



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA A AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE
AMBIENTAL DA APA DA SERRA DE BATURITÉ**

Brenda Oliveira Rocha

Monografia da disciplina de Introdução
ao Geoprocessamento – SER 300, como
requisito parcial a aprovação no curso,
sob orientação do Dr. Antônio Miguel
Vieira Monteiro.

INPE

São José dos Campos

2021.

RESUMO

Dentre as muitas definições de vulnerabilidade ambiental, esta pode ser entendida como as características do meio físico e biótico à exposição a fontes de pressão ambiental e à ocorrência de impactos ambientais. O Estado do Ceará, mesmo sendo caracterizado majoritariamente pela depressão sertaneja, possui enclaves úmidos que apresentam diferentes características hidroclimáticas associadas as elevadas declividades, sendo a APA da Serra de Baturité um desses locais de destaque que vem sofrendo intensas mudanças relacionadas às suas particularidades naturais. Dessa forma, o objetivo dessa pesquisa foi analisar a vulnerabilidade ambiental da APA da Serra de Baturité, com aplicação da álgebra de mapas associada ao Processo Analítico Hierárquico (AHP). Esta metodologia consiste na integração das variáveis escolhidas e dos fatores condicionantes, de modo a serem atribuídos pesos aos critérios a partir de uma comparação pareada entre esses, tornando-os estatisticamente dependentes. Desse modo, foram escolhidas 5 variáveis para a análise (Geomorfologia, Pedologia, Declividade, Orientação das Vertentes e Uso e Ocupação), sendo os critérios “Uso e Ocupação” e “Declividade” os que apresentaram valores de influência mais altos relacionados à vulnerabilidade ambiental na matriz AHP. Com isso, a vertente dissecada seca da APA da Serra de Baturité, que apresenta neossolos litólicos frágeis, muitas áreas degradadas pelas práticas de agricultura ultrapassadas e que recebe menos umidade, foi classificada com vulnerabilidade “Muito Alta” e “Alta”. Já a região classificada como “Moderada” apresenta pacotes de solos mais expressivos, como Argissolos Distróficos e Eutróficos, porém contém muitas áreas degradadas em decorrência à construção eminente de condomínios multifamiliares de luxo. Por fim, a região classificada como “Baixa” e “Muito Baixa” foram as áreas preservadas de mata úmida densa. Portanto, a álgebra de mapas associada ao AHP se mostrou uma ótima metodologia para a análise integrada da região, porém é necessário a validação dos resultados por meio da obtenção de dados de campo.

Palavras-chave: APA da Serra de Baturité. Vulnerabilidade Ambiental. AHP.

ABSTRACT

Among the many definitions of environmental vulnerability, this can be understood as the characteristics of the physical and biotic environment to exposure to sources of environmental pressure and the occurrence of environmental impacts. The State of Ceará, even though it is mostly characterized by the sertaneja depression, has humid enclaves that have different hydroclimatic characteristics associated with high slopes, and the Serra de Baturité APA is one of these prominent places that has been undergoing intense changes related to its natural characteristics. Thus, the objective of this research was to analyze the environmental vulnerability of the Serra de Baturité APA, applying map algebra associated with the Analytical Hierarchical Process (AHP). This methodology consists of the integration of the chosen variables and conditioning factors, in order to assign weights to the criteria based on a paired comparison between them, making them statistically dependent. Thus, 5 variables were chosen for analysis (Geomorphology, Pedology, Slope, Strand Orientation and Use and Occupation), with the criteria "Use and Occupation" and "Slope" having the highest influence values related to environmental vulnerability in the AHP matrix. Thus, the dry dissected slope of the Serra de Baturité APA, which has fragile litholic neosoils, many areas degraded by outdated agricultural practices and which receives less moisture, was classified as "Very High" and "High" vulnerability. The region classified as "Moderate" has more expressive soil packages, such as Dystraphic and Eutrophic Argisols, but it contains many degraded areas due to the imminent construction of luxury multifamily condominiums. Finally, the region classified as "Low" and "Very Low" were the preserved areas of dense humid forest. Therefore, map algebra associated with AHP proved to be an excellent methodology for the integrated analysis of the region, but it is necessary to validate the results by obtaining field data.

Keywords: APA of Serra de Baturité. Environmental Vulnerability. AHP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Mapa de localização da área de estudo.....	08
Figura 2	– Flanco leste da APA da Serra de Baturité, representado pelas vertentes úmidas, no município de Guaramiranga, CE.....	09
Figura 3	– Flanco oeste da APA da Serra de Baturité, caracterizado pelas vertentes secas na região de sotavento, na rodovia que liga o município de Aratuba à Caridade.....	10
Figura 4	– Formação de chuvas orográficas na vertente à barlavento da APA da Serra de Baturité.....	11
Figura 5	– Média pluviométrica anual do período de 1988-2020 do Maciço de Baturité com destaque para as áreas em vermelho que fazem parte da APA da Serra de Baturité.....	12
Figura 6	– Grande presença de plantações de bananeiras nas vertentes à sotavento (CE 060 que liga os municípios de Aratuba e Canindé	13
Figura 7	– Plantações de bananeiras à barlavento (localidade do Rolador – Pacoti)	14
Figura 8	– Loteamento e construções nas encostas íngremes na região da APA da Serra de Baturité.....	14
Figura 9	– Fluxograma das etapas metodológicas deste trabalho	15
Figura 10	– Mapas das variáveis escolhidas para a análise da vulnerabilidade ambiental da APA da Serra de Baturité.....	21
Figura 11	– Mapa da Vulnerabilidade Ambiental da APA da Serra de Baturité.....	22
Figura 12	– Ambiente da Floresta Caducifólia amplamente descaracterizado por atividades agrícolas, na vertente dissecada seca do município de Mulungu-CE.....	23
Figura 13	– Área de Floresta Caducifólia fortemente degradada na vertente dissecada seca no município de Pacoti-CE.....	23
Figura 14	– Histograma raster gerado a partir do mapa de vulnerabilidade.....	24
Figura 15	– Unidade multifamiliar em construção sobre um relevo de meia laranja no município de Guaramiranga-CE.....	25
Figura 16	– Unidade multifamiliar em construção sobre um relevo de meia laranja no município de Guaramiranga-CE.....	25
Figura 17	– Cachoeira São Pedro e São Paulo, no município de Guaramiranga. A mesma se encontra na região de barlavento da APA da Serra de Baturité, onde se destaca a presença da mata úmida.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Escala Fundamental da AHP.....	17
Tabela 2	– Matriz quadrada de correlação par a par.....	17
Tabela 3	– Valores de IR em função da ordem da matriz quadrada.....	18
Tabela 4	– Variáveis escolhidas e fonte de dados.....	19
Tabela 5	– Matriz de comparação pareada.....	19
Tabela 6	– Notas atribuídas a cada classe das variáveis “Pedologia” e “Geomorfologia”.....	20
Tabela 7	– Notas atribuídas a cada classe das variáveis “Declividade” e “Orientação das Vertentes”.....	20
Tabela 8	- Notas atribuídas a cada classe da variável “Uso e Ocupação”.....	20
Tabela 9	– Pesos resultantes da matriz AHP para cada variável, com o valor de RC...	21
Tabela 10	– Dados gerais das classes mapeadas da APA da Serra de Baturité nos anos de 1958, 1988 e 2004.....	26

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	06
2	OBJETIVOS.....	07
3	ÁREA DE ESTUDO.....	08
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
4.1	Escolha do modelo e do ambiente SIG.....	16
4.2	Escolha das variáveis, fonte de dados e estruturação do método AHP.....	19
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	22
6	CONCLUSÃO.....	27
	REFERÊNCIAS.....	28

1. INTRODUÇÃO

Vulnerabilidade é um termo abrangente, que possui variadas interpretações. É comum vários autores abordarem e discutirem esse tema assimilando-o com outros conceitos, por exemplo, susceptibilidade, sensibilidade, fragilidade, integrando-os com outros termos de acordo com o objetivo final de sua pesquisa (MORAIS, 2017).

Para Cunha (2011), a vulnerabilidade ambiental refere-se ao conjunto de fatores ambientais de mesma natureza que, diante de atividades ocorrentes ou que venham a se manifestar, poderá sofrer adversidades e afetar de forma vital, total ou parcial, a estabilidade ecológica da região em que ocorre.

Complementarmente, Kang *et al.* (2016), relaciona vulnerabilidade a características do meio físico e biótico (declividade, altitude, temperatura, aridez, vegetação, solo), à exposição a fontes de pressão ambiental (densidade populacional, uso da terra) e à ocorrência de impactos ambientais.

Dessa forma, de acordo com Crepani *et al.* (1996), o mapa de vulnerabilidade ambiental pode constituir uma das principais ferramentas utilizadas pelos órgãos públicos na elaboração do planejamento territorial e ambiental, pois permite avaliar as potencialidades do meio ambiente de forma integrada, compatibilizando suas características naturais com suas restrições.

Sob a mesma perspectiva, para a realização de um mapa de vulnerabilidade, é necessária uma análise conjunta de variáveis, não sendo interessante avaliá-las separadamente. Com isso, diante da facilidade atual de obtenção de dados remotos juntamente com as técnicas de Geoprocessamento e a existência de ambientes SIG (Sistemas de Informação Geográfica) acessíveis e didáticos, a vulnerabilidade ambiental pode ser facilmente avaliada pois é oriunda da combinação de várias informações geográficas, caracterizando um processo de inferência geográfica com análise multicritério (MALCZEWSKI, 2010).

Assim, no contexto de problemas espaciais, esses critérios são combinados em um processo cartográfico denominado de álgebra de mapas, resultando em um mapa síntese. (Longley *et al.* 2013). Junto a isso, o Processo de Hierarquia Analítica (AHP) é um dos métodos de avaliação mais comumente usados, que trabalha com a premissa de que a tomada de decisão de problemas complexos pode ser tratada pela estruturação do

problema complexo em uma hierarquia simples e de compreensível estrutura (Li *et al.*, 2007; Xiong *et al.*, 2007).

Tendo em vista as vantagens do mapa de vulnerabilidade, o Estado do Ceará, mesmo apresentando características predominantemente semiáridas, devido aos fatores geográficos locais como altitude e proximidade do oceano, apresenta enclaves úmidos que condicionam contrastes significativos no seu quadro natural (SILVA, 2004). Como exemplo de uma dessas regiões, a Área de Proteção Ambiental (APA) da Serra de Baturité, devido às suas características geoambientais singulares, vem sendo impactada pelas ações antrópicas eminentes, sendo válido, conseqüentemente, a análise da sua vulnerabilidade ambiental.

Diante do exposto, as Unidades de Conservação de Uso Sustentável, incluindo a categoria APA, têm por objetivo básico proteger a biodiversidade, disciplinar o processo de ocupação e assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais (BRASIL, 2000), o que torna de suma importância a avaliação espacial da área de estudo escolhida, que, através do mapa de vulnerabilidade, é possível a integração das variáveis mais significativas.

2 OBJETIVO

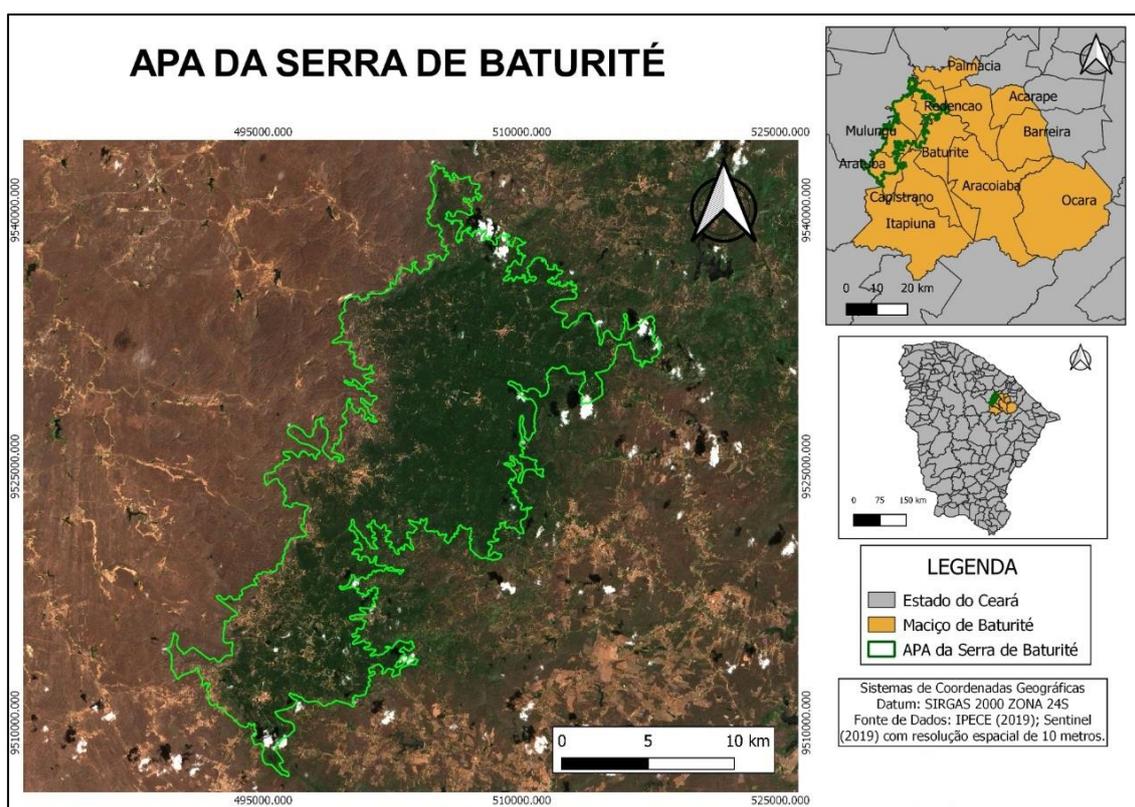
O objetivo central deste trabalho visa utilizar as técnicas de geoprocessamento em um ambiente SIG para desenvolver um mapa de vulnerabilidade ambiental no qual irá indicar quais as áreas mais vulneráveis da APA da Serra de Baturité, enclave úmido do Estado do Ceará, por meio da aplicação do método de álgebra de mapas, com uso do Processo de Hierarquia Analítica (AHP).

3 ÁREA DE ESTUDO

O Maciço de Baturité é um dos enclaves úmidos do Ceará, se destacando pelo diferencial de suas características naturais em relação ao semiárido predominante do estado. Uma boa parte do setor da vegetação mais densa e úmida está inserido dentro da Área de Proteção Ambiental (APA) da Serra de Baturité.

A APA se localiza no setor oeste do maciço (MAPA 1), criada pelo Governo do Estado do Ceará pelo Decreto Estadual nº 20.956 de 18 de setembro de 1990, alterado pelo Decreto N° 27.290, de 15 de dezembro de 2003 (BASTOS, 2012). Sua delimitação foi realizada a partir da curva de nível de 600 (seiscentos) metros, ocupando um espaço territorial em torno dos 32.690ha, englobando as cidades de Aratuba, Mulungu, Pacoti, Guaramiranga, Palmácia, Redenção, Baturité e Capistrano (FREITAS, 2011).

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora, (2020).

Do ponto de vista geológico, A APA da Serra de Baturité é majoritariamente toda composta por rochas do embasamento cristalino do Pré-Cambriano, fazendo parte do setor setentrional da Província da Borborema (ARTHAUD *et al.*, 2008). Esta fazia parte de uma unidade tectônica maior que se estendia dentro do continente africano, sendo formada por terrenos que apresentam características litológicas bem diversificadas (SILVA, 2015).

Dessa forma, a região do maciço se encontra ainda dentro de duas Unidades Geológicas: A Unidade Canindé, na qual pode ser observada no setor setentrional, apresentando rochas metamórficas, com a preponderância de gnaisses; e a Unidade Independência: também com a presença de rochas metamórficas, com destaque para os quartzitos, que são mais resistentes aos processos de intemperismo além da ocorrência de metacalcários, configurando algumas feições cársticas (SILVA, 2015; BASTOS, 2012).

Sobre os aspectos geomorfológicos, o maciço apresenta vertentes escarpadas tanto no flanco leste (encosta úmida, a barlavento), quanto no flanco oeste (encosta seca, a sotavento) (DANTAS *et al.*, 2014), como representa as Figuras 2 e 3.

Figura 2: - Flanco leste da APA da Serra de Baturité, representado pelas vertentes úmidas, no município de Guaramiranga, Ce.



Fonte: Brenda Rocha (2020).

Figura 3: Flanco oeste da APA da Serra de Baturité, caracterizado pelas vertentes secas na região de sotavento, na rodovia que liga o município de Aratuba à Caridade.



Fonte: Brenda Rocha (2020).

No geral, dentre as superfícies elevadas, a APA apresenta relevos convexos arredondados (meias-laranjas) nas áreas de platô (acima de 800 metros) e, associadas a elas, podem apresentar feições aguçadas (cristas). Entre as meias-laranjas, algumas regiões são relativamente planas, configurando as planícies alveolares, que são resultado de depósitos colúvio-aluviais, com baixa declividade. Ademais, devido à resistência estrutural à erosão, possui relevos monoclinais de cornijas de quartzo e pães de açúcar (BASTOS, 2012).

Em relação aos tipos de solos, estes variam conforme as alterações das rochas, da configuração do relevo e do clima, nas quais estão diretamente relacionadas aos diferentes tipos de intemperismo atuantes em cada setor do maciço (BÉTARD, 2007).

De acordo com Bastos (2012), há a predominância de Argissolos Distróficos e Eutróficos, sendo caracterizados como solos profundos e moderadamente drenados, presentes nas vertentes com fortes declividades da APA. Também há a presença de Luvisolos, nos quais igualmente se encontram nas vertentes com fortes declividades, porém são rasos e com alta fertilidade natural.

Os Neossolos Flúvicos situam-se nas planícies alveolares e também nas baixas fluviais do Maciço, sendo caracterizados como profundos e mal drenados. Já os Neossolos

Litólicos se encontram em altas declividades, sendo rasos, pedregosos e suscetíveis à erosão. (BASTOS, 2012).

Sobre as condições meteorológicas nas quais estão associadas diretamente a todos os aspectos naturais do Maciço, apresenta um clima úmido na vertente a barlavento devido às chuvas orográficas (Figura 4), subúmido à sotavento e semiárido nos entornos e, segundo Zanella (2011), essa configuração da pluviosidade na região é influenciada diretamente pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e pelos ventos alísios, sendo o período entre fevereiro e abril o mais chuvoso em toda a região.

Figura 4: Formação de chuvas orográficas na vertente à barlavento da APA da Serra de Baturité.



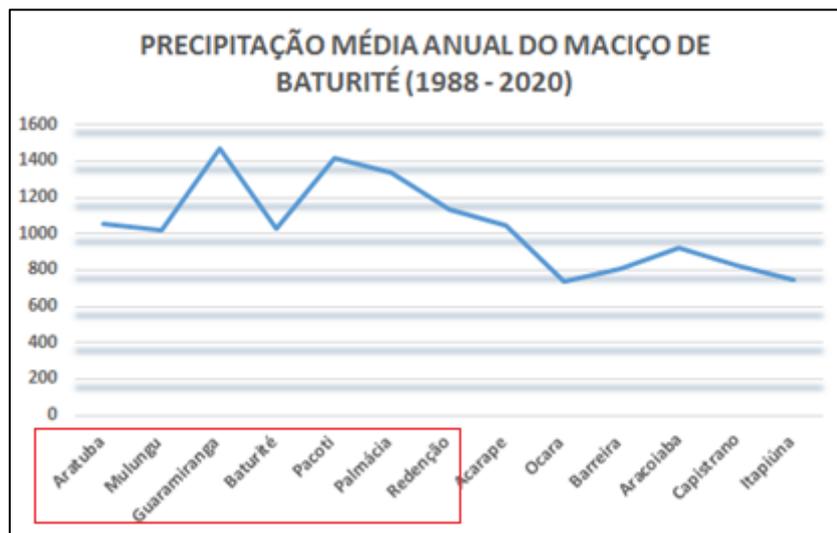
Fonte: Fabio Nunes, 2020.

Segundo Bastos (2012, p. 27),

Alguns setores do Maciço de Baturité apresentam os mais elevados índices pluviométricos do Ceará, justificando uma dinâmica natural diferenciada, com profundos mantos de intemperismo, associados a solos profundos, além da presença de uma cobertura vegetal perenifólia, representada pela mata plúvio-nebular.

De acordo com os dados fornecidos pela Fundação Cearense de Recursos Hídricos (FUNCEME), a precipitação média anual, do período histórico de 1988 - 2020, foi acima de 1000 mm nos municípios localizados nas altitudes mais elevadas tais como Guaramiranga, Pacoti e Mulungu, conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5 - Média pluviométrica anual do período de 1988-2020 do Maciço de Baturité, com destaque para as áreas em vermelho que fazem parte da APA da Serra de Baturité.



Fonte: Elaborado pela autora, com acesso aos dados da FUNCEME (2020).

Neste trabalho, a tipologia da vegetação será baseada na classificação adotada no Zoneamento Ambiental da APA da Serra de Baturité realizado pela Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará (SEMACE). Dessa forma, a APA da Serra de Baturité é dividida em quatro tipologias básicas: floresta úmida - perenifólia (mata úmida), floresta úmida semi-perenifólia (mata úmida), floresta úmidasemicaducifólia (mata seca) e floresta caducifólia (caatinga). As principais características de cada tipologia estão descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Tipologia vegetal da APA da serra de Baturité.

Tipologia	Localização	Uso e ocupação
Floresta úmida perenifólia	Localiza-se na vertente a barlavento e no platô. Pode ser encontrada em altitudes superiores a 800m.	Pouco alterada devido a presença de relevo bastante acidentado, mas com indícios claros de devastação. É ocupado pelo cultivo de bananeiras e café.
Floresta úmida semiperenifólia	Cotas altimétricas que variam entre 600m e 800m.	É utilizada para a plantação de banana, café, milho e feijão.
Floresta úmida semicaducifólia	Vertentes oriental e barlavento, em cotas que variam entre 200m e 600m.	Utilizada pela cultura de subsistência, basicamente arroz, milho e feijão.
Floresta caducifólia	Vertente ocidental (barlavento) em cotas inferiores a 600m	Agricultura de subsistência e extração de madeira.

Fonte: CEARÁ (1992).

Em relação aos processos de uso e ocupação, segundo o Plano Territorial de Desenvolvimento Rural e Sustentável (PTDRS) do Maciço de Baturité, por volta do século XVIII, com as sesmarias se iniciaram o surgimento das primeiras vilas e, no século seguinte, a cidade de Baturité já se destacava no comércio do algodão.

Posteriormente, também nas demais cidades, veio a criação de gado, a plantação de cana-de-açúcar e café, no qual o último foi peça chave para um aumento dos níveis populacionais na região e conseqüentemente responsável pelo aumento da degradação ambiental no maciço (BRASIL, 2010).

Até hoje, nota-se a presença de plantações, principalmente de bananeiras, em áreas bem extensas das encostas do Maciço. Já sendo um aspecto cultural, pode-se observar que a degradação de áreas de vegetação nativa para o cultivo de sequeiros é eminente, tanto na região de barlavento (Figura 6) quanto de sotavento (Figura 7).

Figura 6 - Grande presença de plantações de bananeiras nas vertentes à sotavento (CE 060 que liga os municípios de Aratuba e Canindé).



Fonte: Brenda Rocha (2020).

Figura 7 – Plantações de bananeiras à barlavento (localidade do Rolador - Pacoti).



Fonte: Brenda Rocha, 2020.

Sobre a degradação ambiental, sendo uma região elevada e de clima ameno, a especulação imobiliária com viés turístico tem trazido consequências negativas para a biodiversidade local. Segundo Cunha (2017) “a facilidade de acesso e o crescimento da demanda por segundas residências criaram um efeito prejudicial, ocasionado pelo crescimento populacional e pela especulação imobiliária que provocaram o aumento dos perímetros urbanos nas cidades.” Assim, nota-se que essa expansão urbana é crescente, com destaque para as construções nas encostas íngremes (Figura 8).

Figura 8 – Loteamento e construções nas encostas íngremes na região da APA da Serra de Baturité.

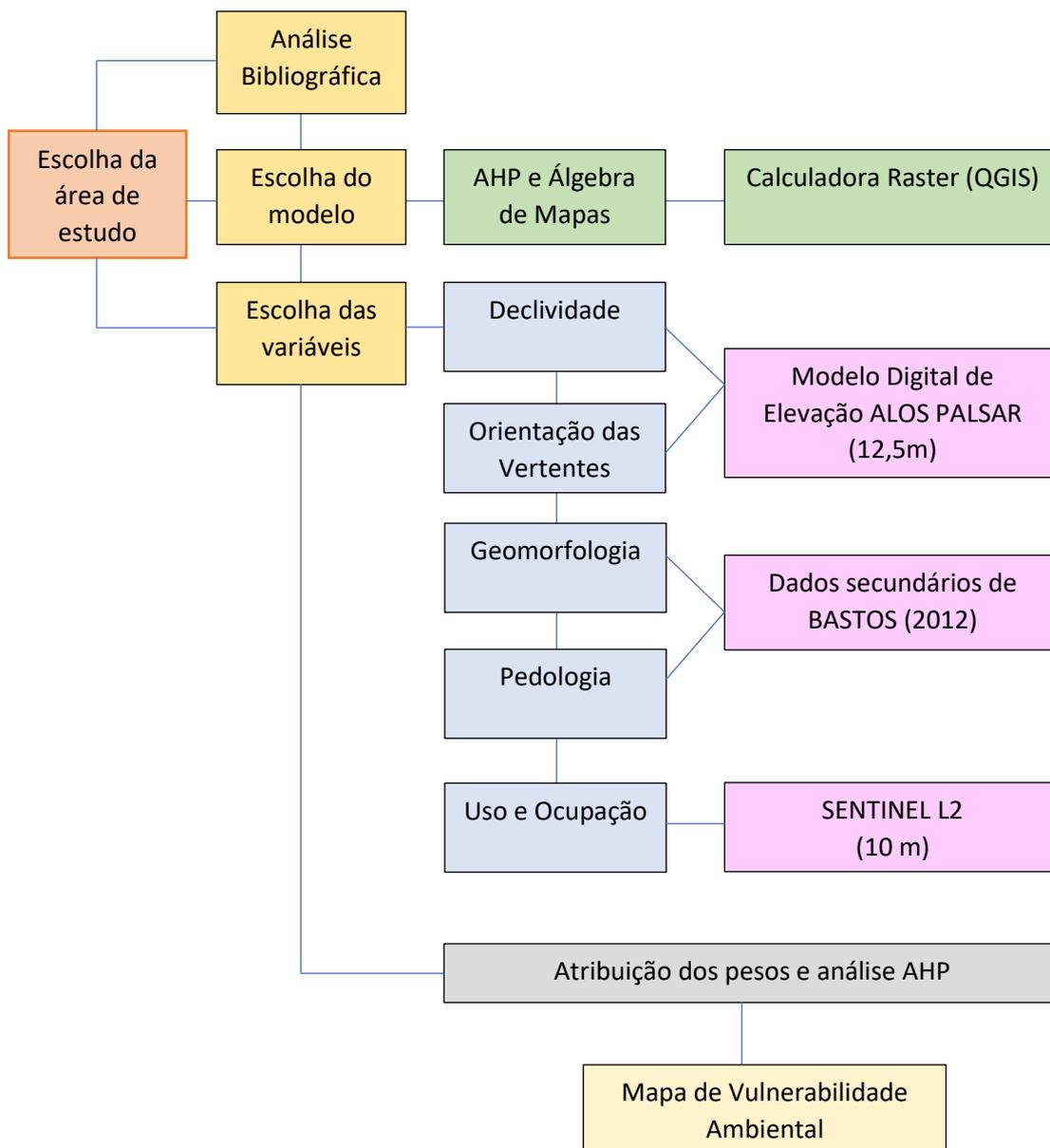


Fonte: Diário do Nordeste (2018).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o alcance do objetivo proposto neste trabalho, serão descritos a seguir as etapas metodológicas para a geração dos resultados, de acordo com os passos descritos no fluxograma a seguir (Figura 9):

Figura 9: Fluxograma das etapas metodológicas do trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.1 Escolha do modelo e do ambiente SIG

Todas as análises espaciais realizadas neste trabalho foram desenvolvidas no software QGIS 3.10, no qual possui diversas ferramentas de geoprocessamento que podem ser integradas a outros dados ambientais, em destaque para a Calculadora Raster. Com isso, os arquivos necessários para a aplicação da álgebra de mapas foram convertidos e padronizados para o Sistema Coordenadas Geográficas Datum Sirgas 2000 zona 24S por ser o sistema oficial do Brasil, definido pelo IBGE.

Sendo assim, tendo em vista a disponibilidade de dados georreferenciados que podem ser manipulados em um ambiente SIG, existem vários modelos nos quais podem fazer estimativas com um bom grau de acurácia e que podem ser aplicados diretamente no planejamento estratégico do local de estudo.

Em relação a análises que necessitam de uma tomada de decisão que envolve a consideração de multicritérios, como no caso da geração de um mapa de vulnerabilidade ambiental, uma etapa crucial é a definição da contribuição relativa de cada critério. Uma das técnicas mais tradicionais para desenvolver a análise multicritério é a proposta por Thomas Saaty, em 1978, denominada de Processo Analítico Hierárquico (AHP - Analytic Hierarchy Process) (Saaty, 1980).

O princípio da AHP é atribuir o peso aos critérios a partir de uma comparação pareada entre esses. Para tanto, Saaty propôs uma escala de 1 a 9, denominada de Escala Fundamental (Tabela 1), sendo o valor 1 atribuído aos critérios de mesma importância relativa, e o valor 9 aos critérios de importância absoluta em relação aos demais (Saaty, 1980).

Diante disso, o conjunto de valores medidos, integrados e calculados são complexamente inter-relacionados e não podem ser considerados como estatisticamente independentes (TRAN 2002).

Tabela 1: Escala Fundamental da AHP

Escala Numérica	Escala Conceitual	Descrição
1	Igual Importância	Duas atividades contribuem igualmente com o objetivo
3	Importância moderada de um sobre o outro	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre a outra
5	Essencial ou forte importância	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre a outra
7	Importância muito forte	Uma atividade é fortemente favorecida e seu domínio é demonstrado na prática
9	Extremamente importante	A evidência favorece uma atividade sobre a outra é da mais alta ordem possível de afirmação
2,4,6,8	Valores intermediário entre dois julgamentos adjacentes	Quando o compromisso é necessário

Fonte: Adaptado de Saaty (1991)

Especificamente, através de critérios pré-selecionados, utiliza-se uma matriz quadrada, na qual realiza uma análise aos pares, culminando em um peso para cada critério, formando uma matriz de comparação paritária (Tabela 2). Posteriormente, os dados são normalizados, onde o valor de importância determinado para cada par é dividido pela somatória dos valores de cada coluna (BISPO, 2018).

Tabela 2 - Matriz quadrada de correlação par a par

Critérios	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	$C_{21}=1/C_{12}$	$C_{31}=1/C_{13}$	$C_{41}=1/C_{14}$	$C_{51}=1/C_{15}$
C2	C12	1	$C_{32}=1/C_{23}$	$C_{42}=1/C_{24}$	$C_{52}=1/C_{25}$
C3	C13	C23	1	$C_{43}=1/C_{34}$	$C_{53}=1/C_{35}$
C4	C14	C24	C34	1	$C_{54}=1/C_{45}$
C5	C15	C25	C35	C45	1

Fonte: Adaptado de Bispo (2018) para Saaty (2008).

Saaty (1991) afirma que a matriz desenvolvida deve apresentar um grau de inconsistência ou margem de erro máxima de (0,10) e, caso ultrapasse esse limite, haverá a necessidade de aprimoramentos com a operação real dos julgamentos. Este valor é encontrado através do cálculo da Razão de Consistência (RC), descrito na Equação 1:

$$RC = \frac{IC (\text{Índice de Consistência})}{IR (\text{Índice Randômico})}$$

(Equação 1)

O Cálculo do Índice de Consistência (IC), avalia o grau de inconsistência da matriz de julgamentos paritários, conforme a Equação 2:

$$IC = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)}$$

(Equação 2)

onde $\lambda_{\max} = 1/n \sum_{i=1}^n [Aw]/w_i$ e n = número de ordem da matriz; λ_{\max} = autovetor; W_i = pesos calculados; Aw = Produto entre W_i com a matriz de correlação pareada.

A tolerabilidade da inconsistência desta matriz é determinada pelo Índice Randômico (IR), que é fornecido por uma tabela de valores (Tabela 3) e é função da dimensão da matriz de comparação.

Tabela 3 - Valores de IR em função da ordem da matriz quadrada

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0	0	0,53	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49	1,52	1,54	1,56	1,58	1,59

Fonte: Saaty, 2008.

Obtendo-se os valores de IC e do IR, o valor de RC é encontrado. A RC mede a coerência e a consistência das relações de importância consideradas na análise e, caso ela seja superior a 0.10, há incoerências nos pesos atribuídos. Portanto, quanto mais próxima de "0" for a razão de consistência, mais consistente será o modelo (Carvalho, Riedel, 2005; Saaty 1991, 2008; Torres, 2014 *apud* BISPO, 2018).

4.2 Escolha das variáveis, fonte de dados e estruturação do método AHP

Neste estudo, para a modelagem da vulnerabilidade ambiental, foram utilizados os seguintes critérios: Declividade, Orientação das Vertentes, Geomorfologia, Pedologia e Uso e Ocupação. A Tabela 4 contém a descrição dos processos de obtenção dos dados e na Tabela 5 é apresentada a matriz de comparação pareada e pesos dos fatores utilizados pelo método AHP.

Tabela 4: Variáveis escolhidas e fontes de dados

Variáveis Escolhidas	Fonte de Dados
Declividade	Manipulação do MDE ALOS PALSAR, com 12,5 metros de resolução espacial, com divisão das classes de declividade de acordo com a EMBRAPA (1999)
Orientação das Vertentes	
Geomorfologia	Arquivos shapes disponibilizado por Bastos (2012), na escala de 1:250.000
Pedologia	
Uso e Ocupação	Classificação Supervisionada da imagem Sentinel L2, de 2020, com 10 metros de resolução espacial.

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 5: Matriz de comparação pareada

Critério	Geomorfológico	Pedológico	Uso e ocupação	Declividade	Orientação das Vertentes
Geomorfológico	1	0,5	0,14	0,33	3
Pedológico	2	1	0,14	0,33	3
Uso e ocupação	7	7	1	5	7
Declividade	3	3	0,2	1	5
Orientação das Vertentes	0,33	0,33	0,14	0,2	1
RC	0,068898				

Fonte: Elaborado pela autora.

É importante destacar que antes da aplicação dos pesos das variáveis na matriz AHP, todas as classes de cada variável receberam notas ponderadas, de modo a serem diferenciadas as classes que possuem maior relevância em relação às outras de uma mesma variável.

Como apresentado na sessão 3 deste trabalho, de acordo com as características naturais da APA da Serra de Baturité e as pressões antrópicas eminentes, nas tabelas 6, 7 e 8 são indicadas as notas atribuídas para cada classe, variando de 1 a 5. Posteriormente, na tabela 9, são apresentados os pesos resultados da matriz AHP para cada variável, juntamente com o valor de RC. Em seguida, na Figura 10, são representados os mapas desenvolvidos dos cinco critérios escolhidos.

Tabela 6: Notas atribuídas a cada classe das variáveis Pedologia e Geomorfologia

Pedologia	Notas	Geomorfologia	Notas
Argissolo Distrófico	4	Cristas	2
Argissolo Eutrófico	3	Domos Rochosos	3
Neossolo Litólico	4	Meias Laranjas	5
Neossolo Flúvico	5	Planície Alveolar	4
		Vertente Dissecada Seca	5
		Vertente Dissecada Úmida	4

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 7: Notas atribuídas a cada classe das variáveis Declividade e Orientação das Vertentes

Declividade	Notas	Orientação das Vertentes	Notas
Plana (0-3%)	1	Nordeste (NE)	5
Suave Ondulado (3-8%)	2	Sudeste (SE)	5
Ondulado (8-20%)	3	Sudoeste (SW)	3
Forte Ondulado (20-45%)	5	Noroeste (NW)	3
Montanhoso (45-75%)	5		
Escarpado (>75%)	5		

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 8: Notas atribuídas a cada classe da variável Uso e Ocupação

Uso e Ocupação	Notas
Corpos D'água	4
Área Urbana	1
Floresta Subperenifólia	4
Floresta Perenifólia	3
Floresta Caducifólia	4
Área Degradada	5

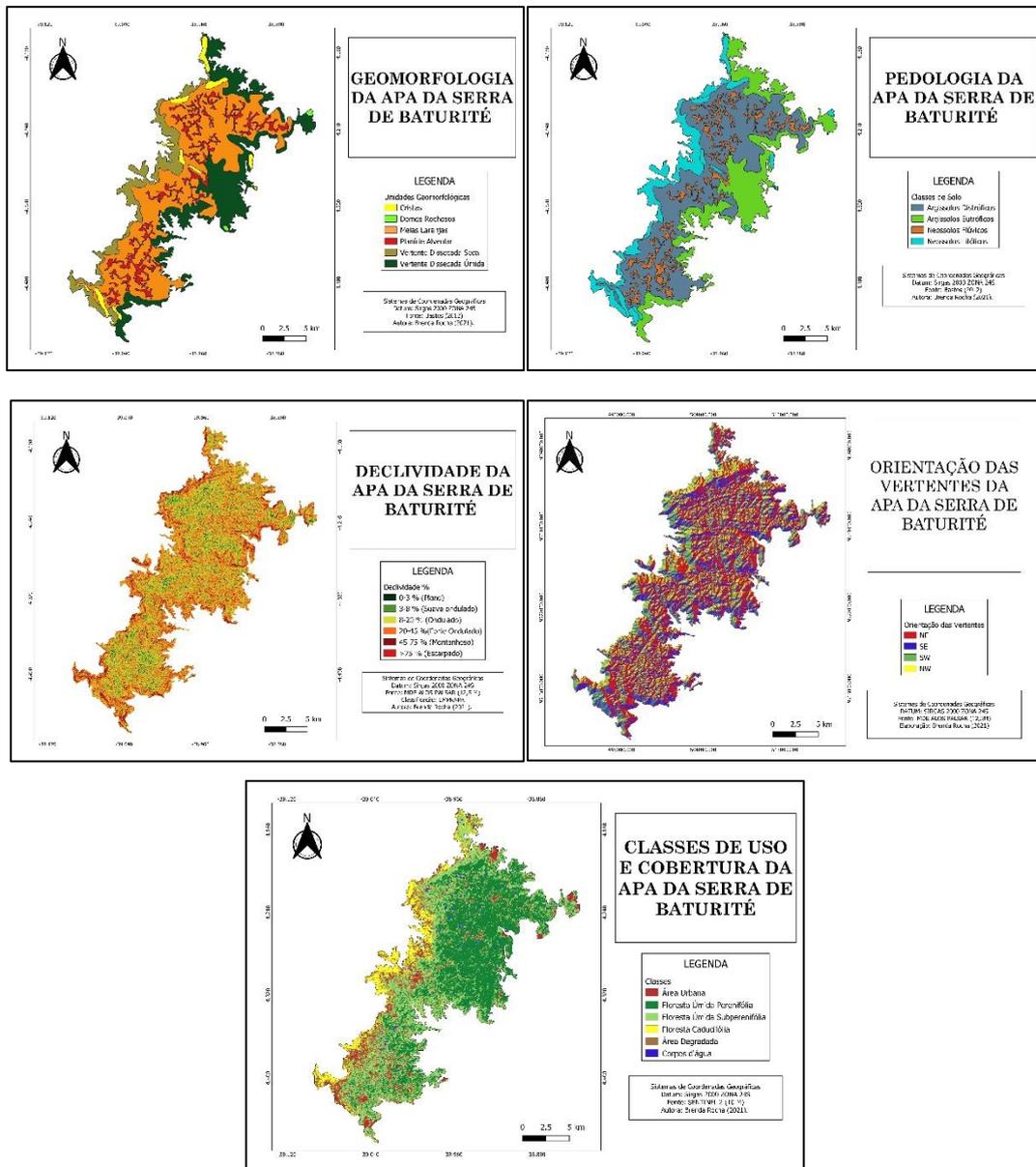
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 9: Pesos resultantes da matriz AHP para cada variável, com o valor de RC.

Critério	Pesos	RC
Geomorfológico	0,104909858	0,068808
Pedológico	0,104909858	
Uso e ocupação	0,517836594	
Declividade	0,233985424	
Orientação das Vertentes	0,038358266	

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 10: Mapas das variáveis escolhidas para a análise da vulnerabilidade ambiental da APA da Serra de Baturité.

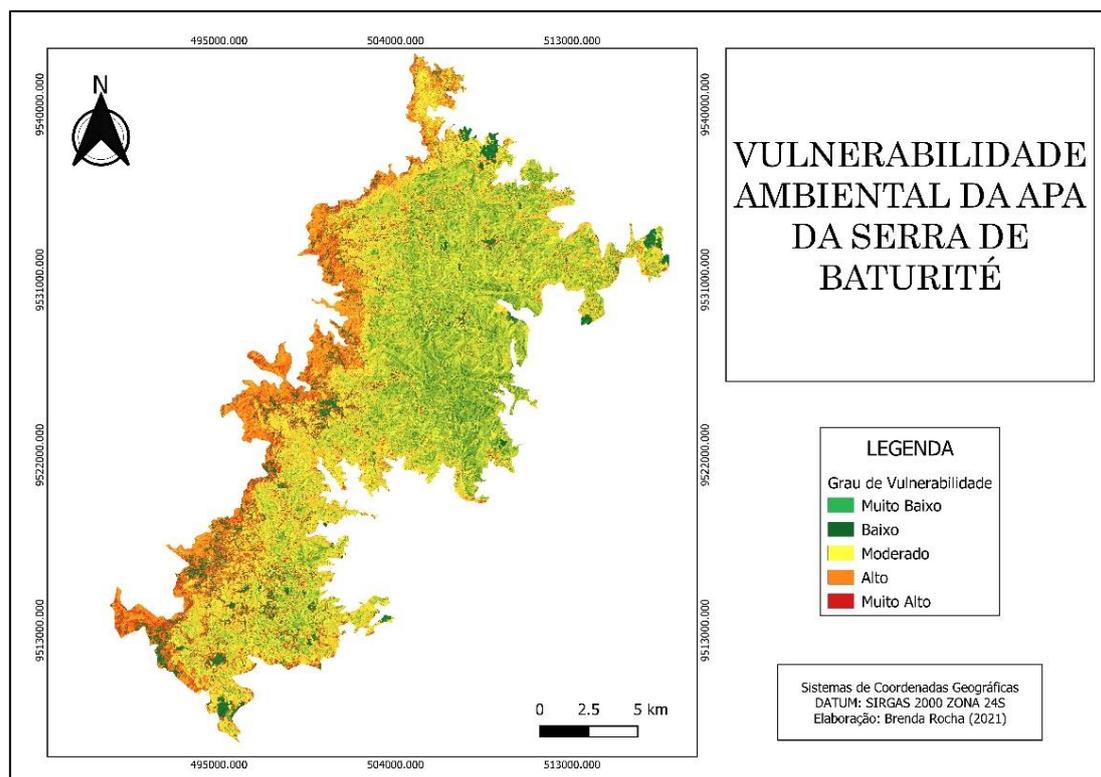


Fonte: Elaborado pela autora, com uso de dados secundários.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme a análise aprofundada da área de estudo, considerando suas características geomorfológicas, pedológicas, uso e ocupação, além da sua declividade e disposição frente aos agentes atmosféricos, o mapa de vulnerabilidade ambiental foi desenvolvido (Figura 11).

Figura 11: Mapa da Vulnerabilidade Ambiental da APA da Serra de Baturité.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tendo em vista a amostragem do produto final, pôde-se observar no mapa que as áreas classificadas com grau de vulnerabilidade “Muito Alto” e “Alto” foram aquelas onde a declividade é acentuada, com predominância do relevo montanhoso (45-75%), localizadas em maior parte na vertente dissecada seca e caracterizadas pedologicamente por neossolos litólicos e argissolos distróficos.

Nessa região, segundo Freitas Filho (2011), em virtude de sua intensa utilização, tanto em relação ao extrativismo vegetal como por atividades agrícolas (Figura 12 e 13), observa-se que a cobertura vegetal situada nesta unidade de paisagem encontra-se predominantemente degradada.

Complementarmente, nessa área, a adoção da cultura de sequeiro, especialmente plantação de milho e feijão, com as técnicas adotadas, de modo geral, que são bem precárias e ocasionam elevados índices de erosão levando à redução da qualidade do solo, mediante perda dos horizontes, contribuem para manter o ciclo de destruição e pobreza (BASTOS, 2012; SILVA, 2015).

Figura 12 - Ambiente da Floresta Caducifólia amplamente descaracterizado por atividades agrícolas, na vertente dissecada seca do município de Mulungu-CE.



Fonte: Freitas Filho (2011).

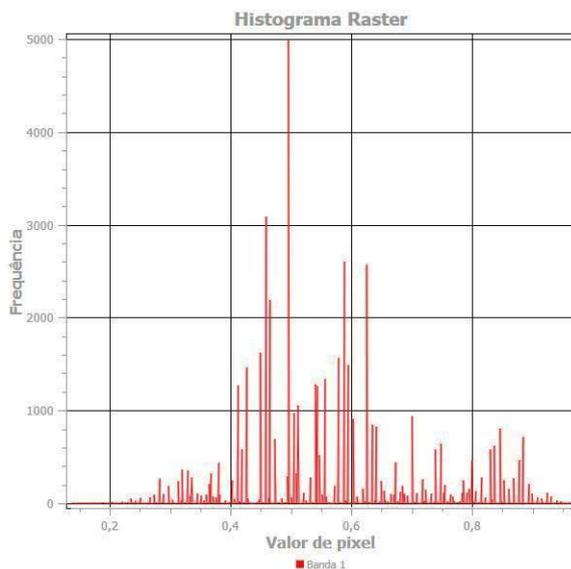
Figura 13: Área de Floresta Caducifólia fortemente degradada na vertente dissecada seca no município de Pacoti-CE.



Fonte: Silva (2015).

As áreas classificadas como “Moderadas” apresentaram uma maior extensão territorial no geral, como indicado no histograma das classes geradas pelo mapa de vulnerabilidade (Figura 14), porém mais no sentido oeste da APA.

Figura 14: Histograma raster gerado a partir do mapa de vulnerabilidade, onde os valores de pixel variam de 0 a 1, apresentando maior frequência no intervalo classificado como “Moderado”.



Fonte: Elaborado pelo autor, através do software QGIS.

Esse resultado é alarmante pelo fato de ser uma unidade de conservação de uso sustentável e, somado as características naturais de declividade, pedológicas e unidades fitoecológicas, às pressões antrópicas relacionadas as queimadas, a contínua frequência de áreas agrícolas e principalmente o desmatamento para a construção de condomínios (Figura 15) contribuem diretamente para essa vulnerabilidade.

Figura 15: Unidade multifamiliar em construção sobre um relevo de meia laranja no município de Guaramiranga-CE.



Fonte: Bastos (2008).

Segundo Bastos (2012), os locais de preferência dos empreendedores para a construção de residências na APA são áreas elevadas ou situadas em encostas íngremes, como mostra a figura 16, em meio as unidades fitoecológicas de vegetação úmida.

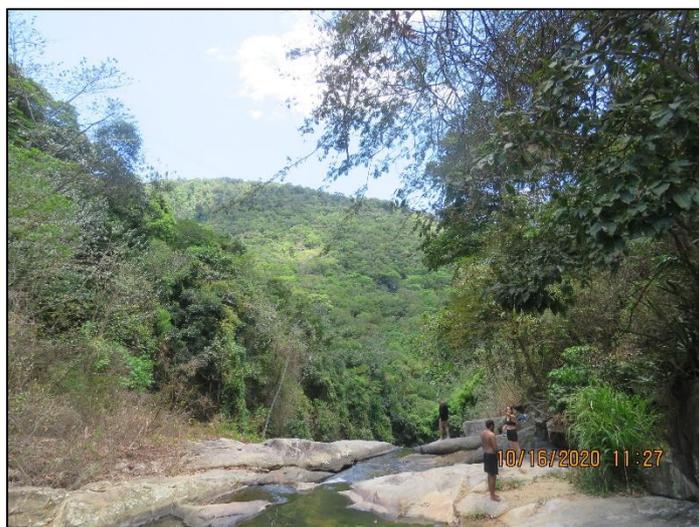
Figura 16: Unidade multifamiliar com significativos cortes das vertentes.



Fonte: Bastos (2012).

Já nas áreas classificadas como “Baixa” e “Muito Baixa” foram localizadas mais expressivamente na vertente dissecada úmida (Figura 17).

Figura 17: Cachoeira São Pedro e São Paulo no município de Guaramiranga. A mesma se encontra na região de barlavento do Maciço de Baturité, onde se destaca a presença da mata úmida.



Fonte: Brenda Rocha (2020).

É importante destacar que, com a implantação da Área de Proteção Ambiental em 1990, segundo Freitas Filho (2011), verificou-se uma importante regeneração da Floresta Ombrófila Aberta (mata úmida), passando de 41,00% da área total mapeada em 1958, para 46,17% do total mapeado em 1988, e, finalmente, para 59,42% em 2004 (Tabela 9), mesmo com dados crescentes de expansão urbana, como indica a Figura 14.

Tabela 10: Dados gerais das classes mapeadas na APA da Serra de Baturité nos anos de 1958, 1988 e 2004.

Classes mapeadas	1958		1988		2004	
	Área (ha)	% em relação a área total	Área (ha)	% em relação a área total	Área (ha)	% em relação a área total
Floresta Ombrófila Aberta	13.403	41,00	15.089	46,17	19.425	59,42
Floresta Estacional Semidecidual	762,06	2,33	910,66	2,79	2547,77	7,79
Áreas agrícolas	18.451	56,45	16.560	50,64	10.498	32,13
Água	7,73	0,02	19,28	0,06	52,98	0,16
Povoado	7,04	0,02	11,61	0,03	40,22	0,12
Sede municipal	58,05	0,18	99,33	0,31	124,48	0,38
Total	32.690,0	100,00	32.690,0	100,00	32.690,0	100,00

Fonte: Freitas Filho (2011).

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos na pesquisa foram satisfatórios pois a álgebra de mapas, associada ao AHP, se mostrou uma ótima metodologia para a análise integrada da APA da Serra de Baturité, sendo possível um estudo integrado da região.

Ademais, a escolha das variáveis englobou as principais características da APA que podem ser associadas à vulnerabilidade ambiental, porém o modelo pode se tornar ainda mais robusto com a adição de outras variáveis, o que faz necessário um conhecimento aprofundado da área de estudo.

Portanto, os mapas de vulnerabilidade ambiental podem ser aplicados em prol de um planejamento mais minucioso da paisagem, adquirindo uma maior importância na efetivação de planos diretores municipais, em que se estabeleçam critérios e limites de formas de uso e ocupação do solo em uma escala mais detalhada.

Dessa forma, para a validação dos resultados do produto desenvolvido, é necessário a obtenção de dados de campo.

REFERÊNCIAS

ARTHAUD, M.H. et al. Geology of the northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa. In: PANKHURST, R.J., TROUW, R.A.J., BRITO NEVES, B.B., De WIT, M.J. (eds), West Gondwana Pre-Cenozoic correlations across the South Atlantic region. **Geological Society**, London, Special Publications, 294, 49-67, 2008.

BASTOS, F.H. **Movimentos de massa no maciço de Baturité (CE) e contribuições para estratégias de planejamento ambiental**. 2012. 257 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2012.

BÉTARD F.; PEULVAST J-P; CLAUDINO-SALES, V. Caracterização morfoopedológica de uma serra úmida no Semi-árido do Nordeste brasileiro: o caso do maciço de Baturité-CE. **Mercator**, 2007, 12: 107-125

BISPO, Carlos de Oliveira. **Suscetibilidade natural e induzida à ocorrência de escorregamentos no litoral norte de Maceió, Alagoas**. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Agrário. **Plano Territorial de Desenvolvimento Rural Sustentável: Território Cidadania Maciço do Baturité** – MDA/SDT/CONSAD Fortaleza: Instituto Agropolos do Ceará, 2010.

CUNHA, M. A. R. **A rota verde do café como estratégia de desenvolvimento integrado do turismo sustentável no Maciço de Baturité**. 2017. 149 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão de Negócios Turísticos) - Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2017.

DE MORAIS, Marly Silva et al. Análise da vulnerabilidade ambiental em áreas protegidas: o caso da APA do Maracanã–São Luís/MA. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 1115-1126, 2017.

KANG H, XUXIANG L, WANG J, ZHANG J. Evaluating Ecological Vulnerability Using the GIS and Analytic Hierarchy Process (AHP) Method in Yan'an, China. **Polish Journal of Environmental Studies**. 2016; 25(2): p. 599-605.
doi:10.15244/pjoes/61312

LI, Lu et al. A fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to eco-environmental vulnerability assessment for the Danjiangkou reservoir area, China. **Ecological Modelling**, v. 220, n. 23, p. 3439-3447, 2009.

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. São Paulo: Mcgraw-hill, Makron, 1991. Tradução e Revisão Técnica Wainer da Silveira e Silva.

SILVA, J. B.; CAVALCANTE, T. C. **Atlas escolar, Ceará: espaço geo-histórico e cultural**. João Pessoa: Editora Grafset, 2004, 200p.

SILVA, F. E. S. **A conservação da biodiversidade da Serra de Baturité na perspectiva das unidades de conservação**. 2015. 221 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2015.

Xiong, Y., Zeng, G.M., Chen, G.Q., Tang, L., Wang, K.L., Huang, D.Y., 2007. Combining AHP with GIS in synthetic evaluation of eco-environment quality—A case study of Hunan Province, China. **Ecol. Model** 209, 97–109.

ZANELLA, M. E., SALES, M. C. L. Considerações sobre o clima e a hidrografia do maciço de Baturité. In: BASTOS, F. H. (org) Serra de Baturité: Uma visão integrada das questões ambientais. **Expressão gráfica e editora**. Fortaleza, 2011.