



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

WELLYNNE CARLA DE SOUSA BARBOSA

ANÁLISE MULTIVARIADA E USO DO SIG NO DIAGNÓSTICO DE ÁREAS DE RISCO
DE EROÇÃO DOS SOLOS NO BAIXO PARNAÍBA, PIAUÍ-BRASIL

Rio de Janeiro

[2024]

WELLYNNE CARLA DE SOUSA BARBOSA

ANÁLISE MULTIVARIADA E USO DO SIG NO DIAGNÓSTICO DE ÁREAS DE RISCO
DE EROSÃO DOS SOLOS NO BAIXO PARNAÍBA, PIAUÍ-BRASIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Departamento de Geografia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito para a obtenção do título de doutora em Geografia

Orientador: Prof. Dr^o Antonio José Teixeira
Guerra

Coorientadora: Prof^a Dr^a Iracilde Maria de
Moura Fé Lima

Rio de Janeiro

[2024]

CIP - Catalogação na Publicação

B457a Barbosa, Wellynne Carla de Sousa
 Análise Multivariada e Uso do SIG no Diagnóstico
de Áreas de Risco de Erosão dos Solos no Baixo
Parnaíba, Piauí-Brasil / Wellynne Carla de Sousa
Barbosa. -- Rio de Janeiro, 2024.
 160 f.

 Orientador: Antonio José Teixeira Guerra.
 Coorientadora: Iracilde Maria de Moura Fé Lima.
 Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de
Pós-Graduação em Geografia, 2024.

 1. Erosão. 2. Sistema de Informações Geográficas
. 3. Bacia hidrográfica do rio Parnaíba. 4. perda de
solos. 5. feições erosivas. I. Guerra, Antonio José
Teixeira, orient. II. Lima, Iracilde Maria de
Moura Fé, coorient. III. Título.

WELLYNNE CARLA DE SOUSA BARBOSA

ANÁLISE MULTIVARIADA E USO DO SIG NO DIAGNÓSTICO DE ÁREAS DE RISCO
DE EROÇÃO DOS SOLOS NO BAIXO PARNAÍBA, PIAUÍ-BRASIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Departamento de Geografia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito para a obtenção do título de doutora em Geografia.

Aprovada em: 07/06/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr^o Antonio José Teixeira Guerra [Orientador – Presidente]
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof^a Dr^a Iracilde Maria de Moura Fé Lima [Coorientadora]
Universidade Federal do Piauí

Professora Dr^a Carla B. Madureira Cruz – [Examinadora interna]
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Professor Dr^o Antonio Soares da Silva – [Examinador externo]
Universidade Estadual do Rio de Janeiro

Professor Dr^o Raúl Sanchez Vicens – [Examinador externo]
Universidade Federal Fluminense

Professor Dr^o Marcelo Motta de Freitas [Examinador externo]
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a realização deste doutorado. Em primeiro lugar, agradeço a Deus, cuja graça e amor incondicional foram a luz que guiou meus passos ao longo desta jornada desafiadora. Ao meu marido, Lucas Oliveira Lima, expresso minha gratidão por ser meu companheiro de vida e de sonhos, por estar ao meu lado em cada desafio e por ser meu porto seguro em momentos de incerteza.

À minha mãe, Laura Alves de S. Barbosa pelo amor infinito que sempre me sustentou e pelas palavras de força que me motivavam a seguir firme nessa caminhada, e ao meu irmão, Wallison Carlos de S. Barbosa, cuja trajetória acadêmica e conselhos pontuais foram fontes de inspiração para mim. À memória do meu pai, que, mesmo ausente, permanece vivo em meu coração como exemplo de coragem e determinação.

Aos meus estimados orientadores, Professor Antonio José Teixeira Guerra e Professora Iracilde Maria de Moura Fé Lima, meu profundo agradecimento. Ao primeiro, por ter aceitado me orientar e pelo suporte e incentivo oferecidos, especialmente no início dessa jornada, quando nos deparamos com alguns obstáculos, sua força e determinação para enfrentar as adversidades me motivaram a continuar estudando e alcançar o primeiro lugar na seleção de doutorado da UFRJ. À segunda, por sua valiosa orientação, que foi além das fronteiras físicas, estendendo-se por meio de conversas significativas e esclarecedoras, que guiaram em muitos momentos meu caminho nesta pesquisa, inclusive no trabalho de campo. Tendo em vista a brilhante trajetória acadêmica e a significativa contribuição de ambos para a geografia brasileira, sinto-me honrada por tê-los como orientadores.

Agradeço também ao apoio fundamental durante a etapa do trabalho de campo do Professor Almir Lima e do Professor Hikaro Nunes. Ao Professor Gustavo Valladares, minha gratidão pela colaboração especialmente nas etapas de geoprocessamento e as parcerias de trabalho e orientação desde o mestrado.

Aos amigos do Laboratório de Geomorfologia Ambiental e Degradação dos Solos - LAGESOLOS, verdadeiros companheiros de jornada, meu sincero agradecimento. À Gilberlene Lisboa, que tem sido uma parceira de vida acadêmica, compartilhando nossas angústias e vitórias. Ao Diego, pela ajuda e suporte quando cheguei ao laboratório, além da colaboração e parceria acadêmica que desenvolvemos ao longo do tempo. A Ana Paula e a Vitória, pelo apoio e dedicação durante as análises das amostras de solo no laboratório, ainda no período de pandemia. Mais recentemente, Yuri e Sabrina também deram um suporte

importante nessa etapa. Agradeço também pelas boas conversas acadêmicas que fizeram parte dessa experiência, divididas com Carmem, Hugo, Leonardo, Luana Rangel, Guilherme, Jorge, Fabrício e outros. Aos amigos de graduação Rafaela e Leylson, que se mantiveram por perto, dentro do possível, oferecendo apoio e torcendo por mim.

Agradeço aos ilustres membros da banca examinadora, Prof. Marcelo Motta de Freitas (PUC), Prof. Raúl Sanchez Vicens (UFF), Prof^a. Carla B. Madureira Cruz (UFRJ) e Prof. Antonio Soares da Silva (UERJ), pela disponibilidade, interesse e contribuições na avaliação deste trabalho.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, que me concedeu a bolsa de estudos nos dois primeiros anos do doutorado, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ, que assumiu nos anos subsequentes, por meio da premiação da bolsa de doutorado nota 10. A Universidade Federal do Rio de Janeiro e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, pela oportunidade de crescimento acadêmico e pessoal. Ao CLAC - Curso de Línguas Aberto à Comunidade, pelas amizades e pelo aprendizado em outra língua, o inglês, tão essencial na vida acadêmica. À biblioteca do PPGG, e aos funcionários que sempre foram prestativos e acolhedores. Agradeço também aos funcionários da limpeza, sempre tão simpáticos e alegres, que tornam o ambiente da pós-graduação mais harmonioso, deixando os corredores e espaços de trabalho mais agradáveis.

Foram quatro anos repletos de desafios, marcados especialmente pelos dois primeiros anos de pandemia. Contudo, o apoio incondicional do meu marido, da minha família, e a minha fé foram fundamentais para superar cada obstáculo e seguir em frente. Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista. A decisão de permanecer no Rio de Janeiro desenvolvendo minha pesquisa, após a pandemia, foi motivada pela certeza de que cada experiência vivida e cada pessoa conhecida aqui deixaram uma marca importante em minha vida e em minha trajetória acadêmica, que este seja apenas o início de uma nova fase repleta de realizações e aprendizados.

Obrigada a todos vocês, que tornaram esta jornada possível!

RESUMO

A presente pesquisa de tese analisa a erosão do solo na intenção de estimar o potencial erosivo e a erosão real nas Bacias Difusas do baixo curso do rio Parnaíba. Buscou-se ainda analisar a erodibilidade dos solos na área e espacializar os pontos que apresentam feições erosivas ao longo da área de estudo. O estudo foi desenvolvido sobretudo a partir dos parâmetros da Equação Universal de Perda de Solo que são: Erosividade das chuvas (Fator R), fator topográfico (LS), erodibilidade dos solos (fator K) e uso e manejo (Fator CP), todos apoiados no uso de Sistema de Informações Geográficas e dados de Sensoriamento Remoto, além de análises laboratoriais e de campo. A equação tem por finalidade prever o nível de erosão em unidades de $[t\ ha^{-1}\ ano^{-1}]$, que poderá ocorrer em determinada área, buscando promover a adoção de medidas preventivas e/ou mitigadoras para que os impactos das perdas de solo fiquem situados dentro de limites toleráveis. A espacialização das feições erosivas foi baseada especialmente no trabalho de campo e em análise de laboratório como o caso da Voçoroca da Torre localizada no município de Miguel Alves- Piauí. A Erosividade da chuva (Fator R), exige o uso de dados pluviométricos que podem ser adquiridos através dos registros contínuos cotados nas estações pluviométricas nacionais e regionais. A erodibilidade da área (fator K), foi adquirida a partir de estudos feitos na área que tiveram por base especialmente as classes de solo, além do fator K, foram conduzidas análises da erodibilidade a partir da declividade e da granulometria, contribuem mais expressivamente para explicar a variância da perda de solo, essas análises levaram em consideração: textura dos solos, estrutura, densidade do solo, espaço poroso ocupado por ar. As amostras coletadas foram espacializadas no mapa de solos da área adquirido na página eletrônica do INDE - *Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais*. Para o fator topográfico (LS), utilizou-se o modelo digital de elevação (MDE) combinado a procedimentos de cálculo via “Raster Calculator Tool”, no *software* ArcGIS. O MDE utilizado para cobrir a bacia do rio Parnaíba- Piauí provem das imagens SRTM (*Shuttle Radar Topograph Mission*) que possui 30 m de resolução espacial disponibilizado gratuitamente (USGS - United States Geological Survey). Para o uso e cobertura da terra (fator CP), além da verdade de campo, foi utilizado imagens de satélite *Landsat* sensores 5 e 8, em um intervalo de 15 anos entre 2006 e 2021. Assim, o conhecimento da perda anual de solo e a identificação e espacialização das feições erosivas da área correspondeu a um esforço de compreensão do risco de erosão dos solos na região de influência desse importante recurso hídrico do estado do Piauí, o rio Parnaíba, que poderá auxiliar no desenvolvimento futuro de propostas de gestão e ordenamento territorial. A perda de solo obtida pela integração dos fatores físicos naturais com o uso da terra (ação antrópica) variou de pouca ($0 - 0,01\ t\ ha^{-1}.ano^{-1}$) a extremamente alta ($>100\ t\ ha^{-1}.ano^{-1}$). As áreas de maior perda de solo foram identificadas em regiões de pastagem, solo exposto e terras cultivadas. Esse cenário está associado também às características físicas do local, que podem apresentar um potencial natural para processos erosivos. Os resultados da erodibilidade dos solos mostraram que 60,66% da bacia está na classe moderadamente erodível, localizada em áreas com declividade entre 12-20% e hipsometria variando de 90 a 120 metros. Os principais solos da área são Latossolo Amarelo (11,5%), Argissolos (41,51%) e Luvisolos (7,65%). Foram identificadas cerca de 10 feições erosivas, incluindo a voçoroca urbana de Miguel Alves, que apresentou uma expansão de aproximadamente 21,85% entre os anos de 2007 e 2017.

Palavras-chave: Erosão, SIG, rio Parnaíba, perda de solos.

ABSTRACT

This thesis analyzes soil erosion to estimate the erosive potential and actual erosion in the Diffuse Basins of the lower course of the Parnaíba River. The study also aimed to analyze soil erodibility in the area and spatialize sites with erosive features throughout the study area. The study was mainly developed based on the parameters of the Universal Soil Loss Equation, including Rainfall Erosivity (R Factor), Topographic Factor (LS), Soil Erodibility (K Factor), and Land Use and Management (CP Factor), all supported by the use of Geographic Information Systems and Remote Sensing data, in addition to laboratory and field analyses. The equation aims to predict the level of erosion in units of [$t\ ha^{-1}\ year^{-1}$] that may occur in a particular area, seeking to promote the adoption of preventive and/or mitigating measures to keep the impacts of soil losses within tolerable limits. The spatialization of erosive features was based especially on fieldwork and laboratory analysis, such as the case of the urban gully in the municipality of Miguel Alves, Piauí. Rainfall erosivity (R Factor) requires the use of rainfall data, which can be obtained through continuous records from national and regional rainfall stations. Soil erodibility (K Factor) was determined based on studies in the area, especially focusing on soil classes. In addition to the K factor, analyses of erodibility based on slope and granulometry were conducted, considering soil texture, structure, bulk density, and pore space occupied by air. The collected samples were spatialized on the soil map of the area obtained from the INDE - National Spatial Data Infrastructure website. For the topographic factor (LS), a digital elevation model (DEM) combined with calculations using the Raster Calculator Tool in ArcGIS was used. The DEM used to cover the Parnaíba River basin was derived from SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) images with 30 m spatial resolution, available for free from the USGS (United States Geological Survey). For land use and land cover (CP Factor), in addition to field truth, Landsat satellite images from sensors 5 and 8 were used, covering a 15-year interval between 2006 and 2021. Therefore, the knowledge of annual soil loss and the identification and spatialization of erosive features in the area will correspond to an effort to understand the risk of soil erosion in the region influenced by this important water resource in the state of Piauí, the Parnaíba river, which may assist in the future development of proposals for management and territorial planning. The soil loss obtained by integrating natural physical factors with land use (anthropogenic action) ranged from low ($0 - 0.01\ t\ ha^{-1}.year^{-1}$) to extremely high ($>100\ t\ ha^{-1}.year^{-1}$). The areas of greatest soil loss were identified in regions of pasture, exposed soil, and cultivated land. This scenario is also associated with the physical characteristics of the location, which may present a natural potential for erosive processes. The results of soil erodibility showed that 60.66% of the basin is in the moderately erodible class, located in areas with slopes between 12-20% and hypsometry ranging from 90 to 120 meters. The main soils in the area are Oxisols (11.5%), Ultisols (41.51%), and Alfisols (7.65%). About 10 erosive features were identified, including the urban gully of Miguel Alves, which showed an expansion of approximately 21.85% between the years 2007 and 2017.

Keywords: Erosion, GIS, Parnaíba river, soil loss.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - A evolução da concepção do Geossistema, segundo o modelo inicial de Bertrand (1972) e o modelo GTP proposto em 2009 por Bertrand e Bertrand.
- Figura 2 - Feições erosivas relacionadas às paisagens na área de estudo
- Figura 3- Erosão laminar e área de deposição de sedimentos na área de estudo, local de retirada de material de construção, próximo à cidade de Miguel Alves.
- Figura 4. Erosão por ravina e voçoroca nas BDBP- Piauí
- Figura 5 - Métodos de determinação de perda de solos
- Figura 6 – Fluxograma da metodologia de pesquisa
- Figura 7 – Distribuição das estações pluviométricas.
- Figura 8 – Trabalho de campo na região das BDBP – PI, em um trecho ao lado da rodovia PI-112.
- Figura 9 - Etapas de análise de laboratório das amostras de solo coletadas na área de estudo
- Figura 10 – Unidade de Planejamento hídrico do Piauí
- Figura 11 – Localização do trecho das Bacias Difusas do Baixo Parnaíba – Piauí
- Figura 12 – Diferentes formas da paisagem encontradas na área de estudo
- Figura 13 – Mapa geológico da área de estudo
- Figura 14 – Mapa de geomorfologia da área de estudo
- Figura 15 – Mapa de declividade da área de estudo
- Figura 16 – Feições da paisagem encontradas na área de estudo
- Figura 17 – Mapas da distribuição anual de chuvas
- Figura 18 - Lagoas do Cajueiro e do Mutuns na seção norte da área de estudo
- Figura 19 – Trecho do rio Parnaíba no município de Teresina, entre os povoados Caiçara e São Domingos
- Figura 20 - Mapas das Sub-bacias difusas com altimetria e municípios da área de estudo
- Figura 21 – Mapa do uso e cobertura da terra relativo aos anos de 2006 e 2021
- Figura 22 – Mosaico comparativo de uso e cobertura da terra com destaque para as principais mudanças.
- Figura 23- Representação espacial dos Geoambientes
- Figura 24 - Mapa da Erosividade (fator R)
- Figura 25 - Espacialização do Fator *K*
- Figura 26 – Modelo Digital de Elevação do Piauí
- Figura 27 – Modelo Digital de Elevação da BBP – PI

- Figura 28 - Espacialização do fator topográfico (fator LS)
- Figura 29 – Espacialização do fator *CP* na área de estudo
- Figura 30 - Espacialização do potencial erosivo do solo nas BDBP – PI
- Figura 31 - Espacialização da erosão real em 2006 e 2021
- Figura 32 - Evolução do processo de voçorocamento na área das BDBP – PI
- Figura 33 - Erosão laminar observada em 2013 e 2022 na área de estudo
- Figura 34 – Mapa de solos das Bacias Difusas do Baixo Parnaíba – Piauí
- Figura 35 – Mapas de hipsometria e declividade das encostas
- Figura 36 – Mapa de suscetibilidade à erosão laminar da área de estudo
- Figura 37 – Mapa de espacialização dos pontos amostrais
- Figura 38 – Feições erosivas identificadas ao longo da área de estudo
- Figura 39 – Localização do Município de Miguel Alves e da voçoroca urbana
- Figura 40- Painel de imagens mostrando a evolução da voçoroca e urbanização no seu entorno, em Miguel Alves, entre 2007 e 2017.
- Figura 41 - Voçoroca em relação às torres de telecomunicação.
- Figura 42 - Rede de drenagem do município de Miguel Alves – PI.
- Figura 43 – Vista geral da voçoroca.
- Figura 44 – Área de expansão da voçoroca

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1. - Classificação dos solos em função do fator de erodibilidade do solo (K)

Tabela 2. - Recomendações da FAO, PNUMA e UNESCO (1994) quanto à classificação do grau de erosão do solo.

Tabela 3 – Distribuição das Classes de Declividade das BDBP – PI

Tabela 4 – Dinâmica do uso e cobertura da terra da área de estudo

Tabela 5- Interpretação da Erosividade (fator R).

Tabela 6- Classificação de solos em função do fator de erodibilidade do solo (K)

Tabela 7 – Distribuição do Fator *LS* nas BDBP- PI.

Tabela 8 – Relação da dinâmica do uso e cobertura com o fator *CP*

Tabela 9- Potencial erosivo do solo nas bacias difusas do Baixo Parnaíba, Piauí, Brasil.

Tabela 10– Erosão real do solo nas Bacias Difusas do Baixo Parnaíba – PI

Tabela 11 – Granulometria e densidade da área de estudo

Tabela 12 - Classes de erodibilidade dos solos para as bacias difusas do Baixo Parnaíba (PI).

Tabela 13- Dados de porosidade e densidade da voçoroca.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação causa x consequência dos processos erosivos

Quadro 2 – Etapas de investigação sobre erosão do solo

Quadro 3 – Classes de erodibilidade

Quadro 4 - Critério para divisão, por meio da relação erodibilidade x declividade

Quadro 5 – Escala geológica simplificada da Bacia Sedimentar do Parnaíba, das sub-bacias difusas da margem piauiense do Baixo Parnaíba.

Quadro 6 – Quadro síntese das Unidades Geoambientais das BDBP-PI

Sumário

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	18
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-CONCEITUAL	19
2.1 Análise geoambiental da paisagem como suporte à compreensão dos processos erosivos	19
2.2 Análise teórica dos processos erosivos e sua importância	23
2.3 Feições erosivas - voçorocas e as questões conceituais -metodológicas	29
2.4 Erosão dos solos e as ferramentas de mensuração	32
2.5 Reflexões sobre metodologias na temática erosão e perda de solo	35
2.5.1 Origens das Linhas e Abordagens dos métodos de determinação de perda de solos	40
CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS	47
3.1 Base de dados e metodologia da caracterização geoambiental da área de estudo.	49
3.2 Método indireto de determinação de perda de solos	52
3.2.1 O Modelo da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE)	52
3.2.2 Base de dados	53
3.2.3 Modelagem espacial da erosão do solo	54
3.2.4 Validação	55
3.2.5 Fator de erosividade da chuva (R)	56
3.2.6 Factor de erodibilidade do solo (K)	56
3.2.7 Fator topográfico (LS)	57
3.2.8 Uso e cobertura do solo, gestão das práticas conservacionistas Fator (CP)	58
3.2.9 Classificação e interpretação dos resultados	59
3.3 Erodibilidade dos solos das Bacias Difusas do Baixo Parnaíba - PI	60
3.3.1 Erodibilidade a partir da análise da declividade e classes do solo	60
3.3.2 Erodibilidade a partir da granulometria	61
3.4 Identificação e espacialização de pontos com feições erosivas	63
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS	64
4.1 Caracterização geoambiental das Bacias Difusas do Baixo Parnaíba -PI	64

4.2 Erosão Real e Potencial das Bacias Difusas do Baixo Parnaíba - PI	92
4.3 Análise da erodibilidade dos solos nas BDBP-PI	112
4.4 Identificação e espacialização de feições erosivas	122
4.5 Feição Erosiva da Voçoroca Urbana de Miguel Alves - PI	126
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	135
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A erosão do solo é um processo natural no qual o solo superficial é removido de sua localização original Jiang *et al.* (2023). A erosão acelerada do solo, encontrada em todo o mundo, é um problema ambiental relacionado ao uso da terra para práticas agrícolas e florestais e está ligada ao crescimento populacional. O problema dos incêndios florestais também é um fator agravante nesse contexto (Lal, 1998; Osterkamp *et al.*, 2012; Kastridis *et al.*, 2022). Segundo Borelli *et al.* (2017), a erosão do solo pode causar danos à perda de nutrientes, ao ciclo do carbono, à produtividade da terra e às condições socioeconômicas. Essas práticas de longo prazo, sem um manejo adequado, podem causar degradação ambiental e processos erosivos intensos (Pereira *et al.*, 2016; Santos; Guerra, 2021; Guerra *et al.*, 2020; Loureiro *et al.*, 2022)

A redução na porosidade do solo é uma das razões para os processos erosivos, diminuindo a capacidade de retenção e infiltração da água. Isso resulta em um aumento no escoamento superficial e transporte de sedimentos, levando ao assoreamento de corpos d'água. (Durães; Mello, 2016; Alves *et al.*, 2022; Jiang *et al.*, 2023).

Com os impactos naturais que podem ser intensificados por condições sociais, a erosão e degradação do solo, que são problemas globais, têm causado grandes transtornos ao Brasil. Os efeitos podem ser observados tanto em áreas urbanas quanto rurais, podendo causar impactos sociais, econômicos e ambientais, como a redução da qualidade da água e perda de fertilidade do solo, podendo também prejudicar a segurança alimentar. Portanto, a pesquisa relacionada aos solos e sua conservação para as gerações futuras está se tornando cada vez mais relevante (Guerra *et al.*, 2014, 2017; Loureiro *et al.*, 2022)

Do ponto de vista hidrográfico, o Brasil está localizado em uma região privilegiada, pois abriga uma alta quantidade de água doce: um total de 12% de todo o planeta segundo a Agência Nacional de Águas (2009). Ainda no contexto hidrográfico, outra importante característica é que pelo território brasileiro corre o maior de todos os rios, o rio Amazonas, eixo da maior bacia hidrográfica do mundo. O país conta ainda com outras grandes bacias, como a do São Francisco, Tocantins-Araguaia, Paraná e a do rio Parnaíba, de modo que a dimensão de todas elas contribui para a condição da disponibilidade de água além de influenciar nas dinâmicas da paisagem

Correspondendo a uma das regiões hidrográficas mais importante do Nordeste brasileiro, a bacia do rio Parnaíba abrange uma área de 331.441 km², contemplando os estados do Piauí, Maranhão e Ceará, onde cerca de 75% no Piauí, 20% no Maranhão e 5% no Ceará, entre as coordenadas 02° 21'S e 11°06'S de latitude e 47°21'W e 39°44'W de longitude (ANA,

2014). A bacia abrange 279 municípios com uma população de aproximadamente 5 milhões de habitantes. Logo, o rio Parnaíba e seus afluentes têm contribuído de forma decisiva no desenvolvimento econômico dos estados onde estão inseridos a partir do uso de seus recursos naturais (Codevasf, 2006; Abrel *et al.*, 2019).

Devido a sua grande extensão, a área selecionada para o desenvolvimento da pesquisa corresponde a seção do baixo curso da bacia hidrográfica do rio Parnaíba na faixa correspondente ao estado do Piauí, trecho das bacias difusas, que se estende desde a cidade de Teresina até a foz do rio, no oceano atlântico, no entanto, entendendo-se que a faixa costeira possui uma dinâmica diferente da faixa continental, optou-se por um novo recorte espacial, este abrangendo a área das bacias difusas no perímetro continental da bacia. (Brasil; MMA, 2006).

O interesse em estudar com as bacias difusas do Baixo Parnaíba (BDBP – PI) se deu por esta receber grandes quantidades de sedimentos produzidos no leito principal e nas áreas de contribuições dos afluentes dos cursos alto e médio, oriundos tanto da retirada inadequada da cobertura vegetal para ampliação de fronteiras agrícolas como do processo natural de assoreamento, tornando o solo vulnerável à erosão e, conseqüentemente, aumentando a produção de sedimentos que assoreiam o rio Parnaíba (Morais, 2015; 2020). Além disso, dentre os trechos desse rio, o baixo curso é o que apresenta a menor área, o que facilitou o recorte da área em um trecho adequado para pesquisa de campo em termos de recursos logísticos e financeiros.

Logo, a área em estudo apresenta uma elevada suscetibilidade à ocorrência de processos erosivos. Esta proposta de trabalho é importante para estimar a taxa anual de perda de solo e identificar feições erosivas. Para isso, utilizaremos o Sistema de Informação Geográfica (SIG), dados de sensoriamento remoto, trabalho de campo e análises laboratoriais. Esta hipótese é fundamentada em observações de campo realizadas em 2021 e em estudos anteriores, como os de Moraes (2015; 2017; 2020).

A estimativa da perda do solo e a análise da erosão na área corresponderá a um esforço para compreensão da dinâmica ambiental, com foco na erosão do solo, fenômeno que envolve vários fatores intensificadores, tais como: pluviosidade, tipo de solo, declividade, vegetação e presença ou ausência de medidas de conservação. Como consequência direta da erosão do solo, há o declínio da produtividade devido à perda de nutrientes, deterioração física, diminuição da espessura do solo podendo chegar em alguns casos à perda total de solos todos esses aspectos e fatores supracitados indicam a importância de estimar o potencial erosivo do solo desta área, o que pode contribuir na implantação de medidas preventivas e mitigadoras no planejamento e

gestão do território (Morgan, 1997; Guerra *et al.*, 2020; Luvai *et al.*, 2022; Guerra *et al.*, 2023; Barbosa *et al.*, 2024).

Partindo do entendimento de que a erodibilidade do solo é um dos principais fatores que influenciam na dinâmica dos processos erosivos, foram conduzidos ainda estudos direcionados para este fator em diferentes abordagens, tanto associados aos trabalhos de observação direta em campo, quanto a coleta de amostras de solo para análises laboratoriais, além da avaliação da erodibilidade a partir da declividade das encostas.

Todos esses fatores e variáveis foram analisados e discutidos no contexto da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) e, como estudo de caso, de identificação de feições erosivas observadas no campo e com auxílio do SIG, fez-se uma análise detalhada de uma voçoroca urbana encontrada na área de estudo, especificamente no entorno da área urbana do município de Miguel Alves (Barbosa *et al.*, 2021a; 2021b; 2024).

Dessa forma, o desenvolvimento da pesquisa teve como direcionamento os seguintes questionamentos: 1) Qual é a taxa anual de perda de solo na área das bacias difusas do Baixo Parnaíba (BDBP – PI), considerando a influência de fatores como a erosividade da chuva, erodibilidade dos solos e o fator topográfico? 2) Como a evolução do uso e cobertura do solo tem contribuído para a intensificação dos processos erosivos na região? 3) Quais são as principais feições erosivas identificadas na área de estudo, e qual é o impacto delas no ambiente local? 4) Que tipos de usos da terra têm contribuído para erosão em maior escala?

A estrutura da presente tese está organizada em cinco capítulos que abordam diferentes aspectos relacionados à análise multivariada e ao uso do Sistema de Informações Geográficas (SIG) na identificação e avaliação de áreas com risco de erosão dos solos nas Bacias Difusas do Baixo Parnaíba, Piauí. O Capítulo 1, Introdução, apresenta a contextualização do problema, enquanto o Capítulo 2, Fundamentação Teórico-Conceitual, oferece uma base sólida para compreensão dos processos erosivos, incluindo a análise geoambiental da paisagem e a discussão sobre feições erosivas do tipo voçorocas. Este capítulo também discute ferramentas de mensuração e metodologias na temática da erosão.

No Capítulo 3, Material e Métodos, a tese detalha a base de dados, metodologias de caracterização geoambiental e a aplicação do Modelo da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) para determinar a perda de solo. A espacialização da erosão do solo, validação dos resultados e análises específicas sobre erodibilidade dos solos também são abordadas.

O Capítulo 4, apresenta os resultados da caracterização geoambiental das Bacias Difusas do Baixo Parnaíba, a análise da erosão real e potencial, a erodibilidade dos solos, e a

identificação e espacialização de feições erosivas, incluindo uma análise específica da voçoroca urbana de Miguel Alves, Piauí. Por fim, o Capítulo 5, Conclusões, sintetiza os principais resultados obtidos e suas implicações, encerrando a tese de forma conclusiva e destacando as contribuições para o conhecimento acadêmico e para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas para o uso sustentável do solo na região estudada.

1.1 Objetivos

a) Objetivo Geral

Estimar a erosão real e potencial nas bacias difusas do Baixo Parnaíba - Piauí, considerando os fatores da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) e a erodibilidade do solo, bem como identificar e espacializar feições erosivas na área de estudo.

b) Objetivos Específicos

1. Caracterizar a área de estudo, incluindo análise dos fatores fisiográficos para melhor compreensão do contexto ambiental e sua influência nos processos erosivos.
2. Utilizar o modelo RUSLE para estimar a erosão real e potencial na área das bacias difusas do Baixo Parnaíba.
3. Analisar a erodibilidade do solo a partir da avaliação de amostras de solo e com base na declividade da área.
4. Identificar e espacializar feições erosivas ao longo da área de estudo.
5. Analisar a evolução de uma voçoroca urbana encontrada no município de Miguel Alves.

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO - CONCEITUAL

2.1 Análise geoambiental da paisagem como suporte à compreensão dos processos

erosivos

A análise geoambiental e fisiográfica desempenha um papel fundamental na compreensão dos processos erosivos que afetam o ambiente. Através da análise das características físicas, climáticas, geológicas e geomorfológicas de uma determinada área, é possível identificar os fatores que influenciam a erosão do solo e a formação de voçorocas. Além disso, a análise fisiográfica permite a identificação de feições do relevo e padrões de drenagem que podem indicar áreas mais susceptíveis à erosão (Silva, 2008; Mattos; Paula, 2017; Guerra *et al.*, 2020; Barbosa; Valladares, 2022; Rodrigues *et al.*, 2024).

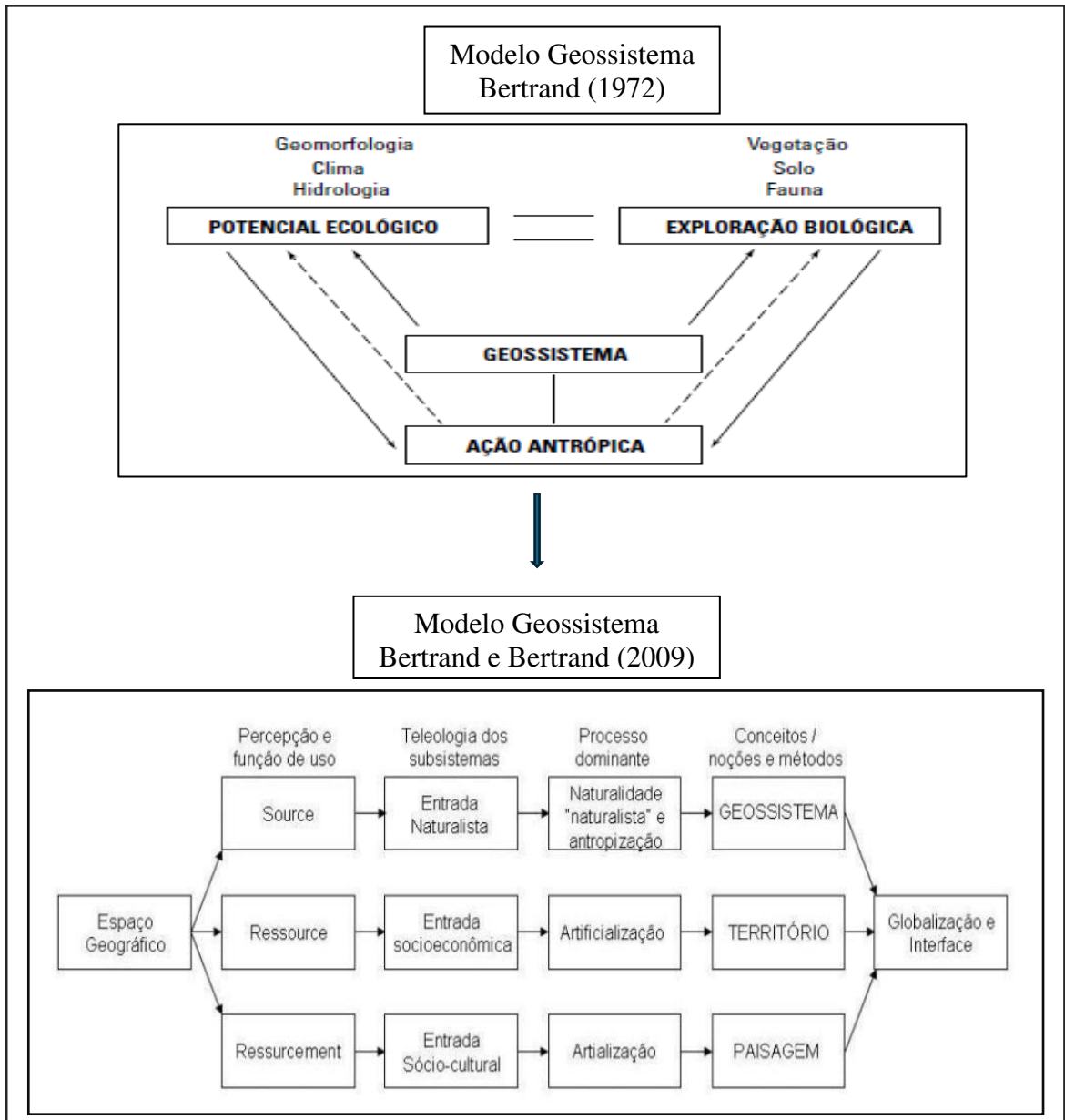
Compreender esses aspectos é essencial para o desenvolvimento de estratégias de manejo e conservação do solo, visando mitigar os impactos negativos da erosão e promover a sustentabilidade ambiental. O levantamento de fatores fisiográficos assim como a relação deles entre si, compõe uma importante ferramenta nos estudos ambientais, sobretudo nos temas ligados ao detalhamento dos atributos de clima, geologia, hidrografia, geomorfologia, solos e do uso e cobertura da terra. Esses elementos, quando associados e analisados de forma integrada, tornam-se componentes essenciais no diagnóstico de áreas com risco de erosão e na gestão dos recursos naturais (Cândido, 2013; Mattos; Paula, 2017; Guerra; Jorge, 2017; Rahmati *et al.*, 2017; Lira; Loureiro *et al.*, 2022; Farias *et al.*, 2022; Barbosa; Valladares, 2022).

Tendo em vista que o espaço geográfico está em constante modificação, monitoramentos da paisagem tornam-se importantes na busca por uma relação de equilíbrio entre o homem e a natureza. Bertrand (1972) considerou que a paisagem seria o resultado da combinação dinâmica de elementos físicos, biológicos e antrópicos que, ao interagirem, fazem dela um conjunto único e intrínseco, em constante evolução.

Mas, Bertrand e Bertrand (2009), apresentam outra análise desse modelo baseada na integração dessas categorias a partir da paisagem, esse modelo tem sido amplamente aplicado, mas permanecendo sua denominação como geossistema (Figura 1).

numa visão mais amadurecida, centrada noutra dimensão ambiental da paisagem, resultou numa segunda versão dessa teoria: o Modelo GTP (Geossistema-Território-Paisagem), que procura entender como as sociedades constroem sucessivas paisagens para viver, trabalhar e sonhar (Passos, 2016, p.2).

Figura 1 – A evolução da concepção do Geossistema, segundo o modelo inicial de Bertrand (1972) e o modelo GTP proposto em 2009 por Bertrand e Bertrand.



Fonte: Organizado por Barbosa e Lima (2024) baseado em Passos (2016)

Como é possível observar na Figura 1, no segundo momento da concepção do modelo teórico/metodológico, o geossistema, com esta designação, passa a corresponder a apenas uma das três categorias de análise, e não o todo, porém ele continua nomeando igualmente os dois modelos, como se o segundo permanecesse com a mesma concepção do modelo inicial proposto por Bertrand em 1972.

Ao se tratar de Unidades de Paisagem, Ross (1992) esclarece a possibilidade de se trabalhar com a individualização destas unidades a partir da composição do relevo, clima, cobertura vegetal, solos, tipo de litologia ou pelo arranjo estrutural, podendo ser também considerado apenas um desses elementos. Neste caso, não é adotada a concepção de paisagem com base no geossistema, pois a análise só leva em consideração os elementos naturais da paisagem. Já Guerra e Cunha (1994), adotando a concepção geossistêmica, destacam que essas unidades apresentam limites e delimitações complexas, uma vez que essas unidades naturais podem se modificar e transformar em decorrência dos tipos de ocupação (Guerra; Cunha, 1994; Loureiro; Guerra, 2022; Barbosa; Valladares, 2022; Rodrigues *et al.*, 2024).

Esse tipo de análise, quando integrada aos estudos setoriais, atributos físicos, econômicos e sociais de determinado espaço, possibilita diagnosticar em diferentes escalas a ocorrência de impactos ambientais. Possibilita ainda, a avaliação de recursos naturais, reconhecimento de áreas de risco geoambientais e áreas vulneráveis à ocorrência de eventos naturais que podem resultar em quadros de impactos catastróficos (Amorim; Oliveira, 2008; Cordeiro *et al.*, 2017; Mattos; Paula, 2017; Barbosa; Valladares, 2022).

Estudos que consideram análises geossistêmicas são amplamente adotadas em pesquisas integradas no Brasil, esses estudos consistem nas relações mútuas entre os componentes do potencial ecológico e da exploração biológica e destes com a ação antrópica. Esses estudos têm contribuído fortemente para o entendimento das dinâmicas ambientais, muitas dessas pesquisas envolve a separação da área em unidades geoambientais ou geossistêmicas diferentes com base em fatores únicos ou em outros critérios, isso para facilitar o entendimento da localização desses atributos no contexto geográfico e permitir de forma mais eficiente a integração e sua análise (Silva, 2004; Trentin, 2005; Morais, 2013; Passos, 2016; Cordeiro *et al.*, 2017; Hemenda, 2021; Barbosa; Valladares, 2022).

Observa-se que a investigação detalhada dos processos erosivos em diferentes escalas temporais e espaciais estão diretamente relacionadas com aspectos físicos da natureza. Ao examinar as características do terreno, como declividade das encostas, tipo de solo, cobertura vegetal e padrões de uso da terra, é possível identificar os mecanismos e as áreas mais suscetíveis à erosão hídrica, eólica e gravitacional. Na Figura 2 observa-se diferentes feições erosivas relacionadas a paisagem das Bacias Difusas do Baixo Parnaíba.

Figura 2 – Feições Erosivas relacionadas às paisagens na área de estudo



Legenda: (A): Pequena escarpa com presença de ravinamento, contendo materiais como estacas de madeira usadas para construções locais na zona rural de União - Piauí. (B): Nível de base da voçoroca localizado em Miguel Alves-Piauí, cujo fluxo de água e sedimentos desagua na planície do rio Parnaíba. (C): Margem da Rodovia 112, com erosão causada pela retirada da vegetação local, área com deposição de sedimentos e processo de ravinamento em escarpas de baixo declive.

Fonte: Barbosa (2021)

Essa abordagem holística é essencial para compreender a complexidade dos processos erosivos, que podem ser influenciados por uma variedade de fatores naturais e antrópicos. Ao integrar dados fisiográficos com modelos de previsão de erosão, torna-se possível diagnosticar os problemas existentes, antecipar e mitigar os impactos futuros da erosão.

Em nível internacional esse tipo de pesquisas também vem sendo desenvolvida, elas buscam sobretudo a análise de características ambientais para prevenir riscos que envolvem erosão e degradação do solo, mineração e até mesmo monumentos subterrâneos. Grande parte dessas pesquisas envolve o uso do Sistema de Informação Geográfica – SIG, que tem auxiliado pesquisadores na espacialização e mensuração dos atributos físicos da paisagem (Rahmati *et al.*, 2017; Souto *et al.*, 2006; Sun *et al.*, 2017; Hemenda, 2021)

2.2 Análise teórica dos processos erosivos e sua importância

Ao tratar de processos erosivos, o conceito de erosão se torna de grande importância no entendimento dessa questão, autores como Martini *et al.* (2006), Guerra *et al.* (2017) e Boardman e Evans (2020) discutem a erosão do solo em diferentes contextos. A erosão é um processo natural que resulta no transporte de sedimentos principalmente pela ação de fluidos como água e vento. É importante diferenciar este processo dos movimentos de massa, que são causados diretamente pela força da gravidade sobre os materiais da encosta. Essa dinâmica é muitas vezes acelerada por atividades antrópicas. Ela é acionada por ventos e chuvas, e a magnitude do processo é diretamente influenciada por fatores de solo, relevo e cobertura vegetal.

Outro conceito imprescindível nessa discussão é sobre o solo. No que tange a qualidade ambiental os solos são de fundamental importância e beneficiam a humanidade através de diversos serviços ambientais, sendo um recurso fundamental para a produção de alimentos, regulação do ciclo hidrológico, dentre outros (Palm *et al.*, 2007; Raij, 2011; Prevedello *et al.*, 2013; Boardman; Evans, 2020; Guerra; Jorge, 2021; Favis-Mortlock *et al.*, 2022).

As atividades antrópicas, cada vez mais em contato com os solos resultam em alterações desse componente, sobretudo em relação as suas proporções ligadas a estrutura e composição química, exercendo forte pressão nas áreas florestais e em áreas de ecossistemas não florestais como, por exemplo, os campos. Este processo está relacionado ao processo de degradação dos solos, uma vez que a cobertura vegetal atua como uma proteção, amortecendo e interceptando a água da chuva e preservando a sua estrutura, controlando dessa forma os processos erosivos (Oliveira *et al.*, 2010; Stefanoski *et al.*, 2013; Guerra; Jorge, 2021).

A importância do estudo dos processos erosivos está relacionada com a associação de diversos fatores, dos quais destaca-se a topografia do terreno, fatores climáticos, uso e manejo do solo, textura e sua erodibilidade intrínseca. O entendimento da dinâmica desses fatores pode ser decisivo no diagnóstico de áreas com risco de erosão, essas podem gerar implicações às terras agricultáveis, ocasiona transporte de sedimentos aos corpos hídricos, com consequências adversas como decréscimo da qualidade das águas e assoreamento de rios e reservatórios.

O uso de técnicas de geoprocessamento, associadas aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), vêm ganhando cada vez mais espaço no cenário atual, pois é consenso que essas técnicas vem sendo uma importante ferramenta de avaliação e monitoramento dos processos erosivos (Mello *et al.*, 2006; Sales *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2016; Loureiro *et al.*, 2022).

Vários estudos vêm sendo desenvolvidos incorporando essas técnicas como auxílio na determinação do fator relacionados aos processos erosivos como é o caso da erodibilidade dos solos de diferentes regiões, tais como o trabalho de Souza e Galvani (2017) que, para determinar o fator de erodibilidade em solos conhecido como fator K na Equação Universal de Perda de Solos, determinaram o potencial natural à erosão na bacia do rio Jacaré Guaçu no estado de São Paulo, Brasil, onde utilizaram técnicas de geoprocessamento desenvolvidas em SIG, enquanto que, Arghiuş e Arghiuş (2011) estimaram a taxa anual de erosão superficial do solo nas cordilheiras de Codrului e Piemonte na Romênia utilizando técnicas de SIG para representação espacial, utilizando o modelo de erosão de solo da Romênia, outro exemplo é o de Tang *et al.* (2015), utilizaram a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) associada ao emprego de SIG para estimar a perda do solo e sua distribuição espacial da bacia hidrográfica de Yangou na China.

Em decorrência dos efeitos na superfície, em geral a erosão do solo é chamada de laminar, em ravinas ou em voçorocas, formadas em decorrência do arraste de partículas em taxas variáveis, mas com efeitos duradouros sobre a paisagem, atuando na alteração do relevo e dos continentes, como no caso da erosão geológica, podendo atingir taxas de transporte muito acentuadas em áreas agrícolas ou zonas urbanas com intensa mobilização de solos (Martini *et al.*, 2006; Jorge; Guerra, 2013; Thomaz, 2019; Guerra *et al.*, 2020; Guerra *et al.*, 2023; Barbosa *et al.*, 2021).

Nas discussões que envolvem erosão dos solos, é importante que se tenha uma preocupação em incluir os elementos sociais, políticos e econômicos, nos estudos de degradação e conservação de solos, devido a atividade humana ser um agente acelerador dos processos erosivos, transformando os ambientes, gerando e agravando os problemas ambientais atuais. Nesse sentido, para entender a erosão é importante um olhar atento a dinâmica dos processos erosivos e isso remete a compreensão do momento em que as gotas de chuva começam a bater nos solos, fator que dá início ao *splash*, que pode ser o evento causador de rupturas dos agregados, selando o topo do solo (Guerra, 2014; Guerra *et al.*, 2017; Thomas, 2019; Guerra *et al.*, 2020; Favis-Mortlock, 2020; Boardman, 2021; Guerra; Jorge, 2021).

O planejamento ambiental é de suma importância para o equilíbrio dos fatores sociais e ambientais que envolvem a erosão dos solos, tanto em áreas urbanas, como rurais, sendo um dos fatores determinantes no surgimento e evolução de processos erosivos (Guerra; Jorge, 2021). Segundo Guerra (2018) o entendimento de processos complexos requer a análises relativas à infiltração, armazenamento e geração de *runoff*, origem e evolução do escoamento superficial e subsuperficial, assim como o processo de *splash* e a formação de crostas na

superfície de solos, a compreensão desses processos de forma isolada e em interação um com os outros é que auxilia no entendimento dos processos erosivos básicos.

Com os impactos naturais que podem ser intensificados pelas condições sociais, a erosão e degradação do solo que são problemas mundiais, vem causando grandes transtorno ao Brasil, os efeitos podem ser observados tanto em zonas urbanas como rurais, podendo provocar impactos socio-econômicos, logo, pesquisas relacionadas a solos e sua conservação para gerações futuras são cada vez mais pertinentes (Fullen; Catt, 2004; Morgan, 2005; Goudie; Boardman, 2010; Guerra, *et al.*, 2017; Guerra *et al.*, 2020; Jorge; Guerra, 2020).

Entender os processos geomorfológicos ajuda na compreensão dos processos erosivos, Goudie (2019), afirma que desde a década de 1960, a geomorfologia vem sofrendo uma espécie de Revolução Quantitativa, com variados estudos sobre os processos, o que leva a aglomeração de dados sobre taxas dos processos, permitindo a comparação entre diferentes ambientes, sendo eles antrópicos ou não, além do papel das mudanças no uso e cobertura da terra, que afetam diretamente esses processos.

De acordo com Lima *et al.* (2021), investigações que envolvem a delimitação de unidades de paisagem são importantes na identificação de pontos com tendencia a riscos e desastres. Esse tipo de análise possibilita a identificação e espacialização de pontos com riscos socioecológicos do tipo físico que, em geral, estão associados a fatores geomorfológicos como deslizamentos e inundações.

Logo, nesses processos geomorfológicos, as ações antrópicas têm papel crucial na erosão dos solos e nos eventos de degradação da terra, como os movimento de massas. Esses eventos apresentam diferentes formas de ocorrência e diversas feições morfológicas, que permitem diferentes formas de monitoramento, entretanto, a melhor forma de evitar tais eventos de degradação dos solos é a ação preventiva, o que exige o entendimento dos riscos de erosão e/ou de movimentos de massas. (Fullen; Catt, 2004; Morgan, 2005; Goudie; Boardman, 2010; Guerra *et al.*, 2015; Guerra *et al.*, 2017; Goudie, 2019; Favis-Mortlock, 2020; Boardman, 2021; Lima *et al.*, 2021).

De acordo com Silva *et al.* (2017), os danos nas encostas é um bom exemplo de exploração de recursos naturais que pode ser proveniente de processos erosivos provocados por várias formas de uso que os seres humanos têm dado a elas, para os autores, os solos, que são a parte mais externa do relevo, acumulam toda vulnerabilidade de danos, em função dos riscos relacionados à sua utilização, como exemplo nas relações entre as encostas e as calhas fluviais.

Nesse contexto, a erosão é entendida como o processo de desagregação e remoção de partículas do solo ou fragmentos de rocha pela ação combinada da gravidade com a água, vento,

gelo ou organismos, ela age continuamente sobre a superfície terrestre, sendo a erosão um dos principais agentes exógenos modeladores do relevo (Jorge; Guerra, 2013; Guerra, 2014; 2018; Boardman; Evans, 2020, Loureiro *et al.*, 2022)

Segundo Boardman (2021) por ser o principal meio de produção de alimentos, o solo tem grande valor para o agricultor e para a sociedade, no entanto a erosão do solo e eventos como movimentos de massa, impactam essas funções tanto em curto como em longo prazo, o que acarreta custos para o agricultor e para a sociedade em geral. Segundo o autor, alagamentos de propriedades, sedimentação e poluição de cursos d'água e reservatórios estão entre os maiores custos e continuaram aumentando com as mudanças climáticas e o uso da terra inadequado, é preciso ações preventivas e mitigadoras que, para o autor, custarão bem menos do que reparar os danos causados pela erosão dos solos.

Logo, observa-se que os processos erosivos se devem a uma série de fatores, desde os materiais, como também condições climáticas, intempéricas, declividade do terreno, entre outras condições topográficas e geomorfológicas, é possível constatar ainda que são necessários mais estudos destinados aos processos erosivos no Brasil, onde população urbana e meio ambiente estão convivendo cada vez mais próximos, atuando assim de diferentes formas nos solos, podendo gerar riscos a natureza e ao homem. Todos estes fatores somados a uma região caracterizada por uma estação tropical com regime pluvial de muito volume em um curto período de tempo, favorecem ainda mais os processos erosivos **laminares e lineares** (Jorge; Guerra, 2013; Guerra, 2014; Guerra *et al.*, 2017; Boardman; Evans, 2020; Barbosa *et al.*, 2024).

Os processos erosivos laminares, ocorrem em decorrência do escoamento superficial de forma homogênea e logo após o início das chuvas, o excesso de água no solo, aumenta em espessura progressivamente formando uma lâmina fina do topo à base da encosta com velocidade suficiente para causar erosão (Fullen; Catt, 2004; Morgan, 2005; Poesen, 2011; Ayres, 1993 *apud* Rotta, 2012; Guerra; Jorge, 2013; Guerra *et al.*, 2014; Tomaz, 2019; Favis-Mortilock *et al.*, 2022).

O processo se caracteriza por remover finas camadas de solo a cada evento chuvoso, isso torna a erosão laminar de difícil percepção, logo, devido à dificuldade no diagnóstico este tipo de processo é considerado grave e prejudicial, pois a partir dele inicia-se os processos erosivos lineares (Jorge; Guerra, 2013; Michette, 2015; Guerra, 2014; Guerra *et al.*, 2017). Na Figura 3 é possível observar alguns exemplos de erosão na área de estudo.

Figura 3- Erosão laminar e área de deposição de sedimentos na área de estudo, local de retirada de material de construção, próximo à cidade de Miguel Alves.



Fonte: Barbosa (2021)

Já o processo de erosão linear se caracteriza pela concentração de linhas de fluxo das águas do escoamento superficial classificadas como ravinas e voçorocas sendo que estas podem alcançar o nível do lençol freático (Jorge; Guerra, 2013; Guerra, 2014; Michette, 2015; Guerra *et al.*, 2017; Guerra; Jorge, 2021). A erosão por sulco segundo Fournier (1960) *in* Araujo (2011), ocorre com um pequeno corte no solo com profundidade e largura inferior a 0,5m, é caracterizada como o arrastamento de partículas do solo pela água, perpendicular às chuvas de nível, esse processo resulta em filetes sobre a superfície.

Para Boardman e Favis-Mortlock (2014) existe um período em que o solo sem proteção adequada, representa uma “*window of opportunity*” (janela de oportunidade) para erosão, esse período está relacionado com: o momento, quantidade e intensidade da chuva, data de início e duração da “*window of opportunity*” e do solo e as características morfológicas do local.

O processo de ravinamento ocorre de forma mais intensa que os sulcos, são considerados de grande porte, podem atingir largura e profundidade superiores a 0,5m, é uma dinâmica que ocorre quando às águas do escoamento superficial se concentram em determinados locais

formando assim canais, nesse processo a água escava o solo de podendo atingir a rocha em estágios mais avançados (Fournier, 1960 *apud* Araujo, 2011; Jorge; Guerra, 2013; Guerra, 2014; Michette, 2015; Boardman; Favis-Mortlock; 2016; Guerra *et al.*, 2017).

As voçorocas constituem os processos erosivos mais agressivos, são erosões de grande porte podendo chegar ao nível freático, são maiores em largura e profundidade, se comparadas aos sulcos e ravinas; as técnicas de recuperação delas são caras e muitas vezes complexas, as voçorocas podem gerar diversas perdas tanto ambientais quanto econômicas (Guerra, 2018; Guerra *et al.*, 2020; Filho; Vieira, 2020; Ionita *et al.*, 2021; Guerra *et al.*, 2023). A figura 4 mostra exemplos de ravina e voçoroca na área em estudo.

Figura 4. Erosão por ravina e voçoroca nas BDBP- Piauí



Legenda: (A) Voçoroca na região periférica de Miguel Alves - Piauí, (B) Ravina no entorno da cidade de União – Piauí.

Fonte: Barbosa (2021)

Ainda tratando de voçorocas, estas feições são na verdade evoluções de ravinas profundas, que podem se desenvolver tanto em sedimento como em solos, taludes naturais ou artificiais e que se instalam em terrenos de baixa declividade, se desenvolvem através do escoamento superficial das águas ou através da associação com a erosão subsuperficial, podendo existir outras possibilidades de formações (Boardman; Favis-Mortlock, 2014; Guerra, 2016; Loureiro *et al.*, 2020; Guerra; Jorge, 2021; Guerra *et al.*, 2023).

Nesse contexto, Jorge e Guerra (2013) enfatizam os tipos de problemas que podem ocorrer devido à falta de estudo e monitoramento em áreas com risco de erosão, como a

diminuição da quantidade de nutrientes no topo do solo, assoreamento e poluição dos lugares em que os sedimentos se depositam, em especial quando está relacionado a reservatórios, rios, lagos e açudes. O Quadro 1, demonstra exemplos de problemas resultantes dos processos erosivos associados as suas principais causas.

Quadro 1 – Relação causa *versus* consequência dos processos erosivos

CAUSAS DOS PROCESSOS EROSIVOS	CONSEQUÊNCIAS ASSOCIADAS
Chuvas de variadas intensidades	Remoção dos nutrientes
Desmatamento	Redução da penetração das raízes e do armazenamento de água
Agricultura e pecuária, sobretudo em encostas de elevada declividade	Fragilidade do solo
Trilhas abertas por animais e por homens	Aumento do assoreamento de rios, lagos, reservatórios e açudes
Construção de rodovias e moradias sem cuidados especiais	Enchentes, desmoronamentos, movimento de massas
Mineração e outras atividades econômicas	Poluição de corpos líquidos

Fonte: Org. BARBOSA (2020) baseado em Jorge e Guerra (2013) e Wild (1993)

Observou-se que as implicações dos processos erosivos podem ser intensificadas pela ação humana. Conforme discutido, há uma conexão entre diferentes tipos de erosão. Guerra (2014) enfatiza a importância de entender como, onde e por que as feições erosivas se formam. Esse conhecimento é essencial para implementar medidas que evitem o surgimento de ravinas e, conseqüentemente, reduzam o risco de formação de voçorocas, processos que estão inter-relacionados

Um outro ponto relevante no estudo dos processos erosivos é a identificação dos estágios de evolução, uma vez que essa conexão pode desencadear erosão linear, logo o entendimento do início do processo pode ser decisivo na tomada de medidas no sentido de evitar o estabelecimento de feições erosivas (Loureiro, 2013; Guerra, 2014; Guerra, 2018; Rangel *et al.*, 2019; Filho; Vieira, 2020; Loureiro *et al.*, 2020; Favis-Mortilock *et al.*, 2022; Guerra *et al.*, 2023).

2.3 Feições erosivas, voçorocas e as questões conceituais e metodológicas

Analisar feições erosivas do tipo voçoroca requer bastante atenção conceitual, pois alguns autores divergem em suas interpretações, sobretudo em termos dimensionais. Imeson e

Kwaad (1980) relatam que voçorocas são feições erosivas com profundidade e largura superiores a 100cm. Já Foster (1982) e Bergsma *et al.* (1996) diferenciaram ravina e voçoroca pela profundidade e largura, situando a voçoroca como uma feição superior a 30cm de largura e profundidade. Essas diferenças nas definições destacam a complexidade do estudo das voçorocas e a necessidade de uma compreensão abrangente das várias perspectivas. Reconhecer essas variações é fundamental para uma análise mais completa e permite que os pesquisadores escolham a definição que melhor se adapta aos objetivos específicos de seus estudos. Portanto, é importante considerar o contexto e os critérios de cada autor ao analisar e comparar os processos erosivos.

A conceituação utilizada pela *Soil Science Society of America* – SSSA (1987), adotada por um conjunto de estudos desenvolvidos no Brasil, determina o termo voçoroca como um canal resultante de erosão proveniente de fluxos de água concentrados, intermitentes e relacionados com a água da chuva, podendo esse tipo de processo erosivo interferir em processos normais de cultivo.

De acordo com Oliveira (2012) a maior aceitação entre os pesquisadores nacionais brasileiros é a padronização com a literatura internacional, o que facilita a comunicação e interação entre as partes, optando-se assim por classificar voçorocas como feição erosiva com largura e profundidade superiores a 50 cm. É importante destacar que alguns autores somente consideram voçorocas quando essa feição erosiva atinge o lençol freático.

O que se observa é de fato uma dificuldade em estabelecer critérios dimensionais rígidos de diferenciação entre ravinas e voçorocas, de acordo com Poesen *et al.* (2003), a voçoroca é uma feição com uma área mínima de 1m², não estabelecendo largura e profundidade mínima.

Para Guerra (2018) apesar desses valores propostos com natureza “universal”, uma possível melhor solução seria o estabelecimento de valores para cada região, em especial, para voçorocas oriundas da expansão de ravinas.

Segundo Oliveira (2012), diferentes escalas, tais como espaciais e temporais, podem influenciar de diferentes formas a erosão por voçoroca, essas influências podem ser causadas por vários mecanismos, podendo ser entendidas por: deslocamentos de partículas, transporte por escoamento superficial difuso, transporte por fluxos concentrados, erosão por quedas d'água, solapamentos, liquefação, movimentos de massa e arraste de partículas.

De acordo com Bezerra *et al.* (2012) a dinâmica interna da água no solo também é um importante parâmetro para o entendimento dos processos erosivos em feições do tipo voçorocas, pois ela pode revelar a relação de diversos fatores que controlam o componente hídrico, como o clima, propriedades físicas do solo, tensão, sistema radicular da vegetação,

macro e micro fauna e uso do solo, influenciando a umidade do solo que está diretamente ligado ao seu potencial matricial, quanto mais úmido o solo, maior será o seu potencial.

Com o potencial matricial pode-se também determinar o grau de saturação da água no solo. Quanto maior a saturação, menor será a capacidade da água em se infiltrar e mais rápida será a geração do escoamento superficial. (Bezerra *et al.*, 2012)

No contexto da dinâmica de voçorocas é importante entender também o papel dos sedimentos provindos da erosão em espaços temporais de limites variáveis, segundo Ramalho e Guerra (2014) estudar essa relação é relevante por envolver a prática da coleta de amostras em áreas do relevo, onde interagem processos e mecanismos naturais e antrópicos, visando a avaliar a relação entre erosão e deposição.

A erosão por voçorocamento tem sido reconhecida como uma das principais formas de degradação do solo que, em muitos casos, está relacionada ao uso inadequado da terra, desde o início do século XX é perceptível o número cada vez mais crescente de estudos que tem trabalhado a erosão em voçorocas, seja destacando sua importância, os fatores controladores, os processos geomorfológicos associados, os impactos ambientais e mais recentemente o monitoramento e reabilitações (Fullen; Catt, 2004; Morgan, 2005; Poesen, 2011; Castillo; Gómez, 2016; Goudie, 2019; Loureiro *et al.*, 2020; Favis-Mortlock *et al.*, 2020; Ionita *et al.*, 2021; Guerra *et al.*, 2023).

De acordo com Favis – Mortlock *et al.* (2022), apesar da simples descida mais íngreme e o galgamento permitirem um satisfatório quadro das rotas de fluxo da água, tão importantes para entender o nível de agravamento de ambientes com processos erosivos ativos como as voçorocas, uma representação mais explícita das interações “*landscape elements*” (LEs) seja necessário para captura adequada da dinâmica do escoamento campo - rio e transporte de sedimentos, que segundo o autor pode ser feito por meio de modelos de erosão em escala de captação.

Ionita *et al.* (2021), em estudo sobre a erosão das ravinas no Planalto da Moldávia, no leste da Romênia, indica esse fenômeno como uma grande ameaça ambiental, e destaca a existência de dois grandes grupos, como sistema de ravinas, que são: (1) voçorocas descontínuas, localizadas principalmente nas encostas e (2) voçorocas grandes e contínuas no fundo de vales, os autores enfatizam o fato de haver poucos estudos investigativos sobre evolução de ravinas contínuas a médio e longo prazo.

O Laboratório de Geomorfologia Ambiental e Degradação de Solos da UFRJ tem desenvolvido estudos sobre monitoramento de processos erosivos, principalmente das voçorocas desde o início da década de 1990. Isso tem sido feito com uso de estações

experimentais e estacas para identificação dos avanços dessas feições, como exemplo, o trabalho desenvolvido por Loureiro (2013), no município de Macaé (RJ).

O uso de equipamentos mais modernos para o monitoramento das voçorocas também vem crescendo, como o uso de drones e Laser scanner terrestre como os usados por Garritano *et al.*, (2019) e Loureiro *et al.*, (2020) no estado do Rio de Janeiro, onde a precisão se torna maior e o tempo de monitoramento, menor.

2.4 Erosão dos Solos e as Ferramentas de mensuração

Há décadas estudos de processos erosivos vêm sendo feitos tendo um esforço de entendimento dessa questão em todo o mundo. A preocupação com problemas ambientais fortaleceu os estudos relacionados a problemas com erosão do solo, tanto em países desenvolvidos como naqueles em desenvolvimento. Com isso, o Programa das Nações Unidas para Meio Ambiente (PNUMA) criou um projeto denominado *Global Assessment of Soil Degradation* (GLASOD), cuja tradução seria – Acesso Global da Degradação dos Solos (Fullen; Catt, 2004; Guerra, 2005)

O GLASOD tem beneficiado os estudos sobre degradação e erosão do solo, incentivando e auxiliando pesquisadores no avanço desse tipo de temática. Sendo coordenado principalmente pela Universidade de Wageningen, na Holanda, o projeto resultou, em 1990, numa publicação intitulada “Mapa Mundial do Status de Indução Humana da Degradação dos Solos”. O GLASOD fez ainda uma estimativa sobre a perda anual de solo agrícola por erosão, gerando um dado que corresponde entre 6 e 7 milhões de hectares, demonstrando o nível de prejuízos ambientais que podem causar esse fenômeno. Assim sendo, vários pesquisadores têm utilizado o Potencial Natural de Erosão, definidos a partir dos parâmetros físicos da EUPS (*R*, *K* e *LS* – que serão detalhados na seção seguinte), para estimar as perdas de solos (Carvalho *et al.*, 2010; Demarchi, 2012; Moraes; Sales, 2017; Zerihun *et al.*, 2018; Falcão *et al.*, 2020; Egbueri *et al.*, 2022).

Segundo Oliveira *et al.* (2015), o Potencial Natural de Erosão corresponde às perdas de solo em áreas sem cobertura vegetal e sem qualquer intervenção antrópica. Fiorense *et al.*, (2021) em estudo sobre o Potencial Natural de Erosão na sub-bacia hidrográfica do córrego da Vista Alegre (BHCVA), localizada no município de Muniz Freire, estado do Espírito Santo, identificou uma tendência natural à erosão em quase a metade de sua área, devido, principalmente, às irregularidades topográficas locais. Moraes e Sales (2017) em trabalho feito na Bacia hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí - Brasil, também identificou o fator topográfico

como principal desencadeador de processos erosivos frente a condição de excessiva Erosividade das chuvas na área.

A erosão pode ser conceituada como um evento de ocorrência natural que condiciona a formação das estruturas do relevo da superfície da Terra, no entanto, segundo Guerra (1978), o processo erosivo deve ser encarado como um processo de remoção acelerada da camada superficial do solo, destacando ainda que a erosão pode ser considerada como a destruição das saliências ou reentrâncias do relevo tendendo a um nivelamento.

Já para Galetti (1982), a erosão é um processo que pode ser definido como a desagregação, transporte e deposição do solo, subsolo e rochas em decomposição pelas águas, ventos ou geleiras, destacando assim a importância dos sistemas hídricos nesse fenômeno. Entretanto, Bertoni & Lombardi Neto (1999) tratam o conceito de erosão de forma mais objetiva, determinando o processo erosivo como o processo de desagregação, transporte e deposição de partículas componentes do solo causados pela ação da água ou pelo vento, iniciando na remoção da cobertura vegetal pelo homem para cultivar o solo. A erosão ocorrendo de forma natural é classificada como gradual e lenta, tendendo o solo a uma condição relativamente mais estável, no entanto, quando o homem atua como agente acelerador do processo erosivo, devido a não adoção de técnicas apropriadas de diagnóstico e conservação do solo, os danos ambientais podem ser severos (Guerra, 2018; Guerra *et al.*, 2020; Falcão *et al.*, 2020; Boardman *et al.*, 2022)

Um tipo de erosão analisada na presente pesquisa é a erosão laminar, um dos processos mais comuns de erosão hídrica. Esse tipo de erosão corresponde a um processo causado pelo escoamento difuso das águas da chuva que remove de forma progressiva e relativamente uniforme os horizontes superficiais do solo (Galerani *et al.*, 1995). É um tipo de erosão que tem bastante atuação em áreas de uso agrícola, onde os solos apresentam-se desnudos em determinadas épocas do ano antecedendo o período de plantio (Jorge; Guerra, 2013; Guerra, 2014; Michette, 2015; Guerra *et al.*, 2017; Guerra; Jorge, 2021)

A erosão pode ser classificada em cinco estágios, conforme o manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso (Bellinazzi Jr. *et al.*, 1991):

- a) **Ligeira:** menos de 25% do horizonte A superficial é removido.
- b) **Moderada:** a remoção do horizonte A varia entre 25% e 75%.
- c) **Severa:** mais de 75% do horizonte A superficial é removido, expondo partes do horizonte subsequente B.

- d) **Muito Severa:** o horizonte A é totalmente removido, e o horizonte B é bastante alterado, com perdas entre 25% e 75%.
- e) **Extremamente Severa:** quase todo o horizonte B é removido, e o horizonte C fica exposto.

Essa classificação permite uma compreensão detalhada dos níveis de degradação do solo, facilitando a adoção de medidas de conservação apropriadas. Atualmente os estudos de erosão laminar contam com modelos de predição, que quando associados às técnicas de geoprocessamento possibilitam a previsão de perdas de solo, propiciando a seleção de práticas de manejo e controle que possibilitam o uso racional dos recursos do solo e água mediante uso do planejamento ambiental (Thomas, 2019)

Para compor o potencial natural de erosão laminar é preciso a disposição de dados referentes a fatores pluviométricos (erosividade das chuvas), fatores pedológicos (erodibilidade dos solos), fatores topográficos (comprimento de rampa e declive) e do potencial antrópico, que é composto pela interação entre as variáveis de uso e manejo do solo aliadas às práticas de conservação (Jorge; Guerra, 2013; Guerra, 2014; Guerra *et al.*, 2018; Sousa; Paula, 2019; Falcão *et al.*, 2020; Egbueri *et al.*, 2022)

A Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) proposta por Wischmeier e Smith (1978) é uma ferramenta empírica para estimar a perda de solo causada pela erosão hídrica, considerando vários fatores como erosividade da chuva, erodibilidade do solo, topografia, cobertura vegetal e práticas de manejo do solo, ela será apresentada de forma detalhada mais adiante. É importante citar alguns exemplos mais recentes de uso dessa equação, ratificando sua eficiente utilização nos dias atuais, como é o caso do trabalho desenvolvido por Xavier *et al.* (2019) publicado nos anais do I Simpósio Regional de Geoprocessamento - SIRGEO (2018). O artigo avaliou a eficiência da integração do SIG e EUPS na previsão da erosão no município de Itacuruba, semiárido Pernambucano e os resultados apontaram que 73% das erosões mapeadas estão localizadas dentro de classes de alta instabilidade (erosão moderada, forte e muito forte).

Outro trabalho publicado nesse contexto foi o de Pereira *et al.* (2019) intitulado “Uso das terras: perdas de solo por erosão e valoração econômica”. O trabalho foi realizado no Município de Araras, estado de São Paulo, com o objetivo de estimar as perdas de solo por erosão em diferentes tipos de uso da terra e realizar a valoração deste serviço ecossistêmico. A metodologia utilizada foi a da EUPS para obter as taxas de erosão do solo, e o Método do Custo de Reposição (MCR) para efetuar a valoração econômica do serviço ecossistêmico. A perda de

solos totalizou uma média de 308 mil toneladas/ano, resultando em um custo de R\$ 2,37 milhões/anual para reposição dos nutrientes. Isso demonstra que a EUPS permite inclusive análises associadas a outros modelos, sendo de uso eficiente nos dias atuais.

Falcão *et al.*, (2020) que trabalham com a estimativa da erosão do solo no município de Machados, Pernambuco- Brasil, usando a Equação Universal de Perda de Solo com auxílio de GIS, e dados de sensoriamento remoto, identificaram que a erodibilidade do solo foi um dos fatores de grande influência, seguido do fator topográfico.

2.5 Reflexões sobre metodologias na temática erosão e perda de solo

É possível observar uma relação dinâmica entre a ocupação das terras e os processos erosivos dos solos, isso vai de encontro ao enfatizado pelo USDA - Soil Conservation Service (1948) sobre o processo de erosão acelerada do solo, eles destacam que esse fenômeno é o resultado do desequilíbrio, em geral provocado pela atuação antrópica, que se desencadeia em um espaço de tempo a partir da modificação de algum componente da paisagem (Pinto, 1991).

Dentre as várias formas de erosão do solo, a erosão resultante do escoamento superficial das águas pluviais é a que causa consequências mais graves à população. Nos locais onde ocorrem os processos erosivos, verifica-se a perda da capacidade produtiva do solo, isso em consequência da remoção de seus horizontes superficiais alterando seus nutrientes, por outro lado, os excedentes hídricos que chegam até a rede de drenagem da bacia hidrográfica transportam sedimentos, nutrientes e agroquímicos que alterando a qualidade das águas de superfície. (Guerra; Jorge, 2014; 2021; Boardman; Evans 2020; Loureiro *et al.*, 2022)

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1993), é possível dividir as forças que atuam na erosão hídrica em: forças passivas e ativas. As forças ativas correspondem as forças exercidas pelas características das chuvas, que agem sobre o solo pelo impacto das gotas, que caem com velocidade e energia variáveis, dependendo de seu diâmetro, e pelo escoamento superficial, determinado pela declividade, pela extensão da vertente, além da própria capacidade que tem o solo em absorver água. As forças passivas, entende-se pela resistência exercida pelo solo diante da ação erosiva da água, determinada por suas características físico-químicas e pela densidade e características da cobertura vegetal.

É importante saber que a dinâmica de remoção de camadas dos solos pelas águas da chuva pode ser caracterizada por dois grandes grupos ações, eles são divididos de acordo com a sua intensidade de carregamento das partículas do solo e da incisão nele, a erosão em lençol quando a perda de solo pela erosão se dá em camadas relativamente finas e homogêneas,

chamado de escoamento laminar; e a erosão linear, quando a água se concentra em determinados pontos da vertente devido às depressões do terreno, constituindo-se em pequenos sulcos, ravinas e podendo chegar a um estágio mais avançado que são as chamadas voçorocas (Braun, 1961). As causas para que as feições erosivas possam chegar a este estágio mais avançado são resultantes de situações provocadas pela ação do homem ou aceleradas por eles (Guerra et al., 2014; Tomaz, 2019)

Moniz (1975) indica a agregação do solo como uma propriedade importante, sobretudo por estar relacionada à porosidade. A agregação influencia diretamente a infiltração de água e a resistência à erosão, sendo essencial para a manutenção da estrutura do solo. Além disso, o relevo e a estrutura do terreno são fatores cruciais que afetam a erosão e a distribuição da água. Terrenos inclinados, por exemplo, estão mais sujeitos à erosão, enquanto áreas planas tendem a reter mais água, o que pode impactar a formação e a estabilidade dos agregados do solo. Portanto, ao considerar a agregação do solo, é necessário também levar em conta o relevo e a estrutura do terreno para uma análise mais abrangente

Em geral, quanto maior o volume de poros do solo, maior a possibilidade de infiltração de água das chuvas, e menor o escoamento superficial. Solos de textura mais grosseira como areia grossa e cascalho, podem ser também susceptíveis a erosão por não apresentarem agregação entre suas partículas (Vieira, 1988; Lepshe, 2002; Boardman; Favis-Mortlock, 2014; Centeno *et al.*, 2017; Guerra *et al.*, 2020; Barbosa et al., 2021^a).

Outro fator importante no entendimento desse processo, é a matéria orgânica sobretudo na sua função na agregação, conferindo maior estabilidade aos agregados através da cimentação das partículas, proporcionando a partir disso, maior resistência à ação das gotas das chuvas e do escoamento superficial o que gera uma menor desestruturação e quantidade de solo carregado.

Essas questões conceituais são importantes para entender os principais fenômenos que devem ser analisados nos estudos e pesquisas sobre erosão do solo, auxiliando na definição da metodologia a ser seguida. A chuva, representa o principal elemento do fator climático na erosão dos solos nas regiões tropicais úmidas. Segundo Wischmeier e Smith (1958) a erosão pode ser maior ou menor em função da sua duração, intensidade, distribuição e tamanho de gotas, em contrapartida, a cobertura vegetal assume um papel importante na proteção natural de um terreno contra a erosão, oferecendo diferentes resistências de acordo com os diferentes tipos e densidades de coberturas do solo.

Segundo Thomaz (2019) a investigação de erosão (mensuração, monitoramento, experimento e modelagem), diz respeito basicamente aos três pilares já mencionados anteriormente, que é a pesquisa de campo, de laboratório e de gabinete, o autor ressalta que

alguns métodos e técnicas avançadas na pesquisa em física do solo tem revolucionado as pesquisas nessa área, estudos de erosão do solo têm se beneficiado de métodos sofisticados como: radionuclídeos ambientais (Zapata, 2003); traçadores (Astorga *et al.*, 2018); discriminação de elementos geoquímicos (Melquiades *et al.*, 2013); uso de isótopos traçadores em estudos hidrológicos (Hamel *et al.*, 2018), além de sensores, datalogger e drones (Garritano *et al.*, 2019; Guerra *et al.*, 2020).

Nesses estudos muitos dados são utilizados, como levantamentos bibliográficos e de dados secundários que são informações que os pesquisadores não criam, mas consultam. Diferente dos dados primários que são coletados e gerados tanto em trabalhos de campo quanto em laboratório, as fontes desses dados podem ser agências governamentais ou privadas, tal qual estudos científicos publicados, como: livros, artigos de periódicos nacionais e internacionais, monográficas, dissertações, teses; relatórios técnicos; imagens aéreas, de radar ou satélite. (Cloke *et al.*, 2004; Martin e Pablovskaya; 2010; Guerra *et al.*, 2020; Loureiro *et al.*, 2022; Guerra *et al.*, 2023).

No capítulo de que trata sobre métodos de pesquisa em erosão do solo, Embleton; Thornes (1979); Hart (1986) *apud* Thomaz (2019) fala das possibilidades de investigação em cada local, que segundo o autor podem ser resumidas em três etapas, como mostra o Quadro 2.

Quadro 2 – Etapas de investigação sobre erosão do solo

ETAPAS		
1	2	3
Campo	Laboratório	Gabinete
Levantamento de dados (tempo-espaço)	Controle de variáveis para o entendimento do mecanismo envolvido no processo	Análise de dados de campo e de laboratório
Análise da configuração do sistema a ser explicado ou caracterização	Elaboração-calibração-validação de modelos empíricos e físicos para explicação dos processos	Verificação das relações empíricas entre as variáveis
Observação direta dos processos no contexto em que ocorrem (ex.: magnitude, frequência e intensidade)		
Estabelecimento de variáveis envolvidas no sistema (estrutura e dinâmica)	Análises físico-químicas	Análise de dados e construção de modelos explicativos
Desenho para monitoramento, mensuração ou experimento		Análise estatística por meio de correlação e regressão simples e múltipla entre as variáveis pesquisadas e modelagem

Fonte: Embleton; Thornes (1979); Hart (1986) *apud* Thomaz (2019). Organizado por Barbosa (2021).

É cada vez mais perceptível a preocupação de cientistas, pesquisadores e profissionais da área como geomorfólogos, geógrafos, pedólogos, agrônomos e geólogos, com a questão da

quantificação dos processos erosivos, onde publicações nessa temática estão disponíveis desde a década de 1950, podendo-se destacar, entre outras, aquelas que fundamentaram vários trabalhos, tais como Christofolletti (1980 e 1981), Carson (1971), Wischmeier e Smith (1978), Strahler (1956), Tricart e Cailleux (1956); Boardman e Evans (2020), Guerra; Jorge (2021); Favis-Mortlock *et al.* (2022).

A partir do contexto apresentado observa-se que trabalhar com a perda de solo, sobretudo a partir da erosão hídrica envolve uma série de fatores, a análise combinada desses fatores é imprescindível para uma estimativa eficaz da perda do solo de uma determinada área, esse tipo de estudo pode ser conduzida à luz do modelo da Equação Universal de Perda de Solo – EUPS (Universal Soil Loss Equation – USLE) sistematizado por Wischmeier e Smith (1978), e inicialmente difundido no Brasil por Bertoni e Lombardi Neto (1985 e 1992).

O objetivo desse modelo é indicar a estimativa da erosão do solo a médio e longo prazos, podendo dar subsídios ao planejamento de práticas conservacionistas visando minimizar a perda de solos em níveis aceitáveis. A EUPS pode ser genericamente indicada por seus termos componentes como se segue (equação 1) (Zerihun *et al.*, 2018; Soares; Paula, 2019; Falcão *et al.*, 2020; Egbueri *et al.*, 2022),

$$A = R.K.L.S.C.P \text{ (1)}$$

Em que:

A – é a perda de solo por ano (T/ha); **R** – fator R, é função da erosividade da chuva, isto é do poder erosivo das chuvas, obtido a partir de formulação que inclui energia cinética da chuva e sua intensidade (MJmm/ ha.h); **K** – fator K ou erodibilidade do solo, obtido através de formulação considerando dados referentes à características de um solo, que determinam sua susceptibilidade à erosão.(ton./ha); **L** e **S** - fator LS, função da topografia, envolvendo, respectivamente, a extensão da vertente (em metros) e a declividade (em %); **C** – fator C, função da cobertura vegetal e seu manejo, obtido a partir de dados (índice), considerando diferentes condições de cobertura do solo proporcionadas pela vegetação natural ou cultivos agrícolas, que neste caso inclui o manejo. (adimensional); **P** – fator P, que se refere às práticas de suporte ou de conservação do solo em áreas agrícolas, constituindo também um índice (adimensional).

Um dos modelos modernos mais populares, derivado da EUPS para estimar a perda de solo é a Renard Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Renard 1997), que tem sido amplamente utilizada nas últimas décadas. O modelo RUSLE é uma abordagem adequada e prática para avaliar a perda do solo e pode ser aplicado em diferentes áreas ou onde a escala dos processos de erosão possa ser preocupante, inclusive em bacias hidrográficas ou em

propriedades individuais (Zerihun *et al.*, 2018; Soares; Paula, 2019; Mukanov *et al.*, 2019; Falcão *et al.*, 2020; Egbueri *et al.*, 2022)

Este modelo também calcula perdas anuais aproximadas do solo, levando em conta fatores como precipitação, erosão do solo, parâmetros de relevo (encostas), vegetação e esquemas de uso da terra (Renard 1997; Wischmeier; Smith 1965, 1978).

Porém, a avaliação espacial e quantitativa da extensão da perda do solo por meio da observação nem sempre fornece informações objetivas devido às limitações na confiabilidade dos dados, principalmente por causa da dificuldade com custo e acesso aos dados. Apesar dessas questões, muitos cientistas usam o modelo RUSLE, embora não seja capaz de fornecer uma representação espacial precisa da escala dos processos de erosão devido à falta ou ausência de dados e à complexidade que a área de estudo pode apresentar. (Zerihun *et al.*, 2018; Soares; Paula, 2019; Mukanov *et al.*, 2019; Falcão *et al.*, 2020; Egbueri *et al.*, 2022)

Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e tecnologias de sensoriamento remoto, vem permitindo a análise espacial da avaliação da erosão do solo sobre uma grande área (Adediji *et al.* 2010; Farhan *et al.* 2013). Essa possibilidade vem sendo usada para ampliar a capacidade do modelo RUSLE. A inclusão de imagens de satélite pode fornecer uma ideia mais abrangente do estado da cobertura vegetal (fator C) para a área em observação. A combinação do DEM (Digital Elevation Model) com *softwares* como o ArcGIS possibilita amplas oportunidades de usar vários métodos para calcular as características topográficas (fator LS) de um terreno específico (Panagos *et al.* 2015; Zerihun *et al.*, 2018; Soares; Paula, 2019; Mukanov *et al.*, 2019; Falcão *et al.*, 2020; Egbueri *et al.*, 2022).

É importante destacar um ponto relevante discutido por Cloke *et al.*, (2004), Jones III e Gomez (2010) e Martin e Pavlovskaya (2010), os autores concordam em dizer que qualquer dado ou informação, seja ele bibliográficos, documental, cartográfico ou iconográfico, independente de fonte ou forma, têm suas vantagens e limitações, logo, a escolha do dado a ser usado deve levar em conta o propósito de sua criação, mostrando a sua parcialidade, assim como qual o processo de coleta e sistematização, visto que estas informações podem mostrar o nível de confiabilidade do produtor final.

O solo pode ser detectado pelo espectro eletromagnético através do brilho da superfície do solo, refletindo o grau de cobertura vegetal ou a intensidade do desenvolvimento da vegetação. Assim, os índices de vegetação (por exemplo, NDVI, SAVI, OSAVI e MSAVI) podem ser úteis para avaliar a definição espacial de degradação da terra. Informações espaciais e quantitativas sobre a extensão da erosão do solo em uma bacia ou sub-bacia hidrográfica, podem contribuir significativamente no desenvolvimento de medidas para proteger o solo da

erosão e gerenciar o ambiente de captação (Morais; Sales; 2017; Zerihun *et al.*, 2018; Soares; Paula, 2019; Mukanov *et al.*, 2019; Falcão *et al.*, 2020; Egbueri *et al.*, 2022).

Com base no modelo EUPS e suas variações como a RUSLE, vários trabalhos nacionais e internacionais têm sido desenvolvidos em condições de campo, ao nível de bacias hidrográficas, podendo ser exemplificado por estudo mais antigos que servem de base como Morgan e Nalepa (1982), Pinto (1983, 1991 e 1996), Bertoni e Lombardi Neto (1985 e 1990), Castro e Zobeck (1986), IPT (1986), e estudos mais recentes como, Durães e Mello (2016), Gelagay e Minale (2016), Gomes *et al.* (2018), Mehri *et al.* (2018) Sousa e Paula (2019), Mukanov *et al.* (2019), Falcão *et al.*, (2020) Miguel *et al.* (2021), Fiorese (2021); Pereira e Cabral (2021), Edbueri *et al.*, (2022); Barbosa *et al.* (2024).

Segundo Favis- Mortlock *et al.* (2022), ao tratar da relação e interação entre os fluxos dos elementos da paisagem que influenciam na erosão e perda do solo, destaca que os modelos podem representar bem a velocidade, o volume de escoamento e a distribuição de fluxos e tamanho dos sedimentos transportados, mas admite que alguns desses modelos ainda apresenta limitações, o autor discute formas de melhorar essas representações.

2.5.1 Origens das Linhas e Abordagens dos métodos de determinação de perda de solos

A acelerada erosão do solo tem sido largamente considerada como uma problemática ambiental, sobretudo, no que se refere à ocupação do solo. Como já discutido anteriormente o processo erosivo proporciona a redução da porosidade do solo e da capacidade de retenção e infiltração de água, causando um conseqüente aumento do escoamento superficial, do transporte de sedimentos e assoreamento de corpos hídricos (Durães; Mello, 2016; Centeno *et al.*, 2017; Guerra *et al.*, 2020; Guerra; Jorge, 2021).

Nesse contexto, este tópico apresentará as principais linhas e abordagens dos métodos de determinação de perda de solos. Segundo Pereira (2006) a importância na determinação da perda de solos se encontra na obtenção de parâmetros que auxiliem na tomada de decisão sobre os tipos de proteção que deverão ser empregadas em determinada área, com vista ao controle da erosão e do transporte de sedimentos. A ausência deste tipo de ação leva a escolha de técnicas imprópria, resultando tanto na elevação dos custos de proteção e/ou recuperação como na diminuição de sua eficiência.

Segundo Cloke *et al.* (2004) o processo de interpretação dos resultados passa por várias fases intelectuais e metodológicas, denominado de “peneirar e classificar”, onde os dados,

mesmo que de forma inconsciente, são triados e separados com intuito de ordenar, categorizar e hierarquizá-los.

A partir desse ponto de vista, a pesquisa necessita tanto de aspecto quantitativos que ajudam na descrição da complexidade de determinada realidade, via análise da interação de variáveis, compreendendo suas particularidades. Mas como apontam Shaw *et al.* (2010) a investigação precisa ir além da relação dessa casualidade linear, dando espaço a uma abordagem na qual a casualidade é mais complexa, pois no mundo real dois fenômenos não ocorrem isoladamente, em vez disso, múltiplos fenômenos ocorrem simultaneamente interagindo entre si.

É dentro desse contexto que as características qualitativas como o contato direto com o objeto de estudo e a intensiva coleta de dados via trabalho de campo, com dados descritivos, retratando o maior número possível de elementos existentes na realidade estudada entra na pesquisa, a linha qualitativa é necessária para caracterizar o processo de expansão urbana e a evolução da paisagem, de forma crítica. Cada análise da perda do solo aplicada inclui uma variação espacial e temporal dos parâmetros de sua formulação e o nível de estimação irá definir seu caráter qualitativo ou quantitativo (Almorox *et al.*, 2010; Bezerra *et al.*, 2012; Guerra, 2014; Guerra, 2018; Loreiro *et al.*, 2020; Guerra *et al.*, 2023).

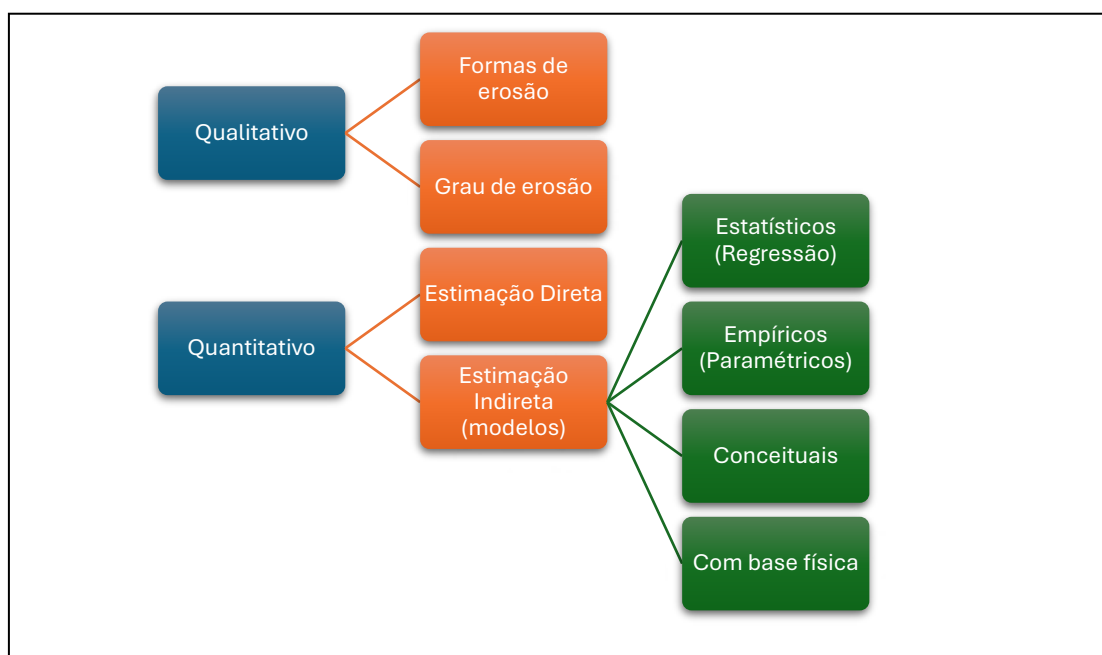
Os métodos quantitativos de estimação indireta, aborda os modelos estatísticos ou de regressão, paramétricos ou empíricos e os modelos conceituais e de base física. Esse método possibilita a estimação numérica da erosão, o valor de perda de solos como também estabelece graus erosivos. Considerando que os distintos tipos de determinação não apresentam limites nítidos, sobretudo no que tange aos modelos, em muitas formulações se combinam distintas opções (Merritt *et al.*, 2003; Almorox *et al.*, 2010; Bezerra *et al.*, 2012; Guerra, 2014; Guerra, 2018; Guerra *et al.*, 2020; Loureiro *et al.*, 2020).

A utilização de métodos quantitativos de estimação indireta, como descrito por Almorox *et al.* (2010), é fundamental para a obtenção de dados sobre a taxa de erosão, especialmente em áreas onde medições diretas são inviáveis. A aplicação desses métodos pode proporcionar uma compreensão mais abrangente e detalhada dos processos erosivos, contribuindo para a elaboração de estratégias mais eficazes de manejo e conservação do solo.

A estimação direta se realiza no terreno com o uso, por exemplo, de medidas de volume de água e sedimentos, de agulhas de erosão, perfiladores microtopográficos, etc., ou a partir de ensaios (parcelas de erosão) (Merritt *et al.*, 2003; Almorox *et al.*, 2010; Loureiro 2013; Bezerra *et al.*, 2012; Guerra, 2014; Guerra, 2018; Rangel *et al.*, 2019; Filho; Vieira, 2020; Loureiro *et al.*, 2020).

Thomaz (2019) cita a mensuração de erosão do solo, que pode ser considerada um método de estimação direta. Ela pode ocorrer de duas maneiras: volumétrica e dinâmica. A mensuração volumétrica inclui métodos como o uso de pinos de erosão, perfis transversais repetidos, raízes expostas e superfícies renascentes. Superfícies renascentes referem-se às áreas de solo que foram removidas pela erosão e que posteriormente ficaram expostas novamente devido a processos erosivos contínuos. A mensuração dinâmica, por sua vez, inclui métodos como o uso de calhas de Gerlach e parcelas fechadas (De Ploey; Gabriels, 1980; Hudson, 1993; Bezerra *et al.*, 2012; Guerra, 2014; Guerra, 2018; Loureiro *et al.*, 2020). Essas situações ocorrem de diferentes maneiras, na primeira situação, o material transportado é registrado após a remoção, já no segundo caso, a remoção do material é registrada à medida em que acontece o processo (Figura 5).

Figura 5 - Métodos de determinação de perda de solos



Fonte: Adaptado de Almorox *et al.*, 2010.

As taxas de erosão analisadas de forma indireta, são geralmente usadas quando não é possível ou não há o interesse em obter as taxas de erosão de forma direta, é então que se usa as modelizações do processo erosivo, ou seja, a estimativa por meio dos modelos, que são representações simplificadas da realidade (Almorox *et al.*, 2010; Bezerra *et al.*, 2012; Guerra, 2014; Guerra, 2018; Loureiro *et al.*, 2020).

Tratando-se de modelos, Merritt *et al.* (2003) enfatiza que os métodos são diferentes em alguns aspectos: a complexidade, os processos considerados, os dados requeridos para sua

calibração e utilização. Além disso a variação espacial e temporal de entradas e saídas, a validação e precisão do modelo, a possibilidade de aplicação considerando os dados disponíveis entre outros elementos que devem ser considerados na escolha do modelo (Zerihun *et al.*, 2018; Soares; Paula, 2019; Mukanov *et al.*, 2019; Falcão *et al.*, 2020; Egbueri *et al.*, 2022; Favis-Mortlock *et al.*, 2022)

Já os modelos conceituais levam em consideração os processos de transferência e deposição de sedimentos, tendo por base a integração de modelos hidrológicos e de erosão. Seus resultados, que em geral são apresentados de forma agregada, possuem um nível de detalhe descritivo sobre os processos internos do sistema assim como os fundamentais para erosão (Alatorre; Beguería, 2009; Bezerra *et al.*, 2012; Guerra, 2014; Guerra, 2018; Tomaz, 2019; Loureiro *et al.*, 2020).

Nesse tipo de método observa-se que a determinação dos seus parâmetros e seu alinhamento são os maiores desafios, os modelos conceituais são mais adequados para descrever o comportamento dinâmico do sistema de erosão, dando indicações sobre os efeitos quantitativos e qualitativos de mudança de solo, sem que seja necessária uma grande quantidade de dados temporais e espaciais.

Já modelos que se baseiam nas leis da física tem por objetivo a explicação dos processos a partir de equações que considerem essas leis, tendo em vista que elas que regem a geração e o transporte de sedimentos, esses modelos são relevantes no sentido de proporcionar a análise de componentes individuais importantes para o processo erosivo, viabilizando a interação entre vários fatores, nesse sentido eles permitem a compreensão dos elementos mais importantes para o conjunto do sistema, sua base em equações de validade universal e com parâmetros de base física podem teoricamente ser aplicados com medidas mais diretas dos valores dos parâmetros, no entanto se limitam devido sua grande exigência de dados (Baldassarini, 2016; Zerihun *et al.*, 2018; Soares; Paula, 2019; Tomaz, 2019; Mukanov *et al.*, 2019; Falcão *et al.*, 2020; Egbueri *et al.*, 2022; Favis-Mortlock *et al.*, 2022)

Como exemplo dos referidos modelos tem-se a WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) (Nearing *et al.*, 1994), atualmente conhecido como Geo-WEPP e a EUROSEM (*The European Soil Erosion Model*) (Morgan *et al.*, 1998), como explicitado esses modelos podem ser fisicamente mais eficientes do que os modelos empíricos, mas geralmente necessitam de vários dados de entrada, onde, em muitos casos não há informações facilmente disponíveis, eles também são computacionalmente mais trabalhosos, particularmente no que se refere ao potencial erosivo do solo em média e em grande escala, tal como numa grande bacia hidrográfica (Wang *et al.*, 2009)

Nos modelos paramétricos (soma ou multiplicação de fatores) ou empíricos a base são os procedimentos de inferência estatística (em especial de regressão) eles buscam interpretar os mecanismos da erosão através de suas causas e efeitos, são mais simples que os conceituais e de base física, sobretudo por necessitar de uma menor quantidade de dados, seus parâmetros são obtidos por calibração em campos experimentais e monitoramento de campo, são de lógica indutiva, sendo portando uma predição de dados, do tipo métrico-estatístico, as análises são das relações observadas entre as diferentes variáveis. (Merritt *et al.*, 2003; Almorox *et al.*, 2010; Baldassarini, 2016; Zerihun *et al.*, 2018; Soares; Paula, 2019; Mukanov *et al.*, 2019; Falcão *et al.*, 2020; Egbueri *et al.*, 2022; Favis- Mortlock *et al.*, 2022).

Estes métodos são usados com frequência, sobretudo no planejamento de áreas e territórios, são matematicamente mais simples, porém bastante úteis na situação de ausência de dados, como exemplo desses modelos tem-se a EUPS/USLE (Wischmeier; Smith, 1978), MUSLE (Williams, 1975; Foster; Meyer, 1975), RUSLE (Renard *et al.*, 1997) entre outros. (Alatorre; Beguería, 2009; Almorox *et al.*, 2010; Soares; Paula, 2019; Mukanov *et al.*, 2019; Falcão *et al.*, 2020; Egbueri *et al.*, 2022; Favis- Mortlock *et al.*, 2022).

De modo mais específico, a USLE (Equação Universal de Perda de Solo) tem sido extensivamente utilizada em diferentes escalas, sobretudo pela simplicidade de sua formulação (Hui *et al.*, 2010; Beskow *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2009; Pan; Zhang; Zhao, 2005), entretanto, precisa de ajustes, calibração. Suas limitações estão em basear-se exclusivamente em relações estatísticas, em geral, se limitando as condições em que foram calibradas, o uso em outras áreas requer uma revisão de dados empíricos, para sua adaptação em diferentes áreas geográficas, o que tem sido feito por grande parte da literatura especializada nestes modelos, além disso, empregam suposições sobre o meio físico, não contemplando os processos de transporte e sedimentação, o que dificulta seu uso em topografias complexas.

É nesse sentido que a RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*) que também é um modelo paramétrico foi testado e validado em diversas condições de solo, clima e manejo (Renard *et al.*, 1997) esse modelo apresenta-se como uma ferramenta útil, sua avaliação também resulta de diversos fatores que influenciam o processo erosivo, os quais são: Erosividade da chuva (R), erodibilidade do solo (K), uso e manejo do solo (C), práticas conservacionistas (P) e topografia (LS), esse último representado pelos efeitos do comprimento de rampa (L) e da declividade (S), devido a todos os fatores da equação poderem ser especializados, tem sido comum o uso do geoprocessamento na avaliação da susceptibilidade do solo à erosão.

Essa possibilidade que RUSLE apresenta de combinar dados a um sistema de informações geográficas (SIG) pode facilitar especialmente a obtenção dos fatores topográficos

através da derivação de um modelo digital de elevação (MDE), como mostram Wang *et al.* (2009), Bartsch *et al.* (2002) e Cerri *et al.* (2001). Com o uso do SIG, é possível compreender a complexidade de uma bacia hidrográfica pela sua discretização em unidades menores, mais homogêneas, facilitando o entendimento do processo erosivo (Durães; Melo 2016; Barbosa *et al.*, 2024)

É importante salientar que o uso de modelos de estimação de erosão, de acordo com García Ruiz e López Bermúdez (2009), proporciona a análise dos complexos mecanismos dos processos erosivos, identificando as variáveis que os controlam, estimando também suas consequências e as taxas de perda do solo, determinando seus limites, além disso eles identificam áreas de maior risco e auxiliam na adoção de ações de conservação de solos e no ordenamento dos seus usos.

De acordo com Baldassarini (2016), é de grande importância conhecer as limitações dos modelos que serão utilizados, entender a finalidade para o qual foram criados e os ajustes que devem ser feitos aos dados disponíveis na busca pela resposta de um determinado objetivo, assim como a necessidade do pesquisador.

É importante salientar a necessidade de alinhamento do modelo a escala de análise, ou seja, o tamanho das parcelas experimentais adotadas, se elas variam, deve-se estar atento aos ajustes e adaptações necessárias a eficaz aplicação do método.

Segundo Almorox *et al.* (2010) os modelos qualitativos e paramétricos são mais adequados por sua simplicidade e possibilidade de uso em grandes escalas temporais e espaciais na identificação de zonas com maiores taxas de erosão, assim como, análise das zonas de origem da produção de sedimentos, os modelos.

Destaca-se nesse contexto que os processos erosivos têm uma ocorrência influenciada pela escala temporal e espacial. Os modelos por sua vez apresentam resoluções ou níveis de detalhe de representação espacial e temporal, a EUPS (Equação Universal de Perda de Solo), por exemplo, tem uma representação unitária ou agregada, considerando que se prediz a taxa de erosão anual média para uma parcela toda, os modelos mais complexos, trabalham com a subdivisão das áreas.

De acordo com Alatorre e Beguería (2009) os modelos trabalham em escalas e resoluções determinadas que, em certos casos, não se enquadram nos processos pesquisados, desse modo, é necessário fazer operações de escalonamento, adequando a resolução de análise para as simulações. Aumentando-se a escala de análise, deve-se incrementar a resolução (áreas em unidade individuais).

Tendo em vista que a erosão apresenta elevada variabilidade de eventos, sendo os fatores que a influenciam, irregulares espacial e temporalmente, como a intensidade de precipitação e infiltração, características dos solos e do escoamento, irregularidade da rugosidade da superfície do solo entre outros é que a questão espacial e temporal se torna relevante. (Alatorre; Beguería, 2009; Baldassarini, 2016; Zerihun *et al.*, 2018; Soares; Paula, 2019; Mukanov *et al.*, 2019; Falcão *et al.*, 2020; Egbueri *et al.*, 2022; Favis- Mortlock *et al.*, 2022).

Para a questão da irregularidade temporal Alatorre e Beguería (2009) destacam que existem duas estratégias de trabalho, realizar o exercício de agregação para predições globais a longo prazo, ou elevar a resolução temporal para modelizar o evento. Os modelos de base física, são ideais para trabalhar com eventos individuais, numa escala temporal, um exemplo são as chuvas erosivas individuais. Outros modelos recorrem a resoluções maiores, como a diária, na qual não é possível capturar a variabilidade da precipitação durante o evento, mas explora sua estacionalidade e as variações da erosão a longo prazo.

Diante do exposto, constata-se que o modelo mais adequado para estudar uma determinada área de escala espacial e temporal definida, requer um alinhamento entre complexidade do mesmo e qualidade das informações disponíveis. Sendo suficiente para a incorporação da totalidade dos processos estudados, observa-se que com o aumento da complexidade do modelo, se eleva também o número de parâmetros, aumentando também a incerteza da qualidade da informação e das resoluções espaciais e temporais (Baldassarini, 2016; Zerihun *et al.*, 2018; Soares; Paula, 2019; Mukanov *et al.*, 2019; Falcão *et al.*, 2020; Egbueri *et al.*, 2022; Favis- Mortlock *et al.*, 2022).

No avanço das pesquisas nesse campo uma série de métodos e técnicas, dependendo dos objetivos do estudo, dos recursos humanos e financeiros disponíveis, das condições climáticas, dos tipos de solos, das condições ambientais e de outras características relevantes para o tema em questão, surgiu no auxílio à obtenção de dados para a discussão do tema, como demonstram os trabalhos de Guerra, (1994, 1996, 2002 e 2005); Guerra e Mendonça (2004); Fullen & Catt (2004); Morgan (2005); Poesen, (2006, 2011); Boardman, (2014, 2016, 2021); Soares; Paula, (2019); Falcão *et al.*, (2020); Goudie (2010; 2019) entre outros importantes autores.

Primeiramente é importante fazer a diferenciação de monitoramento e de experimento. O monitoramento vai referir-se às mensurações sistemáticas de um processo erosivo, no qual se faz necessário a coletas de dados, que dependendo do objeto de estudo pode ser fixo, ou não. Por outro lado, os experimentos referem-se a ensaios ou tipos de simulações que podem ser de laboratório ou não, não sendo obrigatórias coletas em determinados intervalos de tempo (Guerra

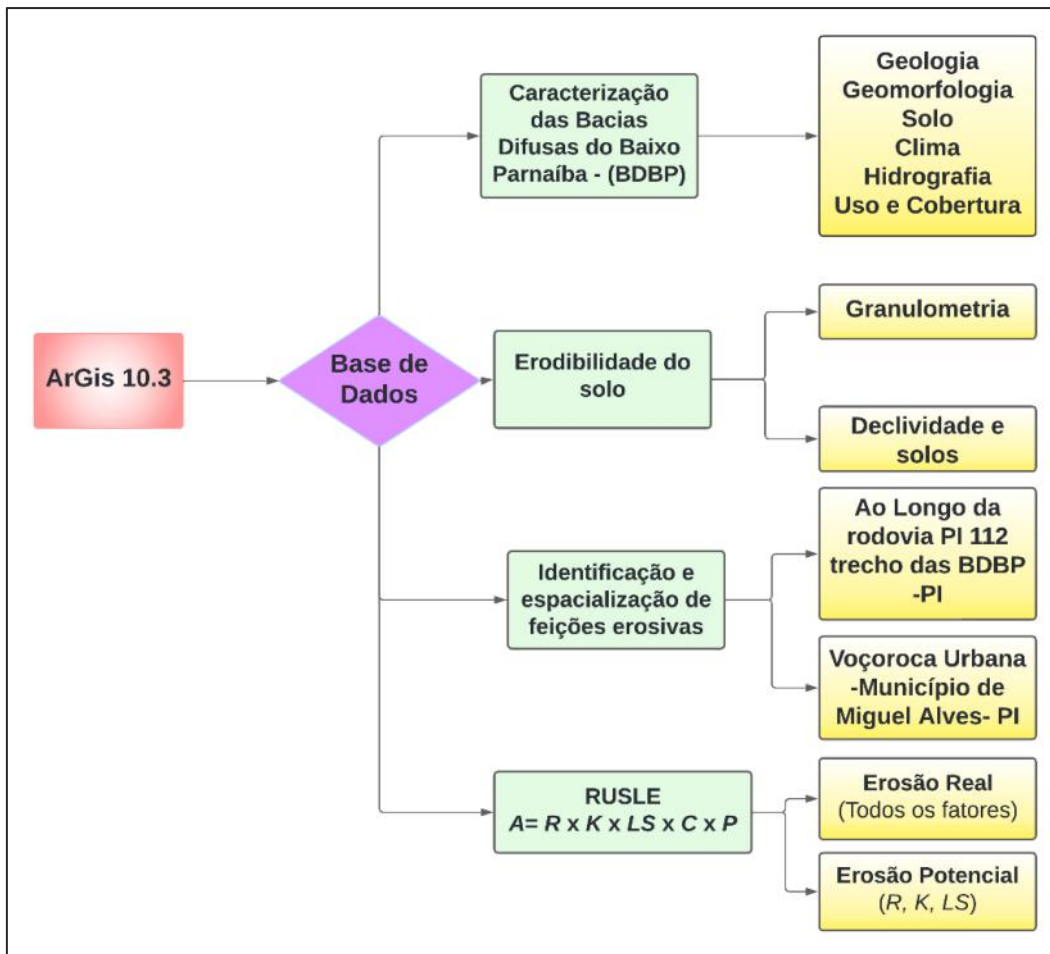
et al., 2014; Thomaz, 2019; Loureiro *et al.*, 2020; Guerra; Jorge, 2021; Loureiro *et al.*, 2022; Guerra *et al.*, 2023)

Existem diversas técnicas de mensuração do potencial de erosão dos solos, no entanto, foram selecionadas aqui apenas aquelas que têm sido mais utilizados no Brasil e no mundo. As técnicas de experimento que foram abordadas na pesquisa referem-se principalmente a EUPS, no que corresponde especialmente aos fatores físicos nas bacias difusas do Baixo Parnaíba-PI, sendo estas as variáveis: erosividade das chuvas (fator R) erodibilidade dos solos (fator K), fator topográfico (LS) e práticas de conservação do solo (fator CP). Será também gerado o Potencial Natural de Erosão (PNE) ou erosão potencial, que a partir dos dados de erosividade, erodibilidade, comprimento de encosta e declividade pode ser obtido e espacializado com a ajuda do Sistema de Informações Geográficas (Barbosa *et al.*, 2024).

CAPÍTULO 3 – MATERIAL E MÉTODOS

O fluxograma da metodologia proposta (Figura 6) para o estudo das bacias difusas do Baixo Parnaíba, Piauí, apresenta uma organização sequencial e integrada das etapas de análise. Inicialmente, observa-se que a organização da base de dados e processamento no *Software ArcGis* compõe as etapas iniciais. A partir dessa base, os objetivos da pesquisa são delineados.

Figura 6 – Fluxograma da metodologia de pesquisa



Fonte: Elaborado por Barbosa (2024)

A caracterização geoambiental engloba diversos fatores, como geologia, geomorfologia, solos, clima, hidrografia e uso e cobertura da terra, sendo essenciais para compreender a dinâmica ambiental e os processos erosivos. Em seguida, a análise se direciona para a erodibilidade do solo, que é avaliada considerando-se a granulometria, declividade e características das classes de solos locais.

Continuando com os objetivos estabelecidos, a pesquisa se volta para a identificação e espacialização de feições erosivas. Esse processo inclui a delimitação de áreas críticas ao longo

da rodovia PI 112 e a identificação de uma voçoroca urbana em Miguel Alves - PI, evidenciando a importância da análise em diferentes escalas e contextos geográficos. Para identificação das feições erosivas, optou-se pela observação direta em campo, tendo em vista as limitações relacionadas à obtenção de imagens recentes e de alta resolução para captação dessas feições. O geoprocessamento foi usado sobretudo na etapa de análise da erosão laminar.

Por fim, a metodologia contempla o uso do modelo RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*) para estimar a erosão real e o potencial de erosão na área estudada. Essa abordagem integrada e sequencial proporciona uma visão holística e detalhada da dinâmica erosiva na região, contribuindo para a elaboração de estratégias e medidas de manejo adequadas para a conservação dos solos e dos recursos hídricos.

3.1 Base de dados e metodologia da caracterização geoambiental da área de estudo.

A metodologia do trabalho teve por base o levantamento bibliográfico, etapa de campo e produção de mapas através de Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Na etapa de campo foi realizado o reconhecimento da área e registros fotográficos com a identificação de algumas feições da paisagem durante o percurso, levando em consideração magnitude, risco e expressividade do processo atuante. As fotografias foram feitas especialmente ao longo da estrada (PI-112) que liga Teresina a Luzilândia.

Para o estudo geoambiental da área foram consideradas os seguintes fatores: geológicos, geomorfológicos, solos, climáticos, hidrológico e uso e cobertura da terra. A separação da área em três Geoambientes, espacializados em um mapa que teve por base a integração de algumas feições geomorfológicas da área, possibilitou uma análise integrada dos dados, essa análise foi sintetizada em um quadro produzido no Excel.

3.1.2 Base Cartográfica

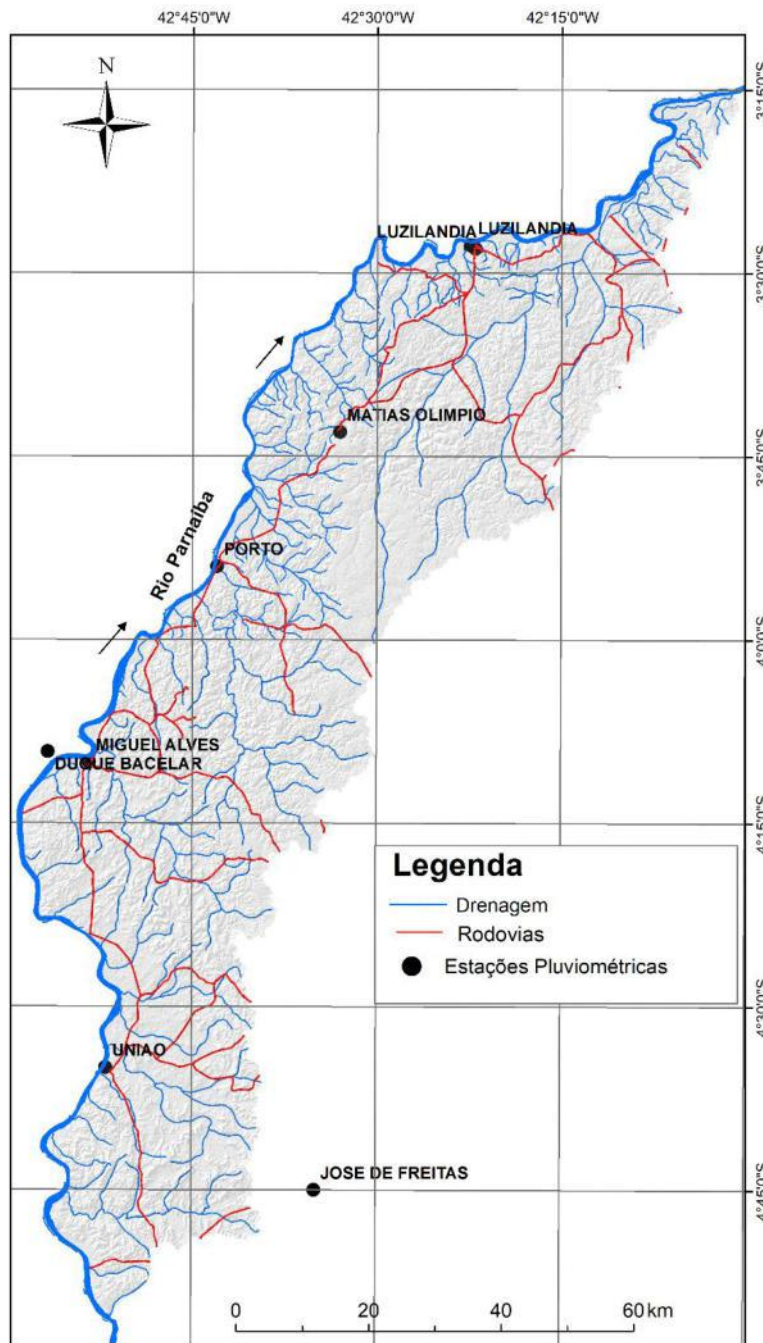
Foi utilizado o software ArcGIS 10.3, disponível no Laboratório de Geomorfologia Ambiental e Degradação dos Solos – LAGESOLOS para geoprocessamento dos mapas, incluindo a ferramenta *raster calculator* para cálculo de áreas. Os mapas foram produzidos utilizando o Sistema de Coordenadas Projetadas UTM (Universal Transverse Mercator), com a zona 23 Sul, baseado no sistema geodésico SIRGAS 2000.

Utilizou-se da base cartográfica vetorial dos solos, no formato shapefile, disponível na página eletrônica do INDE - Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais, na escala original de 1:250000, além do uso dos perfis de solo constantes no levantamento exploratório-reconhecimento dos solos do Piauí (Jacomine, 1986) para complementar as informações sobre os solos da região.

O mapeamento do relevo e da geologia baseou-se nos dados cartográficos da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), obtido no formato shapefile, disponível na página eletrônica do órgão, em escala de semidetalhe (1:250000), em complementação foram conduzidos estudos sobre a geomorfologia piauiense baseado em (Lima, 2024). O mapa de declividade e do perfil hipsométrico, assim como os dados relativos a esses atributos foram obtidos a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE).

A Hidrografia da área teve por base especialmente dados obtidos da United States Geological Survey (USGS) e da HidroWeb do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), gerenciado pela Agência Nacional de Águas (ANA). Além de Imagens topográficas do Images *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 m, disponibilizadas pela NASA e NIMA, para identificação das bacias e sub-bacias. Os dados pluviométricos de estações de medição de chuva foram obtidos de Nascimento et al. (2020) e do Atlas de Chuvas do Brasil (Pinto *et al.*, 2011), para esse estudo foi utilizado dados de 8 estações. A Figura 7, mostra a espacialização dessas estações.

Figura 7 – Distribuição das estações pluviométricas.



Fonte: Barbosa *et al.*, (2024)

A análise da paisagem foi baseada também no mapa de uso e cobertura da terra do projeto Mapeamento Anual de Uso e Cobertura da Terra no Brasil, Mapbiomas (<https://brasil.mapbiomas.org/>), que se baseou no mosaico de imagens de satélite LANDSAT dos anos de 2006 e 2021. A validação do mapa de uso e cobertura foi feita a partir da tabulação cruzada das frequências de amostra das classes mapeadas e reais. O resultado estatístico da exatidão global da coleção 7.0 do Mapbiomas, nível 1, foi de 93,3%.

Algumas classes de cobertura foram agrupadas, tendo em vista a pouca representatividade na área total, as classes incluídas nesta classificação foram: paisagem cultivada, que engloba cana, soja e outras lavouras temporárias, além de silvicultura (monocultura); formação florestal, que abrange matas ciliares, matas de galeria, matas secas e o cerrado; Cerrado abrangendo cerrado denso, cerrado típico, cerrado ralo, cerrado rupestre, vereda, parque cerrado e palmeiral, pastagem, formação campestre, solo exposto, corpos d'água e urbanização. O conjunto de amostras da paisagem foi analisado com base no trabalho de campo e na interpretação de imagens de satélite LANDSAT e do software Google Earth Pro.

As classes com menor percentual de área, que são menos representativas no mapa, podem ser analisadas e visualizadas numericamente na tabela da dinâmica do uso e cobertura da terra, produzida no Excel.

3.2 Método Indireto de Determinação de Perda de Solos

Na etapa que se segue apresenta-se o método que foi aplicado na pesquisa para determinação do potencial erosivo e erosão real na área, essa abordagem, como já contextualizada anteriormente corresponde a um método indireto de determinação de perda de solo, de grande relevância por possibilitar fazer a estimativa da perda do solo de forma não direta, através da modelização do processo erosivo.

No caso de grandes escalas, a mensuração direta da erosão se torna inviável devido a restrições metodológicas e financeiras. Nesse sentido, os modelos de predição da erosão se tornam eficientes na estimativa desses processos, pois consideram fatores passivos e ativos da erosão, associados ao sistema de informação geográficas (SIGs). (Boardman; Favis-Mortlock, 2014; Panagos *et al.*, 2015; Thomaz, 2019; Favis-Mortlock *et al.*, 2022).

Mesmo considerando as discussões, reformulações e questionamentos referentes a aplicação da USLE, ela continua sendo uma ferramenta importante de estimação da perda do solo, sobretudo por suas reformulações, como a RUSLE que permitem o alinhamento com SIG, sendo amplamente aplicada, sobretudo no auxílio ao planejamento conservacionista ou de recuperação de áreas degradadas. Esse cenário foi o que motivou a escolha desse método de estimativa, além de estar vinculado com uma ampla aplicação nos trabalhos que tratam dessa temática.

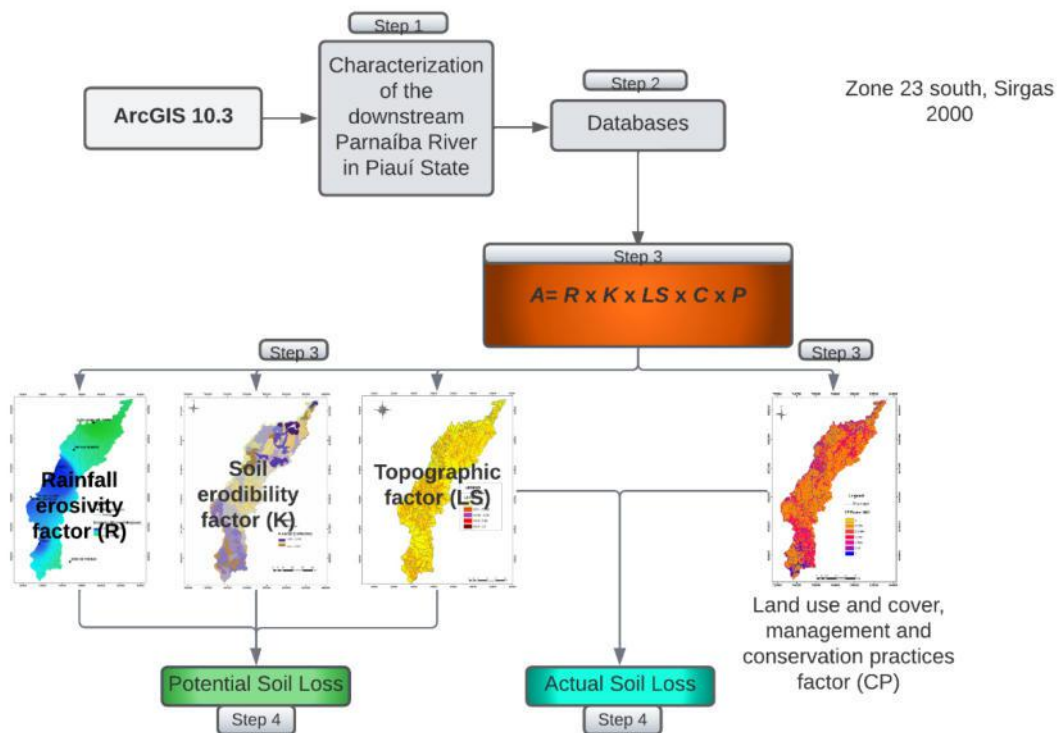
3.2.1 O Modelo da Equação Universal de Perda de Solo (USLE)

Para atingir o objetivo de estimar a perda de solo na área e calcular a erosão potencial e erosão real, foi utilizada a metodologia da Equação Universal de Perda de Solo Revisada os

fatores da equação foram processados utilizando o software ArcGIS 10.3®, Calif (1999), licenciado pelo Laboratório de Geomorfologia Ambiental e Degradação do Solo - LAGESOLOS da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.

Os mapas foram elaborados no Sistema de Coordenadas Projetadas: Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS) 2000, Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), Zona 23 Sul (23S). A utilização deste sistema de coordenadas planas, associadas ao sistema UTM, facilita a definição da resolução espacial e as operações de matrizes, essenciais para a análise e interpretação dos dados geoespaciais. É importante destacar que, embora todos os mapas estejam com coordenadas geográficas, o uso do sistema de coordenadas projetadas permite uma melhor precisão na visualização e manipulação dos dados. (Figura 8).

Figura 8 - Fluxograma metodológico das etapas do modelo RUSLE.



Fonte: Barbosa *et al.* (2024)

3.2.2 Base de dados

O banco de dados foi obtido do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS); os dados pluviométricos foram adquiridos de Nascimento *et al.*, (2020), e atualizados a partir da ferramenta HidroWeb do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH),

que é gerenciado pela Agência Nacional de Águas (ANA). A base de dado para análise da erosão real e potencial obtida a partir da RUSLE seguiu da seguinte forma:

1. A drenagem provém da base cartográfica digital de ANA (2006).
2. Os modelos numéricos com dados topográficos da área, Images *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 m, geradas pela cooperação entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), o DoD (*Department of Defense*) dos Estados Unidos da América e as agências espaciais da Alemanha e Itália, disponibilizado pelo *United States Geological States Survey* (USGS, 2018);
3. A base cartográfica vetorial dos solos, em shapefile, foi obtida do site da INDE - Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais, na escala original de 1:250.000, associada às informações dos perfis de solos, contidas no levantamento exploratório de solos do Estado do Piauí.
4. A erosividade foi calculada a partir da coleta de dados pluviométricos mensais e anuais, retirados do Atlas de Chuvas do Brasil, escala 1:5.000.000 entre 1977 e 2006, atualizados a partir da ferramenta HIDROWEB da ANA, correspondentes à bacia 3 – Atlântico, Norte e Nordeste.
5. Neste trabalho, foram selecionadas imagens dos satélites LANDSAT-5 e LANDSAT-8, disponíveis no site do *United States Geological Survey* - USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Foram selecionadas imagens com condições climáticas semelhantes e correspondentes à mesma época do ano. Foram utilizadas imagens do satélite LANDSAT-5, sensor Mapeador Temático (TM) de resolução espacial de 30m, órbita/ponto 219/64 e 219/63 de 29/08/2006 e satélite Landsat-8, órbita/ponto 219/63 e 219/62, de 22/08/2021 e 25/10/2021 respectivamente, foram utilizadas imagens do espectro visível e infravermelho próximo/médio do sensor *Operational Terra Image* (OLI) para a geração das composições de cores, com resolução espacial de 15 a 30m.

3.2.3 Modelagem espacial da erosão do solo

Os mapas foram confeccionados utilizando o modelo USLE (Wischmeier; Smith, 1965, 1978), que busca quantificar as perdas de solo, decorrentes da erosão laminar, esse modelo foi adaptado para uso no Brasil por Lombardi Neto e Moldenhauer em 1977 (Bertone; Lombardi Neto, 2014). Este modelo e sua variação (RUSLE) permitem estimar a erosão hídrica, com base

na interação entre fatores de erosividade da chuva, erodibilidade, influências do relevo, cobertura do solo e manejo, a partir do uso de ferramentas SIG. Portanto, torna-se ainda mais amplamente utilizado por estimar a perda média anual de solo em larga escala, apresentando uma validade aceitável (Alves *et al.*, 2022; Amorim *et al.*, 2010; Jiang *et al.*, 2023; Lu *et al.*, 2004; Moisa *et al.*, 2022; Barbosa *et al.*, 2024), a equação é definida como

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

Onde A é o índice que representa a perda de solo por unidade de área [$t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$], R corresponde à erosividade da chuva, [$MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot ano^{-1}$]; K é a erodibilidade, [$t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$], L indica o fator de comprimento de declividade (adimensional), S fator de ângulo de declividade (adimensional), C indica o fator relativo ao uso e manejo do solo (adimensional) e P corresponde ao fator relativo à prática conservacionista adotada (adimensional)

A escolha da RUSLE como metodologia principal é apoiada por suas melhorias em relação à USLE original, tornando possível aplicá-la em grandes bacias hidrográficas. A RUSLE incorpora avanços tecnológicos como sistemas de informações geográficas (SIG) e sensoriamento remoto, permitindo uma análise mais abrangente espacialmente da erosão do solo em diferentes escalas geográficas. No entanto, reconhecemos algumas limitações, como a sensibilidade aos parâmetros utilizados e a necessidade de dados precisos para uma modelagem eficaz.

3.2.4 Validação

Devido ao tamanho da área estudada ($6.075,48 \text{ km}^2$) e à falta de parcelas de erosão extensas ao longo da área, foi necessário adotar uma abordagem cuidadosa na seleção e utilização dos dados existentes. Dadas as dimensões significativas das bacias difusas do baixo Parnaíba, a implantação de parcelas erosivas em toda a área seria desafiadora e impraticável.

Para compensar a ausência de dados experimentais tradicionais, recorreremos a métodos alternativos de validação, como comparação com dados observacionais (trabalho de campo e medições históricas), análise de consistência interna, comparação com estudos anteriores e sensibilidade dos resultados a variações nos parâmetros do modelo. Essas estratégias são comumente empregadas em estudos abrangendo grandes bacias hidrográficas, visando minimizar incertezas e obter resultados mais abrangentes (Tomaz, 2019; Silva *et al.*, 2021; Roque *et al.*, 2022; Alves *et al.*, 2022)

A estimativa da erosão do solo na área de estudo foi calculada utilizando a ferramenta do ArcGIS 10.2, *Raster Calculator*, que realiza operações algébricas em imagens rasterizadas, possibilitando a geração do mapa de potencial de perda de solo, considerando apenas os fatores

R, K e LS e o mapa de perdas de solo real foi obtido considerando todos os fatores da USLE, incluindo C e P. No entanto, para a obtenção de cada fator da equação, foram seguidos os seguintes passos:

3.2.5. Fator de erosividade da chuva (R)

O fator de erosividade da chuva é calculado como uma média dos valores de intensidade de energia cinética. Esses valores são estimados a partir de um histórico de precipitação para identificar os padrões pluviométricos cíclicos aparentes (Wischmeier; Smith, 1978). Alguns autores indicam a contribuição de cerca de 80% na perda de solo (Renard; Freimund, 1994), para a obtenção do fator R, utilizou-se a seguinte equação (E2) baseada em (Wischmeier; Smith, 1978), que foi adaptado às condições naturais brasileiras (Bertone; Lombardi Neto, 2014).

$$R = \sum_{i=1}^{12} 67.355 \left(\frac{r_i^2}{P} \right)^{0.85} \quad (2)$$

onde R é a Erosividade, em MJ.mm.h-1 ha⁻¹.ano⁻¹, r corresponde à média mensal total, em mm, e P é a média anual total de precipitação em mm, ressalta-se que r e P foram obtidos a partir dos dados pluviométricos das estações. Posteriormente, os valores de erosividade da chuva foram obtidos para cada estação chuvosa. Estes dados foram interpolados utilizando o método Inverse Distance Weighted (IDW) do ArcGIS Spatial Analyst Tools.

3.2.6. Factor de erodibilidade do solo (K)

A erodibilidade é definida pela resistência do solo às forças de dispersão, respingos, abrasão e transporte de partículas do solo pela água, além de considerar também a velocidade de infiltração, permeabilidade e capacidade de armazenamento de água no solo (Bertone; Lombardi Neto, 2014; Guerra *et al.*, 2017; Mannigel *et al.*, 2002).

Apesar das limitações para a obtenção do fator K, diversos pesquisadores têm desenvolvido experimentos para que esse fator seja aplicável aos mais variados tipos de solos brasileiros (Albuquerque *et al.*, 2005; Aquino; Oliveira, 2017; Farinasso *et al.*, 2006; Moraes; Sales, 2017). Nesta pesquisa optou-se por adotar os fatores de erodibilidade do solo disponíveis na literatura, levando em consideração as classes de solos da bacia hidrográfica do rio Parnaíba.

O mapa de solos deste estudo foi elaborado a partir do mapa exploratório de solos do Brasil - INDE - Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (2014). Levou-se em consideração também o levantamento exploratório de solos do Brasil (Jacomine, 1986), o fator K foi associado as unidades de mapeamento de solos do mapa digital da área de estudo de acordo

com (Jacomine, 1986), e posteriormente interpolado pelo método da distância inversa, formando uma camada matricial com a espacialização do fator de erodibilidade da RUSLE.

Os dados relacionados ao fator K, crucial para os cálculos da Equação Universal de Perda de Solo (RUSLE), foram obtidos do estudo de Aquino e Oliveira (2017). Este trabalho delineou um método detalhado para a determinação da erodibilidade média ponderada de associações de solos no Estado do Piauí. O procedimento envolveu a identificação de perfis representativos para cada tipo de solo nas associações, a partir de comparações entre as características apresentadas nas descrições dos solos e as dos perfis descritos por Jacomine (1986).

Posteriormente, foi realizado o cálculo da erodibilidade para cada perfil de solo, considerando sua contribuição para os tipos de solo nas associações. Os valores de K para cada tipo foram determinados pela média aritmética dos valores individuais dos solos considerados. A erodibilidade da associação de solo foi então calculada como uma média ponderada, levando-se em conta a erodibilidade média de cada tipo de solo e suas porcentagens na associação. Os resultados obtidos foram agrupados em classes, adaptando-se a descrição de (Mannigel *et al.*, 2002), como mostra a Tabela (1) abaixo.

Tabela 1 - Classificação dos solos em função do fator de erodibilidade do solo (K)

Propensão à erodibilidade	(ton.ha.h/ha. MJ.mm)
Muito baixa	>0,009
Baixa	0.009 - 0.015
Média	0.015-0.30
Alta	0.30 - 0.045
Muito alta	0.045 - 0.060
Extremamente alta	>0,060

Fonte: Mannigel *et al.* (2002).

3.2.7. Fator topográfico (LS)

Na RUSLE a influência da topografia sobre as taxas de erosão pode ser analisada através do fator *LS*, onde *L* é o comprimento do talude medido em metros e *S* é o índice de ângulo de declividade do terreno expresso em porcentagem (Ozcan *et al.*, 2008; Bertone; Lombardi Neto, 2014; Fernández *et al.*, 2020; LI, 2013).

O desenvolvimento de metodologias apoiadas no uso de SIG e Modelos Digitais de Elevação (MDE) tem favorecido a obtenção do fator *LS* em grandes áreas, como bacias hidrográficas. Este fator nesta pesquisa baseia-se na abordagem do modelo RUSLE, empregado

na metodologia proposta por Moore e Burch (1986); Engel (1999), também aplicado por outros pesquisadores na literatura (Alves *et al.*, 2022; Durães; Mello, 2016; Moisa *et al.*, 2022; Sousa; Paula, 2019).

Neste contexto, para obter o fator topográfico em uma área tridimensional, um modelo digital de elevação (MDE) é utilizado, combinado com procedimentos de cálculo através da Ferramenta Calculadora Raster, no *software ArcGIS*, que é baseado na seguinte equação (E3):

$$LS = \left(\frac{fa \times mr}{22.1} \right)^{0.4} \left(\frac{\sin(d \times 0.01745)}{0.09} \right)^{1.4} \quad (3)$$

sendo *FA* o fluxo acumulado; *mr* é o tamanho da célula do DEM (m) (comprimento do fluxo), *sin* é o seno e *d* é a inclinação, em radianos.

3.2.8 Uso e cobertura do solo, gestão das práticas conservacionistas Fator (CP)

O uso, manejo e práticas conservacionistas – fator (CP) na equação (1,0) está inteiramente relacionado ao uso da terra e cobertura vegetal. Eles determinam os fatores antrópicos da equação (Agele *et al.*, 2013; Amorim *et al.*, 2010; Lu *et al.*, 2004). Os fatores C e P podem variar ao longo dos anos devido a mudanças na forma e intensidade desse uso.

O fator C reflete os efeitos do cultivo e do manejo de práticas conservacionistas sobre a erosão do solo em áreas agrícolas, além do efeito da cobertura vegetal na redução da erosão em áreas florestais. Neste trabalho de pesquisa, essas informações foram obtidas a partir da análise do uso da paisagem.

A análise da paisagem baseou-se no mapa de uso do projeto Mapeamento Anual de Uso e Cobertura da Terra no Brasil, Mapbiomas (Mapbiomas Brasil | Estatística de acurácia), que foi baseado no mosaico de imagens do satélite LANDSAT dos anos de 2006 e 2021. A validação do mapa de uso e cobertura foi feita a partir da acurácia dos dados que são produzidos a partir do cruzamento das frequências amostrais das classes mapeada e real. Os resultados estatísticos de acurácia global da coleção 7.0 de Mapbiomas, nível 1, foi de 93,3% (Mapbiomas Brasil | Estatística de acurácia).

As classes de abrangência incluídas nessa classificação foram: paisagem cultivada, floresta, *Cerrado*, pastagem, campo, solo exposto, corpos d'água e urbanização. Os fatores antrópicos C e P foram integrados e formaram um único produto (CP), considerando o fator P igual a 1, como observado na literatura (Barbosa *et al.*, 2015; Carneiro *et al.*, 2021; Durães; Mello, 2016; Sousa; Paula, 2019; Barbosa *et al.*, 2024).

Devido à extensão da área, não foi possível identificar as práticas conservacionistas. Essa escolha foi baseada em razões práticas, uma vez que a obtenção de dados detalhados sobre práticas de manejo e conservação em toda a extensão da bacia seria logisticamente desafiadora e demorada. Decidimos concentrar nossos esforços na utilização de dados de uso e cobertura da terra, que estão mais amplamente disponíveis e podem oferecer inferências relevantes sobre a distribuição espacial das práticas de manejo.

O conjunto amostral da paisagem foi analisado, com base em trabalho de campo e interpretação de imagens do satélite LANDSAT e do software Google Earth Pro. As amostras foram obtidas a partir do treinamento do algoritmo. A espacialização dos resultados do fator CP está diretamente relacionada ao uso e cobertura vegetal da bacia hidrográfica do Baixo Parnaíba e os índices foram definidos com base em referências com uso e cobertura vegetal semelhantes à área de estudo.

3.2.9. Classificação e interpretação dos resultados

Os resultados da erosão potencial que considera os fatores: R, K e LS, foram reclassificados e interpretados de acordo com (Morais; Silva, 2020), e variou de muito baixo a muito alto. Os resultados de perda de solo (erosão real) foram reclassificados e interpretados levando-se em consideração os dados obtidos para o contexto local, bem como pesquisas sobre o tema (Carneiro *et al.*, 2021; Farinasso *et al.*, 2006; Moisa *et al.*, 2022; Barbosa *et al.*, 2024).

A erosão real também foi comparada com a classificação proposta pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) (Pennock, 2015) (Tabela 2). A reclassificação dos resultados é necessária para um melhor entendimento dos processos que envolvem potencial de erosão e perda de solo, considerando os fatores da RUSLE, possibilitando a apresentação de produtos cartográficos que auxiliem na compreensão deste evento, bem como na identificação de áreas que necessitam de implementação de práticas de manejo e conservação do solo, apoiando, assim, o planejamento e a gestão dos recursos hídricos.

Tabela 2 - Recomendações da FAO, PNUMA e UNESCO (1994) quanto à classificação do grau de erosão do solo.

Perda de solo em t.ha ⁻¹ .ano ⁻¹	Grau de erosão
<10	Nenhuma ou Baixo
10–50	Moderado
50–200	Alto
>200	Muito Alto

Fonte: FAO/PNUMA e UNESCO (1994)

3.3 Erodibilidade dos solos das Bacias Difusas do Baixo Parnaíba

3.3.1 Erodibilidade a partir da análise da declividade e classes do solo

O mapa de erodibilidade foi gerado pela associação do mapa de solos, cuja nomenclatura foi atualizada conforme EMBRAPA (2018) e as informações das classes de erodibilidade adaptadas de Salomão (2012), conforme mostra o quadro 3.

Quadro 3 – Classes de erodibilidade.

Classes de erodibilidade	Índices relativos de erodibilidade
I muito erodível	10,0 a 8,1
II moderadamente erodível	8,0 a 4,1
III pouco erodível	2,1 a 0

Fonte: Adaptado de Salomão (2012)

Para a elaboração do mapa de declividade foi utilizado as cartas da Diretoria do Serviço Geográfico do Ministério do Exército – DSG/ME e Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais - INDE, na escala de 1:250000, com equidistância das curvas de nível de 5 m. Para digitalização das cartas da DSG e INDE foi utilizado o software ARCGIS® 10.2.

As curvas de nível (linha) e drenagem (linha e polígono) foram vetorizadas, e posteriormente processadas com a extensão 3D Analyst, resultando numa Rede Irregular Triangular (TIN), que é um Modelo Digital de Elevação (MDE). Através do TIN, foram produzidos os mapas de declividade, hipsometria e curvatura de vertentes.

Quadro 4 – Definição das classes de suscetibilidade a erosão laminar por meio da relação erodibilidade x declividade

Declividade (%)				Erodibilidade
I (>20)	II (12 a 20)	III (6 a 12)	IV (<6)	
I	I	II	II	1
I	II	II	III	2
II	III	III	IV	3
III	IV	IV	V	4
Não existe	Não existe	Não existe	V	5

Fonte: IPT (1990) *apud* Salomão (2012)

3.3.2 Erodibilidade a partir da granulometria

As amostras de solo têm importância fundamental na etapa de análise da erodibilidade, sobretudo, o método que será usado, exige os dados dos aspectos físico-químicos do solo, auxiliando assim no diagnóstico da degradação e do processo erosivo, nesse sentido, cabe esclarecer que foram coletadas amostras deformadas e volumétricas para análise no Laboratório de Geomorfologia Ambiental, Maria Regina Mousinho de Meis, do Departamento de Geografia da UFRJ e no Laboratório do Colégio Agrícola da UFPI.

As análises feitas foram: granulométricas; densidade do solo (ou aparente), densidade de partículas e porosidade, todas seguindo o Manual de Métodos de Análise do Solo da EMBRAPA solos, organizado por Teixeira *et al.* (2017).

Ressalva-se que, em alguns pontos não foi possível fazer a coleta em triplicata do anel volumétrico, a ferramenta usada nessa coleta foi o anel de Kopecky, de 100 cm³. As amostras deformadas, foram coletadas por meio do perfil exposto, nos cortes durante a estrada ou em paredes expostas de feições erosivas, além disso foram coletados também em áreas próximas a drenagem e em área de cultivo agrícola.

O estudo envolveu a coleta de amostras deformadas do horizonte A em oito pontos estrategicamente distribuídos ao longo da bacia, abrangendo diversas condições geográficas, como áreas centrais, setores norte e sul. Esses locais foram espacializados no mapa de solos, são numerados de acordo com a sequência cronológica de coleta. As amostras foram analisadas no Laboratório de Geomorfologia Ambiental, Maria Regina Mousinho de Meis, do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, e no Laboratório da Faculdade de Agricultura da Universidade Federal do Piauí. Esta abordagem permitiu uma caracterização granulométrica fornecendo informações sobre a heterogeneidade dos solos da região.

Para a coleta dessas amostras foi feito um trabalho de campo, este abrangeu 4 dias, 19, 20, 21 e 22 de fevereiro de 2021, as amostras foram coletadas ao longo da bacia hidrográfica do baixo Parnaíba, sobretudo, nas proximidades da estrada (PI-112) que liga Teresina a Luzilândia, onde foi observado ao longo desse percurso, pontos com feições erosivas e diferentes paisagens, a figura 8 mostra alguns momentos do trabalho de campo.

As amostras seguiram o seguinte padrão de coleta: 0-10 cm, que chamamos de (A) e 10-20 cm (B), ressalva-se que alguns pontos de coleta de amostras deformadas, não foi possível a coleta do anel volumétrico, seja pela dificuldade de acesso ou dificuldade de coleta em estado físico apropriado da amostra.

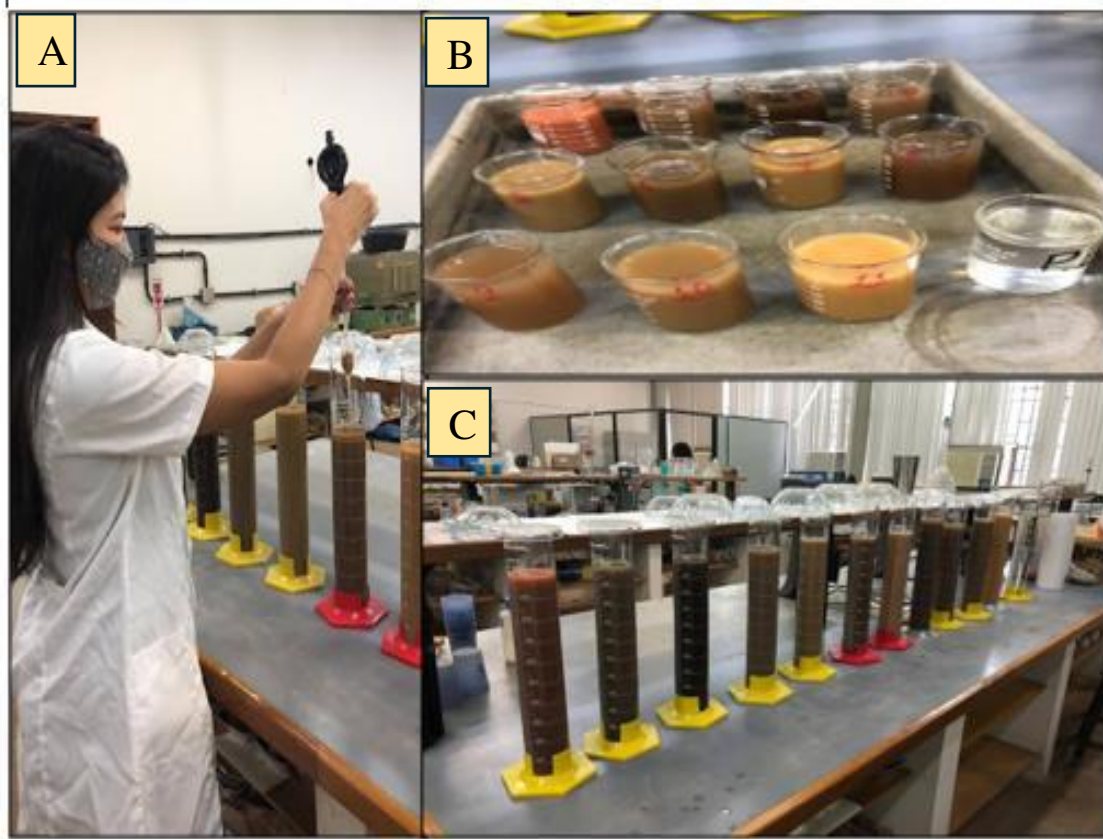
Figura 8 – Trabalho de campo na região das BDBP – PI, em um trecho ao lado da rodovia PI-112.



Legenda: (A) equipe de campo próximo à feição erosiva, (B) área de deposição de sedimentos causada pela retirada de material para construção civil. (C) coleta de anel volumétrico à margem da rodovia nas proximidades da cidade de Porto – Piauí, (D) Ravina encontrada no entorno da cidade de União - Piauí.
Fonte: Barbosa (2021)

No laboratório, todas as amostras deformadas foram analisadas em triplicata (Figura 9). Ressalva-se que, a voçoroca de Miguel Alves, analisada de forma mais específica no trabalho, foi determinada apenas a análise da densidade do solo, densidade de partículas e porosidade, pois não foi feito outros tipos de coleta de amostras nesse ponto.

Figura 9 - Etapas de análise de laboratório das amostras de solo coletadas na área de estudo



Legenda: (A): Processo de pipetagem, demonstrando a inserção de líquido nas amostras de solo. (B): Amostras em pequenos béqueres de vidro antes da secagem em estufa. (C): Amostras de solo diluídas em provetas de vidro durante a análise granulométrica.

Fonte: Barbosa (2021)

3.4 Identificação e espacialização de pontos com feições erosivas.

Inicialmente, realizou-se uma pesquisa bibliográfica para aprofundar o entendimento sobre o tema em questão. Em seguida, procedeu-se ao levantamento dos arquivos cartográficos da área de estudo, disponíveis nos formatos raster e vetorial, presentes no banco de dados do IBGE (2017) e no Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e Google Earth.

A identificação das feições erosivas foi realizada a partir da abordagem fenomenológica, de acordo com Nascimento e Costa (2016), o foco nesse método é na experiência direta e imediata da interação entre você, como observador, e as feições na paisagem, ou seja, nessa etapa a análise foi mais subjetiva no sentido de espacializar pontos com erosão do solo na área de estudo. Esse levantamento ocorreu sobretudo ao longo da rodovia (PI-112).

Nessa etapa da pesquisa foi identificada uma feição expressiva do tipo Voçoroca na cidade de Miguel Alves – PI. Optou-se então por caracterizar e detalhar a evolução desta feição. Foram realizadas medições de largura e comprimento, com o auxílio da base cartográfica mencionada anteriormente para identificar áreas de maior risco e analisar sua evolução ao longo

tempo. Os valores das áreas em metros quadrados foram obtidos utilizando a ferramenta "Calculate Geometry" presente no *ArcGIS* 10.3.

A elaboração do mapa de evolução espaço-temporal da voçoroca foi realizada utilizando imagens de satélite obtidas através do software Google Earth, referentes aos anos de 2007 e 2017, as quais foram ortorretificadas com resolução variando de 30 metros (2007) a 15 metros (2017).

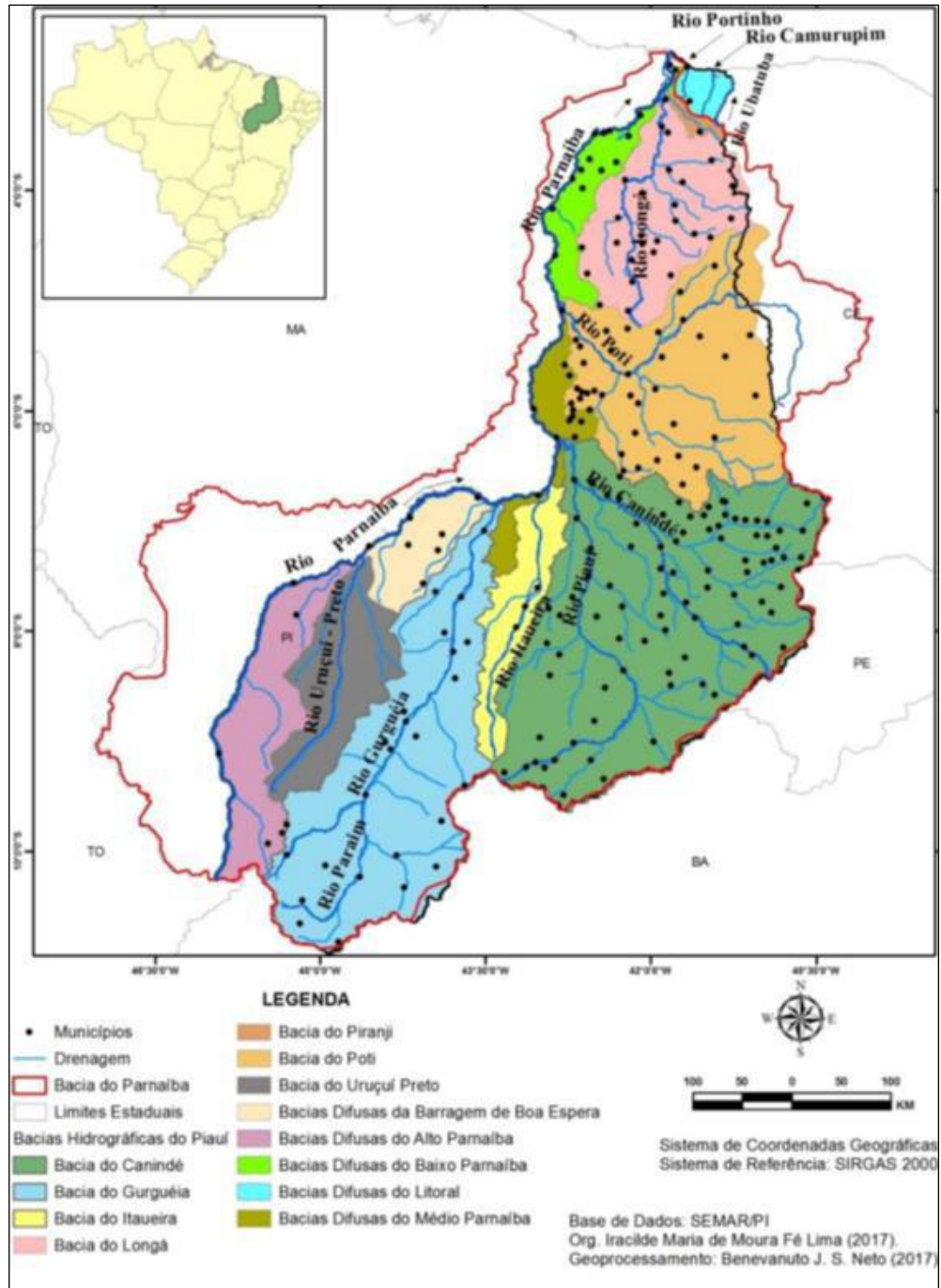
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

4.1 Caracterização geoambiental das Bacias Difusas do Baixo Parnaíba – Piauí

A bacia do rio Parnaíba corresponde a mais densa rede hidrográfica do Nordeste, sendo uma das mais importantes dessa região, o que torna seu sistema aquífero de grande importância no contexto ambiental e socioeconômico, objetivando ações do Governo Federal traduzidas na elaboração de importantes projetos destacando-se: Zoneamento Ecológico Econômico, elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) e publicado em 2005 com foco nos cerrados do Sul do Piauí e Maranhão e o Caderno da Região Hidrográfica do Parnaíba, lançado em 2006 entre outros; todos com a finalidade de promover e coordenar políticas públicas voltadas ao desenvolvimento econômico e sustentável dessa região (MMA, 2006; BRASIL; Medeiros, 2002; Abrel *et al.*, 2019).

No contexto piauiense, os principais rios que formam o sistema de drenagem da bacia hidrográfica do rio Parnaíba podem ser descritos como sistemas hidrográficos sub-regionais, devido à sua vasta extensão territorial e à complexidade ambiental que caracterizam suas bacias hidrográficas. De acordo com Lima (2017) essas bacias são identificadas como sub-bacias hidrográficas do rio Parnaíba, no caso do rio Parnaíba, o trecho considerado como alto curso abrange desde suas principais nascentes até a foz do rio Gurgueia; o médio curso se estende da foz do rio Gurgueia até a foz do rio Poti; e o baixo curso compreende o trecho da foz do rio Poti até o delta do rio Parnaíba. A Figura 10 mostra a divisão das unidades de planejamento hídrico do Piauí, segundo a Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do estado.

Figura 10 – Unidade de Planejamento hídrico do Piauí



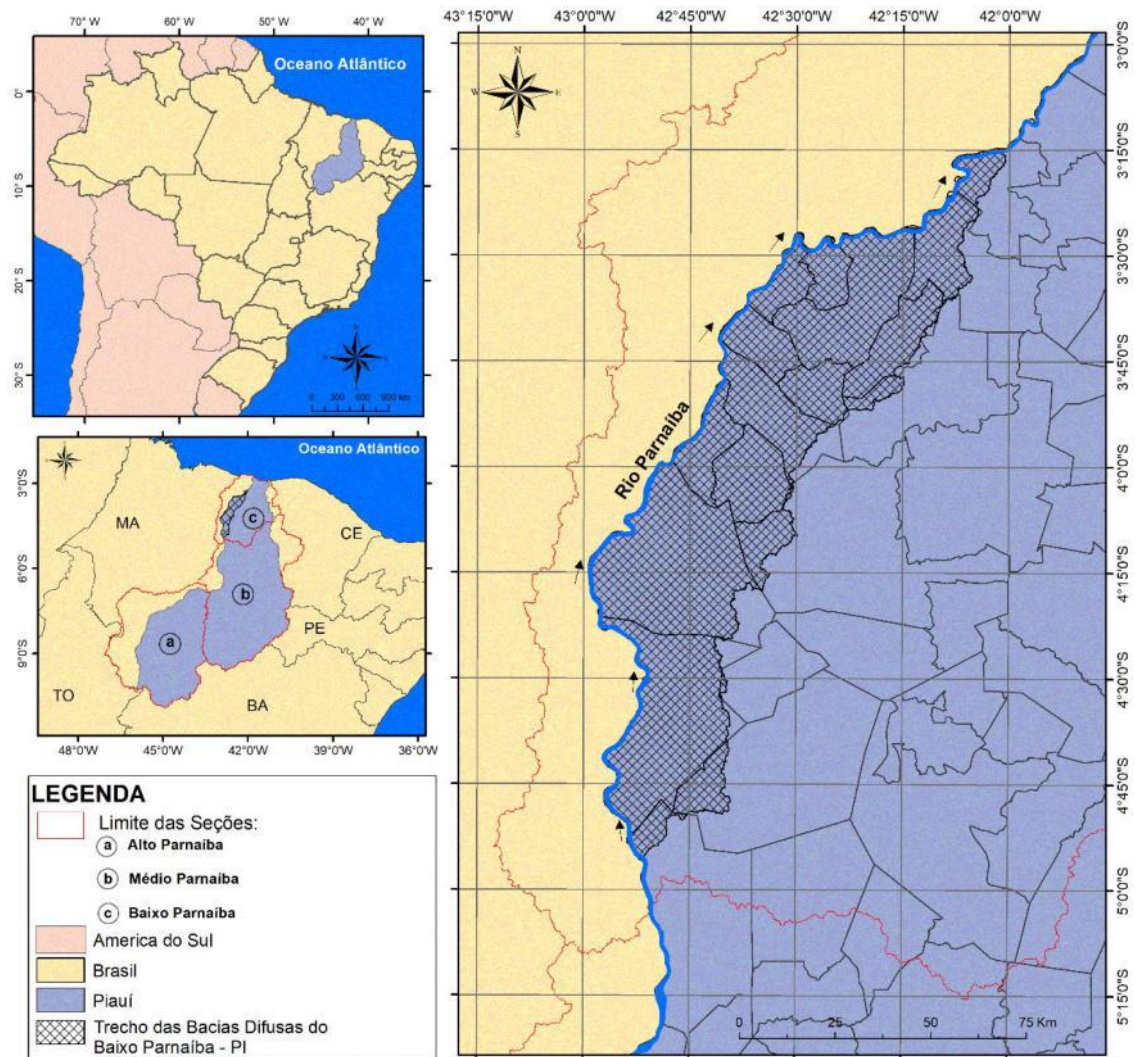
De acordo com Moraes (2015) a região norte da bacia do Parnaíba (setor superior), baixo curso do rio, constitui-se como a principal fonte de sedimentos, com uma produção específica da ordem de 94,8 t/km²/ano, o excesso de sedimentos transportados e depositados no leito do rio Parnaíba, indica os impactos ambientais existentes na extensão de sua bacia. Por estar localizada em uma área de cerrado, que vem apresentando expansão na produção agrícola comercial, necessita de uma atenção especial. Ressalva-se que esse quadro de transporte e

sedimentação, pode influenciar no assoreamento, qualidade e quantidade de recursos hídricos da região, necessitando assim de estudo e monitoramento da área.

A área das Bacias Difusas do Baixo Parnaíba no estado do Piauí, tem como rios principais pequenos afluentes da margem direita do rio Parnaíba, correspondendo a uma faixa de terra alongada no sentido sul-norte, paralela ao rio Parnaíba. Apresenta uma área aproximada de 6.075,48 km², entre as coordenadas geodésicas 5°1'20,06"S/42°50'43,95"W e 3°7'41,42"S/41°55'32,98 "W cujo divisor topográfico faz seu limite leste com a sub-bacia do rio Longá, também localizada no baixo curso do rio Parnaíba.

Representa aproximadamente 12,60% do baixo curso do rio Parnaíba e 18,45% da porção piauiense dessa seção, se iniciando em Teresina, a partir da foz do rio Poti no rio Parnaíba e se estendendo até a confluência do rio Longá. No entanto, essa faixa das sub-bacias difusas do baixo curso do Parnaíba, continua em direção ao norte, após a confluência e estreitas faixas de planícies dos rios Longá e Piranji, portanto de forma descontínua em relação à área deste estudo, penetrando na faixa litorânea e se estendendo até o oceano Atlântico, onde o rio Parnaíba forma o seu delta (Figura 11).

Figura 11 – Localização do trecho das Bacias Difusas do Baixo Parnaíba - Piauí



Fonte: IBGE (2016); ANA (2021). Organizado por Barbosa e Lima (2024)

Esse trecho do rio Parnaíba recebe grandes quantidades de sedimentos formando grandes depósitos aluviais no seu leito, proveniente tanto das áreas de contribuições dos afluentes dos alto e médio cursos, quanto da recepção dos sedimentos resultantes da erosão das pequenas bacias dos afluentes do trecho estudado que correm diretamente para o rio Parnaíba, embora de pequena extensão, uma vez que o rio principal da drenagem, o Parnaíba, não tem competência para transportar os sedimentos do seu leito, somente os sedimentos finos em suspensão e em solução chegam até o Oceano Atlântico na área do Delta deste rio.

Assim, somando-se ao processo natural da dinâmica do rio, sedimentos oriundos da retirada inadequada da cobertura vegetal para ampliação de fronteiras agrícolas, uso impróprio da terra e pastagem, tornam o solo vulnerável à erosão, na Figura 12, revela uma variedade de paisagens distintas encontradas na área (MMA, 2006).

Figura 12 – Diferentes formas da paisagem encontradas na área de estudo



Legenda: (A) Riacho com água turva e margem parcialmente assoreada. (B) Área sem vegetação com solo exposto, apresentando fina camada de sedimentos e pequenos seixos. (C) Amplo campo coberto por gramíneas, com presença de gado. (D) Riacho cercado por vegetação ciliar bem preservada, rodeado por campos de pastagem, com divisão topográfica ao fundo.

Fonte: Barbosa (2021)

A base geológica da área de estudo

As condições litológicas do Piauí encontram-se no contexto da atuação tectônica pretérita, a que se submeteu a estrutura geológica do nordeste e que, mais recentemente desde o Pliopleistoceno, registra variações climáticas responsáveis pela dinâmica subatual e atual do seu modelado (Ab'sáber, 1969; Lima, 1987; 2024).

A área de estudo se localiza na bacia sedimentar do Parnaíba, podendo se observar no quadro 5, de forma resumida, a posição cronoestratigráfica das características da área de estudo.

Quadro 5 – Escala geológica simplificada da Bacia Sedimentar do Parnaíba, das sub-bacias difusas da margem piauiense do Baixo Parnaíba.

Era	Período	Formação/Grupo	Litologia
Cenozoica	Quaternário	Depósitos Aluvionares	Areia, cascalho e níveis de argila
	Terciário	Grupo Barreiras	Arenito e conglomerados com intercalações de siltitos e argilitos
Mesozoica	Cretáceo	Formação Sardinha	Basaltos e diabásios
	Jurássico	*	*
	Triássico	*	*
Paleozoica	Permiano	Formação Pedra de Fogo (Grupo Balsas)	Arenitos, siltitos, folhelhos e calcários. Ambiente marinho raso e litorâneo
	Carbonífero	Formação Piauí (Grupo Balsas)	Arenitos, siltitos, folhelhos e calcários. Ambiente continental fluvial e litorâneo com intercalações marinhas
		Formação Poti (Grupo Canidé)	Arenitos, siltitos e folhelhos
	Devoniano	Formação Longá	Folhelhos e siltitos. Ambiente marinho raso

Fonte: CPRM (2006). Organizado por Barbosa (2024) (*) sem registros de unidades.

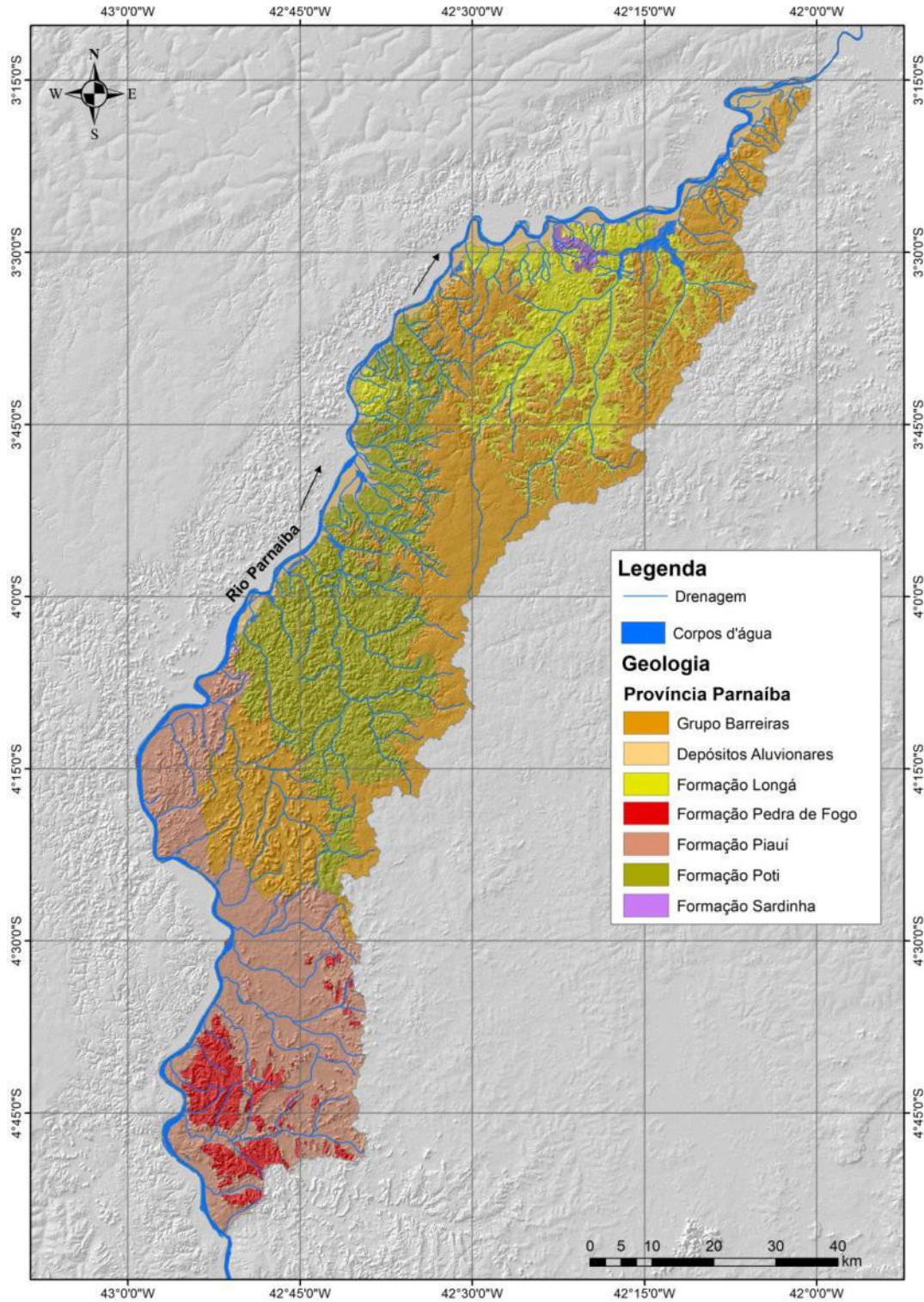
Na região das sub-bacias difusas do Baixo Parnaíba, as formações geológicas aflorantes são datadas desde o Paleozoico até o Cenozoico. No Paleozoico, destacam-se a Formação Pedra de Fogo, do Permiano, composta por arenitos, siltitos, folhelhos e calcários, indicando um ambiente marinho raso e litorâneo. Além disso, há a Formação Piauí, do Carbonífero, com litologia semelhante à Formação Pedra de Fogo, com registros de ambiente continental fluvial e litorâneo, com intercalações marinhas. Também presente é a Formação Poti, do Carbonífero e a Formação Longá, do Devoniano (CPRM, 2006; 2017).

Na era Mesozoica, há registros do Cretáceo, representado pela Formação Sardinha, composta por basaltos e diabásios. No Cenozoico, especificamente no Quaternário, os depósitos aluvionares são compostos por areia, cascalho e níveis de argila. Além disso, o Grupo Barreiras apresenta-se como uma formação representativa, caracterizada por arenitos e conglomerados com intercalações de siltitos e argilitos, a espessura desse grupo pode variar, mas em geral as formações espessas são encontradas em áreas costeiras e em bacias sedimentares interiores, como a Bacia do Parnaíba, é uma importante unidade geológica para estudos paleoambientais

e paleoclimáticos, o Grupo Barreiras também é significativo para a compreensão da evolução geológica e geomorfológica das regiões em que ocorre (Brasil, 2006; Pfaltzgraff, 2008; Hasui *et al.*, 2012; CPRM, 2017).

O mapa geológico da Figura 13 apresenta uma distribuição espacial dos afloramentos das formações geológicas. Na região mais ao sul da bacia, a Formação Pedra de Fogo, datada do Permiano, aflora compondo as rochas dos morros e os platôs, onde também aflora no fundo dos vales fluviais a Formação Piauí (Carbonífero). Na região central encontra-se a Formação Poti, sobreposta pela formação Piauí, e o Grupo Barreiras que se estende do litoral onde recobrem rochas cristalinas (datadas do pré-cambriano) e se interiorizam sobre a bacia sedimentar do Parnaíba, se estendendo até a porção norte da área de estudo, correspondendo as formações superficiais de municípios como Murici dos Portela, Luzilândia e Morro do Chapéu.

Figura 13 – Mapa geológico da área de estudo



Fonte: Organizado pelos autores (2024) com base em CPRM (2006)

O mapa mostra que na área central do trecho em estudo, começam a surgir com mais frequência os depósitos aluvionares, que seguem a jusante do rio Parnaíba, em direção à foz. Na região mais ao norte, caracteriza-se também pela presença da Formação Longá e da

Formação Sardinha. Essa ocorrência de afloramentos de diversificadas formações geológicas evidencia a complexidade da geologia local e a importância do mapa geológico para a compreensão da distribuição e interação entre as diferentes unidades de relevo e a organização da drenagem local.

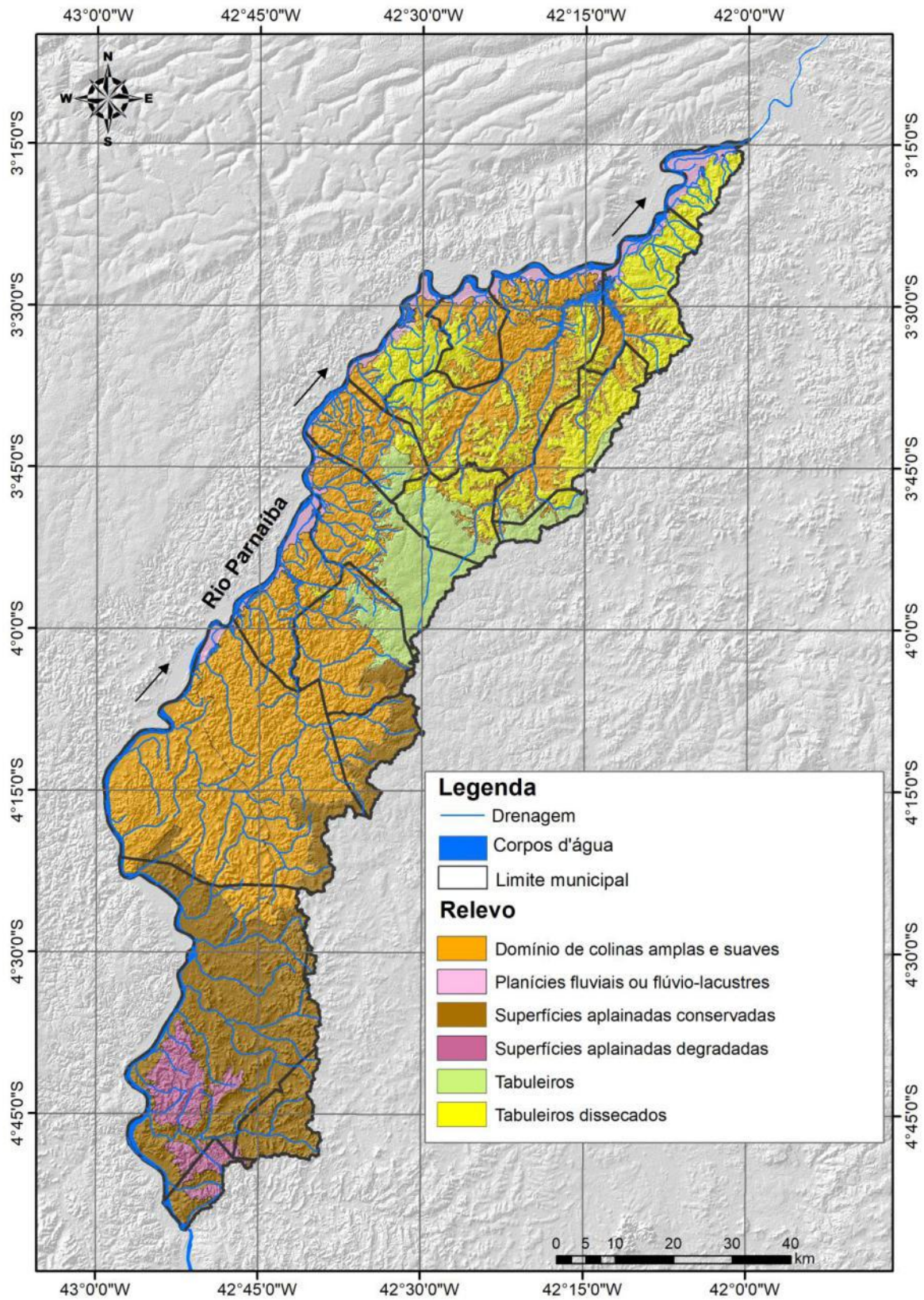
Geomorfologia e Solos

Na análise geossistêmica da paisagem o relevo aparece como um dos componentes principais, sendo este o objeto de estudo da geomorfologia, isso devido a sua influência direta dos diversos processos erosivos, hidrológicos, climáticos e biológicos. Marques (2018), destaca nesse contexto o estudo dos processos, sendo estes os responsáveis pelas ações capazes de criar ou destruir, fixar ou mover, ampliar ou reduzir as dimensões que envolvem essas estruturas do relevo, modelando continuamente ou descontinuamente a paisagem.

Embora o mapa de geomorfologia da área tenha sido baseado nas informações da CPRM, é importante ressaltar a contribuição de Lima (1987, 2024) para o entendimento do contexto geomorfológico mais amplo da Província Estrutural do Parnaíba. Seu trabalho descreve as unidades geomorfológicas da região, fornecendo um panorama geral que contribui para contextualizar as características específicas observadas, como as superfícies aplainadas, colinas, tabuleiros dissecados e planícies aluviais. De acordo com a autora a área estudada encontra-se na província centro-norte piauiense onde são identificadas as seguintes unidades: Planalto Inferior do Norte-Central, Superfície Sedimentar Dissecada com Colinas Residuais, Vales e Planícies do Norte-Central (Lima, 1987, 2024).

Quanto ao relevo, apresenta declividades variáveis o que influenciam na distribuição dos solos. No contexto das unidades geomorfológicas a partir do mapa da Figura 14, observa-se que nesta área há um predomínio de superfícies aplainadas e conservadas, colinas amplas e suaves e tabuleiros dissecados. As superfícies aplainadas, degradada e conservada, correspondem a superfícies horizontalizadas, resultantes de ações erosivas, representam herança de superfícies anteriores, são testemunhas da evolução das formas de relevo, conhecidos também como pediplanos, estão associadas aos solos Argilosos e Latossolo Amarelo (Melo *et al.*, 2005; Silva, 2016; Guerra *et al.*, 2017; Santos; Guerra, 2021; Loureiro *et al.*, 2022).

Figura 14 – Mapa de geomorfologia da área de estudo



Fonte: Organizado por Barbosa (2024) com base em CPRM (2006)

Apesar de ser uma área que apresenta predominantemente baixos declives, foram encontradas na etapa de campo feições erosivas expressivas que se referem a formas ou características do terreno que são visivelmente afetadas pela erosão e que têm um impacto significativo na paisagem. Segundo Pelech *et al.* (2019), nesse domínio predomina estruturas de topo convexo com baixos valores de densidade de drenagem e de aprofundamento das incisões, são áreas associadas a solos com areia franca e deficiência de matéria orgânica, tornando-se propício a processos erosivos.

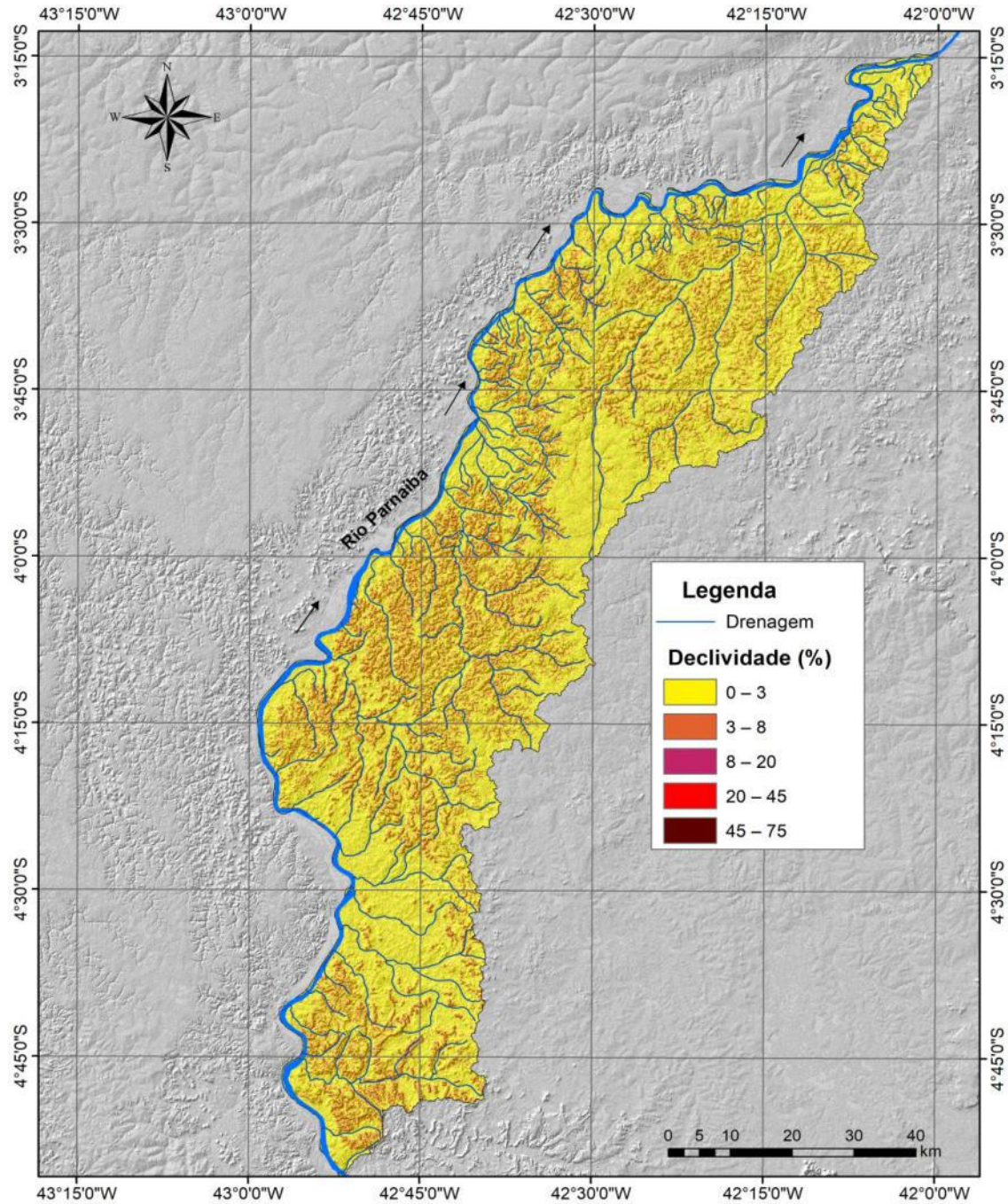
Na tabela 3 e Figura 15, encontram-se os valores de declividade observados na área de estudo, constatando-se que variou de 0 a 45% de declividade, a altitude máxima registrada na área foi de 180m, ou seja, o relevo varia de plano a ondulado, sendo que as maiores declividades estão na parte sul e sudeste da bacia com valores que chegam a 45% principalmente na faixa do divisor topográfico em relação à bacia do rio Longá. As altas declividades em encostas sem cobertura vegetal assumem papel crucial no aumento significativo das perdas de solos. (Pereira *et al.*, 2016; Sousa; Paula, 2019; Guerra *et al.*, 2017, 2020; Guerra; Jorge, 2017; Loureiro *et al.*, 2022).

Tabela 3 – Distribuição das Classes de Declividade das BDBP - PI

Declividade (%)	Área (km²)	Área (%)	Classes de relevo
0 - 3	3.144,57	51,76	Plano
3 - 8	2.008,67	33,06	Suave - ondulado
8 - 20	893,65	14,71	Ondulado
20 - 45	28,44	0,47	Forte ondulado

Fonte: Organizado por Barbosa (2022) com base em Embrapa (1979).

Figura 15 – Mapa de declividade da área de estudo



Fonte: Barbosa (2024)

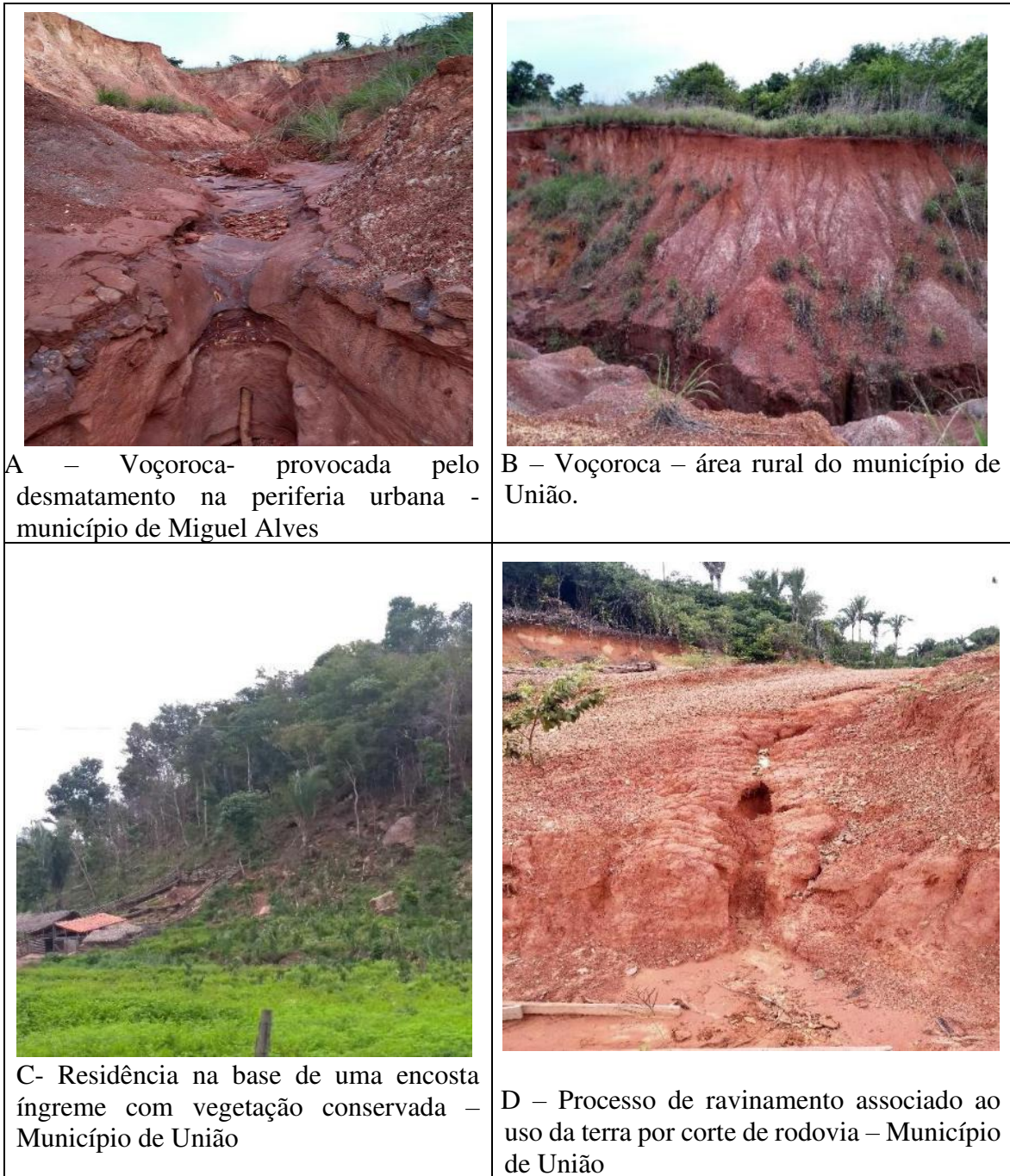
Outro domínio identificado na área são as Planícies Fluviais ou Flúvio-Lacustres. São áreas caracterizadas como ambientes de transição entre os meios aquáticos e terrestres periodicamente alagáveis, onde ocorre a presença da classe dos Chernossolos e Neossolos (Silva; Costa, 2022).

Além dessas unidades geomorfológicas, estão presentes também os tabuleiros que correspondem a superfícies planas ou levemente onduladas que se estendem ao longo da

paisagem, com topos suavemente inclinados e encostas mais acentuadas. Já os tabuleiros dissecados, como observado no mapa de geomorfologia da área, são semelhantes aos tabuleiros, mas apresentam topos planos recortados por vales encaixados, resultantes da ação de rios e seus afluentes, que ao longo do tempo foram erodindo e formando esse aspecto mais fragmentado.

Os solos nessa área são bastante variáveis, com ocorrência de tipos como Luvisolos, Neossolos Litóticos e Latossolo Amarelo. Esses solos são geralmente compostos por sedimentos recentes, incluindo areia, argila e matéria orgânica. Nas áreas de topos planos, é comum encontrar uma maior fertilidade devido à deposição de sedimentos (Guerra; Cunha, 1994; Lima, 1987, 2024; Lima; Augustin, 2010; Guerra *et al.*, 2017). Na figura 16 é possível observar algumas feições erosivas e estilo de encosta encontradas na área.

Figura 16 – Feições da paisagem encontradas na área de estudo



Fonte: Barbosa (2021)

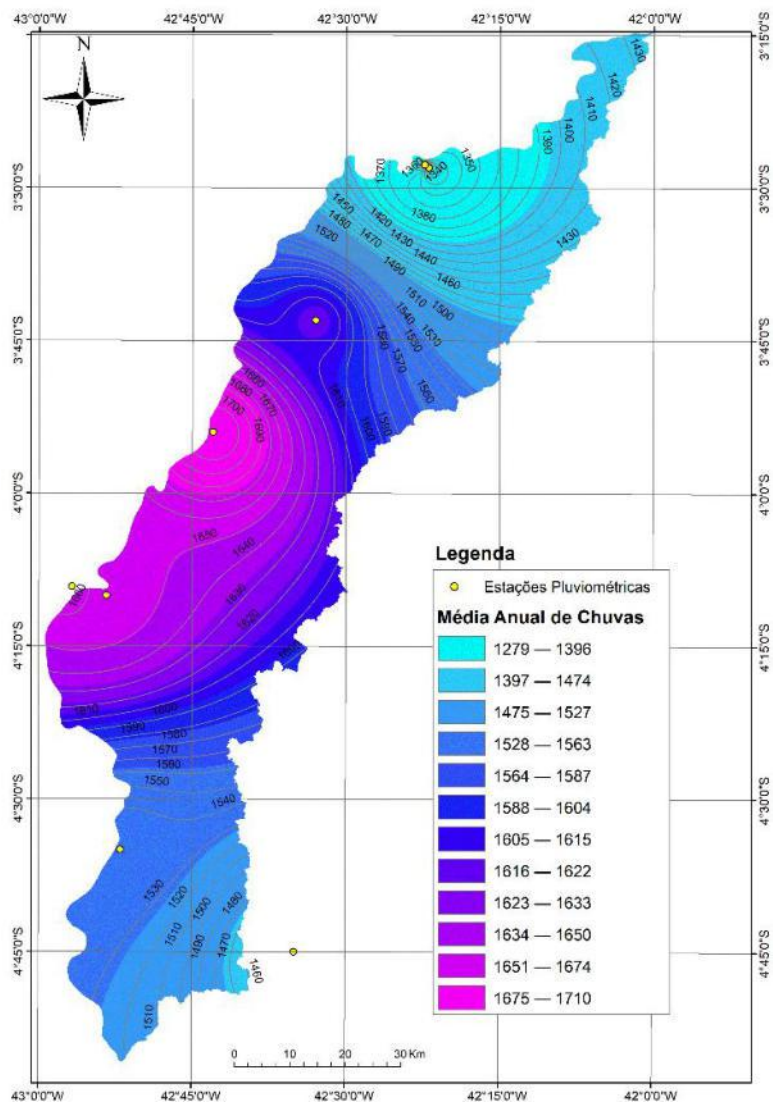
Clima

O clima predominante na região é quente e úmido, com chuvas no verão (trecho à montante) e outono (trecho à jusante). Os dados das chuvas monitoradas por estações automáticas e convencionais no Piauí indicam que a região Norte e Noroeste concentra o maior volume anual, superando 1.500 mm, com os meses de fevereiro a agosto sendo os mais chuvosos. Seguindo a classificação climática de Köppen, o clima na região é o Megatérmico

chuvoso (variedade AW'), a bacia possui temperatura média de 27°C (Pinto *et al.*, 2011; Motta; Gonçalves, 2016; Nascimento *et al.*, 2020).

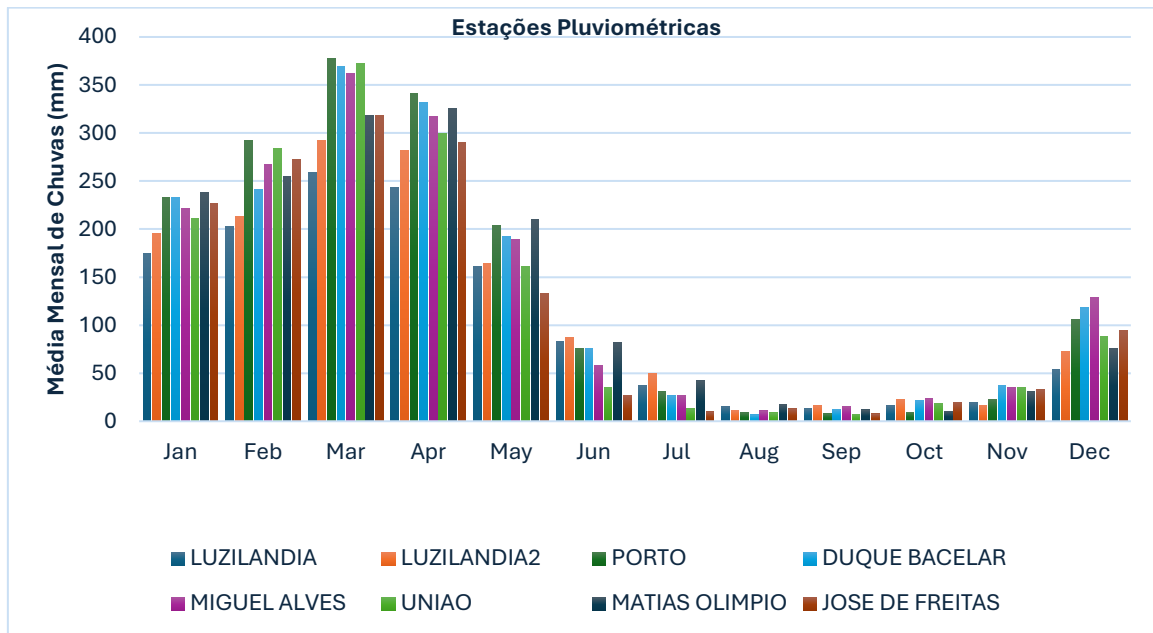
Na área das bacias difusas do baixo Parnaíba, na margem direita deste rio, os valores das precipitações variam aproximadamente de 1279 a 1710 mm (Barbosa et al., 2024), como mostrado no mapa de espacialização das chuvas na Figura 17. A partir desse mapa é possível observar a relativamente grande variabilidade espacial de precipitações que ocorre na área, sendo a ocorrência dos maiores índices pluviométricos na sua porção central e, que, gradativamente, vão se reduzindo em direção ao sul e ao norte da área de estudo.

Figura 17 – Mapas da distribuição anual de chuvas

Fonte: Barbosa *et al.* (2024).

A análise da variação mensal das chuvas com base nas estações pluviométricas na área de estudo revela diferentes padrões sazonais, como visto no Gráfico 1. Os meses de julho a novembro são os menos chuvosos, caracterizando uma estação mais seca, enquanto janeiro a março apresentam os maiores índices pluviométricos, configurando uma estação mais chuvosa. Essa distribuição sazonal é crucial para a compreensão dos períodos críticos de suscetibilidade à erosão. (Guerra *et al.*, 2017; Loureiro *et al.*, 2022; Barbosa *et al.*, 2024).

Gráfico 1 – Variação mensal de precipitação das estações pluviométricas da área de estudo



Fonte: Barbosa *et al.* (2024)

Hidrografia

Os canais fluviais são agentes significativos na dinâmica da erosão dos leitos, assim como o transporte e a distribuição dos sedimentos gerados, exercem impacto em toda a bacia hidrográfica. Segundo Lima; Augustini (2014), esses canais influenciam nos processos de estruturação do relevo, compondo um dos principais geossistemas de modulação da geomorfologia terrestre.

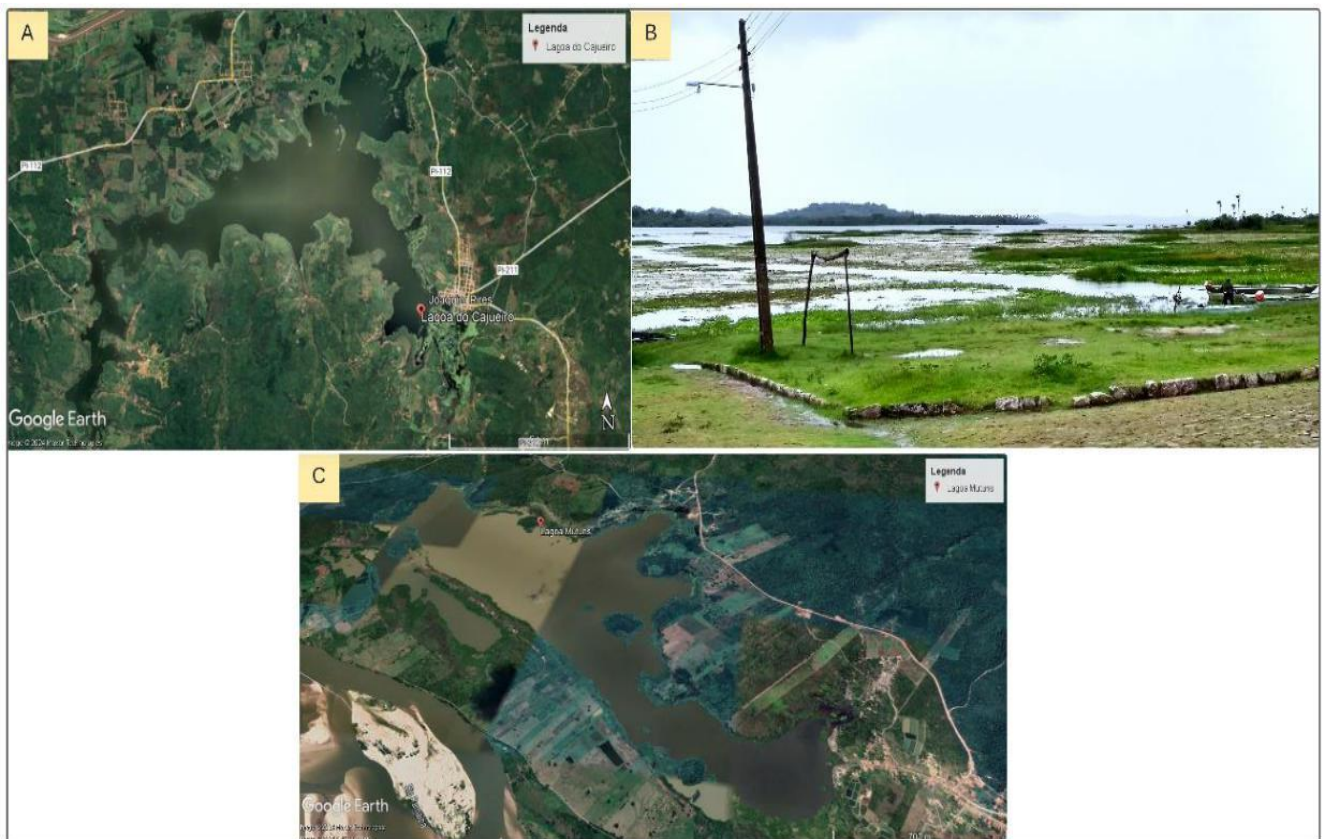
Em termos geossistêmicos, a hidrografia é considerada por vários autores um dos componentes essenciais dos sistemas naturais da Terra. Historicamente a dinâmica hidrográfica enquanto geossistema vem sendo discutida por autores da Geografia Física há anos, com por exemplo: Bertrand (1971), Sochava (1977), Cavalcante (2013) e Bertrand; Bertrand (2009).

Nesse contexto, a dinâmica dos cursos d'água, a rede de drenagem e a disponibilidade de água superficial e subterrânea são geossistemas que influenciam diretamente a dinâmica da

natureza. A hidrografia desempenha um papel crucial na configuração e no funcionamento dos ecossistemas aquáticos e terrestres, além de influenciar diretamente a distribuição da vida e o ciclo de nutrientes (Guerra; Cunha, 1994; Lima; Augustin, 2014; Lima, 2017; Silva *et al.*, 2018; Oliveira; Aquino, 2020; Guerra; Loureiro, 2022).

Diante dessa discussão observa-se que a região do Baixo Parnaíba – Piauí, apresenta um sistema hidrográfico consideravelmente amplo e com a presença de bacias hidrográficas difusas, isso devido à distribuição irregular e dispersa das águas superficiais, característica associada a estruturação do relevo que nessa região é predominantemente suave ou ondulado. Com destaque para a Lagoa do Cajueiro que abrange os municípios de Luzilândia e Joaquim Pires e tem uma capacidade de armazenamento que chega a 34.300 m³ e a Lagoa Mutuns localizada no município de Joca Marques com cerca de 20.000 m³ (Figura 18) (Lima; Augustin, 2014, 2010; Lima, 2017).

Figura 18 - Lagoas do Cajueiro e do Mutuns na seção norte da área de estudo



Legenda: (A) e (B) – Lagoa do Cajueiro; (C)- Lagoa do Mutuns.
Fonte: Imagens Google Earth (2024) e Autores (2021).

O rio Parnaíba, é o principal da drenagem estudada, se comporta como um efetivo rio de planície, com uma média de cerca de 0,1 metro de descida por quilômetro percorrido. Isso significa que o rio tem uma inclinação suave na área de estudo, o que resulta em um perfil

batimétrico reduzido. Em decorrência dessa baixa declividade, o rio tende a apresentar grandes bancos de areia e sedimentos depositados pelo próprio curso d'água e por seus afluentes em seu leito, com margens que podem ser bastante extensas e sujeitas a processos de erosão e deposição.

Devido à baixa velocidade das águas, em alguns trechos dessa região o rio pode apresentar extensas larguras, chegando a mais de 1 km em alguns pontos. Essa característica é comum em áreas de planície aluvial, onde o rio se torna mais sinuoso e seu canal se alarga, formando áreas de baixa profundidade, alta sedimentação e grandes ilhas fluviais, como mostra a Figura 19. (Brasil, 2006; Motta; Gonçalves, 2016).

Figura 19 – Trecho do rio Parnaíba no município de Teresina, entre os povoados Caiçara e São Domingos

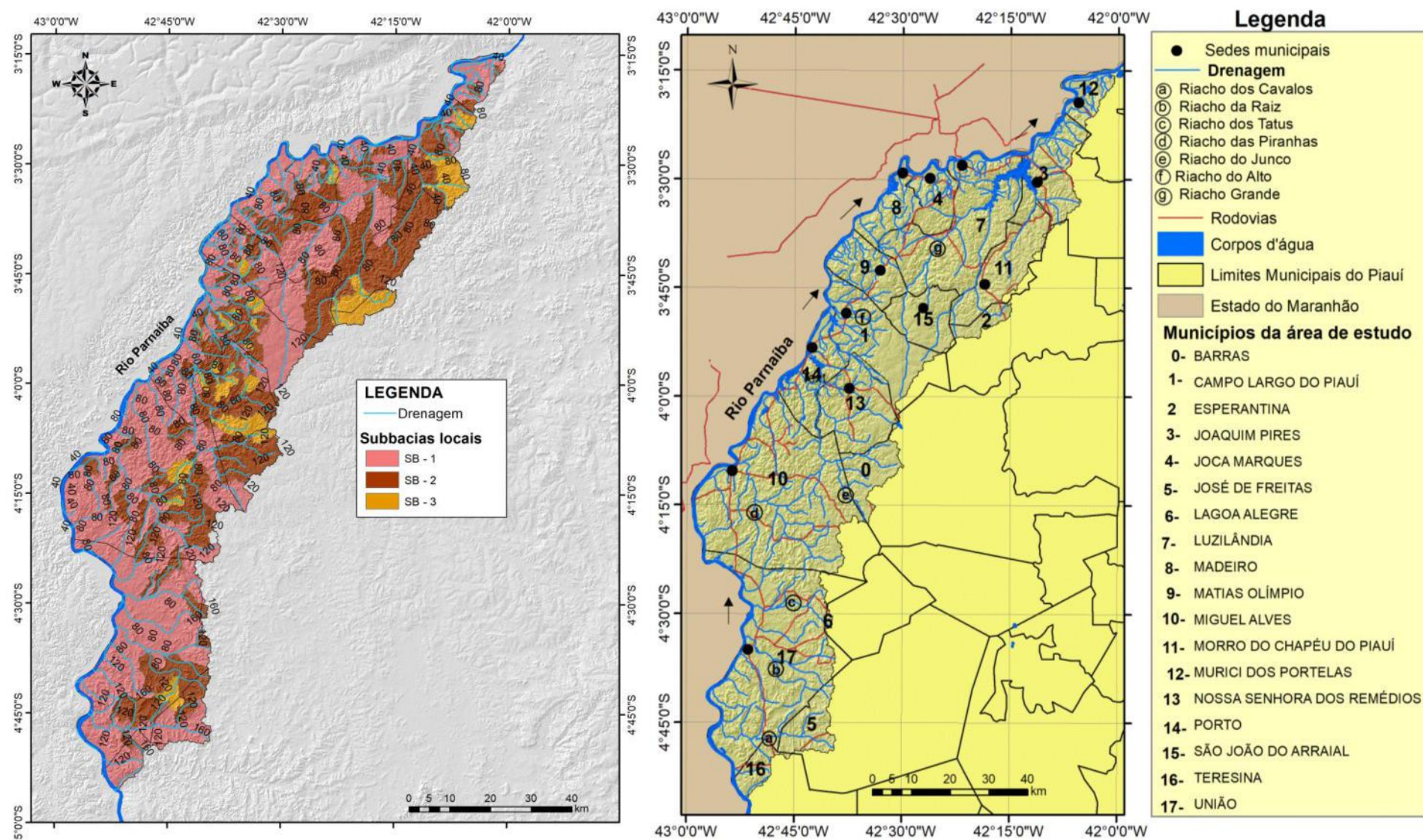


Legenda: Traçado vermelho indica a largura do trecho
 Fonte: Imagem Google Earth (2024)

Além da baixa declividade, que resulta em um perfil batimétrico reduzido, o rio Parnaíba no baixo curso também apresenta variações significativas em seu nível de água. Segundo dados da CPRM (2017) coletados durante o período de janeiro a agosto de 2016, a cota média do rio em Luzilândia foi de 207 cm, 18% abaixo da média histórica para o mesmo período, indicando uma redução na quantidade de água em relação a anos anteriores. Apesar disso, a cota mínima registrada no ano foi de 115 cm, 22% maior que a mínima histórica, sugerindo variações pontuais e a possibilidade de eventos de cheia e seca na região.

As Bacias Difusas do Baixo Parnaíba destacam-se por seu extenso e complexo sistema hídrico. De acordo com a base cartográfica da Agência Nacional de Águas (2006), essa região apresenta cinco ordens hierárquicas, que incluem rios e riachos, os quais participam da estruturação de diversas formas de relevo na paisagem. Essas características resultam na formação de sub-bacias difusas, as quais banham os 17 municípios que compõem a região, conforme indicado no mapa da Figura 20 que desempenham um papel significativo na dinâmica hidrográfica local.

Figura 20 - Mapas das Sub-bacias difusas com altimetria e municípios da área de estudo



Fonte: Organizado pelos autores (2024)

Uso e Cobertura da terra

Analisar a dinâmica do uso e cobertura da terra, é uma abordagem importante para entender as mudanças que ocorrem na paisagem ao longo dos anos, podendo ser um indicativo de tendência de intensificação das atividades agropecuárias, expansão urbana e aumento da exposição do solo, o que pode ter consequências significativas para os recursos naturais e o equilíbrio dos geossistemas da região, além dos desmatamentos para a construção de rodovias, como se observa na área de estudo (Barbosa; Valladares, 2020; Oliveira; Aquino, 2020; Amorim *et al.*, 2021; Cerqueira; Gomes, 2023).

A tabela 4 apresenta a dinâmica do uso e cobertura da terra em hectares (ha) e em porcentagem (%) na área estudada nos anos de 2006 e 2021. Essa análise é fundamental para compreender a relação entre as alterações no uso da terra como parte do contexto ecossistêmico da região.

Tabela 4 – Dinâmica do uso e cobertura da terra da área de estudo.

Classes	Anos			
	2006 (ha)	(%)	2021 (ha)	(%)
Cerrado	194.468,46	32,01	161.283,46	26,55
Floresta	377.989,12	62,21	377.371,75	62,11
Formação Campestre	1.202,16	0,2	1.031,71	0,17
Paisagem Cultivada	10.454,47	1,72	9.014,15	1,48
Pastagem	8.268,92	1,36	32.449,799	5,34
Solo Exposto	2.096,99	0,35	12.714,41	2,09
Urbanização	1.681,31	0,28	2.272,25	0,37
Corpos d'água	11.388,51	1,87	11.413,8	1,88
Total	607549.94	100%	607549.94	100%

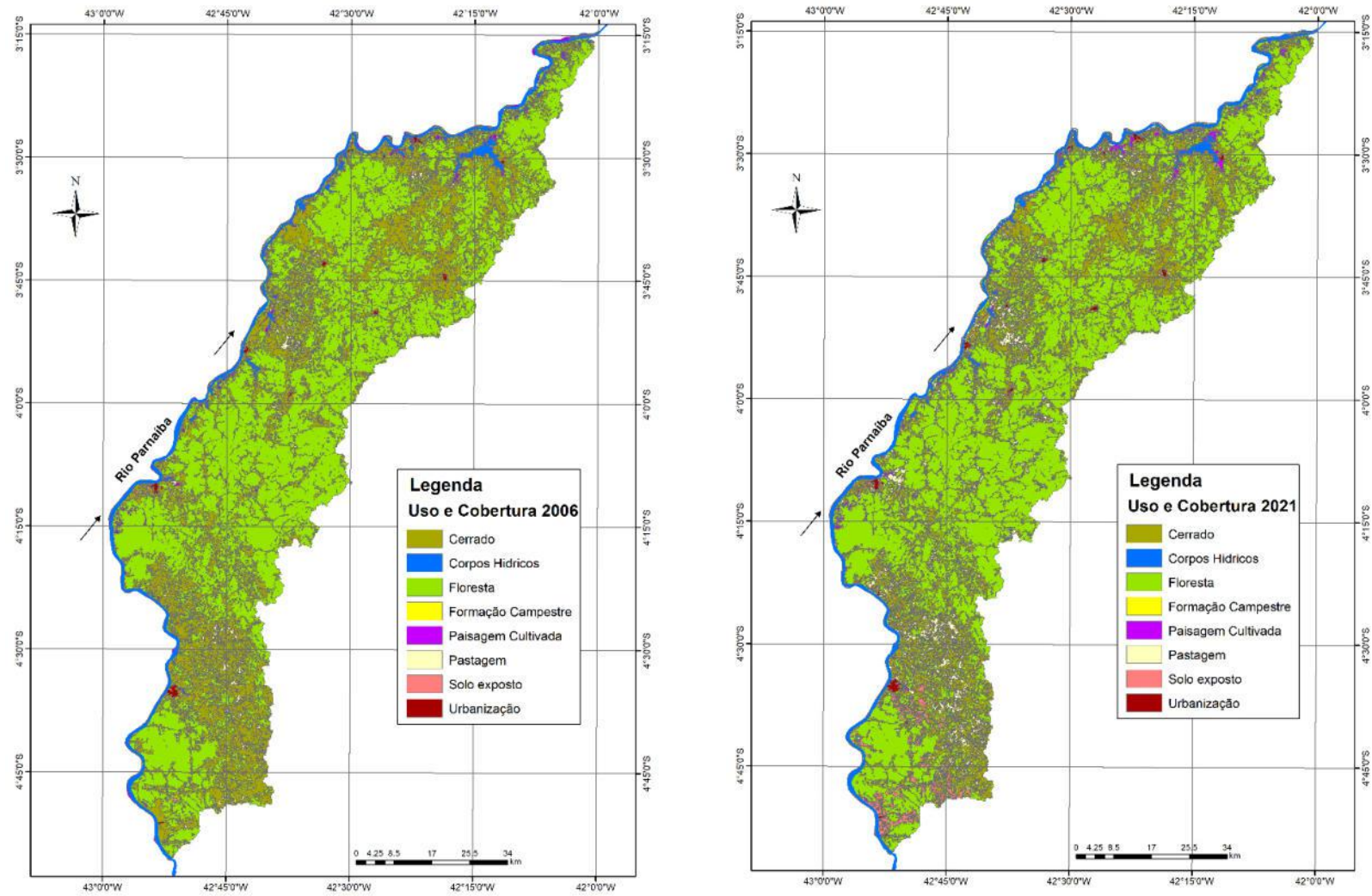
Fonte: Adaptado de Barbosa *et al.* (2024)

Em 2006, a vegetação de Cerrado ocupava 194.468,46 ha, representando 32,01% da área total. Em contraste, em 2021, essa classe diminuiu em mais de 5%, correspondendo a 26,55% da área total. Esse declínio sugere que houve intensificação dos processos de desmatamento nesse período de cerca de duas décadas e, possivelmente, conversão do Cerrado em outras formas de uso da terra, como paisagem cultivada e pastagens.

A floresta correspondeu à classe dominante em 2006, cobrindo mais de 377.000 ha, ou 62,21% da área total. Em 2021, essa cobertura permaneceu praticamente estável, com (62,11%). Isso indica uma relativa estabilidade na área de floresta, maior que no cerrado, o que pode ser

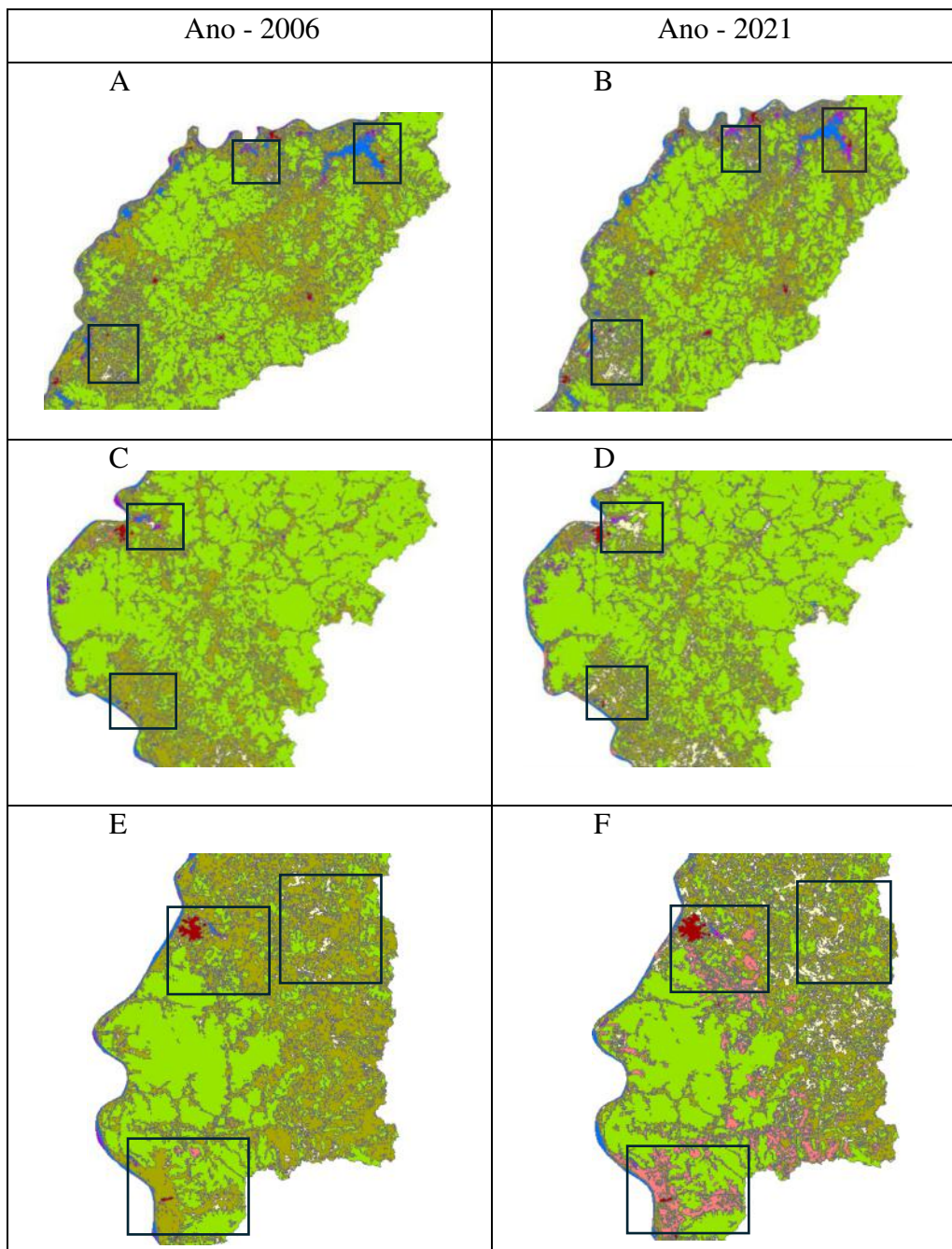
atribuído à redução do uso da terra nessa área. Já as áreas de pastagem aumentaram significativamente de 8.268,92 ha (1,36%) em 2006 para 32.449,799 ha (5,34%) em 2021. Esse aumento sugere uma expansão da atividade pecuária na região, o que pode ter impactos ambientais significativos, como a compactação do solo e a redução da biodiversidade, o que, paralelamente, indicam impactos positivos no setor econômico local. Nos mapas de espacialização dessas classes (Figura 21) é possível observar essa dinâmica.

Figura 21 – Mapa do uso e cobertura da terra relativo aos anos de 2006 e 2021.

Fonte: Barbosa *et al.*, (2024)

As áreas de solo exposto também aumentaram de 2.096,99 ha (0,35%) em 2006 para 12.714,41 ha (2,09%) em 2021. Esse aumento pode estar relacionado à expansão das atividades agrícolas e de mineração, que muitas vezes resultam em degradação do solo e aumento da erosão. Na Figura 22 é possível observar de forma mais aproximadas as mudanças na cobertura da terra em diferentes pontos da área de estudo.

Figura 22 – Mosaico comparativo de uso e cobertura da terra com destaque para as principais mudanças.



Fonte: Organizado por Barbosa (2024).

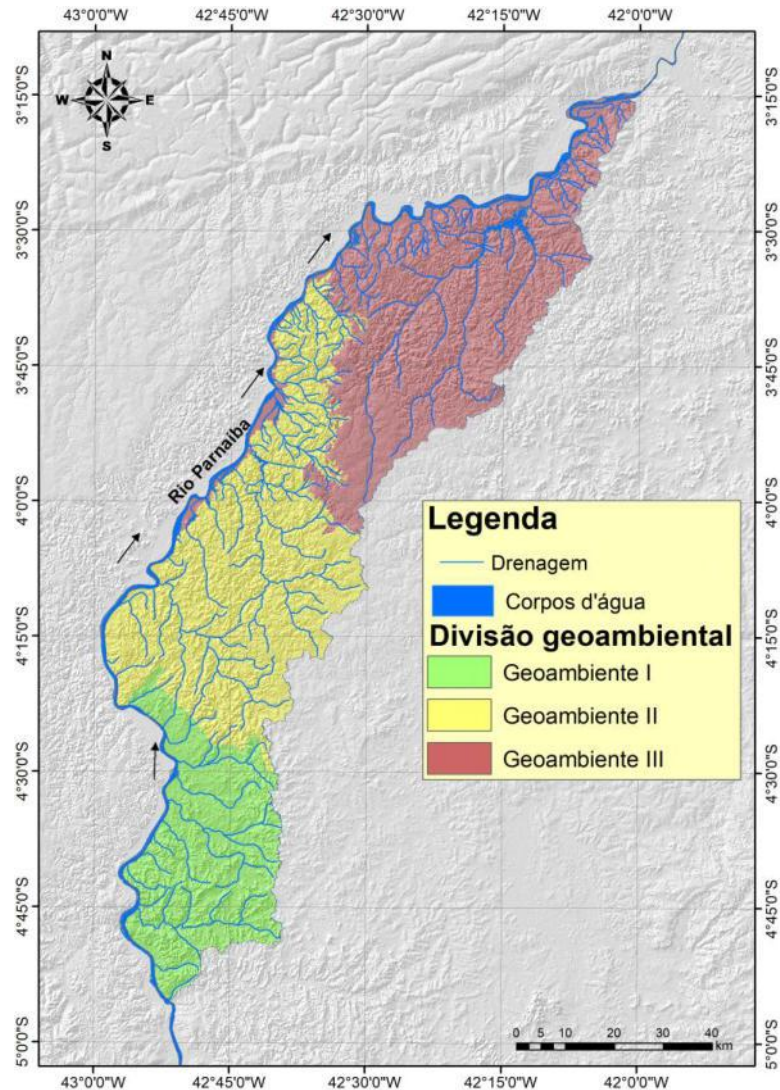
A urbanização também aumentou, passando de 1.681,31 ha em 2006 para 2.272,25 ha em 2021. Embora esse aumento pareça pequeno em termos absolutos, ele representa um aumento significativo na área urbanizada, impactando na disponibilidade de recursos hídricos e na qualidade do ar e da água.

Gestão sustentável dos recursos naturais nas Bacias Difusas do Baixo Parnaíba – Piauí

Considerando a análise geoambiental associada a gestão sustentável dos recursos naturais, observa-se que esse tipo de avaliação se torna uma ferramenta importante para preservação e manutenção da qualidade de vida. Diante da disponibilidade articulada de dados dos sistemas naturais é possível gerir com mais efetividade tanto setores como economia quanto a consciência da sociedade sobre a importância da preservação ambiental (Lira; Cândido, 2013; Hemeda, 2021).

Para uma melhor análise das características ambientais de uma área, o agrupamento de fatores que interagem ou não entre si torna-se uma oportunidade de aprimorar o entendimento de diferentes dados relacionados aos aspectos físicos e conduzir aferição que auxiliem na identificação de fragilidades e potencialidades (Trentin, 2005; Morais, 2013; Cordeiro *et al.*, 2017; Mattos; Paula, 2017). Com a diversidade de recursos naturais presente na área de estudo, o seccionamento da área para uma análise integrada mais eficiente, foi realizado, no mapa da Figura 23, apresenta a representação dos três Geoambientes da área identificados neste trabalho, essa divisão foi baseada na união de feições geomorfológicas presentes nas áreas sul, centro e norte da área.

Figura 23- Representação espacial dos Geoambientes



Fonte: Organizado por Barbosa (2024)

No geoambiente I, localizado ao sul das BDBP-PI, foi constatado uma área com disponibilidade de recursos hídricos, com alta aptidão para atividades agrícolas, tornando-se uma potencialidade local. Práticas agrícolas sustentáveis, como agricultura orgânica e sistemas de irrigação eficientes podem ser desenvolvidos e estimulados nessa região.

Entretanto, observou-se a partir da análise do uso e cobertura da terra, um aumento do solo exposto ao longo dos anos, de acordo com o “estudo das potencialidades, investimento e reflorestamento do vale do médio e baixo Parnaíba” (CEPRO, 1993). Nessa área são indicadas também restrições para a Silvicultura, o que indica a necessidade de medidas de conservação do solo e reflorestamento, além de práticas agrícolas que minimizem a degradação ambiental.

No geoambiente II, localizado na área central, foi identificado uma alta disponibilidade de recursos naturais, o que sugere que a área pode ser bem aproveitada para atividades

sustentáveis, como agroecologia e turismo rural, desde que implementadas práticas de manejo adequadas.

Porém, existe nessa área uma vulnerabilidade à degradação ambiental e a propensão para eventos de erosão hídrica, o que indica necessidade de medidas de conservação do solo e da vegetação, bem como o monitoramento das atividades humanas na região, pois a população dos municípios pertencentes a essa área vem crescendo. No quadro 6 é possível observar uma síntese integrativa dos recursos naturais observados nos Geoambientes I, II e III.

Quadro 6 – Quadro síntese das Unidades Geoambientais das BDBP-PI

Unidades	Geologia	Geomorfologia	Solo*	Clima (precipitação)	Hidrografia	Uso e Cobertura	Potencialidades	Fragilidades
Geoambiente I	Formação Piauí e Pedra de Fogo	Superfícies Aplainadas, Degradadas e Conservadas	Planossolos, Latossolos e Argissolos	~1460 - 1580 (mm)	Riachos da Raiz e dos Cavalos	Solo exposto, pastagem, urbanização, vegetação nativa	Aptidão para agriculturas específicas, disponibilidade de água para atividades agrícolas.	Suscetível à erosão e degradação do solo. Restrição para Silvicultura
Geoambiente II	Predominância Formação Poti e Grupo Barreiras	Predominância de Colinas Amplas e Suaves	Latossolo e Argissolos	~1600 - 1700 (mm)	Riachos do Juco, das Piranhas e da Ameixa	Vegetação nativa, urbanização e pastagem	Boa disponibilidade de recursos naturais. Aptidão regular para pastagem plantada	Vulneráveis à degradação ambiental. Propensa para eventos de erosão hídrica
Geoambiente III	Formação Longá, Barreiras e Depósitos Aluvionares	Tabuleiros, Planícies flúvias ou flúvio-lacustres e colinas	Neossolos Litólicos, Plintossolos, Luvisolos, Chernossolos e Latossolos	~1340 - 1600 (mm)	Riacho Grande, Riacho do Alto, Lagoas do Cajueiro e Mutuns	Paisagem cultivada, vegetação nativa e urbanização	Solos férteis para agricultura. Boa disponibilidade de recursos naturais	Vulneráveis à degradação ambiental. Propensa para eventos de erosão hídrica

(*) Neossolos foram encontrados em toda proximidade do rio Parnaíba

Fonte: Organizado por Barbosa (2024)

No geoambiente III, região norte, foi constatada uma maior diversidade de recursos naturais, com ênfase para diferentes tipos de solo, sendo favorável para a agricultura, com a presença de solos férteis. Os recursos dessa área podem ser aproveitados para promover o desenvolvimento sustentável da região, por meio de práticas agrícolas sustentáveis e conservação da biodiversidade.

A fragilidade do geoambiente III está associada à possibilidade de degradação ambiental e a propensão para eventos de erosão hídrica indicando a necessidade de medidas de conservação do solo, reflorestamento e manejo adequado dos recursos naturais.

Em geral, para uma gestão sustentável dos recursos naturais em cada geoambiente, é essencial adotar práticas que promovam a conservação do solo, a proteção da vegetação nativa, o uso eficiente da água e a diversificação das atividades econômicas, visando a manutenção da biodiversidade e o bem-estar das comunidades locais.

Com base nos dados apresentados nas diferentes unidades geoambientais, é possível concluir que a região estudada possui características distintas em termos geológicos, climáticos, geomorfológicos, hidrográficos, de solo e de uso e cobertura da terra. Essas características influenciam diretamente nas potencialidades, fragilidades e nos processos erosivos.

4.2 Erosão Real e Potencial das BDBP – PI

Os resultados das análises de erosividade da chuva para a área das Bacias Difusas do Baixo Parnaíba revelam um valor médio de $9051,52 \text{ MJ.mm.h}^{-1}.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e um desvio padrão de 148,33, demonstrando o alto potencial erosivo da chuva nesta região. Levando em consideração as diferenças nessas áreas, bancos de dados e séries históricas, os valores de erosividade neste estudo corroboram os obtidos por Moraes e Silva (2020) para a bacia do rio Longá, um afluente do rio Parnaíba localizado a leste da área de estudo, onde os valores críticos variaram de 8865 a $9540 \text{ MJ.mm.h}^{-1}.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

Portanto, o fator R calculado para a área a jusante do rio Parnaíba variou de 7943,46 a $10.081,61 \text{ MJ.mm.h}^{-1}.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, com a intensidade variando de média a muito forte, como pode ser observado na Tabela 5.

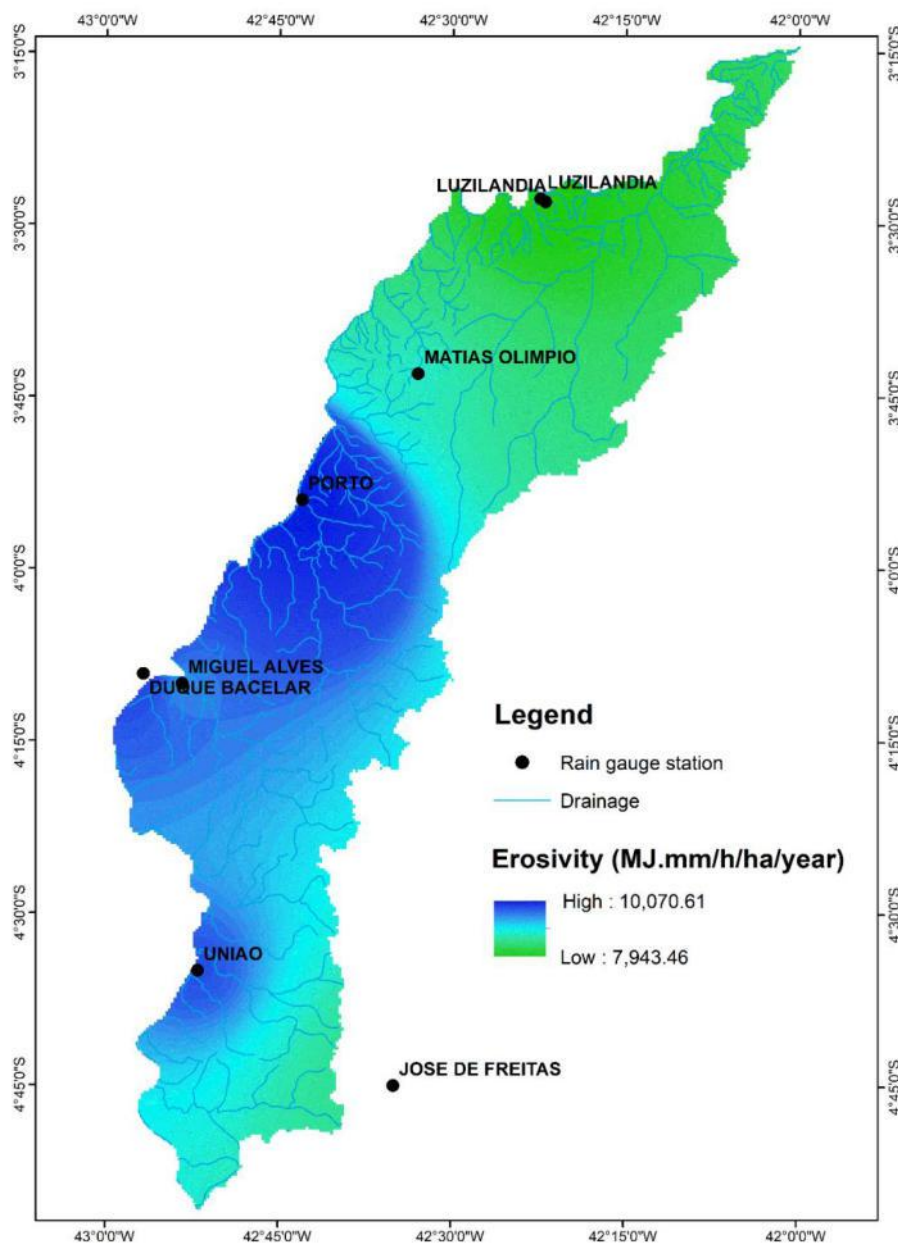
Tabela 5 - Interpretação da Erosividade (fator R).

Classificação (MJ.mm.h⁻¹.ha⁻¹.ano⁻¹)	Interpretação da Erosividade
R < 6.000	Muito fraco
6.000 > R < 7.500	Fraco
7.500 > R < 8.500	Média
8.500 > R < 9.000	Forte
R > 9.000	Muito Forte

Fonte: Adaptado de Morais e Silva (2020).

O mapa de espacialização do fator R demonstra a grande variabilidade espacial dessas chuvas, como pode ser observado na Figura 24. A partir dos dados vinculados às chuvas individuais monitoradas por estações automáticas e convencionais no Piauí, (Nascimento *et al.*, 2020a) destaca que, no estado do Piauí, os maiores volumes de chuva anual estão concentrados nas regiões norte e noroeste, atingindo valores superiores a 1500 mm, com os meses de fevereiro a agosto sendo os mais chuvosos, ratificando os altos valores de R encontrados nesta pesquisa para esta região. Na área de estudo, os valores específicos variaram aproximadamente de 1279 a 1710 mm.

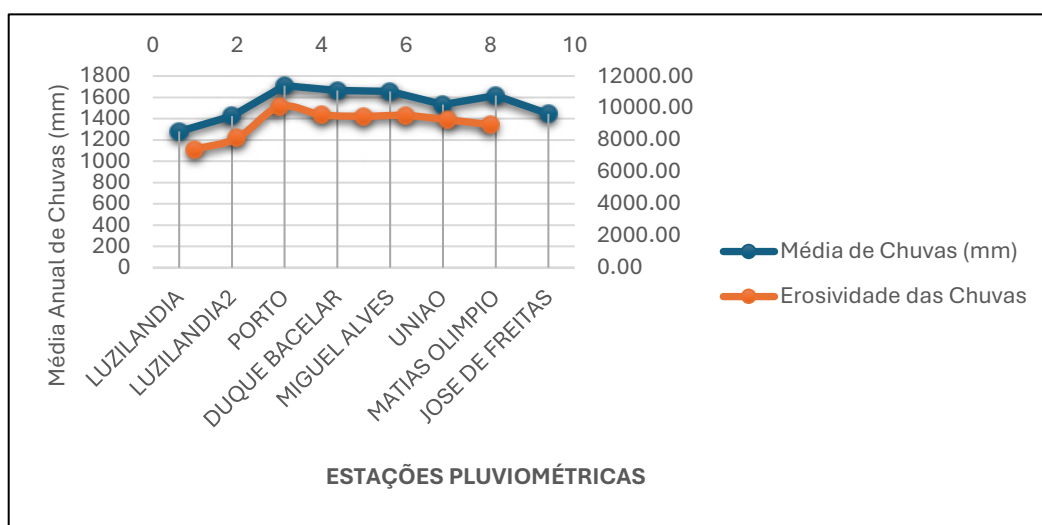
Figura 24 - Mapa da Erosividade (fator R)



Fonte: Barbosa *et al.*, (2024)

No gráfico 2, que relaciona a erosividade (fator R) com a precipitação média anual nas estações chuvosas, mostra uma convergência interessante entre esses dois parâmetros. A proximidade e semelhança nos padrões dessas linhas indicam que, apesar das variações mensais, a erosividade permanece relativamente consistente ao longo do ano. Essa observação sugere uma correlação intrínseca entre a erosividade da chuva e os volumes de chuva anuais. Compreender essa relação é essencial para avaliar o potencial erosivo da chuva em diferentes épocas do ano e é fundamental para estratégias de prevenção e controle da erosão do solo.

Gráfico 2 – Relação entre Erosividade (Fator R) e média anual de chuvas



Fonte: Barbosa *et al.* (2024)

Essa análise conjunta dos padrões sazonais de chuva e sua relação com a erosividade fornece uma visão abrangente das condições ambientais na área estudada, contribuindo para uma interpretação mais precisa dos processos erosivos na região.

Erodibilidade (K)

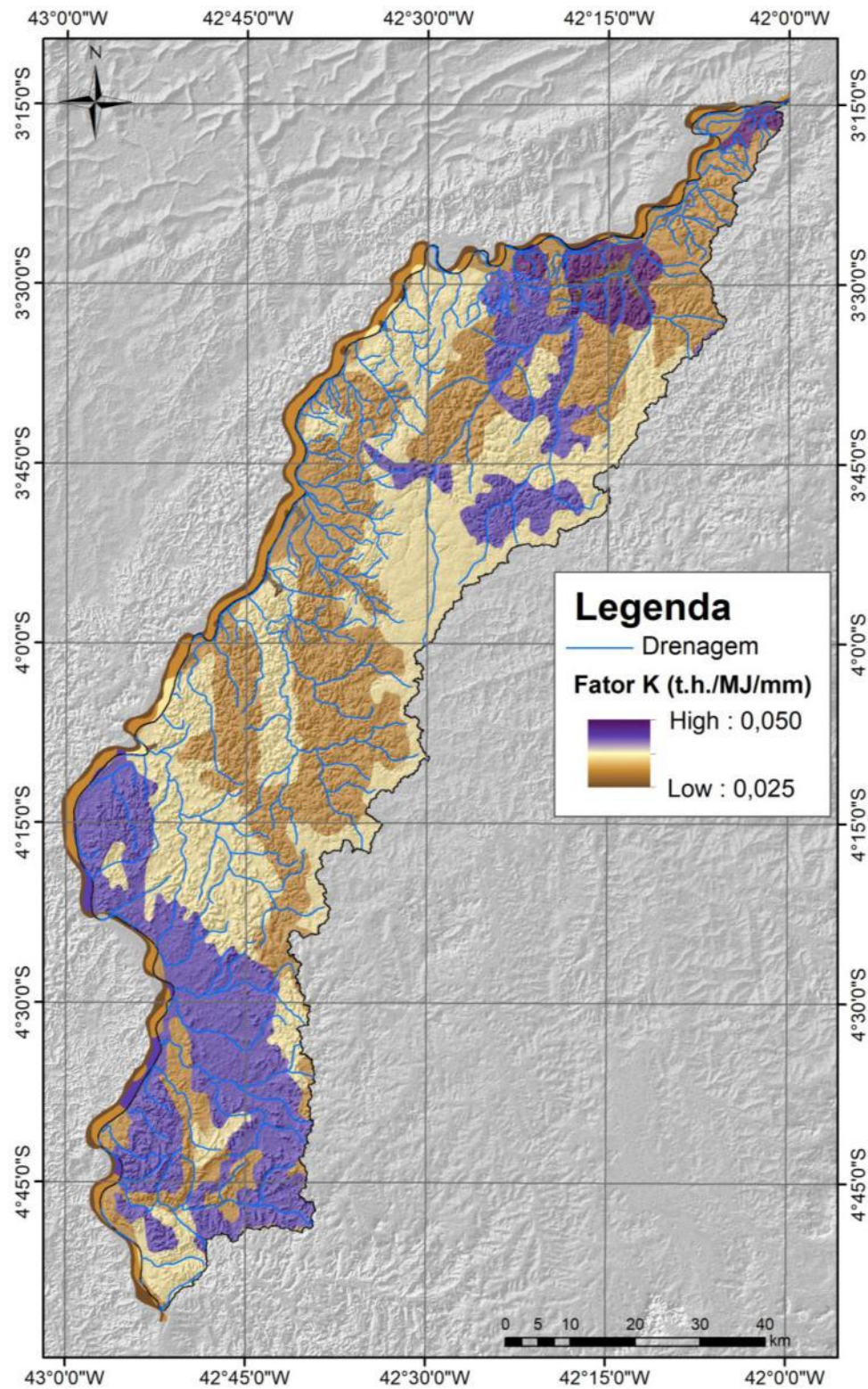
A combinação de chuvas com forte erosividade e solos frágeis e desprotegidos favorece o desencadeamento de processos erosivos. A Tabela 6 apresenta as classes de solos encontradas no trecho das Bacias Difusas do Baixo Parnaíba, seguidas de seus valores de erodibilidade, associados à sua área na bacia.

Tabela 6 - Classificação de solos em função do fator da erodibilidade do solo (K)

Classes de Solos ¹	Classes de Solos ¹	Classificação ²	Área		Fator K^3 ton.ha.h/ha.MJ.m m			
			ha	(%)				
A1	NEOSSOLOS	Média	38,805.56	5.97%	0.028			
A4	FLÚVICOS	Alta			0.032			
BV1	CHERNOSSOLOS	Muito alta	16,559.63	2.55%	0.05			
LA10	LATOSSOLO AMARELO	Média	74,811.94	11.50%	0.025			
LA11		Média			0.028			
LA13		Média			0.028			
LA5		Alta			0.035			
LA8		Alta			0.037			
LA9		Alta			0.035			
PE10		Alta			0.031			
PE11		LUVISSOLOS			Alta	49,729.27	7.65%	0.036
PE9		PLANOSSOLO			Muito Alta	25,019.50	3.85%	0.043
PL3					Alta			0.039
PT1	Média		0.027					
PT12	Muito Alta		0.047					
PT3	Alta		0.038					
PT9	Alta		0.037					
PV10	Alta		0.031					
PV11	Alta		0.039					
PV12	ARGISSOLOS	Alta	269,956.7	41.51%	0.036			
PV13		Alta			0.037			
PV14		Média			0.03			
PV20		Muito alta			0.042			
R1	NEOSSOLOS	Alta	43,476.21	6.68%	0.041			
R2	LITÓLICOS							
*	ÁGUA	*	23,011.33	3.54%	*			
*	ILHA	*	210.4231	0.03%	*			
Total	*	*	650,418.13	100%	*			

Fonte: Organização Barbosa (2023); baseado em Jacomine¹ (1986), Mannigel *et al.* (2008)², Aquino; Oliveira, (2017)³ (*) sem valor atribuído.

A espacialização do fator K pode ser encontrada na Figura 25. Os valores de erodibilidade do solo (fator K) variaram de 0,025 a 0,050 t h. MJ⁻¹. mm⁻¹ com predominância, segundo estudos desenvolvidos por Aquino e Oliveira, (2017), da classe de erodibilidade média a muito alta, sendo a classe dos Argissolos, a de maior área (>50%), também a classe com maior variabilidade do fator K com dominância da classe de alta erodibilidade (0,031 – 0,042 t h.MJ⁻¹.mm⁻¹), situam-se em relevo plano a ondulado com inclinação variando de 3 a 20%, indicando suscetibilidade a processos erosivos, segundo Salomão (2012).

Figura 25 - Espacialização do Fator K 

Fonte: Barbosa *et al.* (2024)

Observa-se que os solos classificados com baixa erodibilidade, conforme tabela 6, não aparecem na área de estudo, e a classe média apresenta os menores valores do fator K (Tabela 6). Além dos Argissolos, outras classes de solos apresentaram erodibilidade "muito alta" na

bacia, são os Argissolos (7,65%) e os Chernossolos (2,55%), estes atingem $0,50 \text{ t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$, valor máximo do fator K nesta análise e está localizado principalmente próximo a corpos d'água, na área de estudo, esses solos possuem um horizonte subsuperficial argiloso, como os Argissolos.

A classe de solos com considerável erodibilidade, são os Latossolos que correspondem a 11,50% da área e o fator K variando de 0,025 a $0,035 \text{ t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$, nota-se que a topografia influencia diretamente nos processos erosivos destes solos, a área das BDBP - PI é formada principalmente por morros largos e suaves, platô dissecado e superfícies achatadas degradadas.

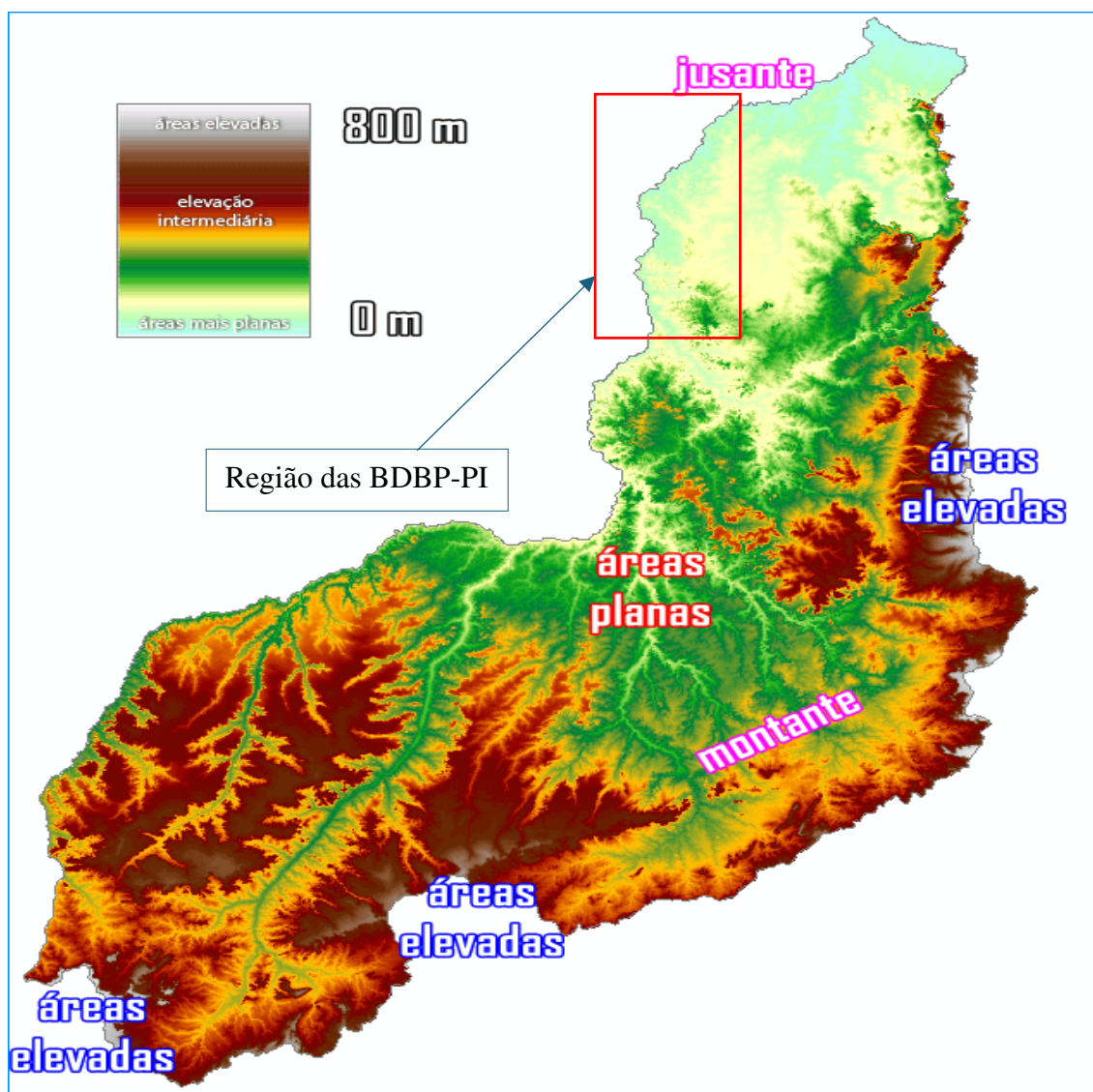
De acordo com o mapa da Figura 25 e Tabela 6, há predomínio dos valores de K localizados nas classes de erodibilidade alta e muito alta na área de estudo, o que corrobora com estudos do fator K desenvolvidos na área (Aquino; Oliveira, 2017), onde os autores concluíram que cerca de 94,4% dos solos do Estado do Piauí predominam classes do fator K, como erodibilidades alta e muito alta.

Fator topográfico (fator LS)

O fator LS pode ser estimado através de medição de campo ou com um modelo digital de elevação (DEM), incorporando-os em ambiente SIG é possível a determinação de S (declive) e L (Comprimento da rampa) que podem ser combinados para formar o único fator LS (Agele *et al.*, 2013)

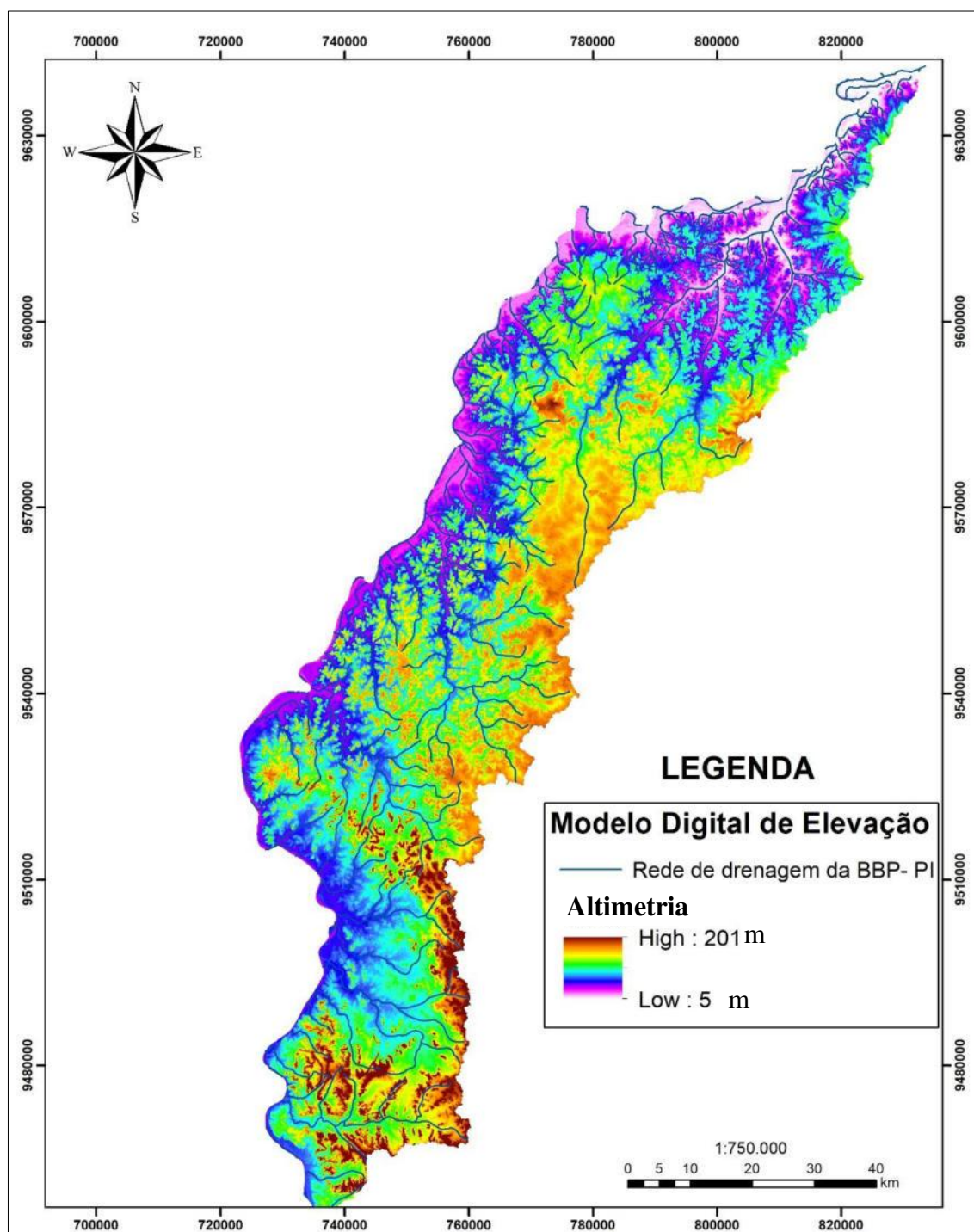
Para um melhor entendimento da estrutura topográfica da área de estudo, é importante observar primeiramente o Modelo Digital de Elevação do estado do Piauí e mais especificamente da Bacia do Baixo Parnaíba como mostram as figuras 26 e 27.

Figura 26 – Modelo Digital de Elevação do Piauí



Fonte: Adaptado de Jorge Santos (2022)

Figura 27 – Modelo Digital de Elevação da BBP - PI



Fonte: Elaborado por Barbosa (2021)

O fator LS , como mencionado anteriormente, pode ser estimado através de medição de campo ou com um modelo digital de elevação (MDE), que concilia os fatores de comprimento da rampa L com a inclinação S , neste contexto, o fator L representa uma dimensão linear que teoricamente indica uma distância correspondente ao início da formação do fluxo (fluxo

hortoniano) até o ponto em que se encontra uma condição favorável para o depósito de sedimentos ou um canal (Agele *et al.*, 2013; Li, 2013; Moisa *et al.*, 2022; Renard *et al.*, 1996).

Os valores de *LS* variaram de 0,01 nas partes com menor declividade a 3,0 nas declividades mais íngremes, mas as áreas com fator *LS* entre 0,6 e 3,0 representaram apenas 0,01% de toda a área, sendo que 80,75% obtiveram fator *LS* entre 0 e 0,01. Além disso, 18,55% da bacia hidrográfica apresentou fator *LS* entre 0,01 – 0,08. Portanto, observa-se que grande parte da área apresenta diminuição do potencial erosivo ($LS < 1$), como pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7. – Distribuição do Fator *LS* nas BDBP- PI.

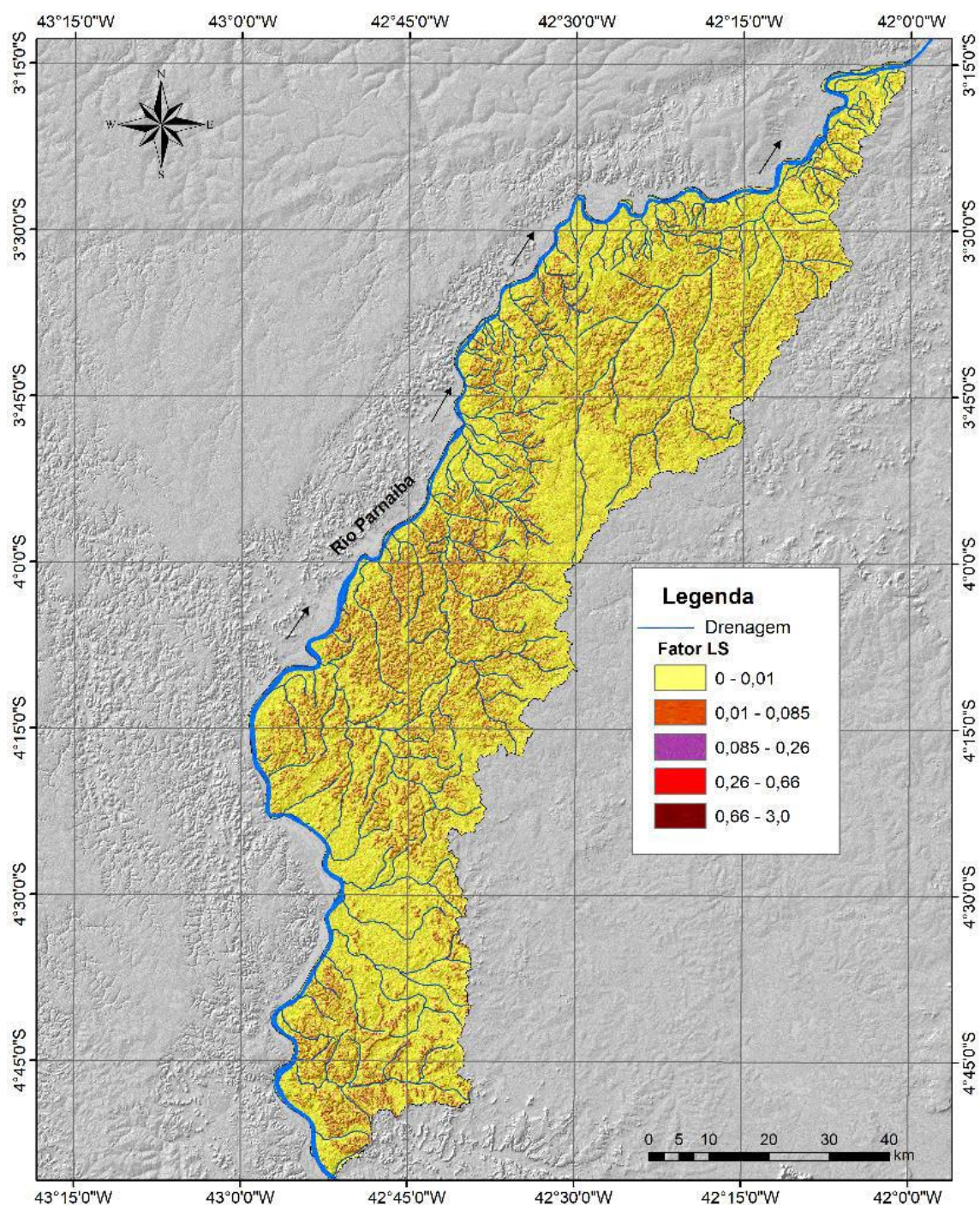
Fator (LS)	Área (km ²)	Área (%)
0 – 0.01	4,906.37	80.75
0.01 – 0.08	1,127.10	18.55
0.08 – 0.2	35.53	0.58
0.2 – 0.6	5.69	0.09
0.6 – 3.0	0.79	0.01

Fonte: Organizado por Barbosa (2022)

Portanto, é possível notar que o *LS* é maior nas áreas mais íngremes e com maiores comprimentos de rampa e menores valores de *LS* aparecem em áreas de suave relevo, como nas proximidades da rede de drenagem, a espacialização do fator *LS* pode ser observada na Figura 28 (Ozcan *et al.*, 2008; Li, 2013; Lu *et al.*, 2004; Moisa *et al.*, 2022).

Em termos de espacialização, os maiores valores do fator *LS*, 0,2 – 3,0 (adimensional) ocorrem de forma mista em toda a bacia, concentrando-se mais na região centro-sul. Esses valores estão relacionados a áreas de relevo ondulado a forte ondulado, com morros planos (colinas com cumes amplos e relativamente nivelados) e lisos e superfícies aplainadas degradadas e conservadas, mais ao sul da bacia, como mostra a Figura 28.

Figura 28 - Espacialização do fator topográfico (fator LS)



Fonte: Organizado por Barbosa (2023)

A distribuição espacial do fator LS mostrou que grande parte da bacia apresenta valores de LS inferiores a 1, indicando baixa influência do fator para erosão potencial e corrente. A partir dos resultados obtidos pode-se observar que menos de 1% da bacia apresentou valores de LS maiores que 1, porém, no campo, observou-se a presença de áreas declivosas que são

influenciadas pelos divisores topográficos da bacia, atuando na dinâmica dos processos erosivos.

Uso e cobertura do solo (Fator CP)

A espacialização dos resultados do fator *CP* está diretamente relacionada ao uso e cobertura do solo na área de estudo. Os índices foram definidos com base em referências com uso e cobertura vegetal semelhantes à área de estudo. Portanto, os valores relacionados ao uso e cobertura, manejo e práticas conservacionistas do solo (Fator *CP*) variam de 0 a 1, conforme (Silva, 2004; Bertone; Lombardi Neto, 2014; Cunha *et al.*, 2017; Durães; Mello, 2016; Farinasso *et al.*, 2006; Oliveira, 2012; Barbosa *et al.*, 2024).

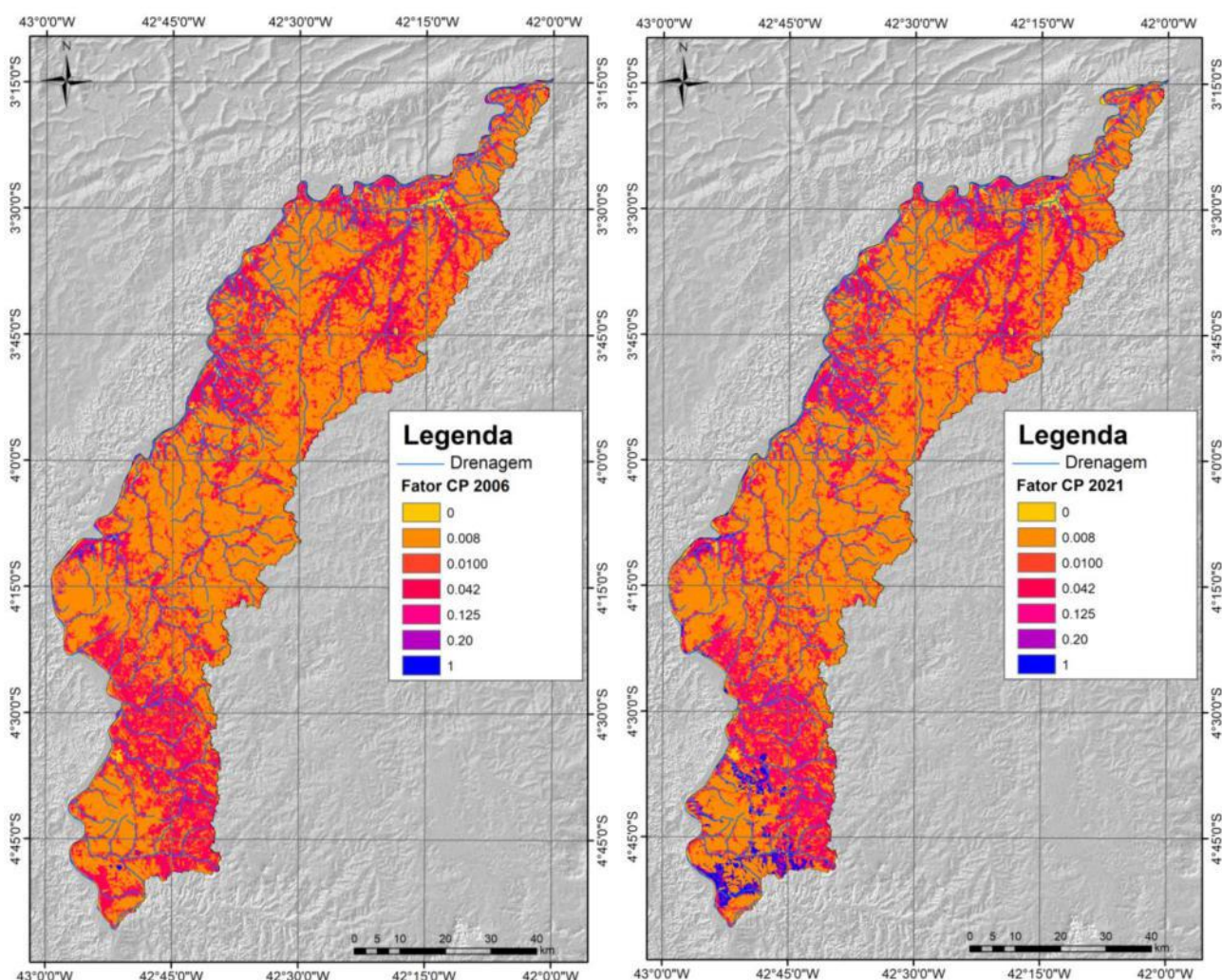
Na validação da classificação de uso e cobertura, os resultados estatísticos de acurácia global da coleção 7.0 do Mapbiomas, nível 1, foi de 91,3%. Os menores valores estão relacionados às condições de não exposição do solo, como *CP* zero, ou baixa exposição a processos erosivos, como rodovias pavimentadas, construções rurais e urbanas e vegetação nativa, como florestas. Os maiores valores estão relacionados às classes em que o solo está mais exposto à erosão hídrica, como pastagem, terra cultivada e solo exposto.

A espacialização do fator *CP*, em 2006, indica que as categorias com zero e baixos valores de *CP* são observadas em diversas localidades de norte a sul da área e correspondem a aproximadamente 64,56% da área total. Os valores mais significativos estão associados à terra cultivada, pastagem e bioma Cerrado (35,9%). Vale ressaltar que o Cerrado do Piauí assistiu à expansão dos usos da terra para agricultura, pastagens e áreas não vegetadas. Desde 1990, a transformação da paisagem do Cerrado se intensificou, variando em mais de 409.000 hectares, entre os anos de 2010 e 2019 (Tabela 8, Figura 29) (Cerqueira; Gomes, 2023).

Tabela 8 – Relação da dinâmica do uso e cobertura com o fator *CP*

Classes	Anos				Fator <i>CP</i>	Fonte
	2006		2021			
	(ha)	(%)	(ha)	(%)		
Cerrado	194,468.46	32.01	161,283.46	26.55	0.042	Farinasso <i>et al.</i> (2006).
Floresta	377,989.12	62.21	377,371.75	62.11	0.008	Cunha <i>et al.</i> (2017).
Campo	1,202.16	0.2	1,031.71	0.17	0.0100	Oliveira (2012)
Paisagem cultivada	10,454.47	1.72	9,014.15	1.48	0.20	Barbosa <i>et al.</i> , (2015)
Pastagem	8,268.92	1.36	32,449.799	5.34	0.125	Bertone; Lombardi Neto (2014)
Solo Exposto	2,096.99	0.35	12,714.41	2.09	1.00	Bertoni; Lombardi Neto (2014)
Urbanização	1,681.31	0.28	2,272.25	0.37	0.00	Silva (2004)
Corpos d'água	11,388.51	1.87	11,413.8	1.88	0.00	Durães; Mello (2016)

Fonte: Organizado por Barbosa (2023)

Figura 29 – Espacialização do fator *CP* na área de estudo

Fonte: Elaborado por Barbosa (2023)

Em 2021, há uma mudança na distribuição do fator *CP* em relação a 2006, os valores mais representativos aumentaram sua proporção em relação à área total, como pastagem, em 2021 é de 5,34%, em 2006 foi de 1,36%, corroborando a discussão apresentada anteriormente (Cerqueira; Gomes, 2023) sobre a expansão agrícola no *Cerrado* do Piauí. Sua área total na bacia diminuiu de 32,01% em 2006 para 26,55% em 2021. Outra variação significativa observada foi no *CP* máximo, correspondente ao solo exposto (*CP*=1), que em 2006 era de 0,35% e em 2021 aumentou para 2,09%. Portanto, os dados ratificam o cenário de degradação do *Cerrado* e aumento da probabilidade de ocorrência de processos erosivos, devido à maior exposição do solo.

Tendo em vista as diferentes escalas de análise de uso e cobertura da terra, vale ressaltar que resultados semelhantes foram observados na região da bacia hidrográfica do Alto Parnaíba (Piauí – Maranhão) (Farinasso *et al.*, 2006). Os autores destacam o uso do solo e o tipo de densidade da vegetação como importantes fatores que reagem à erosão e ao transporte de sedimentos (CERQUEIRA; GOMES, 2023; CUNHA *et al.*, 2017; SOUSA; PAULA, 2019).

Estimativa do potencial erosivo do solo e da erosão real das BDBP – PI

Os processos erosivos são eventos que ocorrem naturalmente, mas podem ser intensificados pela atividade humana (Guerra *et al.*, 2014, 2017; 2023; Ionita *et al.*, 2021; Boardman *et al.*, 2021; Barbosa *et al.*, 2021b). Nesse sentido, a análise de fatores naturais torna-se imprescindível em estudos de perda de solo, são fatores como erodibilidade (fator *K*), erosividade (fator *R*) e fatores topográficos (fator *LS*). Apesar das limitações do método, esta análise ajuda a interpretar a influência desses elementos na erosão hídrica.

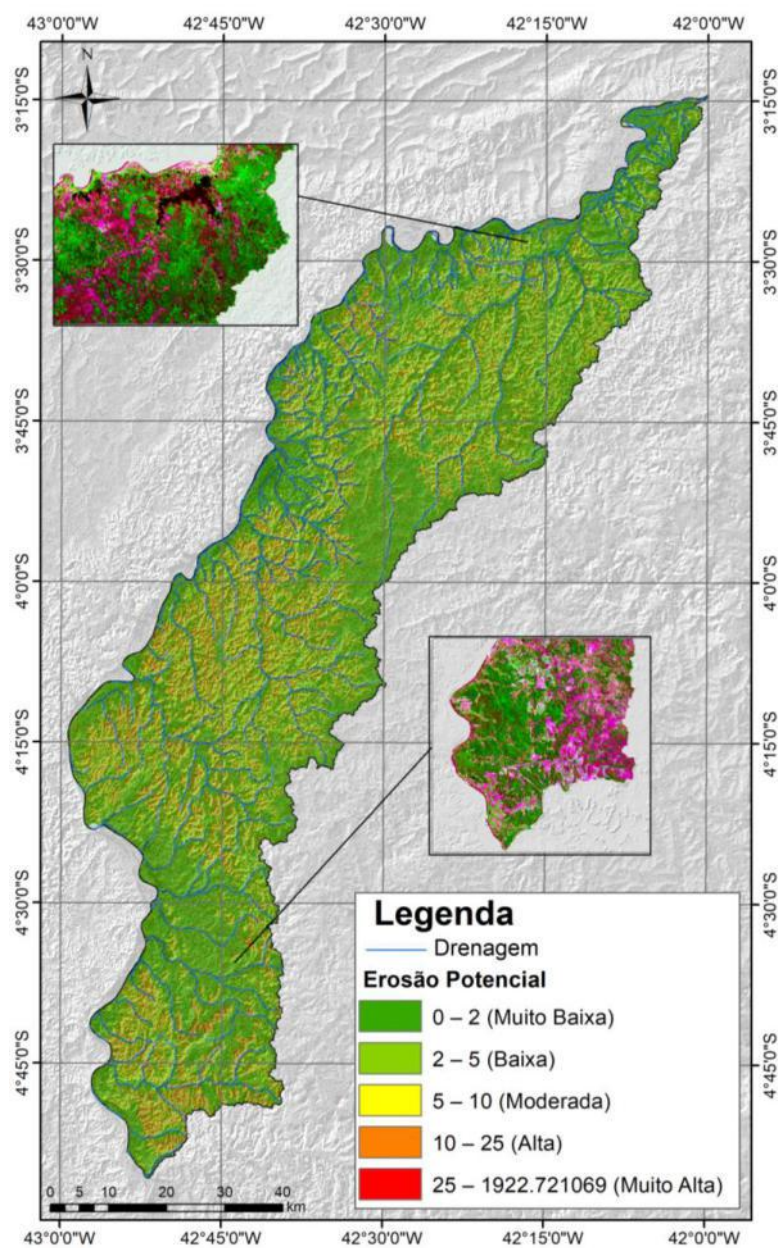
O potencial natural de erosão do solo variou de 61,13% na classe muito baixo a 2,06% na classe muito alto. A classe de predominância de ocorrência do potencial de erosão ao longo da área são classes de potencial fragilidade na classe "muito baixa", seguida por áreas com baixo, moderado, alto e muito alto potencial erosivo, esta última classe obteve valores superiores a 1.600 t.ha⁻¹.ano⁻¹ de perda potencial de solo, com perda média de aproximadamente 4,13 t.ha⁻¹.ano⁻¹ como mostram a Tabela 9 e a Figura 30.

Tabela 9 - Potencial erosivo do solo nas bacias difusas do Baixo Parnaíba, Piauí, Brasil.

Perda de solo em t. ha ⁻¹ ano ⁻¹	Área	
	(ha)	%
0-2 (Muito baixo)	368,695.71	61.13
2-5 (Baixo)	94,987.50	15.74
5-10 (Moderado)	69,546.57	11.53
10-25 (Alta)	57,511.49	9.53
>1.600 (Muito alto)	12,438.88	2.06
4.13 (Perda média)	*	*

Fonte: Organizado por Barbosa (2023)

Figura 30 - Espacialização do potencial erosivo do solo nas BDBP – PI



Fonte: Organizado por Barbosa (2023)

Em geral, a bacia apresentou potencial erosivo natural relativamente baixo, assemelhando-se ao fator topográfico (LS) da região e apresentando baixa correlação com os tipos de solos presentes na área, que são mais arenosos e apresentam alta erodibilidade. Apesar desse cenário, é importante destacar que a ocorrência de relevos com escarpas é uma condição que sempre resultará em valores elevados para o fator LS, diminuindo a influência relativa do fator K (erodibilidade dos solos) e da erosividade da chuva (Fator R), reconhecidos por seus grandes papéis no desencadeamento de processos erosivos (Morais; Silva, 2020; Morais; Sales, 2017; Silva, 2008).

Erosão Real

A erosão real indica as perdas de solo que ocorrem devido à erosão hídrica, considerando o potencial de erosão e as condições atuais de uso do solo, ou seja, os valores do fator *CP*. Neste estudo, essas condições foram analisadas a partir da dinâmica temporal dos anos de 2006 e 2021, devido às limitações do método para grandes áreas, os dados são analisados qualitativamente (Durães; Mello, 2016; Alves *et al.*, 2022; Barbosa *et al.*, 2024).

A perda de solo, indicada pela erosão real na área estudada, variou de $0,01 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ > $100 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, de acordo com a tabela de interpretação adaptada (Beskow *et al.* 2009), há predomínio de áreas com perda de solo na categoria baixo em 2006 com 71,82% da área total e 4,21% nas áreas correspondentes às categorias alta, muito alta e extremamente alta, com erosão média real de aproximadamente $0,0816 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ em 2006 e $0,164$ em 2021.

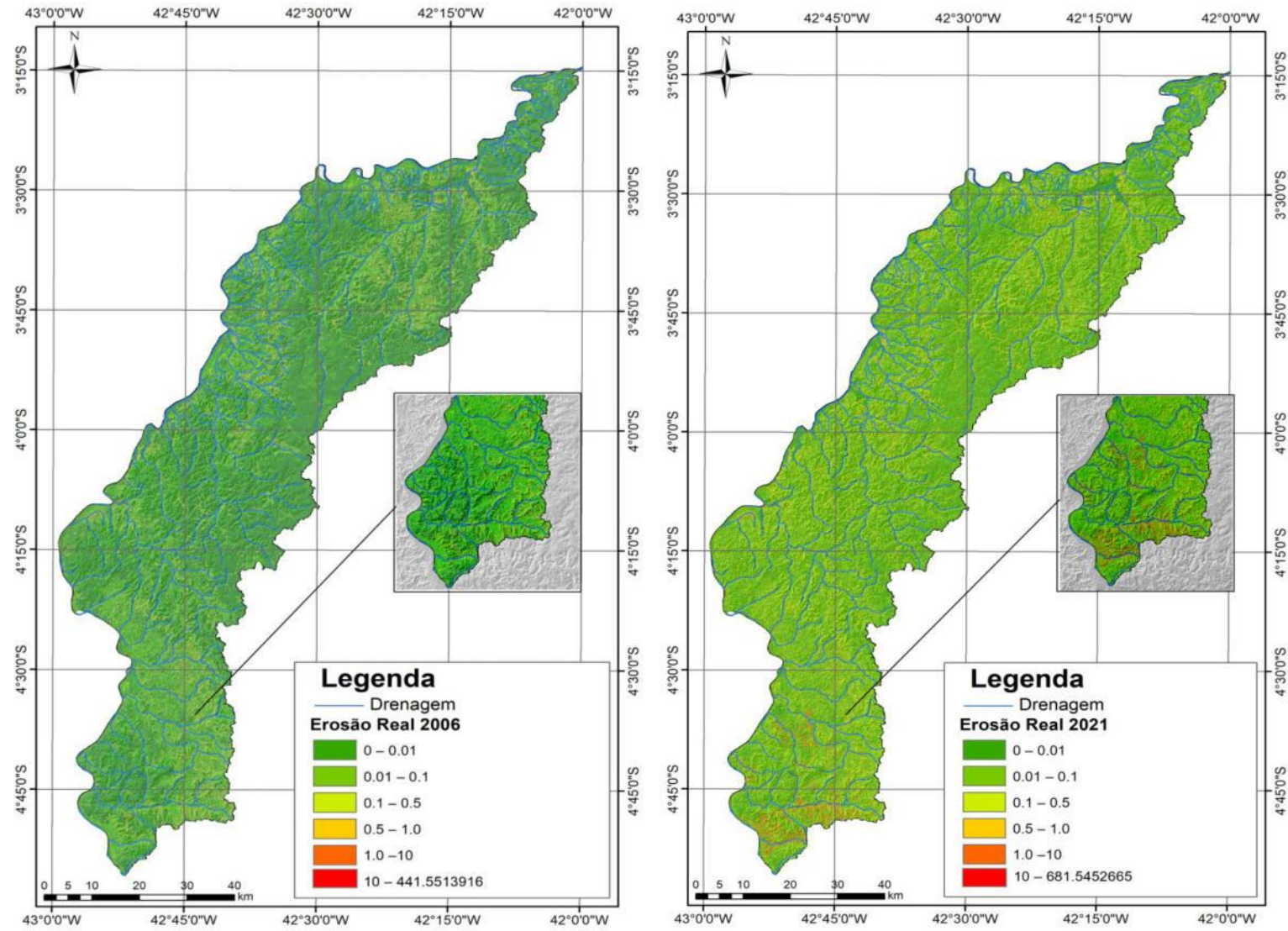
É importante ressaltar que os limites amplamente aceitos de formação média do solo estão entre $0,3$ e $1,4 \text{ t.ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Kastridis *et al.*, 2022). Isso significa que, neste contexto, a erosão real na área de estudo não causa grande ameaça à paisagem. Essa variação indica que as características de uso do solo da bacia, juntamente com as características físicas, indicam diferentes áreas com maior ou menor suscetibilidade à perda de solo (Tabela 10 e Figura 31).

Tabela 10. – Erosão real do solo nas Bacias Difusas do Baixo Parnaíba – PI

Perda de solo em t.ha ⁻¹ .ano ⁻¹	Anos			
	2006		2021	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%
0 - 0,01 (Baixa)	436,368.78	71.82	282,312.74	46.47
0,01 - 0,1 (moderada)	90,185.17	14.84	196,900.95	32.41
0,1 - 0,5 (Moderada - alta)	59,879.56	9.86	98,232.16	16.17
0.5 - 1 (Alta)	9,789.89	1.61	12,485.54	2.05
1 - 10 (Muito alta)	6,487.99	1.07	11,943.63	1.97
>100 (Extremamente alta)	335.167	0.06	1,161.56	0.19
Média de perda de solo	0.081		0.164	

Fonte: Organizado por Barbosa (2023)

Figura 31 - Espacialização da erosão real em 2006 e 2021



Fonte: Elaborado por Barbosa (2023)

Em 2021 há um aumento dessa erosão nas classes "moderada – alta" que obteve 16,17% da área total, a classe alta também aumentou para 2,05% com uma faixa de perda de solo de 0,5 a 1 t. ha⁻¹ ano⁻¹, também houve decréscimo na área considerada "baixa" erosão, que está na faixa de 0,01 t.ha⁻¹.ano⁻¹, o que, nesse caso, correspondeu a 46,47% da área estudada. Isso indica uma mudança no uso do solo ao longo dos anos, de modo a favorecer o aumento de áreas com maior fragilidade a ocorrência de processos erosivos, como pastagem, área cultivada e a própria urbanização que influenciam na dinâmica dos fatores físicos que aumentam o risco de erosão (Carneiro *et al.*, 2021; Durães; Mello, 2016; Guerra *et al.*, 2014)

Verificou-se que entre os anos de 2006 e 2021, houve uma diferença considerável entre a classe de perda moderada de solo, em 2006 foi de 14,84 em 2021 esta classe aumentou para 32,41%, assim como a classe "moderada-alta" que teve um aumento de 3,55% entre os referidos anos, o que pode estar diretamente relacionado à perda de áreas com baixa probabilidade a erosão, como mencionado anteriormente.

A análise de dados sobre a produção e o transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Parnaíba oferece uma valiosa perspectiva analítica sobre os processos erosivos na região. Os dados fornecidos pelo artigo de Moraes (2015), que destaca o setor norte da bacia do Rio Parnaíba como principal fonte de sedimentos com produção específica de 94,8 t/km²/ano, são complementares e beneficiam a discussão dos resultados obtidos pela RUSLE.

Esses dados fornecem uma validação empírica das estimativas da RUSLE, confirmando que, de fato, a área a jusante do rio Parnaíba é uma fonte significativa de sedimentos. A diferença entre a produção específica de sedimentos e as perdas de solo indicadas pela RUSLE sugere que, embora a região contribua substancialmente para a carga total de sedimentos, a maior parte pode ser transportada sem causar perdas significativas de solo na área de produção imediata.

A análise conjunta desses dados permite a identificação de áreas críticas onde a produção de sedimentos é mais intensa, mas a perda de solo permanece relativamente baixa. Essas áreas podem ser alvos estratégicos para práticas de manejo que visem à redução da produção de sedimentos sem comprometer a capacidade produtiva. A diferença entre a produção de sedimentos e as perdas de solo ressalta a importância de abordar não apenas a erosão da produção local, mas também os processos de transporte e deposição em toda a bacia.

Diante do exposto, observa-se que as condições geomorfológicas das Bacias Difusas do Baixo Parnaíba, interpretadas a partir do comportamento do fator topográfico (LS), bem como o potencial erosivo das chuvas e a fragilidade dos solos à erosão, estão diretamente relacionados à ocorrência de erosão hídrica (Moraes; Silva, 2020; Moraes; Sales, 2017; Silva, 2008), o que

indica que o uso da terra é um fator deliberativo para influenciar essa questão, devendo ser monitorado a fim de preservar sua qualidade e minimizar sua exposição ao impacto direto das chuvas intensas, às quais a área está predisposta (Alves *et al.*, 2022; Durães; Mello, 2016; Farinasso *et al.*, 2006; Guerra *et al.*, 2017; Lu *et al.*, 2004).

Exemplos de perdas de solo identificadas pela RUSLE podem ser vistos nas figuras 32 e 33, como erosão superficial e presença de voçorocas, principalmente em áreas com solo altamente erodível, como Argissolos e Neossolos, respectivamente.

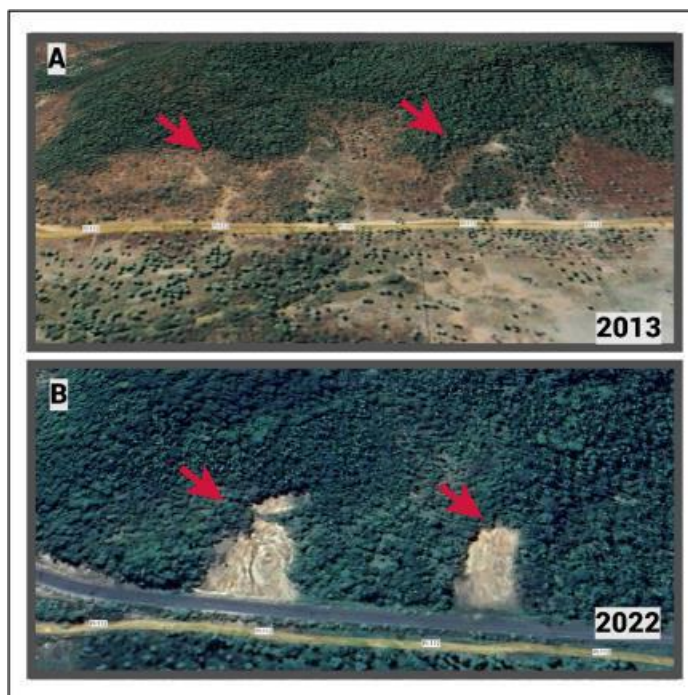
Figura 32 - Evolução do processo de voçorocamento na área das BDBP - PI



Legenda: (A) 2007, (B) 2010 e (C) 2022 nas proximidades da rodovia PI 112 entre as coordenadas geográficas 4°8'50.15"S/ 42°52'36.50"O.

Fonte: Imagens disponibilizadas pelo Google por meio do aplicativo Google Earth Pro (Google, Google, 2017) e organizado pelos autores (2023).

Figura 33 - Erosão laminar observada em 2013 e 2022 na área de estudo



Legenda: (A) 2013 e (B) 2022 ambas nas proximidades da rodovia PI112, entre as coordenadas geográficas $4^{\circ} 1'39,97''S / 42^{\circ}46'19,00''O$. Seta vermelha: processos erosivos não estabilizados.

Fonte: Imagem disponibilizada pelo Google através do aplicativo Google Earth Pro (Google, Google, 2022) e organizado pelos autores (2023).

A análise da RUSLE para determinar o potencial de perda de solo, associado ao SIG, permitiu verificar o grau de impacto que algumas atividades podem causar na dinâmica dos processos erosivos e a consequente perda de solo na bacia, o que pode resultar em diminuição da fertilidade, perda de nutrientes e assoreamento dos corpos d'água. A remoção do solo pode afetar negativamente a dinâmica natural do ecossistema, destruindo habitats naturais e causando perda de biodiversidade.

Diante das análises e discussões apresentadas, fica evidente a importância da continuidade das investigações no baixo curso do rio Parnaíba - Piauí visando melhorar a compreensão dos processos erosivos e a efetividade das práticas de manejo.

4.3 Análise da erodibilidade dos solos nas BDBP- PI

Análise da erodibilidade a partir da granulometria na área de estudo

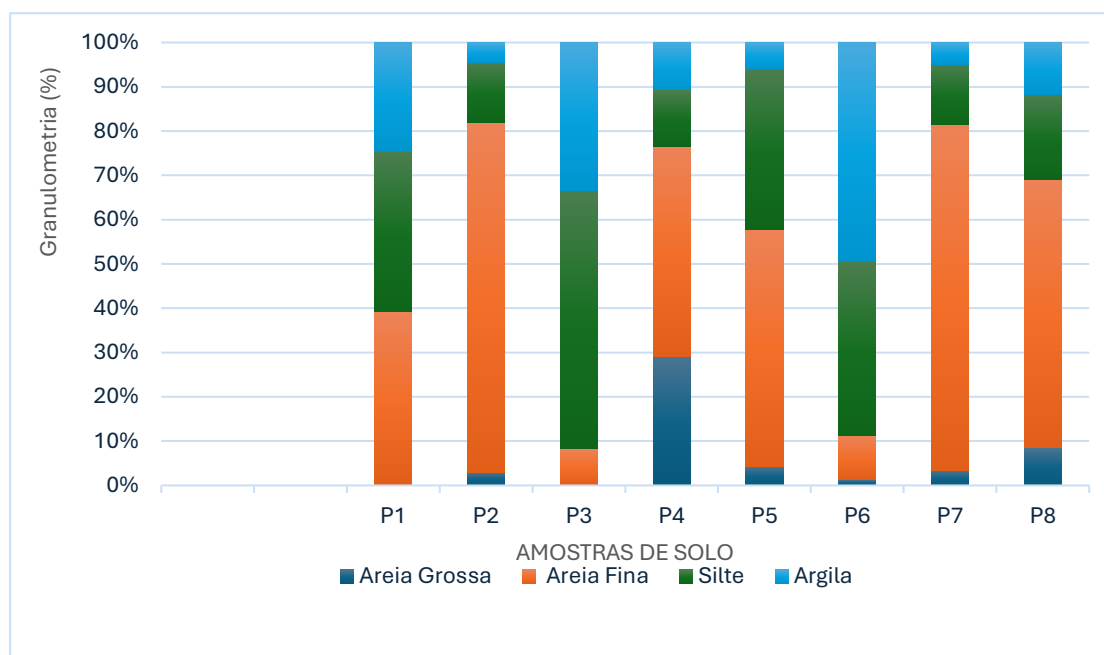
A erodibilidade dos solos pode ser analisada por meio de análises laboratoriais das diferentes propriedades físicas e químicas do solo, podendo ser integrada a análise de mapa temático de solos e refinadas em ambientes SIG.

É importante lembrar que na classificação textural do solo, há três grupos principais de classes conhecidas, sendo estas: solos arenosos, francos e argilosos; podendo coexistir classes em cada grupo. Estas classes fornecem uma ideia da distribuição do tamanho de partículas e indicam o comportamento das propriedades físicas do solo (Brady; Weil, 2013; Centeno *et al.*, 2017; Guerra *et al.*, 2023).

Foram analisadas: granulometria que estabelece as classes texturais; densidade do solo, porosidade total, obtida indiretamente a partir da relação entre densidade do solo e densidade de partículas.

Apesar do reconhecimento de um número limitado de amostras analisadas, a inclusão da análise granulométrica desempenha um papel importante na caracterização dos solos da região. O Gráfico 3, mostra as variações nas frações areia grossa, areia fina, silte e argila em oito locais estrategicamente selecionados, oferecendo uma visão mais detalhada das texturas.

Gráfico 3 - Variação das partículas do solo na área de estudo.



Fonte: Organizado Barbosa (2024).

A variação nos dados de granulometria sugere uma diversidade nas características do solo na bacia. Essa diversidade pode influenciar os processos erosivos, uma vez que diferentes texturas do solo respondem diferentemente à erosão hídrica. A presença de áreas com maior teor de areia grossa pode indicar maior permeabilidade nessas regiões, enquanto áreas com maior teor de argila podem ter maior capacidade de retenção de água.

A distribuição espacial dessas diferentes texturas pode contribuir para um melhor entendimento da suscetibilidade da área à erosão e subsidiar medidas de manejo mais específicas para cada região. Recomenda-se uma análise mais aprofundada, possivelmente por meio de técnicas estatísticas e mais amostras de solo, para identificar padrões significativos ou correlações entre os teores das diferentes frações do solo e os processos erosivos observados na área.

Os dados verificados mostram que a área apresenta uma diversidade de classes texturais, os dois primeiros pontos amostrais coletados (P1, P2), situados em uma mesma classe de solos, os Argissolos, que são solos com mais de 30% de argila, apresentam textura franca e areia franca respectivamente, isso indica que tendem a apresentar deficiências tanto em matéria orgânica, como de fósforo. Também situado nessa mesma classe de solo o ponto 3 (P3), apresentou solos com textura franca-argilo siltosa na camada A (0-10cm) e Franca/franco siltosa na camada B (10-20 cm). (Centeno *et al.*, 2017; Guerra *et al.*, 2023).

Os pontos 4 e 5 (P4; P5), apresentaram solos com textura predominantemente franca arenosa, que são solos com baixos teores de matéria orgânica, entretanto o P5, situa-se na classe dos Planossolos, que são solos minerais mal drenados, a porosidade nessa amostra na camada A de profundidade foi de 46%, enquanto na profundidade B a porosidade ficou em 34,62%, esse tipo de solo costuma sofrer um adensamento em direção ao seu horizonte B, com uma permeabilidade mais lenta. (MMA, 2006; EMBRAPA; 2006; Jacomine, 2009; Lima *et al.*, 2021; Deodoro *et al.*, 2021)

O ponto 6 (P6), apresentou na camada A uma textura argilosa, segundo Santos et al. (2003), solos com textura argilosa, são mais produtivos, o P6 (A) apresentou ainda 53,5% de porosidade, o que indica uma menor capacidade de lixiviação, drenagem mais lenta, além de serem menos propensos a erosão. Já na camada B (10- 20 cm) não foi possível fazer coletas do anel volumétrico, para identificação da densidade e porosidade, devido à limitações relacionadas a acessibilidade ao local, porém são solos com textura Argilo-siltosa. O P6 está localizado na classe dos Chernossolos, que corresponde a solos mais escuros, rico em matéria orgânica, bem espessos e com alto teor de cálcio (Tabela 11)

O ponto 7 (P7), apresentou textura predominantemente areia franca, são solos predominantes em relevo plano a suave plano, está situado na classe dos Argissolos. Já o ponto 8 (P8), está situado na classe dos Plintossolos Concrecionarios, a amostra possui textura franco-arenosa, a porosidade ficou em torno de 47,22% na camada A e 40,11% na camada B, são solos com mais resistência a compactação. Os Plintossolos Concrecionarios, são imperfeitamente a

mal drenados e se caracterizam fundamentalmente por apresentar expressiva plintização (EMBRAPA, 2006; MMA, 2006; JACOMINE, 2009; VAZ; NETO, 2021)

A tabela 11 apresenta, de forma resumida, essa variação textural, através das médias dos dados das profundidades de cada ponto de coleta e das cinco classes texturais citadas anteriormente. Os pontos P7 e P8 foram as últimas amostras coletadas, o que ocorreu em um 2º campo, por isso as amostras não seguiram uma sequência numérica crescente no mapa da Figura 34.

Tabela 11 – Granulometria e densidade da área de estudo

Local		Granulometria (g/kg)								Desidade do Solo g/cm ³	Densidade de partícula g/cm ³	Porosidade (%)	
PONTOS	Profundidade (cm)	Areia Total	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Silte + Areia Fina	Relação Silte/Argila	Classe Textural do Solo (textura)				
P1	B	10 a 20	392	3	390	362	246	751	1,5	Franco-Arenosa	x	x	x
P2	A	0 a 10	820	30	790	134	46	924	2,9	Areia Franca	1,46	2,56	42,74
P3	A	0 a 10	84	2	82	582	334	664	1,7	Franco Argilo-Siltosa	x	x	x
	B	10 a 20	340	6	334	497	163	831	3	Franco-Siltosa	x	x	x
P4	A	0 a 10	765	290	475	128	107	603	1,2	Franco Arenosa	1,3	2,42	46,00
	B	10 a 20	750	291	459	118	132	577	0,9	Franco Arenosa	1,64	2,51	34,62
P5	A	0 a 10	578	43	535	362	60	897	6,1	Franco Arenosa	1,31	2,44	46,36
	B	10 a 20	601	47	554	299	101	852	3	Franco Arenosa	1,56	2,49	37,31
P6	A	0 a 10	113	14	99	393	494	492	0,8	Argilosa	1,19	2,55	53,5
	B	10 a 20	86	6	80	508	406	588	1,2	Argilo-Siltosa	x	x	x
P7	A	0 a 10	814	34	780	136	50	916	2,7	Areia Franca	x	x	x
	B	10 a 20	814	28	786	133	53	919	2,5	Areia Franca	x	x	x
P8	A	0 a 10	691	86	605	192	117	796	1,6	Franco-Arenosa	1,37	2,49	45,22
	B	10 a 20	618	26	591	198	184	790	1,1	Franco-Arenosa	1,49	2,49	40,11

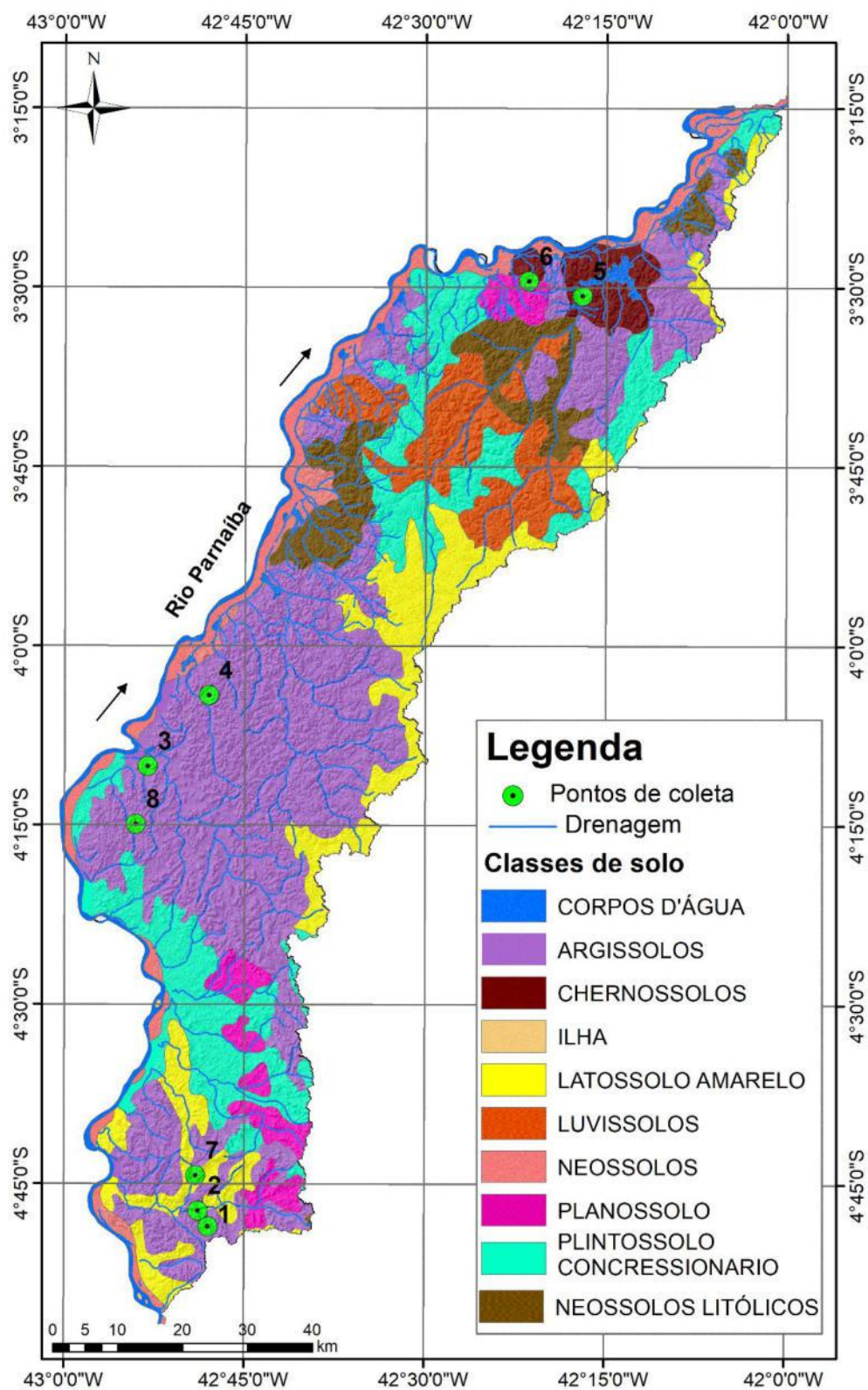
Fonte: Organizado por Barbosa (2022)

Quanto a densidade, não foi possível coletar o anel volumétrico em todos os pontos, por dificuldade de acesso ou por dificuldade na correta coleta do anel, entretanto, a partir das

amostras coletadas até o momento, observa-se que os pontos com densidade do solo mais críticas, foram o P2 (A), P5 (B), P8 (B) que apresentam entre 1,4 e 1,5 g/cm³, segundo Rangel e Guerra (2018), seguindo Reichert *et al.* (2003), os valores críticos de densidade do solo se encontram nesse intervalo, na classe textura franco arenosa.

O que se observa, no entanto, é que os solos arenoso, considerados solos de textura leve, com composição granulométrica nas classes texturais: areia, areia franca ou franco arenosa, foram os mais predominantes entre as amostras coletadas, são caracterizados segundo Ceteno *et al.* (2017) como solos frágeis devido às suas características específicas: alta drenabilidade, baixa disponibilidade de nutrientes, reação ácida e estrutura em grãos simples, logo, são solos com alta suscetibilidade à erosão e de baixa capacidade de uso.

Figura 34 – Mapa de solos das Bacias Difusas do Baixo Parnaíba – Piauí



Fonte: Embrapa (2006) Elaborado por Barbosa (2021)

Análise da erodibilidade a partir da declividade e das classes de solo

O entendimento da erodibilidade dos solos é essencial para o planejamento e gestão ambiental, especialmente em áreas como o baixo curso do rio Parnaíba. Nesse contexto, a composição pedológica, a declividade e a hipsometria da área desempenham papéis importantes na suscetibilidade à erosão. A distribuição dos diferentes tipos de solo, como Latossolos Amarelos, Argissolos e Luvisolos, em conjunto com as características geomorfológicas, como colinas amplas e suaves, tabuleiros dissecados e superfícies aplainadas dissecadas e degradadas, evidenciam áreas moderadamente erodíveis (Guerra; Jorge, 2017; Rangel; Guerra, 2018; Guerra *et al.*, 2020; Barbosa *et al.*, 2021; Lisboa *et al.*, 2023).

Por outro lado, a presença de Neossolos Litólicos, Neossolos, Plintossolos e Planossolos em declividade mais elevada indica áreas muito erodíveis. A existência de áreas classificadas como pouco erodíveis, indicam a presença de Chernossolos em planícies fluviais ou flúvio-lacustres, ressalta a complexidade da distribuição da erodibilidade na região e a importância de considerar esses fatores na avaliação e manejo dos solos para a conservação ambiental. (Guerra *et al.*, 1994; Lima; Augustin, 2010; Santos; Guerra, 2021; Lisboa *et al.*, 2023) A tabela 12 mostra as classes de erodibilidade usadas nessa análise.

Tabela 12 - Classes de erodibilidade dos solos para as Bacias Difusas do Baixo Parnaíba (PI).

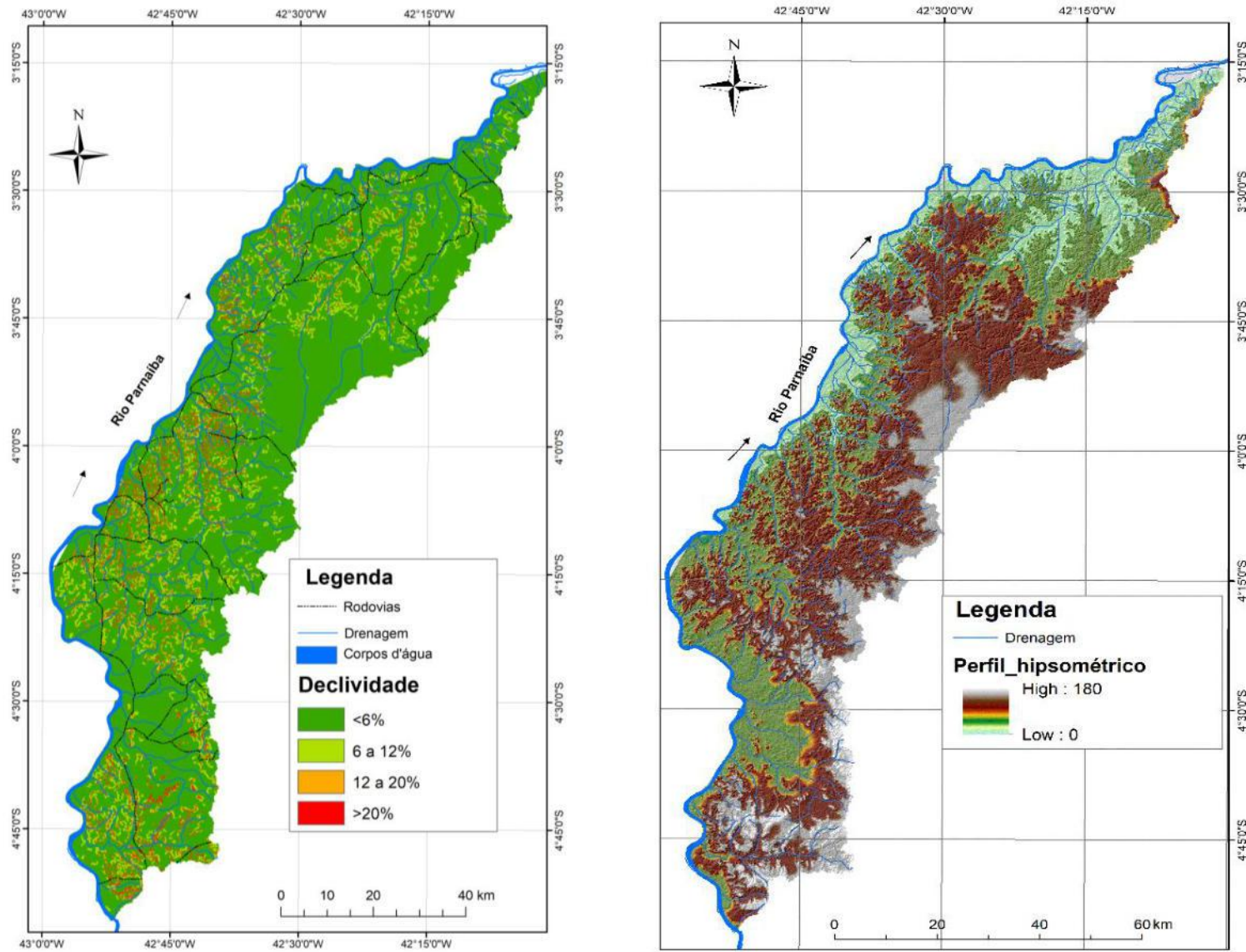
Classe de Erodibilidade	Índices relativos de Erodibilidade	Unidade Pedológicas
I – Muito Erodível	10,0 a 8,1	➤ Neossolos ➤ Neossolos (Litólicos) ➤ Plintossolos ➤ Concessionários ➤ Planossolos
II- Moderadamente Erodível	8,0 a 4,1	➤ Latossolo Amarelo ➤ Argissolos ➤ Luvisolos
III – Pouco Erodível	2,1 a 0	➤ Chernossolos

Fonte: Adaptado de Salomão (2012) Organizado por Barbosa (2023)

O processo de erosão atua naturalmente sobre os solos e rochas modificam o relevo, sendo os solos um fator que influencia sua ocorrência e intensidade. A prevenção e recuperação desses eventos demandam recursos e planejamentos que considerem as especificidades do meio físico, além de condições sociais do desenvolvimento urbano (Barbosa *et al.*, 2021; Guerra; Loureiro, 2022).

A erodibilidade dos solos na área de estudo, aponta que 60,66% da bacia está moderadamente erodível (Classe II), essa área está localizada entre 12-20% de declividade e hipsometria que varia de 90 – 120m. Os principais solos da área são compostos por Latossolo Amarelo (11,5%), Argissolos (41,51%) e Luvisolos (7,65%), essa região é formada principalmente por colinas amplas e suaves, tabuleiros dissecados e superfícies aplainadas dissecadas e degradadas. A Figura 40 mostra o cenário do declive e do perfil hipsométrico na área de estudo.

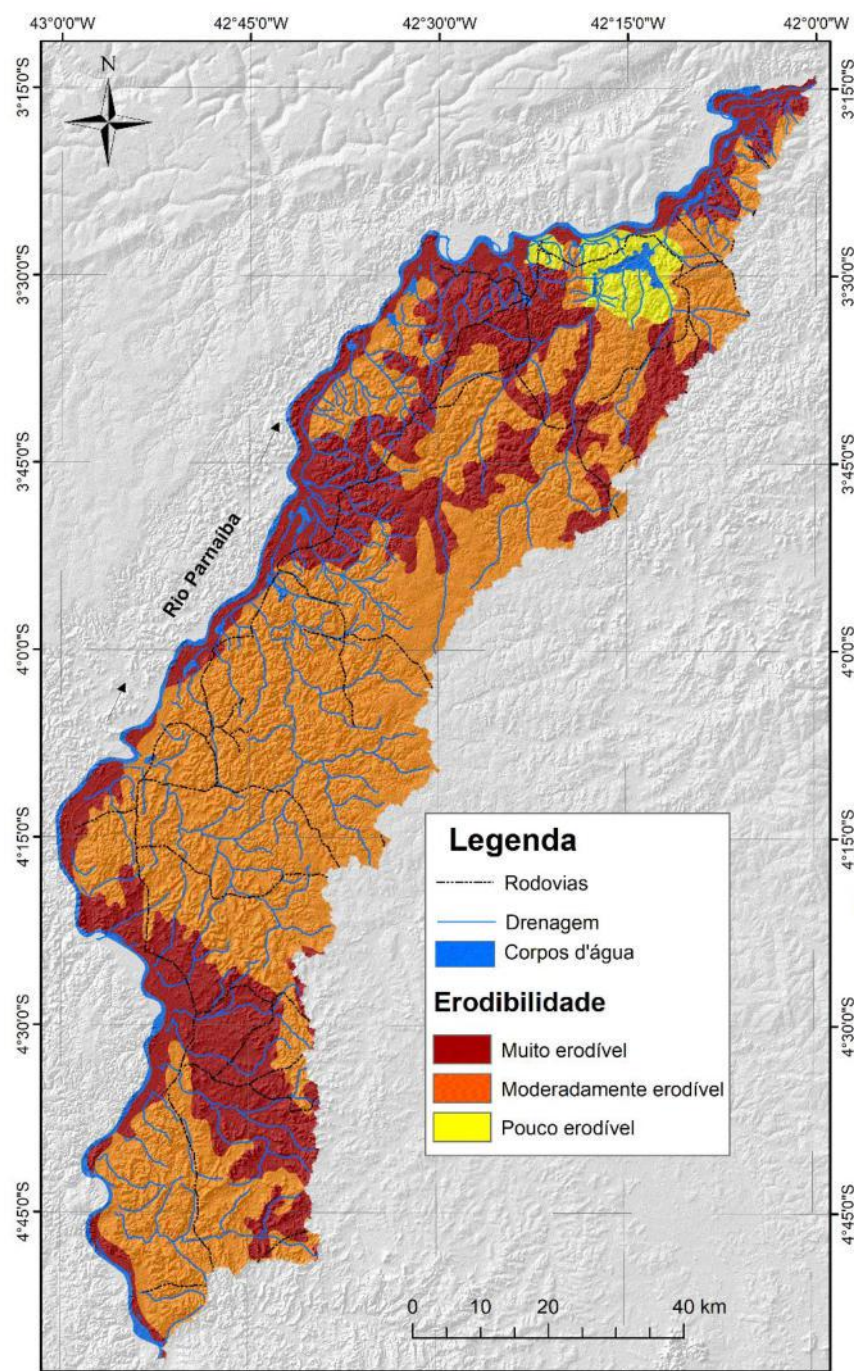
Figura 35 – Mapas de hipsometria e declividade das encostas



Fonte: Elaborado por Barbosa (2022)

As Bacias Difusas do Baixo Parnaíba apontaram também para uma área de 33,23% muito erodível (Classe I), apresentando na sua composição pedológica, Neossolos Litólicos, que tem declividade de 6-12% com aproximadamente 60-90m, Neossolos, com hipsometria de 0-30m e declividade <6%, Plintossolos, localizados em áreas mais elevadas, >20% de declividade podendo chegar a 180m e Planossolos, declividade entre <6% a 12% e hipsometria de 0-90m. O mapa da Figura 36 mostra a espacialização da erodibilidade dos solos na área de estudo.

Figura 36 – Mapa de suscetibilidade à erosão laminar da área de estudo



Fonte: Organizado por Barbosa (2023)

Apenas 2,55% da área da bacia está na classe III de pouco erodível, com Chernossolos, esta área está inserida no contexto geomorfológico das planícies fluviais ou flúvio-lacustres. De acordo com Lima (2003), o grau de inclinação é fator importante na erosão do solo, influenciando o volume e a velocidade do escoamento. A perda de solo é função exponencial da inclinação e, em função disso, os cálculos empíricos de perda de solo por erosão necessitam da definição de diversos valores exponenciais.

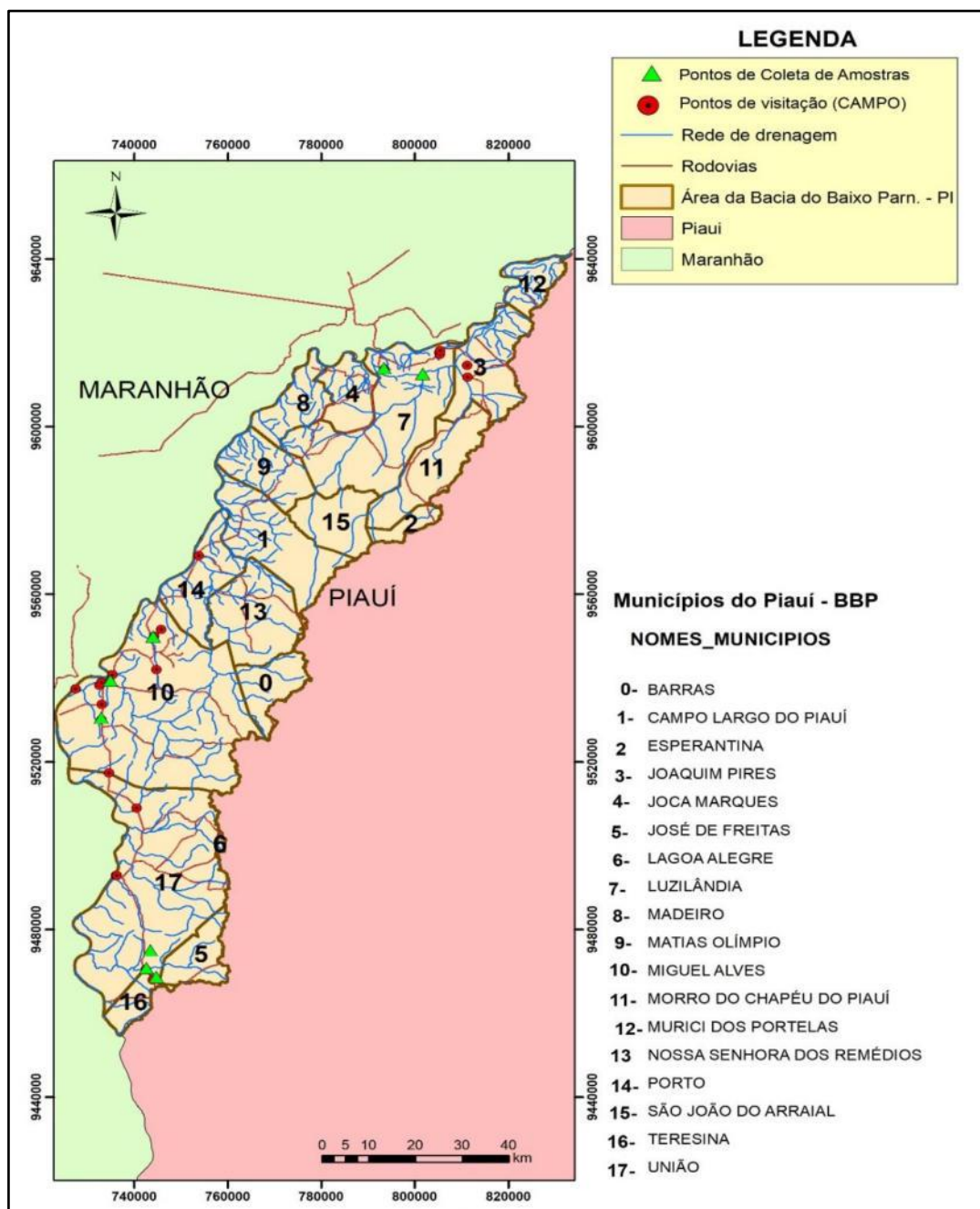
4.4 Identificação e espacialização de feições erosivas

O levantamento de informações sobre feições erosivas, bem como seu mapeamento, é de grande importância para a elaboração de estratégias de mitigação dos efeitos adversos dessas feições sobre a paisagem e os recursos hídricos.

É relevante, sobretudo, na área da bacia do baixo Parnaíba, Piauí, objeto do presente estudo, que em decorrência de receber muitos sedimentos dos seus próprios rios, pode sofrer alterações na paisagem decorrentes do seu sistema natural e dinâmico influenciado pela sua rede de drenagem, além do uso antrópico que pode intensificar ou gerar novos impactos negativos sobre os corpos hídricos e as paisagens, tornando o reconhecimento de feições erosivas um fator importante nessa gestão (Leite *et al.*, 2016)

Na Figura 37 é apresentado o mapa de espacialização dos pontos amostrais da área de estudo, vários pontos foram visitados ao longo da bacia, nesse percurso foram identificadas algumas feições erosivas, a área da BBP-PI, no recorte que essa pesquisa trabalha, abrange 18 municípios, foram visitados cerca de 22 pontos, algumas amostras de solo foram coletadas e todos os pontos foram fotografados e georreferenciados.

Figura 37 – Mapa de espacialização dos pontos amostrais



Fonte: Organizado por Barbosa (2021)

Segundo Carvalho *et al.* (2000), as taxas de erosão que decorrem de intervenções antrópicas, sob determinadas circunstâncias, chegam a ser 100 vezes maiores do que seria apenas considerando-se em termos geológicos. No próximo item será analisado a feição erosiva de uma voçoroca identificada na área de estudo que compartilha espaço com atividades humanas de lazer (Guerra, 2014; Guerra *et al.*, 2017; Santos; Guerra, 2021; Barbosa *et al.*, 2021b)

Foi constatado, fotografado e especializado na figura 38 algumas feições erosivas identificadas ao longo da área de estudo, pode-se constatar que os processos erosivos observados são provocados por diversos fatores, podendo-se destacar a variação da cota de água de alguns rios e riachos que compõe a bacia do Parnaíba, que podem refletir na erosão hídrica de algumas bordas do perímetro molhado, o que vem a influir nos processos erosivos periurbanos de alguns municípios da área de estudo (Leite *et al.*, 2016).

De acordo com Silva *et al.* (2011) isso se dá pelo encharcamento e secamento do solo superficial e subsuperficial e no movimento de partículas de solo, o que acaba provocando processos erosivos nas margens de cursos d'água como consequência da desestruturação promovida por solapamento, resultante da ação da energia cinética das ondas.

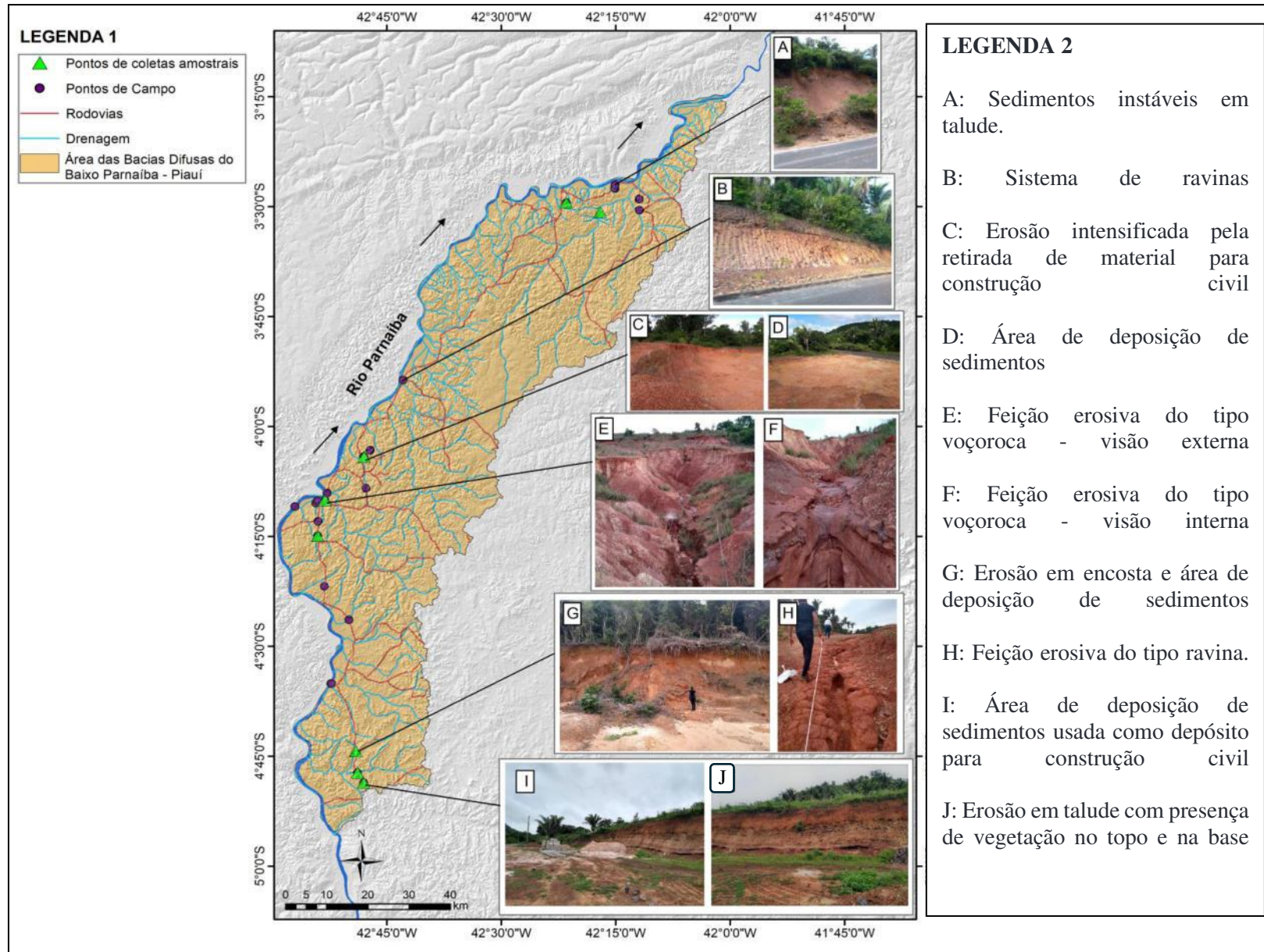
Outro fator com grande peso no desenvolvimento dessas feições erosivas identificadas, são as alterações da cobertura vegetal e uso do solo visando a ocupação imobiliária das margens da drenagem ou próximo a feições erosivas já em desgaste, sem a adoção de práticas conservacionistas adequadas.

O que leva a outro fator de grande influência nessas feições, que é a implantação de estradas sem o estudo satisfatório relacionado erosão, caso não haja os devidos cuidados relacionados a conservação dos solos, pode ocorrer a remoção da cobertura vegetal de extensas áreas e a compactação do solo, reduzindo a infiltração e favorecendo a ocorrência do escoamento superficial direto e conseqüentemente, de processos erosivos. (Leite *et al.*, 2016)

Segundo Soares *et al.*, (2018), as estradas têm sua importância social e econômica, entretanto, a abertura sem estudos prévios adequados relacionado à erosão hídrica e à estabilidade dos solos presentes nos taludes dos cortes pode trazer prejuízos oriundos da restauração das vias e das interrupções ocasionadas por instabilidades dos taludes de corte, além do risco de morte para população local ou para passageiros usuários dessas estradas.

A observação de campo mostra que a perda de solo nessas áreas de estrada ocorre nos horizontes dos solos residuais jovens desestabilizando os horizontes B e A. A classe de solo em que estão inseridas essas feições erosivas, também pode influenciar no processo de instabilidade observado, dependendo do grau de resistência da classe. Em geral, a erosão ocorre na base do talude causando queda de blocos dos horizontes superiores, na Figura 38, estão especializados algumas dessas feições erosivas encontradas em campo (Soares *et al.*, 2018).

Figura 38 – Feições erosivas identificadas ao longo da área de estudo



Fonte: Base cartográfica IBGE (2016) Organizado por Barbosa (2022)

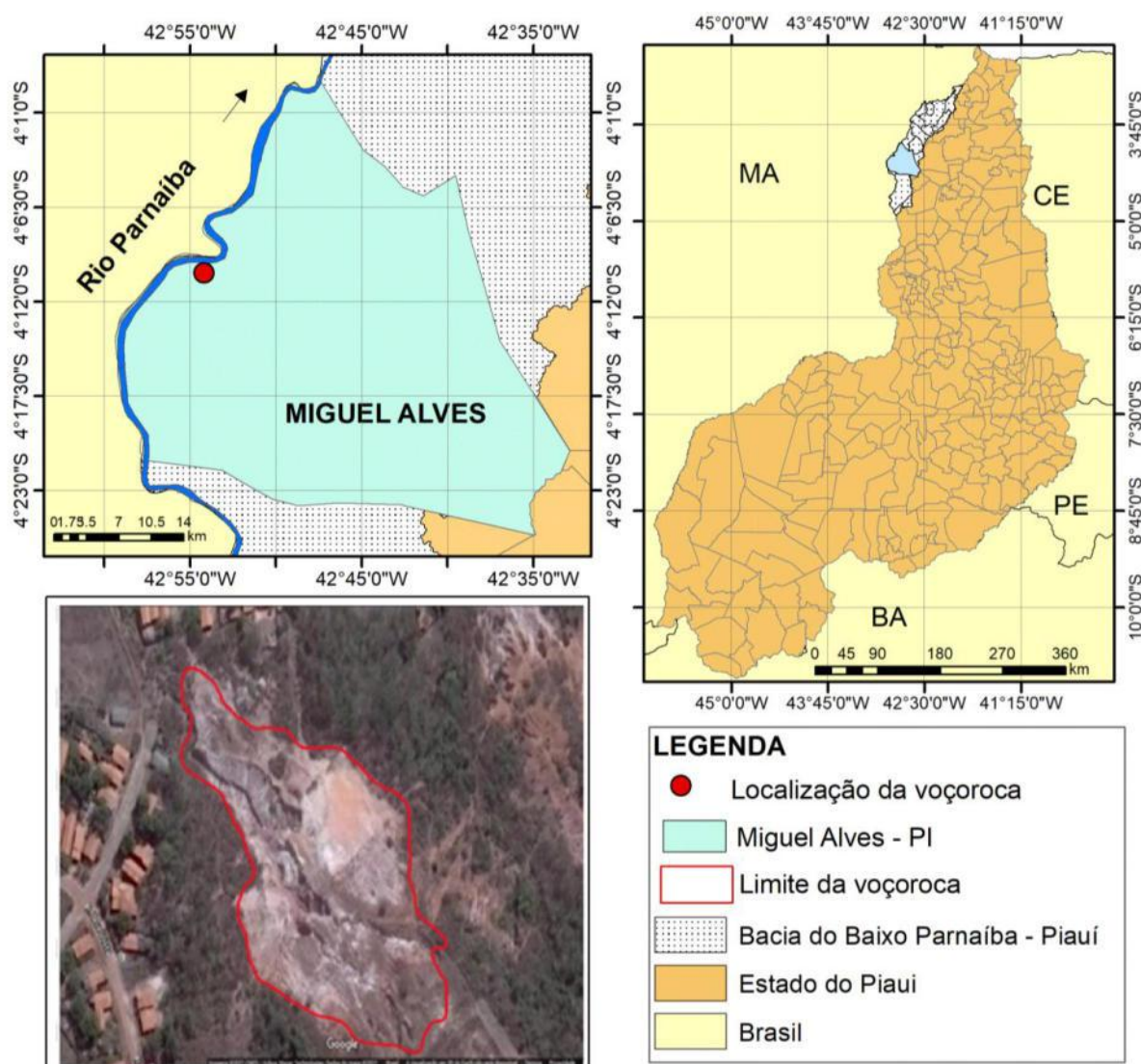
4.5 Feição erosiva da voçoroca urbana em Miguel Alves/Piauí

Optou-se por fazer uma análise mais detalhada do processo erosivo mais expressivo identificado na área de estudo. Situada na zona urbana do município de Miguel Alves, no estado do Piauí. O município fica a 04°09'56'' de latitude sul e 42°53'43'' de longitude oeste, é um dos municípios que compõe as Bacias Difusas do Baixo Parnaíba Piauiense, com uma área total de 1.393 km² (CEPRO, 2001). A identificação desse tipo de incisão no solo nesta localidade de fácil acesso estimulou o interesse do estudo, no intuito de compreender as possíveis consequências da ocorrência desta voçoroca e estudar a sua evolução no espaço e no tempo.

É uma área de clima tropical subúmido, com duração do período seco de seis meses e temperaturas médias entre 22°C a 37°C e precipitação pluviométrica média anual de 1.668,4 mm (Andrade Júnior *et al.*, 2004). Sua vegetação é composta por floresta decidual secundária mista, caatinga/cerrado e cerrado floresta. O município tem um significativo sistema hídrico dentre os quais estão: Rio Parnaíba, lagoas do Riachão, da Salina e das Almas e os riachos da Arara e da Ameixa. A Figura 39 mostra a localização do município, sendo que no contexto do Estado do Piauí este município se encontra na área das Bacias Difusas do Baixo Parnaíba.

A voçoroca em análise está situada na margem de um pequeno riacho afluente do rio Parnaíba, na área urbana de Miguel Alves. Tem sua base geológica na Formação Piauí, que é datada do Carbonífero sendo composta por arenitos finos a grossos, cinza-esbranquiçados a avermelhados, eventualmente conglomeráticos; folhelhos vermelhos; e calcários esbranquiçados (Góes; Feijó, 1994). O solo predominante na região é o Argissolo vermelho-amarelo distrófico típico argiloso e muito argiloso (EMBRAPA, 2018).

Figura 39 – Localização do Município de Miguel Alves e da voçoroca urbana



Fonte: Organizado por Barbosa (2021). Base de dados: IBGE (2017). Imagem: Google Earth (2021).

Estima-se que a voçoroca de Miguel Alves tenha iniciado os processos erosivos na década de 1990, com base em informações locais. Entretanto, a presente análise considerou o período de 2007 a 2017 para estimar sua evolução no tempo e no espaço.

A partir da análise comparativa das imagens de satélite de 2007 e de 2017, observou-se que no ano de 2007, esta voçoroca apresentava uma área de aproximadamente 1.985 m², tendo sua dimensão em 2017 aumentada para 2.765 m², indicando que sua área teve rápida expansão pela intensificação da ação erosiva ao longo destes 10 anos.

Assim, o desenvolvimento da erosão na voçoroca estudada, sobretudo na sua cabeceira, se agravou com o passar dos anos com um aumento de cerca de 780 m², ou seja, de 21,85% nesse período. Este significativo aumento da dimensão da voçoroca urbana em um período tão curto certamente se encontra diretamente relacionado ao crescimento da cidade de

Miguel Alves em direção ao morro onde a voçoroca se localiza, pois se observa um aumento recente do número de residências e um constante fluxo dos moradores no entorno da voçoroca (Figura 40).

Figura 40- Pannel de imagens mostrando a evolução da voçoroca e urbanização no seu entorno, em Miguel Alves, entre 2007 e 2017.



Fonte: Imagens Google Earth (2007 e 2017). Organizado por Barbosa (2021). (A) Voçoroca em 2007; (B) Voçoroca em 2017.

Esse aumento no fluxo de pessoas principalmente na área do desmatamento da encosta voltada para a Rua Maria Celeste, também pode estar relacionado ao acesso e instalação de antenas de telecomunicação no topo do morro, como mostra a Figura 41.

Figura 41 - Voçoroca em relação às torres de telecomunicação.



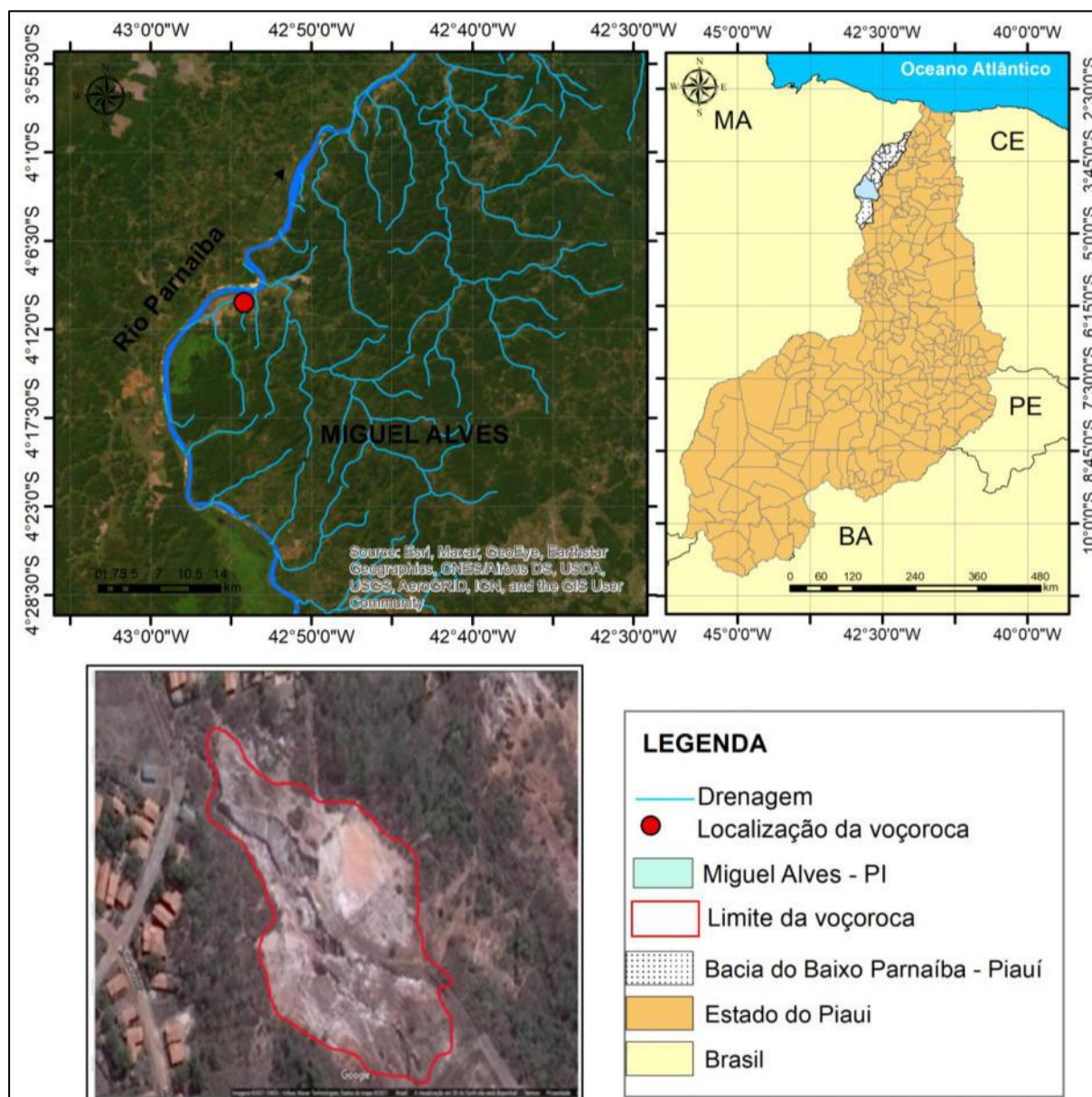
Legenda: (A) Localização da voçoroca. (B) Vista das torres de telecomunicação a partir da voçoroca em estudo.

Fonte: Imagem Google Earth (2021); Barbosa *et al.*, (2021b).

Dessa forma, o aumento da urbanização poderá gerar outros problemas que podem influenciar no crescimento da voçoroca, como o direcionamento das águas pluviais pelo sistema de drenagem urbano. (Graef *et al.*, 2012; Avelar *et al.*, 2013; Adediji *et al.*, 2013; Guerra *et al.*, 2017; Guerra *et al.*, 2018; Santos; Guerra, 2021).

Outro fator que tem contribuído para o desenvolvimento desta voçoroca é sua localização geográfica em relação à rede de drenagem da região, que fica próxima à margem do rio Parnaíba, numa encosta íngreme drenada por um pequeno riacho que corta rochas friáveis e solos delgados expostos também à erosão pluvial (Figura 42).

Figura 42 - Rede de drenagem do município de Miguel Alves – PI.



Fonte: Organizado por Barbosa (2021)

Segundo Bandeira (2005) a erosão marginal destrói as margens de um rio, tendo grande influência no aumento da largura do canal, contribuindo para o aumento da carga no fundo, desvalorizando terrenos ribeirinho e limitando seu uso adequado. Segundo Guerra *et al.* (2017) a gestão integrada de bacias de drenagem oferece um caminho promissor na conservação eficaz do solo, tornando-se importante o conhecimento da rede de drenagem próxima à pontos de erosão. Como observado na Figura 42 a localização da voçoroca está entre dois riachos afluentes do rio Parnaíba e bem próximo à margem do rio Parnaíba, o principal do estado que forma o nível de base regional (Lima; Augustin, 2010; Lima, 2017).

Observa-se, ainda, que o divisor topográfico destes dois riachos corresponde a um morro que apresenta encostas íngremes, tendo a voçoroca se instalado nas encostas voltadas para o norte, enquanto as encostas voltadas para o nordeste apresentam-se com cobertura vegetal razoavelmente conservada e o arruamento na sua base.

Segundo Adediji *et al.* (2013) o processo acelerado de erosão pode estar associado também ao crescimento populacional da área urbana e as atividades relacionadas ao uso do solo na área além da intensidade elevada da pluviosidade. Na análise de campo foi possível perceber que na margem esquerda da voçoroca ocorre um fluxo constante da população local, a qual é utilizada para atividades de lazer em um campo de futebol improvisado, como se observa na Figura 43.

Tendo em vista que os processos erosivos podem ser intensificados pelas atividades humana, se torna cada vez mais necessário a conscientização da população local quanto à conservação do solo, processo este que busca evitar ou atenuar os processos erosivos. O uso e o manejo inadequado da terra expõem o solo ao sol, chuvas, ventos e a outros agentes de intemperismo físico que afetam a qualidade e resistência do solo (Sá; Rocha Filho, 2020).

A erosão é originada sobretudo pela ação da água e do vento, tornando-se um dos principais fatores de enfraquecimento dos solos, ela ocorre ao longo de milhares de anos e é um dos principais fatores de modificação das paisagens.

Figura 43 – Vista geral da voçoroca.



Legenda: (A) Campo de futebol usado para atividades humanas de lazer na margem esquerda da voçoroca, (B) visão geral da voçoroca.

Fonte: Barbosa (2021).

No ano de 2007 a voçoroca apresentava um formato tipo bulbiforme, indicando o início da expansão erosiva em seu interior, em 2017 ela apresenta um formato aparentemente dendrítico, com vários filetes ou arestas, associados à intensificação do processo erosivo na sua parte interna, contribuindo assim para sua expansão lateral. Na Figura 44 é possível observar a

área e a posição da expansão desta voçoroca de Miguel Alves em 2017, em relação ao ano de 2007, um crescimento que corresponde a aproximadamente 21,85%, notadamente nas suas cabeceiras e lado direito, ampliando assim sua extensão e largura (Barbosa *et al.*, 2021b).

Figura 44 – Área de expansão da voçoroca



Fonte: Imagem Google Earth (2017). Organizado por Barbosa (2021).

Foi possível observar também a ausência de práticas conservacionistas do solo e de cobertura vegetal arbórea na margem esquerda da voçoroca, o que se intensificou a partir do seu uso para atividades humanas. Esse fator conjuntamente com o surgimento de águas subsuperficiais intensificaram a erosão lateral.

A existência de cobertura vegetal arbórea com regenerações em parte da margem direita da voçoroca (média e baixa encosta) favoreceu para estabilidade do solo, em situação oposta ao ocorrido na margem esquerda, onde é possível observar o solo exposto e mais compactado devido a maior circulação de pessoas que se deslocam para prática de atividades no campo de futebol improvisado.

a) Parâmetros físicos dos solos da voçoroca em estudo

Os parâmetros de densidade do solo, de partícula e porosidade na voçoroca estudada demonstram que as áreas mais elevadas, horizonte A (*P1*), apresentam densidade de 1,15 g/cm³, se caracterizando como um perfil mais argiloso, e que a densidade de partícula nesse ponto encontra-se com 2,4 g/cm³, o que pode indicar uma alta taxa de infiltração no solo, essas taxas influenciaram a porosidade que foi de 53,50 %. Segundo Alves e Cabeda (1999), o processo de infiltração de água no solo é um dos fenômenos que melhor reflete as condições físicas internas do solo (Andrade *et al.*, 2009; Reinert *et al.*, 2008; Oliveira *et al.*, 2021; Guerra; Jorge, 2021; Guerra *et al.*, 2023).

A amostra coletada em profundidade na voçoroca, horizonte B (*P2*), indica um solo arenoso, com uma densidade de solo de 1,35 g/cm³, densidade de partícula de 2,6 g/cm³ e porosidade de 49,17 %, como pode ser observado na Tabela 13 (Barbosa *et al.*, 2021a).

Tabela 13- Dados de porosidade e densidade da voçoroca.

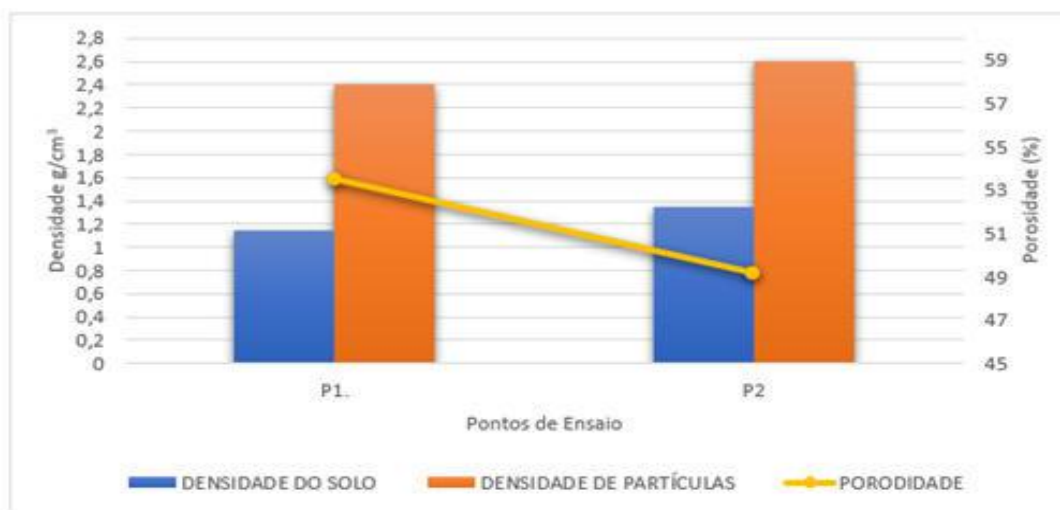
Pontos	Densidade do solo (g/cm ³)	Densidade de Partículas (g/cm ³)	Porosidade (%)
<i>P1</i>	1,15	2,4	53,5
<i>P2</i>	1,35	2,6	49,17

Fonte: Elaborada por Barbosa (2021)

Segundo Lepsch (2002) o solo ideal apresentaria 50% de poros, com 25% ocupados por água e 25% ocupados por ar. Além disso, a área da voçoroca está dentro de uma região urbanizada, com suas margens utilizadas para atividades humanas, aumentando a compactação do solo e reduzindo os valores de porosidade, comprometendo propriedades como infiltração e permeabilidade.

Os dados indicam menor taxa de infiltração em relação ao horizonte A, o que tende a aumentar o escoamento superficial e a aceleração das perdas de solo e de água, alterando o equilíbrio hidrológico natural do sistema. Uma melhor visualização desses dados pode ser observada no Gráfico 04.

Gráfico 04 - Dados comparativos da densidade do solo, densidade de partículas e porosidade da voçoroca.



Fonte: Elaborado por Barbosa (2021).

Diversos problemas socioambientais são causados pela existência da erosão, tais como poluição, movimento de massa e assoreamento dos mananciais, o uso e manejo inadequados do solo reduzem também a cobertura vegetal o que influencia diretamente na infiltração da água no solo, ocasionando o escoamento superficial gerando mais erosão (Sá; Rocha Filho, 2020; Guerra; Jorge, 2021).

5. CONCLUSÕES

Os mapas que espacializaram pontos com visível tendência erosiva, permitem a identificação e análise de áreas com risco à erosão acelerada, fornecendo subsídios para medidas de planejamento e conservação do solo e da água na bacia do baixo Parnaíba.

Considerando as observações de campo, bem como os resultados da análise multivariada da voçoroca localizada na área urbana de Miguel Alves, foi possível identificar o desenvolvimento espaço-temporal recente da feição erosiva em análise, com crescimento considerável da sua área total em apenas 10 anos.

Avaliando os dados de erodibilidade dos solos das Bacias Difusas do Baixo Parnaíba – Piauí, há uma predominância de solos arenosos, que são solos de textura leve com composição granulométrica nas classes texturais: areia, areia franca ou franco arenosa, ou seja, solos frágeis devido às suas características intrínsecas e solos com alta suscetibilidade à erosão e de baixa capacidade de uso.

Há um maior predomínio da classe dos Argissolos na área, que são solos que tendem a ser mais suscetíveis aos processos erosivos devido à relação textural presente nessa classe, o que causa diferentes situações de infiltração dos horizontes superficiais e subsuperficiais, entretanto, os que possuem textura mais leves ou médias são mais porosos, possuindo boa permeabilidade, sendo assim menos suscetíveis à erosão.

A RUSLE, quando aliada ao ambiente SIG, apresentou resultados satisfatórios em a estimativa do potencial erosivo em grandes bacias e a eficiência na integração de dados para identificar áreas propensas à erosão. A perda de solo é um fator que influencia a fragilidade ambiental de uma região, uma vez que a degradação afeta diretamente o equilíbrio natural do ecossistema.

A qualidade do solo tem impacto direto no sistema econômico dos municípios que compõem as bacias difusas do baixo Parnaíba – Piauí, pois, devido ao empobrecimento do solo fica prejudica a produção de alimentos em consequência da perda da camada superficial, que concentra a maior quantidade de nutrientes e matéria orgânica, compromete sua adequação para cultivo. Esses elementos são primordiais para a manutenção da fertilidade do solo e, conseqüentemente, para a produtividade agrícola.

O método utilizado para obtenção dos fatores R e LS produziu resultados adequados em termos dos valores obtidos, especialmente no que se refere à representação espacial por meio de mapeamento, o que permitiu melhor apreciação das classes de erosão. Os mapas de erosão potencial e a erosão real permitiram identificar áreas em risco de erosão acelerada, dando ao

governo informações importantes para o planejamento do território, a fim de priorizar a conservação do solo e da água da bacia hidrográfica do rio Parnaíba.

O potencial erosivo na bacia hidrográfica variou de "muito baixo" em áreas com relevos suaves e próximos ao escoamento de drenagem, a "muito elevado" em divisores topográficos de cursos d'água e áreas com relevos mais acidentados. Portanto, as áreas mais críticas, no que diz respeito ao potencial erosivo, foram aquelas associadas a maiores declividades.

Os resultados sobre a erosão real indicam uma predominância da classe de "baixa" erosão, mas observou-se um decréscimo nessa área ao longo dos anos. Classes como "moderado-alto", "alta" e "muito alta" aumentaram em termos de área em 2021 em comparação com 2006, indicando mudanças no uso da terra que favorecem o aumento da vulnerabilidade à ocorrência de processos erosivos.

Essas mudanças estão associadas à perda de áreas como mata nativa, áreas de vegetação, aumento de pastagens, áreas cultivadas e crescimento populacional em áreas urbanas e rurais. Locais com características erosivas visíveis, com presença de ravinas e voçorocas, foram identificados em áreas urbanas e rurais, verificando-se principalmente o fator K, que indicou solos com alta probabilidade de erosão. Algumas dessas características estavam localizadas próximas a rodovias e outros próximos a residências, indicando um potencial perigo para a população do entorno.

Por fim, destaca-se que as análises realizadas, utilizando a RUSLE aliada ao ambiente SIG, além da análise multivariada da erodibilidade e o trabalho de campo forneceram resultados significativos na identificação e avaliação do potencial erosivo e das feições erosivas nas bacias difusas do baixo Parnaíba, Piauí. A integração dessas metodologias permitiu uma abordagem mais abrangente na análise das áreas com risco de erosão dos solos. Os resultados obtidos contribuem para o avanço do conhecimento acadêmico, na tomada de decisões e no desenvolvimento de políticas públicas voltadas para o uso sustentável do solo nessa região.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. Participação das superfícies aplainadas nas paisagens do Nordeste Brasileiro. **Geomorfologia**, n. 19, p. 1–38, 1969.
- AGELE, D. M., LIHAN, T. B., RAHIM, S. A., RAHMAN, Z. A. Risk assessment of soil erosion downstream of the Pahang river basin with RUSLE model. **Ecology, Environment and Conservation**, v. 19, p. 571–580, 2013.
- ALBUQUERQUE, A. W., FILHO, G., SANTOS, J. R., COSTA, J. P., & SOUZA, J. L. Determinação de fatores da equação universal de perda de solo em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 153–160, jun. 2005.
- ALVES, W. S., MARTINS, A. P., MORAIS, W. A., PÔSSA, É. M., CASTRO, R. M., MOURA, D. M. B. USLE modelling of soil loss in a Brazilian Cerrado catchment. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 27, p. 100788, 1 ago. 2022.
- ADEDIJI, A.; JEJE, L. K.; IBITOYE, M. O. Urban development and informal drainage patterns: Gully dynamics in Southwestern Nigeria. **Applied Geography**, v. 40, p. 90-102, 2013.
- ADEDIJI, A.; TUKUR, A.; ADEPOJU, K. Assessment of revised universal soil loss equation (RUSLE) in Katsina area, Katsina state of Nigeria using remote sensing (RS) and geographic information system (GIS). **Iran J Energy Environ** 1(3):255–264, 2010.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras – Edição Especial – 2014, Brasília – DF, 2015. 163p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Fatos e Tendências**. Brasília: ANA; CEBDS, 2009.
- ABREU, L. P.; MUTTI, P. R.; LIMA, K. C. Variabilidade espacial e temporal da precipitação na bacia hidrográfica do Rio Parnaíba, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 7, n. 2, 2019.
- ALATORRE, L. C.; BEGUERÍA, S. Identification of Eroded Areas Using Remote Sensing in a Badlands Landscape on Marls in the Central Spanish Pyrenees. **Catena**, 76, 182-190, 2009.
- ALMOROX, A., J. LÓPEZ, F., RAFAELLI, S. **La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación**. Murcia: Universidad de Murcia, 2010. p.384.
- AVELAR, A. S.; LACERDA, W. A.; NETTO, A. L. C. Mecanismos de iniciação de fluxos detríticos no Maciço da Tijuca, Rio de Janeiro (RJ): O caso da encosta do Soberbo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 1, 2006.
- AVELAR, A. S.; NETTO, A. L. C.; LACERDA, W. A.; BECKER, L. B.; MENDONÇA, M. B. Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil. In **Landslide science and practice** (pp. 265-270). Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; SILVA, C. O.; GOMES, A. A. N.; FIGUEREDO JÚNIOR, L. G. M. **Atlas Climatológico do Estado do Piauí**. Série Documentos, 101. Teresina: EMBRAPA-Meio Norte, 2004.

ANDRADE, R. D. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n. 4, p. 382-388, 2009.

ARAÚJO, F. S.; SALVIANO, A. A. C.; HOLANDA NETO, M. R. Estimativa da erodibilidade de latossolos do Piauí. **Scientia Plena**, v. 7, n. 10, p. 2839–2845, 2011.

ARAUJO, G. H. S.; ALMEIDA, J. R.; GUERRA, A. J. T. **Gestão Ambiental de Áreas Degradadas**. 7ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011.

ASSIS, J. M. O.; CALADO, L. O.; SOUZA, W. M.; SOBRAL, M. C. Mapeamento do uso e ocupação do solo no município de Belém de São Francisco – PE nos anos de 1985 e 2010. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.7, n.5, p. 859-870, 2014.

AUGUSTO FILHO, O. Escorregamentos em encostas naturais e ocupadas: análise e controle. In: BITAR, O. Y. (Coord.). **Curso de geologia aplicada ao meio ambiente**. São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1995. p. 77-100.

AUGUSTO FILHO, O. O estudo das corridas de massa em regiões serranas tropicais: um exemplo de aplicação no município de Ubatuba, SP. **Congr. Bras. Geol. Eng**, v. 7, p. 63-70, 1993.

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C. Estabilidade de taludes. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p. 243-269.

AUGUSTO FILHO, Oswaldo. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: **Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas-COBRAE. Anais**. 1992. p. 721-733.

AMORIM, J. V. A.; VALLADARES, G. S.; PORTELA, M. G. T. Classificação Não-Supervisionada de Imagens Rapideye no Mapeamento da Cobertura das Terras do Delta do Parnaíba, Piauí. **GEOSABERES: Revista de Estudos Geoeducacionais**, v. 12, n. 1, p. 88–106, 2021.

AMORIM, R. R.; OLIVEIRA, R. C. As unidades de paisagem como uma categoria de análise geográfica: o exemplo do município de São Vicente-SP. **Sociedade & natureza**, v. 20, p. 177–198, 2008.

AMORIM, R. S.; SILVA, D. D. D.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. D. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. **Engenharia Agrícola**, v. 30, p. 1046–1049, dez. 2010.

AQUINO, C. M. S.; OLIVEIRA, J. G. B. Estimativa do fator erodibilidade (k) das associações de solos do estado Piauí descritas em Jacomine (1986). **Revista Geotemas**, v. 7, n. 1, p. 26–36, 2017.

BARBOSA, A. F.; OLIVEIRA, E. F. D.; MIOTO, C. L.; FILHO, A. C. P. The Application of the Universal Soil Loss Equation by Using Free and Available Softwares. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 38, n. 1, p. 170–179, 2015.

BARBOSA, W. C. S.; VALLADARES, G. S. Análise da paisagem e do uso e cobertura das terras no Nordeste brasileiro, litoral semiárido. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 674–686, 2020.

BARBOSA, W. C. S.; LIMA, I. M. M. F.; GUERRA, A. J. T. Estudo da erosão do solo em voçoroca localizada no município de Miguel Alves - Piauí/Brasil, a partir dos parâmetros de densidade e porosidade do solo. In: (Org.) PEREIRA, R.; CACHADA, A.; RODRÍGUEZ-SEIJO, A.; SOARES, C. F.; LOURENÇO, L.; MARTINS, M. J.; OLIVEIRA, S.; ANDREANI, T.; NOGUEIRA, V. **Solos e Desenvolvimento Sustentável: Desafios e Soluções**. 1 ed. Porto: GreenUPorto – Centro de Investigação em Produção Agroalimentar Sustentável, U.Porto Press, v.1, 2021a, p. 304-309.

BARBOSA, W. C. S.; LIMA, I. M. M. F.; GUERRA, A. J. T. Análise multivariada da voçoroca urbana localizada na porção sul da bacia hidrográfica do Baixo Rio Parnaíba. **William Morris Davis - Revista de Geomorfologia**, v. 2, n. 2, p. 1–15, 2021b.

BARBOSA, W. C. S.; VALLADARES, G. S. Mapeamento e Caracterização Geoambiental do Município de Cajueiro da Praia, PIAUÍ – BRASIL In: (Org.) SCABELLO, A. L. M.; VIANA, B. A. S.; ALBUQUERQUE, E. L. S. **Dinâmicas ambientais-urbanas e formação docente no espaço geográfico piauiense**. 1 ed. Sobral- CE: Sertão Cult, v.5, 2022, p. 101-116.

BARBOSA, W. C. S.; GUERRA, A. J. T.; VALLADARES, G. S. Soil Erosion Modeling Using the Revised Universal Soil Loss Equation and a Geographic Information System in a Watershed in the Northeastern Brazilian Cerrado. **Geosciences**, v. 14, n. 3, p. 78, 2024.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURI, N.; VIOLA, M. R.; AVANZI, J. C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **CATENA**, v. 79, n. 1, p. 49–59, 15 out. 2009.

BALDASSARINI, J. S. **Contribuição ao estudo das dinâmicas de perda de solo por meio de técnicas diretas e indiretas de estimação em propriedades rurais de Getulina e Vera Cruz-SP**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Estadual Paulista. São Paulo. p 313. 2016.

BANDEIRA, A. A. **Evolução do processo erosivo na margem direita do rio São Francisco e eficiência dos enrocamentos no controle da erosão**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Sergipe. São Cristovão, 2005.

BENGTSON, R. L.; SABBAGH, G. USLE P factors for subsurface drainage on low slopes in a hot, humid climate. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 45, n. 4, p. 480-482, 1990.

BERGSMA, E.; CHARMAN, P.; GIBBONS, F.; HURNI, H.; MOLDENHAUER, W. C. E.; PANICHAPONG, S. **Terminology for soil erosion and conservation**. Holanda: International Society of Soil Science: ITC, 1996.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 3. ed. São Paulo: Editora Ícone, 1993.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 4. ed. Campinas: Ícone, 1999. 355 p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 9. ed. São Paulo: Ícone, 2014. 355 p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F., **Conservação do Solo**. Piracicaba. São Paulo: Livroceres. 1985. 392 p.

BESKOW, S.; MELLO, C.R.; NORTON, L.D.; CURI, N.; VIOLA, M.R.; AVANZI, J.C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, v. 79, n. 1, p. 49-59, 2009.

BEZERRA, J. F. R.; GUERRA, A. J. T.; RODRIGUES, S. C. Variação da umidade superficial do solo em parcelas experimentais com uso de geotêxteis biodegradáveis, Uberlândia–MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 1, 2012.

BIGARELLA, J. J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: UFSC, 2003.

BORGES, K. M. R. **Avaliação de susceptibilidade erosiva da Bacia do Rio Carinhanha (MG/BA) por meio da EUPS – Equação Universal de Perda dos Solos**. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado. 2009.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 790p.

BRAUN, W. A. G. Contribuição ao estudo da erosão no Brasil e seu controle. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 23, p. 591-642, 1961.

BUCKMAN, H. O.; BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1976. 595 p. Caderno da Região Hidrográfica do Parnaíba / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. – Brasília: MMA, 2006.

BAZZANO, M. G. P.; ELTZ, F. L. F.; CASSOL, E. A. Erosividade e características hidrológicas das chuvas de Rio Grande (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 235-244, 2010.

BOARDMAN, J.; FAVIS-MORTLOCK, D. T. The significance of drilling date and crop cover with reference to soil erosion by water, with implications for mitigating erosion on agricultural land in South East England. **Soil Use Manage**, v. 30, p. 40-47, 2014.

BOARDMAN, J.; FAVIS-MORTLOCK, D. T. The use of erosion pins in geomorphology. In: COOK, S. J.; CLARKE, L. E.; NIELD, J. M. (eds.). **Geomorphological Technique** (Online Edition). London: British Society for Geomorphology, p. 10, 2016.

BOARDMAN, J. How much is soil erosion costing us? **Geography**, v. 106, n. 1, p. 32-38, 2021.

BOARDMAN, J.; POESEN, J.; EVANS, M. Slopes: soil erosion. **Geological Society, London, Memoirs**, v. 58, 2021.

BOTELHO, R. G. M. **Delimitação de unidades ambientais na bacia do rio Cuiabá (Petrópolis – RJ), visando o planejamento do uso do solo**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-graduação em Geografia, da UFRJ, Rio de Janeiro, 148p, 1996.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. SDS- Consórcio ZEE; MEDEIROS, J. S. Programa zoneamento ecológico-econômico: projeto piloto zoneamento ecológico-econômico do baixo rio Parnaíba. In: Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, 2002, Aracaju. **Anais eletrônicos** [...] Aracaju/SE, 2002. p. 1 – 5. Disponível em: http://www.cpatc.embrapa.br/labgeo/srgsr1/pdfs/pa_ab_01.PDF. Acesso em 21 fev. 2022.

BRASIL, C. S. G. Mapa geológico do estado do Piauí. 2006.

CARSON, M. A. **The mechanics of erosion**. London: Pion Limited, 1971.

CARVALHO, E. M.; PINTO, S. A. F.; SEPE, P. M.; ROSSETI, L. A. F. G. Utilização do geoprocessamento para avaliação de riscos de erosão do solo em uma bacia hidrográfica: estudo de caso da bacia do rio Passa Cinco/SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 3, 2010, Recife. **Anais...** Recife: UFPE, 2010. p. 1–8. Disponível em: https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIII/IIISIMGEO_CD/artigos/.../SIG/A_101.pdf

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JÚNIOR, N. P.; SANTOS, P.M.C.; LIMA, J.E.F.W. **Guia de práticas sedimentométricas**. Brasília: ANEEL, 2000, 154 p.

CASTRO, A. G.; FILHO, M V. Simulação da expectativa de perdas de solo em microbacia sob diferentes manejos florestais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 419-426, 1997.

CALIF, E. S. R. I. **Getting to Know ArcView GIS: The Geographic Information System (GIS) for Everyone**. [s.l.] ESRI, Inc., 1999.

CARNEIRO, A. F. S.; FARIA, K. M. S.; ROSA, L. E. Perda de solos em bacias hidrográficas da microrregião do Vão do Paranã – GO. **Boletim de Geografia**, v. 39, p. 440-e61356, 2021.

CEPRO, CENTRO DE PESQUISAS ECONÔMICAS E SOCIAIS DO PIAUÍ. **Estudo das Potencialidades, Investimentos e Reflorestamento do Vale do Médio e Baixo Parnaíba**. Teresina: CEPRO, 1993.

CERQUEIRA, E. B.; GOMES, J. M. A. Expansão agropecuária e dinâmicas de uso e cobertura do solo no Piauí. **Geo UERJ**, n. 42, p. 69241, 12 maio 2023.

CENTENO, L. N.; GUEVARA, M. D. F.; CECCONELLO, S. T.; SOUSA, R. O.; TIMM, L. C. Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 31-37, 2017.

CEPRO. Centro de Pesquisas Econômicas Sociais do Piauí – Informações Municipais 2000 – **Anuário Estatístico do Piauí**. Teresina: Fundação Cepro, 2001.

CHAVES, H. M. L. **Estimativa da erosão atual e potencial no vale do São Francisco**: relatório final de consultoria. Brasília: CODEVASF/FAO, 1994. 35 p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1981.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 190 p. 1980.

CLOKE, P.; COOK, I.; CRANG, P.; GOODWIN, M.; PAINTER J.; PHILO, C. **Practising Human Geography**. London: SAGE Publications Ltd., 2004, 416p.

COLODRO, G.; CARVALHO, M. P.; ROQUE, C. G.; PRADO, R. M. Erosividade da chuva: distribuição e correlação com a precipitação pluviométrica de Teodora Sampaio (SP). **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 809-818, 2002.

CONQ, M.; SILVEIRA, C. S.; DOURADO, F. Processos geomorfológicos e danos derivados da corrida de detritos de janeiro 2011 na bacia do Córrego do Príncipe, Teresópolis–Região Serrana do Rio de Janeiro. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 1, p. 93-103, 2015.

CORDEIRO, A. M. N.; BASTOS, F. DE H.; MAIA, R. P. Caracterização Geoambiental e Compartimentação Geomorfológica da Serra do Quincuncá e Entorno, Nordeste do Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 34, p. 106–121, 2017.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA – CODEVASF. Plano de Ação para o Desenvolvimento Integrado da Bacia do Parnaíba, PLANAP: relatório final: **Plano de Ações Estratégicas da Bacia do Parnaíba/Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba** – CODEVASF. – Brasília, DF: TDA Desenho & Arte Ltda., 2006. 130p. (Plano de Ação para o Desenvolvimento Integrado da Bacia do Parnaíba, PLANAP; v. 14).

CPRM. Relatório situacional dos recursos hídricos superficiais da bacia hidrográfica do Rio Parnaíba. **SACE–Sistema de Alerta de Eventos Críticos Residência de Teresina–RETE**, 2017.

CUNHA, E. R.; BACANI, V. M.; PANACHUKI, E. Modeling soil erosion using RUSLE and GIS in a watershed occupied by rural settlement in the Brazilian Cerrado. **Natural Hazards**, v. 85, n. 2, p. 851–868, 2017.

DEMARCHI, J. C. **Geotecnologias aplicadas a estimativa de perdas de solo por erosão hídrica na sub-bacia do Ribeirão das Perobas, município de Santa Cruz do Rio Pardo, São Paulo**. 2012. 167 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Esdatual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2012.

DEODORO, S. C.; ELMIRO, M. A. T.; GARCIA, R. A. Classificação e mapeamento da textura superficial do solo a partir de dados de sensoriamento remoto e análise discriminante, na região de Volta Grande do Rio Uruguai–Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, p. 340-356, 2021

DENARDIN, J. E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. 1990. 114 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1990.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R. Distribuição espacial da erosão potencial e atual do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, MG. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, p. 677-685, 2016.

EMBRAPA. **Mapa Exploratório - Reconhecimento de Solos do Estado do Piauí**. Rio de Janeiro: Embrapa, 2018.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2018. p. 286.

EMBRAPA/EPAMIG. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos e avaliação da aptidão agrícola das terras do Triângulo Mineiro**. Rio de Janeiro: EPAMIG – DRNR, 1982. 526 p. (Boletim de Pesquisa, 1).

EGBUERI, J. C.; IGWE, O.; IFEDIEGWU, S. I. Erosion risk mapping of Anambra State in southeastern Nigeria: soil loss estimation by RUSLE model and geoinformatics. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 81, n. 3, p. 1-15, 2022.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

FARHAN, Y., ZREGAT, D., FARHAN, I. Spatial estimation of soil erosion risk using RUSLE approach, RS, and GIS techniques: a case study of Kufranja Watershed, Northern Jordan. **J Water Resour Prot** v. 5 n. 12 p. 1247–1261, 2013. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2013.512134>

FARIAS, E. A. O.; GUILHERME, A. S.; SILVA, A. C. B.; ARAUJO, R. A.; ESTEVES, E. M. M.; MORGADO, C. D. R. V. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e o Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da cidade do Rio de Janeiro. **Sustentabilidade: Diálogos Interdisciplinares**, v. 3, p. 1–20, 16 mar. 2022.

FARINASSO, M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; RAMOS, V. M. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS – Equação Universal de Perdas de Solo – utilizando novas tecnologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba – PI-MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, p. 73–85, 2006.

FALCÃO, C. J. L. M.; DUARTE, S. M. A.; VELOSO, A. S. Estimating potential soil sheet Erosion in a Brazilian semiarid county using USLE, GIS, and remote sensing data. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 1, p. 1-11, 2020.

FAVIS MORTLOCK, D.; BOARDMAN, J.; FOSTER, I.; SHEPHEARD, M. Comparison of observed and DEM-driven field-to-river routing of flow from eroding fields in an arable lowland catchment. **Catena**, v. 208, p. 105737, 2022.

FAVIS MORTLOCK, D. Erosion by Water: Accelerated. *In: **Managing Soils and Terrestrial Systems***. CRC Press, p. 25-33, 2020.

FERNÁNDEZ, T.; PÉREZ-GARCÍA, J. L., GÓMEZ-LÓPEZ, J. M., CARDENAL, J., CALERO, J., SÁNCHEZ-GÓMEZ, M., ... & Tovar-Pescador, J. Multitemporal analysis of gully erosion in olive groves by means of digital elevation models obtained with aerial photogrammetric and LiDAR data. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 4, p. 260, 2020.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. do. Movimentos de massa: uma abordagem geológico geomorfológica. *In: GUERRA, A.T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente***. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 123-194.

FILHO, A. B. F.; VIEIRA, A. F. S. G. Monitoramento de Voçorocas na bacia Colônia Antônio Aleixo, Manaus – AM. *In: VIEIRA, A. F. S. G; MOLINARI, D. C. (Org.). **Geografia Física da Amazonia***. São Paulo: Alexa Cultural; EDUA: Manaus, AM, p. 45-59, 2020

FIORESE, C. H. Dinâmica do fator topográfico (LS) da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Catarina, zona rural do município de Guaçuí (ES). **Revista brasileira de pesquisas agrícolas**, v. 2, n.1, 2021.

FIORESE, C. H. U. Fator topográfico (ls) das áreas de pastagem da microbacia hidrográfica do córrego São Francisco, no município de Ibitirama (ES). **Revista Tocantinense de Geografia**, v. 10, n. 21, p. 01-11, 2021.

FIORESE, C. H. U. Potencial natural à erosão dos solos da sub-bacia hidrográfica do córrego da vista alegre, no município de Muniz Freire (ES). **Revista Tocantinense de Geografia**, v. 10, n. 22, p. 221-230, 2021

FOSTER, G. R. Modelling the erosion process. *In: HANN, C.T.; JOHNSON, H.P.; In: BRANKENLEK, D.L. (Orgs.) **Hydrologic modeling of small watershed***. St. Joseph: ASAE; FAO, p. 297-382, 1982.

FREITAS, M. M.; FARIAS, A.; PINTO, R. W. P. Abordagem Geomorfológica na Deflagração de Movimentos de Massa em janeiro de 2011 no bairro de Nova Conquista, Nova Friburgo – RJ. **GeoPUC**, v. 6, n. 11, p. 9-26, 2014.

FULLEN, M. A.; CATT, J. A. **Soil Management: Problems and Solutions**. Edward Arnold, Londres, 2004.

GALDINO, S. Distribuição espacial do fator topográfico da Rusle na Bacia do Alto Paraguai. **Embrapa Territorial-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2015.

GALERANI, C.; RAMOS, C. L.; CHAVES, E.; GENZ, F.; BIDONE, F. Controle da Erosão Urbana. *In: TUCCI, C.E.M. PORTO, R.L.; BARROS, M. T. Drenagem urbana*. Porto Alegre: ABRH, UFRGS, 1995. p. 349-387.

GALETI, P. A. Conservação do solo: **reflorestamento e clima**. Campinas: Instituto Campineiro de ensino agrícola, 257p. 1982.

GARCÍA RUÍZ, J. M.; LOPÉZ BERMÚDEZ, F. La erosión del suelo en Españã. **Sociedad Española de Geomorfología** (SG), Zaragoza, p.441, 2009.

GARRITANO, F. N.; LOUREIRO, H. A. S.; SANTOS, D. S.; GUERRA, A. J. T. Mapeamento da erosão: análise e caracterização de uma voçoroca através do uso de imagens aéreas, obtidas com drone. *In: Antonio Jose Teixeira Guerra; Raphael David dos Santos Filho. Carlos Gonçalves Terra. (Orgs.). Arte e Ciência: História e Resiliência da Paisagem*. 1ed. Rio de Janeiro: Rio Books, 445-456, 2019

GHOSAL, K.; BHATTACHARYA, S. A review of RUSLE model. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 48, n. 4, p. 689-707, 2020.

GRAEF, O.; GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O. Catastrophic floods and landslides in Brazil. **Geography Review**, v. 26, p. 38-41, 2012.

GOMES, F. E. F.; MAMEDE, G. L.; LOPES, F. B. Alternativa para o cálculo automático e especializado do fator topográfico da USLE em bacias hidrográficas. **IRRIGA**, v. 1, n. 2, p. 6-13, 2018.

GOUDIE A. S.; BOARDMAN, J. Soil erosion. In Alcántara-Ayala I, Goudie A. *In: (eds) Geomorphological Hazards and Disaster Prevention*. Cambridge University Press, Cambridge. p. 177-188, 2010.

GOUDIE, A. The human impact in Geomorphology – 50 years of change. **Geomorphology**, 13, 1, 1-17, 2019.

GELAGAY, Habtamu Sewnet; MINALE, Amare Sewnet. Soil loss estimation using GIS and Remote sensing techniques: A case of Koga watershed, Northwestern Ethiopia. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 4, n. 2, p. 126-136, 2016.

GUERRA, A. J. T.; LOUREIRO, H. A. S. Grandes Temas e Conceitos da Paisagem Geomorfológica à Luz do Século XXI. **Paisagens da geomorfologia: Temas e conceitos no século XXI**. Rio de Janeiro: Bertrand, 2022.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. [s.l.] Bertrand Brasil, 1994.

GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. DO C. O. **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas**. [s.l.] Oficina de Textos, 2017.

GUERRA, A. J. T. Processos Erosivos nas Encostas. *In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Org.). Geomorfologia uma atualização de bases e conceitos*. 14 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 149-199, 2018.

GUERRA, A.J.T., FULLEN, M.A., BEZERRA, J.F.R., JORGE, M. C.O. Gully Erosion and Land Degradation in Brazil: A Case Study from São Luís Municipality, Maranhão State. In: Dagar, Jagdish Chander, Singh, Anil Kumar. (Organizadores). **Ravine Lands: Greening for Livelihood and Environmental Security**. 1ed.Cingapura: Springer Singapore, v. 1, p. 195-216, 2018.

GUERRA, A. J. T. **Dicionário geológico e geomorfológico**. Rio de Janeiro: IBGE, 1978. 448 p.

GUERRA, A. J. T. Experimentos e Monitoramentos em Erosão dos Solos. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 32-37, 2005. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2005.0016.0003>

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S., BOTELHO, R. G. M. **Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações**. 9ª. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 17-55, 2014.

GUERRA, A. J. T. The effect of organic matter content on soil erosion in simulated rainfall experiments in W. Sussex, UK. **Soil use and management**, v. 10, n. 2, p. 60-64, 1994.

GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; JORGE, M. D. C. O.; BEZERRA, J. F. R.; SHOKR, M. S. Slope processes, mass movement and soil erosion: A review. **Pedosphere**, v. 27, n. 1, p. 27-41, 2017. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60294-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60294-7)

GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O. Degradação dos Solos—Abordagens Teóricas e Estudos de Casos, ao Longo de 25 Anos (1994–2019), no Âmbito do Lagesolos. **Humboldt-Revista de Geografia Física e Meio Ambiente**, v. 1, n. 2, 2021. Disponível em: <https://www.epublicacoes.uerj.br/index.php/humboldt/article/view/57375/36820>

GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O.; RANGEL, L. A.; BEZERRA, J. F. R.; LOUREIRO, H. A. S.; GARRITANO, F. N. Erosão dos solos, diferentes abordagens e técnicas aplicadas em voçorocas e erosão em trilhas. **William Morris Davis - Revista de Geomorfologia**, v. 1, n. 1, p. 75 – 117, 2020. DOI: <https://doi.org/10.48025/ISSN2675-6900.vol1n1.p75-117.2020>

GUERRA, A. J. T.; BEZERRA, J. F. R.; JORGE, M. C. O. Recuperação de voçorocas e de áreas degradadas, no Brasil e no mundo-estudo de caso da voçoroca do Sacavém-São Luís—MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 00, 2023.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 1996.

GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; JORGE, M. C. O.; ALEXANDRE, S. T. Soil Erosion and Conservation in Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. Rio de Janeiro, v. 37, n. 1, p. 81-91, 2014.

GÓES, A. M.; FEIJÓ, F. J. Parnaíba Basin; Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 8, p. 57-67, 1994.

GOMES, F. E. F.; MAMEDE, G. L.; LOPES, F. B. Alternativa para o cálculo automático e espacializado do fator topográfico da USLE em bacias hidrográficas. **IRRIGA**, v. 1, n. 2, p. 6-13, 2018.

GOMEZ, B.; JONES, J. P. **Research Methods in Geography**. Oxford: Blackwell Publishing Ltda., 2010, 459p.

GLOSSARY OF SOIL SCIENCE TERMS. Soil Science Society of America, Wisconsin, Estados Unidos, 1987, 44p.

HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M.; BARTORELLI, A. **Geologia do Brasil**. São Paulo: Oficina de Texto. 2012.

HEMEDA, S. Geo-environmental monitoring and 3D finite elements stability analysis for site investigation of underground monuments. Horemheb tomb (KV57), Luxor, Egypt. **Heritage Science**, v. 9, n. 1, p. 17, dez. 2021.

HUI, L.; XIAOLING, C.; LIM, K.J.; XIAOBIN, C.; SAGONG, M. Assessment of soil erosion and sediment yield in Liao watershed, Jiangxi province, China, using USLE, GIS and RS. **Journal of Earth Science**, v. 21, n. 6, p. 941-953, 2010.

IMESON, A.C.; KWAAD, F.J.P.M. Gully types and gully prediction. **Geografisch Tijdschrift**, v. 14, n. 5, p. 430-441, 1980.

IONITA, I.; NIACSU, L.; POESEN, J.; FULLEN, M. A. Controls on the development of continuous gullies: A 60 year monitoring study in the Moldavian Plateau of Romania. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 46, n. 13, 2746-2763, 2021.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo - bacia do Peixe - Paranapanema. São Paulo, **IPT- Relatório Técnico** n.23, p. 739, 1986.

JACOMINE, P. K. T. **Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Piauí**. Rio de Janeiro: EMBRAPA - SNLCS/SUDENE, 1986. (Boletim de pesquisa, 26).

JACOMINE, P. K. T. A nova classificação brasileira de solos. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, v. 5, p. 161-179, 2008.

JIANG, N. et al. Estimating the Soil Erosion Response to Land-Use Change Using GIS-Based RUSLE and Remote Sensing: A Case Study of Heilongjiang Province, China. **Sustainability**, v. 15, n. 10, p. 8004, jan. 2023.

JORGE, M. C. O.; GUERRA, A. J. T. Erosão dos solos e movimentos de massa- recuperação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia e prevenção de acidentes. *In*: JORGE, M. C. O.; GUERRA, A. J. T. **Processos Erosivos e Recuperação de Áreas Degradadas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

KASTRIDIS, A.; STATHIS, D.; SAPOUNTZIS, M.; THEODOSIOU, G. Insect Outbreak and Long-Term Post-Fire Effects on Soil Erosion in Mediterranean Suburban Forest. **Land**, v. 11, n. 6, p. 911, jun. 2022.

- LAL, R. Soil Erosion Impact on Agronomic Productivity and Environment Quality. **Critical Reviews in Plant Sciences**, 1 jul. 1998.
- LEITE, O. C.; ORLANDO, P. H. K.; VIOLA, M. R. Mapeamento de feições erosivas lineares em Três Ranchos (GO). **Espaço em Revista**, v. 18, n. 2, 2016.
- LEE, J., LEE, S., HONG, J., LEE, D., BAE, J. H., YANG, J. E.; LIM, K. J. Evaluation of rainfall erosivity factor estimation using machine and deep learning models. **Water**, v. 13, n. 3, p. 382, 2021.
- LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos**. 1ª reimpressão 2005, São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2002.
- LISBOA, G. S.; BARBOSA, W. C. S.; BEZERRA, J. F. R.; GUERRA, A. J. T. Análise dos fatores de erodibilidade e declividade na Bacia do Rio dos Cachorros – MA e Baixo Parnaíba - PI. **Anais do XV Encontro Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Geografia**, 2023. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/editora/anais/enanpege/2023/TRABALHO_COMPLETO_EV187_MD6_ID872_TB865_27112023221945.pdf>
- LI, M.; LI, T.; ZHU, L.; MEADOWS, M. E.; ZHU, W.; ZHANG, S. Effect of land use change on gully erosion density in the black soil region of northeast China from 1965 to 2015: a case study of the Kedong County. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, p. 111, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.652933>
- LI, Ying-kui. Determining topographic shielding from digital elevation models for cosmogenic nuclide analysis: a GIS model for discrete sample sites. **Journal of Mountain Science**, v. 15, n. 5, p. 939-947, 2018.
- LIMA, M. C. **Degradação Físico-Química e Mineralógica de Maciços junto a voçorocas**. 2003. 364f. Tese – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, 2003, 336 p
- LIMA, I. M. M. F.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Bacia hidrográfica do rio Poti: dinâmica e morfologia do canal principal no trecho do baixo curso. **REVISTA GEONORTE**, v. 5, n. 20, p. 161–165, 12 jan. 2014.
- LIMA, I. M. M. F. Hidrografia do Estado do Piauí, disponibilidades e usos da água. In: AQUINO, C. M. S. A.; SANTOS, F. A. **Recursos Hídricos do Estado do Piauí: fundamentos de gestão e estudos de casos em bacias hidrográficas do centro-norte piauiense**. Teresina: EDUFPI, 2017. p.43-68.
- LIMA, I. M. M. F. Geomorphology of the States of Piauí. In: CLAUDINO SALES V.; FALCÃO SOBRINHO, J. (Org.). **Geomorphology of the Northeast of Brazil**. In: Holland: Springer, 2024. (Em prelo)
- LIMA, I. M. M. F. **Relevo do Piauí: uma proposta de classificação**. Teresina: CEPRO, 1987. Disponível em: <http://Iracildefelima.webnode.com>.
- LIMA, I. M. M. F. Rio Parnaíba: da chapada ao oceano. **Revista do Instituto Histórico e Geográfico do Piauí**. 100 Anos, v. 8, Ano C, 2018.

LIMA, I. M. M. F.; AUGUSTIN, C. H. R. R. O relevo do espaço piauiense: aspectos de sua estruturação e evolução. Simpósio Nacional de Geomorfologia, VIII, Sensitividade de paisagens: geomorfologia e as mudanças ambientais, Recife, 2010, **Anais...**, Recife, 2010.

LIMA, S. M. S. A.; LOPES, W. G. R.; FAÇANHA, A. C. Alterações na Cobertura do Solo em Teresina, Piauí, Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 33, 2021.

LIRA, W. S.; CÂNDIDO, G. A. **Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa**. [s.l.] EDUEPB, 2013.

LIMA, M. L. D. S.; SOLÓRZANO, A.; REGO, L. F. G.; FREITAS, M. M. D.; PORTO, B. P. A. Vulnerabilidade e riscos Socioecológicos: uma perspectiva integrada dos riscos na Região de Guaratiba (Rio de Janeiro-Brasil). **Sociedade & Natureza**, v. 33, p. 1-16, 2021.

LOPES, L. H. M. Uso e Cobertura do Solo no Município de Tailândia-PA Utilizando o TM/LANDSAT e Técnica de Classificação Não-Supervisionada. **ENGEVISTA**, v. 10, nº 2, p. 126-132, dez. 2008.

LOUREIRO, H. A. S. **Monitoramento e diagnóstico de áreas degradadas na bacia hidrográfica do rio São Pedro (RJ)- estudos experimentais em voçoroca e utilização de geotêxteis de fibra de bananeira**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, 216p., 2013.

LOUREIRO, H. A. S.; GUERRA, A. J. T. Grandes temas e conceitos da paisagem geomorfológica à luz do século XXI. In: GUERRA A. J. T; LOUREIRO, H. A. S (Org.). Paisagens da Geomorfologia: **Temas e Conceitos do Século XXI**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2022.

LOUREIRO, H. A. S.; GUERRA, A. J. T.; BEZERRA, J.; PEREIRA, L.; GARRITANO, F. 9. Monitoramento da erosão hídrica no Brasil: dos métodos manuais aos digitais. In: **Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira**. UNB: JUNIOR, O.A.C.; GOMES, M.C.V.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T, 2022. p. 530–563p.

LOUREIRO, H. A. S.; GUERRA, A. J. T.; ANDRADE, A. G. Contribuição ao estudo de voçorocas a partir do uso experimental de laser scanner terrestre e VANT. **Revista Brasileira de Geomorfologia. (Online)**, São Paulo, v.21, n.4, (Out-Dez) p.871-892, 2020.

LU, D. et al. Mapping soil erosion risk in Rondonia, Brazilian Amazonia: using RUSLE, remote sensing and GIS. **Land degradation & development**, v. 15, n. 5, p. 499–512, 2004.

LUVAI, A.; OBIERO, J.; OMUTO, C. Soil Loss Assessment Using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) Model. **Applied and Environmental Soil Science**, 2022.

MARQUES, J. S. Ciência Geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia - Exercícios, Técnicas e Aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand, v. 1, p. 25-56, 1996.

MARTINI, L. C. P.; UBERT, A. A. A.; SHEIBE, L. F.; COMIN, J. J.; OLIVEIRA, M. A. T. Avaliação da Suscetibilidade a Processos Erosivos e Movimentos de Massa: Decisão Multicriterial Suportada em Sistemas de Informações Geográficas. **Revista do Instituto de Geociências – USP** v. 6, n. 1, p. 41-52, 2006.

- MANNIGEL, A. R.; PASSOS, M.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v. 24, p. 1335–1340, 2002.
- MAPBIOMAS. **Estatística de acurácia**. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/accuracy-statistics>>. Acesso em: 6 jul. 2023.
- MARQUES, J. S. Ciência Geomorfológica. *In*: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.) **Geomorfologia uma atualização de bases e conceitos**. 14. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2018. p. 23–50.
- MATTOS, J. B.; PAULA, F. C. F. D. Análise Geoambiental de uma microbacia hidrográfica no município de Lençóis, Chapada Diamantina (Bahia), Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 29, n. 1, 18 maio 2017.
- MELO, M. S.; CLAUDINO-SALES, V.; PEULVAST, J. P.; SAADI, A.; MELLO, C. L. Processos e produtos morfogenéticos continentais. **Quaternário do Brasil**. Ribeirão Preto: Holos, p. 258–275, 2005.
- MELLO, G.; BUENO, C.; PEREIRA, G. Variabilidade espacial de perdas de solo, do potencial natural e risco de erosão em áreas intensamente cultivadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 315-322, 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662006000200010>. Acesso em: dez. 2020
- MELO, L. M. R.; MANRIQUE, H. N.; MACHADO, J. H. R.; SILVA, H. A. Os impactos ambientais em decorrência da interferência negativa humana arraçoada pelo progresso econômico. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 10, p. 74935-74952, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n10-063>
- MEHRI, A.; SALMANMAHINY, A.; TABRIZI, A. R. M.; MIRKARIMI, S. H.; SADODDIN, A. Investigation of likely effects of land use planning on reduction of soil erosion rate in river basins: Case study of the Gharesoo River Basin. **Catena**, v. 167, p. 116-129, 2018.
- MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A. Review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling and Software**. v.18, 761–799, 2003.
- MIGUEL, P.; DALMOLIN, R. S. D.; MOURA-BUENO, J. M.; SOARES, M. F.; CUNHA, H. N. D.; ALBERT, R. P.; LEIDEMER, J. D. Mapeamento da erodibilidade e erosão potencial do solo em uma bacia hidrográfica de encosta. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 26, 01-09, 2021
- MICHETTE, J. F. **Modelos de previsão de erosão pluvial utilizando SIG: estudo na bacia hidrográfica da Represa do Lobo (Broa)**. 2015. 275p. Dissertação (mestrado em geotecnia) Escola de engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- MIGUEL, P.; DALMOLIN, R. S. D.; MOURA-BUENO, J. M.; SOARES, M. F.; CUNHA, H. N. D.; ALBERT, R. P., ... & LEIDEMER, J. D. Mapeamento da erodibilidade e erosão potencial do solo em uma bacia hidrográfica de encosta. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, p. 01-09, 2021.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; RUHOFF, A. L. Utilização de métodos de representação espacial para cálculo do fator topográfico na equação universal de perda de solo revisada em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1455-1462, 2010.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Caderno da Região Hidrográfica do Parnaíba**. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. – Brasília: MMA, 2006. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011023605.pdf. Acesso em: agos. 2020

_____. Ministério do Meio Ambiente; SDS. Secretaria de Políticas para o Desenvolvimento Sustentável. Relatório Preliminar: **Planejamento e Diagnóstico do ZEE Baixo Rio Parnaíba** – Diagnóstico Preliminar. Brasília: MMA/SDS, 2001.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. **Plano Nacional de Recursos Hídricos. Documento Base de Referência**. Brasília: 2003. Cap. 5, p. 125-282

MONIZ, A. C. **Elementos de pedologia**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975.

MOORE, I. D.; BURCH, G. J. Modeling erosion and deposition: Topographic effects. **Transactions of the America, Science Agricultural Engineering**, v. 29, n. 6, p. 1624-1640, 1986.

MOISA, M. B.; DEJENE, I. N.; MERGA, B. B.; GEMEDA, D. O. Soil loss estimation and prioritization using geographic information systems and the RUSLE model: a case study of the Anger River Sub-basin, Western Ethiopia. **Journal of Water and Climate Change**, p. 1-15, 2022.

MORAIS, R. C. S. Estimativa de Produção e Transporte de Sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba, Nordeste do Brasil. **Revista Equador**, v. 4, n. 4, p. 81-97, 2015.

MORAIS, R. C. S.; SALES, M. C. L. Estimativa do potencial natural de erosão dos solos da bacia hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí-Brasil, com uso de Sistema de Informação Geográfica. **Caderno de Geografia**, v. 27, n. 1, p. 84-105, 2017.

MORAIS, R. C. S.; SILVA, A. J. O. Estimativa do Potencial Natural de Erosão dos Solos na Bacia Hidrográfica do Rio Longá, Piauí, Brasil. **Revista Geotemas**, v. 10, n. 2, p. 116-137, 2020.

MORAIS, F. Caracterização geomorfológica da região de aurora do Tocantins, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 2, 2013.

MORGAN, R. **Erosión y conservación de suelo**. Madri, Espanha: Ediciones Mundi-Prensa, 1997.

MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion and Conservation**. Blackwell, Oxford, 2005.

MORGAN, R. P. C.; MARTIN, L.; NOBLE, C. A. **Soil erosion in the United Kingdom: a case study from mid-Bedfordshire**. Silsoe: Silsoe College, Cranfield Institute of Technology, 1987.

MORGAN, K. M.; NALEPA, R. Application of aerial photographic and computer analysis to the USLE for areawide erosion studies. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 37 n. 6, p. 347-350, 1982.

MOTA, J. R.; RODRIGUES, J. A. M.; OLIVEIRA, L. F. C.; VIOLA, M. Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG). **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 1, 1-14, 2021.

MOTTA, E. J. O.; GONÇALVES, N. E. W. **Plano nascente Parnaíba: Plano de preservação e recuperação de nascentes da bacia do rio Parnaíba**. Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (Codevasf): Editora IABS, Brasília-DF, Brasil, 114p, 2016.

MUKANOV, Y., CHEN, Y., BAISHOLANOV, S., AMANAMBU, A. C., ISSANOVA, G., ABENOVA, A., ... & ABAYEV, N. Estimation of annual average soil loss using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) integrated in a Geographical Information System (GIS) of the Esil River basin (ERB), Kazakhstan. **Acta Geophysica**, v. 67, n. 3, p. 921-938, 2019.

NEARING, M. A.; LANE, L. J.; LOPES, V. L. Modeling Soil Erosion. *In*: LAL, R. (Ed.) **Soil erosion: research methods**. Delray Beach: St. Lucie Press. p. 127-135, 1994.

NASCIMENTO, T. F.; COSTA, B. P. Fenomenologia e geografia: teorias e reflexões. **Geografia Ensino & Pesquisa**, p. 43–50, 2016.

NASCIMENTO, J. R. DA S.; MARCUZZO, F. F. N.; PINTO, E. J. A. **Mapas da distribuição anual e mensal da chuva e pluviograma da bacia hidrográfica do rio Parnaíba**. [s.l.] ABRH, 2020. Disponível em: <<http://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/21814>>. Acesso em: 3 jan. 2024.

OLIVEIRA, C. A.; KLIEMANN, H. J.; CORRECHEL, V.; SANTOS, F.C.V. Avaliação da retenção de sedimentos pela vegetação ripária pela caracterização morfológica e físico-química do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 12, p. 1281-1287, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010001200005>. Acesso: nov. 2020.

OLIVEIRA, L. N.; AQUINO, C. M. S. Análise dos fatores de erodibilidade e declividade na sub-bacia hidrográfica do rio Gurgueia, Piauí-Brasil. **Terr@ Plural**, v. 15, p. 1-14, 2021.

OLIVEIRA, J. A.; CÁSSARO, F. A.; PIRES, L. F. Estimating soil porosity and pore size distribution changes due to wetting-drying cycles by morphometric image analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104814, 2021.

OLIVEIRA, J. A.; DOMINGUEZ, J. M. L.; NEARING, M. A.; OLIVEIRA, P. T. S. A GIS-Based procedure for automatically calculation soil loss from the universal soil loss equation: GISus-M. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**. v. 31, n. 6, 2015. p. 907–917.

OLIVEIRA, M. A. T. Processos Erosivos e Preservação de Áreas de Risco de Erosão por Voçorocas. *In*: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). **Erosão e Conservação dos Solos – Conceitos, Temas e Aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012. p. 57-99.

OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; SOBRINHO, T. A.; CARVALHO, D. F.; PANACHUKI, E. Spatial variability of the rainfall erosive potential in the state of Mato Grosso do Sul, Brazil. **Revista Engenharia Agrícola**, 32(1): 69-79, 2012.

OLIVEIRA, J. S. **Avaliação de modelos de elevação na estimativa de perda de solo em ambiente SIG**. PhD Thesis—[s.l.] Universidade de São Paulo, 2012.

OLIVEIRA, L. N.; AQUINO, C. M. S. DINÂMICA TEMPORAL DO USO E COBERTURA DA TERRA NA FRONTEIRA AGRÍCOLA DO MATOPIBA: análise na sub-bacia hidrográfica do rio Gurguéia-Piauí. **REVISTA EQUADOR**, v. 9, n. 1, p. 317–333, 2020.

OSTERKAMP, W. R.; HUPP, C. R.; STOFFEL, M. The interactions between vegetation and erosion: new directions for research at the interface of ecology and geomorphology. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 37, n. 1, p. 23–36, 2012.

OZCAN, A. U.; ERPUL, G.; BASARAN, M.; ERDOGAN, H. E. Use of USLE/GIS technology integrated with geostatistics to assess soil erosion risk in different land uses of Indagi Mountain Pass—Cankırı, Turkey. **Environmental Geology**, v. 53, 1731-1741, 2018.

PASSOS, Messias Modesto. O MODELO GTP (Geossistema–Território–Paisagem) Como trabalhar. **Revista Equador**, v. 5, n. 1, p. 1-179, 2016.

PALM, C.; SANCHEZ, P.; AHAMED, S.; AWITI, A. Soils: A Contemporary Perspective. **The Annual Review of Environment and Resources**, New York, v. 32, p. 99-129, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.31.0201.05.100307>. Acesso em: nov. 2021.

PAN, J. J.; ZHANG, T. L.; ZHAO, Q. G. Dynamics of soil erosion in Xingguo County, China, determined using remote sensing and GIS. **Pedosphere**, v. 15, n. 3, p. 356–362, 2005.

PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K. A new European slope length and steepness factor (LS-Factor) for modeling soil erosion by water. **Geosciences** 5(2):117–126, 2015. <https://doi.org/10.3390/geoscience5020117>

PEREIRA, A. R. Determinação da perda de solo. **Boletim Técnico**, Belo Horizonte, p. 20, n.001, mar. 2006.

PEREIRA, L. C; TÔSTO, S. G.; ROMEIRO. A. R., Terra: mudanças climáticas e biodiversidade. In.: SEABRA, G. (Org). **Uso das terras: perdas de solo por erosão e valoração econômica**. Ituiutaba, MG: Barlavento, 2019. p. 929–943. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1110638/1/PereiraUsodasterras2019.pdf>. Acesso em: agos. 2021.

PELECH, A. S.; NUNES, B. T. A.; GATTO, L. C. S.; BOTELHO, R. G. M. Considerações sobre o mapeamento geomorfológico do território brasileiro: algumas abordagens na representação regional. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 3, 1 jul. 2019.

PFALTZGRAFF, P. A. S. **Geodiversidade do estado do Piauí**. CPRM, 2008.

PENNOCK, D. D. **Status of the World's Soil Resources**. Technical Summary FAO: Rome, Italy, 2015.

PEREIRA, L. S.; RODRIGUES, A. M.; JORGE, M. C. O.; GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A. Processos Hidro-Erosivos em Solos Degradados em Relevo de Baixa Declividade. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 2, 2016.

PINTO, E. J. A.; AZAMBUJA, A. D.; FARIAS, J. A. M.; SALGUEIRO, J. D. B.; PICKBRENNER, K. **Atlas pluviométrico do Brasil: isoietas mensais, isoietas trimestrais, isoietas anuais, meses mais secos, meses mais chuvosos, trimestres mais secos, trimestres mais chuvosos**. Brasília: CPRM, v. 1, 2011. Disponível em: <<https://www.cprm.gov.br/publique//Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>>. Acesso em: 12 jul. 2023.

PEREIRA, M. D. R.; CABRAL, J. B. P. Perda de solo no alto curso das bacias hidrográficas dos ribeirões Taquaruçu Grande e Taquaruçuzinho, Palmas (TO). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 01, p. 332-339, 2021.

PINTO, S. A. F. **Contribuição metodológica para análise de indicadores da erosão do solo utilizando técnicas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e modelo predictivo**. 1996, 136 f. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1996.

PINTO, S. A. F. **Sensoriamento Remoto e integração de dados aplicados no estudo da erosão de solos: contribuição metodológica**. 1991. 147 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

PINTO, S. A. F. **Utilização de técnicas de sensoriamento remoto para a caracterização de erosão do solo no SW do Estado de São Paulo. 1983** (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 1983

POESEN, J.; VANWALLEGHEM, T.; VENTE, J.; KNAPEN, A.; VERSTRAETEN, G.; MARTINEZ-CASANOVAS, J. A. Gully erosion in Europe. *In*: BOARDMAN, J.; POESEN, J. (Org.) **Soil Erosion in Europe**. John Wiley, Chichester. p. 515-536, 2006.

POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, v. 50, p. 91-133, 2003.

PREVEDELLO, J.; VOGELMANN, E.S.; KAISER, D.R.; REINERT, D.J. A funcionalidade do sistema poroso do solo em floresta de eucalipto sob Argissolo. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 100, p. 557-566, 2013. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr100/cap13.pdf>. Acesso em: dez. 2020.

RAIJ, B.V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011.

RAMALHO, M. F. J. L.; GUERRA, A. J. T. Relação entre erosão e deposição, comparando-se tais eventos com a textura de materiais colúvio-aluviais: uma análise preliminar. **Revista Geonorte**, v. 5, n. 23, p. 660-664, 2014.

RAHMATI, O.; TAHMASEBIPOUR, N.; HAGHIZADEH, A.; POURGHASEMI, H. R.; FEIZIZADEH, B. Evaluating the influence of geo-environmental factors on gully erosion in a

- semi-arid region of Iran: An integrated framework. **Science of the Total Environment**, v. 579, p. 913–927, 2017.
- RANGEL, L. A.; GUERRA, A. J. T. Caracterização de atributos do solo de trilhas ecoturísticas em Unidades de Conservação do município de Paraty (RJ). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 1, 2018.
- RANGEL, L. A.; JORGE, M. C. O.; GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A. Geotourism and soil quality on trails within Conservation Units in South-East Brazil. **Geoheritage**, v. 11, n. 3, 1151-1161, 2019.
- RENARD, K. G. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). **Agriculture handbook**, v. 703, p. 400, 1996.
- RENARD, K. G.; FREIMUND, J. R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. **Journal of Hydrology**, v. 157, n. 1, p. 287–306, 1994.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, p.29-48, 2003.
- REINERT, D. J., ALBUQUERQUE, J. A., REICHERT, J. M., AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1805-1816, 2008.
- RIVAS, M. P. **Macrozoneamento geoambiental da bacia hidrográfica do rio Parnaíba**. Rio de Janeiro: IBGE, 1996. (Série Estudos e Pesquisas em Geociências, n.4).
- RODRIGUES, J. E. **Estudo de fenômenos erosivos acelerados, boçorocas**. 162 p., 1982. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado)-USP/Escola de Engenharia, São Carlos.
- ROSA, R. O uso de sistema de informação geográfica para estimativa de perdas de solo por erosão laminar. In: SIMPOSIO NACIONAL DE GEOGRAFIA FISICA E APLICADA, XI. 1995, Goiânia. **Anais...** v. 2, p. 266-271.
- ROQUE, N.; HORTA, C.; DUARTE, A. C. Validação da RUSLE em solos com uso de produção pecuária ao ar livre. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 45, n. 4, p. 559-562, 2022.
- ROSS, J. L. S.; FIERZ, M. S. M.; VIERA, B. C. Técnicas de Geomorfologia. In: VENTURI, L. A. B. (Org.). **Geografia- Práticas de Campo, Laboratório e Sala de Aula**. São Paulo: Editora Sarandi, 2011, v. 1, p. 29-54.
- RODRIGUES, A.; SALDANHA, D. S. S.; SILVA, E. S.; Lima, J. V. Caracterização Geoambiental do Baixo Curso do Piranhas-Açu (RN). **Revista Contexto Geográfico**, v. 9, n. 18, p. 69–77-69–77, 2024.
- ROTTA, C. M. S. **Estudo de recuperação de áreas degradadas por processos erosivos: Procedimento e eficiência dos métodos**. 2012. 180p. Dissertação (mestrado em geotecnia) Escola de engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012

SÁ, L. N.; FILHO, G. B. R. A Importância da Cobertura Vegetal no Processo de Erosão e Degradação do Solo no Ensino da Geografia. **International journal education and teaching**, v. 3, n. 3, p. 173-188, 2020.

SALES, J.C.A.; SILVA, D.C.C.; ROMAGNANO, L.F.T.; BERTAGNA, R.; LOURENÇO, R.W. Avaliação do impacto ambiental causado pelas alterações espaço temporal do uso do solo e da cobertura vegetal utilizando o modelo das cadeias de markov. **Ciência e Natura**, v. 38, n. 1, p. 115-124, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/2179460X18641>. Acesso em: dez. 2021

SANTOS, R. C.; GUERRA, A. J. T. Avaliação da erosão dos solos na bacia hidrográfica do rio Pequeno, Paraty-RJ. **GEOSABERES: Revista de Estudos Geoeducacionais**, v. 12, n. 1, p. 23–43, 2021.

SANTOS, R. C. **Avaliação da erosão dos solos na bacia hidrográfica do rio Pequeno, Paraty – RJ**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-graduação em Geografia, UFRJ, Rio de Janeiro, 112p., 2017.

SANTOS FILHO, R. D. **Antropogeomorfologia do povoamento de áreas de risco em Petrópolis (RJ): análise ambiental urbana**. Tese de doutorado, do Programa de Pós-graduação em Geografia, da UFRJ, Rio de Janeiro, 228p., 2007.

SALOMÃO, F. X. T. Controle e prevenção dos processos erosivos. *In*: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Orgs.). **Erosão e conservação dos solos - conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012. p. 229-267.

SILVA, A. M. D. Potencial natural de erosão no município de Sorocaba. **Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil**, v. 8, n. 1, 2008. p. 5–14. Disponível em: <<https://academic.uprm.edu/laccei/index.php/RIDNAIC/article/view/146/142>>. Acesso em: 09 set. 2020

SILVA, D. E. M.; COSTA, D. F. S. Classificação das áreas úmidas e seus macrohabitats na planície flúvio-marinha do rio Apodi-Mossoró/RN (litoral semiárido do Brasil). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 1, p. 602–617, 23, 2022.

SILVA, V. C. Estimativa Da Erosão Atual da Bacia do Rio Paracatu (mg / Go / Df). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 34, n. 3, p. 147–159, 2004.

SILVA, K. B.; AMORIM, R. R.; MATTOS, J. B. Aspectos físicos da bacia hidrográfica do rio Salitre: análise a partir de uma abordagem geossistêmica. **ACTA GEOGRÁFICA**, v. 12, n. 29, p. 33–45, 10 ago. 2018.

SILVA, M. L. D. Mapping of planation surfaces in the north of Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 2, p. 526–545, 2016.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. 2. ed. São Carlos: Rima, 2003, 158p.

SILVA, A. M.; RANZINI, M.; GUANDIQUE, M. E. G.; ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V. Estudo integrado do processo erosivo numa microbacia experimental localizada no município de Cunha – SP, **Geociências**, Rio Claro, Vol. 24, p. 43-54. 2005.

SILVA, A.; SOUZA FILHO, E.; NEVES, S. M. A. S. Erosão marginal e sedimentação no rio Paraguai no município de Cáceres (MT). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 1, p. 76-84, mar. 2011.

SILVA, D. C. C.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; SALES, J.C.A.; LOURENÇO, R. W. Use of morphometric indicators as tools for assessment watershed. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, p. 627- 642, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/1984-2295.20160043>. Acesso em: out. 2020.

SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. Degradação dos solos no estado do Rio de Janeiro. *In*: GUERRA, A. J. T.; JORGE, M.C.O. (Org.), **Degradação dos Solos no Brasil**. Editora: Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 261-292, 2014.

SILVA, J. R. M; RODRIGUES, J. A. M.; OLIVEIRA, L. F. C.; VIOLA, M. Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG). **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 1, 1-14, 2021

SILVA, P. P. L.; GUERRA, A. J. T.; DUTRA, L. E. D. Subsídios para Avaliação Econômica. *In*: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Org.). **Avaliação e Perícia Ambiental**. 16 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 217-259, 2017.

SILVA, M. L. D. Mapping of planation surfaces in the north of Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 2, p. 526–545, 2016.

SOARES, D. L.; POLIVANOV, H.; BARROSO, E. V.; MOTTA, L. M. G.; SOUZA, C. C. Erodibilidade de solos em taludes de corte de Estrada não pavimentada. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 1, p. 179-193, 2018.

SOUTO, M. V. S.; CASTRO, A. F.; GRIGIO, A. M.; AMARO, V. E.; VITAL, H. Multitemporal analysis of geoenvironmental elements of the coastal dynamics of the region of the Ponta do Tubarão, City of Macau/RN, on the basis of remote sensing products and integration in GIS. **Journal of Coastal Research**, p. 1618–1621, 2006.

SOUSA, F. R. C.; PAULA, D. P. Análise de perda do solo por erosão na Bacia Hidrográfica do Rio Coreau (Ceará-Brasil). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 3, 2019.

STEFANOSKI, D. C., SANTOS, G. G., MARCHÃO, R. L., PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, 1301-1309, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013001200008>. Acesso em: nov. 2020.

STEIN, D. P., DONZELLI, P. L, GIMENEZ, A. F., PONÇANO, W. L.; LOMBARDI NETO, F. Potencial de erosão laminar, natural e antrópico, na bacia do Peixe – Paranapanema. *In*: Simpósio Nacional de Controle de Erosão, III, 1987, Marília. **Anais...ABGE/DAEE**, 1987. v.1, p. 105-135.

SUN, Q.; ZHANG, J.; ZHANG, Q.; ZHAO, X. Analysis and prevention of geo-environmental hazards with high-intensive coal mining: A case study in China's western eco-environment frangible area. **Energies**, v. 10, n. 6, p. 786, 2017.

STRAHLER, A. N. Quantitative slope analysis. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 67, p. 571-596, 1956.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FOTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília, DF: Embrapa, 2017, p. 573.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. D. S. Metodologia para mapeamento geoambiental no oeste do Rio Grande do Sul. Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, XI, **Anais...** São Paulo: USP, p. 3606-3615, 2005.

THOMAZ, E. L. **Erosão do solo: teorias, métodos e perspectivas**. Curitiba: CRV, 2019. DOI 10.24824/978854443382.9

TRICART, J.; CAILLEUX, A. **Introduction à la Géomorphologie Climatique**. Paris: Société d'Éditions d'Enseignement Supérieur, 1956.

VAEZA, R. F.; OLIVEIRA FILHO, P. C.; MAIA, A. G.; DISPERATI, A. A. Uso e Ocupação do Solo em Bacia Hidrográfica Urbana a Partir de Imagens Orbitais de Alta Resolução. **Floresta e Ambiente**, v. 17, nº 1, p. 23–29, 2010.

VIEIRA, L.S. **Manual da Ciência do Solo: com ênfase aos solos tropicais**. 2. Ed. São Paulo: Editora Agronômica CERES LTDA, 1988.

VAZ, G. J.; NETO, L. F. S. **Uma proposta de representação dos dados necessários para a classificação de solos do Brasil**. Embrapa Informática Agropecuária-Documents (INFOTECA-E), 2021.

WANG, G.; HAPUARACHCHI, P.; ISHIDAIRA, H.; KIEM, A.S.; TAKEUCHI, K. Estimation of soil erosion and sediment yield during individual rainstorms at catchment scale. **Water Resources Management**, v. 23, n. 8, p. 1447-1465, 2009.

WISCHMEIER, W. H., SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: guide for selection of practices for soil and water conservation**. Washington: U. S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook. n. 282, p 58, 1965.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Agriculture Handbook n.537. Washington: US Department of Agriculture, 1978.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationships to soil loss. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 39, p. 285-291, 1958.

WISCHMEIER, W.; MAMMERING, J. V. Relation of soil properties to its erodibility. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 33, n. 1, p. 131-137, 1969.

ZERIHUN, M.; MOHAMMEDYASIN, M. S.; SEWNET, D.; ADEM, A. A.; LAKEW, M. Assessment of soil erosion using RUSLE, GIS and remote sensing in NW Ethiopia. **Geoderma regional**, 12, 83-90, 2018.

XAVIER, J. P. S.; HOLANDA, T. F. H.; NERY, T. D.; LISTO, F. L. R., Avaliação da eficiência da integração SIG e Equação Universal da Perda de Solo (EUPS) na previsão da erosão no município de Itacuruba, semiárido Pernambucano. *In.:* Simpósio Regional de Geoprocessamento – SIRGEO, I, 2018, Teresina. **Anais...** Teresina: IFPI, 2019. p. 1-10. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/sirgeo/132652-eficiencia-da-equacao-universal-da-perda-de-solos/>. Acesso em: 08 ago. 2021.