



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS AMBIENTAIS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

VALDIANE MARANHÃO DA SILVA

**MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À PROCESSOS EROSIVOS
EM FAIXA DE DUTOS COM O USO DE GEOTECNOLOGIAS: ESTUDO
DE CASO NA FAIXA DE DUTOS EM MOSSORÓ.**

MOSSORÓ

2024

VALDIANE MARANHÃO DA SILVA

**MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À PROCESSOS EROSIVOS
EM FAIXA DE DUTOS COM O USO DE GEOTECNOLOGIAS: ESTUDO
DE CASO NA FAIXA DE DUTOS EM MOSSORÓ.**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharela em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. D. Rogério Taygra
Vasconcelos Fernandes.

MOSSORÓ

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

SS586 Silva, Valdiane.
m MAPEAMENTO DE ÁREAS SUCETÍVEIS À PROCESSOS
EROSIVOS EM FAIXA DE DUTOS COM O USO DE
GEOTECNOLOGIAS: ESTUDO DE CASO NA FAIXA DE DUTOS
EM MOSSORÓ. / Valdiane Silva. - 2024.
53 f. : il.

Orientador: Rogério Taygra Vasconcelos
Fernandes .
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2024.

1. Erodibilidade.. 2. Gasoduto. 3.
Geoprocessamento. 4. Análise espacial. 5. Perda
de solo.. I. Taygra Vasconcelos Fernandes ,
Rogério , orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

VALDIANE MARANHÃO DA SILVA

**MAPEAMENTO DE ÁREAS SUCETÍVEIS À PROCESSOS EROSIVOS EM
FAIXA DE DUTOS COM O USO DE GEOTECNOLOGIAS: ESTUDO DE
CASO NA FAIXA DE DUTOS EM MOSSORÓ.**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharela em Engenharia Civil.

Defendida em: 19 / 04 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



ROGERIO TAYGRA VASCONCELOS FERNANDES

Data: 23/04/2024 09:06:38-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rogério Taygra Vasconcelos Fernandes, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Documento assinado digitalmente



BRENNO DAYANO AZEVEDO DA SILVEIRA

Data: 23/04/2024 08:47:38-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Brenno Dayano Azevedo da Silveira, Prof. Me. (UFERSA)

Documento assinado digitalmente



VINICIUS NAVARRO VARELA TINOCO

Data: 23/04/2024 08:37:50-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Vinicius Navarro Varela Tinoco, Engº. Me. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecer a Deus, por sempre me abençoar e me dar força, coragem e perseverança para enfrentar todas as circunstâncias. Desde o início da faculdade, todas as dificuldades enfrentadas foram graças a ele. Obrigada por não ter me deixado cair e todas as vezes que cai, o senhor me levantou, pois como diz Romanos 8:28: "Todas as coisas cooperam para aquele que ama e acredita em Deus".

A minha família, por ser minha base em tudo. Aos Meus pais, que viveram esse sonho comigo. Por ter acreditado em mim, nas vezes que nem eu mesma acreditava. Sem eles, nada disso estaria se realizando. Aos meus irmãos, sobrinhos, vó e tias, por todo apoio depositado nessa caminhada e por terem sido compreensíveis em todas as vezes que não consegui estar ao lado deles.

A família que Mossoró me presenteou: Mona, Monize, Karla, Mylla, Yedna, Paloma, Laura, Mayna, Gustavo e Caio. Vocês foram essenciais, foram meu apoio, obrigada por deixarem os dias mais incríveis.

A todos os professores, que me acompanharam nessa trajetória, todo conhecimento repassado foi essencial para meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos Hanna, Giorgy, Miguel, Hanleth e Ellen, vocês tornaram a caminhada leve e ajudaram a suportar o processo. Obrigada por tudo.

Aos meus amigos que mesmo de longe, torcem para meu sucesso: Yasmim, Lauany, Paulinha, Melyssa, Lucas, Kellison e Igor.

A Johnnathan, por ter sido compreensível, por sempre acreditar em meu potencial e por tornar esses dias mais leves. Como mesmo falo, você é um dos meus maiores fãs.

Ao Projeto de Pesquisa e Extensão Acesso à Terra Urbanizada. Sem dúvidas, o projeto me proporcionou momentos incríveis e que me transformou em uma pessoa e profissional melhor. Por Todo conhecimento adquirido e a todas as pessoas que conheci nessa caminhada, obrigada pela confiança. E aonde irei, falarei o quanto sou grata pelas oportunidades que estive estando nele.

Ao meu Orientador Rogério Taygra, por aceitar esse desafio comigo, incentivar e colaborar com minha pesquisa.

Aos membros da banca por terem aceitado a participação e auxiliado para a melhoria do trabalho.

RESUMO

Processos erosivos são um dos principais problemas existentes em faixas de dutos de gás, os quais necessitam de uma atenção especial por parte das empresas do ramo. Manter a integridade do gasoduto é essencial para o transporte seguro do combustível, uma vez que o rompimento dessa estrutura pode trazer sérios problemas ambientais, econômicos e sociais. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo realizar o mapeamento das áreas mais suscetíveis a processos erosivos na faixa de dutos por meio de geotecnologias combinado ao uso da equação universal de perda de solos, analisando fatores como erosividade da chuva, declividade, a estimativa de perda de solo, a erodibilidade do solo, uso e manejo do solo entre outros. Para essa análise foi utilizado o software QGIS 3.32 e, a partir da análise do Modelo Digital de elevação e dos fatores que compõe a equação universal de perda de solo, foi possível obter os locais que são mais suscetíveis a erosão. Dessa forma, foi verificado que cerca de 47% da área de estudo encontra-se com predominância de nenhuma ou ligeira suscetibilidade ao processo erosivo, cerca de 15% estão como área moderada, 20% como alta e 18% muito alta suscetibilidade a erosão.

Palavras-chave: Erodibilidade. Gasoduto. Geoprocessamento. Análise espacial. Perda de solo.

ABSTRACT

Erosive processes are one of the main problems in gas pipelines, which require special attention from companies in the sector. Maintaining the integrity of the gas pipeline is essential for the safe transportation of fuel, since the rupture of this structure can cause serious environmental, economic and social problems. Thus, this work aimed to map the areas most susceptible to erosive processes in the pipeline strip using geotechnology combined with the use of universal soil loss search, analyzing factors such as rain erosivity, slope, loss estimate soil, soil erodibility, land use and management, among others. For this analysis, the QGIS 3.32 software was used and, based on the analysis of the Digital Elevation Model and the factors that make up the universal soil loss solution, it was possible to obtain the locations that are most susceptible to erosion. Thus, it was verified that around 47% of the study area has a predominance of no or slight susceptibility to the erosion process, around 15% is a moderate area, 20% is a high and 18% is a very high susceptibility to erosion.

Keywords: Erodibility. Gas pipeline. Geoprocessing. Spatial analysis. Soil loss.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Localização da área de estudo	25
Figura 2 Composição do solo da área de estudo	31
Figura 3 Fator de Erodibilidade	33
Figura 4 Fator de Erosividade	34
Figura 5 Uso e ocupação do solo	35
Figura 6 Uso e ocupação do solo	36
Figura 7 Fator CP	37
Figura 8 Modelo Digital de Elevação	38
Figura 9 Declividade	39
Figura 10 Acúmulo de fluxo	40
Figura 11 Direção do fluxo	41
Figura 12 Fator L	42
Figura 13 Fator S	43
Figura 14 Fator LS	44
Figura 15 Fator A	Erro! Indicador não definido.
Figura 16 Fator A	46
Figura 17 Áreas suscetíveis a erosão	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Classificação de perda de solo.....	30
Tabela 2 Fator de erodibilidade do solo	32
Tabela 3 Fator CP.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
GNL	Gás Natural Liquefeito
IEA	International Energy Agency
BAR	Boletim de Recursos e Reservas de Petróleo e Gás Natural
RDT	Regulamento Técnico de Dutos Terrestres
SIG	sistemas de informação geográfica
EUPS	Equações Universais de Perda de Solo
USLE	Universal Soil Loss Equation
RUSLE	Previsão de Erosão em Encostas
TOPODATA	bancos de dados geomorfométricos do Brasil
ANA	Agência nacional de águas e Saneamento Básico
BDIA	Banco de Dados e Informações Ambientais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MDE	Modelo Digital de Elevação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS.....	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 – MERCADO DE GÁS NATURAL.....	13
2.2 CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DA FAIXA DE DUTOS DE GÁS.	15
2.3 NECESSIDADE DE MONITORAMENTO E PREVENÇÃO	15
2.4 EROSÃO E CONSERVAÇÃO DO SOLO	16
2.5 GEOTECNOLOGIAS NA ANÁLISE DE EROSÃO.....	17
3 MODELOS DE PREVISÃO E MAPEAMENTO DE EROSÃO	19
3.1 MODELOS BASEADOS EM SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG) 19	
3.2 MODELOS DE EROSÃO EM ENCOSTAS.....	20
3.3 MODELOS FÍSICOS E NUMÉRICOS.....	21
3.4 O MODELO DE EQUAÇÕES UNIVERSAIS DE PERDA DE SOLO (EUPS)	22
4 METODOLOGIA.....	23
4.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	23
4.2 LOCAL DE ESTUDO	24
4.3 DETERMINAÇÃO DOS FATORES DA EUPS (EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO).....	25
4.4 DETERMINAÇÃO DA ERODIBILIDADE DOS SOLOS - FATOR K.....	26
4.5 DETERMINAÇÃO DA EROSIVIDADE DAS CHUVAS – FATOR R	27
4.6 DETERMINAÇÃO DO USO E MANEJO DO SOLO FATOR CP	27
4.7 DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO DA RAMPA E DA DECLIVIDADE FATOR	28
4.8 DETERMINAÇÃO DO FATOR A	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31

5.1 - FATOR K- ERODIBILIDADE DOS SOLOS.....	31
5.2 - FATOR R - EROSIVIDADE DAS CHUVAS	33
5.3 - FATOR CP - USO E MANEJO DO SOLO.....	34
5.4 - FATOR LS - COMPRIMENTO DA RAMPA E DA DECLIVIDADE	37
5.5 – FATOR A.....	44
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A busca pela transição energética com menos carbono, ao mesmo tempo preservando a segurança energética, tem levado diversos países a aumentarem a participação do gás natural em sua matriz energética. Nos últimos anos o Brasil teve o aumento significativo no consumo de gás natural e uma previsão de maior produção e investimentos na malha de gasodutos (IBP,2023).

O transporte de gás natural por meio de gasodutos é uma parte vital da infraestrutura energética do Brasil, facilitando o movimento eficiente do gás das áreas de produção para os centros de consumo em todo o país (RTDT,2011). Um dos grandes problemas enfrentado pelas empresas transportadoras de gás natural, é a questão de erosões nas faixas de dutos, uma vez que há a possibilidade de expor o duto e comprometer integridade dele, resultando em danos sociais, em segurança, ambientais e econômicos.

Além de que, a recuperação das áreas erosivas tem custo elevado sobretudo quando estão em estágio progressivo, dessa forma a melhor alternativa de mitigações aos impactos provocados por esses processos ainda é a prevenção fornecido por mapeamentos dessas áreas. Dessa forma o mapeamento das áreas que são mais suscetíveis a erosão é de extrema importância para a realização de medidas preventivas e da realização de planos de inspeção eficientes com a maior frequência de acompanhamento dessas áreas tendenciosas à erosão (DAVID MONTGOMERY,2007).

Essa abordagem preventiva não só ajuda a proteger a infraestrutura de transporte de gás natural, mas também contribui para a preservação do meio ambiente e para a redução de riscos sociais e econômicos associados à erosão nas faixas de dutos. Portanto, investimentos em tecnologias de mapeamento e monitoramento das áreas de risco são essenciais para garantir a segurança e a eficiência do transporte de gás natural (RATTAN LAL,2005).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar o mapeamento de áreas suscetíveis a erosão por meio do uso de geotecnologias em um trecho da faixa de dutos Guamaré – Cabo (GASFOR).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificação de Variáveis Ambientais Relevantes para o processo erosivo;
- Coleta de Dados Geoespaciais da área estudada;
- Desenvolvimento e utilização de Modelos de Suscetibilidade à Erosão;
- Mapeamento de Áreas Suscetíveis à Erosão

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 – MERCADO DE GÁS NATURAL

A busca pela transição energética com menos carbono, ao mesmo tempo preservando a segurança energética, tem levado diversos países a aumentarem a participação do gás natural em sua matriz energética, por tratar-se de uma fonte mais limpa em comparação com os combustíveis fósseis convencionais.

Dessa forma, o mercado de gás natural global vem passando por várias mudanças significativas nos últimos anos, com vários países buscando expandir o uso e a infraestrutura do gás natural. Investimentos em infraestrutura de transporte, como gasodutos e terminais de GNL (Gás Natural Liquefeito), para facilitar o comércio de gás natural. Segundo a International Energy Agency (IEA,2021), o consumo global de gás natural atingiu aproximadamente 4.138 bilhões de metros cúbicos em 2020.

O Brasil, por exemplo, implementou alterações regulatórias com o intuito de promover a abertura e a competitividade no mercado de gás natural, visando atrair investimentos e reduzir os custos. Em 2021, foi promulgada a Nova Lei do Gás (Lei 14.134/2021), com o propósito de aumentar investimentos na infraestrutura de gás natural e incentivar a concorrência no setor. Essa legislação recém-aprovada tem como objetivo principal atrair investimentos do setor privado para impulsionar o

desenvolvimento da infraestrutura de gás natural, resultando em maior competição e eficiência no mercado. Isso inclui a realização de projetos de expansão da infraestrutura, como a construção de gasodutos para melhorar a capacidade de transporte e armazenamento.

No ano de 2020, as reservas comprovadas de gás natural totalizaram 338 bilhões de metros cúbicos, divididas em 77 bilhões de metros cúbicos (23%) em áreas terrestres e 261 bilhões de metros cúbicos (77%) em áreas marítimas. A produção global atingiu 45,9 bilhões de metros cúbicos durante esse período, conforme indicado no Boletim de Recursos e Reservas de Petróleo e Gás Natural publicado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) em 2021 (BAR, 2020).

Conforme destacado no Boletim de Recursos e Reservas de Petróleo e Gás Natural de 2020 (BAR, 2020), divulgado pela Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2021), apesar do aumento significativo no uso de gás natural no Brasil, ainda há uma demanda por investimentos em infraestrutura. Atualmente, o país conta apenas com 9.409 km de gasodutos de transporte, uma extensão que se mantém praticamente constante desde 2010. Essa rede abrange uma área de 8,5 milhões de km² e uma população superior a 210 milhões de habitantes. Em contrapartida, nos Estados Unidos, em 2020, havia mais de 485 mil km de gasodutos de transporte, abrangendo uma área de 9,8 milhões de km² e uma população de 328 milhões de habitantes (BNDES, 2021).

A falta de modernização e expansão da rede de gasodutos no Brasil pode resultar não apenas em acidentes, mas também em perdas econômicas significativas. Acidentes envolvendo vazamentos de gás natural podem causar danos ambientais, riscos à saúde pública e prejuízos financeiros para as empresas do setor. Além disso, a dependência de uma infraestrutura defasada pode dificultar a implementação de políticas energéticas mais sustentáveis e eficientes (OLIVEIRA, JS E SILVA, AM 2020).

Com o crescente uso do gás natural, é necessário garantir a produção e transporte de forma segura, eliminando qualquer potencial para acidentes. A segurança no fornecimento do gás natural é crucial não apenas para proteger o meio ambiente, mas também para resguardar a integridade das comunidades e as operações das empresas envolvidas.

2.2 CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DA FAIXA DE DUTOS DE GÁS.

O transporte de gás natural por meio de infraestruturas de gasodutos que são dutos terrestres de transporte, transferência e de escoamento da produção que movimentam gás natural, são estruturas que permitem o transporte eficiente do combustível desde os locais de produção até os pontos de consumo, como indústrias, residências e estabelecimentos comerciais (RDT,2011). Além disso, desempenham um papel vital na infraestrutura energética, possibilitando o fornecimento seguro e eficiente de gás natural em larga escala, contribuindo para o atendimento das demandas energéticas de diferentes setores da sociedade.

Existe uma área delimitada, com uma extensão de 20 metros, que acompanha a rota dos dutos terrestres na superfície. Esta região é frequentemente conhecida como faixa de dutos ou faixa de serviço. A faixa é considerada uma parcela de terreno com uma largura específica, ao longo da direção dos dutos, legalmente designada para atividades como construção, montagem, operação, inspeção e manutenção dos dutos, além de servir como uma área de segurança para terceiros. Essa área protege a trajetória dos dutos, identificando os pontos de instalação de equipamentos e sinalizando locais onde escavações, construções, ocupações, queimadas e outras obras não são permitidas. As faixas de dutos atravessam áreas tanto urbanas quanto rurais em todo o país (RTDT, 2011).

2.3 NECESSIDADE DE MONITORAMENTO E PREVENÇÃO.

A aplicação de tecnologias avançadas com geotecnologias e monitoramento geotécnico, possibilita uma análise mais precisa e eficiente das condições do solo nas proximidades dos gasodutos. Dessa forma, o acompanhamento ativo das erosões nas faixas de dutos desempenha um papel crucial na salvaguarda da infraestrutura, na promoção da segurança operacional e na preservação ambiental, contribuindo para a sustentabilidade e eficácia a longo prazo do sistema de distribuição de gás.

O monitoramento atento de áreas suscetíveis a erosões desempenha um papel fundamental na identificação precoce de problemas potenciais. Ao detectar áreas propensas a erosões antes que elas atinjam um estágio crítico, torna-se possível implementar medidas preventivas para mitigar os riscos. Essas medidas podem incluir a

estabilização do solo, o controle do terreno, a construção de barreiras físicas e a implementação de sistemas de deslizamento adequados (OLIVEIRA E SILVA, 2020).

2.4 EROÇÃO E CONSERVAÇÃO DO SOLO

Erosão é o processo de desgaste da superfície da Terra, incluindo o solo, rochas e depósitos sedimentares, por ação de fatores naturais como a água, vento e gelo, muitas vezes exacerbado por atividades humanas (DAVID MONTGOMERY, 2021).

A erosão, um fenômeno natural que ocorre devido à ação de agentes como água, vento e gelo, representa um desafio significativo para a estabilidade do solo. Sua definição abrange a remoção e deslocamento da camada superficial da Terra, resultando na exposição de áreas desprotegidas. A ação constante desses agentes erosivos pode ter impactos profundos e duradouros no solo, afetando sua qualidade e produtividade. Existem vários tipos de erosão, incluindo erosão hídrica (causada pela água, como chuva ou correntes de água), erosão eólica (provocada pelo vento), erosão glacial (associada à ação do gelo) e erosão causada por atividades humanas, como a erosão do solo devido à agricultura intensiva (SMITH ET AL., 2020).

Os impactos da erosão no solo são significativos e podem incluir a perda da camada fértil, redução da capacidade de retenção de água, degradação da qualidade do solo e consequências adversas para a biodiversidade e ecossistemas.

Perda de solo por consequência da erosão é uma das questões ambientais mais presentes na atualidade e que tem ocasionado a alteração de diversos recursos naturais, sobretudo do solo e da água. O processo físico de erosão hídrica consiste em três etapas que são: desagregação, transporte e deposição dos sedimentos (PRUSKI, 2009).

A conservação do solo emerge como uma prioridade crucial, particularmente em áreas de importância estratégica, como a faixa de dutos de gás. A preservação efetiva do solo desempenha um papel fundamental na manutenção da estabilidade dessas regiões críticas, evitando a degradação do solo e seus efeitos adversos. O manejo adequado do solo não apenas preserva sua fertilidade, garantindo a sustentabilidade agrícola nessas áreas, mas também desempenha um papel vital na segurança e integridade das infraestruturas, como dutos de gás. A compactação do solo, erosão e deslizamentos de terra representam riscos significativos para a segurança dessas instalações.

Portanto, estratégias de conservação do solo, como a implementação de práticas agrícolas sustentáveis, revegetação e técnicas de engenharia do solo, tornam-se imperativas para mitigar esses riscos e garantir a funcionalidade contínua e segura da infraestrutura de dutos de gás. É importante mencionar, a necessidade premente de considerar a conservação do solo como uma parte integral do planejamento e gestão de áreas críticas, promovendo assim a harmonia entre o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental (SHRESTHA ET AL. 2018).

Um dos grandes problemas enfrentados pelas empresas transportadoras de gás natural, é a questão de erosões nas faixas de dutos, uma vez que há a possibilidade de expor o duto e comprometer a integridade dele, resultando em danos sociais, ambientais e econômicos. A vigilância das erosões ao longo das faixas de dutos de gasodutos é de suma importância para assegurar a integridade e segurança dessas infraestruturas.

Erosões têm o potencial de comprometer a estabilidade do solo próximo aos gasodutos, elevando o risco de movimentação do solo e, conseqüentemente, danos aos dutos, podendo resultar em deslizamentos de terra, expondo os dutos e aumentando a probabilidade de danos acidentais, como vazamentos ou rupturas. O monitoramento de áreas suscetíveis a erosões é importante na identificação de áreas propensas a erosões antes que se tornem críticas, possibilitando a implementação de medidas preventivas antes que ocorram problemas mais graves (SANTOS ET AL., 2019).

Nesse contexto, a compreensão e aplicação de práticas inovadoras e eficazes de conservação do solo emergem como um componente essencial para garantir a sustentabilidade de áreas estratégicas, como a faixa de dutos de gás.

2.5 GEOTECNOLOGIAS NA ANÁLISE DE EROSÃO

A aplicação de geotecnologias na análise de áreas suscetíveis à erosão é fundamental para promover uma abordagem mais eficaz e sustentável na gestão do solo. A justificativa para o uso dessas tecnologias abrange diversos aspectos que contribuem para uma compreensão mais abrangente e precisa dos processos erosivos (JOHNSON ET AL., 2018).

No monitoramento em tempo real as geotecnologias, como o sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica (SIG), possibilitam o monitoramento em

tempo real das mudanças na cobertura do solo. Isso permite uma detecção rápida de áreas propensas à erosão, permitindo intervenções imediatas.

A utilização de geotecnologias também permite uma análise detalhada do terreno, incluindo topografia, declividade e uso da terra. Essas informações são cruciais para identificar áreas de maior vulnerabilidade à erosão e direcionar esforços de conservação de forma precisa. A capacidade de mapear o uso da terra com precisão por meio de imagens de satélite e dados de sensoriamento remoto é essencial e isso possibilita a identificação de práticas inadequadas, como o desmatamento, que podem aumentar a suscetibilidade à erosão (CHEN ET AL, 2019).

As geotecnologias facilitam a integração de dados multidisciplinares, como climatologia, hidrologia e geologia. Essa abordagem proporciona uma compreensão mais abrangente dos fatores que contribuem para a erosão, possibilitando estratégias de conservação mais integradas. A modelagem de processos erosivos, utilizando geotecnologias, permite simular cenários e prever áreas de risco, essa abordagem ajuda na implementação de medidas preventivas e estratégias de conservação do solo mais eficazes, otimizando o uso de recursos, direcionando intervenções específicas para áreas prioritárias, resultando em uma abordagem mais eficiente e econômica na gestão da erosão (WANG ET AL., 2020).

Assim, a aplicação de geotecnologias na análise de áreas suscetíveis à erosão é justificada pela capacidade dessas ferramentas em fornecer dados precisos, monitoramento em tempo real e suporte à tomada de decisões informadas, contribuindo significativamente para a sustentabilidade ambiental e a gestão eficiente do solo.

A aplicação de geotecnologias na análise de erosão representa um avanço significativo na compreensão e gestão desse fenômeno complexo. Ao integrar ferramentas como sensoriamento remoto, sistemas de informação geográfica (SIG) e modelagem computacional, é possível realizar uma análise mais abrangente e precisa dos processos erosivos em diferentes ambientes. Diversos autores têm contribuído para a fundamentação teórica e prática dessa abordagem.

A utilização de geotecnologias permite monitorar em tempo real as mudanças na cobertura do solo, identificando áreas propensas à erosão. Essa capacidade de detecção precoce é crucial para intervenções imediatas e estratégias de conservação eficazes (RENARD ET AL. (1997).

A análise detalhada do terreno, incluindo topografia, declividade e uso da terra é essencial para identificar áreas de maior vulnerabilidade à erosão (MONTGOMERY, 2007). O mapeamento preciso do uso da terra, possível por meio de imagens de satélite e dados de sensoriamento remoto, é fundamental para identificar práticas inadequadas que contribuem para a suscetibilidade à erosão. (FAVIS MORTLOCK, 2016)

A Modelagem de processos erosivos, oferece uma abordagem preditiva, permitindo simular cenários e prever áreas de risco. Essa modelagem, quando incorporada às geotecnologias, proporciona uma compreensão mais holística e dinâmica dos processos erosivos ao longo do tempo.

A integração de dados multidisciplinares, incluindo climatologia, hidrologia e geologia, é essencial. As geotecnologias facilitam essa integração, fornecendo uma visão abrangente dos fatores que contribuem para a erosão, possibilitando estratégias de conservação mais integradas (NIELSEN, 1993).

Dessa forma, a análise de erosão com o suporte de geotecnologias oferece uma abordagem abrangente e eficaz para compreender, monitorar e gerenciar processos erosivos. Ao integrar as contribuições de diversos autores, podemos desenvolver estratégias mais informadas e sustentáveis para a conservação do solo e a prevenção da erosão.

3 MODELOS DE PREVISÃO E MAPEAMENTO DE EROSÃO

Como é notável, a erosão do solo é um fenômeno ambiental significativo que pode resultar em sérias consequências. Para amenizar os impactos, a utilização de modelos de previsão e mapeamento de erosão torna-se crucial. Devido às dificuldades de métodos aplicáveis para a estimativa de erosão, surgiu a necessidade do desenvolvimento de modelos matemáticos para estimativas, análises e mapeamentos dos processos erosivos.

3.1 MODELOS BASEADOS EM SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) desempenham um papel crucial no mapeamento da erosão, são tecnologias poderosas que possibilitam a coleta,

análise e visualização de dados geoespaciais, desempenhando um papel central na compreensão da erosão e na implementação de estratégias de conservação, destacando a capacidade dos SIG em lidar com a complexidade espacial, proporcionando uma visão aprimorada dos processos erosivos em escala geográfica. (TOMLINSON, R.F. ,2003).

Este modelo, permite a integração de dados provenientes de diversas fontes, como imagens de satélite, mapas topográficos e informações climáticas, proporcionando uma visão abrangente das condições ambientais.

Além disso, possibilitam a avaliação precisa de fatores que contribuem para a erosão, incluindo declive, uso do solo, cobertura vegetal e características do solo, resultando em modelos preditivos para estimar a probabilidade e extensão da erosão em áreas específicas, orientando práticas de conservação eficazes, ou seja, é a apresentação prática do conceito de análise espacial, proporcionando a inclusão de dados de fontes distintas para solucionar falhas mais complexas (GOODCHILD, M.F. 1993).

Os SIG facilitam a identificação de áreas suscetíveis à erosão, considerando fatores como tipo de solo, padrões climáticos e características topográficas e sua capacidade de processar dados temporais possibilita o monitoramento contínuo da erosão ao longo do tempo, fornecendo informações cruciais para a gestão sustentável do solo.

Dessa forma a integração contínua de tecnologias de sensoriamento remoto e aprimoramento de algoritmos fortalecem a posição dos SIG como aliados fundamentais na preservação da qualidade do solo, sendo crucial para a implementação de medidas preventivas e adaptativas.

3.2 MODELOS DE EROSÃO EM ENCOSTAS.

O modelo de Previsão de Erosão em Encostas (RUSLE), representa uma abordagem abrangente para prever a erosão do solo, especialmente em encostas. Desenvolvido por Wischmeier e Smith em 1965 e revisado ao longo do tempo, o modelo tornou-se uma ferramenta padrão na avaliação e prevenção da erosão.

Foram estabelecidas bases teóricas incorporando fatores como erosividade da chuva, erodibilidade do solo, comprimento e inclinação do declive, cobertura vegetal e práticas de conservação. Esses componentes fundamentais permitem uma análise

holística da dinâmica da erosão em encostas. O RUSLE tem aplicações práticas significativas na conservação do solo. Renard et al. (1997) destacaram a utilidade do modelo na previsão da perda de solo, permitindo a implementação eficiente de práticas de manejo e conservação.

Ademais, o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) na implementação do RUSLE é crucial. A sua grande importância é a integração de dados espaciais para aprimorar a precisão do mapeamento da erosão, proporcionando uma visão abrangente da distribuição espacial dos fatores que influenciam a perda de solo (BURROUGH, MCDONNELL 1998).

O Modelo RUSLE emerge como uma ferramenta indispensável, oferecendo uma abordagem científica sólida para prever e mapear a erosão em encostas. Sua aplicação eficaz, especialmente quando integrada a SIG, promove uma gestão sustentável do solo.

3.3 MODELOS FÍSICOS E NUMÉRICOS

Os avanços na computação têm permitido o desenvolvimento de modelos mais sofisticados para a compreensão e previsão da erosão do solo.

Os modelos numéricos, utilizam algoritmos e equações matemáticas para simular os processos erosivos em uma escala mais ampla e detalhada. Meyer e Foster desenvolveram modelos computacionais baseados em princípios físicos, como a Equação de Transporte de Sedimentos, que descreve a movimentação das partículas de solo sob a influência da água. Esses modelos consideram uma variedade de variáveis, como a textura do solo, a intensidade da chuva e a topografia do terreno, para prever padrões de erosão em diferentes cenários (MEYER, FOSTER, 1972).

Uma das principais vantagens dos modelos numéricos é sua capacidade de integrar dados provenientes de várias fontes, como sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas (SIG) e observações de campo. Pesquisadores tem explorado o uso de imagens de satélite e dados topográficos de alta resolução para calibrar e validar seus modelos, permitindo uma análise mais precisa e abrangente da erosão em diferentes escalas espaciais e temporais.

Apesar dos avanços significativos alcançados por modelos físicos e numéricos na compreensão da dinâmica da erosão, ainda existem desafios a serem superados. A modelagem da interação entre processos erosivos e fatores climáticos, por exemplo, continua sendo um campo de pesquisa ativo. Além disso, a aplicação desses modelos em diferentes contextos geográficos e climáticos requer adaptações e validações adicionais.

3.4 O MODELO DE EQUAÇÕES UNIVERSAIS DE PERDA DE SOLO (EUPS)

O Modelo de Equações Universais de Perda de Solo (EUPS)– Universal Soil Loss Equation (USLE) (WISCHMEIER & SMITH, 1978). É um dos principais modelos de estimativa de perda de solos. Essa abordagem considera fatores como precipitação, erosividade do solo, comprimento de declive, práticas de conservação e cobertura vegetal, fornecendo uma estimativa da perda de solo anual.

Sua aplicação inicialmente foi proposta para pequenas áreas de clima temperado, contudo pode também ser aplicada em regiões tropicais e em escala regional, com enfoque quantitativo, para discriminar áreas de maior e menor suscetibilidade à erosão (MATA ET AL. (2007).

A Equação Universal de perda de solos (EUPS) é o método mais amplamente utilizado em todo o mundo para prever taxas de longo prazo de erosão em áreas agrícolas sujeitas a diferentes práticas de manejo. Este método pode ser aplicado para quantificar as perdas de solo por erosão, buscar alternativas de práticas de conservação para minimizar as perdas conforme os tipos de solo e manejos (CARVALHO, 2012).

A equação da perda de solo é um método essencial na análise e gerenciamento da erosão do solo, desempenhando um papel crucial na preservação da qualidade do solo e na sustentabilidade ambiental, é amplamente utilizada para calcular a taxa de erosão do solo em uma determinada área. A Equação 1 é expressa da seguinte forma:

$$A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

Fator de Erosividade da Chuva (R): Representa a intensidade e quantidade de precipitação, influenciando diretamente a erosão do solo.

Fator de Erodibilidade do Solo (K): Reflete a suscetibilidade do solo à erosão, levando em consideração suas características físicas e químicas.

Fator de Comprimento de Inclinação (L): Considera o comprimento do declive e sua contribuição para a erosão.

Fator de Grau de Declive (S): Leva em conta a inclinação do terreno e seu impacto na erosão do solo.

Fator de Cobertura Vegetal (C): Avalia o tipo e quantidade de vegetação, influenciando a proteção do solo contra a erosão.

Fator de Práticas de Conservação (P): Reflete as medidas tomadas para controlar a erosão, destacando a eficácia das práticas de manejo.

4 METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada a partir do uso de geotecnologias em conjunto com a equação universal de perda de solos, com o objetivo de identificar as áreas de maior susceptibilidade erosiva e compreender as causas e efeitos do potencial da erosão na faixa de dutos. Os procedimentos para avaliação da perda de solo foram executados no software livre o QGIS 3.32. Os dados foram obtidos na literatura, bancos de dados geomorfométricos do Brasil (TOPODATA), como Modelos Digitais de Elevação e suas derivações (altitude, declividade, curvaturas horizontal e vertical, formas do relevo e relevo sombreado). Além de dados da Agência nacional de águas e Saneamento Básico (ANA), do Banco de Dados e Informações Ambientais (BDIA) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e MapBiomias.

4.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa científica pode ser classificada de várias maneiras, dependendo dos objetivos, métodos e abordagens utilizados pelos pesquisadores. A pesquisa foi classificada de acordo com os critérios propostos por Gil (2002).

No que se refere a abordagem a pesquisa pode ser classificada como quantitativa e qualitativa, tornando uma pesquisa mista. Conceituada como quantitativa pois usa da análise e verificação de dados para possibilitar a análise do problema e qualitativa por analisar o contexto e pela descrição dos processos. Nesta pesquisa, a

classificação quantitativa foi aplicada na determinação de dados para a obtenção dos produtos requeridos como por exemplo o Modelo Digital do Terreno e a qualitativa para a análise dos resultados das áreas mais suscetíveis a erosão.

Em relação aos procedimentos utilizados na coleta de dados, a pesquisa pode ser classificada como estudo de caso, uma vez que, ela tem como objetivo apresentar a situação do contexto em que está sendo feita a investigação preservando o caráter unitário do objeto estudado. Nesse caso, é um estudo relacionado à questão de mapeamento de áreas suscetíveis a processos erosivos na faixa de dutos.

Em relação a natureza pode ser classificada como aplicada, pois ela é focada para a verificação de um problema específico e pode gerar soluções para esse problema. Que na pesquisa é a questão de análise de áreas suscetíveis a processos erosivos na faixa de dutos.

4.2 LOCAL DE ESTUDO

A área de estudo, faixa de dutos, está inserida no município de Mossoró, localizado na Mesorregião oeste do Estado do Rio Grande do Norte, a 287 km da capital do Estado, Natal. O município possui área de 2.099,334 km² e com uma população de aproximadamente 264.577 pessoas. (IBGE,2022).

Caracterizada por um clima semiárido, onde predominam longos períodos de estiagem com duração de 7 a 8 meses (de junho a janeiro). Há uma estação de chuvas entre fevereiro e um período muito úmido de março até meados de maio Mossoró (RN), especificamente, registra uma média anual de precipitação pluviométrica de 695,8 mm e uma temperatura média anual de aproximadamente 27,4°C, variando entre 21°C e 36°C (IDEMA, 2002). A Figura 1 Apresenta a localização da área de estudo.

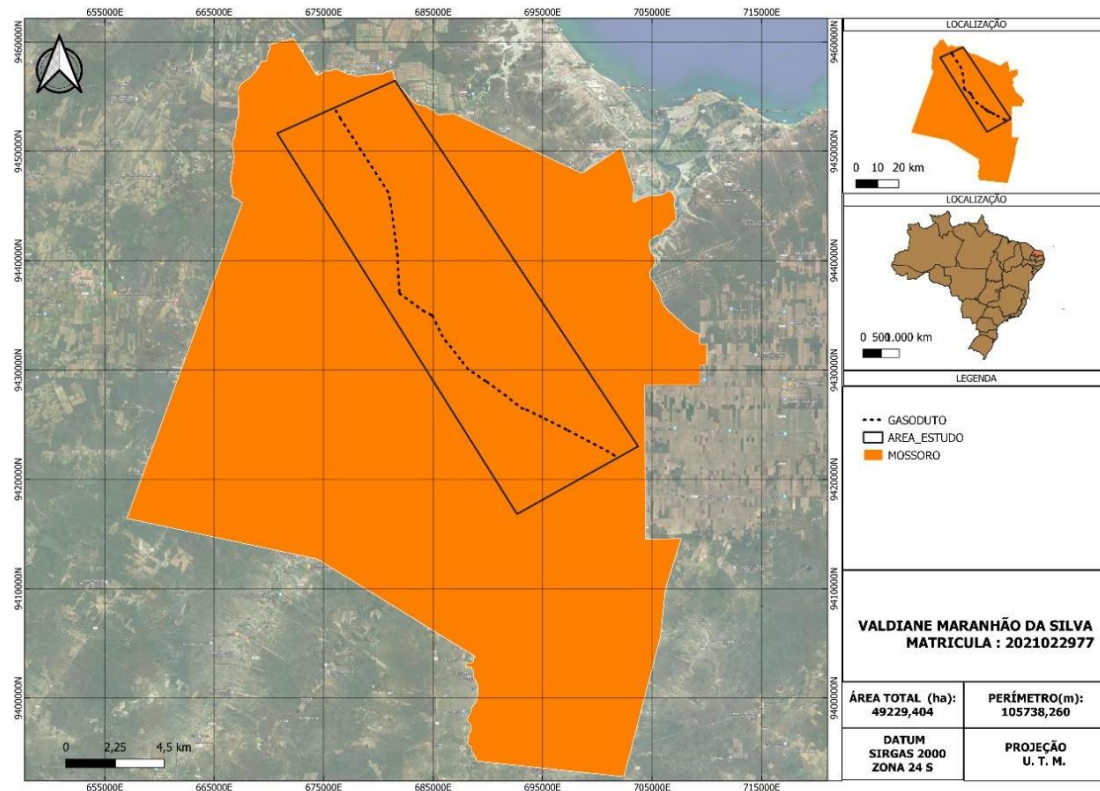


Figura 1 Localização da área de estudo

Fonte: Autoria própria (2024).

4.3 DETERMINAÇÃO DOS FATORES DA EUPS (EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO)

A equação USLE considera fatores naturais e antrópicos, os quais podem ser estimados e especializados a partir de adequação do modelo da USLE em ambiente computacional de um SIG, que permite uma otimização das interpolações dos dados e resultados espaciais mais precisos. Os parâmetros naturais considerados são: clima, solo, relevo e os antrópicos consideram o resultado decorrente quanto ao uso do solo, o que promove impactos diretos (SILVA ET AL, 2007). Os valores dos parâmetros R, K, LS e CP são estimados através de mapas temáticos desenvolvidos com o uso das ferramentas de Sistema de Informações Geográficas.

A equação Universal de perda de solo correlaciona os fatores que influenciam na erosão do solo. Erosividade da chuva (R), erodibilidade do solo (K), comprimento da encosta (L), declividade da encosta (S), cobertura vegetal (C) e práticas conservacionistas adotadas (P).

As etapas do processamento dos dados seguem abaixo:

- Aquisição do Modelo Digital de Elevação (MDE) fornecido pelo TOPODATA;
- Obtenção do mapa de uso da terra e cobertura vegetal através da classificação da área de estudo;
- Realização do mapa de solos baseado em dados pedológicos do Brasil;
- Obtenção da erosividade da chuva;
- Interpolação dos mapas com os fatores da USLE resultando na análise das áreas mais suscetíveis à erosão na faixa de dutos.

4.4 DETERMINAÇÃO DA ERODIBILIDADE DOS SOLOS - FATOR K

A capacidade de um solo para resistir à erosão, representada pela erodibilidade (K), reflete sua suscetibilidade à ação erosiva da chuva e sua capacidade de se manter intacto ao longo do tempo, mesmo sem cobertura vegetal (CARVALHO, 1994). A determinação do fator K pode ser realizada por meio de abordagens diretas ou indiretas. No entanto, os métodos diretos demandam trabalho de campo extensivo, tempo e investimentos financeiros significativos (LIMA et al., 2007).

Conforme mencionado por Florenzano (2011), as características dos solos influenciam o tipo e a intensidade da erosão, resultando em um fator K específico para cada tipo de solo. Este fator depende de uma série de atributos, tais como textura, teor de matéria orgânica, estrutura e permeabilidade (RESENDE, 1985). Portanto, neste estudo a erodibilidade foi avaliada de forma indireta, foram compilados os resultados de diversas pesquisas realizadas que contém as características pedológicas semelhantes às da região de estudo, conforme descrito nos passos a seguir:

- Aquisição do shape de solos da região de Mossoró. O shape foi obtido no Banco de Dados e Informações Ambientais (BDIA) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE);
- Verificação dos dados de erodibilidade dos tipos de solo existentes no local de estudo;
- Especificação dos índices K de erodibilidade com dados da literatura, a partir dos solos da área de estudo;
- Mapa de erodibilidade.

4.5 DETERMINAÇÃO DA EROSIVIDADE DAS CHUVAS – FATOR R

O fator da erosividade das chuvas indica a capacidade da chuva e da água da que pode causar erosão em uma região desprovida de vegetação. Para este estudo, os valores anuais de precipitação pluviométricas foram extraídos das isoietas e para o valor de média mensal de precipitação foram usados os valores de média anual de precipitação dividido pelo número de meses em um ano, que são 12. As isoietas são contornos que representam áreas de igual quantidade de precipitação, geralmente expressa em milímetros, disponibilizadas no catálogo de metadados da ANA.

A partir dos dados de Precipitação pluviométrica, foi obtido o fator de erosividade aplicando a Equação 2 formulada por Bertoni e Lombardi Neto (1990), onde 'p' representa a média mensal de precipitação em milímetros, e 'P' é a média anual de precipitação em milímetros por ano.

$$Fator R = 67,355 \times \left(\frac{p^2}{P}\right)^{0,85} \quad (2)$$

4.6 DETERMINAÇÃO DO USO E MANEJO DO SOLO FATOR CP

Os impactos causados pela existência da cobertura vegetal, que é vista como uma barreira natural para a erosão do solo, podem ser categorizados da seguinte forma: dispersão da água; interceptação e evaporação das gotas de chuva; proteção direta contra o impacto das gotas de chuva; aumento da capacidade de retenção de água; decomposição das raízes das plantas, as quais facilitam a infiltração da água e diminuem a velocidade do escoamento superficial (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012).

O fator C é empregado para avaliar como as culturas cultivadas e as práticas associadas à sua manutenção influenciam os níveis de erosão do solo, ou seja, está diretamente ligado ao manejo da terra e à cobertura vegetal na área em questão. Já o fator prático conservacionista (P) verifica a relação entre a perda de solo em uma prática conservacionista específica e a perda correspondente quando a cultura é cultivada em declives. Os fatores C e P podem variar ao longo do tempo devido a mudanças na intensidade e na forma de uso da terra, assumindo valores de até 1 para solo descoberto

e valores inferiores a 1 à medida que a cobertura do solo aumenta, o que resulta em menor erosão do solo (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

Para a verificação dos valores do fator CP da área estudada foram realizados os seguintes passos:

- Obtenção do shape do uso e ocupação do solo da área estudada, ele foi obtido no site <https://www.geoaplicada.com/dados-espaciais/> Acessado dia 04/03/2024;
- Verificação das classes de uso e ocupação do solo no MapBiomass, que é uma rede colaborativa, formada por ONGs, universidades e startups de tecnologia, produzem o mapeamento anual da cobertura e uso da terra e monitoramos a superfície de água e cicatrizes de fogo mensalmente com dados a partir de 1985(MapBiomass,2024);
- Classificação do Fator CP a partir das classes de uso e ocupação a partir da literatura;
- Conversão do mapa dos fatores CP em formato raster.

4.7 DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO DA RAMPA E DA DECLIVIDADE FATOR LS

Os fatores L e S representam a influência da topografia na erosão do solo (normalmente, os fatores L (comprimento da encosta) e S (declividade da encosta) são considerados juntos para prever a erosão, e os valores que compõem o fator LS podem ser determinados diretamente no terreno ou a partir de dados altimétricos Modelo Digital de Elevação. Esses fatores estão associados ao relevo, que influencia a intensidade do escoamento superficial e, conseqüentemente, o grau de perda de SOLO (RENARD ET AL., 1997).

Para a determinação do fator de declividade foi aplicada a Equação 3 desenvolvida por McCool et al (1987), e para a determinação do fator L, foi utilizada a Equação 4 desenvolvida por Desmet e Govers (1996), aplicando essas equações no software QGIS utilizada como parte da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS).

$$\beta = \frac{\left(\frac{\sin \theta}{0,08696}\right)}{(3 \sin \theta^{0,8} + 0,56)} \quad (3)$$

Onde,

β = quociente entre a erosão em sulcos e entre sulcos

$\emptyset$ = Declividade em graus

$$L_{ij} = \frac{((A_{ij} + D^2)^m + 1 - (A_{ij})^{m+1})}{X_{ij}^m \times D^{m+2} \times 22,13^m} \quad (4)$$

Onde,

L_{ij} = fator de comprimento de uma célula com coordenadas(i,j);

A_{ij} = Area de contribuição de uma célula com coordenadas (i,j)(M^2)[flow accumulation];

D = tamanho da grade de células (m);

X_{ij} = Valor da direção do fluxo;

m = coeficiente dependente da declividade;

Para a verificação dos valores do fator LS da área estudada foram realizados os seguintes passos:

- Obtenção do Modelo Digital de Elevação (MDE);
- Retirada das depressões espúrias, utilizando o modelo Fill sinks (Wang & Liu)
- Geração da raster declividade;
- Geração da raster direção de fluxo;
- Geração do raster de acumulação de fluxo;
- Determinação do fator L;
- Determinação do Fator S,
- Determinação do Fator LS:

4.8 DETERMINAÇÃO DO FATOR A

Para a determinação do Fator A, realizou-se a aplicação da Equação 1, que é a equação universal de Perda de solos.

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

Onde,

R: Fator de Erosividade da Chuva

K: Fator de Erodibilidade do Solo

L: Fator de Comprimento de Inclinação

S: Fator de Grau de Declive

C: Fator de Cobertura Vegetal

P: Fator de Práticas de Conservação

Estando todos os dados consolidados no QGIS, foi realizado a multiplicação das variáveis com ajuda da calculadora raster, retornando o resultado do fator A dado em toneladas por hectare ano. Além disso, após a determinação do fator A foi realizado a classificação de grau de suscetibilidade a erosão. A classificação da erosão foi utilizando o critério de Guimaraes (2011) que é baseado em FAO 1967 (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura), como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 Classificação de perda de solo

MÍNIMO	MÁXIMO	VALOR
0	1	1
1	3	2
3	5	3
5	10	4
10	20	5
20	50	6
50	200	7
200		8

Fonte: GUIMARAES (2011)

Essa classificação de erosão proposta pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) em 1967 é uma das primeiras tentativas sistemáticas de categorizar os diferentes tipos e formas de erosão do solo. Essa classificação é baseada principalmente nos agentes causadores da erosão e nas características dos processos erosivos. A classificação apresenta valores de 1 a 8, onde cada valor corresponde a um intervalo mínimo e máximo de perda de solo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - FATOR K- ERODIBILIDADE DOS SOLOS

A partir dos dados no Banco de Dados e Informações Ambientais (BDIA) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Identificou-se na composição de solos da área estudada que cerca de 40,15% são do tipo Latossolo Amarelo, 5,06% de Latossolo Vermelho, Argiloso 19,78%, Cambissolo 16,23%, Gleissolos Sálcos cerca de 12,33%, presença de água 0,040% e de área urbana cerca de 2,26%. A Figura 2 apresenta a composição do solo da área de estudo.

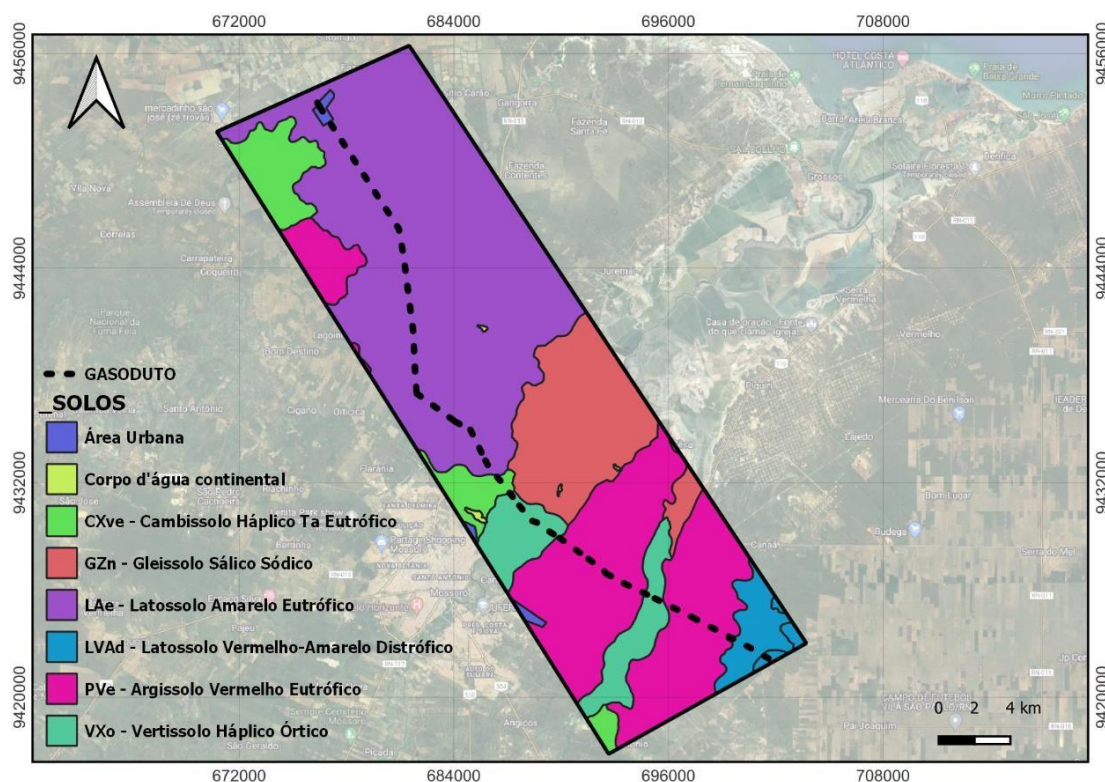


Figura 2 Composição do solo da área de estudo

Fonte: Autoria própria (2024).

A partir dos tipos de solo, verificou-se na literatura os valores de K – Fator de Erodibilidade do solo para cada classe do solo. Os valores utilizados estão representados na Tabela 2.

Tabela 2 Fator de erodibilidade do solo

ID	SOLO	K (t ha MJ^{-1} mm^{-1} ;	REFERÊNCIA
1	Latossolo Vermelho - Amarelo	0,0150	Morais & Sales, (2017)
2	Latossolo Amarelo	0,0277	Morais & Sales, (2017)
3	Cambissolo	0,0175	Silva et al. (2009)
4	Neossolo Flúvico	0,0366	Morais & Sales, (2017)
5	Argissolo Vermelho	0,0592	Morais & Sales, (2017)
6	Gleissolos Sálícos	0,2190	Morais & Sales, (2017)
7	Vertissolo Haplico	0,0262	Chaves et al. (2004)

Fonte: Autoria própria (2024).

O fator de erodibilidade é uma medida que quantifica a suscetibilidade do solo à erosão, ou seja, o quão facilmente o solo pode ser erodido pelos agentes externos. Dessa forma, é verificado que na área de pesquisa, existe uma variação de valores do fator de erodibilidade entre 0 e 0,3 dependendo do tipo de solo, o que significa que fator K com valores menores tem menos suscetibilidade a erosão, diferente de um fator K maior.

É observado que a maior composição do solo da área de estudo é de Latossolo Vermelho – Amarelo o que tem o menor fator de erodibilidade, conseqüentemente é menos suscetível a erosão. Geralmente, demonstram uma baixa erodibilidade, o que pode ser atribuído às quantidades variáveis de óxidos de ferro e alumínio. Os que concedem a esses solos uma boa estrutura, contribuindo com a agregação das partículas e concedendo uma maior resistência à dispersão em água (SILVA ET AL., 2011)

A partir dos valores do fator de erodibilidade de cada tipo de solo, foi criado o mapa de erodibilidade, como mostra a Figura 3.

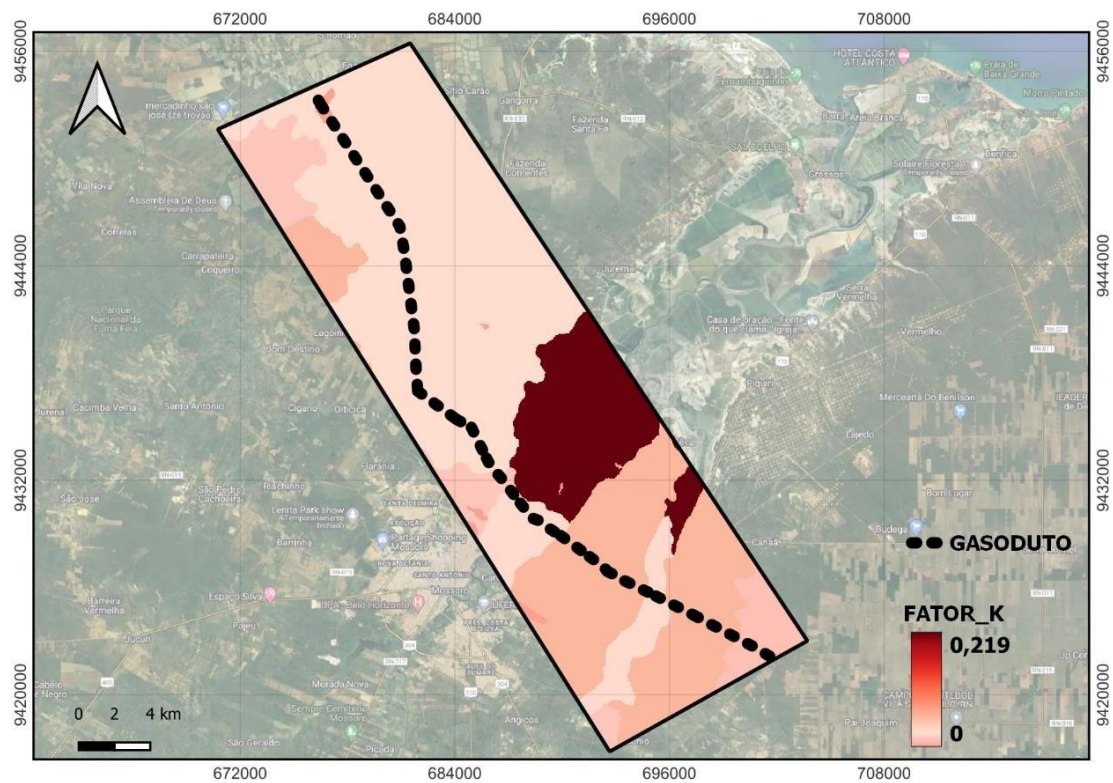


Figura 3 Fator de Erodibilidade
Fonte: Autoria própria (2024).

5.2 - FATOR R - EROSIVIDADE DAS CHUVAS

O fator de Erosividade foi encontrado a partir dos valores de pluviometria anual e mensal. Para a área de estudo foram encontrados os seguintes valores médios de pluviometria anual 800 mm e 900 mm, sendo cerca de uma média de 66,67 mm e 75 mm mensais. A partir desses dados, foram calculados os valores do fator R, utilizando a Equação 2 dos autores Bertoni e Lombardi Neto (1990). Os valores obtidos estão representados abaixo.

$$Fator R = 67,355 \times \left(\frac{P}{P_p}\right)^{0,85} \quad (2)$$

Precipitação Anual de 800 mm

Precipitação Mensal de 66,67 mm

Fator R1 = 163411,24 MJ mm ha⁻¹h⁻¹

Precipitação Anual de 900 mm

Precipitação Mensal de 75 mm

Fator R2 = 180625,90 MJ mm ha⁻¹h⁻¹

O fator de erosividade é uma medida que quantifica a energia e a intensidade das chuvas ou precipitações que podem causar a erosão do solo. Ele representa a capacidade das chuvas de provocar o desprendimento e o transporte de partículas do solo, contribuindo para a degradação dele (RICHARD D. WILLIAMS, 1983). Os fatores de Erosividade resultantes, representa que mesmo a região contendo curtos períodos de chuva, elas apresentam grande grau de erosividade para o solo.

A partir dos valores obtidos de R, realizou-se o processamento e obteve o mapa de fator de erosividade, representado na Figura 4.

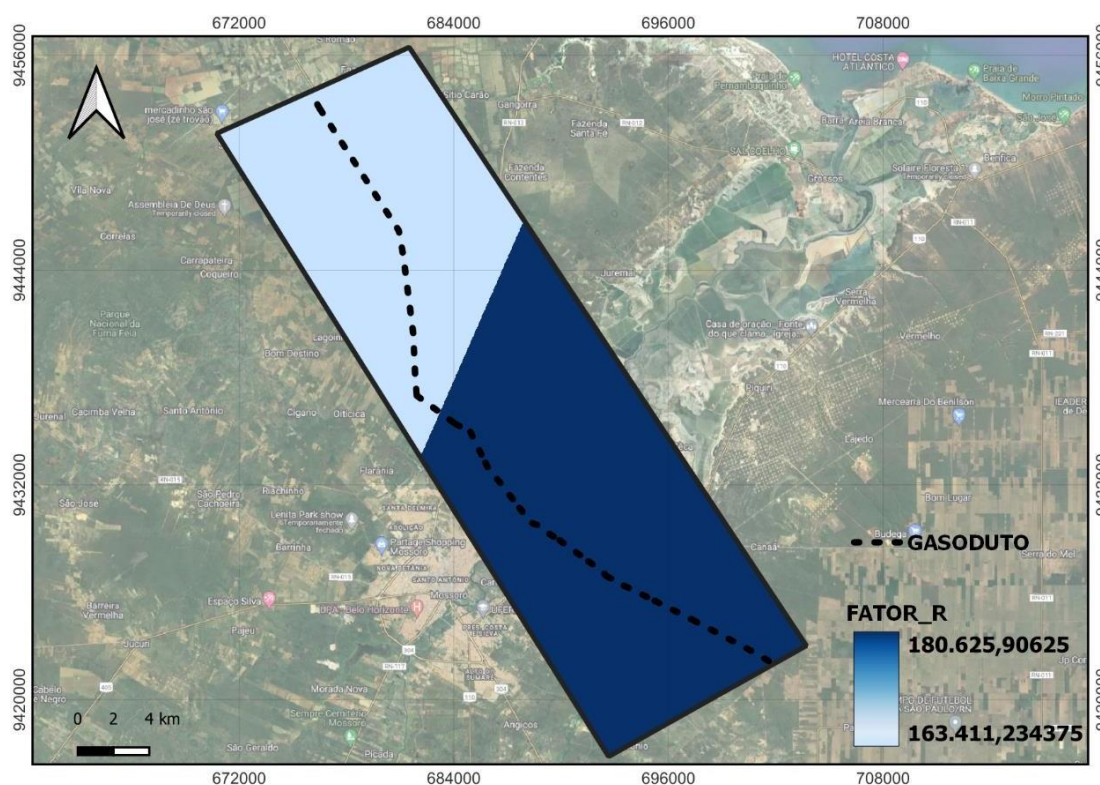


Figura 4 Fator de Erosividade
Fonte: Autoria própria (2024).

5.3 - FATOR CP - USO E MANEJO DO SOLO

Na obtenção do fator CP foi verificado o uso e ocupação do solo da área de abrangência. O fator CP é expresso como uma fração entre 0 e 1, onde 0 representa a ausência de práticas conservacionistas e 1 representa a adoção total dessas práticas. Quanto maior o valor do fator CP, maior será o efeito das práticas conservacionistas na redução da erosão do solo (WISCHMEIER, SMITH, 1978).

A Figura 6, apresenta a divisão em % do uso e ocupação do solo.

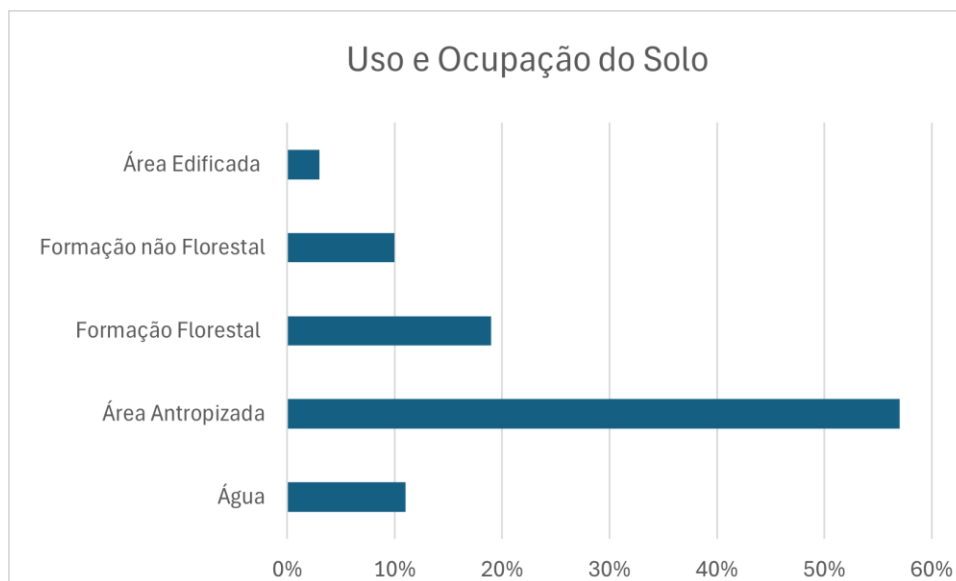


Figura 6 Uso e ocupação do solo
Fonte: Autoria própria (2024).

Depois disso, foi obtido o mapa de cobertura e práticas de conservação, representado na Figura 7. Onde é observado, que as áreas não vegetadas, que englobam as áreas edificadas e alteradas, apresentam maior fator CP, sendo mais suscetíveis a erosão. Visto que, a área de estudo apresenta uma composição maior de área de não formação florestal, de atividades antrópicas e áreas edificadas, o impacto de manejo do solo e da vegetação contribui com o aumento da erosão.

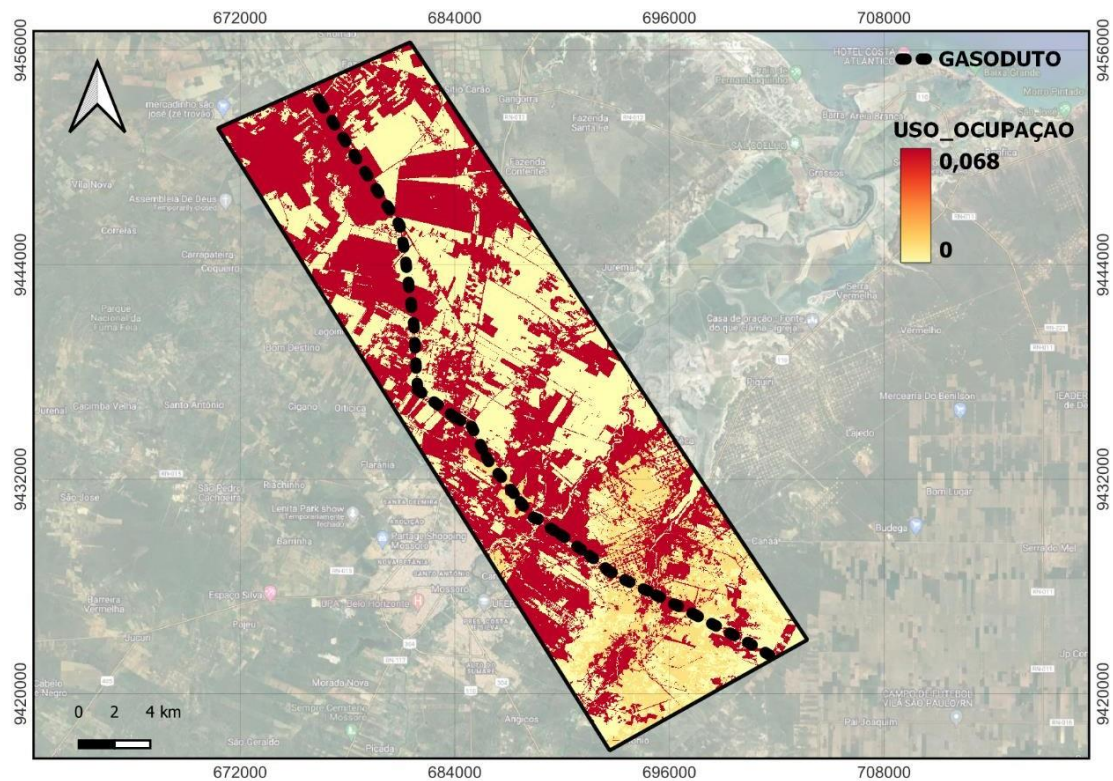


Figura 7 Fator CP

Fonte: Autoria própria (2024).

5.4 - FATOR LS - COMPRIMENTO DA RAMPA E DA DECLIVIDADE

Na realização do Fator LS foram obtidos a partir do MDE onde ele apresenta as diferenças altimétricas da região, nesse caso a área de estudo tem uma altura altimétrica mínima de -0,741703 e máxima de 146,323, como representado na Figura 8.

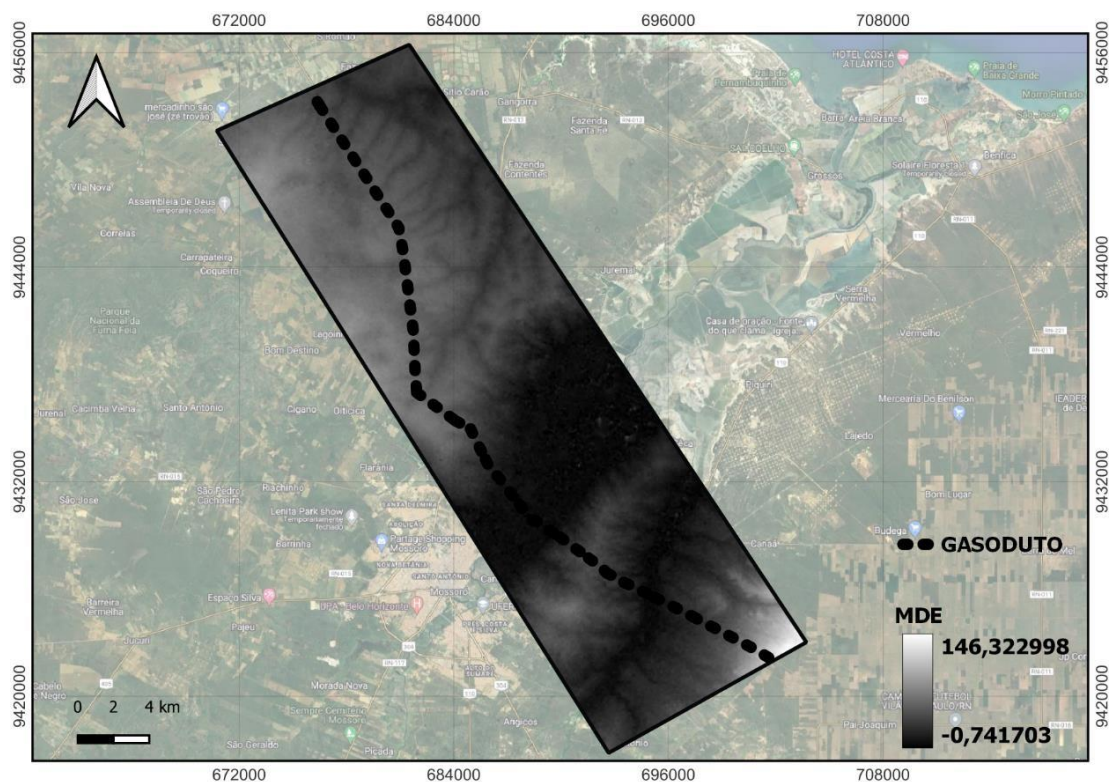


Figura 8 Modelo Digital de Elevação

Fonte: Autoria própria (2024).

A declividade, ou inclinação do terreno, desempenha um papel crucial na dinâmica da erosão, influenciando a velocidade do escoamento superficial de água e, consequentemente, a taxa de remoção de partículas do solo (LAL,1988).

Com o modelo digital de elevação foi verificado a declividade da área de estudo. Onde foi verificado uma variação de 0,000567209 a 12,477, caracterizando as áreas que tem a declividade aproximada de 12% como maior suscetibilidade a remoção de solo, como representado na Figura 9.

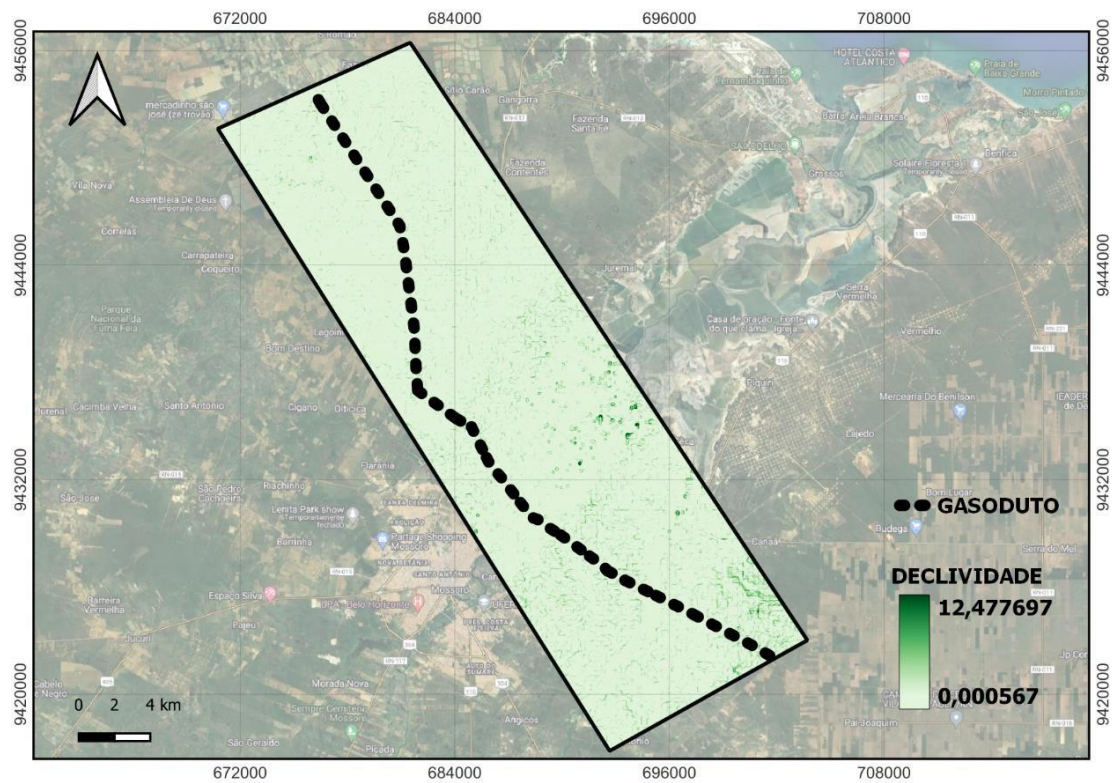


Figura 9 Declividade
Fonte: Autoria própria (2024).

Além da declividade, é considerado o fluxo acumulado como estimativa do comprimento de rampa. É observado, que o acúmulo de fluxo se situa nas regiões aproximadas de rios. A Figura 10 apresenta o fluxo acumulado, realizado a partir da ferramenta *flow accumulation*.

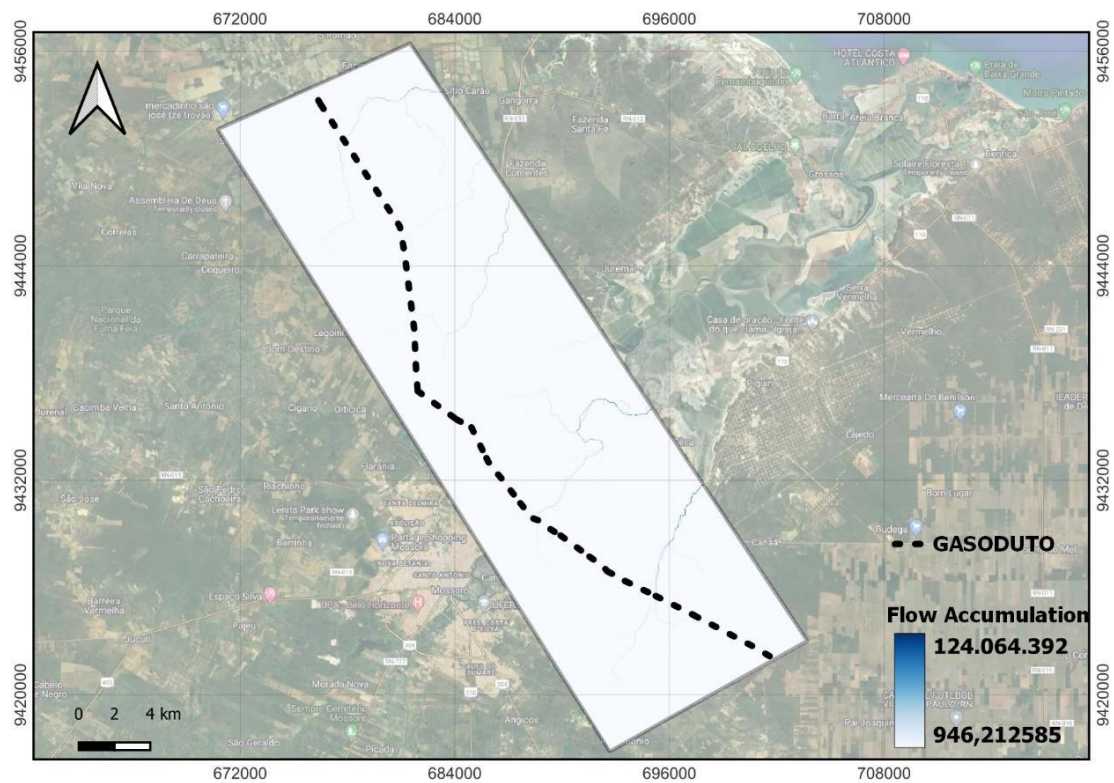


Figura 10 Acúmulo de fluxo
Fonte: Autoria própria (2024).

Além disso, é realizada a verificação da direção do fluxo, apresentada na Figura 11, a qual varia de acordo com o relevo do terreno.

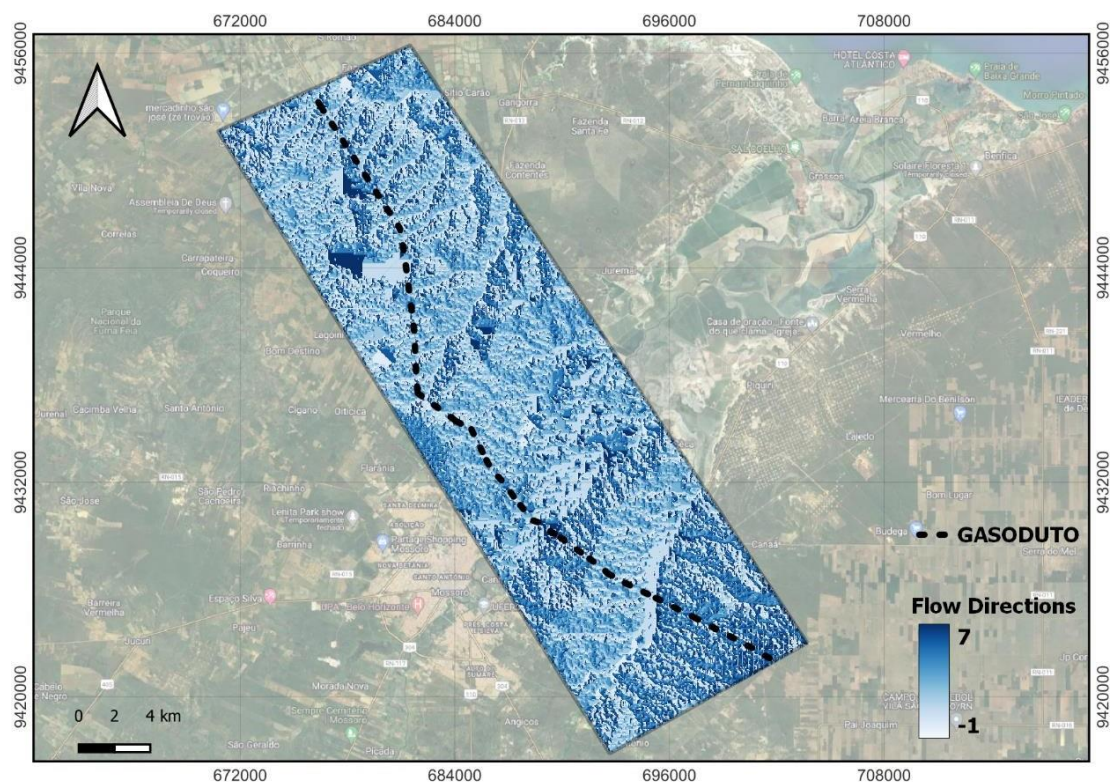


Figura 11 Direção do fluxo
Fonte: Autoria própria (2024).

Contendo as informações do modelo digital de elevação, declividade, acúmulo de fluxo, direção de fluxo e aplicando o conceito de Desmet & Govers (1996), é possível obter o fator L. O fator L, considera o comprimento da encosta ou declive em que ocorre o escoamento superficial da água. Quanto maior o comprimento da encosta, maior a distância que a água percorre, aumentando assim a chance de erosão do solo. Por isso, o fator L é uma medida da extensão do terreno exposto ao escoamento da água da chuva.

A Figura 12, apresenta o fator L do local de pesquisa.

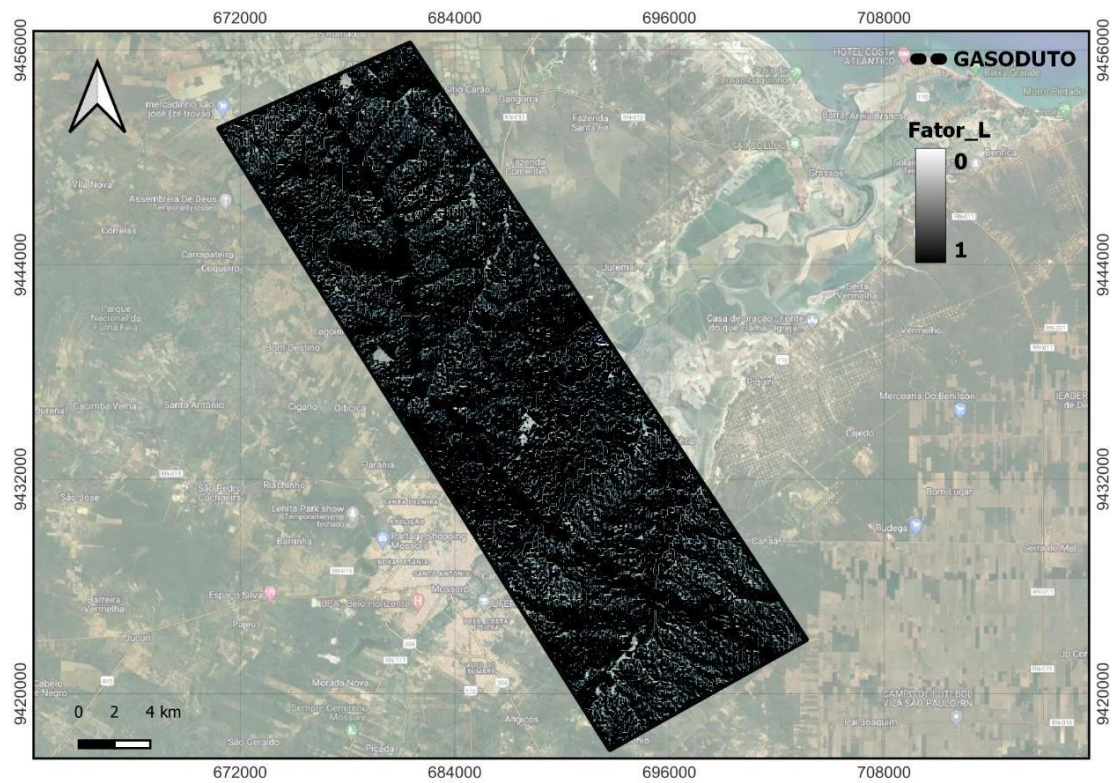


Figura 12 Fator L
Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 13, representa o fator S que foi gerado a partir do MDE e da declividade.

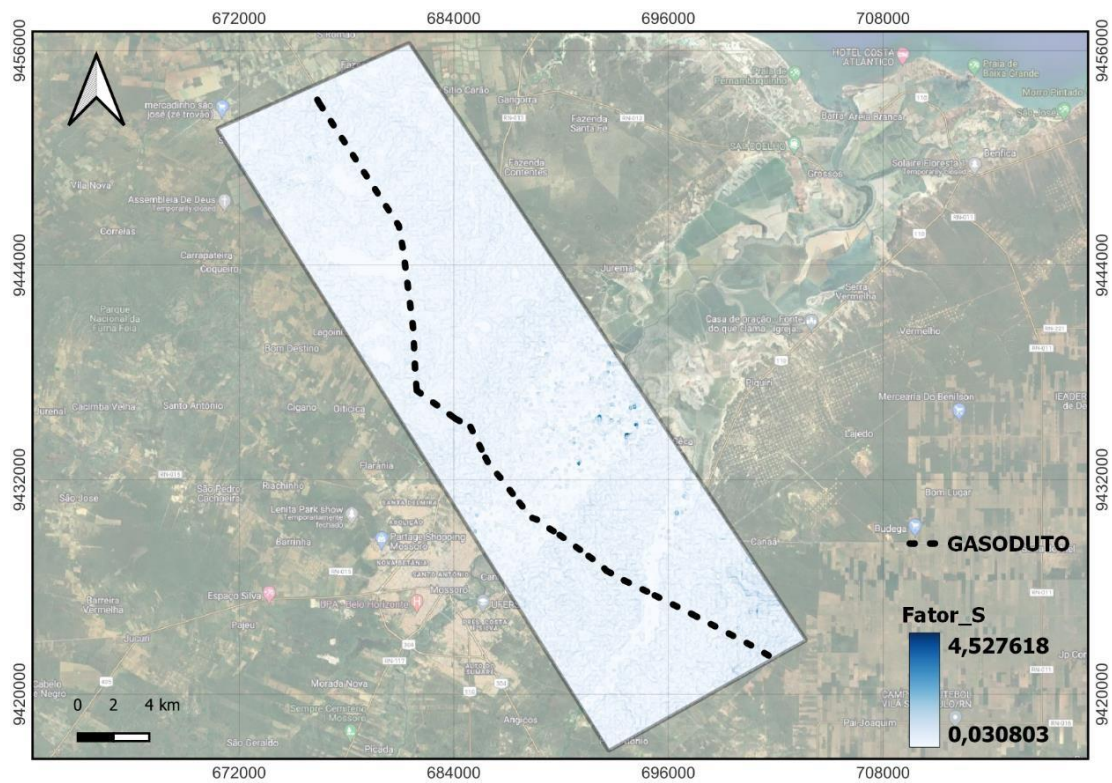


Figura 13 Fator S
Fonte: Autoria própria (2024).

O Fator LS, representado na Figura 14, é obtido realizando o produto do fator de comprimento de rampa (L) pela declividade (S). É possível verificar que na área de estudo prevalece valores próximos dos valores máximos, o que caracteriza taxas maiores de escoamento superficial e consequentemente áreas com mais suscetibilidade a processos erosivos.

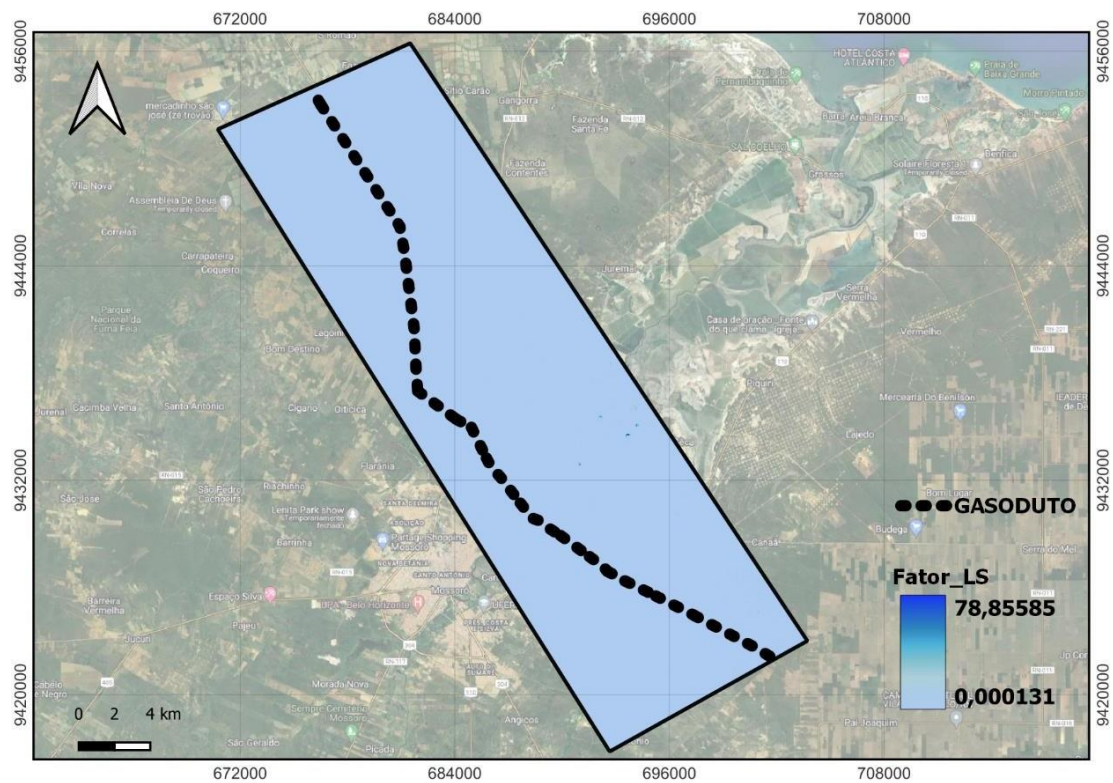


Figura 14 Fator LS
Fonte: Autoria própria (2024).

5.5 – FATOR A

Para a obtenção do fator A é realizado o produto dos fatores R, K, L e S, CP. A Figura 15 apresenta o percentual das classes de erosão, é verificado que cerca de 47% da área de estudo encontra-se com predominância de nenhuma ou ligeira suscetibilidade ao processo erosivo. Cerca de 15% estão como área moderada, 20% como alta e 18% muito alta suscetibilidade a erosão.

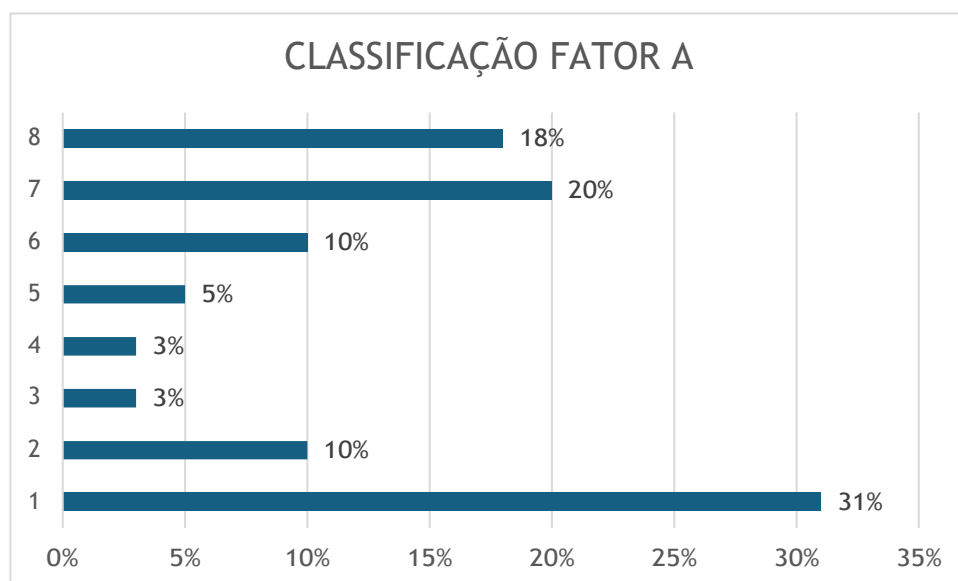


Figura 15 Fator A
Fonte: Autoria própria (2024).

Analisando a figura 16, que apresenta a distribuição territorial das áreas suscetíveis, é verificado que a região que apresenta mais suscetibilidade a processos erosivos contém parâmetros que contribuem para a perda de solo, uma vez que é composto pelo tipo de solo com maior fator de erodibilidade, contém o maior fator de erosividade e maior fator CP, além de apresentar maiores valores de declividade.

A Figura 16 apresenta a distribuição territorial das áreas suscetíveis a processos erosivos.

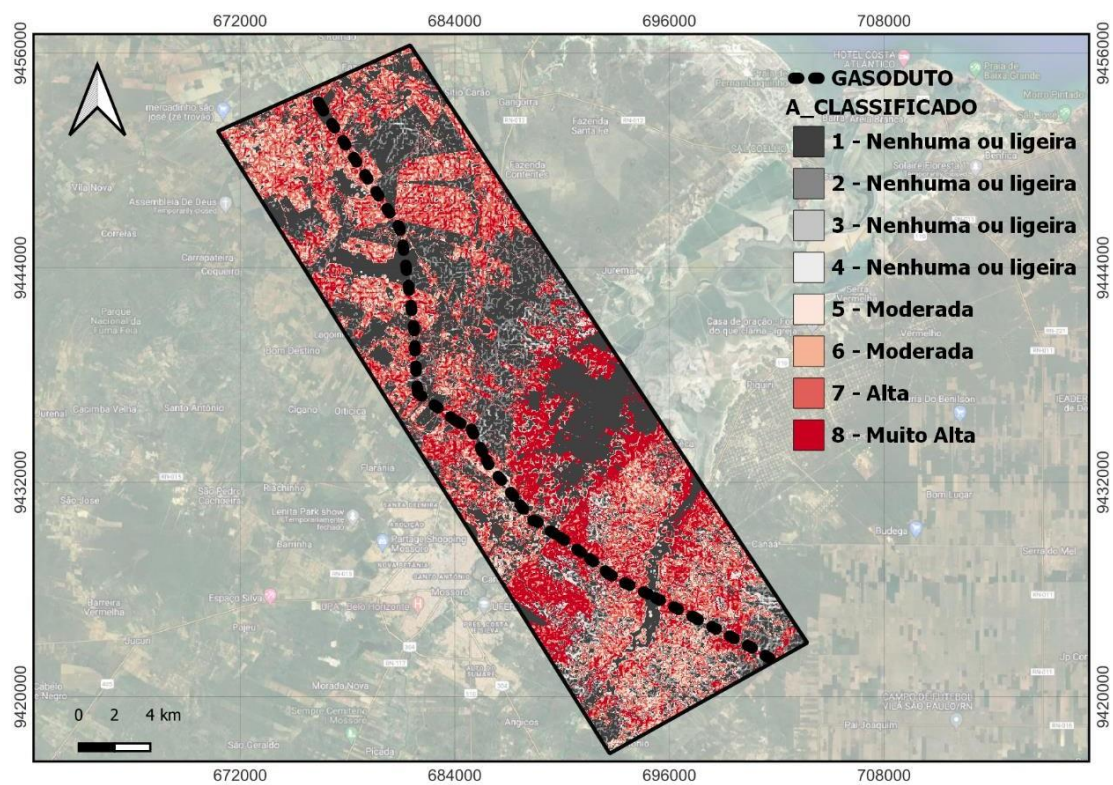


Figura 16 Fator A
Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 17 representa o mapeamento de áreas suscetíveis a erosão na faixa de dutos, onde foram identificadas as classes de moderada, alta e muito alta.

Para futuras pesquisas, é recomendável que estudos adicionais sobre erosividade sejam complementados por trabalhos de campo, incluindo as inspeções locais para uma obtenção mais precisa do modelo USLE com dados mais representativos da área de estudo. Além disso, sugerem que seja realizada uma análise temporal dos processos erosivos, utilizando as geotecnologias como ferramentas para monitoramento contínuo das mudanças ambientais ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **"Boletim Anual da Produção de Gás Natural."** Rio de Janeiro: ANP, 2021.
- BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. L. **Conservação do solo.** São Paulo: Ícone, 2010.
- BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Gás para o desenvolvimento: perspectivas de oferta e demanda no mercado de gás natural do Brasil.** Rio de Janeiro, 2021.
- BURROUGH, PA E MCDONNELL, RA. **Princípios de Sistemas de Informação Geográfica.** Imprensa da Universidade de Oxford, Oxford, 1998.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática: CPRM.** 1994
- CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia prática.** 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. 599 p.
- CHAVES, I. B.; DINIZ, E. J. **Erosividade das chuvas no Estado da Paraíba. In: Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação do Solo, 1981, Recife. Anais...**Recife, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1981, p.136-147.
- CHEN, X., ET AL. **Tecnologias geoespaciais para avaliação da erosão do solo: uma revisão.** Jornal da Sociedade de Ciências do Solo da América, 83(3), 598-609, 2019.
- FAVIS-MORTLOCK, D.T.; GUERRA, A. J. T. **The implications of general circulation model estimates of rainfall for future erosion: a case study from Brazil.** Catena, 37, p. 329- 354, 1999.
- FOSTER, G. R., & MEYER, L. D. **A closed-form soil erosion equation for upland areas. Proceedings of the Meeting on Erosion and Sediment Transport Measurement.** 1972.
- FOSTER, G.R., MCCOOL, D.K., RENARD, K.G., & MOLDENHAUER, W.C. **Conservation Evaluation and Environmental Impact Assessment of Erosion. Soil Science Society of America Journal,** 67(6), 1782-1788, 2003.
- GIL, ANTÔNIO CARLOS. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Editora Atlas S.A, 2002. 57 p.
- GOODCHILD, M.F. **Geographic Information Systems and the Law: Mapping the Legal Frontiers,** 1993.
- GUIMARÃES, R. Z.; LINGNAU, C.; RIZZI, N. E.; SCHEICHI, R. G.; BIANCHI, R. C. **Espacialização da Perda de Solo por Erosão Laminar na Microbacia do Rio Campinas, Joinville SC.** RAEGA, v.23, p.534-554, 2011.
- IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **"World Energy Outlook 2021."** Paris: IEA. 2021

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **População no último censo.** 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/mossoro/panorama>. Acesso em: 05 março. 2024

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Banco de Informações Ambientais.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/23382-banco-de-informacoes-ambientais>. Acesso em: 05 março. 2024

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E MEIO AMBIENTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE. **Atlas para a promoção do investimento sustentável no Rio Grande do Norte.** módulo I: zona homogênea mossoroense. Natal: IDEMA, 2005. 205 p. 1 atlas.

JOHNSON, AB, ET AL. **Tecnologias geoespaciais para análise de suscetibilidade à erosão: uma revisão abrangente.** Revista de Ciências Geográficas, 28(3), 291-307, 2018.

LAL, R. **Effects of slope length, slope gradient, tillage methods and cropping systems on runoff and soil erosion on a tropical Alfisol: preliminar results.** Proceedings of the Porto Alegre Symposium, Sedimen Budgets, IAHS Publ. n.174, 1988.

MATA, C. L., CARVALHO JUNIOR, O. B., CARVALHO, A. P. F., GOMES, R. A. T., MARTINS, E. S., & GUIMARÃES, R. F. **Avaliação Multitemporal da Suscetibilidade Erosiva na Bacia do Rio Urucuia (Mg) por Meio da Equação Universal de Perda de Solos.** Revista Brasileira de Geomorfologia, [S.L.], 8(2), 1-17, 18 dez. Revista Brasileira de Geomorfologia. ,2007.

MEYER, L. D., & FOSTER, G. R. **A computer model for estimating sediment yield from agricultural watersheds.** Journal of Hydrology, 34(1-2), 29-42. 1977

MONTGOMERY, DAVID R. **EROSAO: DOS SOLOS AS CIVILIZAÇÕES.** São Paulo: Edusp, 2021. 376 p.

OLIVEIRA, JS E SILVA, AM. **Desafios e perspectivas para o setor de gás natural no Brasil: uma análise sob a ótica da infraestrutura de transporte.** Revista de Economia Contemporânea, 24(2), e 20191454, 2020.

PRUSKI, F. F. (Ed.). **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica.** Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2006. 240 p. il.

RENARD, K.G., FOSTER, G.R., WEESIES, G.A., MCCOOL, D.K., & YODER, D.C. **Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. USDA Agriculture Handbook No. 703, 1997.

RESENDE, M. **Aplicações de conhecimentos pedológicos à conservação de solos**. Informe Agropecuário, v. 11, n. 128, p. 27-37. 1985.

SANTOS, LA, ET AL. **Avaliação de métodos de monitoramento remoto para detecção precoce de danos em gases enterrados**. XXXI Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, Belo Horizonte, MG, Brasil. 2019

SHRESTHA, R.K., ET AL. Soil conservation practices in the hills of Nepal: A case study of costs and benefits. *Land Degradation & Development*, 29(10), 3531-3543, 2018.

SILVA, A.M.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; AVANZI, J.C. & FERREIRA, M.M. **Erosividade da chuva e erodibilidade de Cambissolo e Latossolo na região de Lavras, Sul de Minas Gerais**. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:1811-1820, 2009

SILVA, M. A.; SILVA, M. L. N.; AVANZI, J. C.; OLIVEIRA, A. H.; LIMA, G. C.; CURI, N.; LEITE, F. P. **Erodibilidade de Latossolos no Vale do Rio Doce, região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais**. XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Uberlândia, 2011.

SMITH, JR, ET AL. **Erosão: Processos, Fatores de Risco e Estratégias de Gestão**. *Ciência e Tecnologia Ambiental*, 54(10), 5751-5764, 2020.

SMITH, P., ET AL. **Opportunities for soil carbon sequestration in the Cotswolds Area of Outstanding Natural Beauty**. *Land Use Policy*, 90, 104336, 2020.

TOMLINSON, R.F. **Thinking About GIS: Geographic Information System Planning for Managers**, 2003.

WANG, J., ET AL. **Integração de tecnologias geoespaciais para avaliação da erosão do solo e planejamento de conservação: uma revisão**. *Modelagem e Avaliação Ambiental*, 25(3), 253-268, 2020.

WISCHMEIER, W.H., & SMITH, D.D. **Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning**. USDA Agricultural Handbook No. 537, 1965.