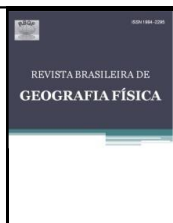




ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Determinação da Vulnerabilidade Ambiental em Pavimentos Rodoviários: Estudo de Caso da BR-230 no Estado da Paraíba

Alan Barbosa Cavalcanti¹, Madson Tavares Silva², João Hugo Baracuy da Cunha Campos³, John Kennedy Guedes Rodrigues⁴

¹Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande- PB, profalancavalcanti@gmail.com;

²Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande- PB, madson.tavares@professor.ufcg.edu.br;

³Professor da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, Araruna- PB, jhugocampos@yahoo.com.br;

⁴Professor da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande- PB, profkennedy@hotmail.com.

Artigo recebido em 05/08/2022 e aceito em 05/09/2022

RESUMO

De acordo com o Boletim Estatístico da 23ª edição da Pesquisa CNT de Rodovias (2019), 59% das rodovias brasileiras apresentam algum tipo de problema quanto ao seu estado geral. O processo de degradação dos pavimentos provém de fatores como tráfego, condições climáticas, processos construtivos, drenagem, estrutura, materiais, manutenção adotada, entre outros. Dessa forma, com base no conceito de Ecodinâmica, é importante entender que os fatores de deterioração dos pavimentos podem, também, sofrer grande influência do meio que se encontra. Portanto, esse trabalho busca quantificar a vulnerabilidade de pavimentos rodoviários flexíveis na rodovia BR-230, trecho Campina Grande/PB-João Pessoa/PB, bem como identificar regiões com maior vulnerabilidade de redução do tempo de vida útil do pavimento e elaborar um Índice de Vulnerabilidade de Pavimentos (IVP) a partir da técnica que sintetiza a soma das variáveis utilizando a álgebra de mapas, onde foi aplicada a sobreposição das seguintes classes: Geomorfologia, Cobertura, Drenagem, Geologia, Modelo Digital de Elevação, Precipitação, Declividade, Solos e Textura. Ao verificar as combinações de classificação do IVP, a região estudada apresentou mais de 50% de áreas com algum nível de estabilidade e pouco mais de 48% com um certo risco de vulnerabilidade. Foi possível perceber que a construção de mapas é uma ferramenta de grande importância na orientação inicial do estudo de vulnerabilidade voltado para a degradação de pavimentos e que o índice é um significativo instrumento com o poder de ajudar os órgãos responsáveis no gerenciamento de projetos de pavimentação mais eficazes quanto às condições climáticas e às ações antrópicas.

Palavras-chave: Pavimento; Degradação; Vulnerabilidade; Índice; Álgebra de mapas.

Determination of Environmental Vulnerability in Road Pavements: Case Study of the BR-230 in the State of Paraíba

ABSTRACT

According to the Statistical Bulletin of the 23rd edition of the CNT Highway Survey (2019), 59% of Brazilian highways have some type of problem regarding their general condition. The pavement degradation process comes from factors such as traffic, weather conditions, construction processes, drainage, structure, materials, adopted maintenance, among others. Thus, based on the concept of Ecodynamics, it is important to understand that pavement deterioration factors can also be greatly influenced by the environment. Therefore, this work seeks to quantify the vulnerability of flexible road pavements on the BR-230 highway, Campina Grande/PB-João Pessoa/PB, as well as to identify regions with greater vulnerability to reducing the useful life of the pavement and to elaborate an Index of Pavement Vulnerability (VPI) from the technique that synthesizes the sum of variables using map algebra, where the superposition of the following classes was applied: Geomorphology, Coverage, Drainage, Geology, Digital Elevation Model, Precipitation, Declivity, Soils and Texture. When verifying the combinations of IVP classification, the studied region presented more than 50% of areas with some level of stability and just over 48% with a certain risk of vulnerability. It was possible to perceive that the construction of maps is a tool of great importance in the initial orientation of the vulnerability study aimed at the degradation of pavements and that the index is a significant instrument with the power to help the responsible bodies in the management of more intensive paving projects. effective in terms of climatic conditions and human actions.

Keywords: Pavement; Degradation; Vulnerability; Index; Map algebra.

Introdução

Atualmente o Brasil tem o modal rodoviário como seu principal meio de transporte, de acordo com o Boletim Estatístico da 23ª Pesquisa da Confederação Nacional do Transporte de Rodovias (CNT/2019), o modal rodoviário concentra, aproximadamente, 61% da movimentação de mercadorias e 95% do fluxo de passageiros, dessa forma pode-se evidenciar a importância da infraestrutura rodoviária para o desenvolvimento econômico do país e para a garantia de direitos fundamentais dos seus cidadãos. Em 2019, um total de 108.863 km de rodovias foram avaliados pela CNT em todo o país, desse total, 64.198 km (59,0%) apresentaram algum tipo de problema no Estado Geral, ou seja, numa análise conjunta das características do pavimento da sinalização e da geometria da via, sendo classificados 6,9% (7.531 km) em estado péssimo, 17,5% (19.039 km) ruim, 34,6% (37.628 km) regular, 29,1% (31.714 km) bom e apenas 11,9% (12.951 km) em estado ótimo. Segundo a pesquisa, na avaliação de 141 países, o Brasil encontra-se na 93ª posição, atrás de países da América do Sul, como Chile (16ª), Argentina (47ª), Uruguai (54ª) e Equador (63ª).

A modelagem do processo evolutivo da degradação oferecida por estruturas de pavimentos exige o entendimento claro de como os principais mecanismos de deterioração se originam e se desenvolvem sob a ação das cargas do tráfego e das variações climáticas, tais como: deflexões, tensões, deformações, tensões térmicas, teor de umidade e temperatura (Gonçalves, 2002). Segundo o autor, tal entendimento é dificultado devido à complexidade presente na estimativa do comportamento futuro da estrutura de pavimento, pois este depende de uma série de fatores, tais como tráfego, condições climáticas, processos construtivos, condições de drenagem, tipo de estrutura, materiais de construção e política de manutenção adotada. As condições climáticas contribuem para a antecipação da deterioração do pavimento tendo em vista que a água da chuva pode provocar queda da capacidade de suporte e a temperatura pode afetar o comportamento do revestimento provocando envelhecimento precoce. O efeito são danos estruturais e superficiais ocasionados a partir da associação com as cargas do tráfego, como trincas de superfície que facilitam ainda mais a entrada de água e contribuem para o declínio da medida de serventia (Bernucci et al., 2022).

Dentro desse contexto é importante entender que os fatores de deterioração dos pavimentos podem, também, sofrer grande influência do meio que se encontra. Essa relação é

possível de ser explicada através do conceito de ecodinâmica proposto por Tricart (1977). Para o autor, o conceito de ecodinâmica indica um modelo de avaliação integrado das unidades territoriais, com base no balanço pedogênese/morfogênese, propiciando sua classificação quanto aos graus de instabilidade. O conceito assume que as trocas de energia e matéria na natureza se processam em relações de equilíbrio dinâmico. Assim, as áreas em que prevalecem os processos morfogenéticos são entendidas como instáveis, enquanto aquelas nas quais predomina a pedogênese são consideradas estáveis, sob a perspectiva da ecodinâmica; já quando há equilíbrio entre os dois processos, a área é considerada de estabilidade intermediária. As Unidades Ecodinâmicas foram classificadas por Tricart (1977) em três categorias: meios estáveis, meios intergrades e meios fortemente instáveis, propondo a representação dessas unidades da paisagem com a Carta Ecodinâmica (apud Silveira; Fiori; Oka-Fiori, 2005).

A vulnerabilidade é o grau em que um sistema é suscetível e incapaz de lidar com os efeitos adversos da mudança do clima, inclusive variabilidade climática e os extremos. A vulnerabilidade é uma função do caráter, magnitude e taxa de mudança do clima e da variação que um sistema está exposto, sua sensibilidade e sua capacidade de adaptação. Além da mudança do clima, os principais fatores que contribuem para o aumento da vulnerabilidade são: a pressão demográfica, crescimento urbano desordenado, a pobreza e a migração rural, baixo investimento em infraestrutura e serviços, e os problemas relacionados à governança, com a coordenação intersetorial (PBMC, 2013). Mendonça et al. (2022), com base em fatores ambientais que por sua vez determinam a vulnerabilidade natural do terreno, realizaram uma análise de decisão multicritério espacial que permitiu a projeção dos cenários capaz de criar um consenso para as perspectivas de conservação florestal e adequação agrícola.

A evolução dos sistemas de informações geográficas (SIG) facilitaram a seleção e cruzamento de diferentes variáveis consideradas relevantes na análise ambiental, permitindo maior agilidade na integração de dados e na geração de resultados (Filho et al., 2018). Os critérios para atribuição da vulnerabilidade para os temas: Geologia, Geomorfologia, Solos, Precipitação e Vegetação, foram determinados por Crepani et al. (2001), segundo o qual, para se analisar a vulnerabilidade ambiental de uma unidade de paisagem é necessário conhecer sua gênese, constituição física, forma e estágio de evolução,

bem como o tipo de cobertura vegetal constituinte. Berre et al. (2022), baseados na geração de um conjunto de 62 indicadores combinados em diferentes tipos de índices mapeados por uma interface web-GIS desenvolvida para esse sistema de vulnerabilidade, analisaram a região da Bretanha, localizada no noroeste da França, com o intuito de contribuir para o pensamento estratégico sobre vulnerabilidade sistêmica dos territórios costeiros à erosão e inundações marinhas.

Portanto esse trabalho busca quantificar a vulnerabilidade de pavimentos rodoviários flexíveis na rodovia BR-230 (Trecho Campina Grande/PB-João Pessoa/PB), bem como identificar regiões com maior vulnerabilidade de redução da vida útil do pavimento e elaborar um índice de vulnerabilidade de pavimentos a partir de técnicas

de álgebra de mapas sem uso de técnicas tradicionais de avaliações funcionais e estruturais do pavimento.

Material e métodos

Área de estudo

A área de estudo (Figura 1) compreende as microrregiões do estado da Paraíba que estão inseridas no entorno do trecho entre as cidades de Campina Grande/PB e João Pessoa/PB da rodovia federal transversal BR-230, também conhecida como Rodovia Transamazônica. A área total estudada é de 6.137,43 km² e o trecho da BR-230 analisado tem uma extensão de 112 km.

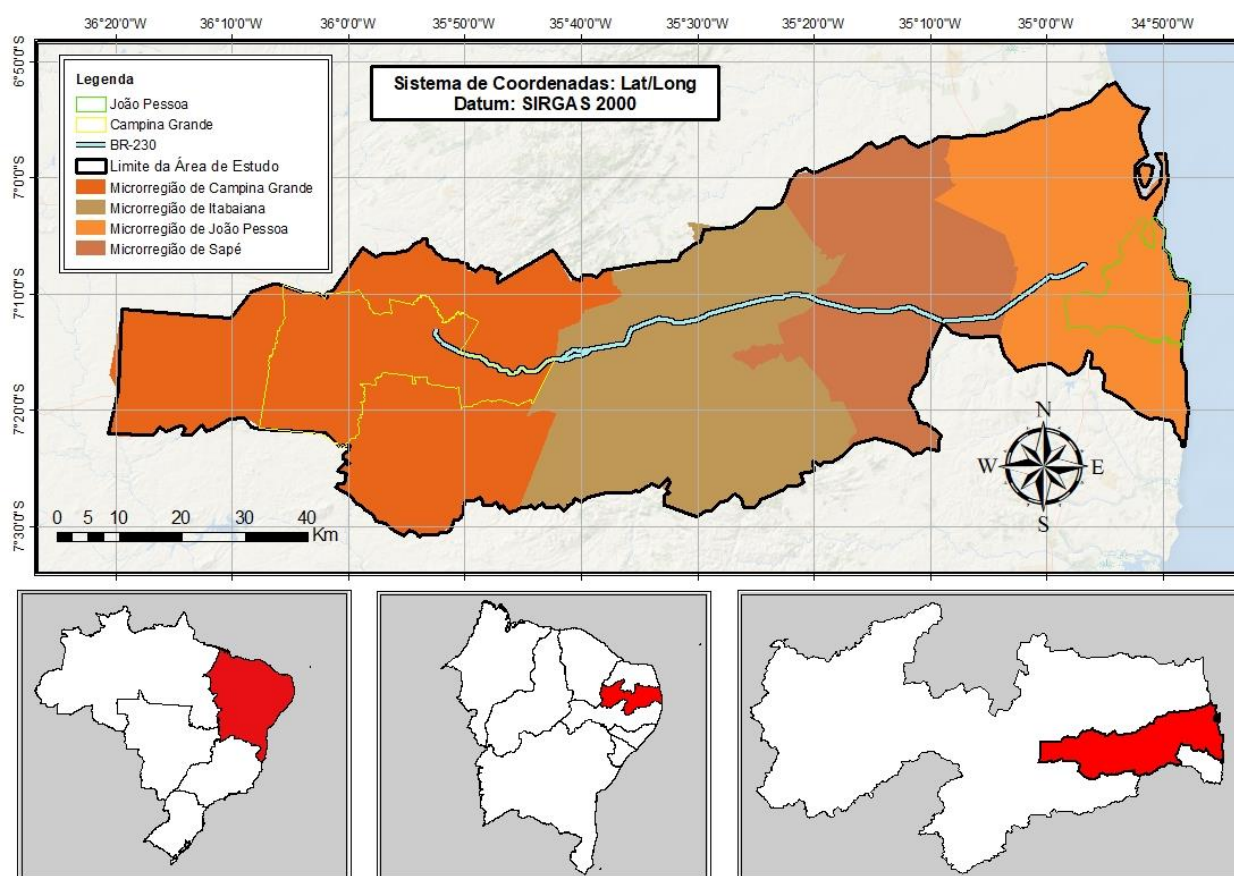


Figura 1. Localização da área de estudo. Fonte: Adaptado IBGE (2020).

As microrregiões de Campina Grande e Itabaiana fazem parte da mesorregião do Agreste Paraibano, porção oriental do Estado. De acordo com a classificação Köppen, grande parte destas áreas apresentam-se como As', clima tropical quente e úmido, com ocorrência das maiores precipitações outono-inverno nos meses de abril a julho (Peel et al., 2007). De acordo com Pereira et al. (2001), por estar inserida na região semiárida, engloba áreas que pela umidade assemelham-se às

do litoral e outras secas como as associadas ao Sertão. As temperaturas médias variam entre mínimas de 17 a 20 °C e máximas de 22 a 26 °C. A umidade relativa do ar situa-se em torno de 79%. As precipitações pluviiais médias anuais das áreas variam entre 700 e 1600 mm (Silva et al., 2015). As microrregiões de Sapé e João Pessoa fazem parte da mesorregião da Mata Paraibana onde as precipitações médias anuais situam-se na faixa de 1600 a 2.200 mm/ano, cujo período chuvoso inicia-

se de fevereiro a março e prolonga-se até agosto. O período de estiagem é de 5 a 6 meses, a temperatura média anual está entre 22° C e 30° C e a umidade relativa do ar média é de 70% (Resumo executivo – 2010-2020).

A mesorregião do Agreste Paraibano, segundo Teotia (2011), apresenta geologia proveniente do terciário, com formação geológica proveniente da era pré-cambriana e caracteriza-se pela presença de gnaisses e migmatitos. Na porção oriental da área de estudo, pertencente a mata Paraibana, é predominante o Cenozóico que está representado por sedimentos do Grupo Barreiras, depósitos colúvio-eluviais, depósitos litorâneos praias, depósitos eólicos litorâneos vegetados, depósitos de mangue e depósitos aluvionares (Programa Geologia do Brasil, 2014).

O agreste compreende a zona de transição, situada entre o litoral úmido e o sertão semiárido. Abrange áreas planas e superfícies elevadas da porção oriental do planalto da Borborema, onde se vê a transição entre os brejos úmidos e o sertão das caatingas (PNUD/FAO/IBAMA, 1994). Os compartimentos geomorfológicos que se apresentam no município de João Pessoa são basicamente: os Baixos Planaltos Costeiros, e as planícies fluviais e marinhas. Os Baixos Planaltos Costeiros são superfícies de idade terciárias, que acompanham todo o litoral do Nordeste do Brasil, em extensão estimada de 8,42 milhões de hectares. Eles estão esculpidos em grande parte sobre os sedimentos mal consolidados da Formação Barreiras, apresentando como características uma topografia plana a suavemente ondulada, material sedimentar e de baixa altitude, com declividade média inferior a 10% (Barbosa, 2021).

De acordo com Francisco et al. (2015), os solos do tipo Luvisolos Crômicos Planossólicos com relevo suave ondulado e ondulado, associados à Planossolos Solódico nas áreas mais planas e aos Neossolos Litólicos Eutróficos nas áreas mais declivosas, ocorrem na região de caatinga do Agreste, iniciando na área da Planície Atlântica até o Sudoeste. Predominantes em área de relevo forte ondulado e montanhoso, os Neossolos Litólicos são solos mais rasos e pedregosos e rochosos, são associados a afloramentos de rochas e acompanham a calha do rio Paraíba e a oeste da região, entre as cidades de Itatuba, Alagoa Grande e Campina Grande.

No Agreste contínuo ao Brejo, área de transição para regiões mais secas do interior do Planalto, os solos predominantes na área mais úmida são os Neossolos Regolíticos Distróficos, polarizada pela cidade de Esperança; na área mais seca, ao norte, ocorrem os Neossolos Regolíticos

Eutróficos e os Luvisolos Crômico Litólico (Francisco et al., 2015). No litoral, nas áreas de Tabuleiros, os solos são originados de sedimentos argilosos da era terciária – formação Grupo Barreiras ao sul (Latossolos e Argissolos), e ao norte, por sedimentos arenosos desta mesma formação (Neossolos Quartzarênicos). Nos tabuleiros costeiros os solos são comumente pobres e ácidos (Francisco et al., 2015).

A vegetação predominante da área de estudo é a Caatinga que, em geral, segundo Prado (2003), podem ser caracterizadas como florestas arbóreas ou arbustivas, compreendendo principalmente árvores e arbustos baixos muitos dos quais apresentam espinhos, microfilia e algumas características xerofíticas. Ao Leste (litoral) da área de estudo (Mata Paraibana) é possível identificar a presença do bioma Mata Atlântica onde a vegetação se trata de floresta sempre verde, cujos componentes em geral possuem folhas largas, que é vegetação de lugares onde há bastante umidade o ano todo, mata dos trópicos úmidos e vizinha da costa ou acompanha a costa (Andrade & Santos, 2014).

A mesorregião da Mata Paraibana (porção litorânea) concentra o maior contingente populacional do Estado (37,7%), seguida pelo Agreste (31,8%). A Mata Paraibana, que abrange a área metropolitana de João Pessoa, concentra 53,7% do PIB estadual, seguido pelo Agreste com 27,0%. Além da capital João Pessoa, Campina Grande e Santa Rita (todos inclusos na área de estudo) fazem parte dos municípios mais populosos do estado. Santa Rita é um município vizinho de João Pessoa, tendo grande produção de abacaxi e cana-de-açúcar. Campina Grande é o segundo maior polo industrial e tecnológico da Paraíba, destacando-se em eletrônica e informática, sendo um dos mais avançados centros de tecnologia de programas de computador no Brasil (Banco do Nordeste, 2015).

Metodologia

Obtenção de dados

Para a análise da vulnerabilidade ambiental da área de estudo foi preciso fazer a delimitação da área a partir das cartas topográficas e de dados vetoriais, utilizando como critério a região de entorno do trecho de 112 km entre as cidades de Campina Grande/PB e João Pessoa/PB da rodovia BR-230. As classes utilizadas para caracterização foram: Geomorfologia, Cobertura, Drenagem, Geologia, Modelo Digital de Elevação do terreno (MDE), Precipitação, Declividade (Slope), Solos e Textura. Os dados contidos dentro do projeto,

utilizados para gerar informações da área de estudo, foram originados de diferentes fontes, como por exemplo: *Geo Portal da AESA* (Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba); *BDiA* (Banco de Dados de Informações Ambientais – IBGE) com todos os temas em escala 1:250.000; *Geoportal do IBGE* com todos os temas em escala 1:250.000 e *Brasil em Relevo* - Embrapa Monitoramento por Satélite - Conselho Nacional do Ministério Público (CNPMP).

Classificação da vulnerabilidade

A vulnerabilidade se refere a determinadas questões, problemas ou impactos ambientais (mudança climática, erosão etc.), assim é importante definir quais perturbações serão objeto do estudo, uma vez que um sistema pode ser vulnerável a um tipo de problema, enquanto a outros não. Também, observa-se que esse conceito está atrelado a outros, como exposição a pressões, impacto ambiental, sensibilidade do sistema ecológico, capacidade adaptativa da sociedade, resiliência e susceptibilidade à ocorrência de efeitos negativos (Figueirêdo et al., 2010).

De acordo com a metodologia de Crepani et al. (2001), para cada classe analisada

determinou-se um intervalo de valores pré-estabelecidos que por sua vez são associados à vulnerabilidade. Seguindo esta proposta, cada um destes temas recebe uma pontuação de vulnerabilidade variando entre 1,0 e 3,0, onde valores próximos de 1,0 correspondem às áreas consideradas estáveis, valores ao redor de 2,0 correspondem à média estabilidade e valores próximos a 3,0 representam as áreas instáveis, com alto índice de vulnerabilidade. Como o objetivo da pesquisa permeia por criar um Índice de Vulnerabilidade de Pavimentos (IVP), foi previsto, em alguns casos, a alteração dos valores propostos por Crepani et al. (2001), tendo em vista o contexto característico das classes que gerassem maior ou menor degradação ao pavimento.

Foram utilizados nove atributos para o mapeamento da vulnerabilidade ambiental ligada a degradação do pavimento da área estudada. Na Tabela 1 são apresentadas as classes de Geomorfologia, Densidade de Drenagem, Amplitude Altimétrica, Precipitação e Declividade. Na Tabela 2 são apresentadas as classes de Geologia, Uso de Solo, Tipos de Solo e Textura.

Tabela 1. Escala de vulnerabilidade para as classes de Geomorfologia, Densidade de Drenagem, Amplitude Altimétrica, Precipitação e Declividade.

Geomorfologia	Drenagem	Amplitude Altimétrica (m)	Precipitação (mm/mês)	Declividade (°)	Valor	Vulnerabilidade
Homogênea Convexa/Aguçada/Tabular, Estrutural Tabular	Média	>160,5	<150	>21,7	1,0	Baixo Risco
		160,5-113	150-275	21,7-15,2	1,5	Risco Moderado
Pediaplano Degradado Inundado	Baixa	113-67,5	275-400	15,2-8,6	2,0	Médio Risco
		67,5-20	400-525	8,6-2	2,5	Alto Risco
Planície e Terraços Fluviais, Planície Fluviomarinha Planície Marinha	Muito Baixa	<20	>525	<2	3,0	Vulnerável

Fonte: Adaptado de Crepani et al., (2001).

Tabela 2. Escala de vulnerabilidade para as classes de Geologia, Uso de Solo, Tipos de Solo e Textura.

Geologia	Uso de Solo	Tipos de Solo	Textura	Valor	Vulnerabilidade
Quartzitos ou metaquartzitos, Riólito, Granito, Dacito, Granodiorito, Quartzito, Diorito, Granulitos, Migmatitos, Gnaisses, Fonólito, Nefelina, Sienito, Traquito, Sienito	Floresta	Latossolos	Arenosa, arenosa média	1,0	Baixo Risco
Andesito, Diorito, Basalto, Anortosito, Gabro, Peridotito, Milonitos, Quartzito, muscovita, Biotita, Clorita, xisto, Piroxenito, Anfíbolito, Kimberlito, Dunito, Hornblenda, Tremolita, Actinolita, xisto	Savana			1,5	Risco Moderado
Estauroлита xisto, Xisto granatífero, Filito, Metassilito, Ardósia, Metargilito, Mármore, Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos	Várzeas, Agricultura	Argissolos Luvisolos Chernossolos Planossolos Espodosolos	Arenosa/argilosa	2,0	Médio Risco
Conglomerados, Subgrauvacas, Grauvas, Arcózios, Siltitos, Argilitos, Folhelhos, Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporito	Agropecuária	Cambissolos		2,5	Alto Risco
Sedimentos Inconsolidados: Aluviões, Colúvios etc	Urbanização	Neossolos Vertissolos Organossolos Gleissolos Plintossolos Afloramento Rochoso	Argilosa média, argilosa	3,0	Vulnerável

Fonte: Adaptado de Crepani et al., (2001).

Álgebra de mapas para cálculo do IVP

Seguindo a mesma metodologia de Crepani et al. (2001), no que se diz respeito ao cálculo da média aritmética dos valores individuais de vulnerabilidade, a Equação (1) apresenta o cálculo com o acréscimo de outros temas julgados como importantes e que possam trazer informações complementares sobre a vulnerabilidade associada ao pavimento.

$$V = \frac{(R + C + D + G + MDE + P + SL + S + T)}{9}$$

(Equação 1)

em que:

V: Vulnerabilidade;

R: vulnerabilidade para o tema Geomorfologia;

C: vulnerabilidade para o tema Cobertura;

D: vulnerabilidade para o tema Drenagem;

G: vulnerabilidade para o tema Geologia;

MDE: vulnerabilidade para o tema Modelo Digital de Elevação;

P: vulnerabilidade para o tema Precipitação;

SL: vulnerabilidade para o tema Slope;

S: vulnerabilidade para o tema Solos e;

T: vulnerabilidade para o tema Textura.

Desse modo, foi gerado o mapa de vulnerabilidade que sintetiza a soma das variáveis a partir da álgebra de mapas, ou seja, aplicou-se a sobreposição de vários mapas utilizando uma escala comum e pesos de vulnerabilidade para cada classe conforme sua importância. A ferramenta, responsável pelo resultado, foi a Calculadora de Raster do ArcGIS Spatial Analyst (ARCGIS para Desktop 10.6.1), encarregada de executar cálculos matemáticos com operadores e funções, configurar consultas de seleção ou digitar a sintaxe da álgebra de mapa.

Níveis de vulnerabilidade do IVP

Em posse do mapa de vulnerabilidade, com todos os valores médios calculados para cada pixel, utilizou-se da estatística descritiva para determinar os intervalos e definir o grau de vulnerabilidade. De acordo com Freund & Simon (2000) a estatística descritiva “compreende o manejo dos dados para resumi-los ou descrevê-los, sem ir além, isto é, sem procurar inferir qualquer coisa que ultrapasse os próprios dados”. Na criação dos intervalos foi utilizada a amplitude interquartil, ou distância interquartil, pois é uma medida de dispersão que não sofre a influência de valores extremos. Os quantis dividem os valores ordenados em “q” partes essencialmente iguais, ou em “q”

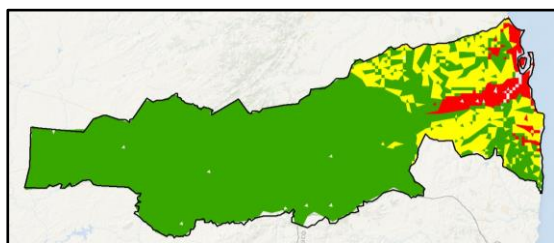
partes com a mesma proporção de valores. Podemos interpretar os quantis como medidas de posição. Diversas medidas de dispersão podem ser definidas a partir de quantis, a mais utilizada delas é a distância interquartil.

Resultados e discussão

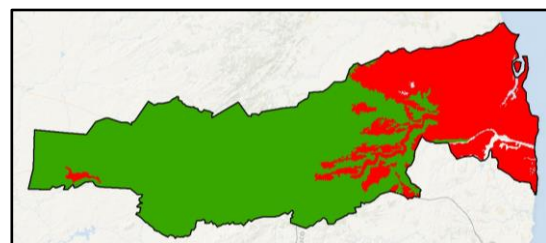
Tendo em vista que a geomorfologia compreende as dinâmicas correspondentes ao relevo terrestre e as suas formas no que se diz respeito à gênese, materiais predominantes e os processos atuantes sob dada porção da superfície do planeta, ao estudar esses componentes do espaço geográfico, é possível levantar e constatar espaços vulneráveis de acordo com diferentes

objetos de estudo. Para estudos de Vulnerabilidade Ambiental, por exemplo, visa-se estudar as constantes alterações nos processos morfogenéticos e morfodinâmicos do relevo, principalmente pelas diferentes formas, tempos e intensidades no uso e apropriação do relevo (Manoel, 2018).

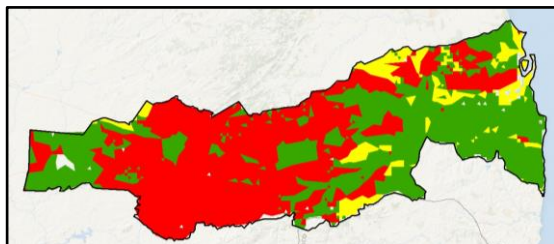
A partir do grau de vulnerabilidade ambiental atribuído para cada ocorrência geomorfológica presentes na área estudada, obedecendo as condições metodológicas, foi possível confeccionar o mapa da Figura 2-A com a escala de vulnerabilidade: baixa/estável (valor 1,0), média/intermediária (valor 2,0) e alta/instável (valor 3,0).



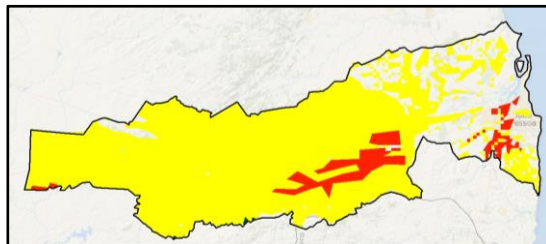
A. Mapa de vulnerabilidade da geomorfologia.



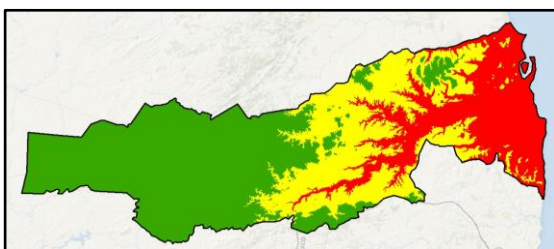
B. Mapa de vulnerabilidade da geologia.



C. Mapa de vulnerabilidade para uso e ocupação do solo.



D. Mapa de vulnerabilidade da drenagem.



E. Mapa de vulnerabilidade do MDE.



Figura 2. Mapas de vulnerabilidade para geomorfologia, geologia, usos do solo, drenagem e MDE.

A área de estudo apresenta 85,33% da área total com baixa vulnerabilidade, basicamente a totalidade das microrregiões de Campina Grande, Itabaiana e Sapé, e parte da microrregião de João Pessoa, que pertencem a todo Agreste e parte da

Mata Paraibana da região estudada. Essa área de estabilidade é composta pelas unidades geomorfológicas: Homogênea Convexa, Homogênea Aguçada, Homogênea Tabular e Estrutural Tabular. As áreas de médio risco

(14,67%) são referentes as ocorrências de Pediplano Degradado Inundado e as de alta vulnerabilidade (4,47%) são compostas por Planície e Terraços Fluviais, Planície Fluviomarina e Planície Marinha, todas na porção oriental da área de estudo, caracterizadas pelas particularidades que constituem as regiões litorâneas.

No contexto dos pavimentos, as ocorrências geomorfológicas que apresentam declividades mais acentuadas são importantes no escoamento da água, ajudando a drenagem superficial e evitando a saturação das camadas do pavimento. Já as ocorrências geomorfológicas de baixa declividade, dificultam a drenagem superficial, estabelecendo maior tempo de contato da água com as camadas do pavimento e provavelmente potencializam a degradação do mesmo. Segundo Medeiros et al. (2020) a geomorfologia indica regiões em que ocorrem escoamento concentrado de águas ou erosões lineares, pois descreve a topografia local, dessa forma é possível ter ideia da declividade, que por sua vez é fator preponderante no entendimento das formas do relevo de uma área submetida a movimentos de massa e fluidos.

A Geologia considera os materiais constituintes da terra, sua estrutura, feições superficiais, processos e aparências envolvidas no arranjo, além da idade e vida no passado geológico (Silva & Crispim, 2019). As informações relativas à história da evolução geológica do ambiente onde a unidade se encontra e o conhecimento relativo ao grau de coesão das rochas de composição (intensidade da ligação entre os minerais ou partículas), compreendem a contribuição da Geologia para a análise e definição da categoria morfodinâmica da unidade de paisagem natural (Crepani et al., 2001).

As composições geológicas dos domínios de Biotita, Metagranito, Sienogranito, Ortognaisse, Monzogranito, Diorito, Formação ferrífera bandada, Migmatito, Metadacito e Paragnaisse, são consideráveis, segundo as considerações metodológicas, de Baixa vulnerabilidade (estáveis), compreendendo 67,71% da área de estudo e presentes predominantemente na região de Agreste (Figura 2-B). Esta baixa vulnerabilidade deve-se a uma maior coesão das rochas de composição que por sua vez são pouco susceptíveis as intempéries.

A composição geológica do domínio de Muscovita, apenas 0,01%, compõe a vulnerabilidade Média (intermediária), já os Arenitos e as Areias constituem, segundo as considerações metodológicas, a área de Alta

vulnerabilidade (instável), compreendendo 32,28% da área de estudo e predominantemente presente na porção oriental da região.

A decomposição da rocha está ligada a modificação provocada por agentes químicos de intempéries, já a desintegração compreende a diminuição da coesão da rocha devido a agentes físicos. No geral, a desagregação da rocha consiste no mecanismo de redução da resistência mecânica e aumento, sob ação de processos químicos e físicos, da produção de finos (Lopes, 2019). A alta vulnerabilidade deve-se a uma menor coesão das rochas de composição que por sua vez são mais susceptíveis as intempéries e tendem a apresentar solos mais finos com características mecânicas de baixa resistência.

Para Valadares (2017) classificar uma área quanto ao uso e cobertura do solo, permite definir até que ponto as intervenções humanas podem alterar as características naturais do ambiente. Nesse sentido, para entender o gradiente de variação da vulnerabilidade ambiental em uma localidade por meio de informações de uso e cobertura do solo, significa analisar a suscetibilidade do ambiente às pressões antrópicas relacionando-se a vulnerabilidade natural a processos erosivos. Segundo Crepani et al. (2001) as atividades desenvolvidas dentro dos polígonos de intervenção antrópica, a exemplo da agricultura, a pecuária, a silvicultura, a mineração e as obras de engenharia civil, introduzem novas forças que podem alterar, em escala variável, as condições de equilíbrio do sistema representado pela unidade de paisagem natural.

Conforme Figura 2-C, a área de estudo apresenta 41,14% da área total com baixa vulnerabilidade, essa área de estabilidade é composta, segundo as definições metodológicas, pelas classes de Floresta e Savana, que por sua vez podem apresentar cobertura vegetal que oferece proteção do solo. As áreas de médio risco (7,85%) são referentes as classes de Agricultura e Formação Pioneira e as de alta vulnerabilidade (49,97%) são compostas por Agropecuária e Influência Urbana, predominantes da porção central da área de estudo.

Sambuichi et al. (2012) afirma que os impactos ambientais causados pela atividade agropecuária intensiva decorrem principalmente da degradação das áreas cultivadas, causada por práticas de manejo inadequadas e da mudança do uso do solo, resultante do desmatamento e da transformação de ecossistemas naturais em áreas cultivadas. Para Rodrigues (2001) as atividades agropecuárias ajudam no aumento das concentrações de nitrogênio e fósforo, devido, em especial, ao uso de fertilizantes empregados nas

culturas que por lixiviação chegam as margens dos rios. A influência da urbanização contribui para o processo de degradação dos pavimentos quanto a presença da água, pois aumenta a sobrecarga no sistema de drenagem urbana, além do acúmulo de resíduos sólidos nos elementos do sistema de drenagem causando obstrução e possíveis enchentes em períodos chuvosos.

Para Santana (2003), como a água é essencial nas ações químicas e biológicas do processo de intemperização facilitando o processo erosivo, a influência no desenvolvimento do perfil é provocada pelo conteúdo de umidade retido pelo material do solo. Ainda, indiretamente, essa umidade promove variações de temperatura, de precipitação, drenagem, entre outros aspectos, provocando a diferenciação entre terrenos declivosos e planos.

Nos pavimentos, a função da drenagem de uma rodovia é eliminar a água que, sob qualquer forma, atinge o corpo estradal, captando-a e conduzindo-a para locais em que menos afete a segurança e durabilidade da via (DNIT, 2006a). De acordo com Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006b) os métodos de dimensionamento presumem que será promovidas uma drenagem adequada e as considerações referentes à topografia da região, ou as restrições impostas pelas estruturas contíguas devem ser analisadas.

A área de estudo apresenta 74,38% da área total com Média vulnerabilidade, composta pela classe de Densidade de Drenagem Baixa. As áreas de baixo risco (0,07%) são referentes a classe de Densidade de Drenagem Média e as de Alta vulnerabilidade (5,74%) são compostas pela classe de Densidade de Drenagem Muito Baixa (Figura 2-D).

A porosidade e a permeabilidade do solo e da rocha definem a intensidade de dissecação do relevo pela drenagem, ou seja, rochas e solos impermeáveis dificultam a infiltração das águas, apresentando maior quantidade de água em superfície. Isso implica em um número maior de canais de drenagem, maior disponibilidade de energia potencial para o escoamento superficial (Crepani et al., 2001). Quanto menor a declividade, maior será a profundidade do solo, ou seja, em regiões mais planas, com baixo potencial de drenagem, maior será a permanência de água e consequentemente a ação do intemperismo provocará a presença de solos mais finos, que por sua vez, geralmente, apresentam baixa capacidade de suporte. As regiões de topografia acentuada, apesar de apresentarem fenômenos intensos de erosão provocados pela velocidade de escoamento

da água principalmente em áreas desprotegidas, apresentam maior potencial de drenagem, que por sua vez facilitam a retirada da água da região pavimentada tornando-se menos danoso ao pavimento.

A geomorfometria emprega modelos digitais estruturados em grades, sendo as mais utilizadas as triangulares e as regulares, compostas por matrizes com valores de elevação da superfície do terreno. Os atributos topográficos representam mensurações quantitativas da superfície terrestre (Neuman et al. 2018).

A área de estudo apresenta 48,76% da área total com Baixa vulnerabilidade, obedecendo as condições metodológicas, esse grupo é composto pelas classes de cotas acima de 141,5 metros de amplitude altimétrica (Figura 2-E). Esse comportamento é presente, principalmente na porção ocidental da área de estudo, influenciadas pelo Planalto da Borborema.

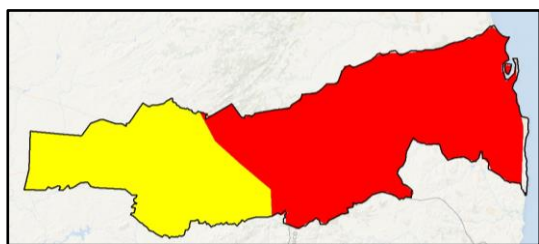
A estabilidade é associada a possibilidade de maiores declividades longitudinais do pavimento, que por sua vez pode gerar uma maior drenagem, evitando, assim, que a água permaneça mais tempo próxima do corpo estradal. A área de vulnerabilidade Média (27,78%) é composta por cotas que variam de 77-141,5 metros de amplitude altimétrica e as regiões de Alta vulnerabilidade (23,46%) compreendem amplitudes altimétricas menores que 77 metros. Estas regiões, por sua vez, encontram na porção litorânea da área de estudo, apresentam alta vulnerabilidade pois devida a sua baixa declividade e consequentemente baixo potencial de drenagem, permitem maior permanência da água no corpo estradal. Segundo Chaves (2002), o relevo é representado, no mundo digital, pelos modelos digitais de elevação, atuando como importante regulador da distribuição do fluxo de água e energia dentro das bacias hidrográficas.

A importância de se conhecer o comportamento pluvial em uma determinada bacia hidrográfica, sendo a chuva a mais importante forma de precipitação devido à sua capacidade de produzir escoamento, deve-se ao fato, do grau de precipitação pluvial estar atribuído ao potencial de perdas de solos (Cabral et al., 2005).

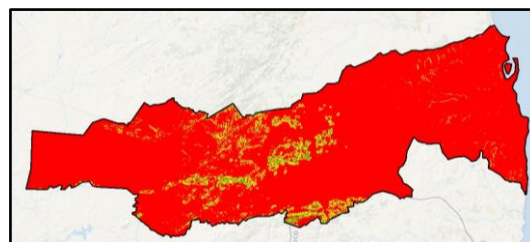
A área de estudo apresenta 35,91% da área total com Média vulnerabilidade, esse grupo é composto, segundo as condições metodológicas, pelas classes de intensidade pluvial que variam de 316-375 mm/mês, predominantemente na microrregião de Campina Grande (Agreste). A região de Alta vulnerabilidade (64,09%), representando mais da metade da área de estudo, apresenta intensidade pluvial acima de 375

mm/mês englobando as microrregiões de Itabaiana, Sapé e João Pessoa, sendo esta última a região de máxima intensidade pluvial (Figura 3-A). Como já discutido anteriormente, a presença de água é um fator de grande impacto na degradação

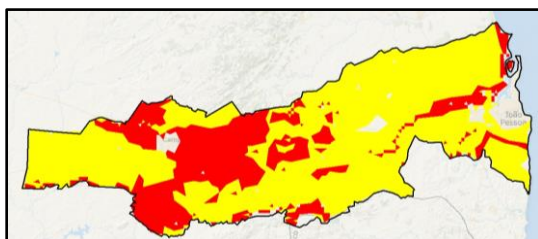
do pavimento, ou seja, áreas que apresentaram maior vulnerabilidade são aquelas que apontam maior intensidade pluvial.



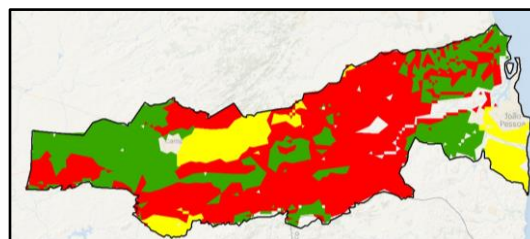
A. Mapa de vulnerabilidade da intensidade pluvial.



B. Mapa de vulnerabilidade a declividade.



C. Mapa de vulnerabilidade a composição pedológica.



D. Mapa de vulnerabilidade a textura do solo.



Figura 3. Mapas de vulnerabilidade para da intensidade pluvial, declividade, composição pedológica e textura do solo.

Os pavimentos possuem grandes áreas expostas às intempéries e ao tráfego. Sob ações combinadas das mudanças de temperatura e das chuvas, e ainda das tensões e deformações causadas pela solicitação do tráfego, surgem vários tipos de ações danosas que aumentam a irregularidade, desagregam o material superficial e, eventualmente, podem conduzir à ruína do pavimento. A quantidade de água que infiltra através da superfície do pavimento é função da capacidade de vazão das trincas ou juntas, da quantidade de trincas, da área que drena cada trinca ou junta e da intensidade e duração das chuvas (Pereira, 2003)

A declividade é responsável pela infiltração das águas das chuvas e a velocidade de escoamento das águas, tornando-se um dos principais fatores na verificação de ameaça a

deslizamentos de terra. Assim, a geração do mapa de declividade para análise das formas de relevo e amplitudes altimétricas apresenta-se como importante fator para o entendimento dos processos geodinâmicos (Filho et al., 2018).

A área de estudo apresenta 93,53% da área total com Alta vulnerabilidade, obedecendo as condições metodológicas esse grupo é composto pelas declividades menores que 19,8% (Figura 3-B). Para o pavimento, a declividade longitudinal é importante no escoamento da água, melhorando, assim, a drenagem superficial, ou seja, regiões de baixa declividade apresentam maior vulnerabilidade pois tendem a diminuir o escoamento podendo fazer com que a água fique por mais tempo em contato com as camadas.

A área de estudo ainda apresentou 5,58% de área com Média vulnerabilidade (declividades

entre 19,8%-37,2%) e apenas 0,89% com Baixa vulnerabilidade (declividades maiores que 37,2%).

Para o pavimento, a declividade longitudinal é importante no escoamento da água ajudando a drenagem superficial. Pereira (2003) ressalta que em rodovias que apresentam greide plano ou em regiões baixas de rodovias que apresentam greide ondulado, devido à reduzida declividade longitudinal e à maior dificuldade que a água tem para escoar superficialmente, há uma propensão para ocorrência de infiltração pelas bordas do pavimento.

De acordo com Barbosa (2020), quanto a pedologia, deve-se considerar o solo como sendo um corpo natural e tridimensional o qual é necessário conhecer sua origem, composição, distribuição na paisagem e que fatores ambientais influenciam na sua formação. O estudo das condições do solo precisa ser feito desde as camadas mais superficiais até as mais profundas, dessa forma, o conhecimento da espacialização pedológica permite saber suas características de modo a avaliar a vulnerabilidade quanto às ações antrópicas.

De acordo com a Figura 3-C, a área de estudo apresenta 68,94% da área total com Média vulnerabilidade, obedecendo as condições metodológicas esse grupo é composto por solos do tipo: Luvisolo, Planossolo, Argissolo, Espodossolo e Nitossolo. A área apresentou, também, 26,37% com Alta vulnerabilidade (Neossolo, Vertissolo e Gleissolo).

De acordo com Teixeira (2014), solos que possuem grandes quantidades de partículas finas (silte e argila) tornam-se inadequados para fins de pavimentação, isso ocorre devido às más interações entre suas partículas e a água, causando efeitos desfavoráveis como: expansão, contração, diminuição da coesão e redução da resistência

quanto a solicitação de esforços.

Características como textura, estrutura, porosidade, permeabilidade, consistência e profundidade, definem a vulnerabilidade dos solos quanto a presença de água e saturação devido a variação do nível do lençol freático (Franco et al., 2015). De acordo com Brandão (2003) a textura, determinada pela quantidade de macroporos do solo, influencia a movimentação de água e interfere na infiltração, além de determinar a forma e continuidade dos poros. Solos arenosos apresentam maior quantidade de macroporos do que solos argilosos, este fator faz com que as areias apresentem, quando saturadas, maior condutividade hidráulica do que as argilas.

A área de estudo apresenta 50,13% da área total com Alta vulnerabilidade, esse grupo é composto por solos com predominância de argila na sua composição. Quanto maior a presença de partículas finas, do tipo silte e argila, maior será a vulnerabilidade deste para o pavimento, pois esse tipo de solo pode apresentar interações entre suas partículas e a água causando efeitos de expansão e contração, ocasionando na diminuição da resistência (Figura 3-D). A área apresentou, também, 30,26% com Baixa vulnerabilidade (predominância de areia) e 11,71% Média com boa representatividade do tipo de textura Média.

Índice Vulnerabilidade de Pavimentação a partir da álgebra de mapas

O conjunto de dados (matriz composta por 71.241 pixels) referente a média de cada valor calculado por pixel, foi submetido, com nível de significância de 5%, a estimativa de quantis para divisão igualitária dos intervalos das classes de vulnerabilidade. A Tabela 3 apresenta a estatística descritiva dos dados.

Tabela 3. Estatística descritiva dos dados.

Variável	Observações	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
IVP	71241	1,00	2,98	2,22	0,198

Fonte: Autor, 2021.

A Tabela 4 apresenta os percentis utilizando a função de distribuição acumulada empírica com limites inferior e superior baseados na distribuição Normal.

Tabela 4. Tabela de percentis.

Percentil	Valor	Limite inferior	Limite superior
Máximo 100%	2,98		
99%	2,59	2,58	2,60
95%	2,49	2,49	2,49
90%	2,44	2,44	2,44
3º Quartil 75%	2,36	2,36	2,37
Mediana 50%	2,24	2,24	2,24
1º Quartil 25%	2,09	2,09	2,09
10%	1,97	1,97	1,97
5%	1,93	1,92	1,93
1%	1,56	1,53	1,60
Mínimo 0%	1,00		

Fonte: Autor, 2021.

A partir de todos os temas propostos, aplicando a sobreposição de mapas, foi gerado o mapa de vulnerabilidade geral que compõe o IVP (Figura 4), utilizando uma escala comum e pesos de vulnerabilidade para cada classe conforme as

condições metodológicas, alicerçado pela calculadora de Raster que sintetiza a média das variáveis a partir da álgebra de mapas.

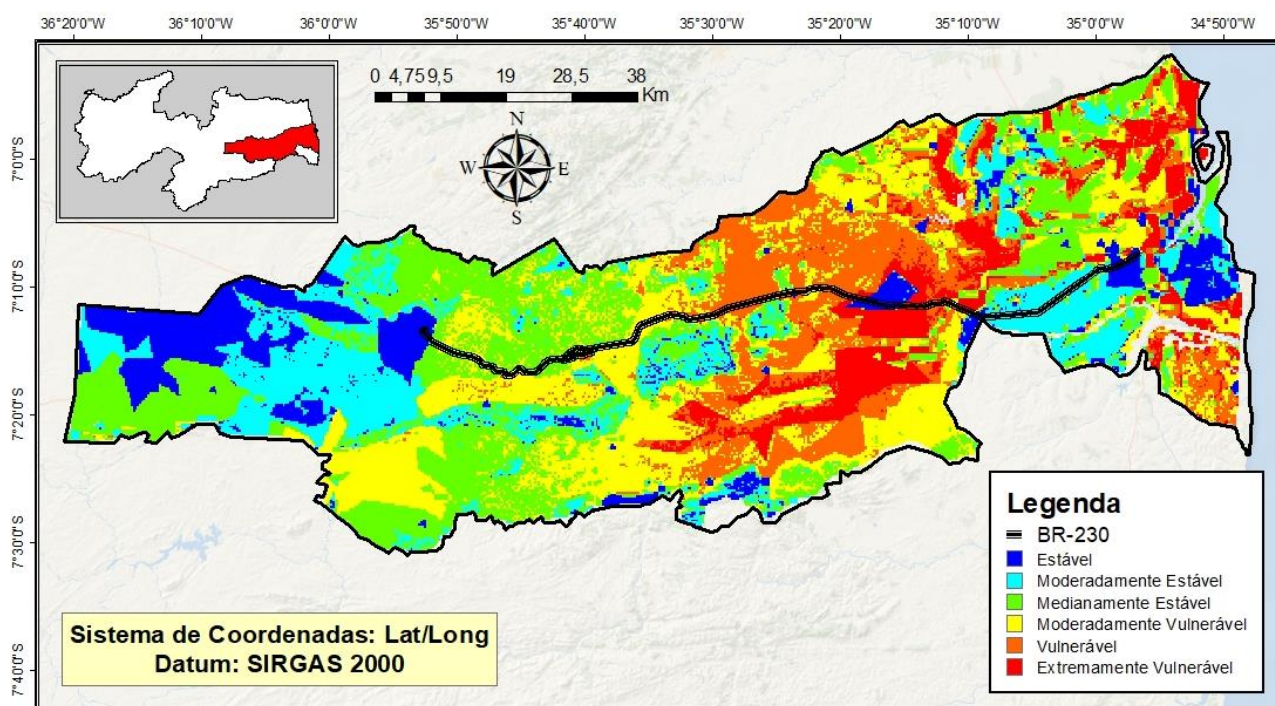


Figura 4. Mapa do Índice de Vulnerabilidade de Pavimentos.

É possível observar, a partir da distribuição visual do Índice de Vulnerabilidade de Pavimentos sobre a área de estudo, que as áreas do entorno da BR-230 identificadas pela classificação de vulnerável, desde moderada a extremamente vulnerável, se encontram, em sua maioria, na extensão que vai aproximadamente da porção central da Microrregião de Itabaiana até a porção central da Microrregião de sapé. Esse trecho é

identificado como a região de transição entre o Agreste e a Mata Paraibana e encontra-se aproximadamente entre o quilômetro 63 e 121 da rodovia, totalizando uma extensão de quase 60 km.

A Tabela 5 apresenta a porcentagem da distribuição territorial espacial para cada nível do IVP presente na área de estudo.

Tabela 5. Porcentagem da distribuição por nível do IVP.

Classificação do IVP	Intervalo	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Estável	1,00 – 1,97	488,12	10,14%
Moderadamente Estável	1,97 – 2,09	749,64	15,58%
Medianamente Estável	2,09 – 2,24	1227,23	25,50%
Moderadamente Vulnerável	2,24 – 2,36	1157,21	24,05%
Vulnerável	2,36 – 2,44	737,43	15,32%
Extremamente Vulnerável	2,44 – 3,00	452,71	9,41%

Fonte: Autor, 2021.

Ao verificar as combinações de classificação, a região estudada apresenta mais de 50% de áreas com algum nível de estabilidade e pouco mais de 48% de áreas com um certo risco de vulnerabilidade. Essas áreas de vulnerabilidade apresentam, em sua maioria, a combinação de características em que predominam elementos considerados fatores que possam contribuir para a degradação do pavimento. A exemplo de composições geológicas como os arenitos e as areias, predominância de atividades ligadas a agropecuária e forte influência urbana, densidade de drenagem muito baixa, amplitudes altimétricas menores que 77m, intensidade pluvial acima de 375 mm/mês, declividades menores que 19,8%, solos com textura predominantemente argilosa e com classificações do tipo Neossolo, Vertissolo e Gleissolo.

As áreas de estabilidade, predominantes na microrregião de Campina Grande e centro sul da microrregião de João Pessoa, apresentam, também, em sua maioria, a combinação de características em que predominam elementos considerados fatores que possam desfavorecer a degradação do pavimento. A exemplo de unidades geomorfológicas do tipo homogênea e tabular, composições geológicas como os ortognaisses, predominância classes de floresta e savana, cotas acima de 141,5 m de amplitude altimétrica, intensidade pluvial que varia de 316-375 mm/mês, solos com textura predominantemente arenosa e com classificações do tipo Luvisolo, Planossolo, Argissolo, Espodossolo e Nitossolo.

De acordo com Siche et al. (2007) o índice, singularizado como um valor numérico, pode servir como mecanismo de tomada de decisão/previsão, pois este utiliza-se de cálculos, bases científicas e métodos adequados para representar a realidade de um sistema simples ou complexo. Para Aquino (2017) a elaboração de índices de vulnerabilidade ambiental, é retratada como complexa, tendo em vista que a completude de um ecossistema não pode ser expressa diretamente por meio de uma única medida e nem sua quantificação/qualificação podem ser resolvidas de forma geral, porém, os índices, são

importantes instrumentos para auxiliar no gerenciamento da vulnerabilidade que se apresenta como uma parte delicada de qualquer estratégia de desenvolvimento sustentável.

Conclusão

De forma geral, a partir da observação visual dos mapas criados, é possível perceber que a construção de mapas é uma ferramenta de grande importância na orientação inicial do estudo de vulnerabilidade voltado para a degradação de pavimentos. Tendo em vista que a definição de regiões estáveis ou instáveis quanto ao tema, possibilitou identificar onde o pavimento pode estar submetidos a condições de entorno que apresente características de vulnerabilidade distribuindo-se desde moderada a condições de extrema instabilidade.

Avaliando as combinações de classificação que apresentaram algum tipo de vulnerabilidade e que compreenderam pouco mais de 48% da área de estudo, foi possível verificar que estas regiões, em sua maioria, apresentaram características que predominam elementos contribuintes para a degradação do pavimento como formações geológicas susceptíveis a intempéries, uso e ocupação do solo com predominância de atividades agropecuárias e urbanização, baixas declividades e amplitudes altimétricas, intensidade pluvial acima da média de chuvas do estado e solos que possam apresentar na sua constituição a presença de material argiloso.

Examinando as combinações de classificação que apresentaram algum tipo de estabilidade, pouco mais de 50% da área de estudo, foi possível verificar que estas regiões, em sua maioria, apresentaram características que predominam elementos como formações geológicas menos susceptíveis a intempéries, uso e ocupação do solo com predominância de áreas com maior grau de preservação, maiores declividades e amplitudes altimétricas, menores intensidades pluviais e solos que possam apresentar na sua constituição a presença de material arenoso.

A importância da criação de um índice que possa, através de um valor numérico embasado em

uma metodologia adequada, classificar a vulnerabilidade quanto a degradação do pavimento de uma determinada localidade, é um significativo instrumento que possibilita a aplicação de uma técnica que tem como objetivo ajudar no gerenciamento e na tomada de decisão no que se diz respeito ao dimensionamento de projetos de pavimentação mais eficazes quanto a condições naturais e antrópicas, sendo assim mais uma estratégia de investigação por meio dos órgãos responsáveis para melhorar a qualidade dos pavimentos.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a Universidade Estadual da Paraíba pelo incentivo a qualificação de docentes; ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande pelo apoio científico e a AESA, IBGE e EMBRAPA pela disponibilidade dos dados.

Referências

- Andrade, J. R., Santos, S. C., 2014. Estudo sobre o desmatamento da mata atlântica na Paraíba. Revista Brasileira de Educação e Saúde - REBES (Pombal - PB, Brasil), 4., 24-33, mai.-jun.
- Aquino, A. R., Paletta, F. C., Almeida, J. R., 2017. Vulnerabilidade Ambiental. São Paulo: Blucher.
- Banco do Nordeste, 2015. Perfil Socioeconômico da Paraíba. Fortaleza, Banco do Nordeste do Brasil.
- Barbosa, P. G., 2020. Análise Geomorfológica como Fator de Vulnerabilidade Ambiental em Regiões Serranas: Uma Proposta a Gestão Territorial na Microrregião da Serra do Teixeira-PB. Dissertação Mestrado. Campina Grande: UEPB, 122p.
- Bernucci, L. B., Motta, L. M. G., Ceratti, J. A. P., Soares, J. B., 2022. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2ª edição.
- Berre, L. I., Meur-Ferec, C., Cuq, V., Guillou, E., Lami, T., Dantec, N., Letortu, P., Lummert, C., Philippe, M., Rouan, M., Noûs, C., Hénaff, A., 2022. Systemic vulnerability of coastal territories to erosion and marine flooding: A conceptual and methodological approach applied to Brittany (France). International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 78, August 2022, 103122.
- Barbosa, T. S., 2021. Geomorfologia Urbana e Antropogênica do Setor Central da Região Metropolitana de João Pessoa – Paraíba, Brasil. Tese de Doutorado. João Pessoa: UFPB, 163p.
- Brandão, V. S., 2003. Infiltração de Água em Solos Sujos a Encrostamento. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais.
- Cabral, J. B. P., Becegato, V. A., Lucena, L. R. F., Scopel, I., 2003. Intensidade Pluviométrica e Vulnerabilidade à Erosão do Solo na Área de Drenagem do Reservatório de Cachoeira Dourada-GO/MG. Revista Eletrônica do Curso de Geografia do campus Avançado de Jataí-GO. Nº 4, jan-jun (2005). Disponível: <https://www.revistas.ufg.br/geoambiente/article/view/25870/14860>. Acesso: 28/07/2021.
- Chaves, M. A., 2002. Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes para a Bacia Amazônica. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais.
- Confederação Nacional do Transporte (CNT). Pesquisa CNT de Rodovias 2019: Relatório Gerencial – Brasília: CNT: SET: SENAT. Disponível: <https://cdn.cnt.org.br/diretorioVirtualPrd/49c9e3d3-ed8e-4a93-95ac-76dd53790299.pdf>. Acesso: 16/03/2021.
- Crepani, E., Medeiros, J. S., Azevedo, L. G., Filho, P. H., Florenzano, T. G., Duarte, V., Barbosa, C. C. F., 2001. Sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico. São José dos Campos: INPE.
- Cunha, R. C., Dupas, F. A., Pons, N. A. D., Tunsisi, J. G., 2015. Análise da influência das variáveis ambientais utilizando inferência fuzzy e zoneamento das vulnerabilidades. Estudo do caso da bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos - SP. Geociências, São Paulo, v. 30, n. 3, p.399-414.
- DNIT. 2006a. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de Drenagem de Rodovias - 2. ed. - Rio de Janeiro.
- DNIT. 2006b. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos - 2. ed. - Rio de Janeiro.
- Figueirêdo, M. C. B., Vieira, V. P. P. B., Mota, S., Rosa, M. F., Miranda, S., 2010. Análise da

- Vulnerabilidade Ambiental. Fortaleza: Embrapa.
- Filho, B. C., Polivanov, H., Junior, W. C., Chagas, C. S., Calderano, S. B. 2018. Avaliação da Vulnerabilidade Ambiental de Regiões Tropicais Montanhosas com Suporte de SIG. *Revista de Geografia (Recife)* V. 35, No. 3.
- Francisco, P. R. M., Pereira, F. C., Ziany Neiva Brandão, Z. N., Zonta, J. H., Santos, D., Silva, J. V. N., 2015. Mapeamento da aptidão edáfica para fruticultura segundo o zoneamento agropecuário do Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Geografia Física*, vol.08, n.02.
- Franco, G. B., Silva, D. D., Marques, E. A. G., Chagas, R. L. G., 2015. Análise da Vulnerabilidade à Contaminação do Aquífero Freático e da Taxa de Infiltração do Solo da Bacia do Rio Almada e Área Costeira Adjacente – BA. *Revista Brasileira de Geografia Física* 08.
- Freund, J. E., Simon, G. A., 2000. Estatística aplicada. 9. ed. Porto Alegre: Bookman.
- Gonçalves, F. J. P. 2002. Estudo do Desempenho de Pavimentos Flexíveis a partir de Instrumentação e Ensaios Acelerados. Tese de Doutorado. Porto Alegre: UFRGS.
- IBAMA, 1994. Plano de manejo florestal para a região do Seridó do Rio Grande do Norte. Natal: IBAMA, v.1. (Projeto PNUD/FAO/IBAMA).
- Lopes, P. M., 2019. Alterabilidade e Comportamento Geomecânico de Rochas no AHE Simplício. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Manoel, J. L., 2018. Vulnerabilidade Ambiental do Município de Maringá – PR: Subsídios à Geomorfologia Geográfica. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual Paulista. Campus de Presidente Prudente/SP.
- Medeiros, G. F., Castro, A. S., Rodrigues, R. J. R., Resplandes, J. M., Almeida, J. G. R., 2020. Fatores Geomorfológicos na Contribuição de Ocorrência de Processos Erosivos as Margens da Rodovia TO-445, Município de Miracema-TO. *Revista de Geociências do Nordeste - Northeast Geosciences Journal*, v. 6, nº 2.
- Mendonça, G. C., Costa, R. C. A., Parras, R., Oliveira, L. C. M., Abdo, M. T. V. N., Pecheco, F. A. L., Pissarra, T. C. T., 2022. Spatial indicator of priority areas for the implementation of agroforestry systems: An optimization strategy for agricultural landscapes restoration. *Science of the Total Environment* 839 (2022) 156185.
- Neuman, G., Silveira, T., Sampaio, T. V. M., 2018. Análise da Influência da Escala na Obtenção dos Atributos Topográficos Derivados de MDE. *RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise. Temático de Geotecnologias*, Curitiba, v.43, p. 179-199.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., McMahon, T. A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*.
- Pereira, A. C. O., 2003. Influência da Drenagem Subsuperficial no Desempenho de Pavimentos Asfálticos. Dissertação Mestrado. Escola Politécnica – USP. São Paulo: USP, 222p.
- Pereira, I. M., Andrade, L. A., Barbosa, M. R. V., Sampaio, E. V. S. B., 2001. Regeneração natural em um remanescente de Caatinga sob diferentes níveis de perturbação, no agreste paraibano. *Acta Botanica Brasilica* 15: 413-426.
- PBMC, 2013. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo do GT2. PBMC, Brasília, DF. 28 p.
- Prado, D. E., 2003. As caatingas da América do Sul. In: LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. *Ecologia e Conservação da Caatinga*. Recife: UFPE.
- Programa Geologia do Brasil, 2014. Relatório Técnico – Etapa Final. Contrato 060/PR/08-CPRM/UFPE/FADE. Ministério das Minas e Energia. Recife.
- Resumo Executivo, 2010. Plano Territorial de Desenvolvimento Rural Sustentável – PTDRS. Território da Zona da Mata Sul – PB. Paraíba.
- Rodrigues, S., 2001. Nova Etapa na Despoluição da Bacia da Guanabara. *BIO – Revista Brasileira de Saneamento e Meio Ambiente*, p. 42-43.
- Sambuichi, R. H. R., Oliveira, M. A. C., Silva, A. P. M., Lurdeemann, G. A., 2012. Sustentabilidade Ambiental da Agropecuária Brasileira: Impactos, Políticas Públicas e Desafios. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea.
- Santana, D. P., 2003. Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, Documentos 30.
- Siche, R., Agostinho, F., Ortega, E., Romeiro, A., 2007. Índices Versus Indicadores: Precisões Conceituais na Discussão da Sustentabilidade de Países. *Rev. Ambiente & Sociedade*. Campinas X, n137-148.
- Silva, G. F., Santos, D., Silva, A. P., Souza, J. M., 2015. Indicadores de Qualidade do Solo Sob

- Diferentes Sistemas de Uso na Mesorregião do Agreste Paraibano. Rev. Caatinga 28 Mossoró.
- Silva, M. V. C., Crispim, A. B., 2019. Geologia Geral. Fortaleza: EdUECE.
- Teixeira, I., 2014. Estabilização de um Solo Laterítico Argiloso para Utilização como Camada de Pavimento. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp. Campinas.
- Teotia, H. S., Ribeiro, G. N., Ramos, F. A., 2011. Integração de Sensoriamento Remoto e SIG (Geoprocessamento) na Identificação dos Solos Principais e Estratos de Vegetação para Planejamento Regional no Estado da Paraíba. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio, INPE p. 9128.
- Tricart, J., 1977. Ecodinâmica. Rio de Janeiro, FIBGE/SUPREN.
- Valadares, A. A., 2017. Análise da Dinâmica do Uso e Cobertura do Solo sobre a Vulnerabilidade Ambiental em Área do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.