



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

RODRIGO PORFIRIO VITURINO

ESTIMATIVA DA PERDA DE SOLOS POR EROSÃO
HÍDRICA PARA A REGIÃO METROPOLITANA DE
FORTALEZA UTILIZANDO O QGIS

FORTALEZA

2025

RODRIGO PORFIRIO VITURINO

ESTIMATIVA DA PERDA DE SOLOS POR EROSÃO
HÍDRICA PARA A REGIÃO METROPOLITANA DE
FORTALEZA UTILIZANDO O QGIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Ambiental do
Departamento de Engenharia Hidráulica e
Ambiental da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Dr. Prof. Anderson Borghetti
Soares

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

V834e Viturino, Rodrigo Porfírio.

Estimativa da perda de solos por erosão hídrica para a Região Metropolitana de Fortaleza utilizando o QGIS / Rodrigo Porfírio Viturino. – 2025.
61 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

1. Erosão hídrica. 2. Equação universal de perdas de solos. 3. Geoprocessamento. 4. QGIS. 5. Sistema de Informação geográfica. I. Título.

CDD 628

RODRIGO PORFIRIO VITURINO

ESTIMATIVA DA PERDA DE SOLOS POR EROSÃO
HÍDRICA PARA A REGIÃO METROPOLITANA DE
FORTALEZA UTILIZANDO O QGIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Ambiental do
Departamento de Engenharia Hidráulica e
Ambiental da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de Engenheiro Ambiental.

Aprovada em 08/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Carlos Alves Barroso Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Thalya dos Santos Sousa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não é somente meu. É nosso. Pertence a mim e a todos que participaram da minha vida até aqui e que, de alguma forma, me ajudaram a me tornar a pessoa que sou hoje.

Ao meu pai (*in memoriam*): seu sonho de me ver formando em engenharia tornou-se também o meu sonho e, hoje, torna-se realidade. Obrigado por tudo, eu amarei o senhor pela eternidade.

À minha mãe, que, junto com meu pai, participou da minha criação, do meu sustento e da formação do meu caráter, e que me ensinou a amar. Existem mais de 7 mil línguas no mundo, e em nenhuma delas eu seria capaz de encontrar palavras bonitas o suficiente para descrever a sua grandeza e o quanto a amo.

À minha família, que tanto amo, que me fortalece e me dá orgulho de ter seu sangue. Agradeço demais por ter um vínculo eterno com todos vocês.

Aos maravilhosos amigos que fiz durante meus 21 anos (alguns nem tanto), começando pelo colégio. Pessoas que tanto me arrancaram risadas e me ensinaram a interagir com os outros. Obrigado, Yaslim, Pedro, Luiz, Gabriel, Lucas, Tamires, Werner e tantos outros que tenho preguiça de citar.

Ao professor Paulo Igor, da disciplina de Microbiologia, que durante suas aulas falou do filo de bactérias Spirochaetes, ou espiroquetas, e me deu, assim, a ideia para o nome do grupo dos melhores amigos que já tive até aqui.

Aos meus amados amigos que, por coincidência, fazem a mesma graduação que eu: cada um de vocês foi e continua sendo muito importante para mim. Cada um já ouviu minhas dores, já brigou comigo quando errei, já me tratou com o carinho e o respeito que qualquer pessoa sonha em ter.

Lucas, meu amigo, você, mais do que todos, cuidou de mim e me ajudou nos momentos em que precisei. Por isso, serei sempre grato e estarei sempre disposto a fazer por você o mesmo que fez por mim.

Thalya, tão gentil e compreensiva comigo (só é difícil para pagar as coisas), você sempre me tratou como um filho mais novo, um protegido, e é como dizem: amor de mãe é o

mais sincero.

Luiza, você, dentre todas, foi além de minha amiga; foi minha professora. Ensinou-me sempre que eu não sabia e teve comigo o maior dos gestos de cuidado: foi paciente. É um dos meus orgulhos ter trazido você para perto de nós.

Paulo, não tenho como descrever o que sua amizade significa para mim. Você me ensinou, cuidou e ajudou, fez de tudo um pouco e fez por mim todo o possível (só não saía comigo). Você também tem uma importância inenarrável para mim.

João Guilherme é o novato da trupe. Cuido mais dele do que ele já cuidou de mim, mas, acredite, é outro dos meus orgulhos tê-lo trazido para perto. Você é uma alma iluminada que só aquece nosso caminho.

Por último, e não menos importante (e também não posso dizer "mais importante", para não despertar ciúmes), Beatriz e João Pedro, que são os mais antigos dos meus amigos atuais. Por vocês e com vocês, eu vou até o fim do mundo. Não há limites para descrever meu amor por essas duas pessoas, não há palavras suficientes para descrevê-los, só há o sentir; o sentimento de estar perto de pessoas que te entendem como se fossem você mesmo.

À Clarice, que dos meus amores é o maior, é minha paixão, é meu coração. Seria presunçoso da minha parte achar que conseguiria descrever meu sentimento e sua importância num pequeno texto de agradecimento. Eu só posso ser feliz por ter você ao meu lado, por todo o apoio, por tudo que me faz seguir em frente, por me dar o seu amor e por me fazer sentir a pessoa mais amada que existe.

Ao meu gatinho Marduk, a criatura mais fofa que existe e mais uma das alegrias de todos os meus dias.

Ao meu amigo, meu orientador, meu professor, Anderson. Sou muito feliz por ter participado do Programa de Educação Tutorial ao seu lado. Sou mais feliz ainda por ter sido a pessoa que votou em você para ser o tutor da equipe. Sou feliz por fazermos este trabalho juntos, com este tema maravilhoso. Eu só tenho a agradecer.

E à minha psicóloga, Francimeire, que manteve meu psicológico inteiro, ou pelo menos remendado, durante todo esse tempo.

Este trabalho não seria possível se não fosse por cada um de vocês.

RESUMO

A erosão hídrica é um processo na natureza que pode comprometer a qualidade do solo e gerar impactos socioambientais severos, como o assoreamento de corpos hídricos, e perda da produtividade de solos agrícolas. Devido a importância desse fenômeno, no último século, houve várias tentativas de criar métodos para calcular as perdas de solo por erosão hídrica, até a criação da ferramenta universal de estimativa da perda de solos, criada por Wischmeier e Smith (1978), que leva em consideração a quantidade de chuva, a facilidade de cada solo em sofrer erosão, a topografia do terreno, além da cobertura vegetal do solo e práticas conservacionistas. Este trabalho teve como objetivo estimar a perda de solo por erosão hídrica na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), Ceará, por meio da aplicação da Equação Universal de Perda de Solo utilizando um ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Para isso, o *software* QGIS foi utilizado para integrar e analisar os diferentes fatores que compõem a equação. O fator de erosividade da chuva (R) foi calculado a partir de dados de 70 estações pluviométricas da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME); o fator de erodibilidade do solo (K) foi determinado com base nos dados pedológicos do Banco de Dados e Informações Ambientais (BDiA) e em valores da literatura; o fator topográfico (LS) foi derivado de um Modelo Digital de Elevação (MDE) da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM); e o fator de uso, manejo e práticas conservacionistas (CP) foi obtido a partir do mapeamento do MapBiomias. Os resultados indicam que, embora existam áreas com alta erosividade (principalmente no litoral) e alta erodibilidade, o fator CP se mostrou preponderante no controle da erosão na RMF. Aproximadamente 97% da área de estudo apresentou uma perda de solo classificada como "nula a pequena" (menor que $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$), em grande parte devido à predominância de formações vegetais naturais que protegem o solo. As áreas com maiores taxas de erosão estão associadas a solos expostos e áreas de lavoura, evidenciando a importância do planejamento do uso da terra e da adoção de práticas conservacionistas para a mitigação do processo erosivo.

Palavras-chave: erosão hídrica; equação universal de perdas de solo; geoprocessamento; qgis; sistema de informação geográfica.

RESUMÉ

L'érosion hydrique est un processus naturel qui peut compromettre la qualité du sol et générer de graves impacts socio-environnementaux, tels que l'ensablement des plans d'eau et la perte de productivité des sols agricoles. Compte tenu de l'importance de ce phénomène, au siècle dernier, plusieurs tentatives ont été faites pour créer des méthodes de calcul des pertes de sol dues à l'érosion hydrique, jusqu'à l'établissement de l'outil universel d'estimation des pertes de sol, créé par Wischmeier et Smith (1978), qui prend en compte la quantité de pluie, la facilité de chaque sol à subir l'érosion, la topographie du terrain, ainsi que la couverture végétale du sol et les pratiques de conservation. Ce travail visait à estimer la perte de sol par érosion hydrique dans la Région Métropolitaine de Fortaleza (RMF), Ceará, par l'application de l'Équation Universelle de Perte de Sol dans un environnement de Système d'Information Géographique (SIG). À cette fin, le logiciel QGIS a été utilisé pour intégrer et analyser les différents facteurs composant l'équation. Le facteur d'érosivité de la pluie (R) a été calculé à partir des données de 70 stations pluviométriques de la FUNCEME. Le facteur d'érodibilité du sol (K) a été déterminé à partir des données pédologiques de la Banque de Données et d'Informations Environnementales (BDiA) et des valeurs de la littérature. Le facteur topographique (LS) a été dérivé d'un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) de la mission *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Enfin, le facteur d'utilisation, de gestion et de pratiques de conservation (CP) a été obtenu à partir de la cartographie de MapBiomias. Les résultats indiquent que, bien qu'il existe des zones à forte érosivité (principalement sur le littoral) et à forte érodibilité, le facteur CP s'est avéré prépondérant dans le contrôle de l'érosion dans la RMF. Environ 97 % de la zone d'étude a présenté une perte de sol classée comme "nulle à faible" (inférieure à $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$), en grande partie en raison de la prédominance des formations végétales naturelles qui protègent le sol. Les zones présentant les taux d'érosion les plus élevés sont associées aux sols exposés et aux zones cultivées, soulignant l'importance de la planification de l'utilisation des terres et de l'adoption de pratiques de conservation pour atténuer le processus érosif.

Mots-clés: érosion hydrique; équation universelle des pertes en terre; géotraitement; qgis; système d'information géographique.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa de Erosividade das chuvas no Brasil	22
Figura 2 - Mapa de Erodibilidade dos solos do Brasil.....	23
Figura 3 - Razão de perda de solos e valores de fator C, em Sumé, PB.....	26
Figura 4 – Localização da RMF.....	29
Figura 5 – Municípios da RMF.....	29
Figura 6 – Estações pluviométricas utilizadas no estudo.....	30
Figura 7 – Planilha de precipitação anual (mm)	31
Figura 8 - Planilha de erosividade ($\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$).....	32
Figura 9 – Solos da RMF	35
Figura 10 – Modelo Digital de Elevação da RMF	38
Figura 11 – Mapa do Fator R.....	44
Figura 12 – Mapa reclassificado de erosividade.....	45
Figura 13 – Mapa do Fator K.....	47
Figura 14 – Mapa reclassificado de erodibilidade	48
Figura 15 – Mapa do Fator LS.....	50
Figura 16 – Mapa do Fator CP.....	52
Figura 17 – Mapa de Perda de Solos	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de erodibilidade dos solos ($t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$).....	23
Tabela 2 – Valor de P para algumas práticas conservacionistas	27
Tabela 3 – Solos do estado do Ceará	33
Tabela 4 – Valores de K ($t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$)	36
Tabela 5 – Tabela de atributos do shapefile unificado.....	37
Tabela 6 – Classes de Manejo, Uso e Cobertura do Solo	42
Tabela 7 – Área relativa das classes de erodibilidade.....	49
Tabela 8 – Área relativa das classes de Manejo e Uso do Solo	53
Tabela 9 – Classes de perdas de solos ($t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$).....	56
Tabela 10 – Área relativa das classes de perdas de solos	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BDIA	Banco de Dados e Informações Ambientais
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CP	Fator Manejo, Uso e cobertura do solo
EUPS	Equação Universal de Perda de Solos
Ec	Energia cinética da chuva
EI	Índice de erosão médio mensal
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	Ponderação pelo Inverso da Distância
LS	Fator Topográfico
MapBiomass	Mapeamento Anual da Cobertura e Uso da Terra no Brasil
MDE	Modelo Digital de Elevação
NASA	Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço
Rc	Índice de Fourier
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos
USLE	<i>Universal Soil Loss Equation</i>
ZARC	Zoneamento Agrícola do Risco Climático

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.2 Objetivo específico.....	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1 Fatores intervenientes no processo erosivo	16
<i>3.1.1 Chuva e infiltração</i>	<i>16</i>
<i>3.1.2 Características do solo.....</i>	<i>17</i>
<i>3.1.3 Cobertura vegetal.....</i>	<i>18</i>
<i>3.1.4 Topografia do terreno.....</i>	<i>18</i>
<i>3.1.5 Tolerância de perdas de solo</i>	<i>19</i>
3.2 Equação Universal de Perda de Solos	20
<i>3.2.1 Fator Chuva (R).....</i>	<i>21</i>
<i>3.2.2 Fator erodibilidade (K).....</i>	<i>21</i>
<i>3.2.3 Fator topográfico (LS).....</i>	<i>24</i>
<i>3.2.4 Fator Uso e manejo do solo (C)</i>	<i>25</i>
<i>3.2.5 Fator de Práticas Conservacionistas (P).....</i>	<i>26</i>
4 METODOLOGIA.....	28
4.1 Programa QGIS	28
4.2 Local de estudo	28
4.3 Fator R.....	30
4.4 Fator K.....	32
4.5 Fator LS	37
<i>4.5.1 Fator L</i>	<i>38</i>
<i>4.5.2 Fator S.....</i>	<i>40</i>

4.6 Fator CP	41
5 RESULTADOS	43
5.1 Mapa de Erosividade (R).....	43
5.2 Mapa de Erodibilidade (K).....	46
5.3 Mapa de Fator (LS).....	49
5.4 Mapa do fator (CP)	51
5.5 Mapa de perda dos solos (E).....	54
6 CONCLUSÃO.....	58
REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

A erosão pode ser descrita como o conjunto de processos que decompõe e desagrega o material da superfície terrestre, seja solo ou material rochoso. A erosão pode ocorrer em mais de uma forma, a partir de um ou mais agentes causadores. A erosão ocorre naturalmente em toda a superfície terrestre ao longo do tempo, e o processo também pode ser acelerado pela ação antrópica, o que aumenta a sua intensidade. (EMBRAPA, 1995; PRUSKI, 2009).

Quanto aos agentes causadores, a erosão pode ser causada tanto pela água da chuva, como pelos ventos. Esse trabalho possui como foco a erosão causada pela água da chuva, ou seja, a erosão hídrica. A erosão hídrica é um importante processo de degradação ambiental que afeta a qualidade dos solos e pode ocasionar diversos outros impactos no meio. Devido ao impacto das gotas de chuva, que, carregadas de energia atingem o solo, e ação do vento, há o desprendimento e carregamento do solo mais superficial, que é rico em minerais e nutrientes que são importantes para a manutenção de sua produtividade agrícola e qualidade. A movimentação dessas partículas pode trazer maiores impactos, a partir da sua deposição no leito de corpos hídricos, causando assoreamento, impactando na qualidade da água e biodiversidade local, além de dificultar o manejo agrícola e ambiental das áreas afetadas. (PRUSKI, 2009; LEPSCH 2011).

Quanto aos tipos de erosão hídrica, há a erosão laminar, em que há a desagregação e arraste das partículas do solo de forma superficial e uniforme, removendo camadas laminares do solo. Por sulcos, havendo a formação de canais no solo que podem aumentar ao longo do tempo; por ravinas, em que há a formação de canais mais profundos e largos que os sulcos, resultantes do escoamento concentrado de água, podendo evoluir se não controlados; e por voçorocas, em que há a formação de sulcos muito grandes, e ocorre o transporte de grandes massas de solo. (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2012; EMBRAPA, 1995).

Existem alguns fatores que irão intensificar ou mitigar o processo de perda dos solos, como a intensidade e frequência das chuvas, que vão influenciar o valor de precipitação média anual da área, as características físico-químicas e biológicas do solo, que vão ditar a capacidade que o solo possui de resistir ao processo erosivo; a topografia da área, que pode aumentar a velocidade do escoamento superficial; a proteção do solo através da quantidade de vegetação que o recobre e práticas conservacionistas de manejo que são utilizadas. (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2012; LEPSCH, 2011).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Em razão da importância e consequências desse fenômeno, tanto no meio biótico, como em meio antrópico, o objetivo desse trabalho foi estimar a perda de solos por erosão hídrica para a RMF, a partir do cálculo da EUPS no ambiente do QGIS.

2.2 Objetivo específico

Identificar as áreas mais impactadas pela erosão, e que, portanto, necessitam de mais atenção e estudo para avaliação das melhores formas de mitigação e remediação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Lepsch (2011), alguns fatores como as características da precipitação local, natureza do solo, declividade do terreno e práticas de manejo agrícola vão aumentar ou diminuir a suscetibilidade do solo à erosão. Esse tópico tem como objetivo explicar como cada um desses fatores afeta o processo erosivo, além de apresentar a equação universal de perda de solos, e o conceito de tolerância de perda de solos.

3.1 Fatores intervenientes no processo erosivo

3.1.1 Chuva e infiltração

Na análise da precipitação no local, os fatores que são levados em consideração são a intensidade da chuva, sua duração e frequência. Quanto mais intensa a chuva, maior a perda de solos e a energia cinética. Uma duração maior de chuva estende o tempo de exposição ao fenômeno, e pode levar a uma enxurrada, dependendo da intensidade e umidade do solo, até estabilizar. A frequência mais constante de chuvas faz com que o teor de umidade do solo se mantenha elevado, facilitando a ocorrência de enxurradas. O tamanho das gotas de chuva também exerce uma influência significativa no processo erosivo, uma vez que gotas maiores possuem maior massa, o que contribui para o incremento de sua velocidade durante a queda, até atingirem um limite conhecido como velocidade terminal, momento em que a velocidade se estabiliza e permanece constante. (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2012; MORGAN, 2005).

Com o aumento tanto da massa quanto da velocidade das gotas, ocorre um aumento da energia cinética, que representa a força com a qual a água impacta a superfície do solo. Esse maior impacto intensifica a desagregação das partículas do solo, potencializando os efeitos erosivos. Uma relação importante que utiliza o valor de energia cinética da chuva é o índice EL_{30} , que de acordo com Wischmeier e Smith (1978) é o produto da energia cinética que a chuva possui, por sua intensidade máxima em 30 minutos. Já a infiltração, consiste na absorção e movimentação da água dentro do solo. Quanto maior for a capacidade do solo de

infiltrar água, e, portanto, a velocidade de infiltração, menor é a erosão. A velocidade de infiltração depende muito do tipo de solo, sendo maior em solos arenosos que possuem poros maiores, e sendo bem menor em solos com maiores teores de argila. (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2012).

3.1.2 Características do solo

Autores como Bertoni e Lombardi Neto (2012) e Frendrich *et al.* (2001) apud Fernandes (2011) indicam que as propriedades físicas, como textura, permeabilidade e estrutura, bem como as características químicas do solo, influenciam diretamente sua resistência à erosão, podendo torná-lo mais ou menos suscetível em comparação com outros solos, se expostos a condições similares de cobertura vegetal, topografia do terreno, e chuvas.

Solos com predominância arenosa são compostos por partículas de maior tamanho e apresentam porosidade mais elevada, o que facilita a infiltração de água devido à alta permeabilidade. Essa característica permite que o solo absorva quantidades significativas de água sem sofrer danos imediatos, mas a baixa coesão entre as partículas faz com que sejam facilmente transportadas pela água ou pelo vento, aumentando a suscetibilidade à erosão. Por outro lado, solos com maior teor de argila possuem partículas menores e maior coesão, o que lhes confere uma capacidade superior de reter água e manter a estabilidade estrutural, mesmo sob a ação de chuvas intensas, reduzindo significativamente os processos erosivos. (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2012; MORGAN, 2005).

Além disso, o teor de matéria orgânica atua na mitigação da erosão. Bertoni e Lombardi Neto (2012) explicam que em solos arenosos, a presença de matéria orgânica reduz o tamanho dos poros, promove a agregação das partículas e aumenta a capacidade de retenção de água, tornando o solo mais resistente ao carreamento. Já em solos argilosos, a matéria orgânica melhora a aeração, facilita a drenagem e otimiza a retenção de água, contribuindo para uma maior estabilidade do solo. A matéria orgânica favorece a formação de agregados estáveis em ambos os tipos de solo, o que incrementa a infiltração de água e diminui as perdas por erosão.

3.1.3 Cobertura vegetal

A vegetação representa uma barreira natural na proteção dos solos contra os processos erosivos. Por meio de sua estrutura, ela minimiza o impacto direto das gotas de chuva sobre a superfície do solo, reduzindo a força com que a água atinge o terreno e, conseqüentemente, evitando a desagregação das partículas. Além disso, a vegetação contribui para a dispersão da água da chuva, promovendo uma distribuição mais uniforme e facilitando a evaporação, o que diminui o volume de água que poderia escorrer superficialmente. (FERNANDES, 2011, RUBIRA, 2016).

As raízes das plantas, aumentam a capacidade de infiltração da água no solo. Elas criam canais naturais que permitem uma melhor penetração, reduzindo o escoamento superficial e, com isso, o risco de erosão. A vegetação também enriquece o solo com matéria orgânica, proveniente da decomposição de folhas, galhos e outros resíduos vegetais. Esse material orgânico melhora a estrutura do solo, tornando-o mais poroso e apto a reter água. (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2012).

Outro aspecto importante é a capacidade da vegetação de reduzir o carreamento de sedimentos por enxurradas. As plantas, com suas raízes e partes aéreas, aumentam o atrito com o solo, dificultando o transporte de partículas pelo fluxo de água. Esse efeito de ancoragem do solo pelas raízes, combinado com a resistência oferecida pela cobertura vegetal, como gramíneas, arbustos ou árvores, estabiliza o terreno e preserva sua integridade. (MORGAN, 2005).

3.1.4 Topografia do terreno

A topografia do terreno pode impactar o processo erosivo através da sua declividade e comprimento de rampa. A declividade afeta o volume e a velocidade das enxurradas. Quanto maior a inclinação do terreno, maior é a distância vertical percorrida pela água em um dado intervalo de tempo, o que resulta em um aumento da velocidade do escoamento. Esse incremento na velocidade confere à água maior energia cinética, potencializando o processo erosivo. (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2012).

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2012), se o declive do terreno aumenta

quatro vezes, a velocidade de escoamento duplica e a capacidade erosiva quadruplica. Com isso, é observável que se a velocidade do escoamento duplica, a quantidade de material que pode ser transportado pelo fluxo aumenta em 32 vezes, e o tamanho das partículas que a água consegue carrear pode crescer até 64 vezes, o que mostra o quanto a declividade impacta o processo erosivo. O comprimento de rampa, por sua vez, também desempenha um papel crucial na aceleração do processo erosivo. À medida que a água percorre uma distância maior ao longo de uma encosta, há um acúmulo progressivo de volume de enxurrada, resultando em um fluxo mais concentrado e intenso. Esse aumento no volume, combinado com a maior distância percorrida, contribui para a elevação da velocidade do escoamento. Portanto, com o incremento da velocidade, a energia cinética do fluxo se intensifica, agravando a erosão por meio do maior transporte de sedimentos e da remoção mais agressiva do material do solo. (WISCHMEIER E SMITH, 1978; MORGAN, 2005).

3.1.5 Tolerância de perdas de solo

Para Bertoni e Lombardi Neto (2012), a tolerância de perda de solos representa o valor máximo de perda de solos que um solo possa suportar sem perder sua produtividade e produção econômica. Cada solo possui um valor diferente, dependendo da sua profundidade, e das suas características. A maior dificuldade em relação ao tema, se deve ao fato de que não há um procedimento padrão para determinar a tolerância para os solos, valor que depende das propriedades do solo, topografia, e erosão anterior. De acordo com Soares (2021), para os solos dos Estados Unidos, o valor máximo de perda de solos varia entre 2,0 a 15,0 tonelada/hectare/ano.

Para os solos de São Paulo, Lombardi e Bertoni (1975) apud Bertoni e Lombardi Neto (2012) definiram critérios para determinar a tolerância de perdas de solos. A profundidade do solo deve ser adequada ao desenvolvimento do sistema radicular, permitindo até 1,00 metro em latossolos. A relação textural entre horizontes superficiais e subsuperficiais influencia a erosão, com ajustes no peso de solo por hectare conforme o grau de diferença textural. Horizontes do perfil do solo são selecionados com base nesses critérios. O peso de solo por unidade de superfície é calculado para cada horizonte, considerando sua espessura e densidade, e ajustado conforme necessário. Para o período de tempo de desgaste de solo da unidade de superfície, adotou-se um horizonte temporal de mil anos. Dividindo o peso total

de solo por unidade de superfície por 1000, obtém-se a tolerância anual de perda de solo, expressa em toneladas por hectare por ano.

3.2 Equação Universal de Perda de Solos

Ao longo do último século, diversos esforços foram realizados para compreender e quantificar a perda de solo decorrente da erosão, resultando no desenvolvimento de várias equações empíricas destinadas a estimar esse processo. Foi no ano de 1950 que o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) deu um passo significativo ao criar uma equação que se tornaria a base para estudos posteriores.

Essa equação foi posteriormente aprimorada por Wischmeier e Smith (1978), consolidando-se como a principal ferramenta empírica para estimar a perda de solo por erosão hídrica. Conhecida como a Equação Universal de Perda de Solo (USLE, na sigla em inglês, e EUPS, traduzida para o português), apresentada na equação 1, ela integra todos os fatores que influenciam a erosão, estabelecendo uma relação matemática que considera variáveis como a erosividade da chuva, a erodibilidade do solo, a topografia do terreno, o uso e manejo do solo, além das práticas conservacionistas adotadas. A seguir serão descritos cada um dos fatores que compõem a EUPS.

$$E = R.K.(LS).C.P \quad (1)$$

E = Perda de solos calculada por área ($t \cdot ha^{-1}$);

R = Fator de erosividade ($MJ \cdot ha^{-1} \cdot mm \cdot h^{-1}$);

K = Fator de erodibilidade do solo ($t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$)

LS = Fator topográfico;

C = Fator de cobertura do solo;

P = Fator de práticas conservacionistas.

3.2.1 Fator erosividade (R)

O fator de erosividade é um valor numérico que indica a capacidade da chuva de provocar erosão, com base nos valores esperados de precipitação em uma área sem proteção. É calculado pelo produto da energia cinética da chuva e sua intensidade máxima em 30 minutos, conforme a equação 2, apresentada por Bertoni e Lombardi Neto (2012):

$$EI_{30} = E_c \times I_{30} \quad (2)$$

EI_{30} = Índice de erosão médio mensal ($\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$);

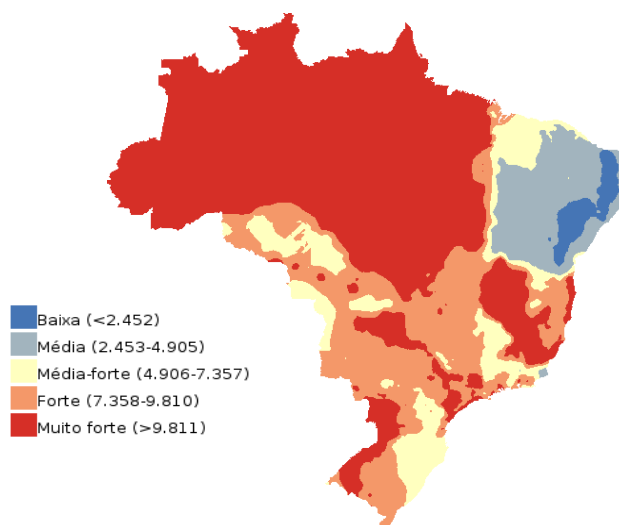
E_c = Energia cinética da chuva;

I_{30} = Intensidade máxima em 30 minutos (mm/h).

A energia cinética é função da intensidade de chuva. Para determinar o valor do índice de erosividade anual, somam-se os valores de EI_{30} de todas as chuvas com precipitação superior a 10mm, ou aquelas menores que causaram perda de solos mensurável. Com os valores anuais, e realizando uma média para um período de 20 anos ou mais, é possível encontrar o fator R utilizado na EUPS, que representa a capacidade erosiva média da chuva em uma certa região, para um intervalo conhecido de tempo.

No contexto brasileiro, a Embrapa (2023), desenvolveu um mapa nacional de erosividade da chuva, que oferece uma visão detalhada da distribuição espacial desse fator no país (Figura 1). Esse mapa foi gerado com base em dados de 3.659 estações pluviométricas, sendo 3.294 da rede de Zoneamento Agrícola do Risco Climático (ZARC) e 365 do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), e mostra que boa parte do país possui alto índice de Erosividade, utilizando como classificação as classes anuais de Erosividade propostas por Carvalho (2008) apud Embrapa (2023), apresentadas como legenda da Figura 1:

Figura 1 – Mapa de Erosividade das chuvas no Brasil



Fonte: Embrapa, 2023.

3.2.2 Fator erodibilidade (*K*)

O fator de erodibilidade do solo refere-se às propriedades intrínsecas do solo que determinam sua suscetibilidade à erosão, independentemente de outros fatores que influenciam o processo erosivo. Esse valor, utilizado em cálculos de erosão, é obtido experimentalmente em parcelas unitárias padronizadas, com 25 metros de comprimento e 9% de declividade. Essas parcelas são preparadas como se fossem destinadas ao plantio, mas mantidas sem vegetação por, pelo menos, dois anos, permitindo a avaliação da perda de solo sob condições controladas. (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2012).

Devido aos desafios e à complexidade de determinar experimentalmente o fator de erodibilidade, estudos têm buscado alternativas para estimar esse parâmetro. Ferramentas de geoprocessamento, como sistemas de informação geográfica (SIG) e sensoriamento remoto, vêm sendo empregadas para correlacionar características do solo — como textura, estrutura, permeabilidade e conteúdo de matéria orgânica — com sua erodibilidade. Essas abordagens permitem estimativas mais rápidas e abrangentes, especialmente em áreas extensas ou de difícil acesso, contribuindo para o planejamento de práticas de conservação do solo e manejo sustentável do terreno.

Em estudo nacional, o mapa de erodibilidade dos solos do Brasil, desenvolvido

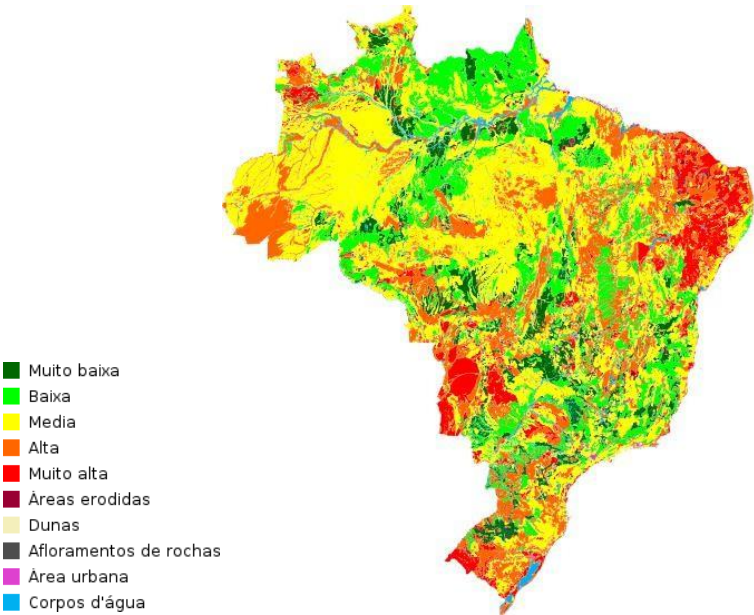
pela Embrapa Solos (2023), foi construído com base em dados pedológicos detalhados, integrando informações sobre textura, estrutura, permeabilidade e conteúdo de matéria orgânica de diferentes tipos de solo em todo o território nacional. Utilizando técnicas de geoprocessamento, como interpolação espacial e modelagem em SIG, o mapa classifica os solos brasileiros em diferentes classes de erodibilidade, baseadas nos estudos de Mannigel et al. (2008), demonstrando as diferenças dos solos brasileiros, como é possível visualizar na Tabelas 1 e Figura 2, respectivamente:

Tabela 1 – Classes de erodibilidade dos solos (t·ha·h·ha⁻¹·MJ⁻¹·mm⁻¹)

Classes	Valores
Muito baixa	0,002 a 0,009
Baixa	0,009 a 0,015
Média	0,015 a 0,030
Alta	0,030 a 0,045
Muito Alta	0,045 a 0,060
Extremamente Alta	Acima de 0,060

Fonte: Mannigel et al., 2008; Embrapa Solos, 2023.

Figura 2 - Mapa de Erodibilidade dos solos do Brasil



Fonte: Embrapa Solos, 2023.

3.2.3 Fator topográfico (LS)

Conforme mencionado anteriormente, os fatores topográficos que impactam a erosão do solo são o comprimento da rampa e a inclinação do terreno, denominados fatores L (comprimento de declive) e S (declividade), respectivamente. De acordo com Wischmeier e Smith (1978), o fator LS representa a razão de perda de solos entre um declive de campo e um declive de uma parcela unitária padrão, com 72,6 pés (aproximadamente 22,13 metros) de comprimento e 9% de declividade. Os mesmos autores também estabeleceram uma equação empírica para o cálculo do fator, apresentada na equação a seguir:

$$LS = \frac{\lambda}{72,6}^m \times (65,41 \sin^2 \theta + 4,56 \sin \theta + 0,065) \quad (3)$$

LS = Fator topográfico;

λ = comprimento do declive, em pés;

θ = ângulo de declividade;

m = coeficiente dependente da declividade.

A primeira parte da equação representa o fator que quantifica a influência do comprimento de declive (L), enquanto a segunda parte corresponde ao fator de declividade (S), que quantifica a influência do declive na erosão e é, por sua vez, dependente da própria declividade.

Baseado nas equações desenvolvidas por Bertoni (1959) apud Bertoni e Lombardi Neto (2012), também foi desenvolvida para o cenário brasileiro uma equação para o cálculo do fator, como mostrado a seguir:

$$LS = 0,00984L^{0,63}S^{1,18} \quad (4)$$

LS = Fator topográfico;

L = comprimento de rampa (m);

S = declividade (%).

Essa abordagem não leva em conta variações na forma do declive, como perfis côncavos ou convexos, devido à ausência de dados suficientes sobre o efeito dessas configurações na perda de solo.

3.2.4 Fator Uso e manejo do solo (C)

Terrenos cultivados e manejados para a agricultura apresentam maior resistência aos processos erosivos (Bertoni e Lombardi Neto, 2012) sendo significativamente menos suscetíveis à erosão em comparação com solos expostos e desprotegidos. O nível de proteção oferecido depende de diversos fatores, como a densidade e a qualidade da cobertura vegetal, que pode variar de altamente protetora, como em culturas densas, a menos eficaz, em culturas esparsas (LEPSCH, 2011).

Além disso, a escolha da cultura agrícola e as práticas de manejo adotadas desempenham papéis cruciais na mitigação da erosão. Nesse contexto, o fator C é utilizado para quantificar a relação entre a perda de solo em uma área cultivada, sob condições específicas de manejo e cobertura, e a perda em um solo sem qualquer proteção vegetal. (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2012).

O fator varia de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 0, maior a proteção do solo contra a erosão, indicando uma cobertura vegetal ou manejo altamente eficaz, enquanto valores próximos de 1 refletem condições semelhantes a um solo desprotegido.

A influência do fator C é determinada por aspectos como o tipo de cultura plantada, que pode oferecer maior ou menor cobertura ao solo — por exemplo, culturas como milho ou algodão tendem a deixar a superfície mais exposta do que os cultivos perenes ou semiperenes (LEPSCH, 2011). Além disso, o método de preparo do solo, como o uso de técnicas de plantio direto ou aração convencional, e o manejo dos resíduos de culturas anteriores, afetam diretamente a capacidade do solo de resistir à erosão. Todas essas variáveis são integradas, permitindo uma comparação sistemática entre diferentes cenários agrícolas e o padrão de um solo desprotegido, fornecendo assim uma métrica essencial para o planejamento de práticas agrícolas sustentáveis e a conservação do solo. Como pode ser observado em um exemplo de estudo realizado em Sumé, Paraíba, a proteção relacionada ao fator C, que representa a influência da cobertura vegetal na erosão do solo, varia de acordo

com a cultura utilizada e os estágios da plantação. Esses estágios, que refletem o desenvolvimento da cultura ao longo do ciclo agrícola, foram definidos como: 1) do preparo do solo até o plantio (dezembro-janeiro); 2) do fim do estágio 1 até 30 dias após o plantio (fevereiro); 3) do fim do estágio 2 até 60 dias após o plantio (março-abril); 4) do fim do estágio 3 até 180 dias após o plantio (maio-outubro); e 5) do fim do estágio 4 até 210 dias após o plantio (novembro).

Figura 3 - Razão de perda de solos e valores de fator C, em Sumé, PB

Cobertura vegetal	Estádio de desenvolvimento das culturas*					C
	1	2	3	4	5	
Parcela padrão	-	-	-	-	-	1,0000
Caatinga nativa	0,0000	0,0000	0,0014	0,0000	0,0000	0,0014
Caatinga nova	0,0000	0,0120	0,0058	0,0000	0,0000	0,0178
Pousio (1)	0,0000	0,0016	0,0112	0,0000	0,0000	0,0128
Pousio (2)	0,0000	0,0072	0,0048	0,0000	0,0000	0,1200
Palma cultivada morro abaixo	0,0092	0,2013	0,2813	0,0511	0,0000	0,5429
Palma cultivada em nível	0,0005	0,1029	0,1408	0,0086	0,0000	0,2528

Fonte: Albuquerque, 2005.

3.2.5 Fator de Práticas Conservacionistas (P)

O fator de práticas conservacionistas, é um parâmetro que estabelece uma relação entre a intensidade das perdas de solo observadas em um terreno desprotegido, situado em declive e sem qualquer medida de controle, e a perda de solo verificada quando se implementam práticas conservacionistas específicas destinadas a mitigar a erosão (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2012; WISCHMEIER E SMITH, 1978).

Assim como o fator C, o fator P varia de 0 a 1, e quanto mais próximo de 0, maior a proteção oferecida contra a erosão, indicando que a prática conservacionista é altamente eficaz na redução das perdas de solo, enquanto valores próximos de 1 refletem a ausência ou ineficácia de medidas de controle, resultando em erosão semelhante à de um solo desprotegido. Esse parâmetro é essencial para o planejamento de manejo sustentável, especialmente em áreas agrícolas suscetíveis à erosão hídrica.

Como apresentado por Bertoni e Lombardi Neto (2012), é possível perceber que as práticas abrangem uma variedade de técnicas, como o plantio em contorno, que consiste em alinhar as linhas de cultivo perpendicularmente à inclinação do terreno para reduzir o escoamento superficial; faixas de contorno com vegetação, que atuam como barreiras naturais;

terraceamento, que cria degraus no terreno para interromper o fluxo de água; cordões de vegetação permanente, que ajudam a estabilizar o solo e reter sedimentos, e cada uma dessas práticas é capaz de ofertar um valor de proteção diferente, como mostrado na tabela a seguir:

Tabela 2 – Valor de P para algumas práticas conservacionistas

Práticas conservacionistas	P
Plantio morro abaixo	1,0
Plantio em contorno	0,5
Alternância de campinas + plantio em contorno	0,4
Cordões de vegetação permanente	0,2

Fonte: Bertoni e Lombardi Neto (2012).

4 METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, foi utilizado o software QGIS na estimativa das perdas de solo na região metropolitana de Fortaleza, empregando diversas fontes de dados, baseando-se na metodologia do canal digital OpenGIS (2021). A erosividade foi calculada com base nos dados pluviométricos da FUNCEME; a erodibilidade dos solos foi calculada a partir dos dados obtidos do Banco de Dados e Informações Ambientais (BDIA); os dados de uso e manejo do solo foram extraídos do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomias); e o fator LS foi determinado utilizando como base um Modelo Digital de Elevação (MDE), oriundo da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), missão da Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA) que visou coletar dados para obter modelos digitais de elevação de todo o globo.

4.1 Programa QGIS

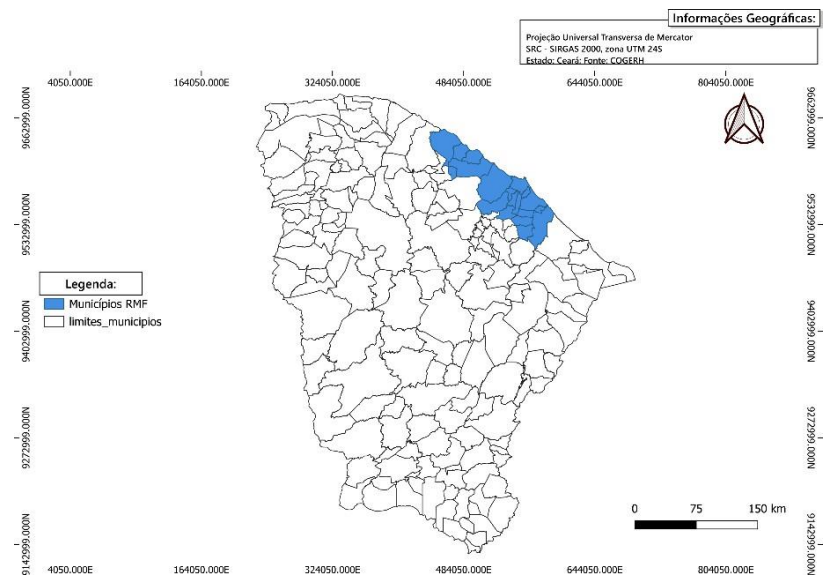
Segundo a documentação oficial do QGIS (2025), o QGIS é um Sistema de Informação Geográfica (SIG) de código aberto, gratuito e acessível, projetado para trabalhar com dados geoespaciais, ou seja, informações que podem ser vinculadas a localizações específicas na superfície da Terra. Ele permite realizar a criação, edição e visualização de mapas detalhados, além de permitir a integração de diferentes tipos de dados e a realização de análises espaciais complexas, o que permite mapear e analisar fenômenos geográficos de forma personalizada.

4.2 Local de estudo

A Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), também conhecida como Grande Fortaleza, é uma das principais regiões metropolitanas do Brasil, localizada no estado do Ceará. Criada pela Lei Complementar Federal nº 14, de 8 de junho de 1973, e regulamentada pela Lei Complementar Estadual nº 180, de 18 de julho de 2018. (FORTALEZA EM MAPAS, 2024). A RMF abrange 19 municípios, que possuem características diferentes de relevo, de uso do solo, de chuva, e das variáveis que afetam a perda de solos.

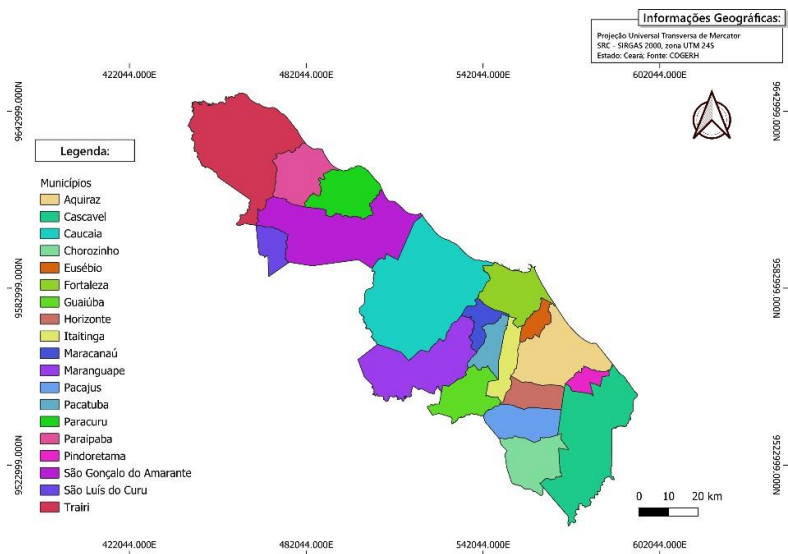
Com uma população estimada em cerca de 4 milhões de habitantes (IBGE, 2022), a RMF é a sexta maior região metropolitana do país e o principal polo econômico, cultural e político do Ceará. Seus 19 municípios apresentam significativa diversidade ambiental e socioeconômica. Fortaleza, a capital, concentra a maior parte da infraestrutura, incluindo o Aeroporto Internacional de Fortaleza, o Porto do Mucuripe e centros educacionais e de saúde, enquanto cidades como Caucaia e Maracanaú destacam-se pelo setor industrial. Nas Figuras 4 e 5, é possível visualizar os municípios da região metropolitana dentro do estado do Ceará, com os dados obtidos de Cogerh (2024):

Figura 4 – Localização da RMF



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 5 – Municípios da RMF



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Autores como Dias e Silva (2003) recomendam um período mínimo de 20 anos de dados pluviométricos para análises robustas do fator de erosividade, pois esse intervalo abrange variações climáticas sazonais e eventos extremos de chuva, que são os principais desencadeadores da erosão. Contudo, os dados disponíveis nas estações da Funceme apresentaram significativa variação no período de registro. Para as estações com informações suficientes, o intervalo de dados variou entre 20 até 50 anos de registro. Para aquelas com menos de 20 anos, utilizaram-se as estações com o mínimo de 10 anos de informações disponíveis, assegurando a inclusão do maior volume de dados possível.

Após o download dos dados da Funceme, as informações foram processadas, com as médias mensais de precipitação calculadas e organizadas em uma única planilha, conforme pode ser visto na Figura 7. Essa planilha contém na primeira coluna o nome de cada posto pluviométrico, em seguida suas coordenadas geográficas para utilização no QGIS. As 12 colunas seguintes contêm as precipitações médias mensais, referentes a todo o período de estudo.

Figura 7 – Planilha de precipitação anual (mm)

Posto	Latitude	Longitude	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
CASTELAO	-3.815	-38.549	151.12	205.925	345.35	351.365	238.31	115.53	63.02	12.27	5.23	6.48	9.345	40.879
(AGUA FRIA)	-3.79	-38.457	160.38	193.74	331.67	345.34	236.23	120.69	72.57	10.17	1.83	3.25	4.32	29.49
MESSEJANA	-3.83	-38.478	131.653	147.168	265.565	268.089	204.783	83.665	65.62	8.186	0.671	3.023	1.55	14.293
PICI	-3.75	-38.583	175.665	228.58	367.26	352.085	230.23	123.635	76.57	12.7	5.635	7.655	11.19	41.5
CAUCAIA	-3.75	-38.683	152.52	216.145	340.985	335.67	187.21	87.715	56.085	5.19	0.42	3.44	4.385	29.11
SITIOS NOVOS	-3.77	-38.958	80.5	85.3	173.938	163.843	84.464	53.236	36.07	1.333	0	0.222	2.922	13.042
MARACANAU	-3.88	-38.631	133.46	198.33	296.365	308.6	177.06	85.68	58.355	5.35	2.28	9.99	7.58	34.625
EUSEBIO	-3.9	-38.5	150.7	213.785	296.6	335.85	226.9	110.95	69.4	10.375	3.947	7.55	8.2	31.75
AQUIRAZ	-3.9	-38.383	138.39	192.76	290.54	334.589	206.339	92.789	49.821	3.995	1.421	1.437	2.195	21.721
PINDORETAMA	-4.05	-38.333	118.35	188.255	311.8	318.4	224.05	97.15	45.03	2.7	0	0.9	2.45	22.6
CASCABEL	-4.13	-38.233	132.49	188.38	286.645	303.995	196.76	82.24	33.525	3.725	0.15	0.7	5.21	29.316

Fonte: elaborado pelo autor.

Com base nas médias mensais de precipitação, calculou-se a pluviometria média anual para cada posto pluviométrico. Esses dados foram utilizados na equação proposta por Dias e Silva (2003) para estimar os valores mensais do índice de erosividade (EI_{30}) em Fortaleza e regiões com características climáticas semelhantes:

$$EI = 73,989(Rc)^{0,7387} \quad (5)$$

EI = média mensal do índice de erosão ($MJ \cdot ha^{-1} \cdot mm \cdot h^{-1}$);

Rc = Índice de Fourier, ou fator chuva, representado por (p^2/P)

p = precipitação média mensal (mm);

P = precipitação média anual (mm).

Com os dados de precipitação média anual (mm), representados na coluna de “P”, e as informações de precipitação média mensal (mm), apresentados nas colunas enumeradas de 1 a 12, representando os meses do ano, a equação 5 foi utilizada para encontrar os valores de fator R (MJ. mm/ha.h) para cada posto pluviométrico, conforme apresentado na Figura 8:

Figura 8 - Planilha de erosividade ($\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)

Posto	P	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	R
CASTELAO	1544,82	541,09	854,70	1834,71	1882,11	1060,55	363,89	148,62	13,25	3,76	5,16	8,86	78,41	6795,12
(AGUA FRIA)	1509,68	600,92	794,44	1757,99	1866,08	1064,85	394,81	186,21	10,21	0,81	1,89	2,88	49,23	6730,33
MESSEJANA	1194,27	533,78	629,27	1505,16	1526,34	1025,22	273,20	190,81	8,81	0,22	2,02	0,75	20,08	5715,67
PICI	1632,71	648,77	957,27	1928,79	1812,21	967,50	386,12	190,24	13,38	4,03	6,33	11,10	76,97	7002,71
CAUCAIA	1418,88	584,08	977,64	1917,30	1873,31	790,61	257,94	133,22	3,96	0,10	2,16	3,09	50,56	6593,96
SITIOS NOVOS	694,87	385,01	419,41	1201,74	1100,14	413,35	209,00	117,59	0,90	0,00	0,06	2,87	26,16	3876,25
MARACANAU	1317,68	506,48	909,34	1646,05	1747,42	769,02	263,15	149,20	4,37	1,24	11,00	7,31	69,00	6083,58
EUSEBIO	1466,01	560,13	938,97	1523,10	1830,08	1025,30	356,30	178,14	10,75	2,58	6,72	7,59	56,11	6495,76
AQUIRAZ	1336,00	528,94	863,02	1582,25	1949,16	954,33	293,03	116,92	2,81	0,61	0,62	1,16	34,30	6327,14
PINDORETAMA	1331,69	420,79	835,38	1760,45	1815,78	1080,37	314,35	100,94	1,58	0,00	0,31	1,37	36,45	6367,78
CASCVEL	1263,14	516,94	869,49	1616,61	1763,25	927,23	255,55	67,87	2,64	0,02	0,22	4,34	55,67	6079,83

Fonte: elaborado pelo autor.

Com a planilha contendo os dados de interesse, e as coordenadas geográficas de todos os postos pluviométricos, os dados foram exportados para o QGIS. No software, os pontos correspondentes aos postos foram inseridos no mapa em suas localizações geográficas reais. Os valores do fator R, associados a cada posto, foram utilizados na interpolação IDW para gerar o mapa de erosividade da RMF.

4.4 Fator K

Para determinar o fator de erodibilidade dos solos (K) na Região Metropolitana de Fortaleza RMF, os dados iniciais foram obtidos a partir do BD_iA, especificamente na seção de pedologia. No BD_iA, os solos são classificados conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), organizados em ordem (1º nível), subordem (2º nível) e grande grupo (3º nível) e incluem informações complementares, como áreas ocupadas por corpos d’água e zonas urbanas, permitindo uma representação detalhada das características pedológicas da RMF. Segundo o Banco de dados, o estado do Ceará apresenta os seguintes solos:

Tabela 3 – Solos do estado do Ceará

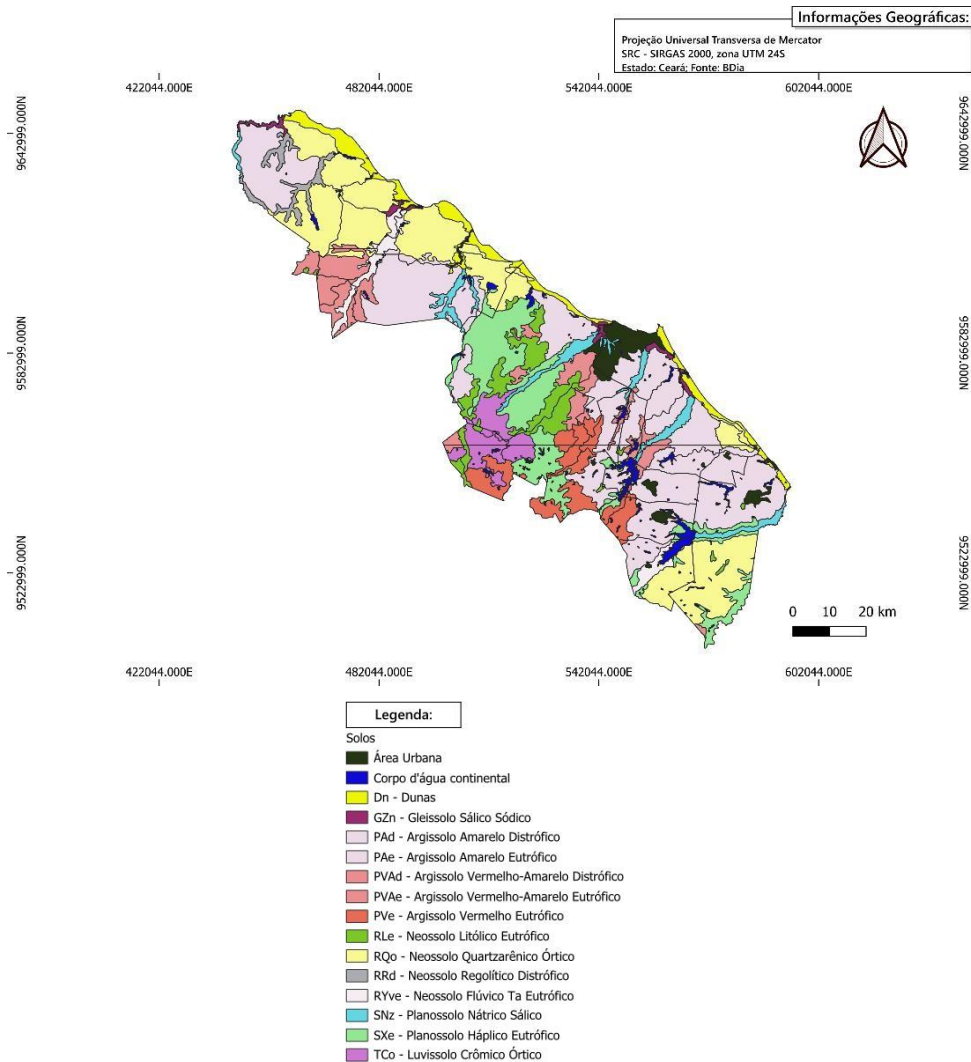
Nome	Sigla
Argissolo Amarelo Distrófico	PAd
Argissolo Amarelo Eutrófico	PAe
Argissolo Vermelho-amarelo Distrófico	PVAd
Argissolo Vermelho-amarelo Eutrófico	PVAe
Argissolo Vermelho Distrófico	PVd
Argissolo Vermelho Eutrófico	PVe
Cambissolo Háptico Ta Eutrófico	CXve
Chernossolo Argilúvico Órtico	MTo
Chernossolo Háptico Órtico	MXo
Chernossolo Rêndzico Órtico	MDo
Gleissolo Melânico Tb Eutrófico	GMbe
Gleissolo Sáfico Sódico	GZn
Latossolo Amarelo Distrófico	LAd
Latossolo Amarelo Eutrófico	LAe
Latossolo Vermelho-amarelo Distrófico	LVAd
Latossolo Vermelho Distrófico	LVd
Latossolo Vermelho Eutrófico	LVe
Luvissolo Crômico Carbonático	TCk
Luvissolo Crômico Órtico	TCo
Luvissolo Crômico Páfico	TCp
Neossolo Flúvico Ta Eutrófico	RYve
Neossolo Litólico Distrófico	RLd
Neossolo Litólico Eutrófico	RLe
Neossolo Quartzarênico Órtico	RQo

Neossolo Regolítico Distrófico	RRd
Neossolo Regolítico Eutrófico	RRe
Nitossolo Vermelho Eutrófico	NVe
Planossolo Háptico Eutrófico	SXe
Planossolo Nátrico Órtico	SNo
Planossolo Nátrico Sálico	SNz
Vertissolo Ebânico Órtico	VEo
Vertissolo Háptico Órtico	VXo

Fonte: BDIA, 2023.

As informações correspondentes aos solos de cada município da RMF foram baixadas do BDIA em formato de *shapefile*, arquivo que armazena as formas, posições e atributos das feições geográficas de uma área e, posteriormente, mesclados em um único *shapefile*, utilizando o programa QGIS, facilitando a análise integrada da região. Na Figura 9, é possível visualizar a distribuição de solos da RMF, com a legenda apresentando os tipos de solos:

Figura 9 – Solos da RMF



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Toda a metodologia de mapeamento adotada segue os preceitos do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) e do Manual Técnico de Pedologia do IBGE (2015). Embora o manual não apresente uma definição estrita para áreas urbanas, ele as caracteriza como regiões com elevada densidade de estradas, edificações e predominância de superfícies não vegetadas.

A partir da classificação dos solos da RMF, a tabela de atributos que apresenta as informações dos solos presentes em cada região foi exportada para o Excel, permitindo assim atribuição dos valores de K para cada feição que representa uma área com um tipo de solo.

Após a obtenção da planilha com informações sobre as áreas da região de estudo e seus respectivos tipos de solo, foi conduzida uma pesquisa bibliográfica para determinar os

valores do fator K (erodibilidade) de cada tipo de solo. Os resultados obtidos são os apresentados na Tabela 4:

Tabela 4 – Valores de K ($t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$)

Solo	K	Referências
Área Urbana	0	Autor
Corpo d'água continental	0	Autor
PVe - Argissolo Vermelho Eutrófico	0,0112	Carneiro, 2019
PVAe - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	0,0258	Pereira, 2016
RLe - Neossolo Litólico Eutrófico	0,027	Freitas e Araújo, 2003
RYve - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico	0,0366	Moraes e Sales, 2017
TCo - Luvisolo Crômico Órtico	0,0384	Moraes e Sales, 2017
PAd - Argissolo Amarelo Distrófico	0,0391	Mannigel et al, 2008
PAe - Argissolo Amarelo Eutrófico	0,045	Sá et al., 2004
RRd - Neossolo Regolítico Distrófico	0,048	Embrapa, 2024
SNz - Planossolo Nátrico Sáfico	0,049	Embrapa, 2024
GZn - Gleissolo Sáfico Sódico	0,052	Embrapa, 2024
SXe - Planossolo Háptico Eutrófico	0,052	Embrapa, 2024
PVAd - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	0,0592	Moraes e Sales, 2017
RQo - Neossolo Quartzarênico Órtico	0,0722	Carneiro, 2019
Dn - Dunas	0,1	Autor

Fonte: elaborado pelo autor.

Para áreas urbanas e corpos d'água, o fator K (erodibilidade) foi definido como zero, uma vez que, teoricamente, não ocorre desprendimento de partículas de solo, considerando uma zona urbana impermeabilizada. Para as áreas de dunas, dada a ausência de dados específicos do BDIA que diferenciem as dunas de acordo com a sua cobertura vegetal (e literaturas que estabeleçam um valor prático para erodibilidade de dunas), a identificação se limitou a considerar áreas de dunas como superfícies desprotegidas e sem vegetação.

Fundamentando-se nas características dos solos predominantemente arenosos que as compõem, e que, conforme Bertoni e Lombardi Neto (2012), possuem baixa coesão de partículas e, teoricamente, uma maior suscetibilidade à erosão, arbitrou-se o valor de 0,1 para a erodibilidade (Fator K) nas áreas de dunas. Este valor foi estabelecido acima do maior coeficiente de erodibilidade identificado em solos pesquisados (o Neossolo Quartzarênico Órtico), a fim de refletir a extrema erodibilidade e a ausência de proteção nessas regiões.

Com os valores de K atribuídos a cada tipo de solo no excel, a planilha de atributos de solos foi exportada para o QGIS, onde foi realizado o processo de integração do *shapefile*

com a planilha contendo os valores de erodibilidade (K), a partir do processo de união do QGIS. Esse procedimento possibilitou a criação de um *shapefile* que incorpora todas as informações sobre os solos da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e seus respectivos valores de K, como apresentado na Tabela 5:

Tabela 5 – Tabela de atributos do shapefile unificado

ID do Solo	Legenda	K
83367	TCo – Luvisolo Crômico Órtico	0,0384
83367	TCo – Luvisolo Crômico Órtico	0,0384
83367	TCo – Luvisolo Crômico Órtico	0,0384
83362	TCo – Luvisolo Crômico Órtico	0,0384
64818	TCo – Luvisolo Crômico Órtico	0,0384
83367	TCo – Luvisolo Crômico Órtico	0,0384
71707	TCo – Luvisolo Crômico Órtico	0,0384
83362	TCo – Luvisolo Crômico Órtico	0,0384
83362	TCo – Luvisolo Crômico Órtico	0,0384

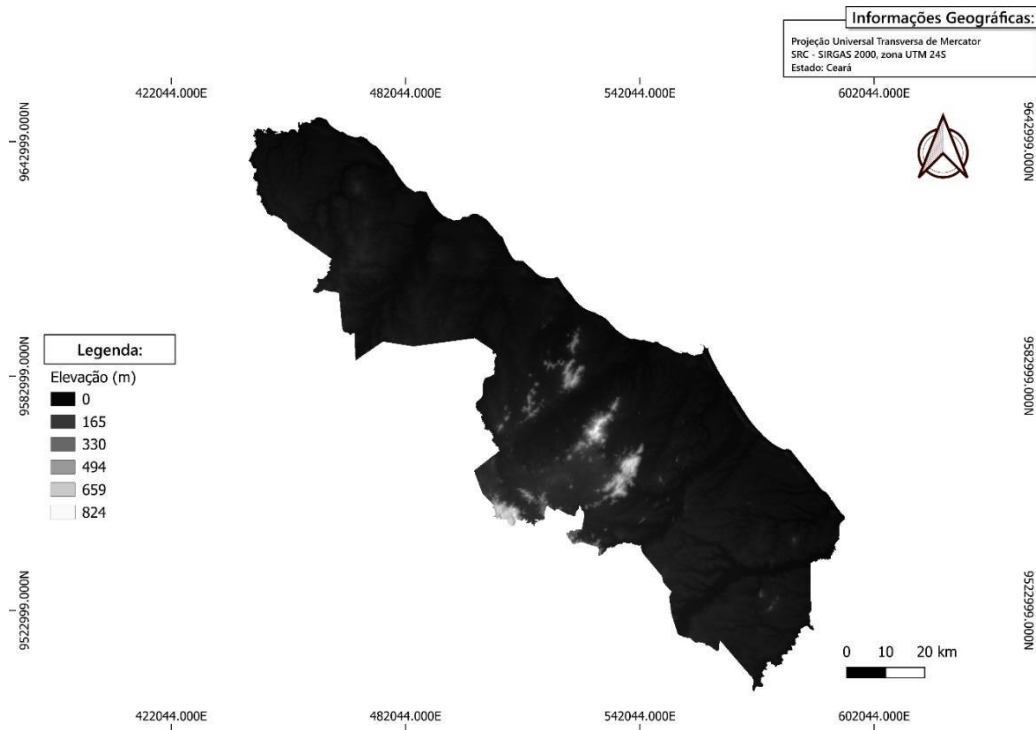
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Por fim, foi realizado o processo de rasterização, que consiste na conversão de um dado vetorial (*shapefile*, que contém informações em formato vetorial) em um dado *raster* (matriz que representa uma grade composta por pixels), utilizando o valor do fator K (erodibilidade) como parâmetro de interesse.

4.5 Fator LS

Para a elaboração do mapa do fator LS, foi necessário obter um Modelo Digital de Elevação MDE da área de estudo. Segundo o IBGE (2025), o MDE é um modelo digital de superfície que representa a altitude do terreno, incluindo elementos como construções e vegetação. O modelo foi adquirido diretamente no QGIS, utilizando o *plug-in OpenTopography DEM Downloader*, por meio do qual foi baixado um modelo SRTM 30 m. Esse modelo fornece dados altimétricos da superfície terrestre com resolução espacial de 30 metros, como apresentado na Figura 10:

Figura 10 – Modelo Digital de Elevação da RMF



Fonte: OpenTopography, 2025.

4.5.1 Fator *L*

Com o MDE da área de estudo, utilizou-se a função *Pit Remove* do *plug-in TauDEM* no QGIS para remover depressões, que poderiam gerar erros nos resultados. O mapa do fator (*L*) foi elaborado com base na metodologia proposta por Desmet e Govers (1996), a qual apresenta um algoritmo para o cálculo do fator topográfico em um ambiente de SIG, utilizando um MDE. Essa abordagem é mais representativa, pois, conforme Matos (2015) e Souza e Vieira (2023), considera os conceitos de área de contribuição, fluxo acumulado, além da convergência e divergência do escoamento, em vez de apenas adotar o comprimento de rampa. Isso possibilita uma modelagem mais precisa dos processos erosivos e da propagação da água em superfícies topograficamente complexas, como demonstrado na equação 6:

(6)

$$L_{i,j} = \frac{(A_{i,j} + D^2)^{m+1} - (A_{i,j})^{m+1}}{X_{i,j}^m * D^{m+2} * 22,13^m}$$

$L_{i,j}$ = Fator de comprimento de vertente de uma célula com coordenadas (i,j);

$A_{i,j}$ = Área de contribuição de uma célula com coordenadas (i,j) (m²)

D = tamanho do pixel (m)

$X_{i,j}$ = Direção do fluxo.

m = constante dependente da declividade

A área de contribuição, representa a área a montante que direciona a água e os sedimentos para um ponto específico em um mapa digital de elevação (célula i,j). Na prática, é a porção de terreno que, ao receber chuva, fará com que essa água escoe até aquele ponto determinado.

O valor D, por sua vez, representa a resolução espacial do MDE. É o tamanho de cada pequeno pixel que compõe esse mapa, medido em metros. No estudo, foi utilizado um MDE com D de 30 metros, o que significa que cada quadrado no mapa representa uma área de 30 por 30 metros no mundo real, definindo o nível de detalhe da informação topográfica.

Por fim, a direção de fluxo indica o caminho natural que a água seguiria ao escoar pela superfície do terreno. Essa direção é determinada pela inclinação do solo, ou seja, a água sempre tenderá a fluir do ponto mais alto para o ponto mais baixo, seguindo o caminho de maior declividade no modelo digital.

No numerador, a expressão $(A_{i,j} + D^2)^{m+1} - (A_{i,j})^{m+1}$ quantifica o potencial erosivo gerado pela própria célula (i,j). Nela, $A_{i,j}$ representa a área de contribuição acumulada que *entra* na célula (i,j) vinda de montante. Esta área é somada à área D^2 da própria célula, resultando na área total de contribuição na saída da célula. A subtração de $(A_{i,j})^{m+1}$ tem como objetivo isolar a contribuição específica da célula (i,j), removendo o potencial erosivo já presente antes da entrada na célula. No denominador, o termo $X_{i,j}^m * D^{m+2}$ representa o comprimento efetivo do contorno. Este valor descreve a distância perpendicular ao fluxo por

onde a água pode efetivamente passar, refletindo a largura da área de contribuição. A relação entre o numerador e o denominador calcula a área de contribuição unitária (m²/m). O valor de 22,13 metros, é um fator de ajuste que relaciona o cálculo com o comprimento de rampa da parcela unitária padrão, conforme estabelecido nos modelos de erosão do solo. (DESMET E GOVERS, 1996).

Todos esses conceitos que são aplicados no cálculo, permitem uma modelagem mais complexa e realista da erosão, em um ambiente de SIG. Já o coeficiente m, é o coeficiente que tanto no método de Desmet e Govers (1996) como no método de Wischmeier e Smith (1978), ajusta o fator L, de acordo com a declividade do local e a sua influência.

A acumulação de fluxo e direção de fluxo foram obtidos através do MDE da área, processado pela função *r.flow* e *r.fill.dir*, respectivamente, no *plug-in GRASS*, do QGIS. Para obtenção do fator m, foi a metodologia aplicada foi a de Foster (1977) e McCool *et al.* (1989) apud Carneiro (2019), de acordo com a equação 7:

$$\beta = \frac{\frac{\text{sen}\theta}{0,0896}}{3\text{sen}\theta^{0,8} + 0,56} \quad (7)$$

β = Razão entre a erosão em sulcos, e a erosão entre sulcos

θ = Declividade, em graus.

Para determinar o fator β , a equação foi aplicada ao *raster* de declividade, gerado pela função de declive do *plug-in* GDAL, utilizando a calculadora *raster*. Da mesma forma, o cálculo do fator (m) foi realizado na calculadora *raster*, empregando o *raster* de β na equação 8:

$$m = \frac{\beta}{1+\beta} \quad (8)$$

4.5.2 Fator S

Para o cálculo do fator S, foram utilizadas equações da metodologia de McCool *et al.* (1987), conforme citadas por Matos (2015) e Carneiro (2019). As equações proporcionam uma representação mais apurada da influência da declividade sobre os processos erosivos.

Esta abordagem diferencia o comportamento erosivo em função das distintas faixas de inclinação do terreno, como apresentado nas equações (9) e (10):

$$S = 10,8\text{sen}\theta + 0,03, \text{ para declividade } < 9\% \quad (9)$$

$$S = 10,8\text{sen}\theta - 0,5, \text{ para declividade } \geq 9\%. \quad (10)$$

Após a aplicação das fórmulas de L e S, o mapa de fator LS foi criado a partir da multiplicação dos dois fatores, utilizando a calculadora *raster*.

4.6 Fator CP

Neste estudo, os fatores antrópicos da EUPS, fator C e fator P, foram combinados em um único mapa. Os valores de CP foram obtidos com base em Stein *et al.* (1987), conforme citado por Oliveira (2012) e Carneiro (2019), e ajustados para as classes de manejo, uso e cobertura do solo que foram utilizadas no trabalho. Diferentemente dos outros processos, que inicialmente utilizaram dados vetoriais, o mapa de CP foi gerado diretamente como dado *raster* por meio do MapBiomas, utilizando o *plug-in* oficial da MapBiomas *Collection* no QGIS. A partir desse *plug-in*, extraiu-se o *raster* de usos do solo para todo o país, que foi recortado para a área de interesse, e teve os valores de CP atribuídos conforme a tabela apresentada a seguir:

Tabela 6 – Classes de Manejo, Uso e Cobertura do Solo

Classe	Fator CP
Formação florestal	0,00004
Formação savânica	0,0007
Mangue	0,00004
Silvicultura	0,0001
Formação campestre	0,01
Pastagem	0,02
Mosaico de Usos	0,135
Lavouras temporárias	0,20
Lavouras perenes	0,25
Solo exposto	1,00
Corpo d'água	0
Área Urbana	0
Apicum	0,01
Restinga herbácea	0,0007

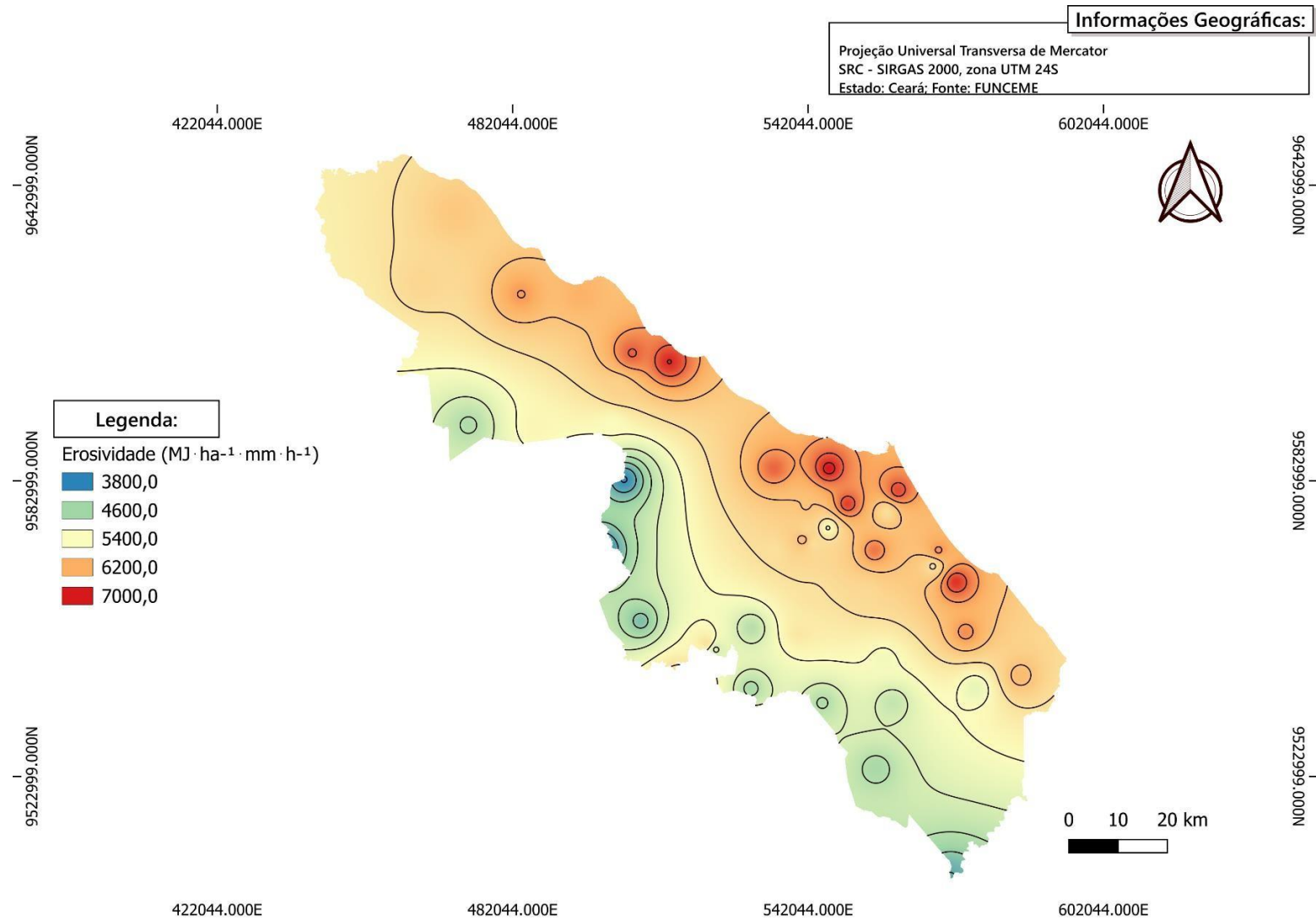
Fonte: adaptado de Carvalho (2019); Stein et al. (1987) apud Oliveira (2012).

5 RESULTADOS

5.1 Mapa de Erosividade (R)

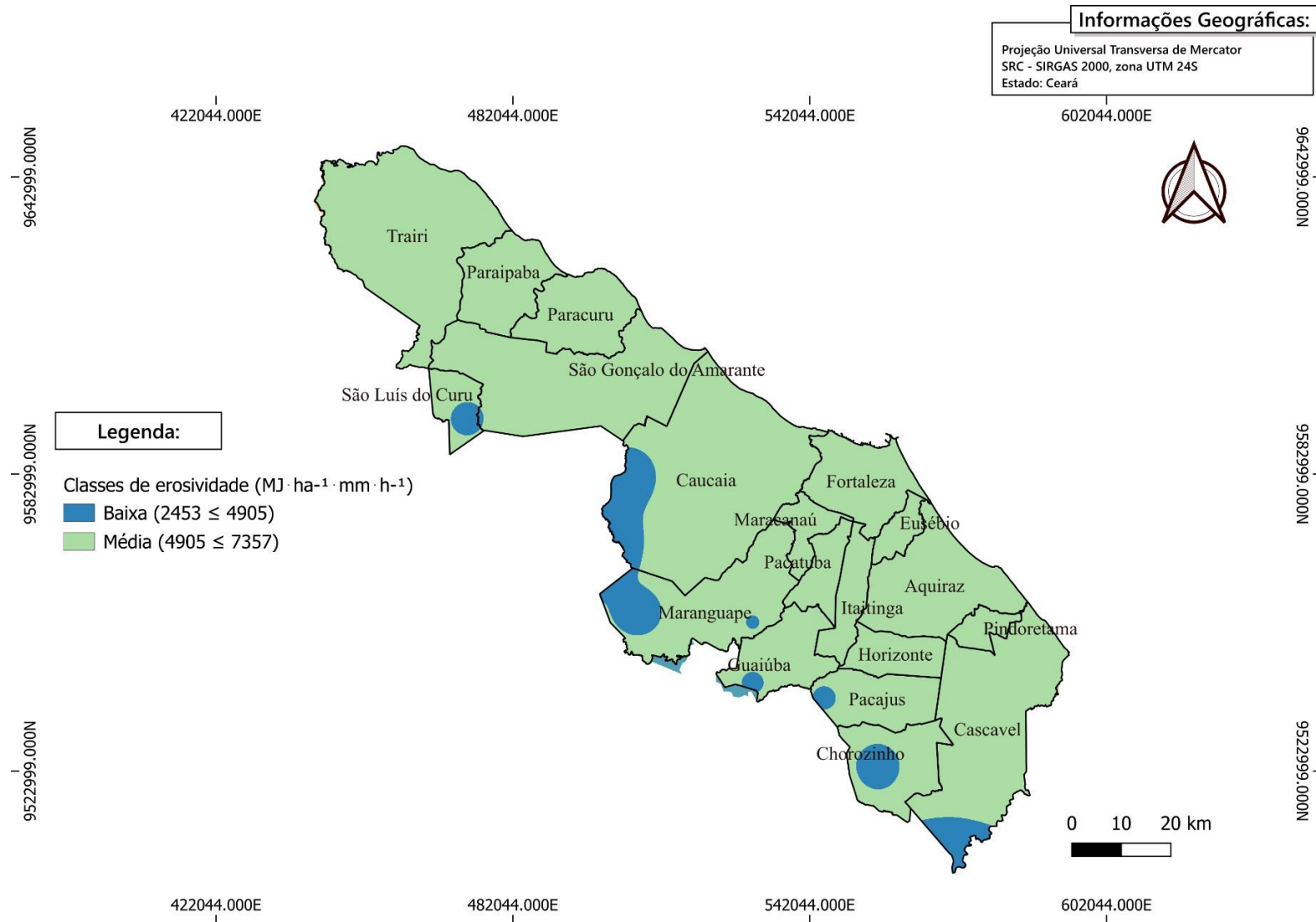
Segundo a documentação do QGIS (2025), o método de Interpolação IDW assume que o valor de um atributo em um ponto não amostrado é uma média ponderada dos valores de pontos amostrados em uma vizinhança local, com pesos inversamente proporcionais à distância, dando maior influência a pontos mais próximos. Com o dado de erosividade importado no QGIS, a interpolação IDW foi realizada utilizando o valor habitual de $P = 2$ e uma resolução de 30 pixels para as direções X e Y. Na camada acima do mapa de erosividade, foram geradas curvas de nível para os valores de erosividade utilizando a função de Contorno do *plug-in* GDAL no QGIS, com um intervalo de 300 entre as curvas, para facilitar a visualização, e na figura seguinte, o mapa foi reclassificado de acordo com as classes de Erosividade, como apresentado nas Figuras 11 e 12, respectivamente:

Figura 11 – Mapa do Fator R



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 12 – Mapa reclassificado de erosividade



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

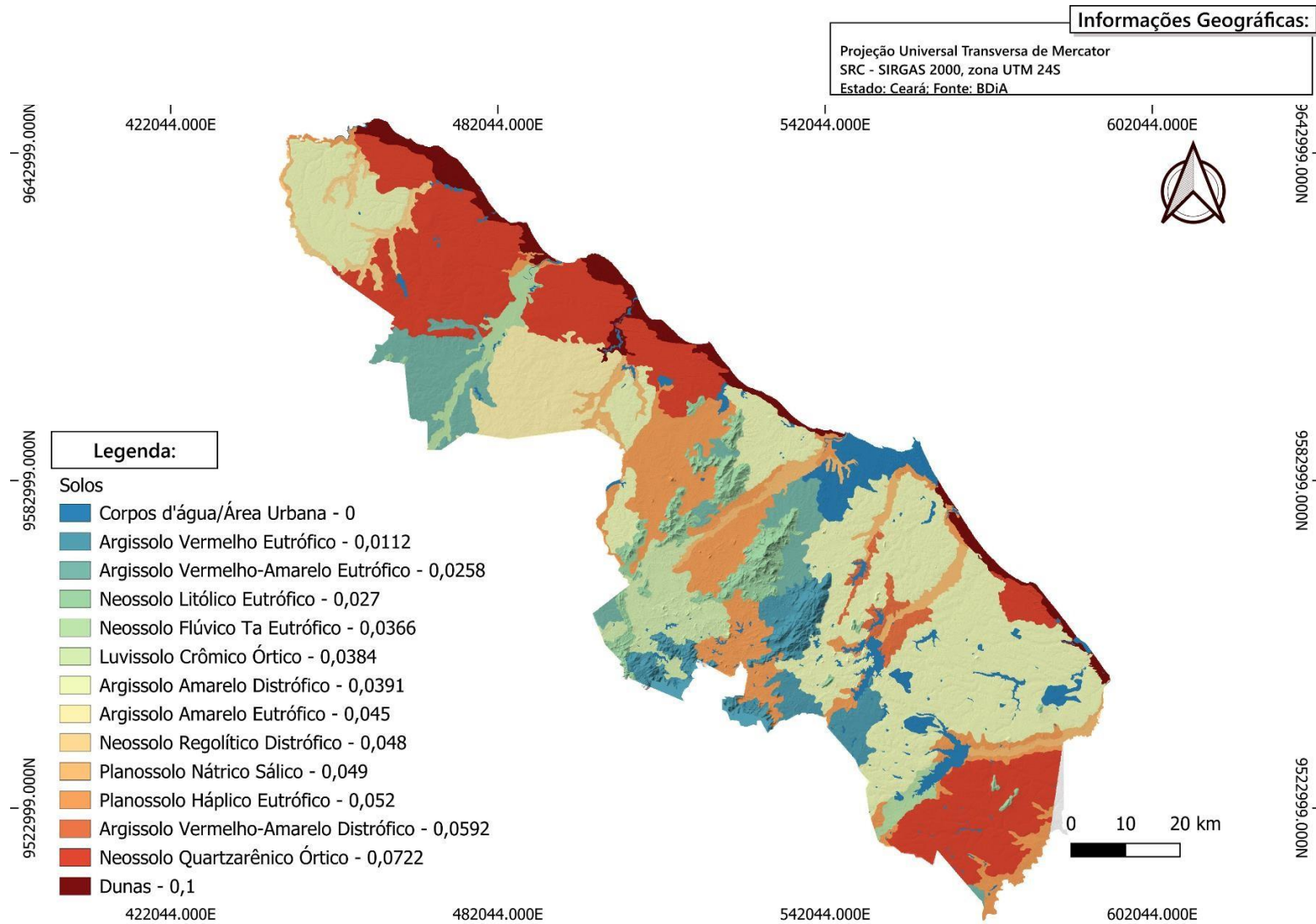
A análise do mapa revela que a maior parte da RMF apresenta valores de erosividade relativamente uniformes, sem variações expressivas. De modo geral, observa-se que as áreas litorâneas concentram os maiores índices de erosividade, variando entre 6.000 e 7.000 ($\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$). Em contraste, as regiões mais distantes do litoral apresentam os menores valores do fator R, oscilando entre aproximadamente 4.000 e 5.500 ($\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), o que reflete uma precipitação total anual inferior nessas áreas e, conseqüentemente, uma menor erosividade.

Ao se considerar isoladamente o fator R da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), infere-se que as zonas litorâneas estão mais suscetíveis à erosão hídrica. No entanto, ao se aplicar na Figura 12 a reclassificação apresentada na Figura 1, verifica-se que a maior parte da RMF se enquadra na categoria de erosividade média, enquanto algumas áreas mais restritas apresentam níveis baixos de erosividade, localizadas nos municípios de Caucaia, Maranguape, Guaiúba, Pacajus, Chorozinho, Cascavel e São Luís do Curu.

5.2 Mapa de Erodibilidade (K)

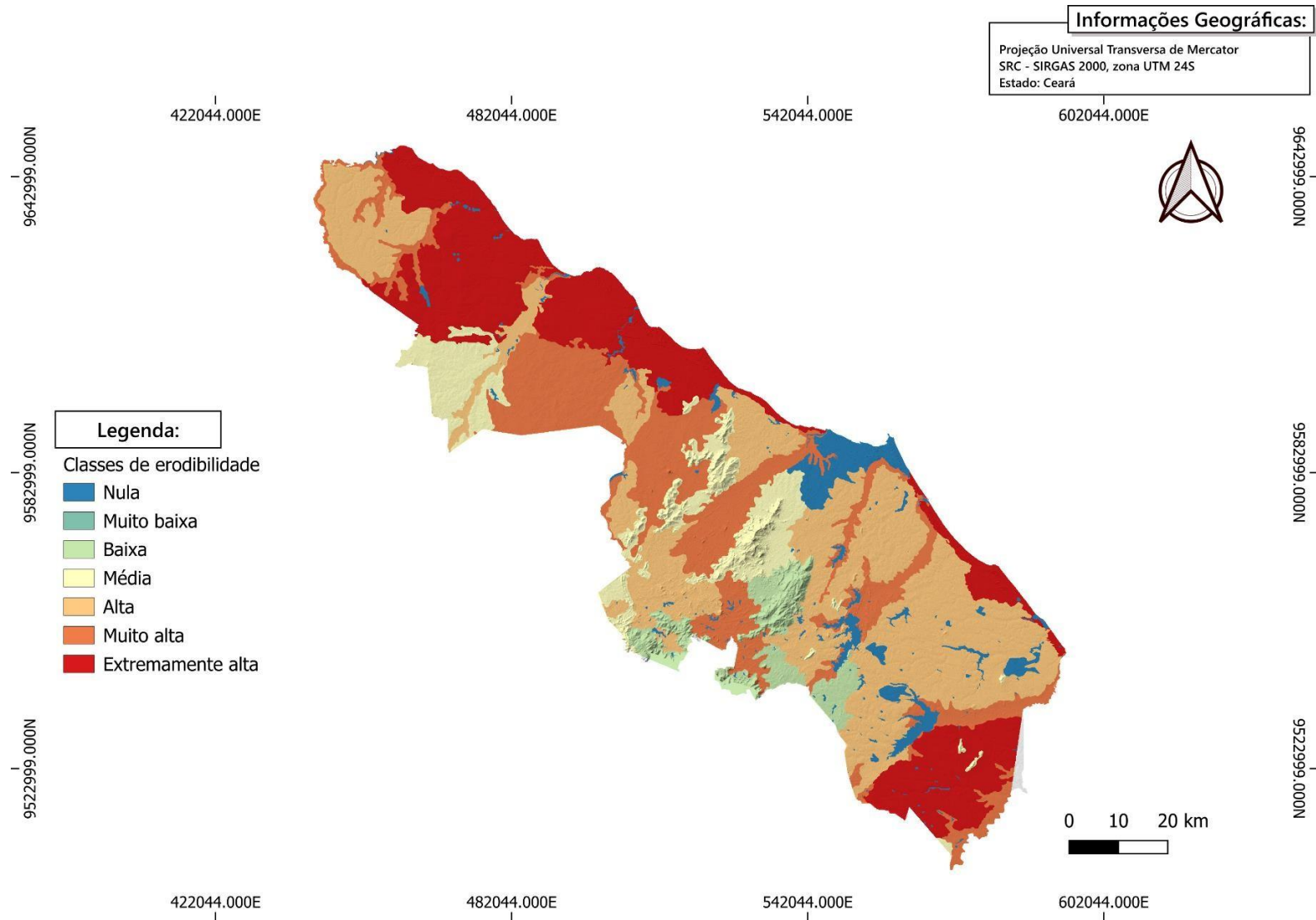
Com base nos procedimentos realizados, foram criados dois mapas, onde um mostra uma área com coloração distinta indicando um tipo de solo e seu respectivo valor de K, possibilitando a visualização dos solos mais suscetíveis à erosão na área, e o outro reclassifica as áreas pelas classes de erodibilidade, conforme ilustrado nas Figuras 13 e 14:

Figura 13 – Mapa do Fator K



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 14 – Mapa reclassificado de erodibilidade



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

A análise dos mapas permite observar a distribuição dos solos na RMF e identificar aqueles com maior erodibilidade, representados pelas tonalidades mais próximas ao vermelho. Como os mapas também apresentam relevo, é possível perceber que as áreas mais elevadas do estudo apresentam solos do tipo Neossolo litólico eutrófico e Argissolo vermelho eutrófico, solos com valores de erodibilidade classificados como médio e baixo, respectivamente. Isso indica que, considerando isoladamente o fator K, essas regiões não seriam as mais suscetíveis à erosão. No entanto, ao se considerar o fator LS, essas mesmas áreas demonstram maior suscetibilidade à erosão hídrica, devido à inclinação acentuada do terreno. Esse contraste evidencia a importância de uma análise integrada dos fatores que compõem a EUPS, a fim de identificar com maior precisão as áreas com maior risco de erosão.

Também foi possível identificar através do processamento de dados as áreas relativas de cada classe de erodibilidade em relação à área total, mostrando que a maior parte da área possui nível de erodibilidade alto ou acima, e que não há áreas na classe de erodibilidade muito baixa, como apresentado na tabela a seguir:

Tabela 7 – Área relativa das classes de erodibilidade

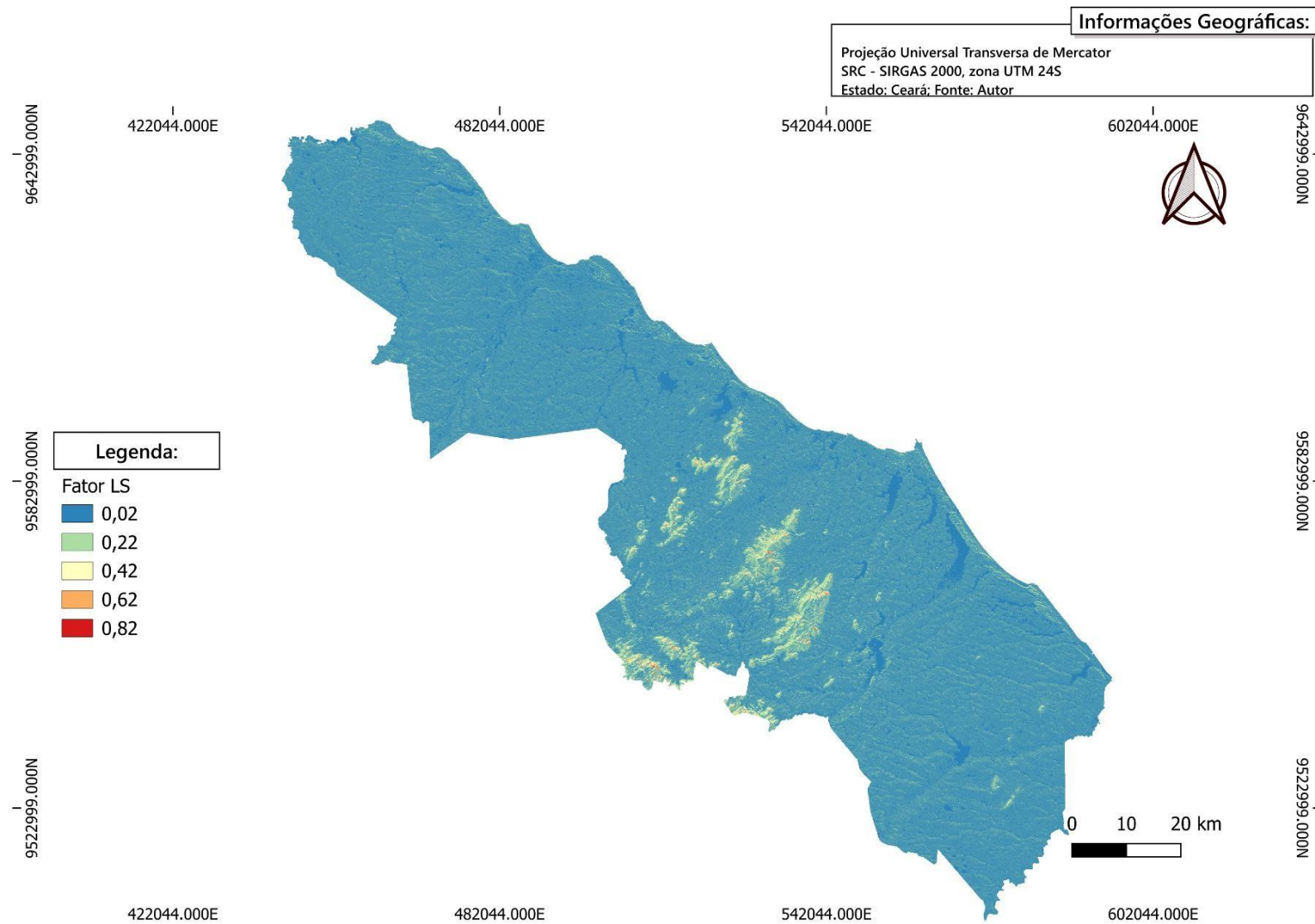
Classe	% da área total
Nula	4,91
Baixa	5,10
Média	10,00
Alta	33,57
Muito alta	22,26
Extremamente alta	24,15

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

5.3 Mapa de Fator LS

A partir dos procedimentos executados, obteve-se um mapa do fator LS calculado, apresentado na Figura 15:

Figura 15 – Mapa do Fator LS



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

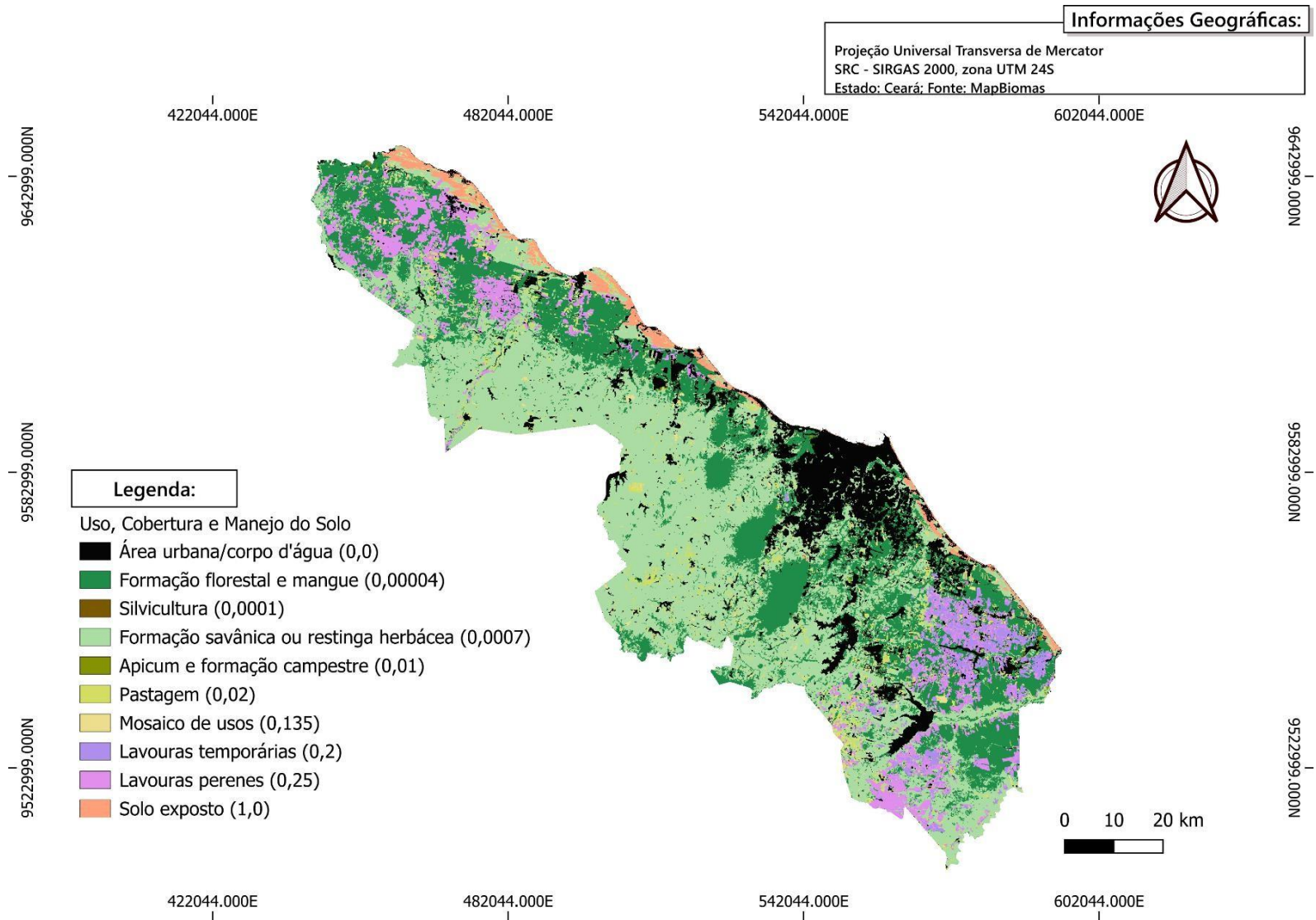
O mapa do fator LS mostra consistência com o MDE da área. Regiões de maior elevação no MDE correspondem às áreas de maior declividade e aos maiores valores de fator LS. Esse padrão é uma consequência direta da elevação do relevo, que promove tanto uma maior declividade quanto um caminho maior para a água da chuva percorrer, influenciando diretamente nos processos erosivos, aumentando os valores do fator topográfico. Dessa forma, ao considerar apenas o fator LS, essas áreas se tornam mais vulneráveis à erosão.

Ao comparar o mapa do fator LS com a Figura 5, é possível notar que algumas das áreas com maior influência da topografia nos processos erosivos se concentram em Caucaia, Maranguape, Pacatuba e Guaiúba, com as duas últimas cidades sendo particularmente conhecidas por suas altitudes elevadas.

5.4 Mapa do fator (CP)

Com base nas classes utilizadas para o mapa, foi elaborado um mapa que possibilita a visualização da distribuição do uso do solo na RMF, destacando áreas com diferentes formações vegetais, presença de corpos hídricos, regiões onde provavelmente não ocorrem perdas de solo e áreas destinadas à agropecuária, como plantações e pastagens, conforme apresentado na Figura 16:

Figura 16 – Mapa do Fator CP



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

A análise do mapa mostra que, em razão da predominância de formações vegetais na RMF, grande parte de sua área exibe uma redução significativa na perda de solo, em que mais de 60% da sua área se enquadra nas categorias de formação florestal, mangue, formação savânica e restinga herbácea. Não foram encontradas áreas de silvicultura. Em áreas urbanas e corpos d'água, não há erosão calculada.

Quanto maior o fator CP, maior a suscetibilidade da área aos processos erosivos. Considerando esse fator, as áreas mais suscetíveis são as áreas de solo exposto, que não apresentam proteção alguma, e nem práticas destinadas a mitigar a erosão, encontradas principalmente no litoral da região. A cidade de Fortaleza, por sua vez, registra pouco ou nenhum solo exposto, provavelmente devido ao seu status de capital estadual e ao elevado nível de urbanização. Em seguida, as áreas mais suscetíveis são de lavouras temporárias e perenes, que diminuem a erosão em 80% e 75% no cálculo da EUPS, devido aos seus valores de CP de 0,20 e 0,25, respectivamente. Abaixo, está a distribuição das classes em (%), apresentada na Tabela 8:

Tabela 8 – Área relativa das classes de Manejo, Uso e cobertura

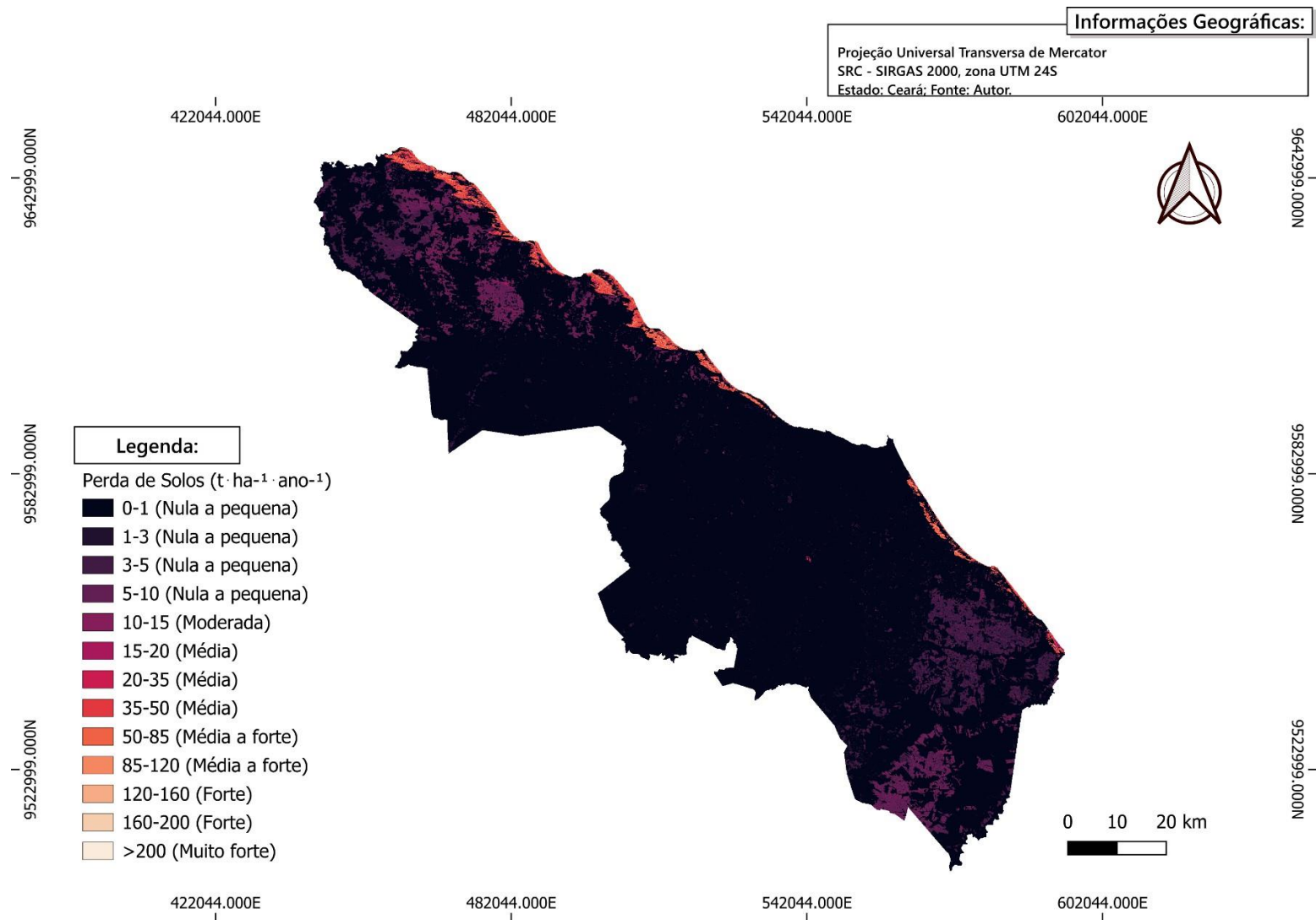
Classe	% da área total
Área urbana/corpo d'água; Formação florestal e mangue; Formação savânica ou restinga herbácea	82,09
Apicum e formação campestre	0,19
Pastagem	2,93
Mosaico de usos	2,12
Lavouras temporárias	2,39
Lavouras perenes	8,09
Solo exposto	2,19

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

5.5 Mapa de perda dos solos (E)

O mapa final de perda dos solos foi gerado, a partir da calculadora *raster*, utilizando a Equação 1, multiplicando todos os fatores, resultando na Figura 17:

Figura 17 – Mapa de Perda de Solos



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

O mapa de perda de solos foi reclassificado de acordo com as classes de perdas de solos apresentadas em Matos (2015), de acordo com a seguinte classificação, na Tabela 9:

Tabela 9 – Classes de perdas de solos ($t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$)

Valor de perda de solos	Classe
< 10	Nula a pequena
10-15	Moderada
15-50	Média
50-120	Média a forte
120-200	Forte
>200	Muito forte

Fonte: Matos (2015).

Contudo, a fim de otimizar a representação visual e aumentar a precisão na delimitação de áreas mais propensas à erosão hídrica, as classes de perda de solo foram refinadas dentro do *software* QGIS. Essa estratégia envolveu a criação de subdivisões dentro dos intervalos originais, visando uma discretização maior dos valores e, consequentemente, uma visualização mais clara e detalhada das áreas de vulnerabilidade no mapa.

Para complementar a análise, procedeu-se à extração, no QGIS, de uma tabela contendo as áreas percentuais correspondentes a cada classe de perda de solo, em relação à extensão total da RMF. Tal representação tabulada oferece uma perspectiva aprofundada da distribuição espacial e da magnitude das perdas de solo observadas na região, como apresentado na Tabela 10:

Tabela 10 – Área relativa das classes de perdas de solos

Faixa de Perda de Solo ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)	Classe	(%) da área total
0 - 1	Nula a pequena	85.52%
1 - 3	Nula a pequena	1.95%
3 - 5	Nula a pequena	4.52%
5 - 10	Nula a pequena	5.06%
10 - 15	Moderada	0.75%
15 - 20	Média	0.22%
20 - 35	Média	0.10%
35 - 50	Média	0.85%
50 - 85	Média a forte	0.70%
85 - 120	Média a forte	0.20%
120 - 160	Forte	0.07%
160 - 200	Forte	0.02%
> 200	Muito forte	0.01%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Com base na análise da Figura 17 e da Tabela 10, observa-se que aproximadamente 97% da área da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) apresenta níveis de perda de solo enquadrados na categoria de nula a pequena. Destaca-se que a maior proporção dessa área se concentra na faixa de valores de até $1 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Ainda dentro da classe "nula a pequena", as faixas de $3\text{-}5 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $5\text{-}10 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ mostram maior representatividade em termos de área, sendo visualizadas predominantemente nas extremidades da RMF.

No que concerne às classes superiores de perda de solo, as áreas mais representativas e visíveis no mapa são aquelas classificadas como de perda média (faixa de $30\text{-}50 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e média a forte (faixa de $50\text{-}85 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Estas se localizam principalmente na faixa litorânea da RMF, com exceção da porção referente ao litoral da cidade de Fortaleza. Adicionalmente, é possível verificar que, à medida que se avança para faixas de perdas de solo de maior severidade, a área correspondente a cada uma dessas faixas é progressivamente menor.

6 CONCLUSÃO

A análise comparativa dos mapas dos fatores individuais e do mapa final de perda de solos permite uma compreensão aprofundada da relevância do cálculo da EUPS. Essa avaliação revela que cada fator, isoladamente, possui influência nos processos erosivos. Porém, regiões que possuem um solo com maior fator de erodibilidade, podem estar expostas a uma zona de vegetação que oferece uma proteção maior à erosão, assim como uma região de topografia mais elevada pode ser formada por um solo como baixa propensão aos processos erosivos, o que demonstra que só é possível obter um diagnóstico realista a partir do produto de todos os fatores, evidenciando a importância do uso da EUPS.

É possível perceber áreas com menores perdas de solos, mesmo com maiores valores de fatores R, K e LS. Porém, observa-se, que não há região com pouca erosão hídrica e fator CP alto, e vice-versa. O que demonstra que o fator CP exerce uma influência preponderante sobre os valores de perda de solo. Cerca de 80% da RMF apresenta perdas de solo que estão classificadas na faixa nula a pequena, proporção bastante similar à região da RMF que possui os menores valores de fator CP, que também ocupa cerca de 80% da área. Uma predominância atribuída, em grande parte, à formação vegetal natural que confere proteção significativa (fator CP = 0,0004 e 0,0007), reduzindo a erosão hídrica a níveis próximos de zero. Ademais, é possível constatar que as maiores áreas que exibem perdas de solo acima dessa faixa de baixa severidade, são, majoritariamente, regiões de lavouras temporárias e perenes, a partir da comparação com o mapa de fator CP. Essas áreas, por possuírem um valor de fator CP mais elevado, evidenciam a notável diferença na proteção do solo entre a vegetação natural e as áreas de cultivo, ressaltando o impacto crucial do uso da terra, do manejo agrícola e da adoção de práticas conservacionistas.

Adicionalmente, percebe-se que as áreas que registram os maiores valores de perdas por erosão hídrica estão predominantemente associadas a solos expostos sem cobertura vegetal, onde o fator CP atinge o valor de 1, indicando a ausência de qualquer redução da erosão e, conseqüentemente, maximizando as perdas de solo. Infere-se, portanto, que a gestão da erosão hídrica e a conservação do solo são predominantemente influenciadas pelo planejamento adequado do uso da terra e pela adoção de práticas conservacionistas.

Tudo isso demonstra que, mesmo frente às variações intrínsecas da erosividade das chuvas, da erodibilidade dos solos e da influência topográfica, a cobertura vegetal se configura como o elemento mais eficaz na mitigação das perdas de solo, ressaltando a primazia

do manejo e da proteção da superfície do terreno.

Nesse contexto, faz-se necessário reavaliar as práticas de uso e conservação do solo que vêm sendo utilizadas nas áreas de maior destaque, ou o início da sua implantação, para o caso de áreas desprotegidas.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. W. DE . *et al.*. **Determinação de fatores da equação universal de perda de solo em Sumé, PB**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 9, n. 2, p. 153–160, abr. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000200001>. Acesso em: 22 abril. 2025.

BERTONI, J; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8. ed. São Paulo: Editora Ícone, 2012.

CARNEIRO, A. F. S. **Fragilidade ambiental em bacias hidrográficas do Vão do Paranã – GO**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Ambientais) – Instituto de estudos socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/365/o/TCC_ANA_FLAVIA.pdf . Acesso em: 15 mar. 2025.

Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **I3Geo**. Fortaleza: COGERH, 2024. Disponível em: <http://i3geo.cogerh.com.br/i3geo/ogc/download.php#>. Acesso em: 15 out. 2024.

DE SOUZA, P. A.; VIEIRA, E. M. V. M.. **Delimitação do potencial erosivo em áreas urbanas, estudo de caso da ocupação vitória, Belo Horizonte - MG**. Revista Brasileira de Geografia Física, [S. l.], v.16, n. 3, p. 1450–1465, 2023. DOI:10.26848/rbgf.v16.3.p1450-1465. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/256833>. Acesso em: 22 maio. 2025.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, CPATSA. **Estudos da erosão**. Petrolina: Embrapa Solos, 1995. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/133340>. Acesso em: 24 set. 2024.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Erosividade da chuva do Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2024. 37 p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Erodibilidade dos solos do Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2024.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. **A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units**. Journal of Soil and Water Conservation, Ankeny, v. 51, n. 5, p. 427-433, set./out. 1996. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/442630066/DESMET-e-GOVERS-1996> . Acesso em: 15 maio 2025.

DIAS, A. S.; SILVA, J. R. C.. **A erosividade das chuvas em Fortaleza (CE): I - distribuição, probabilidade de ocorrência e período de retorno - 1ª aproximação**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 27, n. 2, p. 335–345, mar. 2003. DOI: 10.1590/S0100-06832003000300009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/Cvfk5fVZr7BQmfNmW9csZws/?lang=pt>. Acesso em: 11 maio 2025.

FERNANDES, J. A. **Estudo da erodibilidade de solos e rochas de uma voçoroca em São Valentim, RS**, 2011. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Pós-Graduação em Engenharia

Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011. Disponível em: https://www.abge.org.br/img/biblioteca/5_Fernandes_2011.pdf. Acesso em: 23 out. 2024.

FORTALEZA (Prefeitura). **Região Metropolitana de Fortaleza**. Fortaleza: Secretaria de Urbanismo e Meio Ambiente, 2024. Mapa digital. Disponível em: <https://mapas.fortaleza.ce.gov.br/mapa/626/regiao-metropolitana-de-fortaleza>. Acesso em: 23 maio 2025.

FREITAS, J. C. A. de.; ARAÚJO, J. C. de. **Mapeamento da erodibilidade dos solos do Ceará a partir de mapas pedológicos**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15, 2003, Curitiba. **Anais...** [...]. Curitiba: ABRHidro, 2003. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=11925> . Acesso em: 13 maio 2025.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. Postos pluviométricos. Fortaleza: Funceme, 2024. Disponível em: http://www.funceme.br/?page_id=2694. Acesso em: 14 maio 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual técnico de pedologia**. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. 430 p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv95017.pdf>. Acesso em: 25 maio 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Panorama do Censo 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 23 maio 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Banco de Dados e Informações Ambientais (BDiA): Consulta Pedologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia>. Acesso em: 15 out 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **MDE - Modelo Digital de Elevação**. Rio de Janeiro: IBGE, [2025]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/modelos-digitais-de-superficie/modelos-digitais-de-superficie/10856-mde-modelo-digital-de-elevacao.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 15 abr. 2025.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

MANNIGEL, A. R.; CARVALHO, M. DE P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. DA R. **Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo**. *Acta Scientiarum. Agronomy*, [S. l.], v. 24, p 1335-1340, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v24i0.2374>. Acesso em: 17 mar. 2025.

MATOS, T. V. da S. **Determinação de áreas de vulnerabilidade à erosão hídrica com base na equação universal de perda de solo (USLE)**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-A3FETB>. Acesso em: 15 maio. 2025.

MORAIS, R. C. de S.; SALES, Marta Celina Linhares. **Estimativa do Potencial Natural de Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí-Brasil, com uso de Sistema de Informação Geográfica / Estimation of the Natural Soil Erosion Potential of the Upper Gurguéia Basin, Piauí-Brazil (...)**. Caderno de Geografia, Belo Horizonte, v. 27, n. 1, p. 84–105, 2017. DOI: 10.5752/p.2318-2962.2017v27nesp1p84. Disponível em: <https://periodicos.pucminas.br/geografia/article/view/p.2318-2962.2017v27nesp1p84> . Acesso em: 12 maio 2025.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. 3. ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2005. Disponível em: https://svgaos.nl/wp-content/uploads/2017/02/Morgan_2005_Soil_Erosion_and_Conservation.pdf. Acesso em: 15 abr. 2025.

OLIVEIRA, J. S. **Avaliação de modelos de elevação na estimativa de perda de solos em ambiente SIG**. 2012. Dissertação (Mestrado em ciências. Área de concentração: Irrigação e drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-31052012-075705/publico/Julio_Storion_Oliveira_versao_revisada.pdf. Acesso em: 13 mai. 2025.

PEREIRA, E. C. B. **Determinação do fator de erodibilidade do solo (k) para uma bacia experimental no semiárido brasileiro, utilizando geoprocessamento**. 2016. 53 f. Monografia (Graduação em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

PRUSKI, F. F. Prejuízos Decorrentes da Erosão hídrica e Tolerância de Perdas de Solo. In: PRUSKI, F. F. **Conservação do solo e da água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. p. 13-23.

QGIS Development Team. **QGIS**. Versão 3.40.2. [S.l.], 2024.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Documentation**. Análise Espacial (Interpolação). [S.l.], 2025. Disponível em: https://docs.qgis.org/3.40/pt_BR/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html. Acesso em 17 mai 2025.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS User Guide**. [S.l.], 2025. Disponível em: <https://docs.qgis.org>. Acesso em: 25 maio 2025.

RUBIRA, F. G.; MELO, G. do V. de; OLIVEIRA, F. K. S. de. **PROPOSTA DE PADRONIZAÇÃO DOS CONCEITOS DE EROSIÃO EM AMBIENTES ÚMIDOS DE ENCOSTA**. Revista de Geografia, [S. l.], v. 33, n. 1, p 168-193, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/revistageografia/article/view/229235>. Acesso em: 23 maio. 2025.

SÁ, M. A. C. DE . et al.. **Estimativa da erodibilidade pela desagregação por ultra-som e atributos de solos com horizonte B textural**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 39, n. 7, p. 691–699, jul. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000700011>. Acesso em: 13 maio 2025.

SOARES, A. B. **Recuperação de áreas degradadas**. 4. ed. Fortaleza, CE: Universidade Federal do Ceará, 2021.

USLE (Perda de Solo - Fator CP, K, R) no QGIS 3 - Parte 1/2. Ulisses Costa de Oliveira. [s.l.], 2021. 1 vídeo (19 min). Publicado pelo canal OpenGis. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=oa6Rj_9iAlo. Acesso em: 15 jan. 2025.

USLE (Perda de Solo - Fator L, S, LS, A) no QGIS 3 - Parte 2/2. Ulisses Costa de Oliveira. [s.l.], 2021. 1 vídeo (22 min). Publicado pelo canal OpenGis. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=oa6Rj_9iAlo. Acesso em: 15 jan. 2025.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning**. Agricultural Handbook No.537. Washington, D.C: US Department of Agriculture, 1978. Disponível em: https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/60600505/RUSLE/AH_537%20Predicting%20Rainfall%20Soil%20Losses.pdf. Acesso em: 22 setembro 2024.