nas próprias classes determinadas (Figura 6).

A figura 5 e a figura 6 mostram que a BHRD se apresenta, predominantemente, como uma área Medianamente Estável/Vulnerável. No entanto, percebe-se que a bacia não apresenta as

classes Estável (1 – 1,3) e Moderadamente Estável (1,4 – 1,7). A classe Vulnerável apresenta-se com grau de vulnerabilidade (1), equivalente ao valor 2,7.

A classe *Medianamente Estável/Vulnerável* representa 61,87% (245,44 km²) do território sobre terrenos geologicamente antigos, representados por rochas da Suíte Intrusiva Dona Inês.

Mas também se faz presente em terrenos sedimentos aluvionares holocênicos planos e baixos vegetados com características físicas mais estáveis à vulnerabilidade.

Do ponto de vista geomorfológico, essas classes correspondem às áreas de Tabuleiros Costeiros e da Depressão Sertaneja, cujas características são de relevo plano a suave ondulado, e os solos predominantes são dos tipos Latossolo Amarelo Distrófico e Planossolo Háplico Eutrófico.

A vegetação, de maneira geral, apresenta-se em áreas classificadas como moderadamente es-

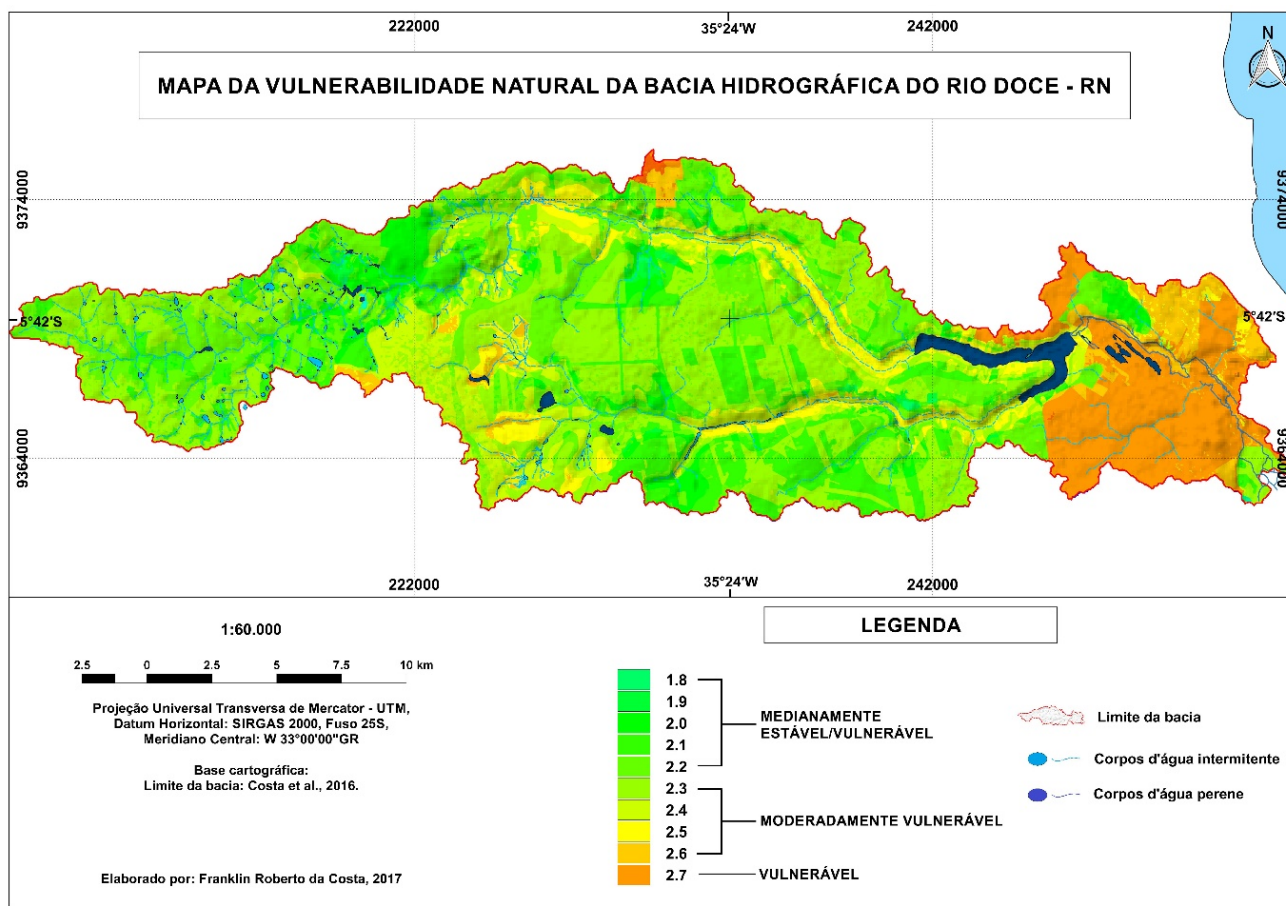


Figura 5 - Mapa da vulnerabilidade natural da BHRD.

Classes/Níveis de Vulnerabilidade	Áreas das classes (km ²)	Áreas das classes (%)
Medianamente Estável/Vulnerável 1 (1,8)	6.54	1.65
Medianamente Estável/Vulnerável 2 (1,9)	9.24	2.33
Medianamente Estável/Vulnerável 3 (2,0)	35.95	9.06
Medianamente Estável/Vulnerável 4 (2,1)	55.83	14.07
Medianamente Estável/Vulnerável 5 (2,2)	137.88	34.76
Moderadamente Vulnerável 1 (2,3)	53.89	13.58
Moderadamente Vulnerável 2 (2,4)	26	6.55
Moderadamente Vulnerável 3 (2,5)	22.57	5.69
Moderadamente Vulnerável 4 (2,6)	38.48	9.70
Vulnerável 1 (2,7)	10.32	2.60

Figura 6 - Classes e Níveis de Vulnerabilidade Natural da BHRD.

táveis (Savana Estépica Arborizada) e vulneráveis (Cultivo Perene). No entanto, a vulnerabilidade para a classe Medianamente Estável/Vulnerável de grau (5) representa 137,88 km² (34,76%) de toda a bacia, e se concentra nas áreas de cultivo (temporário e permanente) e pastagem, o que aponta, portanto, áreas com forte tendência a vulnerabilidade natural.

A classe *Moderadamente Vulnerável* possui

140,94 km², o que equivale a 35,53% da área da bacia, sendo a maior parcela no grau de vulnerabilidade (1). Essa classe é geologicamente caracterizada por formações rochosas mais recentes, que apresentam grau de vulnerabilidade alta, como os Depósitos Aluvionares Antigos e os Depósitos Eólicos Vegetados e Não Vegetados. A geomorfologia dessas áreas se concentra nas áreas das planícies de inundação

fluvial, que se apresenta com relevo suave ondulado a ondulado, principalmente nos leitos dos rios Guajirú, do Mudo e Doce.

Os solos característicos dessa classe são os Argissolos Amarelos Eutróficos Distróficos e os Neossolos Quartzarênicos Órticos. Localizados em áreas onde a vegetação encontra-se antropizada, seja pelo cultivo e pastagem, seja pela ocupação urbana. Assim como na classe anterior, percebe-se um valor considerável para o último grau de vulnerabilidade da classe (4), representando 38,48 km² ou 9,70% da área da bacia. Essa área está associada aos centros urbanos, que apresentam vulnerabilidade alta para os temas Geologia, Geomorfologia, Vegetação e Solos.

A classe *Vulnerável* representa 10,32 km² (2,60%) da área da bacia e se concentra nas áreas urbanas, com ênfase na porção norte da área urbana de Ceará-Mirim. Isso porque além dos

temas Geologia, Vegetação e Solos apresentarem vulnerabilidade máxima, os temas Clima (2,6) e Geomorfologia (2,0) também contribuíram para elevar o valor para o grau 2,7 na escala de vulnerabilidade natural. Em Natal e em Extremoz, pequenas parcelas apresentam o valor 2,7 na escala de Vulnerabilidade em áreas que apresentaram um relevo mais acidentado e mais ondulado, alcançando o grau de vulnerabilidade 2,2.

Vulnerabilidade ambiental

O mapa de vulnerabilidade ambiental foi elaborado a partir das metodologias adotadas por Grigio (2003) e Oliveira (2011), na qual são aplicados diferentes pesos compensatórios para os valores de vulnerabilidade natural e do uso e cobertura da terra. O resultado da equação aplicada pode ser visto na figura 7, que representa o mapa de Vulnerabilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Doce/RN.

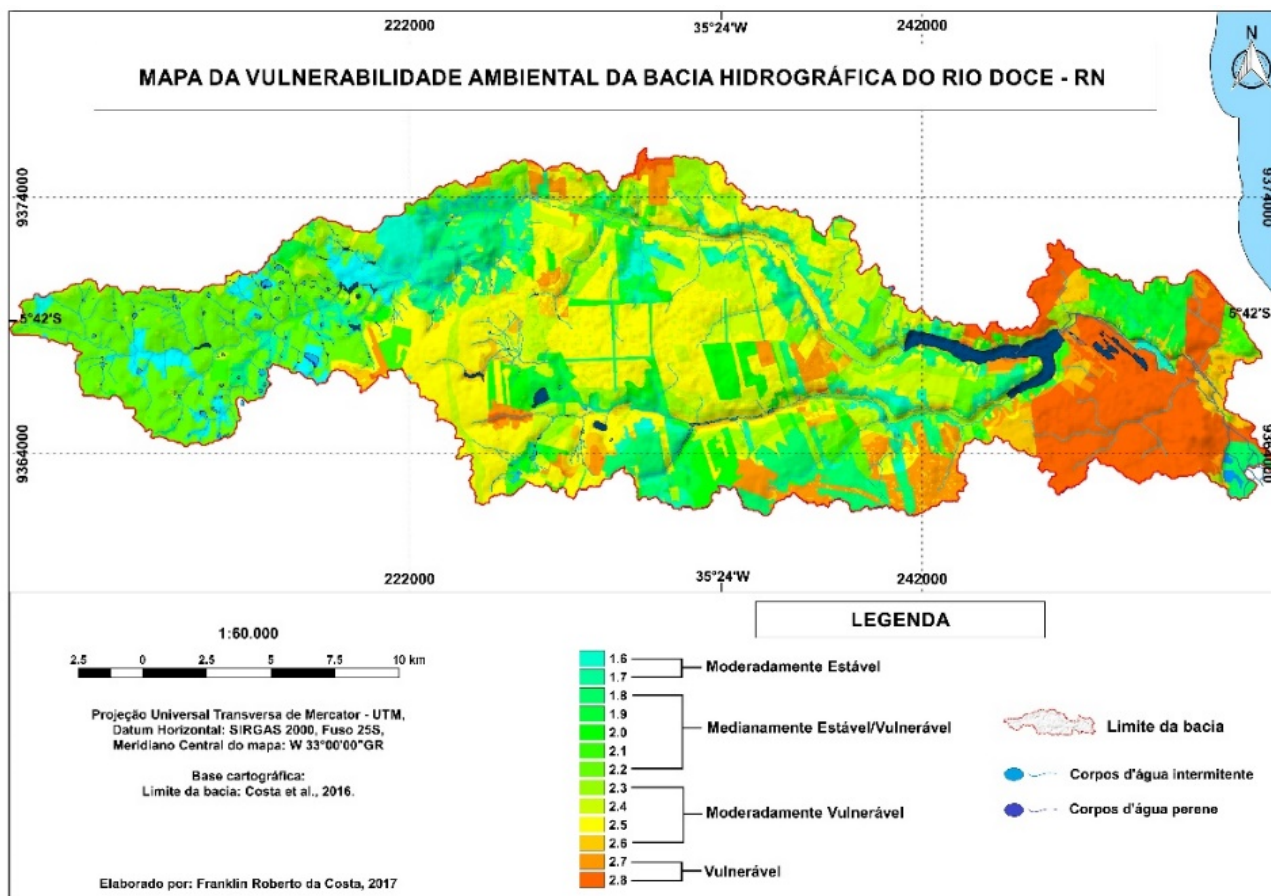


Figura 7 - Mapa da vulnerabilidade ambiental da BHRD.

Já a classificação dos graus de vulnerabilidade seguiu a proposta de Crepani et al. (2001), conforme especificado na descrição metodológica da Vulnerabilidade Natural (Figura 8).

De acordo com a figura 8, a vulnerabilidade ambiental para a bacia apresentou 4 (quatro) classes de vulnerabilidade, sendo os 02 (dois)

últimos níveis da classe Moderadamente estável (3 e 4), todos os níveis das classes Medianamente estável/vulnerável (5) e Moderadamente vulnerável (4) e os 02 (dois) primeiros níveis da classe Vulnerável. Não foram obtidas áreas com a classe Estável.

Em termos quantitativos, a classe mais repre-

Classes/Níveis de Vulnerabilidade	Áreas das classes (km ²)	Áreas das classes (%)
Moderadamente estável 3 (1,6)	9.39	2.37
Moderadamente estável 4 (1,7)	35.21	8.88
Medianamente Estável/Vulnerável 1 (1,8)	15.24	3.84
Medianamente Estável/Vulnerável 2 (1,9)	21	5.29
Medianamente Estável/Vulnerável 3 (2,0)	6.35	1.60
Medianamente Estável/Vulnerável 4 (2,1)	16.77	4.23
Medianamente Estável/Vulnerável 5 (2,2)	52.75	13.30
Moderadamente Vulnerável 1 (2,3)	35.2	8.87
Moderadamente Vulnerável 2 (2,4)	79.16	19.95
Moderadamente Vulnerável 3 (2,5)	53.9	13.59
Moderadamente Vulnerável 4 (2,6)	25.08	6.32
Vulnerável 1 (2,7)	36.83	9.28
Vulnerável 2 (2,8)	9.82	2.48

Figura 8 - Classes e Níveis de Vulnerabilidade Ambiental da BHRD.

sentativa na BHRD foi a Moderadamente vulnerável, com 193,34 km² de área ou 48,74% da bacia, seguidos da classe Medianamente Estável/Vulnerável, com 112,11 km² ou 28,26%. As classes Vulnerável e Moderadamente estável apresentaram resultados semelhantes (46,65 km² ou 11,76% e 44,6km² ou 11,24%, respectivamente).

As áreas classificadas como *Moderadamente estável* estão distribuídas ao longo de toda a bacia e tem como característica principal uma vegetação mais preservada, terrenos e solos mais antigos, bem como um relevo mais plano, formado pela Depressão Sertaneja e a Formação Tabuleiros.

Nessas áreas, as formações Florestal e Campestre se destacam, principalmente ao longo do alto e médio curso do rio do Mudo. O nível 4 dessa classe é a que apresenta a maior parcela de cobertura no terreno, com 35,21 km² (8,88%), o que demonstra uma área de transição entre a estabilidade natural para um processo de antropização de uso e ocupação da terra.

O processo de antropização é o responsável pela degradação ambiental das microbacias de nascentes do rio do Mudo. A remoção total da vegetação natural nas principais áreas de recarga deste rio, ora desnudas, constitui o principal contribuinte para a diminuição da recarga e do nível do lençol freático após a extensiva remoção, ao longo dos anos, da vegetação natural desses locais.

As áreas *Medianamente Estáveis/Vulneráveis* com níveis mais altos se concentraram na porção

sul – sudeste da bacia e se caracterizaram por apresentar uma Geologia formada por depósitos areno-argilosos, solos do tipo Latossolo Amarelo Distrófico e formações geomorfológicas do tipo Tabuleiros. Apresenta uma vegetação parcialmente preservada, decorrente da pressão exercida pela forma de uso e ocupação terra. Esse fato se comprova ao analisar o quadro 3, em que os níveis 4 e 5 de vulnerabilidade representam 69,52 km² ou 62,01% dessa classe. Assim como na classe anterior, essas áreas merecem uma atenção especial por estarem em um nível considerado de transição.

Neste caso, há o risco iminente de se tornarem áreas moderadamente vulneráveis, uma vez que a microbacia do Guajiru se apresenta em processo de uso e ocupação gradativa, o que pode ocasionar um aumento dos impactos ambientais negativos nessa porção da bacia. Investigação em microbacias de nascentes do rio Guajirú apontam para o alto nível de degradação ambiental, decorrente do acentuado nível de desmatamento das microbacias de nascentes e de corpos d'água existentes, propiciando a diminuição gradativa nos níveis do lençol freático, além de barramentos de canais de drenagem para implantação de estradas, assentamentos e agrovilas.

Os níveis mais baixos de vulnerabilidade da classe medianamente estável/vulnerável estão localizados na porção oeste da bacia. A baixa vulnerabilidade se dá pelos condicionantes do meio físico que ali se apresentam. Ou seja, as

características físicas do ambiente apresentam baixa vulnerabilidade.

No entanto, a influência dos tipos de atividades exercidas nesse setor, juntamente com o clima mais vulnerável, não o colocou como uma área totalmente estável.

Como dito anteriormente, a classe *Moderadamente vulnerável* foi aquela mais representativa na bacia, com 193,34 km² ou 48,74% da sua área total.

Apresenta-se em toda a bacia, com ênfase na sua porção central, onde se concentra as principais atividades agropecuárias, bem como nas áreas de expansão urbana das cidades mais representativas existentes na bacia.

Os níveis de vulnerabilidade 2 e 3 são os mais representativos da classe, com uma área de 133,06 km², o que significa 33,54% de toda a bacia.

Essas áreas são caracterizadas por realizarem atividades agrícolas temporárias e permanentes, sendo alguns lugares consorciadas com a criação de animais de grande porte. As culturas temporárias mais representativas são a cana de açúcar, presente ao longo do rio do Mudo e nas áreas de transição entre as sub-bacias do Guajirú e do Mudo, e as hortaliças, cultivadas ao longo do Rio Doce, e algumas áreas do Rio Guajirú (em alguns casos no leito menor do rio)

O último nível de vulnerabilidade da classe moderadamente vulnerável (2,6) se concentra, majoritariamente, nas áreas de expansão urbana das cidades de Natal e de São Gonçalo do Amarante, além das dunas móveis e fixas, localizadas no município de Extremoz. São áreas que se apresentam com grau de vulnerabilidade

alta, com forte tendência a se tornarem vulneráveis, uma vez que estão localizadas em áreas vizinhas as que já são consideradas vulneráveis.

Por fim, as áreas classificadas como *Vulnerável* correspondem a 46,65 km² (11,76%) do território e estão localizadas, principalmente, na porção leste da bacia, onde se concentram as áreas urbanas consolidadas com a maior densidade demográfica da bacia, juntamente com todos os equipamentos urbanos necessário para o funcionamento das cidades, além das áreas de mineração a céu aberto.

Além das áreas urbanas consolidadas, os distritos e as agrovilas dos assentamentos rurais, localizados nos municípios de Ielmo Marinho e de Ceará-Mirim, bem como a extensa área ocupada pelo Aeroporto Internacional Augusto Severo, localizado no município de São Gonçalo do Amarante e o Aterro Sanitário Metropolitano de Natal, localizado no município de Ceará – Mirim, fazem parte dessa classe.

A região extremo leste compreende formações geológicas cenozóicas constituídas por depósitos eólicos litorâneos vegetados e depósitos arenos-argilosos, com ocupação antrópica consolidada. Geomorfologicamente é uma área de relevo plano a suave ondulado, referente às Dunas Fixas, às Dunas Móveis e aos Tabuleiros Costeiros.

A formação geomorfológica e o tipo climático da bacia contribuíram para que não se elevasse o grau de vulnerabilidade para essa classe. No entanto, as demais variáveis apresentaram alto grau de vulnerabilidade, denotando que essas áreas são as mais susceptíveis a impactos ambientais na bacia.

CONCLUSÕES

A BHRD se apresenta como uma área com vulnerabilidade natural de grau médio, prevalecendo um equilíbrio entre os processos de morfogênese e pedogênese. A vulnerabilidade ambiental apresenta-se acima da média, prevalecendo o processo de morfogênese. Em comum, na porção leste da bacia, onde se localizam as principais concentrações populacionais e os sistemas naturais mais frágeis, as vulnerabilidades natural e ambiental se mostraram preocupantes, pois alcançaram os maiores valores do grau de vulnerabilidade, com uma média de 2,7 para a classificação da vulnerabilidade natural e 2,8 para a vulnerabilidade ambiental.

O mapeamento da vulnerabilidade natural mostrou que há uma diminuição da estabilidade

natural/ambiental no sentido oeste-leste. A média da vulnerabilidade na porção oeste foi de 2,2 (Medianamente Estável/Vulnerável); na porção central a média foi de 2,4 (Moderadamente Vulnerável); na porção leste a média foi de 2,6 (Moderadamente Vulnerável - último nível).

Os resultados observados para o tema uso e cobertura da terra, considerado o mais importante para a análise da vulnerabilidade ambiental, apresentaram vulnerabilidade alta ao longo de toda a bacia, decorrente da forma como o homem vem explorando o meio, notadamente, pelo desmatamento quase total da bacia. Isso porque 271,87 km² (68,53%) da área territorial são áreas antropizadas (agrícolas e não agrícolas), cuja média de vulnerabilidade ambiental é de 2,9 e

110,35 km² (27,82%) da área territorial são de vegetação natural e/ou reflorestada, com média de vulnerabilidade 2,0.

O uso das metodologias para análise da vulnerabilidade natural e ambiental, baseados em Crepani et al. (2001), Grigio (2003) e Oliveira (2011), mostraram resultados satisfatórios e passíveis de comparação. A metodologia adotada por Crepani et al. (2001) apresentou resultados que representaram a estabilidade/vulnerabilidade natural da bacia pelos níveis de vulnerabilidade do meio físico, sem diferenças de pesos, o que acarretou uma vulnerabilidade média, de valor 2,1.

Isso significa dizer que as características do meio físico da bacia comprovam que essa área tem uma tendência a vulnerabilidade, independente das ações antrópicas, já que 344,97 km² (86,96%) da bacia está acima da média no nível de vulnerabilidade, concentrando 229,66 km² (57,89%) entre os níveis 2,0 e 2,2.

Já a metodologia adotada por Grigio (2003) e Oliveira (2011), que necessita aplicar pesos para os temas do meio físico (Geologia, Geomorfologia, Solos, Clima e Vegetação) e para o tema antrópico (uso e cobertura da terra), apresentou uma média maior que o resultado obtido para a vulnerabilidade natural. Os valores obtidos mostraram que a bacia se encontra na classe *Moderadamente Vulnerável*, com valor médio de 2,4, na escala de 1,0 a 3,0. O resultado obtido é fruto da antropização da bacia, representando uma área de 204,08 km² (51,44%) acima da média encontrada. Entre os níveis 2,3 e 2,5, concentrou-se o nível de vulnerabilidade ambiental da bacia, representando 168,26 km² (42,41%) do seu território.

Nesse sentido, é possível afirmar que a identificação das classes de vulnerabilidade

natural e ambiental apresentada neste estudo abaliza critérios que sustenta o planejamento do uso e ocupação do solo, principalmente para as áreas que apresentaram vulnerabilidade alta, como as áreas urbanas dos municípios de Natal, Extremoz, São Gonçalo do Amarante e Ceará-Mirim, as nascentes dos rios Guajirú e Doce, os distritos, povoados e assentamentos rurais.

Sugere-se que, para essas áreas, se estabeleçam critérios que limitem o uso e ocupação, tendo como suporte as legislações ambientais em vigor, com o objetivo principal de conservar e restaurar os sistemas naturais ali existentes. Com base na legislação ambiental vigente, pode-se propor proteção para os remanescentes de vegetação nativa existentes nas porções leste, centro-norte e oeste da bacia.

Ponderando a importância da bacia para Região Metropolitana de Natal, principalmente na Zona Norte da cidade de Natal, considera-se primordial a promoção de estudos, em escalas de detalhe, com o objetivo de aprofundar as discussões sobre o ordenamento territorial, que promova o planejamento regional, a partir de planos diretores municipais e comitês de bacias, em torno da sustentabilidade ambiental dessa região.

Finalmente, espera-se que este estudo sirva como instrumento inicial norteador de políticas públicas e de gestão de bacias hidrográficas, bem como contribua para o desenvolvimento local, seja ele econômico, social, associado a um uso sustentável do meio.

Ainda assim, como dito anteriormente, sugere-se estudos em escalas maiores, que permitam o detalhamento e que atendam às necessidades do homem no meio e a preservação dos recursos naturais.

REFERÊNCIAS

- ANGELIM, L.A.A.; MEDEIROS, V.C.; NESI, J.R. **Natal. Programa Geologia do Brasil – PGB**. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte. Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Norte. Escala. 1:500.000. Recife: CPRM/FAPERN, 2006.
- BARBOSA, Y.B. & LORANDI, R. Geoprocessamento aplicado ao estudo da vulnerabilidade à erosão na bacia hidrográfica do Ribeirão do Pântano nos municípios de São Carlos, Analândia e Descalvado (SP). **Revista Geografia** (Londrina), v. 21, n. 1, p. 103-123, jan/abr. 2012.
- CASTRO, V.L.L. **Águas subterrâneas no curso inferior da bacia do rio Doce/RN: subsídios para um gerenciamento integrado**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Geociências. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2000.
- COSTA, F.H.S.; PETTA, R.A.; LIMA, R.F.S.; MEDEIROS, C.N. Determinação da vulnerabilidade na bacia potiguar, Região de Macau (RN), utilizando Sistemas de Informações Geográficas. **Revista Brasileira de Cartografia**. Rio de Janeiro, UFRJ, n. 58, v. 2, p.119-12, 2006,
- COSTA, F.R.; SOUZA, R.F.; SILVA, S.M.P. Análise comparativa de metodologias aplicadas à delimitação da bacia hidrográfica do Rio Doce – RN. **Sociedade e Natureza**, n. 28, v. 3, p.429-442,2016.
- COSTA, F.R.; SOUZA, R.F.; SILVA, S.M.P. Geoprocessamento aplicado a caracterização geoambiental da bacia hidrográfica do Rio Doce – RN/Brasil. **Boletim Paranaense de Geociências**, [S.l.], v. 75, nov. 2019.
- COSTA, F.R.; SOUZA, R.F.; SILVA, S.M.P. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA \zç. **Manual técnico de geomorfologia**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2009.
- JACOMINE, P. K. T. A nova classificação brasileira de solos. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, Recife, v. 5/6, p. 161-179, 2008/2009
- JARDIM DE SÁ, E.F. **A Faixa Seridó (Província Borborema,**

- NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na Cadeia Brasileira/Pan-Africana.** Tese (Doutorado). Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 803 p, 1994.
- MESQUITA, C.; ASSIS, A.Q.S.; SOUZA, R.M. Vulnerabilidade natural à perda de solos da bacia hidrográfica do Rio Sagrado – Morretes/PR. **Revista de Geografia**. Recife – PE, UFPE, v.especial VIII SINAGEO, n.2, 2010, p. 249-264.
- MOTA, S.O. & VALLADARES, G.S. Vulnerabilidade à degradação dos solos da Bacia do Acaraú, Ceará. In: **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.1, jan./mar., 2011, p.39-50.
- OLIVEIRA, P.T.S.; RODRIGUES, D.B.B.; ALVES SOBRINHO, T.; PANACHUKI, E. Processo analítico hierárquico aplicado a vulnerabilidade natural a erosão. **Geociências**, São Paulo, UNESP, v.28, n.4, 2009, p.417-424.
- OLIVEIRA, F.F.G. **Aplicação das técnicas de geoprocessamento na análise dos impactos ambientais e na determinação da vulnerabilidade ambiental no litoral sul do Rio Grande do Norte.** Tese (Doutorado em Geografia) Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP – Rio Claro, 2011, 250p.
- RIBEIRO, F. & CAMPOS, S. Vulnerabilidade à erosão do solo da região do Alto Rio Pardo, Pardinho, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande – PB, UFCG, v. 11, n. 6, p.628–636, 2007
- ROSS J.L.S. **Geomorfologia: ambiente e planejamento.** 2. ed. São Paulo, Contexto, 2001.
- SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS – SEMARH/RN. **Bacia do Rio Doce, 2000.** Disp. em: <http://servicos.semarh.rn.gov.br/semarh/sistemadeinformaco/es/consulta/cBaciaDetalhe.asp?CodigoEstadual=07>. Acesso em: abr. 2016.
- SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy. **Bull. Geol. Soc. America**. n. 67, p. 597-646, 1956.
- SILVA, J.S.V.; CARVALHO, J.R.P.; SANTOS, R.F.; FELGUEIRAS, C.A. Zoneamentos ambientais: quando uma unidade territorial pode ser considerada homogênea? In: **Revista Brasileira de Cartografia**, n.5 9, v. 01, p. 83-92, abril, 2007.
- SILVA, J.X. da & ZAIDAN, R.T. (Org.). **Geoprocessamento e análise ambiental: aplicações.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. 368p.
- SILVA, F.M. **Análise da vulnerabilidade ambiental no estuário do rio Curimataú/Cunhaú, Baía Formosa e Canguaretama – RN, Brasil.** Natal, 2013, 152 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- TRICART, J. **Ecodinâmica.** Rio de Janeiro: IBGE, 1977.

*Submetido em 28 de setembro de 2020
Aceito para publicação em 20 de março de 2021*