



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

Departamento de Matemática e Informática

Trabalho de Licenciatura em
Ciências de Informação Geográfica

**Aplicação Qualitativa do Modelo RUSLE na Análise da
Susceptibilidade do Solo à Erosão com Recurso aos
Sistemas de Informação Geográfica**

Caso de Estudo: **Distrito de Boane**

Autor: José Domingos Chauque

Maputo, Abril de 2025



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

Departamento de Matemática e Informática

Trabalho de Licenciatura em
Ciências de Informação Geográfica

**Aplicação Qualitativa do Modelo RUSLE na Análise da
Susceptibilidade do Solo à Erosão com Recurso aos Sistemas
de Informação Geográfica**

Caso de Estudo: **Distrito de Boane**

Autor: José Domingos Chauúque

Supervisor: Lic. Francesse Mauro Bacião, UEM

Maputo, Abril de 2025

Dedicatória

Aos meus pais, que tem servido de força electromotriz para tudo que sou hoje.

Aos meus irmãos, Lambo D. Cháúque, Alexandre D. Cháúque, e em especial Samuel D. Cháúque, que é minha fonte de inspiração.

Declaração de Honra

Eu, **José Domingos Chaúque**, declaro por minha honra que o presente Trabalho de Licenciatura é resultado da minha investigação e que o processo foi concebido para ser submetido apenas para a obtenção do grau de Licenciado em Ciências de Informação Geográfica, na faculdade de Ciências da Universidade Eduardo Mondlane.

Maputo, Abril de 2025

(José Domingos Chaúque)

Agradecimentos

Em primeiro lugar, manifesto minha gratidão a Deus pelo dom da vida e pela graça de ter preservado minha saúde e determinação até o presente momento. Agradeço profundamente por sua presença constante em minha trajetória, especialmente nos momentos em que, de joelhos, pedi por sabedoria e bênçãos para meu percurso acadêmico.

Expresso o meu reconhecimento ao meu supervisor, Francesse Mauro Bacião, reconhecido como o bom docente no curso de CIG. Além de sua excelência como Docente, foi um mentor indispensável, orientando-me desde os estágios iniciais deste trabalho até a conclusão da monografia que agora apresento. Sua capacidade de direccionar minhas ideias e oferecer uma orientação clara e construtiva foi fundamental para o desenvolvimento deste estudo, pelo que sou imensamente grato.

Agradeço ainda à Universidade Eduardo Mondlane, com especial apreço aos docentes do Curso de Licenciatura em Ciências de Informação Geográfica, que desempenharam um papel essencial na minha formação acadêmica. Com o conhecimento e a dedicação que compartilharam, possibilitaram-me alcançar novos horizontes e almejar um nível acadêmico superior.

Aos colegas e amigos da faculdade, Basílio Quibe, Fortunato Guirruogo e Sebastião Chambal, meu reconhecimento pelo companheirismo durante a vida acadêmica e pela amizade que transcende os portões da Universidade Eduardo Mondlane

À minha família, endereço minha mais profunda gratidão, ao meu pai, Domingos David Chaúque, e à minha mãe, Joaneta Samuel Maculuve, que considero pilares fundamentais de minha trajetória acadêmica e social. Aos meus irmãos, Lambo Chaúque, Alexandre Chaúque, e, em especial, a Samuel Chaúque, pelo constante suporte e inspiração que me mantiveram firme em minha caminhada acadêmica. Manifesto também meu agradecimento à minha cunhada, Elisa Honwana, e aos meus sobrinhos, Domingos Chaúque e Kayane Chaúque, cujo carinho e incentivo foram indispensáveis.

Aos meus amigos, Francisco “Balito” Cossa, Nilton Munwana, Rafael Buque e Wilma Bebane, expresso minha sincera gratidão pelo apoio, directo e indirecto, que recebi desde o momento em que decidi ingressar no ensino superior até a conclusão deste trabalho.

Aos amigos e colegas do estágio, Fernando Socovinho, Hafulásia Cumbe, Ivan Bule, Sônia Uane e, em especial, ao meu amigo Fortunato Guirruogo, agradeço pela troca de ideias e contribuições que foram fundamentais na elaboração deste trabalho de licenciatura.

KHANIMAMBO!

Resumo

A erosão é um processo natural de desgaste e transporte da superfície terrestre, intensificado por actividades humanas, como o uso inadequado do solo. O uso antrópico inadequado do solo compromete a cobertura vegetal, reduz a infiltração de água e aumenta o escoamento superficial, resultando em impactos ambientais significativos com repercussões para a saúde, segurança e bem-estar social. O presente estudo visa avaliar o impacto da erosão no Distrito de Boane, em Moçambique, com base na evolução e nos factores que influenciam a susceptibilidade do solo à erosão num período compreendido entre 2003 e 2023, considerando a dinâmica multi-temporal de 10 anos de mudanças no uso e cobertura do solo. Para isso, foi utilizada a Equação Universal Revisada de Perda de Solo (RUSLE), adaptada aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), integrando dados de erosividade da chuva (R), erodibilidade do solo (K), topografia (LS) e práticas de uso manejo do solo (CP), derivados de imagens de satélite, obtidos nos programas Landsat, Sentinel, SRTM e análises pluviométricas, obtidos na Precipitação por Infravermelho com Estações do Grupo de Perigos Climáticos (CHIRPS). O factor R foi modelado pelo método Krigeagem Ordinária, com um histórico de precipitação mensal de 20 anos para cada estudo. Entretanto, o factor C foi definido a partir da classificação supervisionada de Máxima Verossimilhança, que avaliou a variação da intervenção humana nas práticas de uso e manejo do solo. A topografia foi determinada recorrendo a técnicas de álgebra de mapas e algoritmos da GDAL e SAGA, e para determinar o factor K, foi relacionado o tipo de solo em Boane com a tabela de erodibilidade pré-definida. Foram aplicadas as técnicas de regressão espacial e o Índice de Moran para análise robusta da autocorrelação espacial dos dados e avaliar a capacidade explicativa do modelo por meio do coeficiente de determinação (R^2). O R^2 obtido para os anos de 2003, 2013 e 2023, foi de 0.972, 0.949 e 0.958, respectivamente, evidenciando a forte influência das práticas de uso do solo na susceptibilidade à erosão. Os resultados do R^2 fornecem uma base científica para monitorar e mitigar os impactos da erosão, fornecendo suporte técnico-científico para a gestão sustentável do território.

Palavras-chave: Erosão do solo, RUSLE e SIG

Abreviaturas

CENACARTA	Centro Nacional de Cartografia e Teledeteccção
CM	Conselho de Ministros
DOS1	Subtracção de Objecto Escuro
EPSG	Grupo Europeu de Pesquisa de Petróleo
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
GDAL	Biblioteca de Abstracção de Dados Geoespaciais
IIAM	Instituto Investigação Agrária de Moçambique
INAMI	Instituto Nacional de Minas
INE	Instituto Nacional de Estatística
METIER	Ministério dos Recursos Minerais e Energia de Moçambique
MICOA	Ministério para a Coordenação da Acção Ambiental
OCS	Observatório Cidadão para Saúde
RUSLE	Equação Universal de Perda do Solo Revisada
SAGA	Sistema para Análises Geocientíficas Automatizadas
SCP	Complemento de Classificação Semi-automática
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SRTM	Missão de Topografia por Radar de Transporte Espacial
TauDEM	Análise do Terreno Usando Modelos Digitais de Elevação
USLE	Equação Universal de Perda do Solo
USGS	Serviço Geológico dos Estados Unidos
UTM	Mercator Transverso Universal
WGS	Sistema de Referência Geodésico global

Índice

Dedicatória.....	i
Declaração de Honra.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	iv
Abreviaturas.....	v
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas.....	x
Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Definição do Problema	2
1.3. Justificativa	3
1.4. Relevância do Estudo	4
1.5. Objectivos	5
1.5.1. Objectivo Geral.....	5
1.5.2. Objectivos Específicos	5
Área de Estudo.....	6
2.1 Caracterização da Área de Estudo	6
2.1.1 Clima e Hidrografia.....	7
2.1.2 Relevo e Solos.....	7
2.1.3 Economia	8
Revisão de Literatura.....	9
3.1 Erosão	9
3.1.1 Tipos de Erosão	10
3.2 Teledeteccção.....	13

3.2.1	Radiação Electromagnética.....	13
3.2.1.1	Componentes.....	13
3.2.2	Espectro Electromagnético	14
3.2.3	Sensores e Características dos Satélites.....	15
3.2.3.1	Programas de Observação da Superfície da Terra	16
3.2.4	Aplicação da Teledeteccção.....	18
3.3	Sistemas de Informação Geográfica (SIG).....	18
3.3.1	Modelo Vectorial.....	19
3.3.2	Modelo Matricial	20
3.4	Cartografia Temática.....	21
3.5	Modelos de Predição de Erosão	22
3.5.1	Modelos de Empíricos	22
3.5.2	Modelos Orientados por Processos Físicos Fundamentais	23
	Material e Metodologia.....	24
4.1	Material	24
4.2	Método.....	25
4.2.1	Tratamento de dados.....	25
4.2.2	Reprojecção.....	26
4.2.3	Correcção de imagens	26
4.2.4	Reclassificação de imagens	27
4.2.5	Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE)	27
4.3	Fluxograma Metodológico.....	29
4.3.1	Factor de uso e cobertura (CP).....	30
4.3.2	Factores Topograficos do Terreno (LS).....	31
4.3.3	Factor de Erosividade da Chuva (R).....	32
4.3.4	Índice de Erodibilidade (K).....	32
4.3.5	Factor de correcção	33
4.4	Análise Geoestatística do Modelo.....	33

4.4.1	Modelos de Regressão Espacial	35
4.4.2	<i>Spatial Lag Model</i> (SAR).....	36
4.4.3	<i>Spatial Erro Model</i> (CAR).....	36
	Resultados e Discussão	37
5.1	Desempenho do Modelo	37
5.2	Variação dos Factores Actuantes no Processo Erosivo	38
5.2.1	Factor LS e K	38
5.2.2	Factor R e C.....	40
5.3	Qualificação do Potencial da Susceptibilidade do Solo à Erosão Hídrica	43
	Conclusões e Recomendações	47
6.1	Conclusões	47
6.2	Recomendações	47
	Bibliografia.....	49
	Apêndices.....	53
	Apêndice 1: Intersecção e atribuição de dados a cada tipo de classe de cobertura do solo para determinar o factor C.....	53
	Apêndice 2: representação qualitativa sem o factor de correcção no mapa (A) e representação qualitativa com factor de correcção no mapa (B).....	54
	Anexos.....	55
	Anexo 1: credencial referente a pedido de dados no Instituto Nacional de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM).....	55

Lista de Figuras

Figura 1: Localização Geográfica do Distrito de Boane	6
Figura 2: Impacto ambiental pela erosão hídrica (João, 2023)	11
Figura 3: Erosão Hídrica (Ribeiro, 2021)	12
Figura 4: Sistemas de aquisição de imagens (Fernandes, 2018).....	14
Figura 5: Espectro das ondas eletromagnéticas segundo seu comprimento de onda (Madeira, 2010)	15
Figura 6: Estrutura geral de Sistemas de Informação Geográfica (Davis e Câmara, 2001)	19
Figura 7: Elementos básicos do modelo vectorial (Painho e Curvelo, 2008)	20
Figura 8: Modelo de dados matriciais ou raster (Painho e Curvelo, 2008).....	21
Figura 9: Fluxograma metodológico	29
Figura 10: Mapa de topografia do terreno (LS) e Erodibilidade do solo (K).....	39
Figura 11: Erosividade da chuva (R), e uso e manejo do solo (C), referentes a 2003.....	40
Figura 12: Erosividade da chuva (R), e uso e manejo do solo (C), referentes a 2013.....	41
Figura 13: Erosividade da chuva (R), e uso e manejo do solo (C), referentes a 2023.....	42
Figura 14: Índice de susceptibilidade do solo à erosão (2003)	43
Figura 15: Índice de susceptibilidade do solo à erosão (2013)	44
Figura 16: Índice de susceptibilidade do solo à erosão (2023)	46

Lista de Tabelas

Tabela 1: Características espectrais e espaciais do sensor TM, OLI e TIRS	17
Tabela 2: Resolução espacial e espectral do Sentinel – 2A (MSI)	17
Tabela 3: Tipos e fontes de dados de entrada.....	24
Tabela 4: Descrição dos programas utilizados.....	25
Tabela 5: Correlação espacial com recurso a Índice de Moran I	37
Tabela 6: Teste de Lagrange Multiplicador Robusto (Robust LM)	38
Tabela 7: Erodibilidade do solo com base nas literaturas	39
Tabela 8: Valor C para cada tipo de classe	42

Este capítulo, tem como propósito apresentar o contexto da pesquisa, o porquê de desenvolver o estudo, a justificativa, e os objectivos.

1.1. Contextualização

A erosão, conforme definida por Silva (1995), é um processo natural de desagregação, decomposição e transporte de materiais terrosos e rochosos da superfície terrestre, com consequências socioeconómicas significativas, como o comprometimento do bem-estar humano, perdas de vidas, impactos na agricultura e danos a infraestruturas. Esse processo é intensificado pela intervenção humana, que altera a cobertura vegetal e modifica as propriedades dos solos, levando à compactação, redução da infiltração de água e aumento do escoamento superficial (Bertoni e Neto, 1990). O uso antrópico inadequado pode agravar a erosão, tornando essencial compreender as causas subjacentes e desenvolver soluções sustentáveis para mitigar seus impactos (Guerra e Marçal, 2006). Em Moçambique, as actividades antropogénicas, como o uso inadequado do solo e o manejo insustentável dos recursos naturais, são apontadas pelo Ministério para a Coordenação da Acção Ambiental (MICOA, 2012) como factores que contribuem para a degradação ambiental, prejudicando ecossistemas vitais e comprometendo recursos naturais essenciais à economia. A vulnerabilidade do país às mudanças climáticas é agravada por sua localização geográfica, com uma longa costa e a presença de áreas extensas e baixas, susceptíveis a inundações, além de frequentes eventos climáticos extremos que têm prejudicado o desenvolvimento económico e social (INGD, 2017). Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são ferramentas de abordagem multidisciplinar que integram dados geoespaciais, permitindo a modelagem e análise de fenómenos geográficos. Lima *et al.* (1992), destacaram o potencial dos SIG e dos dados de Teledeteccção orbital para análise da evolução espacial e temporal da erosão, bem como as inter-relações entre diferentes fenómenos espaciais. Com o avanço científico e tecnológico, os SIG tornaram-se fundamentais na modelagem preditiva e na simulação de cenários erosivos, proporcionando subsídios para a tomada de decisão baseada em evidências. Essas tecnologias oferecem um vasto leque de alternativas para a avaliação dos impactos ambientais e a busca por soluções sustentáveis (Pina, 1994).

O presente trabalho tem por objectivo adoptar uma metodologia sustentável na análise de processos erosivos no Distrito de Boane para o planeamento de práticas de conservação e manejo ambiental, proporcionando informações cruciais para a implementação de estratégias preventivas e correctivas para a mitigação da erosão.

1.2. Definição do Problema

Para garantir a sustentabilidade ambiental e a segurança da população, é essencial compreender a pressão imposta pelas acções humanas sobre o meio ambiente. Tal pressão têm desencadeado alterações significativas nas propriedades físicas e químicas do solo, comprometendo o desempenho das suas funções. De acordo com o MICOA (2012), grande parte dessas alterações decorre de actividades antropogénicas, que ao interferirem nos ciclos naturais, podem intensificar a ocorrência de eventos climáticos extremos e, conseqüentemente, a ocorrência à erosão e outros impactos ambientais adversos. Os esforços de combate à erosão frequentemente focam em mitigar os efeitos visíveis e os danos onde o problema já se manifesta, sem abordar suas causas fundamentais, muitas vezes relacionadas ao uso insustentável dos recursos naturais (MICOA, 2007). Essa abordagem não permite entender a extensão dos danos actuais para desenvolvimento de estratégias de gestão ambiental preventiva, buscando a resiliência do ecossistema frente às actividades humanas e mudanças climáticas.

O Distrito de Boane faz parte dos distritos que carecem de estudo aprofundados relacionados a perdas de solo. No entanto, torna-se crucial o estudo de uma metodologia capaz de identificar áreas de risco de erosão, fundamental para orientar políticas públicas de prevenção e mitigação, promovendo um manejo sustentável dos recursos naturais e a preservação dos ecossistemas.

Qual é o grau de susceptibilidade do solo à erosão no Distrito de Boane?

Hipótese Nula (H0): Não há diferença significativa nos índices de susceptibilidade à erosão do solo entre as áreas de uso do solo agropecuária, urbano e florestal no Distrito de Boane, considerando factores como declividade, tipo de solo, cobertura vegetal e erosividade da chuva.

Hipótese Alternativa (H1): Existe uma diferença significativa nos índices de susceptibilidade à erosão do solo entre as áreas de uso do solo agropecuária, urbano e florestal no Distrito de Boane, considerando factores como declividade, tipo de solo, cobertura vegetal e erosividade da chuva.

1.3. Justificativa

O uso intensivo dos recursos naturais, o aumento do caudal de montante da bacia do rio Maputo e a localização geográfica vulnerável do Distrito de Boane (INGD, 2022), associados às lacunas voltadas a falta de estudos aprofundados sobre a erosão na região, geram um desconhecimento da real dimensão dos problemas causados por esse processo, acentuando a necessidade urgente de estudos sobre a susceptibilidade do solo à erosão.

A avaliação geotécnica, conforme Sousa *et al.* (1998) e Macêdo *et al.* (2001), é uma ferramenta essencial para analisar a distribuição, o posicionamento e as características fisiológicas dos fenómenos, como a erosão, além de prever e acompanhar os impactos da intervenção humana no aproveitamento dos recursos naturais. A análise da dimensão temporal das mudanças no uso e cobertura do solo são processos dinâmicos que têm implicações directas na erosão (Lal, 1998). Boardman e Poesen (2006), enfatizam que estudos de médio prazo (5 a 20 anos) são particularmente essenciais para identificar tendências nas mudanças do uso da terra e seus efeitos acumulativos na erosão.

Para estudar esse tipo de fenómeno são empregados métodos directos e/ou indirectos, associados a técnicas de geoprocessamento (Alves, 2000). Dos modelos existentes, a equação RUSLE, desenvolvida por Renard *et al.* (1991), derivada do modelo USLE, proposto por Wischmeier e Smith (1978), é um modelo empírico consideravelmente dependente de sistemas computacionais (Cecchia, 2005). Segundo Silva *et al.* (2004), o modelo RUSLE possui maior divulgação em estudos de predição de perdas de solos em planeamento conservacionista, pela sua simplicidade, disponibilidades de dados, e principalmente pela facilidade de maneiio de dados abaixo custo.

1.4. Relevância do Estudo

Freitas (2012) e Ferreira (2013) destacam a exploração de recursos naturais como uma actividade fundamental para o desenvolvimento social e económico, cujo objectivo central é a extração e o transporte de substâncias naturais do solo para processamento. O uso inadequado dos recursos naturais afecta vários pontos de Moçambique, resultando em prejuízos materiais e económicas como a degradação de infraestruturas, perda de fertilidade dos solos, perturbação de ecossistemas sensíveis, entre outros (MICOA, 2008). Baseando nas constatações do MICOA (2008), a erosão do solo pode inviabilizar o cumprimento dos objectivos de desenvolvimento ao alívio a pobreza, saúde e sustentabilidade ambiental. Este estudo visa criar uma visão comum para uma gestão ambiental sábia conducente a um desenvolvimento sustentável que contribua para erradicação da pobreza e de outros males que afligem a sociedade moçambicana.

O estudo não apenas contribui para pesquisas científicas ambientais voltadas à erosão, mas também, propor subsídios científicos e técnicos para a tomada de decisões relacionadas à conservação da biodiversidade e gestão territorial.

1.5. Objectivos

1.5.1. Objectivo Geral

Analisar qualitativamente a susceptibilidade do solo à erosão no Distrito de Boane por meio da aplicação do modelo RUSLE, com recurso a ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica.

1.5.2. Objectivos Específicos

- Identificar os factores actuantes no processo erosivo, com base nos parâmetros do modelo RUSLE;
- Aplicar o modelo RUSLE para estimar qualitativamente o potencial da erosão, com perspectiva de monitoria;
- Avaliar a variação espacial da susceptibilidade do solo à erosão nos anos compreendidos entre 2003 e 2023;
- Aplicar análises de regressão espacial para avaliar o desempenho do modelo na predição da susceptibilidade do solo à erosão.

2.1 Caracterização da Área de Estudo

O Distrito de Boane está localizado à sudeste da Província de Maputo, no Sul de Moçambique, situando-se aproximadamente entre as coordenadas 25°01'S e 26°11'S de latitude e entre as longitudes 32°10'E e 32°31'E. Sua delimitação geográfica é caracterizada da seguinte forma:

- Ao Norte, faz fronteira com o Distrito de Moamba;
- Ao Sul e Este, é limitado pelo Distrito de Namaacha;
- A Oeste, confina com as Cidade de Maputo e Matola e o Distrito de Matutuíne.

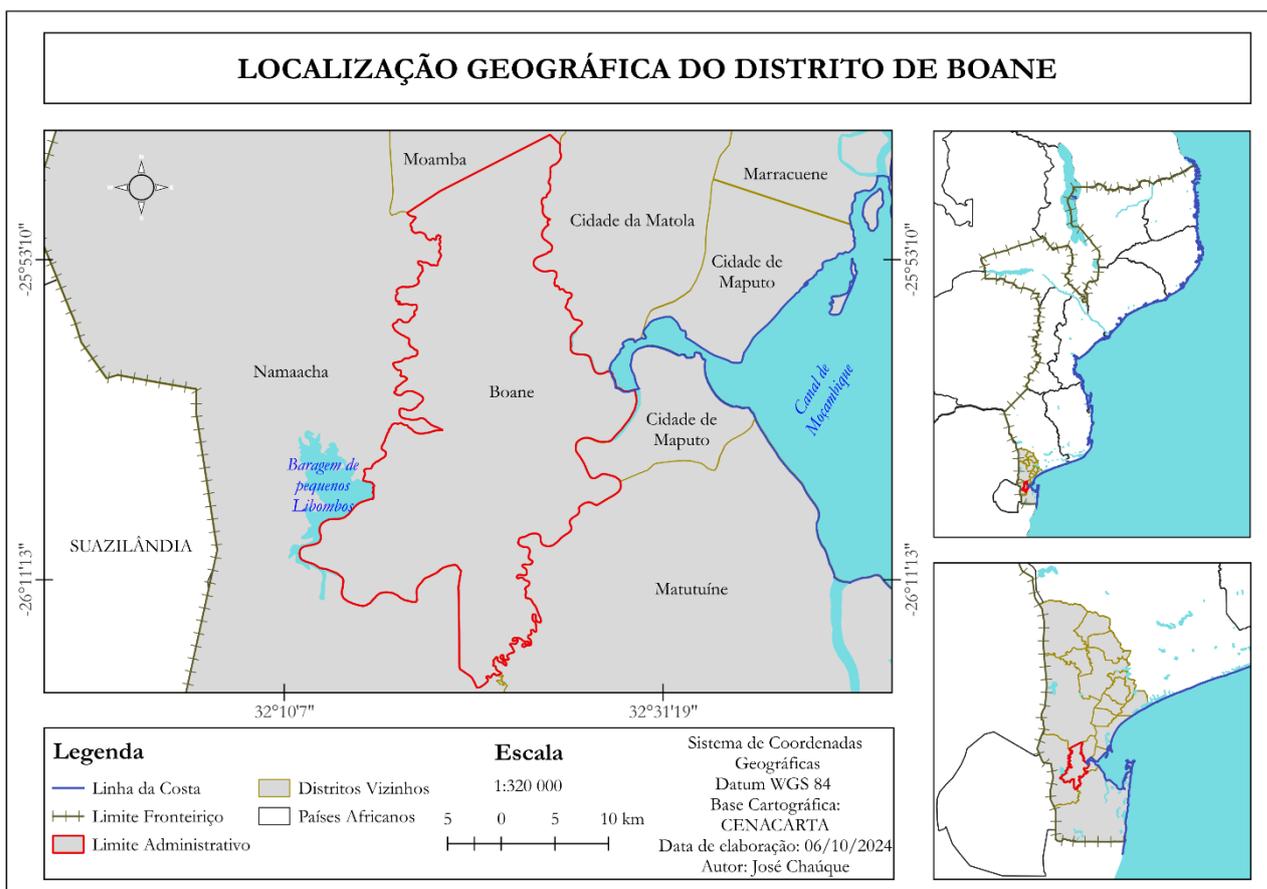


Figura 1: Localização Geográfica do Distrito de Boane

O Distrito de Boane abrange uma área aproximada de 815 km² e, de acordo com estimativas populacionais do INE (2017), possui uma população recenseada de cerca de 210.498 habitantes. A localização estratégica do Distrito, próxima à capital, Maputo, favorece o desenvolvimento de actividades agrícolas e industriais. Além disso, Boane se destaca por sua importância logística, situando-se em uma rota de infraestrutura de transporte essencial, incluindo rodovias e ferrovias que conectam a região a outras partes de Moçambique e à África do Sul, promovendo a integração regional e o fluxo económico transfronteiriço.

2.1.1 Clima e Hidrografia

O clima da região é classificado como sub-húmido, com deficiência pluviométrica durante a estação fria. Este clima é caracterizado pela alternância entre períodos secos, associados à influência de sistemas de alta pressão subcontinentais, e incursões de ventos húmidos provenientes do oceano. A humidade média anual é de 80.5%, com um máximo de 86% em julho e um mínimo de 73.5% em novembro. A temperatura média anual é de 23.7°C, sendo os meses mais frios junho e julho, enquanto os meses mais quentes são janeiro e fevereiro.

A precipitação média anual é de 752 mm, com uma distribuição sazonal significativa. O período húmido, que vai de novembro a março, apresenta uma precipitação média de 563.6 mm, enquanto o período seco, de Abril a Outubro, registra apenas 43.6 mm. A região é vulnerável a eventos climáticos extremos, incluindo ciclones tropicais, depressões atmosféricas, secas prolongadas e enchentes. Além disso, incursões de massas de ar frio podem ocasionar tempestades violentas e chuvas torrenciais de curta duração, intensificando o risco de desastres naturais.

2.1.2 Relevo e Solos

O Vale do Umbeluzi apresenta solos de elevado potencial agrícola e pecuário, explorados tanto por sistemas de agricultura familiar quanto por empreendimentos privados. Há uma significativa variação nas condições de segurança alimentar entre as diferentes áreas do distrito. A zona sul, caracterizada pela presença de uma rede fluvial densa, beneficia de sistemas de irrigação e áreas húmidas baixas, sendo particularmente adequada para o cultivo de hortaliças, banana e citros. Em contraste, a zona norte possui características edafoclimáticas mais favoráveis ao cultivo de cajueiros e ao desenvolvimento da avicultura. O rápido desenvolvimento socioeconómico da região tem impulsionado pequenos negócios, contribuindo para o bem-estar da população local.

2.1.3 Economia

A partir dos finais da década 90, o Distrito de Boane registou grandes projectos de impacto nacional, sendo referencia de grande destaque a construção da Indústria de Fundição de Alumínio MOZAL, pólo de atracção de outras empresas e indústrias nacionais e estrangeiras que têm afluído ao Parque Industrial de Beluluane. (João, 2023).

A agricultura é a base da economia distrital, tendo como principais culturas as hortícolas, milho, mandioca, feijão, banana e citrinos. As espécies de gado predominantes são os bovinos, ovinos e aves, destinadas para o consumo familiar e comercialização. O Rio Incomati é o principal recurso hídrico, favorecendo a prática da actividade pesqueira e agro-pecuária.

A proximidade de Boane com a cidade de Maputo, bem como com os países vizinhos, Suazilândia e África do Sul, tem impulsionado actividade comercial dinâmica, tornando o distrito um importante ponto de conexão regional e internacional, favorecendo o fluxo de bens e serviços.

Revisão de Literatura

O capítulo 3 tem por propósito apresentar a revisão geral da literatura que culmina com o objectivo do trabalho. Aborda questões viradas a erosão do solo, bem como os métodos de predição de erosão do solo.

3.1 Erosão

O solo, conforme descrito por Bigarella *et al.* (1996), representa a camada mais superficial da Terra, formada por materiais minerais e/ou orgânicos desagregados, finamente granulados e porosos, com propriedades únicas resultantes da interação de diversos processos ao longo do tempo. Essas características proporcionam ao solo a capacidade de desempenhar funções vitais, como o fornecimento de nutrientes para plantas e organismos, a regulação da dinâmica da água no ambiente e o papel de mitigador na dispersão de contaminantes. Além disso, o solo influencia na emissão de gases de efeito estufa e tem um impacto directo na saúde humana e animal (Xavier, 2021).

O solo, como parte integral do ecossistema, é um recurso natural que oferece uma vasta gama de bens e serviços essenciais para a humanidade. No entanto, a gestão inadequada desse recurso pode comprometer essas funções, levando a processos como a erosão, que, embora possa ocorrer naturalmente, é frequentemente intensificada pelas actividades antrópicas. A erosão diminui a capacidade do solo de sustentar suas funções ecológicas e económicas, o que pode resultar em impactos ambientais e na redução da produtividade agrícola, comprometendo a sustentabilidade dos sistemas agroecológicos

Os processos erosivos são definidos como a desagregação e remoção de partículas do solo ou fragmentos de rocha, resultantes da acção combinada da gravidade e de agentes como água, vento e gelo (Santos, 1997). Marçal *et al.* (1998), definem o fenómeno de maneira semelhante, descrevendo a erosão, em seu sentido mais amplo, como o conjunto de processos pelos quais os materiais terrosos ou rochosos da crosta terrestre são desagregados, dissolvidos ou desgastados, sendo transportados de um ponto a outro por agentes naturais, como rios, mares, vento e chuva. Nesse contexto, MICOA (2007) caracteriza a erosão do solo como um processo de separação, remoção, transporte e deposição de partículas de solo, influenciado pela acção da chuva e do vento, podendo ser acelerado por actividades

antrópicas. Entre essas actividades, destacam-se o desmatamento, queimadas descontroladas, práticas agrícolas inadequadas e o uso de terras em áreas susceptíveis à erosão.

Segundo Araujo (2010, p. 29), a perda da camada superficial do solo cria ambientes desfavoráveis para a instalação de infraestruturas destinadas ao conforto humano e resulta em uma diminuição da produtividade de solos ricos em nutrientes, afectando especialmente a camada mais propícia ao crescimento das plantas cultivadas. Isso se deve ao facto dos subsolos geralmente conterem menos nutrientes do que as camadas superiores, exigindo o uso de fertilizantes adicionais para manter a produtividade das culturas, o que, por sua vez, eleva os custos de produção. Além disso, a simples adição de fertilizantes não é capaz de compensar na totalidade os nutrientes perdidos com a erosão da camada superior.

Diante desse cenário, é fundamental estudar os factores que influenciam a erosão, como uma abordagem para compreender e mitigar os impactos ambientais adversos das actividades humanas. Conforme Lima (1987), para que qualquer processo erosivo se estabeleça, são necessários, antes de tudo, um agente (água ou vento) e o material (solo) sobre o qual este actuará, desprendendo e desagregando as partículas e transportando-as. A interação entre o material e o agente visa restaurar um novo estado de equilíbrio, que foi rompido, seja por processos naturais ou por acções antropogénicas.

Dentre os diversos factores que influenciam a erosão do solo, como clima, topografia, compactação, redução da capacidade do solo de filtrar água, diminuição da matéria orgânica e da biomassa, e a pedogénese do solo, a má gestão do solo se destaca como o principal factor que conduz à degradação do ecossistema (Araujo, 2010).

3.1.1. Tipos de Erosão

A erosão é um processo pelo qual o solo é desagregado, transportado e depositado (Bertol, 2007). Sob essa perspectiva, Filho *et al.* (2001) identificam a precipitação, associada às actividades antropogénicas, como a principal causa da erosão em ambientes tropicais e subtropicais húmidos, fenómeno conhecido como erosão hídrica. A erosão hídrica refere-se ao impacto das propriedades físicas da chuva, como a intensidade, a distribuição do tamanho das gotas e a velocidade de queda, sobre a dinâmica erosiva do solo (Huber *et al.*, 2007). De acordo com Guerra (2009), a água que não consegue infiltrar no solo transporta grandes quantidades de sedimentos, que são posteriormente depositados em depressões superficiais (Figura 2).



Figura 2: Impacto ambiental pela erosão hídrica (João, 2023)

No contexto do impacto ambiental causado pela erosão hídrica, Guerra (2009) observa que esse processo se intensifica quando o solo permanece desprotegido, sem cobertura vegetal. A erosão inicia-se com o impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo, promovendo a desagregação dos agregados e torrões, que liberta partículas finas. Esse material é projectado para cima e deslocado para longe, em um fenómeno conhecido como dispersão. Segundo Araujo (2010), a erosão hídrica pode se manifestar de três formas principais, nomeadamente:

- **Erosão laminar** – é a forma mais perigosa de erosão, uma vez que é notada somente quando atinge um grau elevado de remoção de uma fina camada de solo relativamente uniforme pela chuva e escorrência superficial generalizada e não canalizada. Apesar de ser uma forma menos gravosa de erosão, é responsável por grande prejuízo às terras agrícolas e por fornecer grande quantidade de sedimentos que vai assorear rios, lagos e albufeiras.
- **Erosão em Sulcos e entre sulcos** – é um processo de erosão formada pela canalização do escoamento das águas na superfície do solo, em forma de valas ou sulcos no terreno, sendo facilmente percebida. Na erosão entre sulcos, a desagregação das partículas de solo é ocasionada pelo impacto das gotas de chuva, sendo que o transporte, o qual poderá ser para dentro dos sulcos, se deve a dispersão provocada pelo impacto das gotas combinado ao fluxo laminar turbulento do escoamento superficial.

- **Erosão de barrancos (ravinar)** – é o estágio mais avançado da erosão hídrica, ocorre em valetas profundas, podendo atingir metros de profundidade e comprimento. O ravinamento consiste na remoção de solo pela água por canais visíveis muito pequenas, mas bem definidas, onde há concentração do fluxo sobre o solo. As ravinas, geralmente, são mais sérias do que a erosão laminar porque as velocidades do escoamento superficial são mais altas nas ravinas ou canais. Quando a água se concentra em determinados sulcos do terreno, originam pequenos sulcos que se formam em decorrência do escoamento superficial, marcas das operações de preparo e nas depressões do terreno.

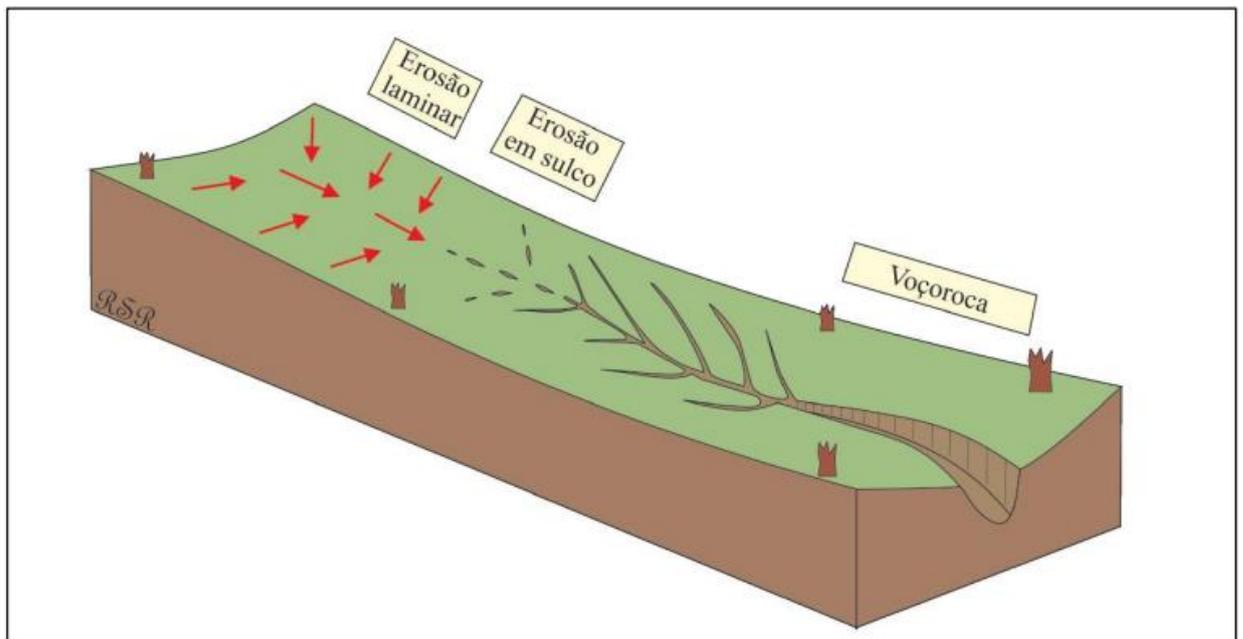


Figura 3: Erosão Hídrica (Ribeiro, 2021)

O potencial de erosão está directamente relacionado ao regime pluviométrico, à declividade do terreno e à capacidade de infiltração do solo. Segundo Bertoni e Neto (1999), a porosidade do solo, que determina sua capacidade de absorção, é influenciada pela sua estrutura, a qual depende da textura e do teor de matéria orgânica presentes. No entanto, os mesmos autores definem a textura do solo (tamanho das partículas que o compõem), como factor determinante na susceptibilidade à erosão, isto é, solos arenosos, possuem macro-porosidade elevada, permitindo uma maior taxa de infiltração de água, o que pode reduzir o risco de erosão superficial durante precipitações leves. Por outro lado, solos argilosos, caracterizados por micro-porosidade e partículas de menor diâmetro, apresentam baixa taxa de infiltração, o que aumenta a probabilidade de escoamento superficial, elevando o risco de erosão hídrica. Solos siltosos, com partículas de tamanho intermediário entre areia e argila, são altamente susceptíveis à erosão, uma vez que possuem baixa coesão e menor capacidade de infiltração, resultando

em um maior volume de material transportado pela água. Dessa forma, a textura do solo é um dos principais factores que influenciam a vulnerabilidade à erosão em diferentes ambientes.

De acordo com Silva (1995), a erosão não se restringe apenas à erosão hídrica, pode ocorrer por diferentes processos naturais. Entre as principais formas de erosão estão:

- **A erosão eólica** – provocada pela acção do vento.
- **A erosão gravitacional** – resultante do movimento de massas sob a influência da gravidade.
- **A erosão glacial** – causada pelo deslocamento de geleiras.

Esses processos erosivos actuam de maneira distinta, dependendo das características ambientais e geológicas de cada região, influenciando directamente a dinâmica dos solos e das paisagens.

3.2 Teledeteção

A Teledeteção é um conjunto de métodos para adquirir informações acerca da superfície terrestre sem estar em contacto directo. Segundo Meneses (2012), a Teledeteção é definida como uma técnica com capacidade de obter informações sobre objectos da superfície terrestre sem que haja contacto físico entre os sensores e o objecto. Essa tecnologia captura ondas electromagnéticas reflectidas a partir da superfície da Terra, direccionados a estudos da paisagem, incluindo a topografia, a hidrografia, a geologia, a geomorfologia e outras variáveis ambientais, assim como análise e auxílio na prevenção e controlo de desastres ambientais e aqueles causados pela actividade humana (Boin *et al.* 2017).

3.2.1 Radiação Electromagnética

Segundo Jensen (2007), radiação electromagnética é a energia transmitida através do espaço em forma de ondas electromagnéticas, que se caracterizam por sua interação com os objectos da superfície terrestre, permitindo a aquisição de informações sobre suas propriedades físicas, químicas e biológicas sem contacto directo. De forma geral, Florenzano (2007), define a radiação electromagnética como sendo que a luz que é transferida de um ponto para o outro em certo período do tempo.

3.2.1.1 Componentes

Segundo Arbelo (2012), a aquisição de informação é feita através do registo da energia reflectida ou emitida (sob a forma de radiação electromagnética) pelo objecto a detectar. Os dados brutos assim obtidos são depois processados e analisados para extrair informação de interesse sobre o objecto a detectar. Isto é exemplificado pelos sistemas de aquisição de imagens descritas na figura 4, onde estão envolvidos os seguintes elementos:

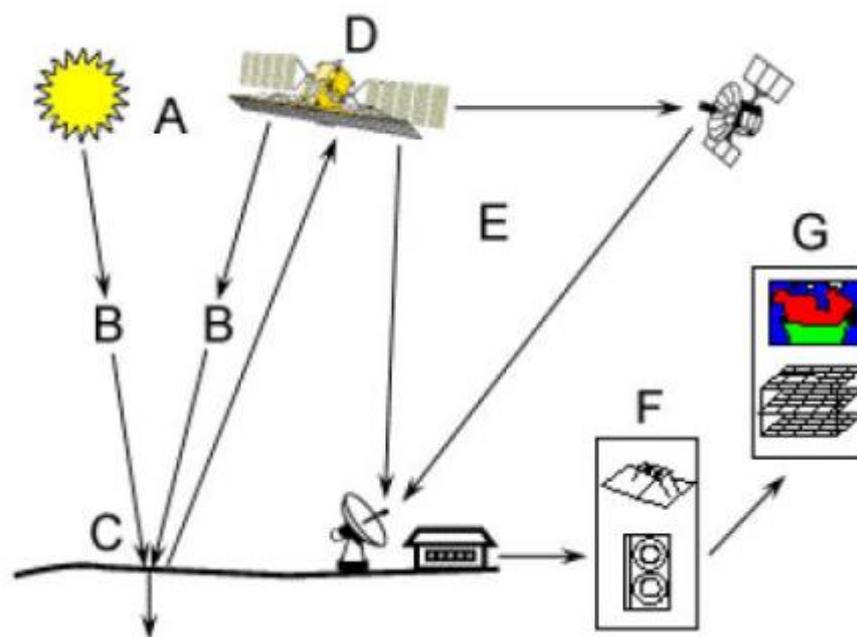


Figura 4: Sistemas de aquisição de imagens (Fernandes, 2018)

Onde:

A – Fonte de energia ou iluminação;

B – A radiação e a atmosfera;

C – Interação com o objecto;

D – Registo da energia pelo sensor;

E – Transmissão, recepção e processamento;

F – Interpretação e análise;

G – Aplicação.

A energia captada pelo sensor é transmitida a uma estação de recepção e processamento na qual os dados fornecidos são convertidos em imagens digitais (E). A imagem processada é visual e digitalmente interpretada de modo a extrair informações acerca dos objectos que foram iluminados (F).

3.2.2 Espectro Electromagnético

Segundo Kiefer e Chipman (2015), o espectro electromagnético é o intervalo completo de comprimentos de onda da radiação electromagnética, que se estende desde as ondas de rádio, de maior comprimento de onda, até os raios gama, de menor comprimento de onda, sendo as faixas específicas

dentro desse espectro utilizadas para captar informações sobre as características da superfície terrestre. Na figura 5, Moraes (2002) descreve as variações de frequência de acordo com o seu comprimento de onda.

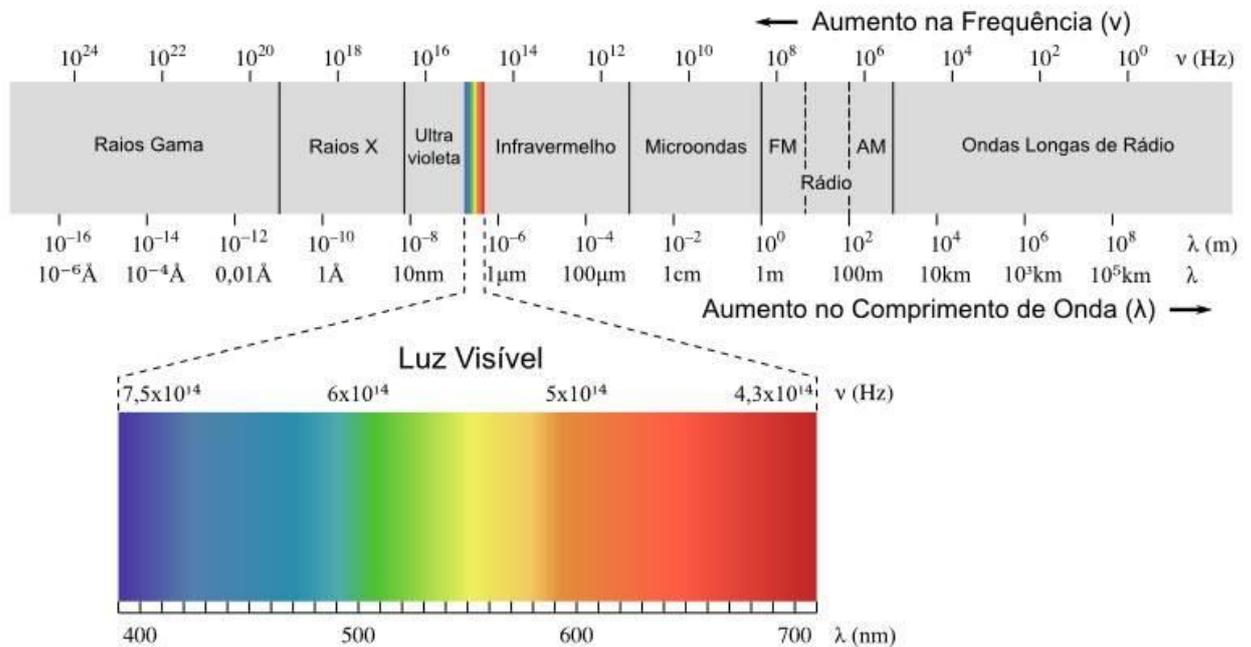


Figura 5: Espectro das ondas eletromagnéticas segundo seu comprimento de onda (Madeira, 2010)

A luz visível é apenas uma das muitas formas de radiação electromagnética existentes e as ondas de rádio, o calor, os raios ultravioleta e os raio-X são outras formas bastante comuns. Em Teledetecção, é comum caracterizar as ondas electromagnéticas pelo seu comprimento de onda, em micrómetros (μm , 10^{-6} m) ou em nanómetros (nm, 10^{-9} m), consoante a posição que ocupam no espectro electromagnético, ficando desta forma definidas as diferentes regiões do mesmo. Embora por convenção lhes sejam associadas determinadas denominações (ultravioleta, visível, infravermelho, micro-ondas, etc.), não existem divisões exactas entre umas e outras (Figura 4). Os sensores para Teledetecção existentes a bordo de satélites são capazes de detectar e registar radiações das regiões não visíveis do espectro electromagnético, desde o ultravioleta às micro-ondas (Arbelo, 2012).

3.2.3 Sensores e Características dos Satélites

Segundo Fonseca e Fernandes (2004), os sensores usados em Teledetecção para estudo da superfície terrestre são dispositivos de imagem cujo principal objectivo é o registo da distribuição espacial das radiâncias, ou da intensidade do sinal reflectido ou emitido pelos objectos na superfície terrestre. No entanto, os autores fundamentam que os sensores captam a radiação correspondente à banda do espectro electromagnético para a qual foram calibrados, medem a intensidade do sinal recebido correspondente no terreno a uma área, de forma geral quadrada, designada por *picture element (pixel)*, o

conjunto das áreas unitárias assim definidas organiza-se um padrão do tipo matricial sendo que a intensidade do sinal medida representa o designado nível radiométrico. Os sensores podem ser classificados como:

- **Sensores ópticos multiespectrais** – capturam imagens em múltiplas bandas do espectro electromagnético, geralmente visível, infravermelho próximo e infravermelho médio. Cada banda representa um intervalo específico de comprimentos de onda, fornecendo informações sobre diferentes propriedades de objectos ou superfícies.
- **Sensores térmicos** – detectam radiação infravermelha emitida por objectos, o que está relacionado à sua temperatura superficial. Operam em comprimentos de onda no infravermelho termal (geralmente 8 a 14 μm). Não dependem da luz solar, permitindo aquisição de dados de dia e de noite.
- **Sensores Hiper-espectrais** – capturam imagens em centenas ou milhares de bandas espectrais, cobrindo intervalos de comprimentos de onda muito estreitos. Proporcionam alta resolução espectral, permitindo identificação detalhada de materiais com base em suas assinaturas espectrais específicas.
- **Micro-ondas** – operam em comprimentos de onda na faixa de micro-ondas, incluindo sensores activos (radares) e passivos (radiómetros). Penetram nuvens e neblina, funcionam em qualquer condição climática e, em muitos casos, têm capacidade de observação noturna.

3.2.3.1 Programas de Observação da Superfície da Terra

Segundo Fonseca e Fernandes (2004), a consolidação da Teledeteccção como ferramenta científica e tecnológica ocorreu com o advento dos programas espaciais da década de 60. O programa Landsat é uma das mais duradouras e bem-sucedidas iniciativas de acompanhamento terrestre, tendo iniciado operações em 1972. A linha de satélites Landsat começou com o lançamento do Landsat 1 (ERTS-1), marcando o início do acompanhamento sistemático da Terra. Seguiram-se os Landsat 2 (1975) e Landsat 3 (1978), que consolidaram o uso do sensor MSS (*Multispectral Scanner System*). Com o Landsat 4 (1982) e o Landsat 5 (1984), foi introduzido o sensor TM (*Thematic Mapper*), ampliando a resolução espectral. O Landsat 6 (1993) falhou no lançamento, mas o Landsat 7 (1999) trouxe o sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), com uma falha no Scan Line Corrector (SLC). O Landsat 8 (2013) e o Landsat 9 (2021) modernizaram as capacidades do programa, garantindo a continuidade de dados multiespectrais e térmicos.

A NASA em colaboração com o USGS (Serviço Geológico dos Estados Unidos) tem projectado satélites com sensores avançados para capturar dados multiespectrais e térmicos, permitindo análises

detalhadas da superfície terrestre. Na tabela 1 são descritas as características principais de dois marcos tecnológicos do programa Landsat.

Tabela 1: Características espectrais e espaciais do sensor TM, OLI e TIRS

Satélite (Sensor)	Banda	Comprimento de Onda (μm)	Resolução Espacial (m)
LANDSAT-5 (TM)	1 – <i>Blue</i>	0.45 – 0.52	30
	2 – <i>Green</i>	0.52 – 0.60	30
	3 – <i>Red</i>	0.63 – 0.69	30
	4 – NIR	0.76 – 0.90	30
	5 – SWR 1	1.55 – 1.75	30
	6 – <i>Thermal</i>	10.40 – 12.50	120
	7 – SWR 2	2.08 – 2.35	30
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) e Thermal Infrared Sensor (TIRS)	1 – <i>Coastal aerosol</i>	0.43 – 0.45	30
	2 – <i>Blue</i>	0.45 – 0.51	30
	3 – <i>Green</i>	0.53 – 0.59	30
	4 – <i>Red</i>	0.64 – 0.67	30
	5 – NIR	0.85 – 0.88	30
	6 – SWIR 1	1.57 – 1.65	30
	7 – SWIR 2	2.11 – 2.29	30
	8 – <i>Panchromatic</i>	0.50 – 0.68	15
	9 – <i>Cirrus</i>	1.36 – 1.38	30
	10 – (TIRS) 1	10.60 – 11.19	100
	11 – (TIRS) 2	11.50 – 12.51	100

Segundo Deleghido *et al.* (2011), programa Copernicus consiste no conjunto de dois satélites para observação terrestre da *European Space Agency* (ESA), denominados Sentinel-2A (2015) e o Sentinel-2B (2017). Sentinel-2A foi o primeiro da série com sensor *Multispectral Instrument* (MSI) para capturar imagens multiespectrais de alta resolução. Ele opera em 13 bandas espectrais, cobrindo desde o visível até o infravermelho próximo e de ondas curtas, com a resolução de até 10 metros (tabela 2).

Tabela 2: Resolução espacial e espectral do Sentinel – 2A (MSI)

Banda	Comprimento de Onda (μm)	Resolução (m)
1 – <i>Coastal aerosol</i>	0.443	60
2 – <i>Blue</i>	0.490	10
3 – <i>Green</i>	0.560	10
4 – <i>Red</i>	0.665	10
5 – <i>Vegetation Red Edge</i>	0.705	20
6 – <i>Vegetation Red Edge</i>	0.740	20
7 – <i>Vegetation Red Edge</i>	0.783	20
8 – NIR	0.842	10
8A – <i>Vegetation Red Edge</i>	0.865	20
9 – <i>Water vapour</i>	0.945	60
10 – SWIR-Cirrus	1.375	60
11 - SWIR	1.610	20
12 - SWIR	2.190	20

O Sentinel-2B é o satélite complementar ao Sentinel-2A, formando uma constelação. O período de revisitação é de 5 dias no equador e de 3 dias em latitudes médias e uma cobertura global para aplicações multiespectrais.

Os sensores foram concebidos para dar continuidade à missão Landsat, ou seja, o Sentinel-2 não só reforça o arquivo de imagens do Landsat, mas também fornece novas possibilidades de mapeamento e acompanhamento de habitats naturais (Hedley *et al.*, 2011).

3.2.4 Aplicação da Teledetecção

Segundo Bonini (2009), o uso de imagens de satélite torna possível se relacionar sob os aspectos multi-espectral, temporal e socioeconómico presentes na paisagem, permitindo o acompanhamento a interferência humana, sua dinâmica e facilitando a compreensão entre as relações do homem com a natureza, e suas consequências. No entanto, a Teledetecção pode ser aplicado em várias áreas como agricultura, geologia, recursos hídricos, estudos de ilhas de calor, gestão e controlo de desastres, entre outras.

3.3 Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

Segundo Painho e Curvelo (2008), os fenómenos que enfrentamos diariamente apresentam uma expressão territorial, e o avanço tecnológico na representação geográfica permite analisar e compreender a dimensão espacial associada a esses fenómenos. O desenvolvimento das actividades humanas impulsionou a necessidade de conhecimento espacial, possibilitando a localização geográfica de eventos, a identificação de padrões espaciais e a análise de suas relações com outros elementos do território, contribuindo para a tomada de decisões fundamentadas em características geográficas (Caerio, 2013).

Ortiz e Maguire (1993, 1991) destacam que o termo "geoprocessamento" surgiu com a introdução dos conceitos de manipulação de dados espaciais georreferenciados, cujo objectivo é fornecer ferramentas computacionais que permitam a analistas examinar a evolução espacial e temporal de fenómenos geográficos e as inter-relações entre eles. Essas ferramentas, conhecidas como SIG, oferecem uma abordagem integrada para o estudo de fenómenos geoespaciais.

Conforme Raper e Maguire (1992), os SIG são compostos por administradores de bancos de dados especializados, expressos na figura 6, capazes de capturar, armazenar, consultar, manipular, analisar, exibir e imprimir dados espacialmente referenciados sobre a superfície da Terra. Esses sistemas integram uma vasta quantidade de dados com expressão espacial, consolidando-se como instrumentos poderosos para a análise geográfica. Adicionalmente, os SIG oferecem uma gama ampla e qualitativa de

alternativas para a avaliação e simulação de cenários, tornando-se essenciais para a análise espacial em diversas áreas do conhecimento (Pina, 1994).

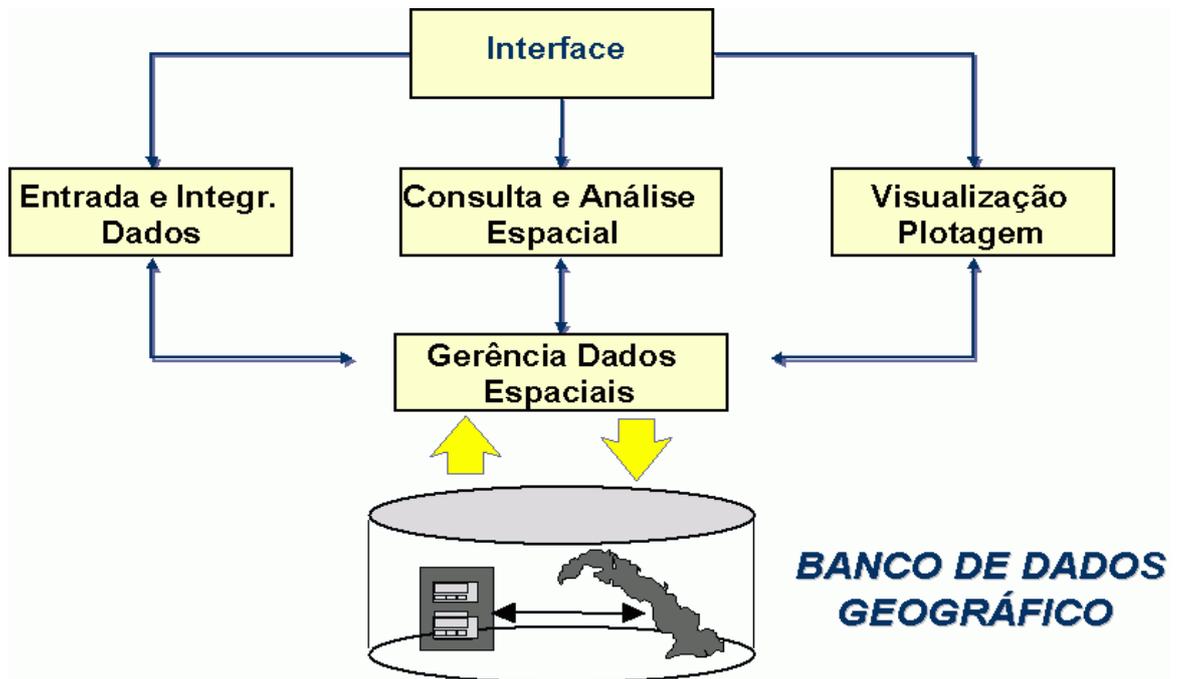


Figura 6: Estrutura geral de Sistemas de Informação Geográfica (Davis e Câmara, 2001)

A representação formal de entidades ou fenômenos geográficos pode ser modelada de acordo com duas abordagens principais, como objectos discretos e a de superfícies contínuas. Objectos discretos correspondem a fenômenos cuja existência é limitada e circunscrita espacialmente, permitindo a tradução de sua localização geográfica em termos de presença ou ausência em áreas específicas. Em contrapartida, superfícies contínuas são representações espaciais que não se baseiam na ocorrência pontual de um fenômeno, mas sim na variação de suas condições, valores, amplitude ou concentração ao longo do espaço geográfico (Caeiro, 2013). Essas duas abordagens correspondem a modelo vectorial e matricial.

3.3.1 Modelo Vectorial

Utilizado para representar objectos discretos, como polígonos, linhas e pontos, este modelo é caracterizado pela interdependência entre as coordenadas espaciais dos elementos e suas relações topológicas (Clarke, 2003). A topologia no modelo vectorial é uma estrutura de dados que armazena informações sobre a posição e as relações entre os objectos geográficos, permitindo a integração de dados posicional e gráfico, bem como a análise das relações espaciais entre os elementos representados (Matos, 2008).

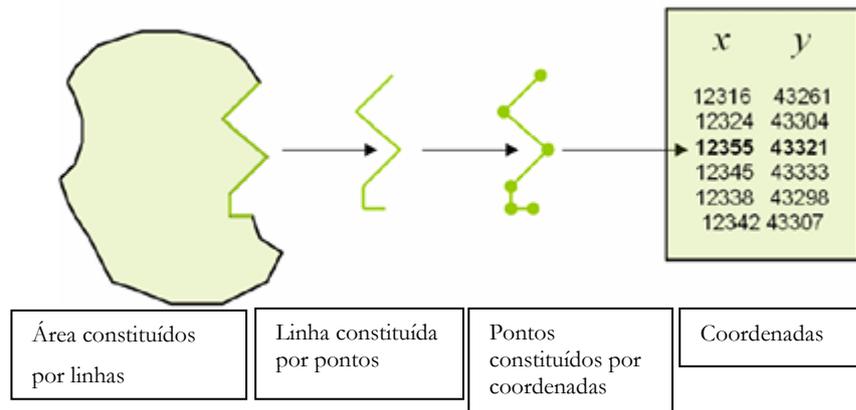


Figura 7: Elementos básicos do modelo vectorial (Painho e Curvelo, 2008)

3.3.2 Modelo Matricial

Na perspectiva de superfícies contínuas, o modelo matricial é caracterizado por uma grade regular de células, tipicamente quadradas, conhecidas como pixels. Esses pixels constituem unidades que representam uma partição da área de estudo, e cada célula é associada a um valor de um atributo específico. Como cada célula contém apenas um valor, a representação espacial no modelo matricial é considerada discreta.

De forma geral, essa estrutura de dados não é adequada para a localização precisa de objectos discretos, uma vez que o espaço geográfico é segmentado em células regulares que formam uma estrutura em mosaico. Essa segmentação pode resultar em resoluções que nem sempre são apropriadas para a representação acurada de fenómenos geográficos. As relações espaciais entre os objectos estão implícitas na estrutura em grade (figura 8), o que dispensa a necessidade de relações explícitas de armazenamento, diferentemente do que ocorre nos modelos vectoriais (Painho e Curvelo, 2008).

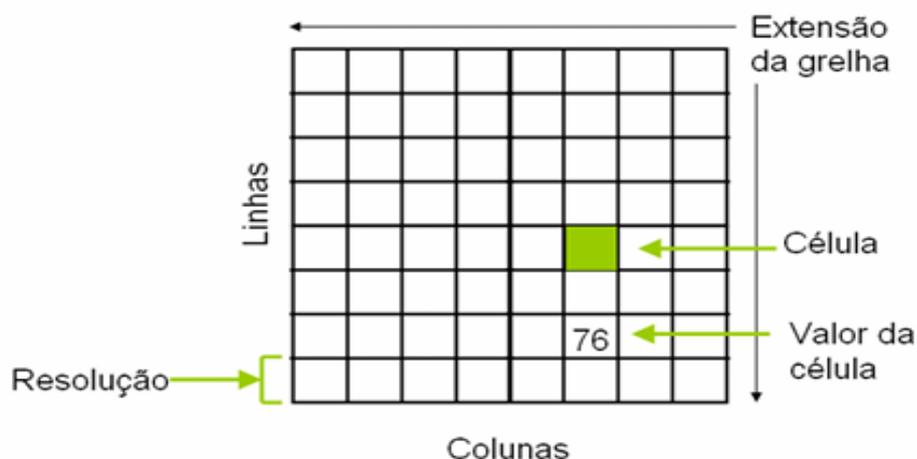


Figura 8: Modelo de dados matriciais ou *raster* (Painho e Curvelo, 2008)

Os SIG possibilitam a realização de análises espaciais complexas por meio da rápida criação e modificação de cenários geoespaciais. Essa capacidade de simulação e visualização oferece suporte fundamental para planejadores e gestores na tomada de decisões informadas.

3.4 Cartografia Temática

Segundo Joly (1990), cartografia é a ciência e a arte que expressa graficamente, por meio de mapas e cartas, o conhecimento humano sobre a superfície da Terra. Neste contexto, Bakker (2018) fundamenta sobre a ciência e arte, onde:

- Define como ciência porque procura um apoio científico computacional, representações digitais, utilização de fotografias aéreas, imagens de satélites, determinações astronômicas e matemáticas como topográficas e geodésicas para expressar de forma gráfica a exactidão satisfatória das informações.
- É arte quando se subordina às leis estéticas da simplicidade, clareza e harmonia, procurando atingir o ideal artístico da beleza.

Na passagem do século XVIII para o XIX, começaram a surgir os mapas ou cartas que buscavam transmitir uma especialização temática, daí que surgiu a cartografia temática (Martinelli, 2006). Joly (1990), define a cartografia temática como a expressão gráfica da geografia científica e seu objectivo é fornecer, com o auxílio de símbolos qualitativos e quantitativos, uma representação dos fenómenos de qualquer natureza, localizáveis na superfície da Terra. Dent (1996) amplia a definição afirmando que os mapas temáticos envolvem mapeamentos de fenómenos físicos e culturais ou ainda de ideias abstratas, incluindo também padrões de localização, medidas de distâncias, direcções e atributos espaciais de diversos tipos de fenómenos. Segundo Castro (2022), nas informações transmitidas em um mapa

consta um conjunto de elementos obrigatórios que nos ajudam a interpretar um documento cartográfico, tais como:

- **Título:** indica-nos o propósito do mapa, seu objectivo;
- **Escala:** a escala cartográfica é uma razão entre as distâncias no terreno (distâncias reais) e as distâncias representadas no mapa (distâncias gráficas);
- **Projeção:** método utilizado para a representação da superfície terrestre ou parte dela em uma superfície plana;
- **Legenda:** auxilia a leitura e informa sobre símbolos e dados;
- **Norte:** orientação do ponto cardinal Norte;
- **Localização:** situa a área mapeada em outras regiões, geralmente níveis administrativos;
- **Fonte:** Referências das informações/dados obtidos não produzidos pelo autor, mas importantes para a sua consecução;
- **Autor:** informa-nos acerca do(s) realizador(es) do mapeamento;
- **Ano:** É a data da impressão do mapa, todavia, pode não ser a data da colecta de dados, da restituição das fotografias aéreas (aerofotogrametria).

Os elementos dos mapas devem ter uma linguagem padronizada, isto é, essas informações ou elementos são de carácter obrigatório mesmo que os mapas ou cartas abordem temas bastante diferentes.

3.5 Modelos de Predição de Erosão

De acordo com Guerra (2007), os mecanismos dos processos erosivos são dinâmicos e variam temporalmente e espacialmente. A erosão ocorre quando as forças responsáveis pela remoção e transporte de partículas superam as que resistem a esse movimento. Modelos que estimam as taxas de perda de solo são baseados em diferentes métodos de colecta de dados, com variações de escala (Ruiz *et al.*, 2015). Medições experimentais limitam-se a áreas específicas de alto risco, e a extrapolação para grandes áreas depende de modelos que agregam zonas não controladas (Figueiredo, 2012). Modelos de erosão podem ser empíricos ou baseados em processos físicos fundamentais (Bhattarai e Dutta, 2008).

3.5.1 Modelos de Empíricos

Os modelos empíricos de erosão baseiam-se em medições realizadas em pequenas áreas, como bacias hidrográficas, e na extrapolação desses resultados para áreas maiores (Kinnell, 2008). A maioria desses modelos deriva da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) proposta por Wischmeier e Smith em 1978 ou de sua versão revisada RUSLE proposta por Renard *et al.* em 1997, que são, nomeadamente:

- WATEM (*Water and Tillage Erosion Model*);
- RUSLE.
- AnnAGNPS (*Annualized Agricultural NonPoint Source model*);

Embora sejam amplamente utilizados pela simplicidade, enfrentam limitações como a previsão da deposição de sedimentos e a dificuldade em calcular parâmetros topográficos (Hickey, 2000).

3.5.2 Modelos Orientados por Processos Físicos Fundamentais

De acordo com Licciardello (2009), os modelos de erosão listados abaixo possuem o potencial de fornecer dados sobre o estado da erosão e contribuir para a compreensão dos factores que a influenciam. No entanto, sua aplicação em grandes áreas (>100 km²) é desafiadora devido à insuficiência de dados de entrada de alta qualidade, o que limita sua aplicabilidade prática, especialmente em termos de gestão. As limitações incluem a precisão das variáveis topográficas, climáticas e do uso do solo, que são cruciais para uma modelagem eficaz em larga escala.

- SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*)– desenvolvido por Neitsch et al., 2002;
- EUROSEM (*European Soil Erosion Model*) – desenvolvido por Morgan et al., 1998;
- LISEM (*Limburg Soil Erosion Model*) – desenvolvido por De Roo et al., 1996;
- WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) – desenvolvido por Flanagan and Livingston, 1995;
- KINEROS2 (*Kinematic Runoff and Erosion Model*) – desenvolvido por Smith et al., 1995.

O modelo *PESERA* (*Pan-European Soil Erosion Risk Assessment*), desenvolvido por Kirkby et al., em 2004, foi concebido para grandes áreas, combina topografia, clima e uso da terra para estimar a perda de sedimentos e o risco de erosão de maneira simplificada.

Material e Metodologia

Este capítulo tem por objectivo delinear os procedimentos necessários para avaliar o potencial de áreas em risco de perda de solo, considerando diferentes períodos e os principais factores erosivos.

4.1 Material

A fim de execução do potencial de cada factor, o estudo utilizou dados espaciais obtidos de satélites, bem como informações sobre tipos de solo e limites administrativos. Os dados foram adquiridos por meio da Teledetecção, que incluem informações topográficas, precipitação, uso e cobertura do solo. Ademais, foram utilizados dados detalhados sobre divisões administrativas e bases cartográficas de classificações de tipos de solo, conforme descrito na tabela 3.

Tabela 3: Tipos e fontes de dados de entrada

Factor a representar	Fonte	Resolução Espacial	Modelo	Formato
Modelo digital de elevação	USGS (23/09/2014)	1Arc (30 metros)	Matricial	TIFF
Uso e cobertura do solo	2023 – Sentinel 2 (19/11/2023)	10 metros	Matricial	TIFF
	2013 – Landsat 8 OLI (15/11/2013)	15 metros		
	2003 – Landsat5 TM (31/12/2003)	30 metros		
Precipitação	CHIRPS	0.05°	Matricial	TIFF
Solo	IIAM	-----	Vectorial	Shapefile
Divisão administrativa de do Distrito de Boane	CENACARTA	-----	Vectorial	Shapefile

O processamento dos dados requer o uso de *softwares* especializados para manipular, analisar e visualizar as informações, além de ferramentas específicas para a elaboração dos relatórios finais. A Tabela 4 apresenta uma descrição detalhada dos programas seleccionados, que foram empregues para a concretização dos objectivos do estudo.

Tabela 4: Descrição dos programas utilizados

Pograma	Descrição
Quantum GIS (QGIS) 3.38.0	É um software geo-espacial, que foi usado para processamento de dados (vectorial e raster)
ArcGIS 10.8	É um software geo-espacial, que foi usado para processamento de dados
Office 2019	É pacote da Microsoft que inclui um conjunto de programas, onde foram usados: Word – para documentação do relatório. Excel – para formatar, organizar e calcular dados em uma planilha.
Microsoft Visio 2016	Faz parte da Microsoft. Permitiu a criação do fluxograma metodológico.
Sentinel Application Platform (SNAP)	É um <i>software</i> do programa Copernicus, desenvolvida pela Agência Espacial Europeia (ESA). Foi empregue para corrigir imagens de Sentinel2.
GeoDA	É um software utilizado para análise e estatística espacial. Foi usado para explorar padrões espaciais e avaliação do desempenho do modelo RUSLE.

4.2 Método

A metodologia de trabalho é bastante importante porque influencia na qualidade do resultado final. No entanto, o tratamento de dados de entrada influi na confiabilidade da informação que se pretende obter.

4.2.1 Tratamento de dados

O pré-processamento de imagens orbitais é fundamental para a qualificação das informações extraídas da superfície terrestre, uma vez que melhora a acurácia e a relevância dos dados obtidos. Nesse contexto, a qualidade das imagens de satélite é influenciada por diversos factores, incluindo as características internas do sensor, os efeitos atmosféricos, a iluminação, além de ruídos e distorções que podem ocorrer durante o processo de aquisição das imagens (Boggione *et al.*, 2014). Os dados brutos provenientes de satélites requerem técnicas de correcção antes da extração e interpretação das informações da superfície terrestre, sendo este pré-processamento uma etapa crucial para garantir a confiabilidade dos dados.

Conforme discutido por Antunes *et al.* (2012), a interação da radiação electromagnética com os alvos terrestres é um fenómeno complexo, e os efeitos atmosféricos podem interferir significativamente na extração e interpretação das informações sobre a cobertura do solo. A precisão radiométrica é, portanto, essencial para mitigar o ruído e otimizar a caracterização do estado e da condição da cobertura do solo. O pré-processamento envolve tanto a correcção atmosférica quanto a geométrica, considerando que o sinal atmosférico pode ser interpretado como um ruído que compromete a

qualidade da informação sobre os alvos de interesse. Ademais, a correcção geométrica é necessária para corrigir distorções resultantes da perspectiva do sensor e das variações topográficas do terreno.

Com a implementação dessas correcções, foi possível realizar análises subsequentes que facilitaram a extração de informações relevantes sobre a superfície terrestre, contribuindo para uma interpretação mais precisa e confiável dos dados.

4.2.2 Reprojecção

A reprojecção de imagens de satélite é um passo essencial no pré-processamento de dados espaciais, pois permite a integração precisa de informações provenientes de diferentes fontes ou sistemas de coordenadas. Esse processo facilita tanto a análise quanto a visualização em SIG. No presente estudo, as imagens obtidas exigiram uma reprojecção do sistema de coordenadas EPSG:32636 - WGS 84 / UTM Zona 36N para EPSG:32736 - WGS 84 / UTM Zona 36S, assegurando a compatibilidade e a consistência espacial para a área de interesse do estudo.

4.2.3 Correção de imagens

Com o objectivo de minimizar imperfeições que possam comprometer a extração de informações, foram realizadas correcções nas imagens de satélite Landsat 5 – TM, Landsat 8 – OLI e Sentinel-2. Para esse processo, utilizou-se o SCP (Complemento de Classificação Semi-automática), uma extensão do QGIS que facilita o processamento e análise de imagens de satélite. No caso das imagens Landsat, o SCP incorpora o método de DOS1 (Subtracção de Objecto Escuro), um algoritmo que presume a existência de pixels escuros, como nuvens ou sombras projectadas pela topografia, que devem apresentar uma reflectância muito baixa, próxima de 1%, de acordo com Chaves (1989). Esse método visa corrigir os efeitos atmosféricos e topográficos que afectam as medições espectrais.

Para as imagens de Sentinel-2, foi utilizado o *Plugin Sen2Cor* do *software* SNAP, específico para a correcção atmosférica. O Sen2Cor realiza a transformação da reflectância no topo da atmosfera para reflectância de superfície, eliminando os efeitos atmosféricos e gerando dados corrigidos que reflectem as condições reais da superfície terrestre.

Assim, as correcções atmosféricas e de imperfeições nas imagens de 2003, 2013 e 2023 foram realizadas utilizando os algoritmos DOS1 (Landsat) e Sen2Cor (Sentinel-2), garantindo a consistência e a precisão dos dados para as análises subsequentes.

A correcção geométrica visa minimizar distorções em imagens de satélite causadas pela perspectiva do sensor e pelas variações do relevo, por meio do processo de rectificação. As imagens provenientes dos sensores Landsat 8 OLI e Sentinel-2 já passaram por ortorretificação, ou seja, as distorções relacionadas à geometria do sensor e ao relevo do terreno foram previamente corrigidas. No entanto, as imagens do

sensor Landsat 5 TM requerem correcção geométrica adicional, uma vez que não são fornecidas ortorretificadas. Esse procedimento é fundamental para garantir a precisão espacial e a integridade geométrica dos dados.

4.2.4 Reclassificação de imagens

A reclassificação de imagens de satélite consiste no ajuste da resolução espacial para uma resolução espacial uniforme. É um processo crucial quando se busca integrar dados provenientes de diferentes fontes que apresentam resoluções distintas. O ajuste da resolução espacial é uma técnica utilizada para aumentar a resolução espacial de uma imagem, suavizando-a de modo a aparentar uma resolução mais elevada, sem, no entanto, introduzir novos detalhes informativos. A escolha da resolução pode afectar significativamente os resultados das estimativas de erosão, levando a subestimacões ou superestimacões da erosão (Gorves et al., 1996). Entretanto, Renard et al 1997 discutem as limitacões e aplicacões a escolha da resolução, onde em grandes áreas a resolução pode ser até de 30 metros e para estudos locais pode variar de 5 a 10 metros para obter estimativas precisas de erosão e assegurar a compatibilidade dos dados em análises espaciais.

4.2.5 Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE)

A Equação Universal de Perdas de Solo (USLE), desenvolvida por Wischmeier e Smith em 1965, é um modelo amplamente utilizado para estimar a perda de solo em áreas agrícolas, servindo de guia sistemático no planeamento da conservacão do solo. Com o tempo, sua aplicacão se expandiu para outras áreas, sendo actualmente empregada em bacias hidrográficas, em projectos de planeamento ambiental e na gestão de recursos naturais.

O modelo não requer dados de entrada complexos ou extensos. Conforme observado por Cecchia (2005), as informacões necessárias incluem a erosividade da chuva, a erodibilidade do solo, o uso e cobertura do solo, bem como a topografia da área em questão. Guerra (1999) classifica esses factores como controladores da erosão, uma vez que influenciam as variações nas taxas de erosão. A interacão entre esses factores é fundamental para entender por que algumas áreas sofrem erosão mais intensa do que outras. Entretanto, o modelo USLE apresenta algumas limitacões, como:

- Foi construído para medir as perdas de solo em longo prazo;
- O factor topográfico foi desenvolvido para comprimentos e inclinação de vertentes relativamente moderadas;
- Não foi projectada para zonas tropicais;
- Os dados não incluem o efeito orográfico;

- Representa a quantidade de solo que sai do sistema, mas não prediz a quantidade de material erodido e depositado.

Ao longo do tempo, o modelo USLE passou por diversas modificações visando superar suas limitações, resultando na criação da RUSLE, conforme descrito por Renard *et al.* (1997). Embora a RUSLE seja um modelo de natureza empírica, ela é significativamente dependente de sistemas computacionais para sua aplicação. Entre suas vantagens em relação à USLE, destacam-se:

- Uso de algoritmos para efectuar cálculos;
- Desenvolvimento de um termo de erodibilidade variável sazonalmente;
- Utilização de novos algoritmos para calcular comprimento de vertente e declividade (LS), reflectindo a erosão laminar e em sulcos;
- Capacidade de calcular o factor topográfico (LS) para vertentes de variadas formas;
- Definição de subfactores para calcular o termo uso e cobertura do solo (C), contemplando o uso anterior da terra, cobertura e rugosidade do solo.

Tanto a USLE quanto a RUSLE utilizam equações empíricas de regressão múltipla que incorporam diversos parâmetros que influenciam a erosão do solo. Ambas as metodologias se fundamentam na mesma equação básica, descrita na equação 1:

$$A = R * K * LS * CP \quad (1)$$

onde: **A** = perda de solo em ton/ha.ano;

R = factor erosividade da chuva em MJ.mm/ha.h.ano;

K = factor erodibilidade do solo em ton.ha.h/ha.MJ.mm;

L = factor comprimento de rampa (adimensional);

S = factor declividade, valores em porcentagem da declividade do terreno (adimensional);

C = factor uso e manejo do solo (adimensional);

P = factor práticas conservacionistas (adimensional).

Segundo Ponce (1989), o modelo RUSLE é definido como aplicável a pequenas áreas, permitindo quantificar a perda anual de solo (ton/ha/ano) em áreas de até 2,56 km². Embora o modelo RUSLE tenha sido desenvolvido e aplicado em pequenas áreas, alinhando-se ao uso agrícola, Stein *et al.* (1987) concluíram que o modelo pode ser utilizado em grandes áreas ou em escalas regionais. No entanto, deve ser empregado não como uma estimativa quantitativa das perdas de solo por erosão, mas sim

como uma ferramenta para avaliação qualitativa de áreas susceptíveis à erosão, tornando-se, assim, valioso no auxílio a trabalhos de gestão ambiental.

No entanto, o modelo RUSLE foi utilizado em conjunto com um SIG para realizar uma avaliação qualitativa, permitindo a identificação de áreas de risco de erosão. Abaixo, na figura 9, apresenta-se o fluxograma metodológico correspondente.

4.3 Fluxograma Metodológico

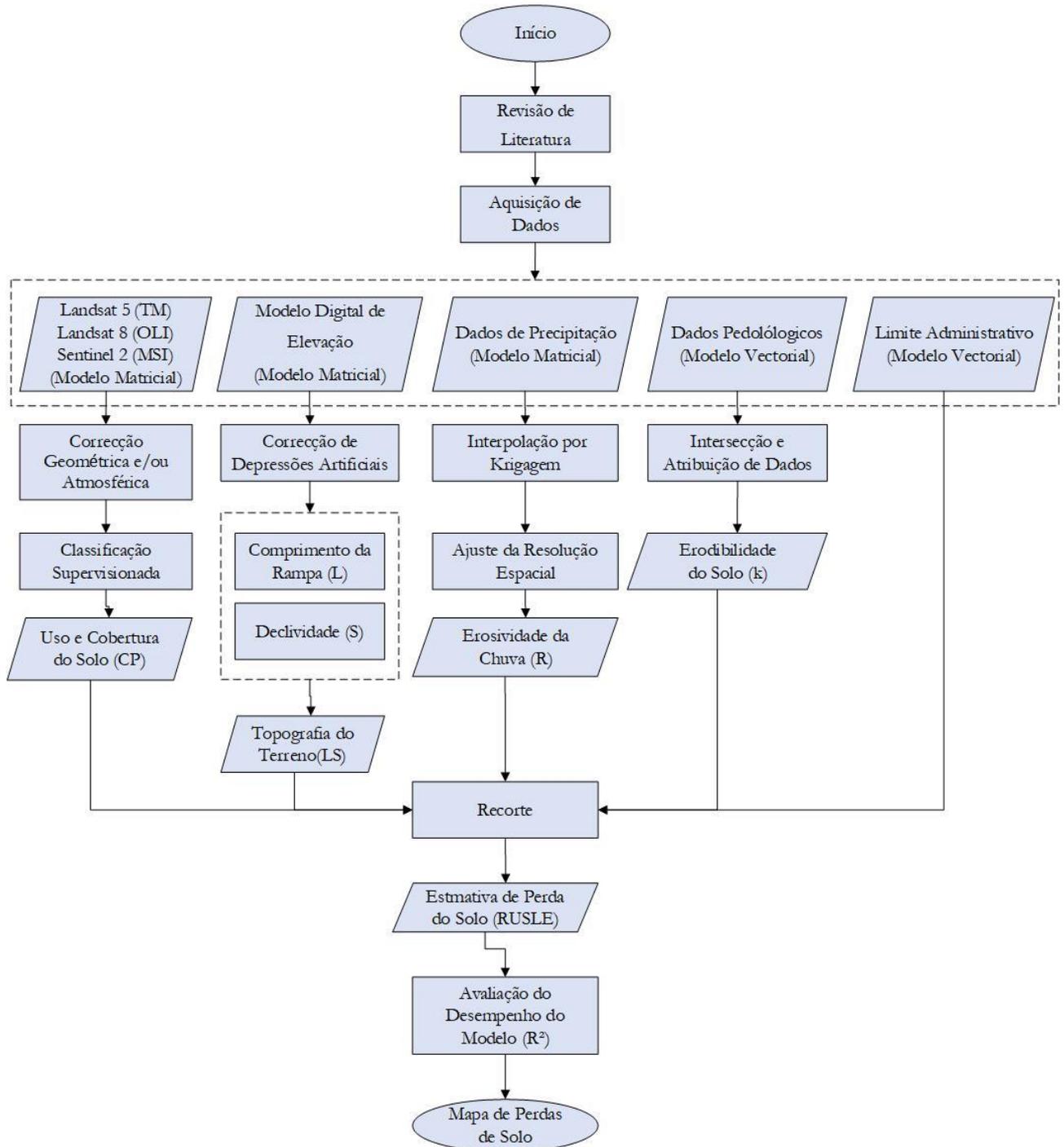


Figura 9: Fluxograma metodológico

O cálculo da predição do potencial de erosão do solo foi feito seguindo uma série de procedimentos para a estimativa dos factores de cobertura e práticas conservacionistas (CP), recurso a operações matemáticas para quantificar a influência dos factores de erosividade da chuva (R), erodibilidade do solo (K), e comprimento e inclinação do terreno (LS) na erosão hídrica. Cada factor foi calculado individualmente para avaliar seu impacto no processo de degradação do solo.

4.3.1 Factor de uso e cobertura (CP)

O uso e cobertura do solo é representado pelo factor de manejo do solo (C) e pelas práticas conservacionistas (P). De acordo com Bertoni e Neto (1990), o factor C é a relação entre as perdas de solo esperadas em uma área cultivada, sob um determinado sistema de manejo, e as perdas correspondentes a um solo descoberto e cultivado na mesma área. Esse factor pode ser classificado em diferentes tipos de cobertura, como agricultura, pastagem, zonas urbanas e solo exposto, sendo um dos mais influentes na mitigação da remoção de partículas pelo impacto da precipitação, em conformidade com os mesmos autores. Diante da extensão da área, Segundo Chaves (1994), utiliza-se uma média ponderada para o cálculo do factor C descrita na equação 2.

$$C = \frac{C_1+A_1+C_2+A_2+\dots+C_n+A_n}{A_t} \quad (2)$$

Onde:

- **C** é o valor de C ponderado (adimensional);
- **C_n** é o valor de C para cada tipo de classe (adimensional);
- **A_n** é a área correspondente a cada tipo de classe (km²);
- **A_t** é a área total de estudo.

A cobertura vegetal actua directamente na redução da energia das chuvas sobre o solo, além de diminuir a velocidade das enxurradas, auxiliando na proteção contra a erosão hídrica (Amaral, 2006).

O factor de práticas conservacionistas (P) é caracterizado como a relação entre a intensidade esperada de perdas de solo em uma área onde se adoptam práticas conservacionistas específicas e as perdas observadas em áreas onde a cultura é plantada no sentido do declive, sem tais práticas (Bertoni e Neto, 1990). Silva (1995) reforça esse conceito, destacando que o factor P está directamente relacionado a um conjunto de práticas e operações agrícolas cujo objectivo é a conservação do solo, por meio do controle da erosão, minimizando os impactos do escoamento superficial. Sobre a óptica do pior cenário possível (solo sem qualquer cobertura e sem nenhuma prática conservacionista), são considerados os valores C e P iguais a 1 em conformidade com o recomendado por Chaves, 1994.

4.3.2 Factores Topograficos do Terreno (LS)

A topografia do terreno exerce um papel crucial no processo de perda de solo, combinando a declividade média do relevo com o comprimento das encostas, conforme descrito por Bertoni e Neto (1993). O comprimento da rampa, representado pelo factor L, é definido como a distância desde o ponto inicial de escoamento superficial da água até o ponto onde ocorre uma redução em sua velocidade, favorecendo o início da deposição de sedimentos, especialmente em rupturas de vertentes ou junto a vales. O factor S, por sua vez, refere-se ao ângulo ou índice de inclinação do terreno, o que influencia directamente a velocidade e o volume do escoamento superficial (Wischmeier e Smith, 1978). O factor L é dada pela equação 3:

$$Lx = \frac{(A_{i,j}+D^2)^{m+1}-(A_{i,j})^{m+1}}{X_{i,j}^m * D^{m+2} * 22.13^m} \quad (3)$$

Onde:

- **Lx** é o factor de comprimento de vertente de uma celula com cordenadas;
- **A_{i,j}** é a área de contribuição da celula em coordenadas;
- **D** é o tamanho da celula;
- **X** é o coeficiente função do aspecto para grade de célula em coordenadas;
- **m** é o coeficiente função da declividade para grade de celula com coordenadas.

O coeficiente **m** pode ser determinado a partir da equação 4, proposta por Foster et al. (1977) e posteriormente refinada por McCool et al. (1987, 1989).

$$m = \frac{\beta}{1+\beta} \quad (4)$$

Onde: **β** é quociente entre a erosão em sulcos e entre sulcos, expressa pela equação 5:

$$\beta = \frac{\sin \theta / 0.0896}{3 \sin \theta^{0.8} + 0.56} \quad (5)$$

O factor **LS**, que representa a influência da topografia no processo de erosão, é calculado através do produto do factor de comprimento de rampa (**L**) e factor de inclinação (**S**). Esse cálculo reflecte a interação entre o comprimento da encosta e a declividade do terreno, na modelagem de perdas de solo dada pela equação 6.

$$LS = S * Lx \quad (6)$$

4.3.3 Factor de Erosividade da Chuva (R)

O factor R é um valor numérico que quantifica a capacidade da chuva de provocar erosão em áreas desprotegidas em uma determinada localidade (Wischmeier e Smith, 1962). Em suas investigações, Wischmeier e Smith (1978) enfatizaram a importância de um histórico de pelo menos 20 anos de dados de precipitação para uma avaliação precisa desse factor. No contexto da avaliação do potencial erosivo da chuva, Bertoni e Neto (1993) determinaram que o índice obtido pela multiplicação da energia cinética da chuva pela sua intensidade máxima em um intervalo de 30 minutos apresenta a melhor correlação com a perda de solo. Este índice é expresso pela seguinte equação 7:

$$EI = 67.355 * (P_m^2/P)^{0.85} \quad (7)$$

Onde:

- P_m – é a precipitação média mensal (mm);
- P – é a precipitação média anual (mm);
- EI – é a média mensal do índice de erosão (MJ.mm/(ha.h)).

A equação 8 quantifica a erosividade da chuva à partir da soma dos valores mensais do índice de erosividade através da seguinte equação:

$$R = \Sigma EI \quad (8)$$

4.3.4 Índice de Erodibilidade (K)

Em 1978, Wischmeier e Smith concluíram que diferentes solos apresentam variações significativas em sua susceptibilidade à erosão, mesmo quando todos os factores do processo permanecem constantes. Essa diferença é atribuída às propriedades inerentes dos solos e é designada como erodibilidade do solo, representada pelo factor K. De acordo com Jones *et al.*, o valor de K indica a susceptibilidade do solo à erosão, sendo influenciado por características como textura, teor de matéria orgânica, estrutura e permeabilidade do solo. A erodibilidade do solo pode ser expressa pela equação 9, conforme descrito por Paiva (2001).

$$K = [2.1 * 10^{-4} * M^{1.14} * (12 - Ka) + 3.25 * (Kb - 2) + 2.5 * (Kc - 3)] * 0.001313 \quad (9)$$

Onde:

K – factor de erodibilidade do solo (ton/MJ)/(mm/h);

Ka – % de matéria orgânica;

Kb – coeficiente relativo a estrutura do solo;

Kc – classe de permeabilidade;

M – (% silte + % areia muito fina) * (100 – % argila).

4.3.5 Factor de correcção

Visto que trata-se de uma área de grande porte, Julién e Frenette (1987) concluíram que a RUSLE poderia ser aplicada desde que contivesse um factor de correcção, daí que Molnar e Julién (1998) propuseram a equação 10 para fins de correcção:

$$Q = 0.577 * A^{-0.174} \quad (10)$$

Onde: **A** representa o potencial de erosão e **Q** o factor de correcção. Os resultados dos modelos matemáticos de perda do solo por erosão são dependentes da resolução espacial dos dados, daí surgiu a necessidade de correcção.

4.4 Análise Geoestatística do Modelo

De acordo com Hair *et al.* (2009), a regressão linear é uma técnica estatística amplamente utilizada na análise de dados devido à sua simplicidade e eficiência na identificação de relações entre variáveis. Contudo, a aplicação tradicional da regressão linear tem sido expandida para outras áreas de conhecimento, incluindo o estudo de fenómenos de natureza geográfica, o que levou ao desenvolvimento do modelo de regressão espacial (Câmara *et al.*, 2002).

A regressão espacial se diferencia da regressão linear convencional ao considerar a autocorrelação espacial, ou seja, a dependência espacial existente entre as variáveis de uma mesma região ou entre áreas vizinhas. Segundo Hair *et al.* (2009), a análise de regressão espacial pelo método de Mínimos Quadrados Ordinários (*Ordinary Least Squares* - OLS) permite explorar a relação entre uma variável dependente e múltiplas variáveis independentes, levando em consideração aspectos espaciais. Os principais indicadores utilizados para avaliar a qualidade do ajuste do modelo incluem a significância dos coeficientes de regressão, teste de Lagrange Multiplicador Robusto (*Robust LM*) e o coeficiente de determinação (R^2).

No presente estudo, o modelo de regressão espacial OLS foi aplicado para investigar a correspondência entre a perda de solo e os factores do modelo RUSLE (R, K, C, LS e P). Essa abordagem visa capturar a influência espacial dos factores de erosividade (R), erodibilidade (K), cobertura do solo (C) e topografia do terreno (LS), sobre a variabilidade espacial da perda de solo, conforme expresso na equação (11) descrita por Islam (2022):

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (11)$$

Onde:

Y – É a variável dependente;

α – É a constante que representa o valor de Y quando o X assume valor zero;

β – Representa a mudança observada em Y associada ao aumento de uma unidade em X ;

X – Representa a variável independente;

ε – É o termo estocástico que representa o erro predito.

Ao incorporar a autocorrelação espacial no modelo, a precisão das estimativas é aumentada, minimizando a violação de pressupostos estatísticos típicos de modelos de regressão linear convencional estabelecidos por Lewis-Beck (1980) e Kennedy (2009), nomeadamente:

- A relação entre a variável dependente e as variáveis independentes deve ser linear;
- As variáveis foram medidas adequadamente, ou seja, assume-se que não há erro sistemático de mensuração;
- A expectativa da média do termo de erro é igual a zero;
- Homocedasticidade, ou seja, a variância do termo de erro é constante para os diferentes valores da variável independente;
- Ausência de autocorrelação, ou seja, os termos de erros são independentes entre si;
- A variável independente não deve ser correlacionada com o termo de erro;
- Nenhuma variável teoricamente relevante para explicar Y foi deixada de fora do modelo e nenhuma variável irrelevante para explicar Y foi incluída no modelo;
- As variáveis independentes não apresentam alta correlação, o chamado pressuposto da não multicolinearidade;
- Assume-se que o termo de erro tem uma distribuição normal;
- Há uma adequada proporção entre o número de casos e o número de parâmetros estimados.

Assim, obtém-se uma análise mais robusta e aderente à complexidade dos fenómenos geográficos.

A escolha do modelo espacial mais adequado deve levar em consideração o grau de dependência espacial do fenómeno analisado, pois o poder explicativo adicional proporcionado pela regressão espacial está directamente condicionado à intensidade dessa dependência (Silva, 2006). Nesse sentido, a análise da autocorrelação espacial é essencial, pois permite investigar como os valores de uma variável

em uma determinada área se relacionam com os valores dessa mesma variável nas localizações adjacentes (O'Sullivan e Unwin, 2010).

Uma das métricas mais antigas e amplamente utilizadas para mensurar a autocorrelação espacial é o Índice de Moran Global (I), proposto por Moran em 1950. Este índice avalia a interdependência espacial entre os polígonos de uma região de estudo, sintetizando essa relação em um valor único que representa toda a área analisada. O Índice de Moran I varia de -1 a 1, onde valores positivos indicam autocorrelação espacial positiva (valores semelhantes estão agrupados), valores negativos indicam autocorrelação espacial negativa (valores dissimilares estão agrupados) e valores próximos de zero sugerem ausência de autocorrelação espacial.

Para a modelagem da dependência espacial, é utilizada uma matriz de proximidade espacial, denominada matriz de estrutura espacial ou matriz de pesos espaciais (*spatial weights matrix*), conforme O'Sullivan e Unwin (2010). Essa matriz, representada por **W**, é construída de forma a indicar a intensidade da interação espacial entre os elementos, variando de 0 (ausência de interação) a 1 (interação forte). A matriz de pesos espaciais define as relações de vizinhança e, frequentemente, é baseada na proximidade geográfica ou na conectividade entre os polígonos.

O Índice de Moran I, em particular, é calculado considerando a matriz de vizinhança de primeira ordem, que define os vizinhos directos de cada polígono, independentemente do critério adoptado para a construção da matriz de pesos espaciais. A fórmula para o cálculo do Índice de Moran I é apresentada por Câmara et al. (2002) e é expressa pela Equação (10):

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}(Z_i - U_z)(Z_j - U_z)}{\sum_{i=1}^n (Z_i - U_z)^2} \quad (10)$$

Onde:

n – É o número de áreas;

Z_i – É o valor do atributo considerado na área (i);

U_z – É o valor médio do atributo na região de estudo;

W_{ij} – É o elemento (ij) da matriz de vizinhança normalizada.

4.4.1 Modelos de Regressão Espacial

De acordo com Druck et al. (2004), a análise espacial de dados é uma abordagem científica que visa compreender a distribuição e os padrões espaciais de fenómenos, explorando as relações entre variáveis

em um contexto geográfico. Essa análise é fundamental para incorporar efeitos espaciais em modelos de regressão clássicos, o que é realizado por meio de testes como o Lagrange Multiplicador Robusto. Esse teste avalia a presença de autocorrelação espacial nos resíduos do modelo de Mínimos Quadrados Ordinários (OLS) e examina a influência de interações espaciais entre os vizinhos na variável dependente. Neste contexto de modelagem espacial, Bailey e Gatrell (1995) identificam dois modelos amplamente utilizados: o *Spatial Lag Model* (SAR), que incorpora dependência espacial directamente na variável dependente, e o *Spatial Error Model* (CAR), que considera a autocorrelação nos erros residuais do modelo.

4.4.2 *Spatial Lag Model* (SAR)

Câmara et al. (2005) explica na equação 11 que na regressão SAR, considera-se a dependência espacial em meio a adição ao modelo de regressão de um novo termo na forma de uma relação espacial para a variável dependente.

$$\mathbf{Y} = \rho \mathbf{WY} + \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (11)$$

Onde: \mathbf{W} é matriz de proximidade espacial, e o produto \mathbf{WY} é a dependência espacial em \mathbf{Y} e ρ é o coeficiente espacial autoregressivo. A hipótese nula para a não existência da autocorrelação espacial pode ser dada como $\rho = 0$. O objectivo deste modelo é introduzir a autocorrelação espacial como componente dele. Portanto, este modelo pode ser explicado conforme equação 12.

$$Y_i = \sum_j w_{ij} Y_j + \sum_{i=1} x_j \beta_i + \varepsilon_i \quad (12)$$

sendo w_{ij} elemento da matriz de proximidade espacial.

4.4.3 *Spatial Erro Model* (CAR)

De acordo com Câmara et al. (2005), regressão CAR considera que os efeitos espaciais são um ruído ou perturbação, por consequência este erro precisa ser removido. Portanto, os efeitos da autocorrelação espacial são associados ao termo de erro ε e o modelo pode ser explicado pela equação 13.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \lambda \mathbf{W}\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\xi} \quad (14)$$

Onde: $\mathbf{W}\boldsymbol{\varepsilon}$ é o componente do erro com efeitos espaciais, λ é o coeficiente autoregressivo e $\boldsymbol{\xi}$ é o componente de erro com variância constante e não correlacionada. A hipótese nula para não existência de autocorrelação espacial é que $\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{0}$, ou seja, o termo do erro não é espacialmente correlacionado.

Resultados e Discussão

O capítulo 4 objectiva apresentação dos resultados obtidos com base na metodologia descrita, por meio de tabelas e mapas temáticos da variação fenomenal da erosão compreendido nos anos 2003, 2013 e 2023, e o desempenho do modelo.

5.1 Desempenho do Modelo

Os resultados de operações aritméticas envolvendo variáveis apresentam indefinições, portanto, as operações matemáticas realizadas em ambientes SIG estão frequentemente associadas a incertezas (Yamamoto *et al.*, 2015). Por conseguinte, feitas as correções dos dados para garantir a consistência na captura das informações, que serviram de base para estimar a perda do solo, procedeu-se com avaliação do desempenho do modelo com recursos geoestatísticos.

A técnica de análise espacial baseada no Índice de Moran (1950), foi utilizada para determinar a correlação espacial da perda de solo por erosão hídrica, tendo como resultados expressos na tabela 5.

Tabela 5: Correlação espacial com recurso a Índice de Moran I

Parâmetros	2003	2013	2023
Permutações	999	999	999
Pseudo p-valor	0.001	0.001	0.001
Moran's I observado	-0.4713	-0.3635	-0.3486
Valor esperados (E[i])	-0.0007	-0.0005	-0.0001
Média (mean)	-0.00017	-0.0007	0.0
Desvio padrão (sd)	0.0161	0.0135	0.0058
Valor Z	-29.1192	-26.8546	-59.9263

Os três índices apresentaram coeficientes significativamente negativos, evidenciando uma distribuição espacial caracterizada pela proximidade entre áreas de alta e baixa susceptibilidade à erosão. No entanto, o p-valor obtido indicou uma violação do pressuposto de independência espacial dos erros no modelo de Regressão Linear Ordinária (OLS).

Diante disso, foi realizada uma análise para avaliar a presença de autocorrelação espacial nos resíduos do modelo OLS e identificar a influência dos vizinhos na variável dependente, com o objectivo de definir o tipo de regressão espacial mais apropriado. Para tal, aplicou-se o teste de Lagrange Multiplicador Robusto, cujos resultados estão apresentados na Tabela 6, permitindo a identificação de efeitos espaciais relevantes no modelo.

Tabela 6: Teste de Lagrange Multiplicador Robusto (*Robust LM*)

<i>Robust LM</i>	2003	2013	2023
<i>Spatial Lag Model (SLM)</i>	13.8924	25.8007	291.5267
<i>Spatial Error Model (SEM)</i>	3232.9554	1802.8596	3281.6385

A análise da correlação dos resíduos revelou uma maior intensidade, reflectida nos valores de R^2 obtidos para os anos de 2003, 2013 e 2023, que foram de 0.972, 0.949 e 0.958, respectivamente. Estes resultados indicam que o modelo apresentou um desempenho robusto na explicação do fenómeno em estudo, com uma capacidade explicativa de aproximadamente 97%, 95% e 96% para os respectivos anos. Isso sugere uma alta adequação do modelo na captura das relações entre as variáveis independentes e a variável dependente ao longo do período analisado.

5.2 Variação dos Factores Actuantes no Processo Erosivo

Para o acompanhamento de áreas susceptíveis a erosão foram determinados os factores correspondentes a topografia do terreno, resistência do solo de acordo com as características que representa, bem como a intensidade que a chuva tem no processo erosivo em diferentes classes que a cobertura do solo apresenta.

5.2.1 Factor LS e K

Os dados SRTM, segundo Santos *et al.* (2006), podem ser utilizados em substituição a dados cartográficos para obter a topografia do terreno. A influencia da topografia do terreno no processo de erosão foi gerado através do modelo digital de elevação (DEM). Portanto, para corrigir os erros gerados pelo DEM foi utilizado o algoritmo *pit remove* do TauDEM. É um algoritmo projectado para eliminar depressões em DEM, isto é, permite o fluxo contínuo da água, eliminando depressões artificiais que fazem com que o fluxo da água tenha interrupções artificiais. Adicionalmente, foram empregadas técnicas de álgebra de mapas e algoritmos da GDAL para determinar o comprimento da rampa, extraíndo a direcção do fluxo de cada célula e acumulando o fluxo no DEM. Essas informações são cruciais, pois influenciam directamente o comprimento do escoamento. A inclinação do terreno foi calculada utilizando a ferramenta *Raster Calculator* do SAGA, uma vez que áreas com relevo acidentado tendem a apresentar um maior potencial de erosão.

Para a confecção do mapa de erodibilidade do solo, os dados que representam a distribuição espacial dos solos em Moçambique foram fornecidos pelo Instituto Investigação Agrária de Moçambique (IIAM) com a seguinte descrição dos solos: grupo de solos, características dominantes, geomorfologia e geologia do solo, a forma da terra, textura do solo, topografia, drenagem, matéria orgânica, tipo de classificação, tipo de vegetação e principais limitações do solo. Para determinar a erodibilidade solo, foi relacionado o tipo de solo em Boane com a erodibilidade determinada, na tabela 7, por Freire (1990)

em conformidade com métodos directos do campo sobre chuvas naturais e simuladas por Wischmeier e Smith (1965).

Tabela 7: Erodibilidade do solo com base nas literaturas

Tipos de solo	Classificação do Solo	Factor K
Corpos de água	---	0
Franco Arenosos	LVd	0.034
Argilo	LEa	0.013
Franco-Argilo arenoso	TEe	0.032
Argiloso	PVe	0.023

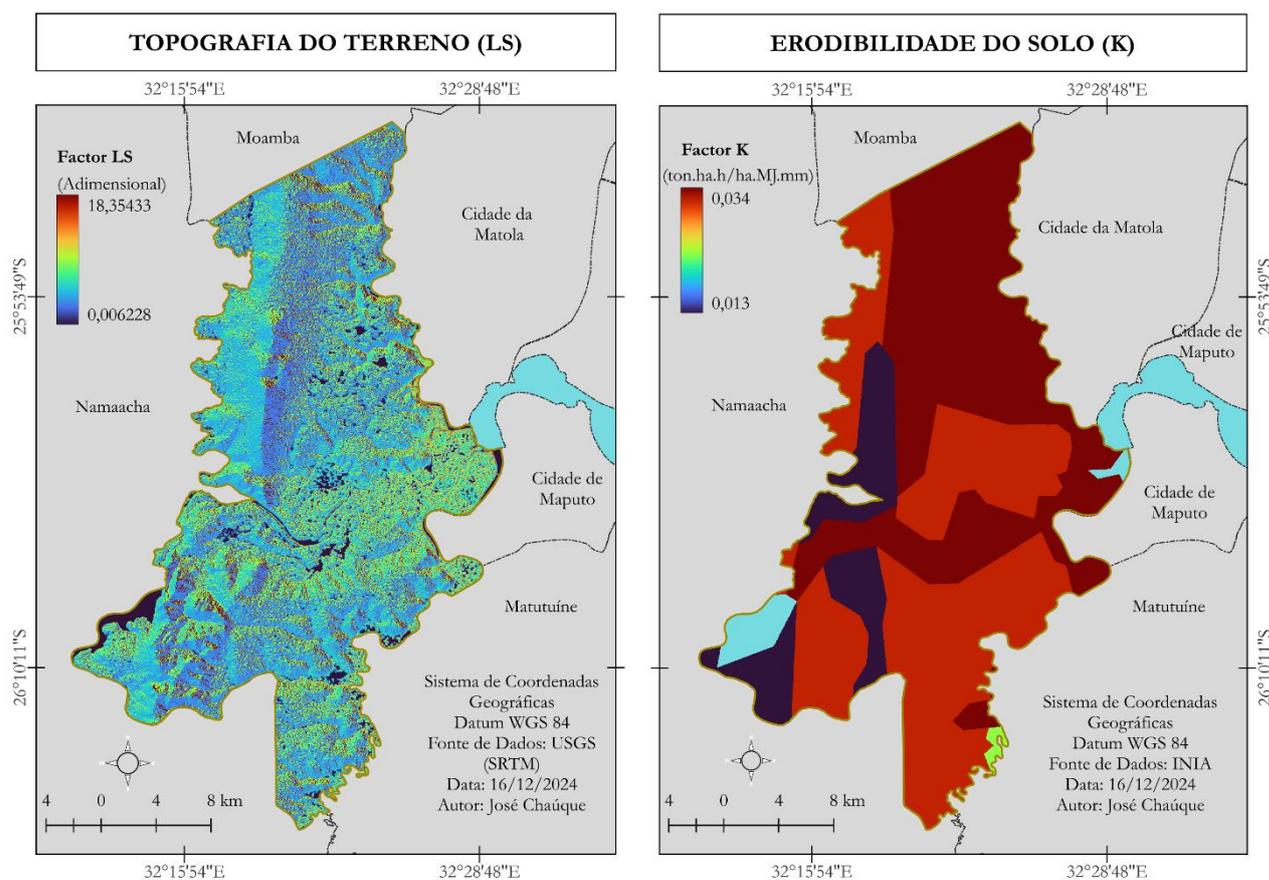


Figura 10: Mapa de topografia do terreno (LS) e Erodibilidade do solo (K)

A topografia do terreno (LS) representa o ângulo ou o índice da inclinação do comprimento de rampa (adimensional), caracterizado por valores mínimos e máximos, sendo 0.006 e 18.354, respectivamente. O valor máximo aponta a origem do caimento da água até o ponto em que ela desagua, podendo transportar sedimentos de um ponto para o outro durante o trajecto percorrido.

A erodibilidade do solo (K) representa o efeito integrado dos processos que regulam o comportamento do solo frente aos agentes erosivos (Lal, 1988). Os parâmetros físicos e químicos dos solos determinam

a variação da erodibilidade em diferentes zonas, onde os solos argilosos apresentam baixa resistência a erosão comparado a solos arenosos (Lorandi e Pedro, 2004).

5.2.2 Factor R e C

Os dados de precipitação utilizados nesta análise para determinar a erosividade consistem em medições mensais, abrangendo um histórico de 20 anos para cada estudo. As informações pluviométricas foram convertidas em valores do factor R. Em seguida, foi gerado um *shapefile* contendo os pontos centrais de cada *pixel*, que foi utilizado para a interpolação dos dados por meio do método de Krigagem Ordinária.

Para o uso e cobertura do solo, utilizou-se o método supervisionado de Máxima Verossimilhança com dimensão temporal de 10 anos dos efeitos acumulativos das mudanças de uso e cobertura do solo. Em conformidade com o recomendado por Chaves (1994), considerou-se as práticas conservacionistas iguais a 1, e no uso e manejo do solo classificou-se as bandas do vermelho, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas 1 e 2.

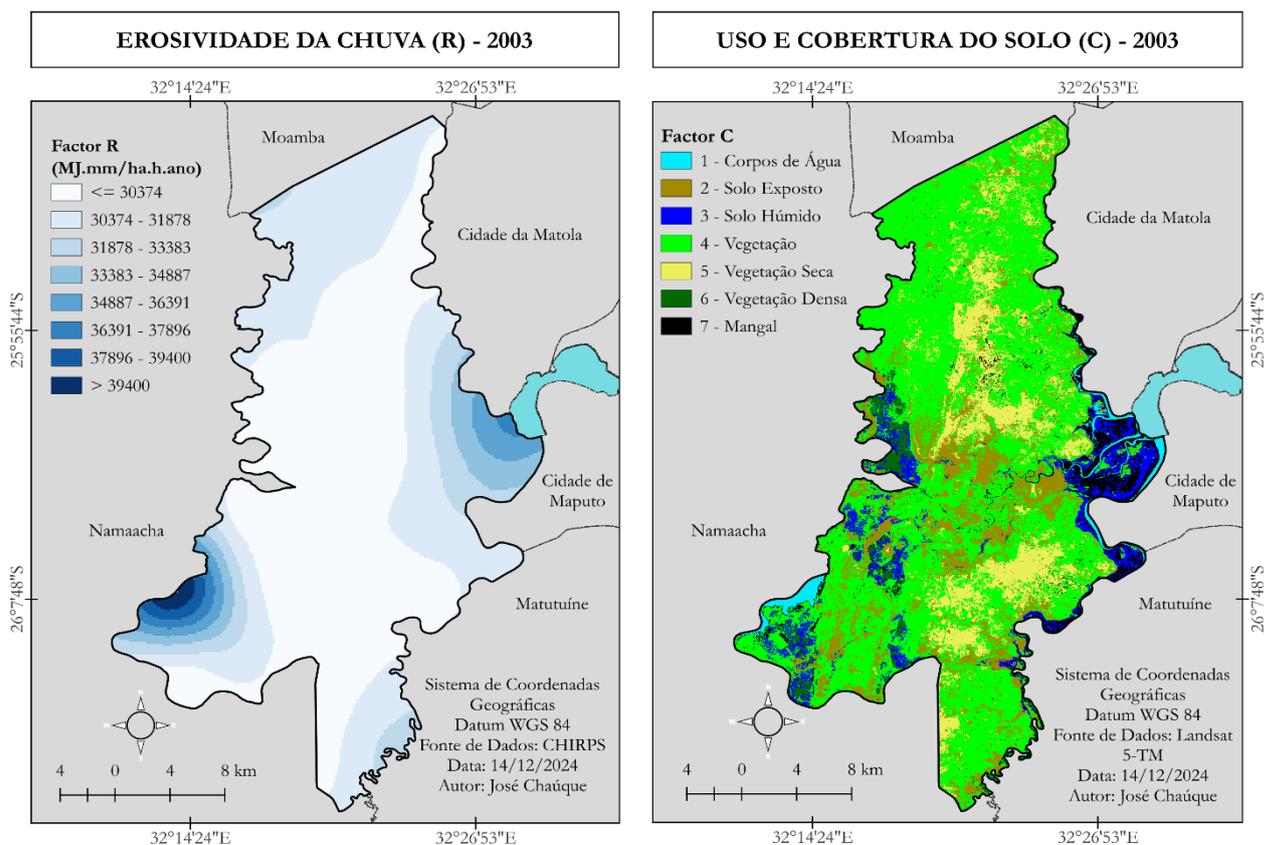


Figura 11: Erosividade da chuva (R), e uso e manejo do solo (C), referentes a 2003

O factor referente a topografia do terreno (LS) e a erodibilidade do solo (K) foi o mesmo em todos os anos, isto é, usou-se os mesmos factores. Em contrapartida, para estimativa da erosividade e uso e cobertura do solo de 2013 e 2023 procedeu-se com o mesmo método da concepção 2003, as figuras 12 e 13 apresentam as variações do factor R e C.

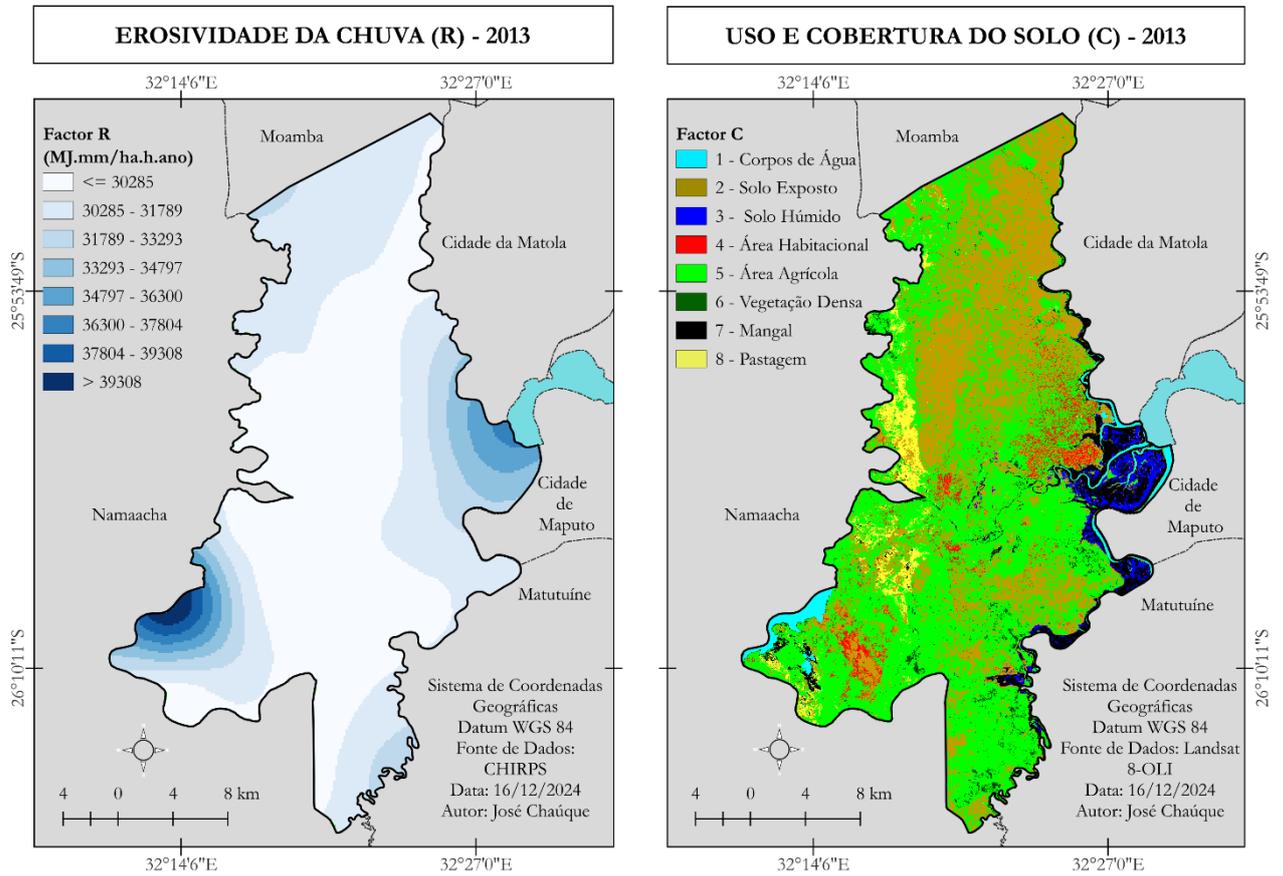


Figura 12: Erosividade da chuva (R), e uso e manejo do solo (C), referentes a 2013

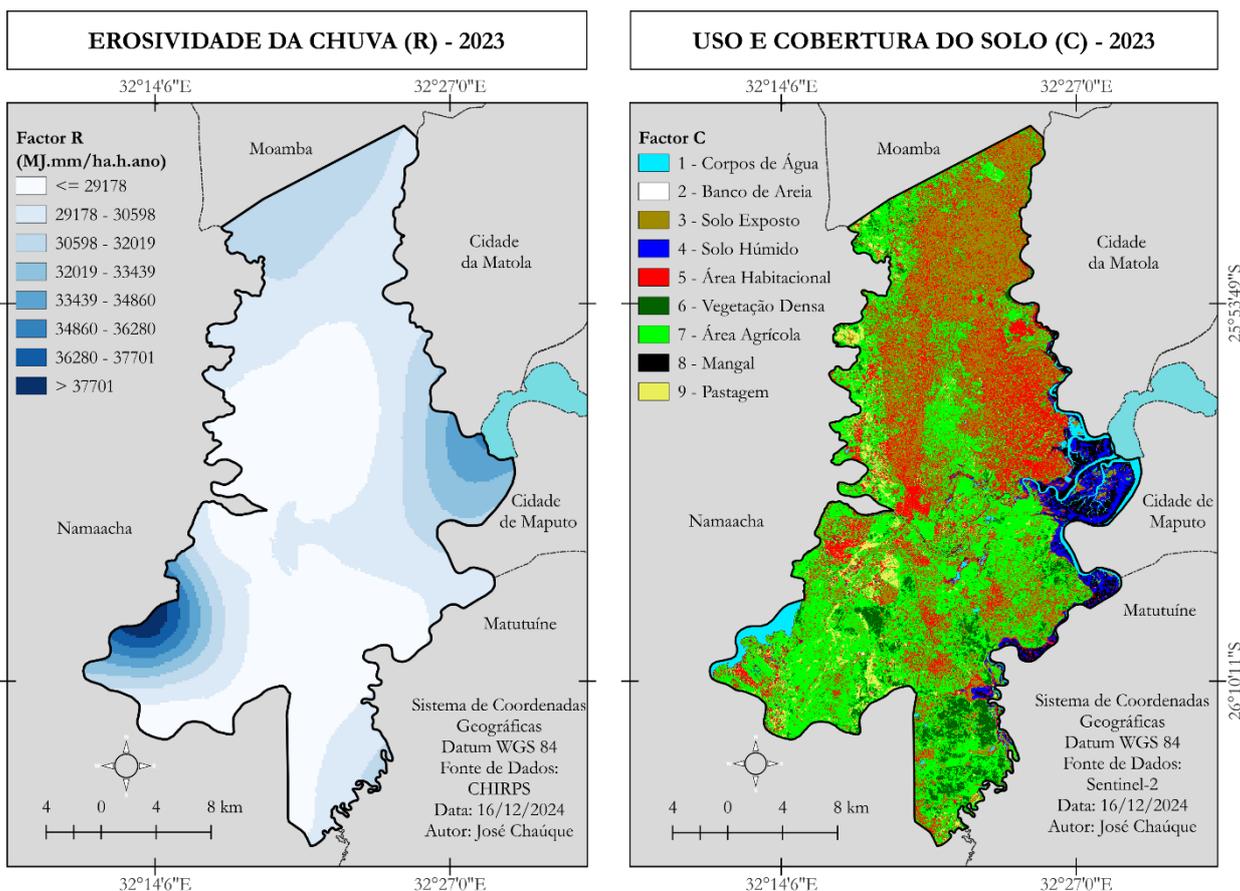


Figura 13: Erosividade da chuva (R), e uso e manejo do solo (C), referentes a 2023

Com base no recomendado por Renato (2006), foi atribuído um valor único para cada classe do factor (C), que estima a resistência ou a susceptibilidade, conforme descrito na tabela 8.

Tabela 8: Valor C para cada tipo de classe

Classe de uso e cobertura do solo	Factor C
Água	0
Solo exposto	0.9
Solo húmido	1
Área habitacional	0.001
Área agrícola	0.018
Vegetação seca	0.5
Vegetação densa	0.08
Mangal	0.04
Pastagem	0.12

5.3 Qualificação do Potencial da Susceptibilidade do Solo à Erosão Hídrica

Para avaliar o índice de susceptibilidade do solo à erosão, foi aplicada a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE), que categorizou os níveis de risco de erosão em classes que variam de muito baixo a muito alto. Essa avaliação foi baseada em parâmetros pré-estabelecidos por Renato (2006) para estimar o potencial de zonas de risco. A Figura 14 apresenta os níveis de susceptibilidade estimados para o ano de 2003, com a distribuição percentual espacial das classes de susceptibilidade. Os níveis foram distribuídos da seguinte forma: muito baixo (36.07%), baixo (27.98%), médio (32.65%), alto (2.9%) e muito alto (0.4%).

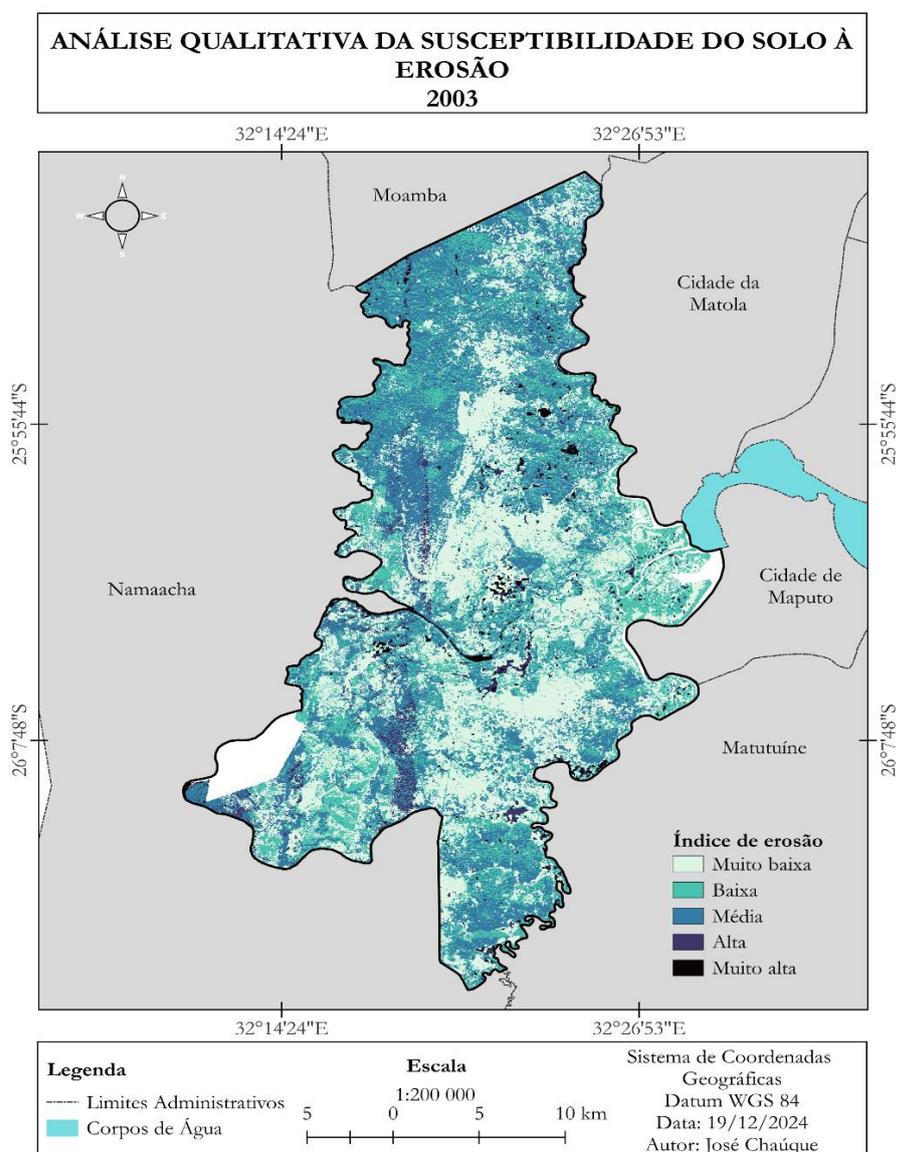


Figura 14: Índice de susceptibilidade do solo à erosão (2003)

Entre os factores independentes analisados, o factor K e o factor C mostraram maior influência na determinação das áreas susceptíveis à erosão, com coeficientes de 0.835 e 0.156, respectivamente. Por outro lado, os factores com menor influência foram o factor R e o factor LS, cujos coeficientes foram 0.016 e 0.032, respectivamente.

No período 2013 observou-se uma redução de 1.41% na susceptibilidade alta, que passou de 2.9% em 2003 para 1.49% em 2013, como também houve uma redução significativa na classe de susceptibilidade media de 32.65% para 3.00%, que culminou com o aumento nas zonas de mais baixo, baixa e muito alta, cujas áreas correspondentes atingiram 43.8%, 50.09% e 1.62%, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 15.

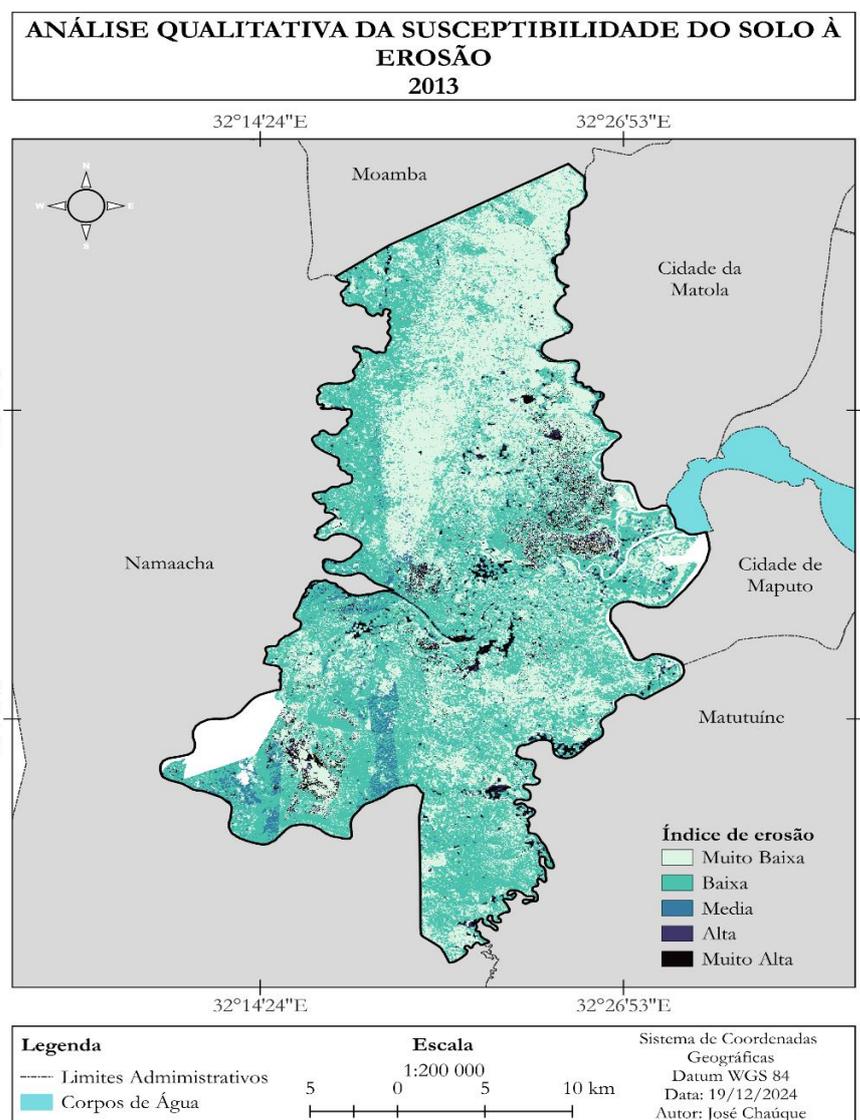


Figura 15: Índice de susceptibilidade do solo à erosão (2013)

Em termos dos factores de influência, houve um aumento de 0.424 na magnitude do factor de erodibilidade do solo (K), alcançando um valor de 1.259 em 2013. Por outro lado, os factores C, R e LS apresentaram decréscimos, com magnitudes de 0.122, 0.012 e 0.031, respectivamente. Apesar da redução no factor C, os factores K e C continuam sendo os mais influentes na determinação da susceptibilidade do solo à erosão, devido à magnitude relativa de seus coeficientes.

Com base na análise histórica dos anos de 2003 e 2013, a Figura 16 apresenta os níveis de susceptibilidade à erosão para o ano de 2023, revelando alterações significativas na distribuição das classes de risco. O nível de susceptibilidade muito baixo aumentou de 43.8% em 2013 para 66.37% em 2023. De forma semelhante, o nível alto registrou um aumento de 1.49% para 10.1%, enquanto o nível muito alto subiu de 1.62% para 9.83%. Em contrapartida, observaram-se reduções nas classes de risco baixo e médio, com o nível baixo diminuindo de 50.09% para 11.5% e o nível médio reduzindo de 3.00% para 2.2%.

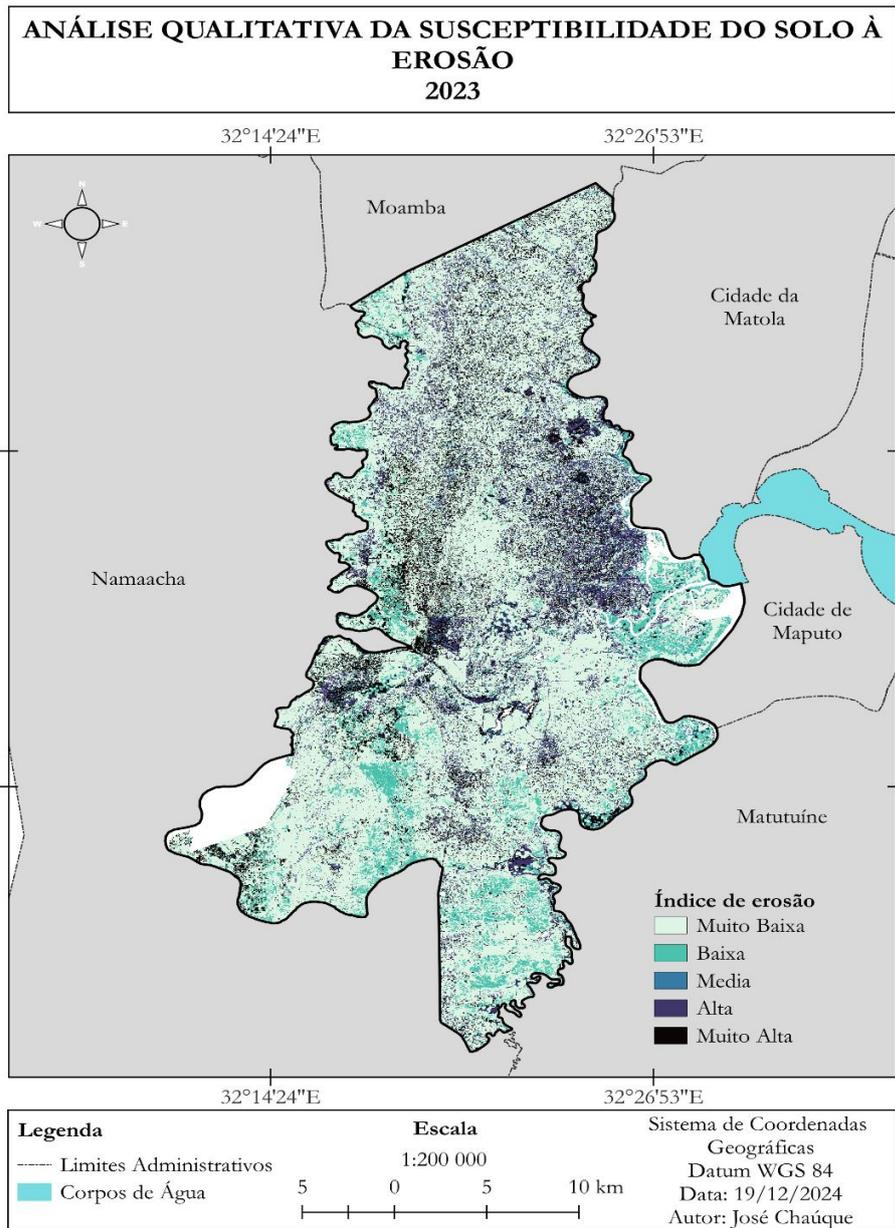


Figura 16: Índice de susceptibilidade do solo à erosão (2023)

No que se refere aos factores de influência, verificou-se um aumento em todos os parâmetros analisados. As magnitudes dos factores C, K, LS e R foram de 0.324, 1.755, 0.04 e 0.016, respectivamente. Estes resultados indicam que os factores C e LS exerceram maior influência na análise da susceptibilidade do solo à erosão.

A variação constante dos factores, particularmente K e LS, está directamente relacionada à interação com outras variáveis. Essas interações desempenham um papel dinâmico, influenciando a magnitude e o impacto relativo dos factores sempre que os dados das variáveis dependentes, como R e C, são alterados.

Conclusões e Recomendações

O presente capítulo visa avaliar de forma genérica a influência das actividades antropogénicas quando relacionados com as características do terreno e eventos naturais, a concepção do modelo perante os factores de destaque a erosão, bem como recomendações do uso e manejo do solo futuro, tendo como base histórica a variação do fenómeno no período compreendido entre 2003 e 2023.

6.1 Conclusões

A distribuição espacial de susceptibilidade do solo a erosão está fortemente vinculada ao uso e manejo do solo, visto que foi um dos factores que teve maior variação em todos os anos. Por conseguinte, foi o maior influenciador da variação do factor K, tendo tido a maior variação em todos os anos quando relacionado com a variação do factor C, juntamente com os factores R e LS, que tiveram menor influência comparando.

Embora o modelo utilizado tenha limitações, como sua concepção original para estimar quantitativamente a perda de solo em pequenas áreas, ele mostrou-se eficaz para estimativas qualitativas da susceptibilidade à erosão em grandes áreas ao ser aplicada uma correcção metodológica. Assim, a abordagem proposta é válida para estudos iniciais de manejo sustentável dos recursos naturais e para a preservação de ecossistemas, fornecendo informações valiosas para o planeamento territorial.

Entre 2003 e 2013, observou-se uma redução das áreas classificadas como susceptibilidade moderada para níveis muito baixos e baixos. No entanto, áreas associadas a assentamentos humanos apresentaram uma tendência oposta. Em 2013 surgiram indícios de alta susceptibilidade à erosão, que se intensificaram em 2023, acompanhando o crescimento demográfico. Esses resultados destacam a importância de práticas de manejo conservacionista sustentável para mitigar os impactos da ocupação humana em áreas susceptíveis.

6.2 Recomendações

O crescimento demográfico está profundamente interligado ao meio ambiente e ao uso antropogénico dos recursos naturais. O uso desordenado desses recursos, frequentemente motivado por questões de sobrevivência, tem contribuído para o aumento do risco de susceptibilidade do solo à erosão. Nesse contexto, o modelo RUSLE apresenta um desempenho significativo como ferramenta para o

planeamento ambiental e controlo sustentável dos recursos naturais. O conhecimento antecipado das causas da erosão e seus potenciais impactos no meio ambiente oferece subsídios cruciais para a formulação de estratégias preventivas e correctivas eficazes na mitigação desse fenómeno.

Embora o coeficiente de determinação (R^2) indique robustez do modelo na explicação do fenómeno da erosão, há necessidade de incorporar modelos baseados em processos físicos subjacentes à erosão. Essa abordagem irá permitir uma calibração mais precisa dos parâmetros de entrada, fornecendo estimativas mais alinhadas à realidade local. Portanto, a combinação entre RUSLE e modelos baseados em processos físicos podem aprimorar a confiabilidade das análises e auxiliar na formulação de políticas ambientais mais eficazes e contextualizadas.

Bibliografia

- al., W. J. (1989). *A Compendium of Soil Erodibility Data from WEPP Cropland Soil Field Erodibility Experiments 1987 & 88*.
- Ambiental, M. p. (2007). *Plano de Acção para a Prevenção e Controlo da Erosão de Solos 2008 - 2018*.
- Amorim, R. S. (2004). *Avaliação dos Modelos de Predição da erosão Hídrica USLE, RUSLE, WEPP para Condições Edafoclimáticas Brasileiras*. Minas Gerais.
- Anderson Luis Ruhoff, B. S. (2006). *Avaliação dos Processos Erosivos Através de Equação Universal de Perdas de Solo, Implementada com Algoritmos em Legal*.
- Azevedo, J. (2010). *Cartografia Digital e Detecção Remota*.
- Bihale, D. (2016). *Indústria Extractiva em Moçambique - Perspectivas para o Desenvolvimento do País*.
- BOLFE, É. L., MATIAS, L. F., & FERREIRA, M. C. (2008). *Sistemas de Informação Geográfica: Uma Abordagem Contextualizada na História*.
- Bortoletto, K. C. (2005). *Aplicação de SIG na Estimativa da produção de sedimentos por Erosão Laminar em Microbacias Hidrográficas com Floresta Plantada e com floresta natural*. Piracicaba.
- Carvalho, L. E. (2006). *Regressão linear geograficamente ponderada em ambiente SIG*.
- Chai, T. (2014). *Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?— Arguments against avoiding RMSE in the literature*.
- Chein, F. (2019). *Introdução aos Modelos de Regressão Linear*.
- CM. (2017). *Plano Director Para a Redução do Risco de Deastres 2017-2030 - Conselho de Ministros*.
- Cumbane, B. L. (2012). *Aplicação de Sistemas de Informação Geográfica para a determinação do Potencial Natural de Erosão dos solos no Distrito de Sussundenga - Moçambique*. Lisboa.
- Da Silva, I. d. (1993). *Formação, Estabilidade e Qualidade de Agregados do Solo Afectado Pelo Uso Agrícola*.
- De Sousa, A. M. (2011). *Fundamentos Teóricos de Detecção Remota*.
- Dedecek, C. M. (2009). *Erosão Real e Estimada Através da RUSLE em Estradas de Uso Florestais, em Condições de Relevo Plano a Suave Ondulado*.
- Denardin, J. E. (1990). *Erodibilidade do Solo Estimada por Meio de Parâmetros Físicos e Químicos*.
- Erik Charas. (2009). *arreiros enterram residentes de Guava. Verdade*.

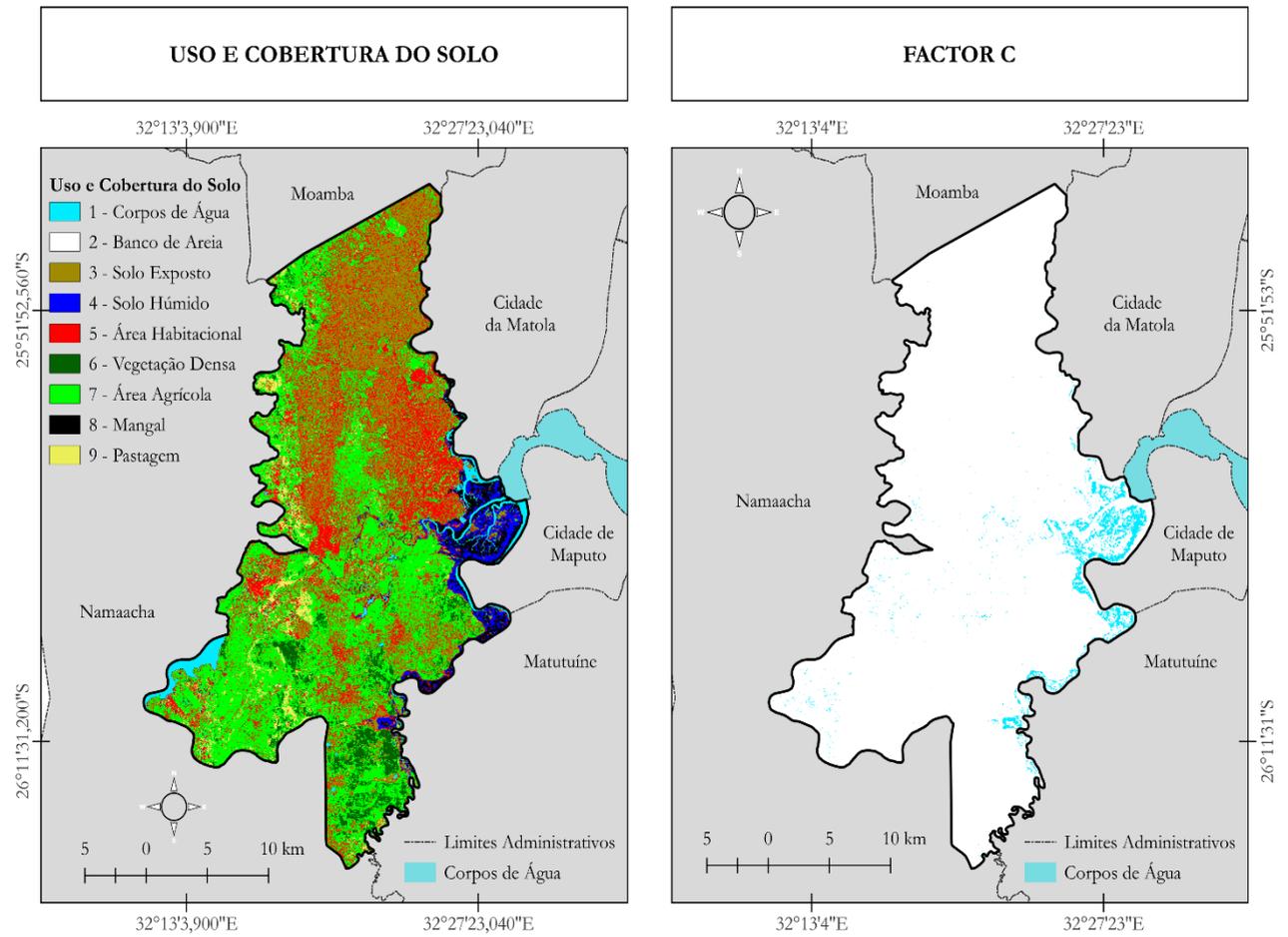
- F., F. F. (2015). *Regressão Espacial*.
- Ferreira, L. A. (2013). *Escavação e Exploração de Minas a Céu Aberto*.
- Figueiredo, D. (2005). *Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto*.
- Filho, D. F. (2011). *O que Fazer e o que Não Fazer com a Regressão: Pressupostos e Aplicações do Modelo Linear de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO)*.
- Freitas, M. W. (2016). *Modelos de Regressão Espacial Aplicados à Investigação de Variáveis de Mudança de Uso e Cobertura da Terra no Alto Uruguai (RS e SC)*.
- Gil, A. (2012). *Satélites para Detecção Remota Aplicada à Gestão Territorial (versão em português)*.
- Gustavo Bayma Siqueira da Silva, D. G. (2012). *Procedimentos para correção geométrica de imagens de satélite*. Campinas, SP.
- INE. (2012). *Estatísticas do Distrito de Boane*.
- INGD. (2022). *Situação de Emergência: Período de 01 de Outubro/ 2020 a 31 de Janeiro de 2022*.
- Ivan Zahinos Ruiz, A. G. (2018). *Meio Ambiente e Mineração Artesanal em Três Distritos de Cabdo Delgado: Ancuabe, Montepuez e Namuno - Um Estudo Transversal*.
- J. PAIS BARBOSA, F. V. (2006). *Aplicação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) a Estudos na Zona Costeira*.
- João, R. A. (2023). *Dinâmica de Transformação Urbana na Região de Maputo (Boane, Moamba E Namaacha). Análise do Risco de Inundações Geradas pela Impermeabilização de Solos. Caso de Estudo: Bairro Fiche - Município da Vila de Boane*.
- Juliana Serioa, C. A. (2008). *Aplicação de USLE e SIG na Caracterização de Três Micro Bacias Hidrográficas no Brasil*.
- Lal. (1998). *Soil Erosion Research Methods*.
- Lemos, R. C. (1996). *Manual de Descrição e Colecta de Solo no Campo*.
- Libombo, S. E. (2023). *Extração Mineral e seus Impactos Socioambientais em Moçambique*. Recife.
- Luz, J. P. (2024). *Perdas de Solo por Erosão Hídrica Usando RUSLE e Random Forest de Traucateua - Pará. Capanema - PA*.
- Macarringue, E. D. (2020). *Avaliação da Vulnerabilidade à Perda de Solo no Distrito de Boane em Moçambique*.

- Matos, M. A. (2012). *Aplicação de Técnicas de Detecção Remota à Cartografia Temática: O Caso da Região do Lobito (Angola)*.
- MICOA. (2005). *Avaliação da Vulnerabilidade as Mudanças Climáticas e Estratégias de Adaptação*.
- MICOA. (2012). *Estratégia Nacional de Adaptação e Mitigação de Mudanças Climáticas*.
- MICOOA. (2007). *Plano de Acção para a Prevenção e Controlo da Erosão de Solos 2008 - 2018*.
- Nelson Giovannini Junior et., a. (2022). *Cross Assessment of Erosive Processes with Methodologies for Quantifying Soil*. Revista Brasileira de Geografia Física v.15, n.02 (2022) 1142-1152.
- Oliveira, C. d. (2016). *Introdução ao Estudo da Ciência do Solo*.
- Oliveira, L. R. (2020). *Automatização do Protocolo de Aquisição e Pré-processamento 'de imagens termicas do sensor TIRS do satélite Landsat-8*.
- Pereira, K. N. (2009). *Avaliação da Fragilidade Ambiental na Microbacia do Ribeirão de Imaruí/SC: uma análise comparativa entre o modelo da Fragilidade Empírica dos Ambientes e o Método da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE)*. Florianópolis.
- Poesen, B. &. (2006). *Soil Erosion in Europe*.
- R., S. (2017). *Análise Exploratória de Dados Espaciais Aplicada a Produtividade de Milhono Estado do Paraná*.
- Rêgo, C. V. (2012). *Análise dos Modelos de Regressão Espacial SAR, SEM e SAC*.
- Renard, K. G. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*.
- Renato Fontes Guimarães et., a. (2006). *Avaliação Qualitativa do Potencial de Erosão Laminar em Grandes áreas por Meio da EUPS - Equação Universal de Perdas de Solos Utilizando Novas Metodologias em SIG para os Cálculos dos seus Factores na Região do Alto Parnaíba - PI-MA*.
- Righetto, A. J. (2015). *Análise de Regressão Linear: Abordagem Tradicional e Espacial em um Estudo de Caso*.
- Ronquim, C. C. (2010). *Solos e Potencialidades Agrícolas em Moçambique: O Caso da Região do Corredor de Nacala*.
- Sampio, E. (2007). *Noções Básicas de Detecção Remota Fotogrametria e Foto-Interpretação em Pedologia*.
- Santiago, V. S. (2023). *Análise e Predição à Erosão so Solo com RUSLE no Município de Ouro Preto, Minas Gerais, através de Geoprocessamento e SIG*. Ouro Preto.

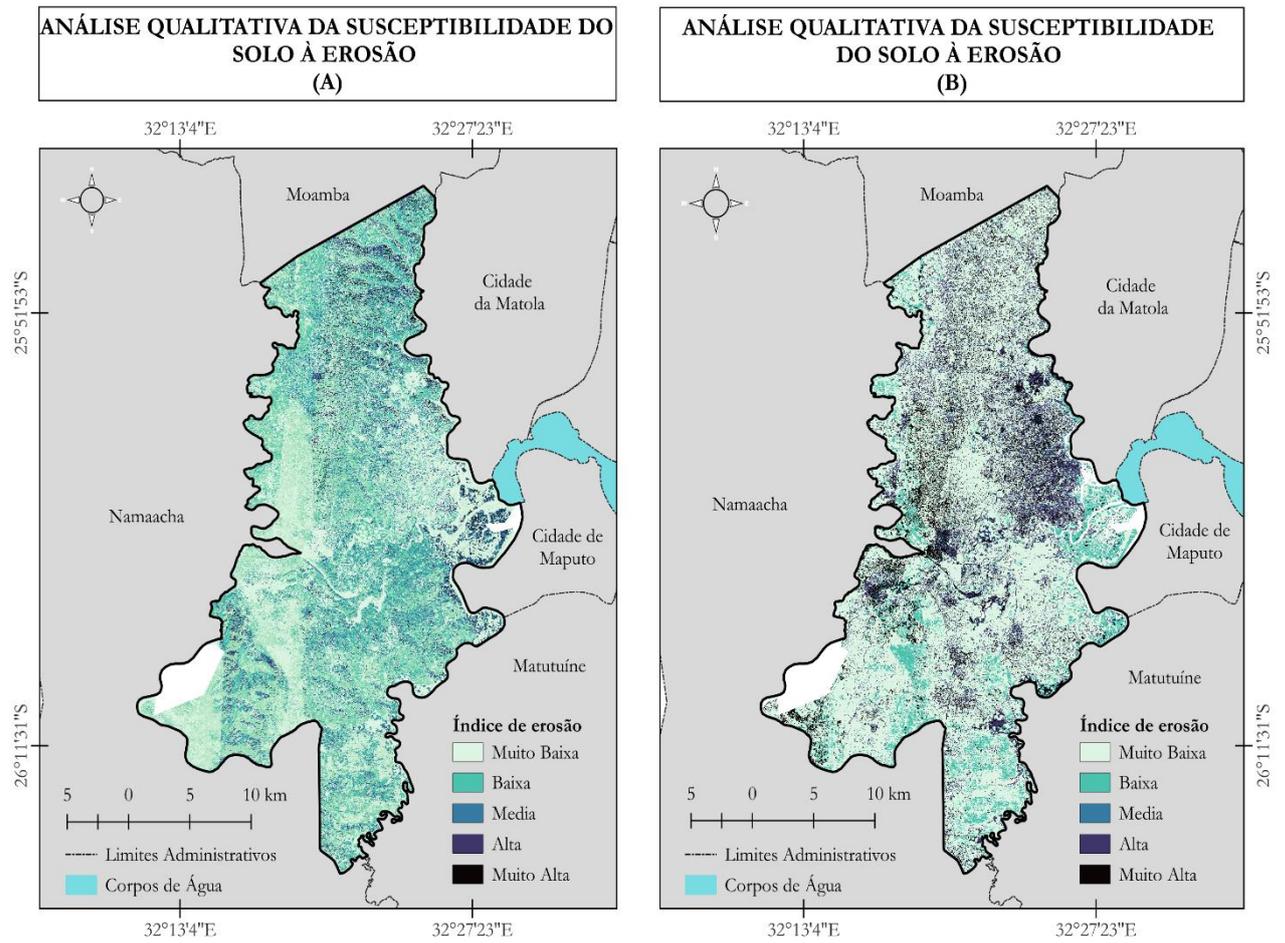
- Seffrin, R. (2017). *Análise Exploratória de Dados Espaciais Aplicada a Produtividade de Milho no Estado do Paraná*.
- Selemane, o. (2010). *Questões à volta da Mineração em Moçambique - Relatório de Monitoria das Actividades Mineiras em Moma, Moatize, Manica e Sussundenga*.
- Silva, M. S. (1995). *Estudos da Erosão*. Petrolina - PE.
- Silva, R. C. (2015). *Apostila de Introdução ao SIG*.
- Tavares, A. O. (2021). *Risco de cheias e impacto da legislação para redução de desastres em Moçambique*.
- Tawata, M. T. (2015). *Determinação da Incerteza associada a Perda de Solo pela Aplicação da Equação da RUSLE*. São Paulo.
- Tomaz, P. (2013). *RUSLE—Equação revisada universal da perda de solo*.
- Uacane, M. S. (2014). *Impactos Ambientais decorrente da Erosão Costeira na Orla Marítima da Cidade da Beira (Moçambique)*.
- William J. Elliot, A. L. (1989). *A Compendium of Soil Erodibility Data From WEPP Cropland Soil Field Erodibility Experiments 1987 e 88*.
- Xavier, F. A. (2022). *Solo - Definição e Importância*.

Apêndices

Apêndice 1: Intersecção e atribuição de dados a cada tipo de classe de cobertura do solo para determinar o factor C.



Apêndice 2: representação qualitativa sem o factor de correcção no mapa (A) e representação qualitativa com factor de correcção no mapa (B)



Anexos

Anexo 1: credencial referente a pedido de dados no Instituto Nacional de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM)


UNIVERSIDADE
EDUARDO
MONDLANE

Faculdade de Ciências

Ao
Instituto Nacional de Investigação
Agrária de Moçambique

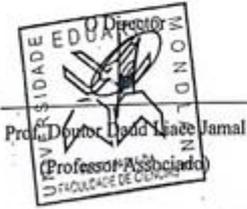
DECLARAÇÃO DE FREQUÊNCIA

Para os devidos efeitos e a pedido do interessado, declara-se que o senhor José Domingos Chauque é estudante da Universidade Eduardo Mondlane, matriculado sob o número de registo 20196637.

O estudante frequenta o curso de Licenciatura em Ciências de Informação Geográfica na Faculdade de Ciências.

A presente declaração destina-se unicamente para efeitos de confirmação do seu vínculo com a UEM, na qualidade de estudante.

Com os nossos melhores cumprimentos


Prof. Doutor David Mace Jamal
(Professor Associado)
FACULDADE DE CIÊNCIAS

Maputo, 19 de Fevereiro de 2024

*Jacer
25/02/2024*

Av. Julius Nyerere, n.º 3453, Campus Principal, C. Postal 257, Tel.: (+258) 21 493377, Fax.: (+258) 21 493377,
.. ..