



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

DIEGO MELO DOS SANTOS

ESTIMATIVA DE EROÇÃO HÍDRICA A PARTIR DE AEROLEVANTAMENTO
REMOTAMENTE PILOTADO

AREIA
2024

DIEGO MELO DOS SANTOS

**ESTIMATIVA DE EROSÃO HÍDRICA A PARTIR DE AEROLEVANTAMENTO
REMOTAMENTE PILOTADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo na área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Davi de Carvalho Diniz Melo

Coorientador Prof. Dr. Raphael Moreira Beirigo

AREIA

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S237e Santos, Diego Melo Dos.

Estimativa de erosão hídrica a partir de
aerolevanteamento remotamente pilotado / Diego Melo Dos
Santos. - Areia, 2024.

77 f.

Orientação: Davi de Carvalho Diniz Melo.

Coorientação: Raphael Moreira Beirigo.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CCA.

1. Assoreamento em reservatório. 2. Erosão do solo.
3. Aeronave Remotamente Pilotada. 4. Modelo Digital de
Terreno. 5. RUSLE. I. Melo, Davi de Carvalho Diniz. II.
Beirigo, Raphael Moreira. III. Título.

UFPB/CCA-AREIA

CDU 631.4 (043.3)

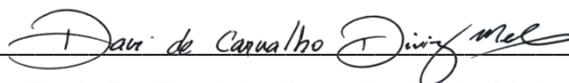
DIEGO MELO DOS SANTOS

ESTIMATIVA DE EROSÃO HÍDRICA A PARTIR DE AEROLEVANTAMENTO
REMOTAMENTE PILOTADO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo na área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

Aprovada em 28 de fevereiro 2024.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Davi de Carvalho Diniz Melo
(Orientador - DECA/ CT/ UFPB)



Prof. Dr. Flávio Pereira de Oliveira
(Examinador Interno - DSER/ CCA/ UFPB)



Prof. Dr. José Romualdo de Sousa Lima
(Examinador Externo - PPGPA/UFPE)

Dedico a toda minha família, em especial minha esposa Rossana e nosso filho Álvaro, que estiveram sempre ao meu lado nesta jornada e conseguir alcançar essa nova conquista.

AGRADECIMENTOS

A todos educadores que me guiaram no caminho do conhecimento em todas as etapas de minha vida. E nesta etapa, ao professor Dr. Davi de Carvalho que me orientou no desenvolvimento deste projeto.

A todos que fazem e fizeram parte do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Departamento de Solos e Engenharia Rural, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba.

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) e Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) pela concessão de bolsa de estudo.

A minha mãe Lucia Giovanna (*in memoriam*) e meu pai Rubens Coelho (*in memoriam*), embora ausentes, sempre lembrando os estímulos e incentivo a buscar educação, respeito ao próximo e crescimento em sociedade.

A minha esposa Rossana que sempre está ao meu lado, abraçando esse nosso sonho, e ao nosso filho Álvaro que tudo que buscamos melhorar hoje é por ele.

A minha tia e madrinha “Maísa”, e hoje avó de Álvaro, pelo apoio nesses momentos e acreditar em mim, juntamente com minha avó Salomé.

Aos meus irmãos, Larissa e Victor Emanuel pelo apoio.

O solo é a base da vida, mas os processos erosivos podem levá-lo a degradação e essa, muitas vezes, acelerada pelo homem. Protejamos o solo para garantir o futuro.

Diego Melo dos Santos

RESUMO

A degradação do solo é um dos problemas ambientais mais importantes do mundo, com perdas anuais entre 20 e 37 bilhões de toneladas. O processo inclui a diminuição da sua fertilidade e aumento da erosão, principalmente em áreas tropicais e subtropicais, além de reduzir a qualidade da água de mananciais hídricos sujeitos a assoreamento. O uso de Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) possibilita a geração de dados com boa relação custo-benefício e alta resolução espacial, além de permitir sua aplicação no monitoramento do meio ambiente e avaliação de risco de erosão do solo. O estudo teve como objetivo estimar movimentação de solo causadores de erosão e assoreamento dos reservatórios hídricos a partir de informações captadas por Aeronave Remotamente Pilotada. A área de estudo foi o reservatório de Barro Branco, localizado no município de Curral de Cima, Paraíba, Brasil. Os planos de voo foram configurados com sobreposição lateral de 70% e longitudinal de 80%, velocidade de cruzeiro de 5 m/s, com dois grids, um simples a 50 m do nível do solo e outro duplo com altura de 30 m, com uso de pontos de controle (GCP) em solo. Prospecção em campo revelaram presença dos solos argissolos, plintossolos e neossolos, no entorno do reservatório, com predomínio de solo estruturalmente degradado e erosões de mais de 1 metro de profundidade. As estimativas de perda de solo foram realizadas com base nas imagens captadas por ARP e na equação universal de perda de solo (RUSLE), atribuindo valores monetários às perdas nas erosões de dois locais, estrada e canavial. Os resultados destacam volume de 165,29 m³, aproximadamente 281 toneladas erodidos, e perdas que podem ultrapassar o custo de R\$ 23 mil. Esses valores estimados em apenas um ano. Assim, a importância do uso de ARP para quantificar movimentação de solo causadoras de erosão e assoreamento, fornecendo informações valiosas para a preservação do meio ambiente e gestão adequada do solo.

Palavras-chave: assoreamento em reservatório; erosão do solo; Aeronave Remotamente Pilotada; Modelo Digital de Terreno; RUSLE.

ABSTRACT

Soil degradation is one of the most important environmental problems in the world, with annual losses between 20 and 37 billion tons. The process includes a decrease in soil fertility and an increase in erosion, especially in tropical and subtropical areas. Siltation causes economic and environmental damage, and an important factor in controlling soil degradation is its structural stability. The use of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) makes it possible to generate cost-effective data with high spatial resolution, as well as allowing it to be used to monitor the environment and assess the risk of soil erosion. The aim of this study was to estimate soil movements that cause erosion and siltation in water reservoirs using information captured by Remotely Piloted Aircraft. The study area was the Barro Branco reservoir, located in Curral de Cima, Paraíba, Brazil. The flight plans were configured with a 70% lateral and 80% longitudinal overlap, a cruising speed of 5 m/s, with two grids, a single one at 50 m from ground level and a double one at a height of 30 m, using ground control points (GCP). Field prospecting revealed the presence of Acrisols, Plinthosols and Arenosols soils around the reservoir, with a predominance of structurally degraded soil and erosion more than 1 meter deep. Estimates of soil loss were made based on the images captured by ARP and the universal soil loss equation (RUSLE), assigning monetary values to erosion losses at two sites, the road and the sugarcane field. The results indicated that a volume of 165.29 m³, approximately 281 tons, eroded, and losses that could exceed a cost of 23 thousand reais. These figures were estimated in just one year. Thus, the importance of using ARP to quantify soil movement causing erosion and siltation, providing valuable information for environmental preservation and proper soil management.

Keywords: reservoir siltation; soil erosion; Remotely Piloted Aircraft; Digital Terrain Model; RUSLE.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-	Vista aérea e localização da área de estudo.....	28
Figura 2-	Localização dos municípios paraibanos do PSA.....	29
Figura 3-	Localização dos perfis de solo e estação meteorológica.....	30
Figura 4-	Mapa geológico do município.....	30
Figura 5-	Mapa de solos do município.....	31
Figura 6-	Volume de chuva mensal dos últimos 3 anos.....	31
Figura 7-	Volume acumulado de chuvas dos últimos 3 anos.....	32
Figura 8-	Coleta de sedimentos.....	33
Figura 9-	ARP DJI mine 2.....	34
Figura 10-	Confecção de material de uso em campo.....	35
Figura 11-	Barra de escala para pontos de controle.....	36
Figura 12-	Procedimento de medição manual.....	38
Figura 13-	Procedimento de medição MDS.....	39
Figura 14-	Locais das classificações dos solos próximos as erosões.....	44
Figura 15-	Pontos de coleta de sedimentos.....	45
Figura 16-	Classificação das cores do solo.....	48
Figura 17-	Perfil BB1 e transição irregular.....	49
Figura 18-	Perfil BB2.....	50
Figura 19-	Perfil BB3.....	51
Figura 20-	Erosão estrada cronologia.....	53
Figura 21-	Vazamento entre as erosões e estrada	53
Figura 22-	Ortofoto gerada em cada levantamento feito no projeto.....	54
Figura 23-	Erosão canavial dia do corte.....	56
Figura 24-	Modelo Digital de Elevação (MDE) voo 12.....	57
Figura 25-	Volume erodido x Acumulado chuvas.....	57
Figura 26-	Profundidade erosão do canavial.....	58
Figura 27-	Profundidade erosão da estrada.....	59
Figura 28-	Fluxo drenagem da área de estudo.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Fator erodibilidade (K) em (ton/MJ/ha)/(mm/h).....	40
Tabela 2-	Fator prática de cultura (C).....	41
Tabela 3-	Fator conservação (P).....	42
Tabela 4-	Atributos da Química e Fertilidade dos solos e sedimentos	46
Tabela 5-	Atributos físicos dos solos e sedimentos.....	47
Tabela 6-	Caracterização de cor e classe textural.....	48
Tabela 7-	Índice de Estabilidade dos solos nos horizontes.....	52
Tabela 8-	Volumes obtidos na linha de cota pelos MDS na erosão estrada..	55
Tabela 9-	Volumes obtidos na linha de cota pelos MDS na erosão canavial...	56
Tabela 10-	Volume manual x volumes obtidos no MDS.....	58
Tabela 11-	Valores RUSLE	60
Tabela 12-	Perda de solo a montante.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
BB1	Perfil Barro Branco 1
BB2	Perfil Barro Branco 2
BB3	Perfil Barro Branco 3
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
cmolc	Centímol
DSER	Departamento de Solos e Engenharia Rural
DJI	<i>Dà-Jiāng Innovations Science and Technology</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETp	Evapotranspiração potencial
EUROSEM	Modelo Europeu de Erosão do Solo
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i> (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura)
FAPESQ	Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
G	Gramma
GALILEO	Sistema de Navegação por Satélite da União Européia
GCP	<i>Ground Control Points</i> (Pontos de Controle em Solo)
GLONASS	Sistema Global de Navegação por Satélite, russo
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IES	Índice de Estabilidade estrutural do Solo
InVEST	<i>Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs</i>
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
ISRIC	<i>World Soil Information</i>
IUSS	União Internacional de Ciências do Solo
LISEM	Modelo de Erosão do Solo de Limburg
m ³	Metro cúbico
mm	Milímetro

MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MDS	Modelo Digital de Superfície
MO	Matéria Orgânica
MOS	Matéria Orgânica do Solo
MPMS	Ministério Público do Estado de Mato Grosso do Sul
NaOH	Hidróxido de Sódio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OECD	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial Hidrogeniônico
PVC	Policloreto de Vinil
RGB	Sistema de Cores Aditivas; Vermelho (<i>Red</i>), Verde (<i>Green</i>) e Azul (<i>Blue</i>)
RUSLE	Equação Universal Revisada de Perda de Solo
SBCS	Sociedade Brasileira de Ciências do Solo
SEDEM	Modelo de Distribuição de Sedimentos
SDR	<i>Sediment Delivery Ratio</i>
SNSA	Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação do Solo
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SINAPI	Sistema Nacional de Índices da Construção Civil
SWAT	Ferramenta de Avaliação de Solo e Água
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
USLE	Equação Universal de Perda de Solo
WaTEM	Modelo de Erosão de Água e Cultivo
WEPP	Projeto de Previsão de Erosão Hídrica
WRB	<i>World Reference Base</i> (Base de Referência Mundial para Recursos de Solos)
3D	3 Dimensões

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	HIPÓTESE.....	17
3	OBJETIVOS.....	18
3.1	Objetivo geral.....	18
3.2	Objetivos específicos.....	18
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
4.1	Degradação do solo.....	19
4.1.1	Erosão.....	19
4.1.1.1	Estágios da erosão.....	21
4.1.1.2	Custos da erosão.....	22
4.2	Cálculo da perda de solo.....	23
4.3	Classificação dos solos.....	24
4.4	Aerolevanteamento.....	25
4.5	Barragem.....	26
4.6	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).....	27
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	28
5.1	Caracterização da área de estudo.....	28
5.1.1	Pluviosidade.....	31
5.2	Coleta das amostras de solo.....	32
5.2.1	Coleta de sedimentos.....	33
5.2.2	Classificação dos solos.....	33
5.3	Análise física dos solos.....	34
5.4	Análise química e fertilidade dos solos.....	34
5.5	Levantamento aerofotográfico com ARP.....	34
5.5.1	Pontos de controle em solo.....	35
5.5.2	Barra de escala.....	36
5.6	Processamento das imagens.....	37
5.7	Cálculo do volume de solo movimentado.....	37
5.7.1	Validação das medições.....	38
5.8	Cálculo de Estabilidade do Solo.....	39
5.9	Cálculo da perda de solo pela RUSLE.....	39

5.9.1	RUSLE por área a montante.....	42
5.10	Cálculo do valor monetário do solo erodido.....	42
6	RESULTADOS.....	44
6.1	Classificação pedológica.....	44
6.1.1	Resultados das análises de solo e sedimentos.....	44
6.1.2	Cor e classe textural.....	48
6.1.3	Classificação dos perfis.....	49
6.1.3.1	BB1: Argissolo Vermelho Eutrófico Abrúptico, Textura Argilosa, A moderado.....	49
6.1.3.2	BB2: Plintossolo Argilúvico Distrófico Típico, Textura Media, A moderado.....	50
6.1.3.3	BB3: Neossolo Quartzarênico Órtico, Típico, Textura Arenosa, A moderado.....	50
6.1.4	Índice de Estabilidade estrutural dos Solo.....	51
6.2	Avaliação temporal da erosão.....	53
6.2.1	Volumes dos solos erodidos.....	54
6.2.2	Validação: volume manual x volume obtido no MDS.....	58
6.2.3	Profundidade das erosões	58
6.3	Perda de solo pela RUSLE	59
6.3.1	Volumes da RUSLE a montante da barragem.....	60
6.4	Rede de drenagem.....	61
6.5	Monetização da perda de solo.....	61
7	DISCUSSÕES	63
7.1	Classificação dos solos.....	63
7.1.1	Análise dos solos.....	63
7.1.2	Estabilidade estrutural dos Solo.....	63
7.2	Profundidade das erosões.....	64
7.3	Volumes das erosões.....	65
7.3.1	Validação; volume manual x volumes obtidos no MDS.....	66
7.3.2	Perda de solo pela RUSLE.....	67
7.4	Rede de drenagem.....	69
7.5	Pluviosidade.....	69
7.6	Monetização da perda de solo	69

8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
8.1	Sugestões	71
	REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

A degradação do solo é um dos problemas ambientais mais importantes do mundo. O processo inclui a diminuição da sua fertilidade e aumento da erosão, grande preocupação global e principalmente em áreas tropicais e subtropicais (Jien; Wang, 2013). Tal fenômeno é responsável pela perda de solo e seus nutrientes, mediante processos erosivos, os quais tem o potencial de afetar negativamente os recursos hídricos, tanto qualitativamente quanto em suas quantidades, aumento os riscos à alimentação (Boufeldja *et al.*, 2020). Esse processo pode ser acelerado pelo homem em função do uso do solo, que se inicia com erosão laminar, formando canais (sulcos) onde a água tende a se encaminhar, podendo chegar a crateras conhecidas por voçorocas, em que o solo perde sua capacidade de regeneração.

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) estima que entre 20 e 37 bilhões de toneladas de solo é perdido anualmente em todo o mundo. Os prejuízos provocam redução na capacidade do solo em armazenar e reciclar carbono, nutrientes e água. A degradação acelerada pelo homem afeta 1.660 milhões de hectares (35%) das terras agrícolas no mundo. Para a produção de cereais, essa perda reflete no decréscimo produtivo de 7,6 milhões de toneladas em todo o mundo (FAO, 2021).

Somente na América do Sul, a degradação do solo é responsável por aproximadamente 17% das terras induzidas a degradação causada pelo homem, o que corresponde a 281 milhões de hectares. Destes, apenas o Brasil possui uma perda na ordem de 500 milhões de toneladas ao ano (Miguel *et al.*, 2021).

Considerando os impactos da degradação do solo sobre os recursos hídricos e o fato de que o acesso de água potável ocorre de maneira desigual no Brasil, é notória a pertinência da questão da erosão do solo no país. A temática é ainda mais crítica em algumas regiões do Brasil. A região nordeste, por exemplo, ocupa o segundo lugar com maior número de pessoas sem acesso a água potável (25,3%), em comparação a região sudeste (8,5%) que possui o melhor abastecimento do país. No que diz respeito ao esgotamento sanitário, o perfil permanece semelhante, nordeste com a quarta posição (30,2%) e sudeste na primeira (81,7%) do total de pessoas atendidas (Brasil, 2021).

As principais fontes de abastecimento hídrico utilizado pelo homem são poços e reservatórios hídricos formado por barragem de terra. Um dos principais problemas desses reservatórios é o assoreamento, que consiste no acúmulo de sedimentos

erodidos da bacia de captação devido às intempéries. O assoreamento é um dos produtos da degradação do solo, que consiste na perda de solo e água, causando danos econômicos e ambientais. Uma das consequências da degradação do solo, através do assoreamento, é a redução no volume do reservatório, diminuição da profundidade da barragem, aumento da taxa de evaporação, aumento da turbidez da água e elevação nos custos de tratamento (Belikov *et al.*, 2019).

Uma outra consequência da degradação do solo é a eutrofização e a poluição dos sedimentos do fundo do reservatório com oligoelementos, que são as principais ameaças relacionadas ao assoreamento intensivo (Baran *et al.*, 2019). Um exemplo é o assoreamento rápido nos reservatórios das usinas hidrelétricas situadas em rios de montanha, que resulta na perda de volume útil (Belikov *et al.*, 2019).

O monitoramento de processos erosivos pode ser feito a partir do sensoriamento remoto. Diversos tipos de sensores abordo de satélites tem possibilitado a geração de informações sobre topografia, cobertura vegetal, temperatura, entre outras características da superfície terrestre. Apesar da abundância de imagens e outros produtos de satélites, a resolução espaço-temporal desses dados nem sempre são suficientes para resolver problemas em escala local. Nesse contexto, o uso de ARP possibilita a geração de dados com boa relação custo-benefício e alta resolução espacial, além de permitir sua aplicação no monitoramento do meio ambiente e de estruturas (Schaefer *et al.*, 2020). Além da resolução espacial das imagens, facilitando sua medição *in loco* reduzindo os custos operacionais e aumentando a precisão.

ARP são ferramentas com potencial de otimizar a elaboração de mapas de avaliação de risco de erosão do solo, com uso de informações geográficas e software na preparação de modelos digitais de terrenos (Boufeldja *et al.*, 2020).

Assim, o presente trabalho busca identificar e quantificar as erosões de solo por fotometria aérea de Aeronave Remotamente Pilotada, para gerar Modelo Digital de elevação (MDE) e Modelo Digital de Superfície (MDS) com alta resolução espacial, cálculo de estabilidade do solo, para identificar a quantidade de solo que está sedimentando no reservatório e contribuindo para diminuição do volume de armazenamento.

2 HIPÓTESE

O volume de solo movimentado por erosão hídrica pode ser medido com acurácia a partir do imageamento com ARP de baixo custo.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Identificar e quantificar movimentação de solo causadores de erosão hídrica a partir de informações captadas por Aeronave Remotamente Pilotada (ARP).

3.2 Objetivos específicos

Classificar os solos e quantificar a estabilidade do solo próximo aos pontos de erosão;

Avaliar, com base no imageamento aéreo, a evolução temporal das erosões;

Validar as estimativas de volume de solo erodido baseadas em imagens de ARP;

Estimar as perdas de solo a montante do reservatório utilizando a equação universal de perda de solo (RUSLE) quantificar a perda de solo por erosão nas proximidades do reservatório de abastecimento;

Monetizar as perdas de solo, dando valor econômico ao solo erodido da área de estudo.

4 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

4.1 Degradação do solo

Para compreender a degradação do solo se faz necessário um olhar mais amplo nos seus efeitos e principais fatores e consequência de sua degradação. O uso intenso do solo intemperizados por longos anos resulta comumente na degradação resultando em esgotamento da matéria orgânica, acidificação e erosão severa (Jien; Wang, 2013).

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) o homem é responsável por cerca de um quarto das áreas degradadas. O sistema de preparo do solo convencional é o maior causador da degradação do solo. Em um período de 52 anos (1961 a 2013) áreas áridas aumentaram em média 1% ao ano, no ano de 2015; em média 500 (380 a 620) milhões de pessoas viviam em áreas desertificadas no período de 1980 a 2000. Agravado pelas mudanças climáticas (Masson-Delmotte *et al.*, 2020).

O solo degradado é um problema socioeconômico e ambiental. Pois reduz a fertilidade e diminui a produção de alimento, o que aumenta o nível de pobreza, agrava o processo de seca e desertificação, assim como, favorece o escoamento de sedimentos que podem transportar poluentes e afetar os ciclos biogeoquímicos (Wen *et al.*, 2023).

A degradação do solo causada pela erosão aumenta a perda de nutrientes e água do solo, considerada uma das formas mais graves de degradação. Assim, o mapeamento da erosão é fundamental na compreensão da dinâmica e identificação dos pontos críticos que promovem a erosão (Han *et al.*, 2023).

No Brasil e no mundo, observou-se que a degradação do solo acarreta custos elevados para a sociedade, principalmente devido à extensa perda de terras aráveis através da erosão. Esta perda leva à diminuição da capacidade produtiva do solo, o que também contribui para o assoreamento de cursos de água e barragens. (Pes; Giacomini, 2017).

4.1.1 Erosão

A erosão por ser um processo da degradação levando recursos não só do solo como também poluindo rios e reservatórios, muitas vezes esses dados podem ultrapassar a microbacia regional levando prejuízos além do ambiental.

O solo é um recurso natural que desempenha papel fundamental no ecossistema natural. Um solo saudável é essencial para uma variedade de uso, melhora a qualidade da água e armazena uma quantidade maior de carbono em comparação com as plantas. Nos últimos anos, com as mudanças climáticas e a intensa atividade humana, houve um aumento da erosão do solo em todo o mundo (Wen *et al.*, 2023).

A erosão do solo é um processo que leva a degradação do meio ambiente e principalmente do solo, que interfere no desenvolvimento sustentável da agricultura. Para a conservação do solo, o primeiro passo é compreender os fatores que levam à erosão em escala regional e global (Dong *et al.*, 2023).

A erosão do solo é um problema ambiental generalizado, representa uma ameaça significativa para a agricultura sustentável em todo o mundo. As terras agricultáveis com relevos acentuados são uma das mais susceptíveis a erosão do solo. Em países como os Estados Unidos, Austrália, China, Índia, Quênia, Noruega e Espanha nesse tipo de terra não é permitido o uso para agricultura, elas funcionam como reserva ambiental (Zhao *et al.*, 2023).

Ainda segundo Zhao *et al.* (2023) os métodos utilizados no cultivo têm impacto significativo na gravidade da erosão do solo. Terras agrícolas inclinadas, na redução de escoamento e sedimentos variam sob diferentes intensidades das chuvas, com o acúmulo nas depressões superficiais podem causar um transbordamento e erodir o solo. O preparo do solo influencia os processos de erosão pluvial, escoamento superficial e modifica a micro-ondulação superficial do solo.

Masson-Delmotte *et al.* (2020) ainda refere que modelos agrícolas modernos já visam a redução do impacto dos cultivos no solo e meio ambiente, através do manejo sustentável do solo como sistema de cultivo mínimo e/ou plantio direto, adubação verde, cultura de cobertura, manutenção e melhoria do manejo de áreas de pastagens.

Uma questão global é o monitoramento da erosão do solo com regularidade mundial, aplicando os modelos globais para quantificar e assim compreender as extensões da erosão do solo e seu impacto ambiental. Conhecer de forma mais eficiente os locais em processos de erosão do solo torna eficiente ações de controle (Bezák *et al.*, 2024).

O preparo do solo para uso e cobertura vegetal tem papel fundamental na formação de uma estrutura estável (Duan *et al.*, 2021), cuja função está diretamente

relacionada a estabilidades dos seus agregados. Manter a estabilidade estrutural é fundamental para minimizar o potencial de erosão do solo e o transporte das partículas de nutrientes e poluentes para o ambiente aquático (Qi *et al.*, 2022).

Para quantificar erosão do solo pode ser utilizada a medição *in loco* ou por modelagem. O tipo modelagem utiliza um processo de ilustrar matematicamente as fases de perda do solo com as desagregações, transporte e deposição de material ao longo da paisagem (Zarrinabadi *et al.*, 2023). Comumente os sedimentos tendem a se depositar em planos inferiores ao de sua origem, e em muitos casos acumula material em leito de rios, podendo levar ao assoreamento.

Outro tipo de erosão é a hídrica, cujos efeitos na degradação do solo é o impacto da gota e transporte de material. Para suavizar esses danos, é necessária vegetação associado ao tipo de raiz, pois, ao cobrir o solo diminui a capacidade de a gota desprender as partículas do solo (Ha *et al.*, 2023), assim, mantém a estrutura e reduz as perdas de solo.

A chuva é o principal fator da erosão hídrica. desagregam as partículas do solo e transportar morro abaixo, o que leva a provocar erosão laminar e entre sulcos, e sua continuidade forma ravinas. A erosão hídrica tende a ser mais severa no terço médio ou superior das encostas e diminui gradualmente nas áreas mais baixas (Zarrinabadi *et al.*, 2023).

A erosão eólica ocorre com maior frequência em regiões áridas e semiáridas, solos secos e ventos com alta velocidades. A perda de solo atribuído a erosão eólica mais severa em áreas abertas no terço superior, e na direção a que o vento sopra (Zarrinabadi *et al.*, 2023).

No geral, cada processo de erosão do solo tem o seu padrão característico na paisagem, e contribuirá para a erosão total do solo nas paisagens agrícolas (Zarrinabadi *et al.*, 2023).

O desenvolvimento de tecnologias remotas e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) contribuem na avaliação da erosão hídrica e eólica anual de forma mais eficiente e global (Han *et al.*, 2023). O uso de novas tecnologias como os ARP amplia a precisão dos dados e diminui o tempo na aquisição dos dados.

4.1.1.1 Estágios da erosão

O processo de desagregação, transporte e deposição do solo é denominado erosão. A perda de solo corresponde a quantificação de solo em uma determinada área e tempo (Zarrinabadi *et al.*, 2023).

As erosões possuem início com a laminar causada por desagregação por gotas das chuvas, vento e ação do homem. O material desagrega da superfície do solo, escoar de forma regular no relevo até o momento em que o fluxo de sedimentos tende a se movimentar em canais ou sulcos, e formar pequenas depressões de concentração desses sedimentos. Esses canais ou sulcos podem ser desfeitos naturalmente no decorrer do tempo.

Esse processo natural auxilia para a formação do solo, relevo e paisagem. As atividades antropogênicas como agricultura aceleram o processo de erosão, em que ocorre remoção da cobertura vegetal e desestruturação do solo para a produção agrícola em todo o mundo (Zarrinabadi *et al.*, 2023).

A portaria nº 83, de 13 de setembro de 2022, classifica escoamento superficial como sendo parte da precipitação oriunda da chuva ou de irrigação que não infiltra e escorre sobre a superfície do solo e que não formando canais. A mesma portaria define processos erosivos do tipo Laminar como sendo a remoção de solo em camadas pequenas oriundos do escoamento superficial; as Ravinas são a retirada do solo resultante da concentração de fluxo em canais com maior velocidade, evolução da erosão laminar; as Voçorocas, correspondem a erosão hídrica que ocorre da evolução da ravina ao atingir o lençol freático, causada por fluxo superficial ou subsuperficial; e Erosão eólica é causada pelo vento, principalmente em áreas com pouca ou nenhuma vegetação (Ibama, 2022).

Portanto, os fatores que contribuem para desencadear a erosão do solo são agricultura, em sua implantação, manejo e colheita; combinados com erosão hídrica e erosão eólica (Kuhwald *et al.*, 2022).

4.1.1.2 Custos da erosão

Globalmente, são gastos aproximadamente 400 bilhões de dólares todos os anos para repor nutrientes perdidos, prevenir a erosão e reparar danos nas infraestruturas causados pela erosão do solo. Restauração do solo e controle da erosão, medidas de conservação do solo. (Yin *et al.*, 2022).

A erosão leva a perdas anuais de 822,7 milhões de toneladas nas regiões agrícolas do Brasil. Perdas monetárias de 2,9 bilhões de dólares devido à erosão,

incluindo custos relacionados com a correção de danos no solo, perda de produtividade e custos de produção. Além disso, os custos não agrícolas decorrentes do processo de erosão, por exemplo, despesas extra com tratamento de água, trabalhos de reparação de estradas, consumo de combustível, consumo de eletricidade em zonas irrigadas) somam outros 1,3 bilhões de dólares. Portanto, estima-se um total de US\$ 4,2 bilhões como perdas anuais. (Coutinho *et al.*, 2014).

4.2 Cálculo da perda de solo

Os cálculos de perda de solo são baseados em equações multifatoriais que buscam estimar as perdas de solo para uma determinada área ou região, como também como parâmetros para os limites toleráveis de perda de solo.

A perda de solo pode ser calculada de acordo com a Equação Universal de Perda de Solo (USLE), entretanto, com limitação. Por não quantificar a deposição de solo, essa equação sofreu revisão, a RUSLE, que melhor prevê a erosão em encostas íngremes (Wen *et al.*, 2023).

A equação universal de perda de solo revisada (RUSLE) é um modelo empírico de equação que prevê e quantifica erosão hídrica de solos, é bastante utilizada em todo o mundo, e, com os devidos ajustes, pode ser aplicado em terras agrícolas inclinadas (Zhao *et al.*, 2023).

Vários modelos foram desenvolvidos para avaliar a erosão hídrica do solo, como por exemplo, Equação Universal de Perda de Solo (USLE), Equação Universal Revisada de Perda de Solo (RUSLE), Modelo Europeu de Erosão do Solo (EUROSEM), Modelo de Erosão do Solo de Limburg (LISEM), Modelo de Erosão de Água e Cultivo (WaTEM) e Modelo de Distribuição de Sedimentos (SEDEM), Ferramenta de Avaliação de Solo e Água (SWAT), Projeto de Previsão de Erosão Hídrica (WEPP) e Avaliação Integrada de Serviços e Compensações Ecológicas com taxa de entrega de sedimentos (InVEST-SDR), todas desenvolvidas com base na USLE. Assim, essa equação é uma ferramenta importante para avaliar exportação de sedimentos e conservação do solo em diversas escalas espaciais e temporais, e tem sido amplamente utilizada internacionalmente (Qiao *et al.*, 2023).

O InVEST-SDR usa parâmetros de características físicas e geológicas dos Estados Unidos. Pode causar erro de cálculo caso não ajustado na aplicação em outros países (Qiao *et al.*, 2023).

4.3 Classificação dos solos

Os solos são corpos naturais com partes sólidas, líquidas e gasosas; tridimensional, dinâmicos; formado por minerais e matéria orgânica. Ocupa a maior parte da superfície do planeta, são formados de maneira natural e podem ser alterados por interferências antrópicas (Santos *et al.*, 2018).

Possui características morfológicas específicas. Os solos são importantes para o uso agrícola, pois, possui a capacidade de produzir, de forma mais sustentável e a disposição a erosão (Santos *et al.*, 2015).

Para um bom entendimento dos processos que ocorrem em uma determinada região, é de grande importância a classificação do solo. Ele está diretamente relacionado com os processos de sua formação. O objetivo é reconhecer as principais variações verticais ao longo do perfil que pode gerar um prognóstico mais preciso (Guerra *et al.*, 2020).

A classificação do solo é essencial para prever seu comportamento e identificar os fatores limitantes nos permitindo tomar decisões de gestão relevantes em áreas como agricultura, pecuária, silvicultura, cidades, ambiente e saúde (IUSS, 2022).

Em 2022, no âmbito da União Internacional de Ciências do Solo (IUSS), em comemoração à "Década Internacional do Solos 2015-2024", e com o compromisso de fornecer à comunidade internacional um sistema de classificação de solos que facilite tanto a realização de inventários de solos como a interpretação de mapas de solos como prático. uma ferramenta para agrônomos, agricultores, engenheiros, políticos, etc. apresentou em dezembro a quarta edição da Base Mundial de Referência (WRB).

O sistema de classificação de solos *World Reference Base* (WRB/FAO) é o sistema internacional de classificação de solos. Desenvolvido para solos de todo o mundo baseadas em ações da FAO e da Unesco, apoiada pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e pela IUSS. (ISRIC, 2024).

O Brasil possui um sistema de classificação; Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) lançada em 2018 sua última edição a 5ª, possui chaves que caracterizam as particularidades do solo para a correta classificação. Usando um sistema hierárquico de classificação para a discriminação de classes de solos identificadas no País, utilizando de descrições em campo e análises físico-químicas do solo. (Santos *et al.*, 2018).

4.4 Aerolevantamento

A utilização de Aeronaves Remotamente Pilotada (ARPs) apresenta uma nova metodologia para recolha de informação no sector agrícola. Utilizando dados de ARP, a criação de resultados de detecção remota excepcionalmente detalhados, como ortomosaicos e modelos digitais de terreno, provou ser eficaz na avaliação das culturas em campos agrícolas (Pleur *et al.*, 2020).

As resoluções das imagens geradas no aerolevantamento inferem qualidade aos mapas e sua precisão depende da taxa de sobreposição utilizada. Modelo Digital de Terreno (MDT) gerados por satélite possuem resolução espacial média de 30 m, em melhor caso até 10 m, e as imagens geradas por Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) pode chegar a ser medido em escala de milímetros. Utilizar ARP sobre a erosão com uma taxa de sobreposição maior em comparação a utilizada na água, a fim de reduzir o tempo de processamento e melhorar o detalhamento de MDS. Ressalta ainda, a importância de ter uma boa resolução para gerar MDT nos estudos de hidrologia e canais de escoamento (García-Alén *et al.*, 2022).

O uso de ARP vem sendo difundido nas diversas áreas como uma ferramenta que fornece estimativas precisas e acuradas, e escala inferior ao centímetro. A análise geomorfológica detalhada e a fotogrametria são metodologias utilizadas na criação de mapas em 3D, como os MDS (Anders *et al.*, 2020).

Segundo Felix, Cândido e Moraes (2023) a combinação de ortomosaicos e modelos digitais de superfície (MDS) através de ARP de baixo custo é uma alternativa viável e promissora para avaliação da erosão do solo usando principalmente no fator C da RUSLE, e sua utilização podendo ser adequado para qualquer cultura refinando seus dados na escala dos centímetros.

Ao utilizar técnicas de modelagem, torna-se possível eliminar a necessidade de amostragem repetitiva e extensas medições empíricas ao estudar a erosão do solo tanto no campo com extensões maiores. Além disso, estes modelos funcionam como laboratórios virtuais que permitem a avaliação de vários cenários potenciais, incluindo o impacto potencial de ocorrências mais frequentes de precipitação intensa (Pleur *et al.*, 2020).

O uso de ARPs ainda não foi utilizado para testar padrões de erosão. Medições quantitativas de erosão distribuída baseadas em eventos frequentes, com alta resolução, inferior aos 5 cm, podem ser usadas para gerar séries temporais de dados de erosão em escalas espaciais ajustável. Estes dados proporcionam uma

oportunidade para avaliar os padrões de erosão do solo de uma forma espacialmente distribuída à escala em que as decisões são tomadas. Além das medições quantitativas, as imagens ópticas das propriedades da erosão podem ser usadas como pontos de dados qualitativos adicionais para avaliação dos modelos de erosão. A combinação de medições de erosão qualitativas e quantitativas fornece uma base sólida para avaliar o desempenho dos modelos de erosão (Meinen; Robinson, 2021).

4.5 Barragem

O Comitê Brasileiro de Barragens define barragem como sendo obstáculo artificial, cuja finalidade é a de reter líquidos, rejeitos e detritos para armazenamento ou controle. As dimensões variam de pequenos barramentos de terra a grandes estruturas de concreto para geração de energia, como as hidrelétricas. As barragens podem ter apenas uma função, mas, é comum as de uso múltiplos, como para atender a irrigação, piscicultura e abastecimento (CBDB, 2010).

As barragens proporcionam um melhor controle dos recursos hídricos, pois pode armazenar água, quando abundante, para uso em épocas secas. Assim, é de fundamental importância para o desenvolvimento da sociedade, além de proporcionar segurança hídrica. O armazenamento deve refletir aspectos sociais e ambientais, pois pode transmitir doenças (Lund *et al.*, 2022).

Assim como, as barragens modificam os mecanismos hidrodinâmicos dos rios e altera as taxas de sedimentos, que pode aumentar significativamente os elementos nocivos, quando estes excedem a capacidade de transporte da água e se sedimentam no leito do rio. Bem como, acelera a fase de troca entre água e sólidos, aumentando os riscos ecológicos (Ziroua *et al.*, 2023).

O consumo de água doce no mundo nos últimos 100 anos teve um aumento de seis vezes, e desde 1980 o crescimento na taxa é de 1% ao ano. Atribui-se a essa elevação a combinação do crescimento populacional, demanda econômica e mudanças nos padrões de consumo. Cerca de 69% desse consumo é por demanda agrícola, como irrigação e fornecimento para o rebanho, em alguns países em desenvolvimento esse valor pode chegar a 95% (UNESCO, 2021).

Os custos da inatividade são altos em termos de perdas e degradação ecossistêmicas. De acordo com a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD), entre os anos de 1997 e 2011, o mundo perdeu cerca de US\$ 4

a 20 trilhões por ano em serviços ecossistêmicos devido à mudança na cobertura da terra, e entre US\$ 6 e 11 trilhões por ano devido à sua degradação” (OECD, 2019).

América Latina e Caribe possuem uma média de quantidade de água por habitante de cerca de 28 mil m³/ano, o que é mais de quatro vezes a média mundial, de 6 mil m³/habitante/ano (UNESCO, 2021).

4.6 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

São 17 objetivos interconectados que abordam os principais desafios de desenvolvimento enfrentados pela população mundial, um apelo global para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, possam desfrutar de paz e de prosperidade em todo o mundo. (ONU, 2019)

Pode-se dizer que a água está em boa parte dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), com foco maior no sexto, em que o alvo do trabalho é água potável e saneamento. Os principais subtópico são o 6.3, que refere a melhorar a qualidade da água e reduzir os produtos químicos liberados nela, e diminuir a água de reuso; o 6.6 restaura ecossistemas relacionados com a produção da água como montanhas, florestas, zonas úmidas, rios, aquíferos e lagos (ONU, 2019).

Ainda segundo a ONU (2019), além do objetivo 6, é possível dizer que o solo e a água ainda estão presentes nos objetivos: 2-Fome zero e agricultura sustentável, 12-Consumo e produção responsável, 13-Ação contra a mudança global do clima e 15-Vida terrestre. Este último tem como um dos focos deter e reverter a degradação da terra, e diminuir a perda de biodiversidade. A meta 15.3 refere a combater a desertificação, e restaurar a terra e o solo degradado.

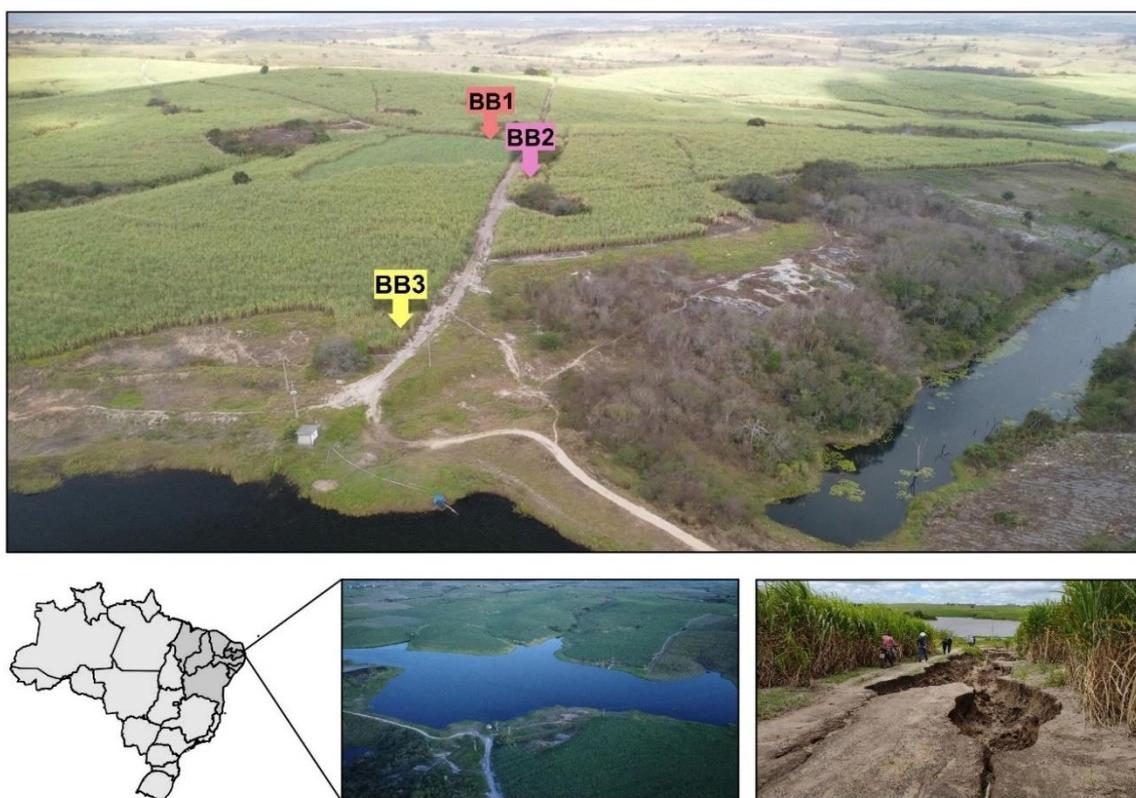
A erosão do solo é uma grande barreira para alcançar Objetivos de Desenvolvimento Sustentável ODS 2 (Erradicar a Fome). Segundo estudos, a taxa de erosão do solo é dez a cem vezes mais rápida do que a formação de solo em campos agrícolas, afetando anualmente dez milhões de hectares de terras aráveis. Além disso, a vida terrestre (ODS 15) e a ação climática (ODS 13) sofrem as consequências da manipulação dos solos, Até 2050, seriam perdidos cerca de 27 Gigatoneladas de carbono orgânico do solo (Yin *et al.*, 2022).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização da área de estudo

Com o intuito de estudar e quantificar erosão do solo foi selecionado a área de estudo, o reservatório de Barro Branco (**Figura 1**) localizado no distrito Malhada, município de Curral de Cima, zona da mata paraibana.

Figura 1 - Vista aérea e localização da aérea de estudo



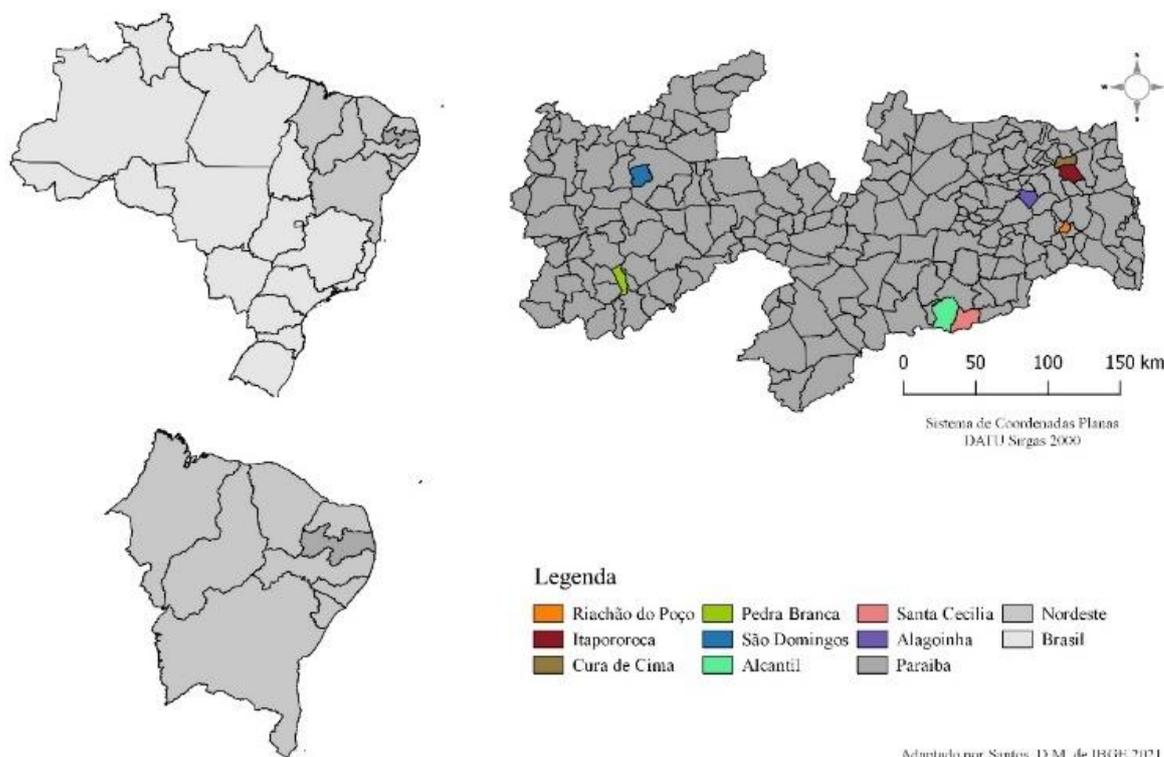
Fonte: Autor (2024).

Para ampliar a segurança desse recurso a Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) junto com a Universidade Federal da Paraíba (UFPB) iniciaram no ano de 2022 o “Plano de Segurança da Água” (PSA), que contemplou os municípios Alcantil, Pedra Branca, Santa Cecília, São Domingos, Curral de Cima, Itapororoca, Alagoinha e Riachão do Poço. Dentre os municípios contemplados, para esta pesquisa foi contemplada o município de Curral de Cima (**Figura 2**).

O município está inserido na bacia hidrográfica do Rio Camaratuba, possui área territorial de 86,428 km² e população de 5.254 habitantes. As coordenadas geográficas da barragem são: Longitudes Oeste -35,3721° e -35,2126° e Latitudes Sul

-6,6884° e -6,7745° (IBGE, 2022). O clima na região, segundo a classificação climática de Köppen, é tropical savana com pluviosidade de 1266 mm ano⁻¹ (Francisco; Santos, 2017).

Figura 2 - Localização dos municípios paraibanos do PSA



Fonte: IBGE (2021), adaptado pelo autor.

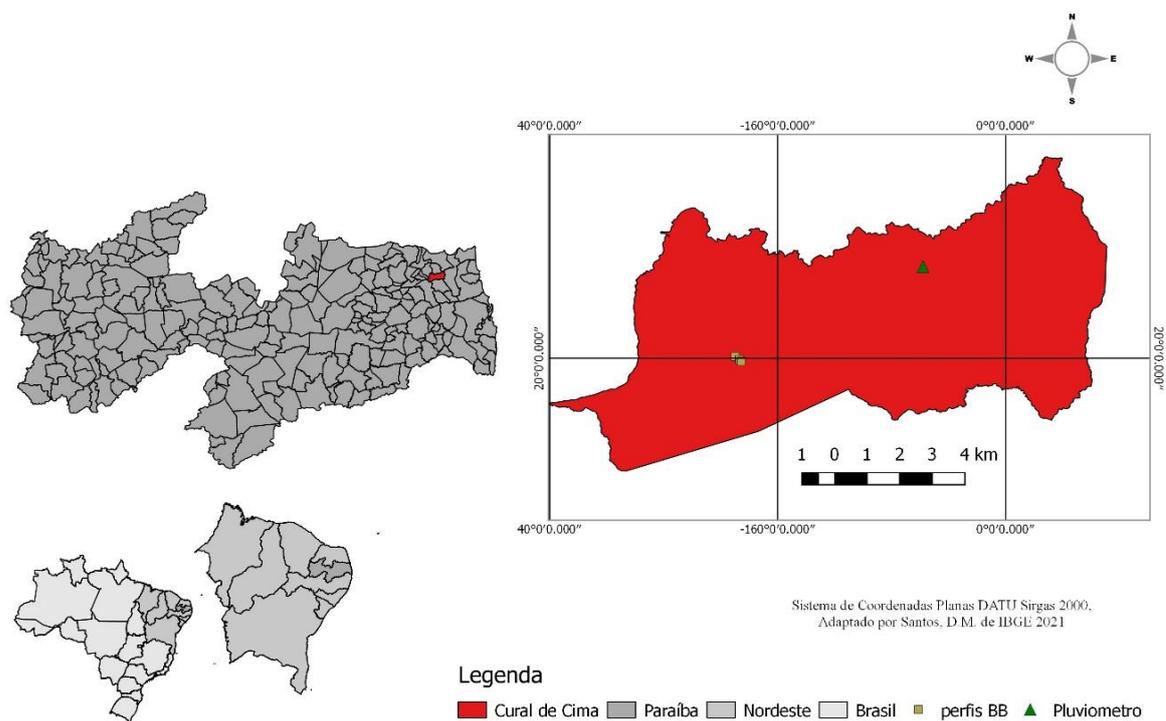
A temperatura média do município é de 25 °C, Evapotranspiração Potencial (ETp) anual >1140 mm e coeficiente de variação < 48%. No ano de 2022, a precipitação foi de 1496,3 mm e no ano de 2023 foi 926,1 mm (AESAs, 2024).

Na **Figura 3** estão referenciados o município Curral de cima, a estação meteorológica e os três perfis de solo abertos pela equipe da UFPB, campus II, Areia/PB. Os solos coletados nesses perfis tiveram suas análises físico-químicas realizados nos Laboratório de Química e Fertilidade do Solo e de Física do Solo, ambos do Departamento de Solos e Engenharia Rural (DSER), da UFPB, campus II, Areia/PB.

Na pedologia do município temos a caracterização da sua geologia seguida, **Figura 4**, o mapa representa as principais formações geológicas indicando o material de origem dos solos da região, indicando sua resistência ao intemperismo já na **Figura**

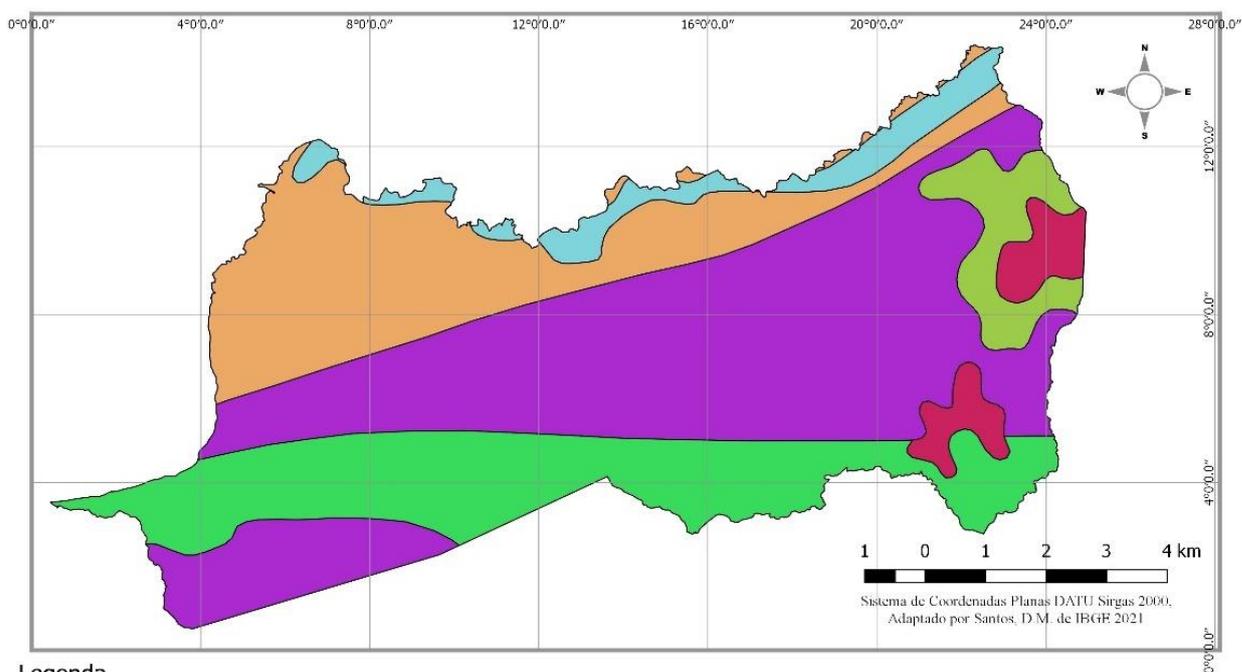
5 apresenta a classificação do solo segundo o IBGE (2021) para o município e no local do estudo todos os solos estão classificados com Argissolo vermelho.

Figura 3 - Localização dos perfis de solo e estação meteorológica



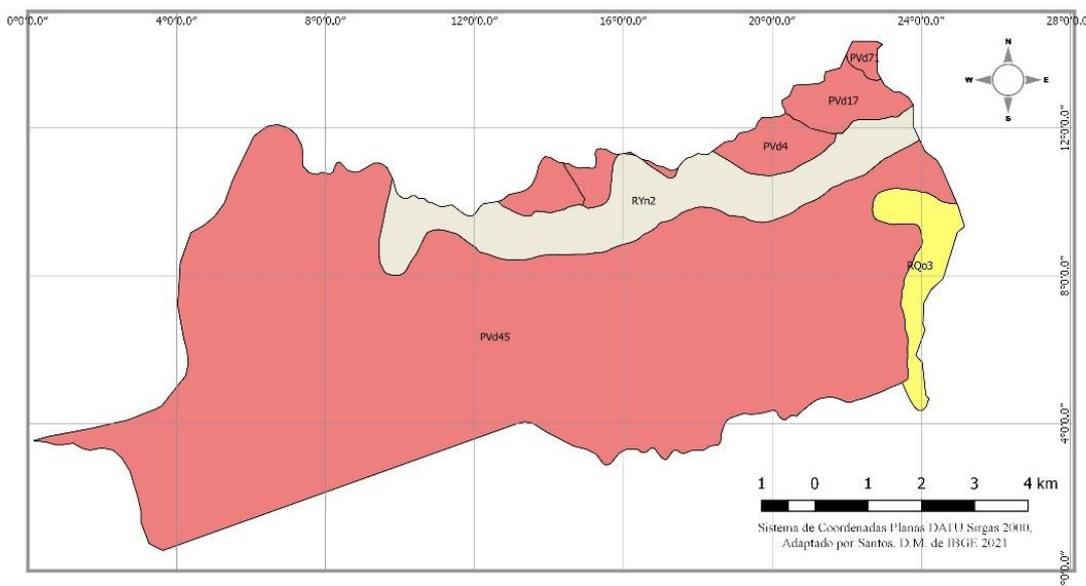
Fonte: IBGE (2021), adaptado pelo autor.

Figura 4 - Mapa geológico do município



Fonte: IBGE (2021). adaptado pelo autor.

Figura 5 - Mapa de solos do município



Legenda

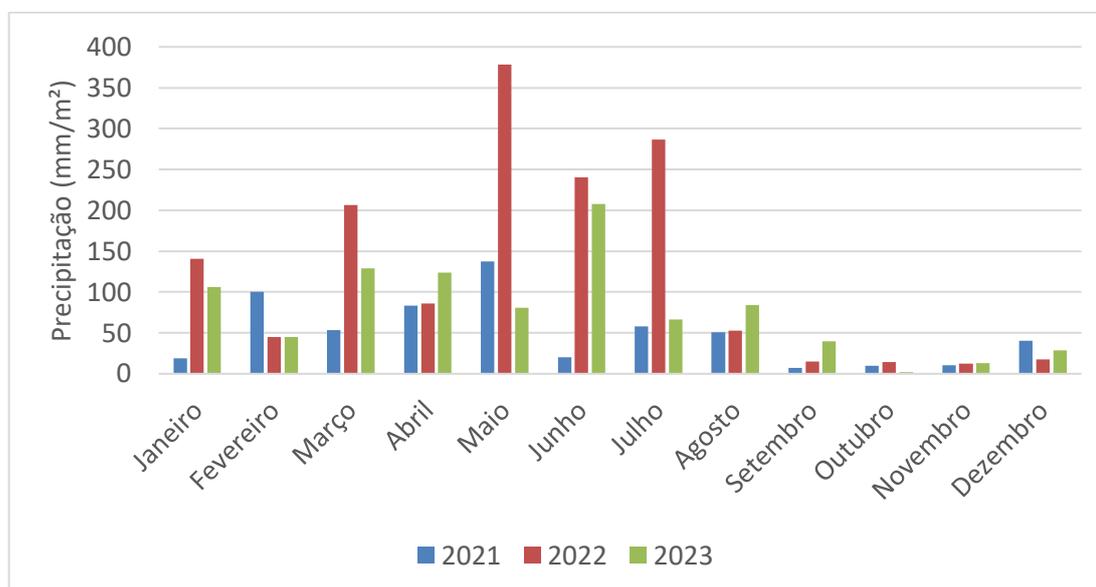
ARGISSOLO VERMELHO distrofico NEOSSOLO FLUVICO NEOSSOLO QUARTZARENICO Ortico

Fonte: IBGE (2021), adaptado pelo autor.

5.1.1 Pluviosidade

A fim de compreender os eventos chuvosos da região que poderiam ter causado a erosão foi realizado um levantamento dos últimos 3 anos das chuvas mensais e acumulados mês a mês dos anos 2021 a 2023, com dados fornecidos pela AESA, obtidos de uma estação meteorológica localizada na cidade de Curral de Cima, a mesma fica aproximadamente 6km da área do estudo (**Figura 6**) e (**Figura 7**).

Figura 6 - Volume de chuva mensal dos últimos 3 anos

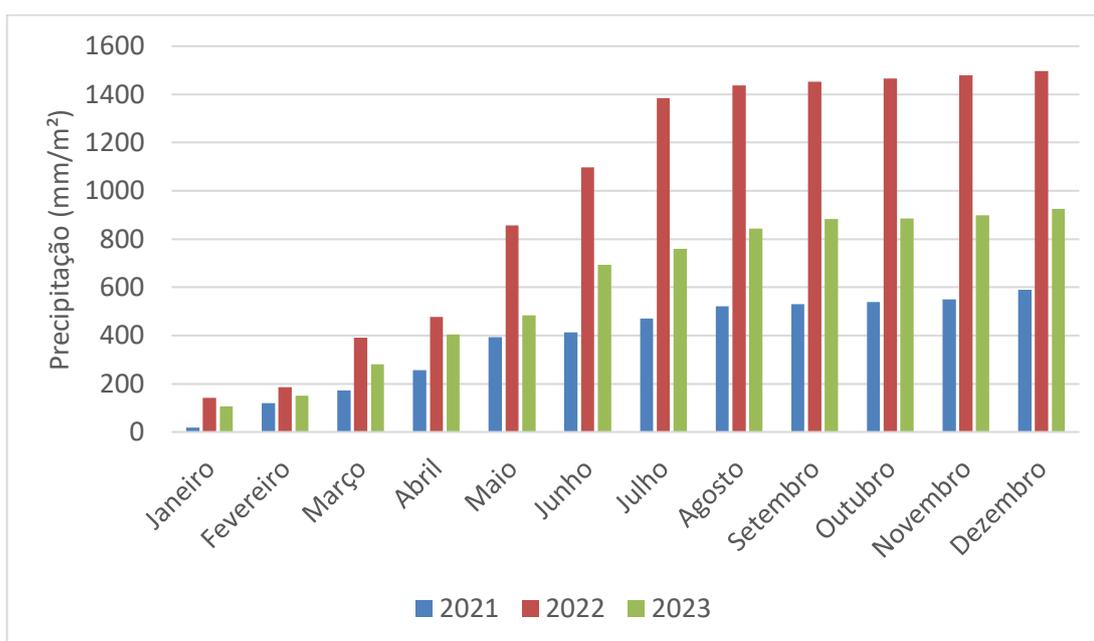


Fonte: AESA (2024), adaptado pelo autor (2024).

As informações deste gráfico (**Figura 6**) permite identificar o período com maior incidência de chuva da região de março a julho, e avaliar as normais atípica das chuvas da cidade, como o ano de 2022.

Já no comparativo do **Figura 7** podemos melhor entender os fatores que levaram o surgimento da erosão no ano de 2022, onde tivemos no mês de maio 378,1 mm e julho com 286,8, juntos apenas dois meses supera o acumulado do ano de 2021, 590,2 mm. Evidencia de chuvas intensas na região.

Figura 7 - Volume acumulado de chuvas dos últimos 3 anos



Fonte: AESA (2024), adaptado pelo autor (2024).

5.2 Coleta das amostras de solo

As amostras indeformadas de solo foram coletadas com anel volumétrico utilizando um trado tipo Uhland nas áreas identificadas em campo e pela modelagem digital do terreno, com função de gerar volume e estrutura do solo superficial. A densidade do solo foi calculada através da relação entre a massa do solo seco e volume da amostra (Teixeira *et al.*, 2017).

No caso de amostras que não permitiu a coleta com anel volumétrico foi utilizado o método do torrão parafinado. Foi coletado blocos de solo indeformado embalado em plástico filme para posterior impregnação com parafina, e estimado volume e densidade. As áreas de coleta foram classificadas de acordo com uso, ocupação e relevo (Teixeira *et al.*, 2017).

A amostra foi seca, destorroada e peneirada em tela de 2 mm de abertura, para obter Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). Posteriormente foi realizada análise de química e fertilidade do solo, matéria orgânica, granulométrica, fração areia, estabilidade estrutural no Laboratório de Física do solo, UFPB, campus II, Areia/PB.

5.2.1 Coleta de sedimentos

Foram coletadas amostras de sedimentos em locais como parte superior da erosão estrada, meio e inferior, além de locais observados onde acumulou sedimentos em micro-relevo denominado de lombada e dentro do reservatório. Com a finalidade de avaliar sua composição e identificar os principais elementos do solo perdidos na erosão (**Figura 8**).

Figura 8 - Coleta de sedimentos



Fonte: Autor (2023).

5.2.2 Classificação dos solos

As classificações dos solos da área de estudo foram realizadas seguindo a metodologia de Santos *et al.* (2015), descrita no manual de descrição e coleta de solo no campo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, juntamente com as análises físicas e químicas do material coletado, e com os dados classificados pelo Sistema Brasileiro de Classificação de solos 5ª edição do ano de 2018.

Na busca de melhor compreender os processos erosivos do solo da área de estudo foram abertas três trincheiras de observação, localizadas a primeira no terço superior denominada de (BB1), no terço médio denominada de (BB2) e no terço inferior denominada de (BB3) seguindo a metodologia descrita no Manual de Descrição e coleta de solos no Campo (7ª edição 2015) da Sociedade Brasileira de Ciências do Solo (SBCS), onde foram escolhidos locais com relevo e posição geográfica para abertura de trincheiras com profundidade mínima de 2 metros ou que atinja a rocha, com comprimento de 1,5 metros por 1,2 metros de largura, quando possível degraus de acesso e ao menos uma das faces bem iluminada. Posterior foi identificado os horizontes e classificados.

5.3 Análise física dos solos

As análises físicas realizadas foram análise granulométrica, fração areia, estabilidade estrutural, relação silte/argila. A análise granulométrica quantifica a distribuição por tamanho dos grãos de minerais individualizados, utilizando a metodologia de Teixeira *et al.*, 2017.

5.4 Análise química e fertilidade dos solos

Nas análises químicas foram realizadas a determinação de pH, acidez trocável de $H^+ + Al^{3+}$, sulfato, matéria orgânica, fósforo assimilável e Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ trocáveis, utilizando a metodologia de Teixeira *et al.*, 2017.

5.5 Levantamento aerofotográfico com ARP

Figura 9 - ARP DJI mine 2



Fonte: <https://www.dji.com/br/mini-2>.

Foram realizados 12 voos com Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) de modelo DJI Mini 2 (**Figura 9**), câmera RGB, sensor CMOS de 1/2,3 polegadas e 12 megapixels, Global Navigation Satellite System (GNSS) (GPS+GLONASS+GALILEO). Alcance de precisão em voo estacionário; Vertical: ± 10

cm (com posicionamento de visão), ± 50 cm (com posicionamento de GPS); Horizontal: ± 30 cm (com posicionamento de visão), $\pm 1,5$ m (com posicionamento de GPS) (Manual do usuário DJI mini 2, V1.4 - 2021.06).

O imageamento da área afetada pela erosão ocorreu no período de 20 de julho a 18 de dezembro de 2023, com intervalo médio entre os voos de 15 dias. Os dados foram gerados pelo software drone Harmony versão 2.3.0 gratuita. Os planos de voo foram configurados para uma sobreposição superior a mínima lateral de 70% e longitudinal de 80%, e velocidade de cruzeiro de 5 m/s (Figueiredo; Figueiredo, 2018).

A altura referencial do ponto de origem foi de 30 m do nível do solo. Nos três primeiros voos foi utilizado um grid simples, a partir do quarto voo foram utilizados dois planos de voo: um de grid simples a 50 m do nível do solo e um segundo voo com duplo grid e altura de 30 m, ambos com mesma taxa de sobreposição e barra de escala em solo para correção de posicionamento e escala.

5.5.1 Pontos de controle em solo

Os Pontos de Controle em Solo ou GCP (*Ground Control Points*) são marcos de referência em solo para conferência e correção no processamento dos mapas. Auxiliam no alinhamento das fotos, correção de referências geográficas e escala.

Com a utilização dos pontos de controle em solo, a precisão dos mapas foi de 0,05 a 0,20 cm (Kou *et al.*, 2020).

Figura 10 - Confeção de material de uso em campo



Fonte: Autor (2023).

Foram utilizados dois modelos de GCP, um para marcos geográficos e outro como barra de escala. Para o primeiro foram confeccionados dez alvos e utilizados tapetes de borracha antiderrapante nas dimensões 50 x 50 cm, pintados e enumerados (**Figura 10**). Para facilitar a identificação do ponto e furo central, que serviu de encaixe no pino de solo, foram inseridos no solo pinos feitos com barra de ferro de aproximadamente 27 cm, ficando 2 cm acima do solo, e quando não utilizado, eram cobertos com uma tampa em PVC, estes pinos serviam para manter a precisão do local nos 11 voos durante 6 meses. Para facilitar a localização dos pontos em campo, foram inseridas estacas de madeira pintadas e enumeradas para cada ponto, elas tinham as dimensões de 55 cm de comprimento.

5.5.2 Barra de escala

Foram utilizadas 10 barras de escala, confeccionada em folhas de forro PVC, com alvos nas pontas e distância conhecida entre os eixos dos alvos, com duas medidas diferentes (1 m e 1,5 m entre eixos), e 2 furos para fixação temporária com pregos, evitando o arraste pelo vento (**Figura 11**). A finalidade das barras de escala é auxiliar na correção das distorções de escala durante o processamento e possibilitando um melhor alinhamento das fotos.

Figura 11 -Barra de escala para pontos de controle



Fonte: Autor (2023).

5.6 Processamento das imagens

As imagens obtidas foram processadas no software Agisoft Metashape 1.6.3.10723. Foram realizados dois processamentos por voo, o primeiro em alta resolução, seguindo o fluxo de trabalho: adicionando as imagens do sobrevoo em seguida as alinhando depois construindo a nuvem densa de pontos, tratar os pontos eliminando os pontos com divergências, para poder construir modelo digital atribuir textura gerando mosaico classificando a altimetria de cada ponto para gerar o Modelo Digital de Elevação (MDE) e por fim gerar ortomosaico, identificar e marcar os pontos de controle com GCP e barra de escala; em seguida, foi corrigido o posicionamento de cada ponto nas fotos e gerado barras de escala com dois pontos conhecidos, por fim, corrigida as escalas de distância.

O segundo processamento se deu pelo alinhamento e reproprocessamento dos mapas, o objetivo foi de gerar dados com maior precisão de escala.

Após processamento dos dados, foi desenhado polígono que delimitou a região erodida no MDS, e mensurou os dados. Assim, permitiu observar o relevo da erosão, melhor identificação das margens da erosão e mensuração do volume da erosão.

5.7 Cálculo do volume de solo movimentado

O cálculo do volume de solo movimentado foi baseado na metodologia de Julian e Nunes (2020), que utiliza imagens de satélite para gerar um modelo anterior às erosões e o MDS atual. Sobrepondo os dois mapas, foi possível identificar áreas de perda e sedimentação do solo. O uso do software de geoprocessamento para quantificar os mapas gerou volume desses corpos em negativo para erosão e em positivo para sedimentação.

As previsões mundiais de perda de solo dependem de uma abordagem de modelagem semi-empírica baseada na Equação Universal de Perda de Solo Revisada (Borrelli *et al.*, 2020). A equação universal de perda de solo não estima as perdas de solo em eventos extremos como nos sulcos, ravinas e voçorocas, pois quantifica pela média. Acrescido pelos eventos extremos identificados pelo aerolevante do ARP, essa equação é baseada na combinação dos fatores de erosividade, erodibilidade, topografia, cobertura vegetal e práticas de suporte.

A USLE/RUSLE apresenta limitações por não estimar as áreas de deposição do solo erodido e a não possibilidade de calcular processos mais avançados de erosão, como as ravinas e voçorocas, usando médias de chuvas e não quantificando

eventos de chuvas intensas que tem maior capacidade de movimentar o solo, onde o MDT possibilitaria essa quantificação agregando mais precisão as taxas de perda de solo (Demarchi; Piroli; Zimback, 2019).

O MDS foi utilizado para identificar as culturas de cobertura, relevo e área com mesma característica, e volumes erodidos não contemplados na EUPS.

5.7.1 Validação das medições

Para verificar a qualidade dos dados fornecido pela medição indireta do MDS foram realizadas medidas manuais em parte da erosão. Isso foi realizado a partir de uma medição em grade com pontos a cada 25 cm. Marcada a área em quatro pontos (**Figura 12**) para possibilitar sua visualização no voo. Foram verificadas a profundidade nas intercessões e o comprimento das linhas, assim, foi gerado área para cada linha da grade. Em seguida, foram realizadas médias das áreas de cada linha e multiplicado pelo comprimento da área selecionada, e gerado volume da área (**Figuras 12 e 13**).

Figura 12 - Procedimento de medição manual



Fonte: Autor (2023).

Figura 13 - Procedimento de medição MDS



Fonte: Autor (2024).

5.8 Cálculo de Estabilidade do Solo

A estabilidade estrutural do solo ou Estabilidade do Solo (ST), corresponde a razão entre matéria orgânica e argila mais lodo, expressa em porcentagem, em que S possui valor superior a 9, este conceito foi descrito por Pieri após ter realizado pesquisa em solos africanos (Pearson; Norman; Dixon, 1995). Assim, temos:

$$ST = \frac{\%MO}{(\%Silte + \%Argila)} \cdot 100$$

Onde:

MO= matéria orgânica.

Os resultados serão classificados de acordo com os valores no índice de Estabilidade Estrutural do solo, em que, para $ST > 9$ (valor de estrutura estável), $7 < ST \leq 9$ (baixo risco de degradação estrutural), $5 < ST \leq 7$ (alto risco de degradação) e $ST \leq 5$ (solo estruturalmente degradado).

5.9 Cálculo da perda de solo pela RUSLE

A equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) utilizada mundialmente para estimar a quantidade de perda de solo em uma determinada área por erosão hídrica e laminar, desenvolvida por Wischmeier e Smith em 1965 e 1978.

Adaptada por Lombardi Neto et al., em 1989 para o estado de São Paulo (Tomaz, 2013).

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Onde:

A= Perda anual do solo (ton/ha/ano) por escoamento superficial.

R= Fator de erosividade, encontrado através de mapas com curvas [MJ/ha/(mm/h)].

$$R = \sum(EI) \quad EI = 6,886 \cdot \left(\frac{Pm^2}{P}\right)^{0,85}$$

Onde:

EI= Média mensal de energia de erosão [MJ/ha/(mm/h)].

Pm= Precipitação média mensal (mm).

P= Precipitação média anual (mm).

K= Fator de erodibilidade do solo (**Tabela 1**), varia de 0,03 a 0,79 [ton/MJ/ha/(mm/h)].

Em função da classificação da classe textural do solo e a quantidade de matéria orgânica (MO) em porcentagem contida no solo, valores esses tabelados por Wanielista; Yousef em 1978 (Tomaz ,2013).

Tabela 1 - Fator erodibilidade (K) em (ton/MJ/ha)/(mm/h)

Ordem	Classe de textura	Matéria orgânica		
		< 0,5%	2%	4%
1	Solo arenoso	0,07	0,04	0,03
2	Solo arenoso fino	0,21	0,18	0,13
3	Solo arenoso muito fino	0,55	0,48	0,37
4	Franco arenoso	0,16	0,13	0,11
5	Franco fino arenoso	0,32	0,26	0,21
6	Franco muito fino arenoso	0,58	0,50	0,40
7	Franco arenoso	0,36	0,32	0,25
8	Franco arenoso fino	0,46	0,40	0,32
9	Franco arenoso muito fino	0,62	0,54	0,44
10	Franco	0,50	0,45	0,38
11	Franco siltoso	0,63	0,55	0,44
12	Silte	0,79	0,69	0,55
13	Franco argilosa arenosa	0,36	0,33	0,28
14	Franco argiloso	0,37	0,33	0,28
15	Franco argiloso siltoso	0,49	0,42	0,34
16	Areia argilosa	0,20	0,17	0,34
17	Silte argiloso	0,33	0,30	0,25
18	Argila	0,17 a 0,38		

Fonte: Tomaz (2013).

Ou fórmula:

$$K = [2,1 \cdot 10^{-4} \cdot M^{1,14} \cdot (12 - ka) + 3,25 \cdot (kb - 2) + 2,5 \cdot (kc - 3)] \cdot 0,001313$$

Onde:

K= Fator erodibilidade do solo (ton/MJ)/(mm/h).

ka= Porcentagem de matéria orgânica.

kb= Coeficiente relativo à estrutura do solo.

kc= Classe de permeabilidade.

M= (%silte + areia muito fina). (100 - %argila)

LS= Fator de declividade e comprimento da encosta.

Indica o efeito do comprimento de rampa e da declividade na erosão do solo.

$$LS = 0,00984 \cdot S^{1,18} \cdot Lx^{0,63}$$

Onde:

S= Declividade média da encosta em porcentagem. Usar a fórmula para valores (<35%).

Lx= Comprimento de rampa em metros (m). Deve ser utilizada quando.

Lx > 10m até Lx<180m.

C= Fator prática de cultura do solo.

Fator tabelado para o tipo de cultura em solo (**Tabela 2**), podendo variar de 0,0001 a 1 a depender da cultura, segundo (Tomaz, 2013).

Tabela 2 - Fator prática de cultura (C)

Uso geral da terra	Fator (C)
Florestas virgens	0,0001
Gramados	0,001
Florestas	0,005
Pastagens	0,010
Terras urbanas	0,010
Áreas urbanas	0,030
Plantações	0,080
Vegetação natural	0,100
Cafezal	0,200
Áreas desnudas e outros	1,000

Fonte: Tomaz (2013).

P: Fator de conservação do solo

As práticas de conservação do solo conforme **Tabela 3**, são aplicadas para reduzir ou minimizar os processos erosivos no solo. Quando existem esses tipos de dispositivos, acaba contribuindo para a diminuição significativa das perdas do solo. Seus valores variam de 0,10 a 1,0 a depender da prática utilizada (Tomaz, 2013).

Tabela 3 - Fator conservação (P)

Tipos de manejo	Inclinação do terreno (%)			
	2 a 7	8 a 12	13 a 18	19 a 24
Plantio morro abaixo	1,00	1,00	1,00	1,00
Faixas niveladas	0,50	0,60	0,80	0,90
Cordões de vegetação permanente	0,25	0,30	0,40	0,45
Terraceamento	0,10	0,12	0,16	0,18

Fonte: Tomaz (2013).

5.9.1 RUSLE por área a montante

Para estimar os valores das perdas de solo pela RUSLE na área a montante do reservatório foram utilizado imagem de satélite disponível o Google *Earth*, sendo gerado polígonos na área a montante e nas margens do reservatório e quantificado sua área, para as estradas foram feitos caminhos representando as estradas e quantificado seus comprimentos e multiplicado pela largura média das estradas de terra (5m). Com o quantitativo de estrada e canavial multiplicado pelo valor estimado para cada tipo de uso.

5.10 Cálculo do valor monetário do solo erodido

Foi utilizado valores do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) do período de janeiro de 2024 para os insumos de; terra vegetal, areia média posto jazida/fornecedor (retirado na jazida, sem transporte) e argila, argila vermelha ou argila arenosa. Que são produtos com características similares aos removidos do solo pela erosão.

$$VM= VS \times VE$$

Onde:

VS= Valor do Solo: Custos dos nutrientes contido no m³ + valor da estrutura (silte, argila, areia e matéria orgânica) ou custo da terra dado por um valor oficial. Exemplo: SINAPI.

VE= Volume Erodido: Quantificado através do aerolevanteamento na área da erosão, volume de solo faltando no perfil do solo.

VM= Valor Monetário: É a multiplicação do VS pelo VE utilizando a tabela SINAPI para composições mais próxima ao material erodido.

6 RESULTADOS

6.1 Classificação pedológica

Na pesquisa foram gerados três perfis em uma toposequência, por ser parte de um projeto maior os perfis foram denominados de Barro Branco 1 (BB1) no terço superior, Barro Branco 2 (BB2) no terço médio e Barro Branco 3 (BB3) terço inferior, (**Figura 14**) fazendo alusão ao local da coleta. Onde foi possível obter três classes de solos distintas.

Figura 14 - Locais das classificações dos solos próximos as erosões



Fonte: Autor (2023).

Utilizando as descrições de campo de cada trincheira e análises físicas e químicas dos horizontes encontrados nos perfis obtivemos as seguintes classificações.

6.1.1 Resultados das análises de solo e sedimentos

As análises químicas, fertilidade e físicas dos solos e sedimentos foram realizadas nos Laboratórios de Química e Fertilidade e no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) Campos II do Departamento de Solos e Engenharia Rural (DSER). Com o resultado e as descrições de campo foi possível classificar os solos da toposequência com três perfis distintos.

Foram realizadas também análise dos sedimentos em cinco pontos (**Figura 15**); terço superior, médio e inferior dos sedimentos acumulados na erosão da estrada

e duas coletas de deposição, na “lombada” de desvio de fluxo antes das erosões e outra no leito rebaixado da barragem.

Figura 15 - Pontos de coleta de sedimentos.



Fonte: Autor (2024).

Legenda: Seta preta deposição lombada, seta azul terço superior da erosão estrada, seta vermelha terço médio da erosão estrada, seta amarela terço inferior da erosão estrada e seta laranja deposição barragem.

Tabela 4 - Atributos da Química e Fertilidade dos solos e sedimentos

LOCAL	Horizonte	PROFUNDIDADE	pH	P	K ⁺	Na ⁺	H ⁺ + Al ³⁺	Al ³⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SB	V%	CTC	MO	
		cm	H ₂ O	mg/dm ³	cmolc/dm ³							cmolc/dm ³	g/kg		
BB1	AP	0-30	5,30	1,86	69,49	0,18	0,02	4,80	0,63	0,92	0,45	1,57	24,65	6,37	16,68
	A2	30-55	5,80	0,98	31,34	0,08	0,05	2,28	0,38	0,80	0,49	1,42	38,38	3,70	7,71
	E	55-80	5,80	0,98	27,31	0,07	0,04	1,50	0,31	0,64	0,38	1,13	42,97	2,63	5,17
	2BT1	80-140	4,80	0,16	50,32	0,13	0,55	1,55	0,34	1,96	1,56	4,20	73,04	5,75	2,01
	2BT2	140-200+	5,00	0,23	57,30	0,15	0,45	1,55	0,30	1,20	2,59	4,39	73,91	5,94	5,91
BB2	AP	0-25	6,00	3,44	42,65	0,11	0,05	3,53	0,15	1,43	1,19	2,78	44,06	6,31	8,55
	BA	25-45	5,10	0,77	10,11	0,03	0,05	5,35	1,38	0,27	0,21	0,56	9,49	5,90	11,40
	Btf	45-80	4,60	0,64	69,49	0,18	0,09	4,90	1,84	0,14	0,23	0,49	9,09	5,39	9,18
	RC	80-90+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BB3	AP	0-30	4,20	8,63	98,00	0,25	0,07	5,31	0,97	1,04	0,79	2,15	28,82	7,46	19,42
	AC	30-60	4,40	2,89	26,62	0,07	0,04	4,17	1,37	0,29	0,46	0,86	17,10	5,03	9,39
	C1	60-85	5,20	0,98	15,51	0,04	0,09	2,11	0,47	0,50	0,34	0,97	31,49	3,08	4,22
	C2	85-150	5,60	0,57	16,59	0,04	0,06	0,33	0,23	0,24	0,11	0,45	57,69	0,78	2,11
	C3	150-200+	5,50	0,29	26,92	0,07	0,09	0,40	0,23	0,45	0,55	1,16	74,84	1,55	2,01
Sedimentos															
Erosão estrada terço superior.	1	superficial	5,20	1,63	28,87	0,07	0,12	0,66	0,16	0,13	0,13	0,45	40,54	1,11	1,34
Erosão estrada terço médio	2	superficial	5,80	4,19	23,18	0,06	0,66	0,30	0,05	0,41	0,53	1,66	84,69	1,96	2,27
Erosão estrada terço inferior.	3	superficial	5,70	3,99	12,98	0,03	0,07	0,51	0,11	0,19	0,13	0,43	45,74	0,94	1,65
deposição 1	Lombada	superficial	6,40	12,62	153,76	0,39	0,72	3,15	0,05	2,80	3,00	6,92	68,72	10,07	23,11
Deposição 2	Barragem	superficial	7,10	5,85	252,32	0,65	1,34	0,00	0,00	5,18	4,69	11,86	100,0	11,86	37,34

Fonte: Autor (2023).

Tabela 5 - Atributos físicos dos solos e sedimentos

LOCAL	Horizonte	PROFUNDIDADE	Areia. Grossa	Areia. Fina	Areia Total	Silte	Argila	CLASSE TEXTURAL
		cm				0,05 - 0,002 mm	< 0,002 mm	
		g/kg ⁻¹						
BB1	A1	0-30	684	71	755	123	122	Franco arenosa
	A2	30-55	592	62	654	222	124	Franco arenosa
	E	55-80	596	62	658	232	111	Franco arenosa
	2BT1	80-140	281	74	355	179	468	argila
	2BT2	140-200+	237	45	282	204	485	argila
BB2	A	0-25	465	165	630	209	161	Franco arenosa
	AB	25-45	391	127	518	234	248	Franco Argilo Arenosa
	Btf	45-80	356	134	490	223	287	Franco Argilo Arenosa
	RC	80-90+	0	0	0	0	0	rocha
BB3	A	0-30	397	281	678	258	64	Franco Argilo Arenosa
	AC	30-60	461	288	747	163	90	Franco Argilo Arenosa
	C1	60-85	466	298	764	135	101	Franco Arenosa
	C2	85-150	495	297	792	173	35	Areia franca
	C3	150-200+	426	294	720	205	75	Franco Arenosa

SEDIMENTOS	Areia muito grossa	Areia. Grossa	Areia Média	Areia Fina	Areia muito fina	Areia Total	Silte	Argila	CLASSE TEXTURAL
	2-1mm	1-0,5mm	0,5-0,25mm	0,25-0,105mm	0,105-0,053mm	2-0,05mm	0,05 - 0,002 mm	< 0,002 mm	
		g/kg ⁻¹							
Erosão estrada terço superior.	15	48	196	464	166	889	89	22	Areia
Erosão estrada terço médio	15	39	216	451	149	870	104	26	Areia
Erosão estrada terço inferior	80	129	294	336	90	929	48	24	Areia
Deposição lombada	11	26	57	116	106	316	421	263	Franca
Deposição barragem	17	33	67	118	73	308	388	304	Fanco argilosa

Fonte: Autor (2023).

6.1.2 Cor e classe textural

Figura 16 - Classificação das cores do solo

Fonte: Autor (2023).

Utilizando torrões do solo de cada horizonte e o sistema de cores Munsell (**Figura 16**) obtivemos as cores dos solos de cada horizonte e com a análise da física das amostras suas composições de areia, silte e argila a sua classe textural, mostrando uma predominância de textura franco arenosa (**Tabela 6**).

Tabela 6 - Caracterização de cor e classe textural

Horizonte.	Profundidade e(cm)	Cor (úmida)	Cor (úmida/moquetamento)	¹ Classe textural
P1(BB1) – Argissolo Vermelho Eutrófico Abrupto, Textura Argilosa, A moderado				
Ap	0-30	10 YR 2/2		franco arenosa
A1	30-55	10 YR 4/3		franco arenosa
E	55-80	10 YR 4/2		franco arenosa
2BT1	80-140	2,5 YR 4/8	5YR 3/2	argila
2BT2	140-200+	2,5 YR 3/2	2,5YR 4/6	argila
P2 (BB2) – Plintossolo Argilúvico Distrófico Típico, Textura Media, A moderado				
Ap	0-25	10 YR 2/2		franco arenosa
BA	25-45	10 YR 4/3		franco argilosa arenosa
Btf	45-80	10 YR 4/2		franco argilosa arenosa
RC	80-90+	-		rocha
P3 (BB3) – Neossolo Quartzarênico Órtico, Típico, Textura Arenosa, A moderado				
Ap	0-30	10 YR 2/2		franco arenosa
AC	30-60	7,5 YR 3/2		franco arenosa
C1	60-85	10 YR 4/2		franco arenosa
C2	85-150	10 YR 5/3		areia franca
C3	150-200+	2,5 YR 6/4		franco arenosa

Fonte: Autor (2023).

6.1.3 Classificação dos perfis de solo

Ao classificarmos os solos da área de estudo possibilitou compreender os seus processos de formação, tal qual sua resistência a degradação, assim melhorando a compreensão do comportamento do solo diante aos processos erosivos.

6.1.3.1 Barro Branco 1 (BB1): Argissolo Vermelho Eutrófico Abrúptico, Textura Argilosa, A moderado

Presentes no terço superior da área de estudo foi classificado como; Argissolo Vermelho Eutrófico Abrúptico, Textura Argilosa, A moderado. coincidindo em parte com os dados do IBGE 2021 que classificou toda a região por Argissolo Vermelho Distrófico e pela Base de Referência Mundial para Recursos de Solos (FAO/WRB); podemos o classificar como um Acrisols.

A **Figura 17** representa a transição irregular do perfil BB1 indicando uma movimentação da solução do solo em períodos que se encontra saturado pela água. O solo apresenta a transição do Bt1 para Bt2 do tipo irregular, onde a matéria orgânica penetra no horizonte Bt2 na forma de línguas. Isso aumentando sua retenção de água.

Figura 17 - Perfil BB1 e transição irregular



Fonte: Autor e Raphael Moreira Beirigo (2023)

Os acrissóis com litologias diferentes podem ser distróficos nos nutrientes lábeis, logo não disponível podendo diferir substancialmente em sua capacidade de reabastecimento de nutrientes lábeis. Têm solo argiloso, com solos argilosos finos, pedregosos, vermelho-amarelados na encosta média retilínea, argila fina avermelhada na encosta superior convexa, argila grossa amarelada erodível na encosta coluvial côncava, e pedras rasas preenchem a ravina (Bailliea *et al.*, 2018).

6.1.3.2 Barro Branco 2 (BB2): Plintossolo Argilúvico Distrófico Típico, Textura Media, A moderado (FAO/WRB: Plinthosols)

No terço médio da vertente estudada ocorre um Argilúvico Distrófico Típico, Textura Media, A moderado, devido ao controle litológico da rocha o que condiciona a ocorrência de episaturação no período chuvoso e processos redoximórficos e formação de plintita (**Figura 18**). A formação da plintita ocorre pela litologia do horizonte sequente que nos períodos chuvosos a uma saturação temporária com água induzir processos de redução e oxidação, conhecido por redoximórfico formado a segregação do ferro. Presença do horizonte Bt coincidente com o horizonte plíntico e Matizes 10YR com croma menor ou igual a 4 (Santos *et al*, 2018).

Figura 18 - Perfil BB2



Fonte: Raphael Moreira Beirigo (2023).

6.1.3.3 Barro Branco 3 (BB3): Neossolo Quartzarênico Órtico, Típico, Textura Arenosa, A moderado (FAO/WRB: Arenosols)

Na área de estudo localizasse no terço inferior da vertente foi classificado o solo, Neossolo Quartzarênico Órtico, Típico (**Figura 19**), solo com sequência de horizontes A-C, e apresentando textura areia franca em todos os horizontes até, no mínimo, a profundidade de 150 cm a partir da superfície do solo. (Santos *et al*, 2018).

Figura 19 - Perfil BB3



Fonte: Raphael Moreira Beirigo e Autor (2023).

Solo basicamente quartzosos, tendo, nas frações areia grossa e areia fina, composta por 95% ou mais de quartzo, calcedônia e opala e praticamente ausência de minerais primários (Santos *et al*, 2018). Por estar no terço inferior sua formação remete a sedimentação de material erodido dos terços superiores, recebendo contribuição.

6.1.4 Índice de Estabilidade estrutural dos Solo (ST)

A análise físico-química (**Tabela 4** e **Tabela 5**) forneceram dados para o estudo do Índice de Estabilidade estrutural dos Solos (**Tabela 7**), em que o valor de estrutura é estável o $ST > 9$, baixo risco de degradação estrutural $7 < ST \leq 9$, alto risco de degradação $5 < ST \leq 7$, e solo estruturalmente degradado $ST \leq 5$ (SIMÕES *et al.*, 2018).

Tabela 7 - Índice de Estabilidade dos Solos nos horizontes

Local	Horizonte	Profundidade	MO	CO	Silte	Argila	ST (%)	Estrutura do solo
		cm			0,05 - 0,002 mm	< 0,002 mm		
			g/kg	g/kg	g/kg ⁻¹			
BB1	AP	0-30	16,68	9,70	123,00	121,00	6,84	Alto risco de degradação
	A2	30-55	7,71	4,48	222,00	125,00	2,22	Solo estruturalmente degradado
	E	55-80	5,17	3,01	232,00	111,00	1,51	Solo estruturalmente degradado
	2BT1	80-140	2,01	1,17	179,00	468,00	0,31	Solo estruturalmente degradado
	2BT2	140-200+	5,91	3,44	204,00	485,00	0,86	Solo estruturalmente degradado
BB2	AP	0-25	8,55	4,97	209,00	162,00	2,30	Solo estruturalmente degradado
	BA	25-45	11,40	6,63	235,00	249,00	2,36	Solo estruturalmente degradado
	Btf	45-80	9,18	5,34	223,00	288,00	1,80	Solo estruturalmente degradado
	RC	80-90+	-	-	-	-	-	-
BB3	AP	0-30	19,42	11,29	258,00	63,00	6,05	Alto risco de degradação
	AC	30-60	9,39	5,46	165,00	92,00	3,65	Solo estruturalmente degradado
	C1	60-85	4,22	2,45	135,00	102,00	1,78	Solo estruturalmente degradado
	C2	85-150	2,11	1,23	173,00	35,00	1,01	Solo estruturalmente degradado
	C3	150-200+	2,01	1,17	206,00	76,00	0,71	Solo estruturalmente degradado
Erosão terço superior	1	superficial	1,34	0,78	89,00	22,00	1,21	Solo estruturalmente degradado
Erosão terço médio	2	superficial	2,27	1,32	104,00	26,00	1,75	Solo estruturalmente degradado
Erosão terço inferior	3	Superficial	1,65	0,96	48,00	24,00	2,29	Solo estruturalmente degradado
Deposição 1	Lombada	Superficial	23,11	13,44	421,00	263,00	3,38	Solo estruturalmente degradado
Deposição 2	Barragem	Superficial	37,34	21,71	388,00	304,00	5,40	Alto risco de degradação

Fonte: Autor (2023).

É possível verificar (**Tabela 7**) que todas as amostras se encontram em estágios de degradação de alto risco a estruturalmente degradado, indicado assim sua susceptibilidade a perda de solo. E alguns dos sedimentos apresentam valores do ST melhores que os horizontes.

6.2 Avaliação temporal da erosão

A perda de solo por erosão hídrica na área de estudo é um problema crônico, conforme se observa nos registros fotográficos da **Figura 20**, o qual revela à recorrência da problemática ao longo do tempo. Ressalta-se que no final de 2022 foi aterrada, e no ano seguinte o seu ressurgimento.

Figura 20 - Erosão estrada cronologia



Fonte: Autor (2022 e 2023).

Figura 21 - Vazamento entre as erosões e estrada



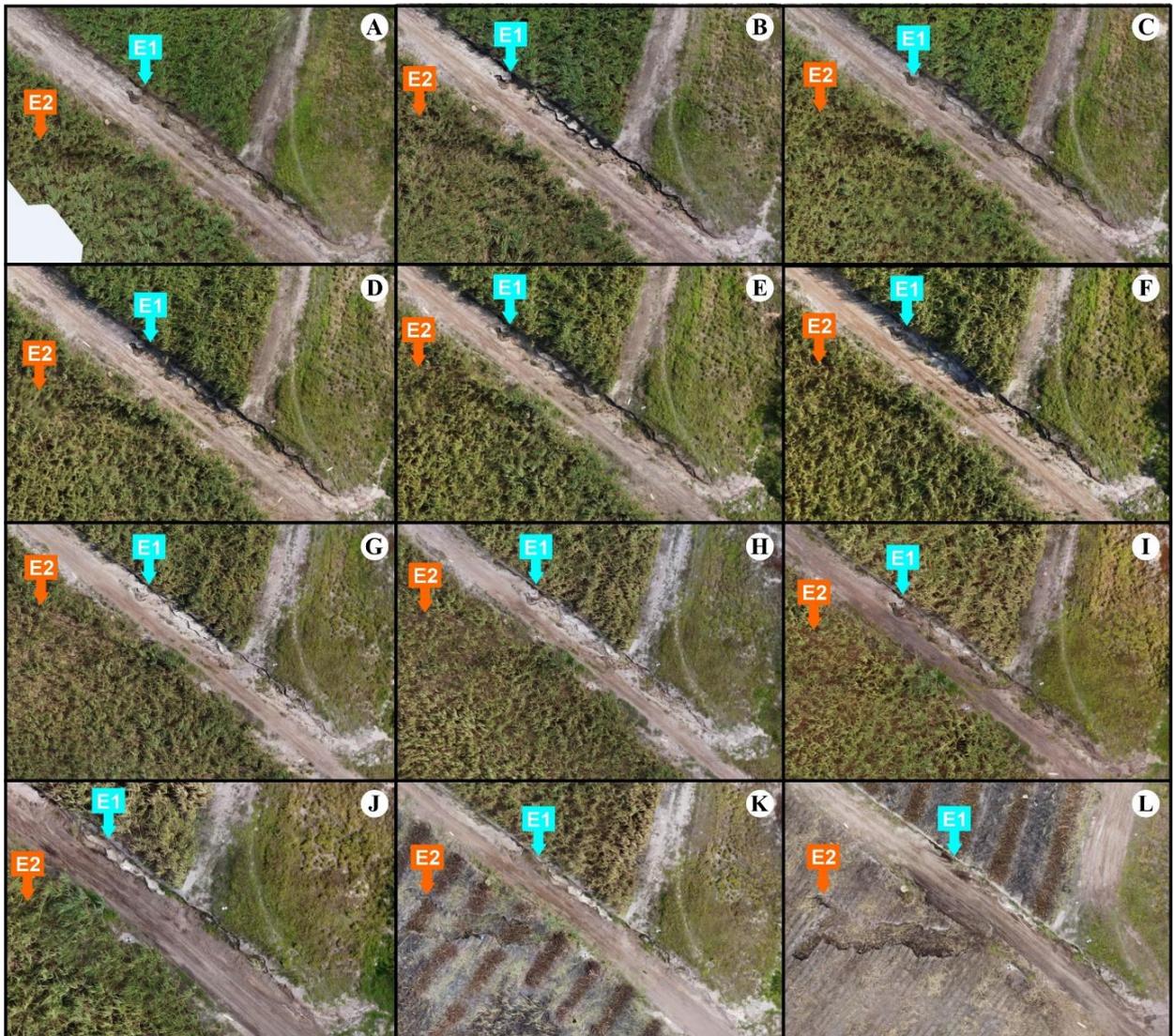
Fonte: Autor (2023).

A metodologia aplicada possibilitou o acompanhamento dos processos evolutivos da erosão em um período de 6 meses possibilitando identificar e quantificar

os volumes de solo erodidos através da aerofotogrametria e processamento das imagens gerando os MDT, trazendo assim um recorte temporal em 3D do fenômeno em um intervalo médio de 15 dias entre levantamento. Podemos observar o seu desenvolvimento causado pela chuva e posteriormente pelo manejo inadequado da irrigação (**Figura 21**).

6.2.1 Volume dos solos erodidos

Figura 22 - Ortofoto gerada em cada levantamento feito no projeto



Fonte: Autor (2023).

Legenda: (E1) Erosão estrada, (E2) Erosão canalial. Ortofoto das erosões nas datas; A- 20/07/2023, B- 04/08/2023, C - 18/08/2023, D - 31/08/2023, E - 15/09/2023, F- 29/09/2023, G - 17/10/2023, H - 31/10/2023, I - 15/11/2023, J - 30/11/2023, K - 07/12/2023, L - 18/12/2023.

As idas a campo possibilitaram a confecção de 12 ortofotos da área de estudo (**Figura 22**), permitindo identificar a erosão da estrada em todas elas e uma depressão no canal das imagens iniciais e sua evidência nos dois últimos sobrevoos. A partir do imageamento realizado em 30/11, só foi possível executar o ortomosaico, devido a um erro no voo que resultou na perda de parte das imagens e, conseqüentemente, comprometendo a qualidade do MDS.

Os volumes calculados pelo MDS nos 11 sobrevoos com ARP (**Tabela 8 e Tabela 9**) avaliou perímetro, área e volume da região erodida. O primeiro sobrevoos foi realizado em 20 de julho de 2023, tendo sido quantificada uma perda de quase 40 m³ de solo. A precipitação acumulada desde o aterramento da ravina/voçoroca (outubro de 2022) até o primeiro sobrevoos foi de 783,30 mm.

A movimentação de solo da erosão estrada mais o fluxo de solo da mesma erosão obtém como valor 79,99 m³. Na erosão canal o maior volume erodido identificado foi de 85,297 m³. Ao somar as duas erosões principais, o volume encontrado é de 165,29 m³ de solo movimentado, apenas nas duas erosões sem quantificar a erosão laminar e em suco da área do estudo.

Tabela 8 - Volumes obtidos na linha de cota pelos MDS na erosão estrada

Voo	Data	Perímetro (M)	Área (M ²)	Volume (M ³)		Chuvas (mm)	Diferença (M ³)
				Acima	Abaixo		
1	20/07/2023	151,96	125,499	1,423	39,103	783,300	0
2	04/08/2023	153,551	124,095	1,618	35,836	7,100	3,267
3	18/08/2023	161,158	124,794	2,056	36,176	13,000	-0,340
4	31/08/2023	159,822	124,729	1,478	41,116	69,800	-4,940
5	15/09/2023	163,230	118,667	2,086	36,146	21,900	4,970
6	29/09/2023	162,733	121,333	3,206	36,887	17,900	-0,741
7	17/10/2023	169,327	125,394	2,585	35,184	0,0	1,703
8	31/10/2023	197,210	146,155	2,668	35,241	1,800	-0,057
9	15/11/2023	178,374	140,312	1,948	41,749	0,700	-6,508
10	07/12/2023	149,074	136,119	3,825	26,032	16,100	15,717
11	18/12/2023	138,634	138,862	3,037	22,251	11,800	3,781

Fonte: Autor (2023).

Na erosão da estrada foram realizadas 11 mensurações com o ARP, denominadas de voos do 1 ao 11 permitindo avaliar o perímetro, área, volume erodido, abaixo e acima da linha de cota, quantitativo de chuvas acumuladas entre os voos e confrontando a diferença dos volumes obtidos com o voo anterior, podendo assim

avaliar o fluxo de sedimentos. Apenas o primeiro voo por não ter referência anterior ficou com valor zero na diferença e seu acumulado de chuvas remete ao período de cobertura da erosão relatado, de novembro do ano de 2022 a 20 de julho de 2023 data do primeiro aerolevanteamento (**Tabela 8**).

No sobrevoo 10, realizado em 07 de dezembro de 2023, foi possível observar uma segunda erosão que estava encoberta com plantação de cana-de-açúcar, visível após corte do cultivo. Nesta erosão foi observada uma perda de solo superior a 85 m³, superior a perda de solo da erosão estrada que teve como valor maior aproximadamente 42 m³ (**Tabela 9**).

Tabela 9 - Volumes obtidos na linha de cota pelos MDS na erosão canavial

Voos	Data	Perímetro (M)	Área (M ²)	Volume (M ³)		Chuvas (mm)	Diferença (M ³)
				Acima	Abaixo		
10	07/12/2023	83,470	149,152	2,302	84,396	16,100	0
11	18/12/2023	76,863	140,850	0,608	85,297	11,800	0,901

Fonte: Autor (2023).

O corte do plantio ocorreu no dia 07/12/2023, a diferença de quase 1 m³ obtida entre os voos 10 e 11 Com a retirada da cobertura vegetal, possivelmente se deu devido ao acúmulo da matéria vegetal cortada dentro da erosão (**Figura 23**).

Figura 23 - Erosão canavial dia do corte



Fonte: Autor (2023).

A **Figura 24** representa o Modelo digital de elevação MDE na área das erosões no último sobrevoo. Na figura é possível observar os seguintes pontos: curvas de nível rompidas (linhas tracejadas laranjas), erosão do canal bem profunda (elipse preta), retângulo azul de onde foi retirado parte do material para aterrar a erosão da estrada e seta em vermelho sentido de um canal de escoamento dentro do canalial em direção a erosão.

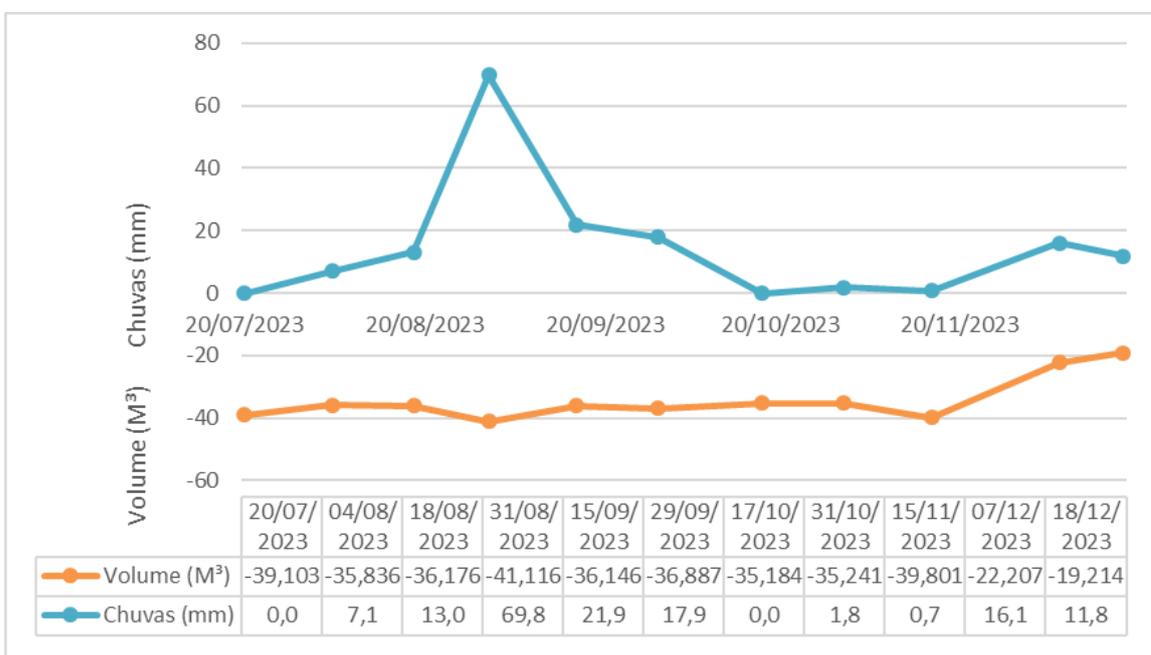
Figura 24 - Modelo Digital de Elevação (MDE) voo 12



Fonte: Autor (2024).

Legenda: A cor verde-escura representa as áreas mais baixas; o vermelho escuro representa as áreas, e a escala em relação ao nível do mar.

Figura 25 - Volume erodido x Acumulado chuvas



Fonte: Autor (2023).

A **Figura 25** permite identificar algumas particularidades como o aumento do volume negativo da erosão no dia 31/08/2023, indicando uma maior perda de solo, com o aumento significativo das chuvas no mesmo período. Já em 07/12/2023 uma redução do volume que não tem relação com a precipitação e sim com o aterro parcial da erosão da estrada.

6.2.2 Validação, volume manual x volumes obtidos no MDS

Ao confrontar as medidas (**Tabela 10**) manual de uma determinada parte da erosão e com a mesma área obtida pelo mapa digital é possível verificar uma proximidade das medidas.

Tabela 10 - Volume manual x volumes obtidos no MDS

Voo	Data	Volumes (M ³)		Diferença (M ³)	Variação (%) [(Manual - MDS)/mds]
		Manual	MDS		
5	15/09/2023	3,352	3,438	0,086	2,501%
7	17/10/2023	2,628	2,634	0,006	0,228%
8	31/10/2023	1,333	1,223	0,110	8,994%
9	15/11/2023	3,360	3,493	0,133	3,808%
11	18/12/2023	4,089	4,079	0,010	0,245%

Fonte: Autor (2023).

6.2.3 Profundidade das erosões

Figura 26 - Profundidade erosão da estrada



Cota de 80 cm nível estrada a base da erosão



Cota de 145 cm, nível do solo para base da erosão



Cota de 55 cm, nível do solo pra estrada

Fonte: Autor (2023).

No dia 30 de agosto de 2023 (**Figura 26**) foram realizadas as avaliações das profundidades da cabeceira da erosão da estrada. Foram obtidas três cotas de profundidade: a primeira da estrada para a base da erosão com 80 cm; a segunda da base do solo do canal na borda da estrada para a base da erosão com 145 cm; e a terceira da base do canal para a estrada com 55 cm. Com isso, é possível inferir que houve um rebaixamento da estrada entre os anos de 2022 e 2023, tendo em vista que a estrada e a erosão vista em 2022 estava no mesmo nível do solo. É possível observar que a profundidade efetiva da erosão é 145 cm na data citada.

Figura 27 - Profundidade erosão do canal



Cota de 85 cm, terço inferior da erosão

Cota de 90 cm, terço médio da erosão

Cota de 107 cm, terço superior da erosão

Fonte: Autor (2023).

Na erosão do canal (**Figura 27**) foi possível fazer as medições após o corte da cana, que ocorreu no dia 07/12/2023, e foram obtidas as profundidades de 85 cm a 107 cm.

6.3 Perda de solo pela RUSLE

Para quantificar a taxa de perda de solo na área de estudos, foi necessário fazer algumas adequações, tendo em vista que o comprimento de rampa (L) é de 321 m, ultrapassando o recomendado de até 180 m (Tomaz, 2013). Diante disto, optou-se por selecionar a faixa em que se encontram as erosões, com um comprimento de rampa de 115 m (Lx), declividade de 9,58% (S) resultando em um LS de 2,813 (adimensional).

No fator erosividade (R) utilizamos os índices de chuvas do ano de 2023 fornecidos pela AESA. Quantificando o valor de 525,884 MJ/ha/(mm/h). Para obtenção do fator de erodibilidade (K), foram utilizadas as **tabelas 5 e 6** com dados dos solos e a (**Tabela 1**) para classificação a ordem 4, resultando em $K = 0,13$ ton/MJ/ha/(mm/h). Fator de prática cultural (C) a área predomina plantação de cana de açúcar (*Saccharum officinarum*) utilizamos o fator tabelado (**Tabela 2**) para plantações $C=0,8$ (adimensional) e para práticas de conservação (P) utilizando plantio em nível foi atribuído o valor de 0,5 (adimensional).

Com a multiplicação dos fatores, chegou-se ao resultado de 7,7 (ton/ha/ano) de perda de solo devido ao escoamento superficial. Alterando o valor da prática cultural (C) para 1 e o (K) pra matéria orgânica > 0,5% ficando no valor de 0,16 ton/MJ/ha/(mm/h) para o K e em práticas culturais segunda a (Tabela 3) $P=1$ representando as estradas o valor será 236,732 (ton/ha/ano) de perda de solo (**tabela 11**).

Tabela 11 - Valores RUSLE

Uso do solo	RUSLE							
	R MJ/ha/ (mm/h)	K ton/MJ/ha/ (mm/h)	LS	C	P	A (ton/ha/ano)	T (ton/ha/ano)	Λ (ton/ha/ano)
Canavial	523,884	0,13	2,813	0,8	0,5	7,7	7,03 ⁽¹⁾ 5,21 ⁽²⁾	0,63 ⁽¹⁾ 2,49 ⁽²⁾
Estrada	523,884	0,16	2,813	1	1	236,732	7,03 ⁽¹⁾ 5,21 ⁽²⁾	229,702 ⁽¹⁾ 231,522 ⁽²⁾

Fonte: Autor (2024).

Legenda: T= tolerância de perda para o estado da Paraíba (Oliveira, *et al.* 2008), Λ= Diferença de perda estimada para a tolerância. (1) Argissolos (2) Neossolos

Com o contínuo progresso tecnológico visando suprir a alta demanda por alimentos e o desafio de cultivar áreas agrícolas de forma sustentável, foi estabelecido um limite aceitável de perdas de solo. Com o desafio da produção de alimento em grande escala foi estabelecido um limite tolerável de perda de solo que representa a máxima intensidade de erosão permitida para garantir a viabilidade econômica das culturas (Wischmeier; Smith, 1978).

6.3.1 Volumes da RUSLE a montante da barragem

A área total a montante da barragem foi estimada em 128ha neles temos; 99,7 ha com cana de açúcar, 25,8 ha área inundada e estradas 2,6 ha. Usando os valores quantificados na **Tabela 12**.

Tabela 12 - Perda de solo a montante pela RUSLE

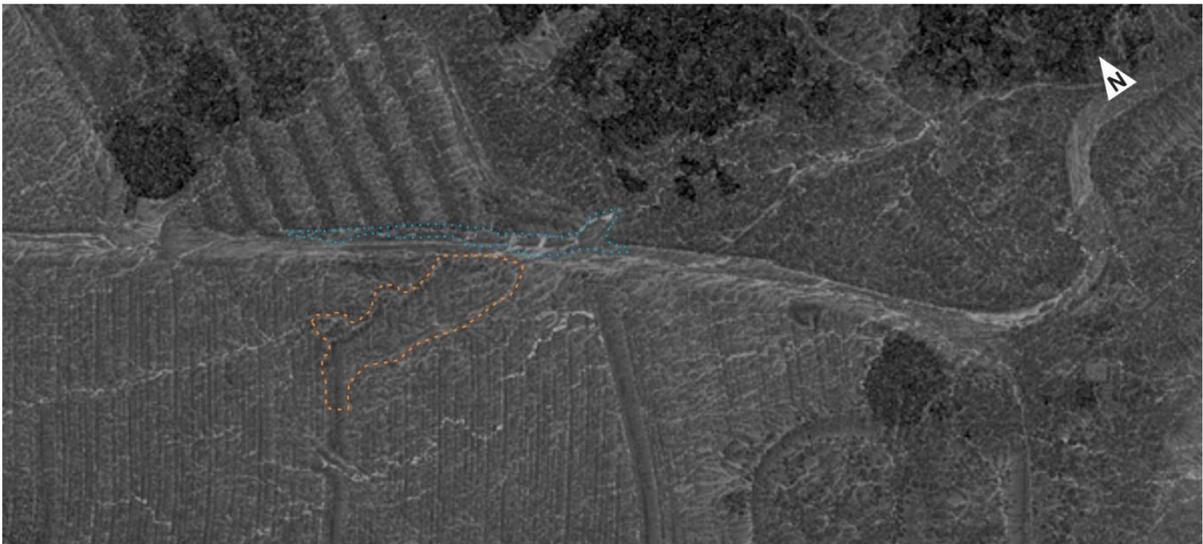
Tipo de uso	Área em hectares	Valor RUSLE (ton/ha/ano)	RUSLE total por uso(ton/ha/ano)
Cana de açúcar	99,6	7,7	766,92
Estradas	2,6	236,732	615,50
Reservatório	25,8	0	0
Área a montante	128		1.382,42

Fonte: Autor (2024).

Onde (**Tabela 12**) é possível estimar uma perda potencial de solo no ano de 2023 no valor de 1.382,42 (ton/ha/ano), para a área a montante do reservatório Barro Branco, Curral de Cima.

6.4 Rede de drenagem

A rede de drenagem foi gerada com o MDS e o software Qgis, versão 3.28.4, com o complemento; r.watershed. A análise desse produto permite identificar preferências de fluxo hídrico nos locais onde as erosões são mais evidentes (**Figura 28**). Com ela foi possível identificar os principais fluxos de drenagem passando nos pontos onde as erosões são mais evidentes (erosão laranja canavial, erosão azul estrada).

Figura 28 - Fluxo drenagem da área de estudo

Fonte: Autor (2024).

Legenda: Marcação em laranja erosão canavial, marcação em azul erosão estrada

6.5 Monetização da perda de solo

Segundo a tabela da SINAPI de janeiro de 2024, temos os seguintes valores; terra vegetal o metro cubico (m³) de R\$ 143,57 e areia pra aterro o m³ de R\$ 57,50.

Usando esses valores como referência e o volume erodido de 165,289 m³, temos caso todo o material sendo classificado por areia de aterro a importância de R\$ 9.504,12. Caso considerarmos como terra vegetal R\$ 23.730,54. Esses valores não contemplam o transporte do material e nem a recomposição dos nutrientes e cultura afetada.

7 DISCUSSÕES

7.1 Classificação dos solos

As trincheiras permitiram a correta classificação do solo no decorrer do relevo que está sendo erodido assim possibilitando a melhor compreensão dos processos de formação dos solos e sua resistência a erosão. O acumulado na posição mais baixa da encosta pode ser mal estruturado e, portanto, mais suscetível à perda de solo induzida pela água e/ou à operação de preparo do solo, podendo depositar sedimentos em ravinas que podem subsequentemente ser movidas pela erosão hídrica (Zarrinabadi *et al.*, 2023) ou seja a mecanização dessas áreas desagrega o solo facilitando movimentação com a chuva e ou vento.

No litoral do estado da Paraíba a predominância dos Argissolos e dos Neossolos, onde os Argissolos Vermelhos têm uma extensão de 5.675,59 km² o que corresponde a 10,05% dos solos do estado. E os Neossolos Quartzarênicos, com 1.780,92 km² (3,15%) dos solos da Paraíba (Francisco *et al.*, 2023).

Ainda de acordo com Francisco a região apresenta declividade plana a suave ondulada formados por várzeas e tabuleiros com solos originados de sedimentos argilosos da era terciária.

7.1.1 Análise dos solos

As análises dos solos possibilitaram a melhor adequação das classes de solos, atributos para utilização da; equação da perda de solo (RUSLE) índice de estabilidade (IES), compreensão dos processos erosivos. O estágio de desenvolvimento das plantas de cana-de-açúcar, limita sua cobertura na proteção dos impactos das gotas de chuva e assim sua capacidade de conservação do solo em períodos de alta erosividade (Felix; Cândido; Moraes, 2023). Principalmente nos períodos pós queima e corte.

7.1.2 Estabilidade estrutural dos Solo

A avaliação da estabilidade do solo é importante para avaliar a sua qualidade estrutural, o transporte de água e nutrientes e o potencial de erosão do solo (Mikha *et al.*, 2024). Ao quantificar a estabilidade de cada horizonte dos solos da área de estudo permitiu constatar os processos de degradação que toda a área se encontra com valores que indicam sua degradação. Os agregados do solo possuem função

estrutural com arranjo composto por aglomerados de minerais e material orgânico, cujas dimensões alternam entre macroscópica e microscópica.

No perfil BB1 apesar de ser um Argissolo apenas o horizonte Ap se encontra em alto risco de degradação os demais horizontes estão estruturalmente degradados com valores abaixo de 2,23. Tendo seus horizontes Bt próximo de 0.

O perfil BB2 todos os seus horizontes encontram na faixa de estruturalmente degradados podendo indicar a preferência e a susceptibilidade das erosões de maior porte se encontrarem nas proximidades dessa classe de solos.

O perfil BB3 tem situação similar ao BB1 apenas seu horizonte Ap encontrasse em alto risco de degradação os demais já estão estruturalmente degradados. O que o torna um pouco mais estável e sua posição no relevo ficando no terço inferior onde se deposita parte dos sedimentos erodidos do BB2.

Mesmo todos os solos sendo cultivado com cana de açúcar (*Saccharum officinarum*) que tem sua raiz fasciculada que tende a reter e agregar solo suas raízes não conseguem fornecer matéria orgânica para os perfis subseqüente ao horizonte Ap.

No assoreamento um dos fatores mais importantes é o controle da degradação do solo é sua estabilidade estrutural, definida como resistência contra influências externas, chuva, vazão e vento (Pavlu *et al.*, 2022). Um solo bem estruturado está menos susceptível a degradação, tornando assim mais resistente.

7.2 Profundidade das erosões

Uma das avaliações feita em campo foi a profundidade da erosão onde utilizamos uma fita com marcações em centímetro para avaliar a profundidade das erosões, assim avaliar em que estágio ela se encontra.

A cobertura contínua de vegetação pode minimizar a exposição do solo e proteger a superfície do solo, conservando a integridade dos macroagregados e consequentemente dos microagregados, dos impactos das gotas de chuva causadores de degradação, a susceptibilidade à ruptura pode aumentar o risco a erosão (Mikha *et al.*, 2024).

Na erosão da estrada foi possível medir, três pontos; no começo da erosão na parte inferior para a estrada com 80 cm de profundidade, da parte inferior da erosão para a base do solo no canavial com 145 cm e da estrada para o solo do canavial com 55 cm. Com isso é possível aferir que o processo de aterramento da erosão no ano de 2022 foi na verdade uma raspagem na linha da estrada, também indicada por

imagens do ano de 2022 onde a estrada estava no mesmo nível do solo do canavial. Esse processo torna a estrada um canal de escoamento, que também pode ser observado na **Figura 28** da rede de fluxo.

Segundo o Leite *et al.* (2021) as estradas rurais de terra representam 1,4 milhão de km, 77% da rede viária do Brasil, são vias que interligam; cidades, propriedades rurais ou localidades próximas, principal conexão entre áreas rurais e centros urbanos. Essas estradas podem representar uma importante fonte de erosão e de degradação ambiental no Brasil. gerando grande carga de sedimentos que se acumulam nas partes baixas do terreno como também podem ser depositadas em corpos hídricos.

Já na erosão do canavial sua maior profundidade foi de 107 cm e na medição da profundidade, já na medição manual do volume apresentou medidas com 114 cm em parte da erosão. Indicando que o fluxo de sedimentos na erosão contínua, formando canais de escoamento. Suas bordas ainda apresentaram medidas de 85 cm e 90 cm. Indicando que a mesma pode ser classificada como ravina.

7.3 Volumes das erosões

Os volumes erodidos avaliados neste trabalho possibilitou observar a dinâmica da perda de solo com volumes maiores de chuvas e irrigação a erosão tendeu a aumentar e com volumes mais baixos a receber sedimentos das partes superiores.

Na **Tabela 8**, coluna da diferença que representa a diferença de volume entre os voos anterior e o seguinte e possível observar um fluxo de sedimentos onde o resultado quando positivo indica um acúmulo de sedimentos e quando negativo perda de solo demonstrando um relação direta com a chuva, mas à partir do voo 6 (29/09/2023) foi observado em campo o uso de irrigação justificando assim o porquê de continuar uma oscilação de erosão e sedimentação em especial no voo 9 (15/11/2023) que com precipitação de 0,7 mm no período apresentou um perda de solo de aproximadamente 6,5m³. A utilização de ARP para medições repetidas apresenta uma oportunidade única para construir conjuntos de dados espaço-temporais que tenham o potencial de calibrar e verificar modelos de erosão em nível de campo (Puer *et al.*, 2020).

No voo 10 (07/12/2023) foi observado em campo um aterro parcial da erosão e confirmado pela mensuração do dia com uma entrada de 15,7 m³ de solo na área da erosão da estrada. O volume da erosão do canavial só foi mensurado nos voos 10 e 11 (**Tabela 9**) com o corte da cultura, é possível observar na **Figura 22** das letras A

até E uma depressão na copa da cultura em seus primeiros estágios, indicando que existe um desnível no solo, já nas ortofotos seguintes devido ao crescimento da cultura fica impossível sua visualização, não foram quantificados nestes períodos devido a presença da vegetação.

O uso das barras de escalas cartográfica combinada com dois planos de voo em alturas distintas foram fundamentais para aferir qualidade aos produtos do processamento, MDS e MDE. Usando da paralaxe das imagens obtidas a 30 e 50m do solo com as barras de medidas conhecidas foi feita uma correção nos produtos gerando maior precisão.

Segundo Meinen e Robinson (2021) mesmo com avanço da modelagem computacional as capacidades das estimativas de perda de solo nos modelos de erosão são muitas vezes fracas. Divergindo dos resultados encontrado no estudo onde ao comparar as medidas manuais com as que obtivemos nos MDE chegando a valores inferiores a 0,23% de variação.

7.3.1 Validação, volume manual x volumes obtidos no MDS

O uso de ARP vem sendo difundido em estudos de erosão desde gerar fatores para a RUSLE como nos trabalhos de Felix e Cândido; Moraes (2023) que gerou o fator C pelo drone quanto no de Meinen e Robinson (2021) que utilizaram como valor absoluto para testar a RUSLE e a WEPP qual apresenta melhor eficiência.

Ao confrontar as medições manuais com as obtidas de forma indireta pelo MDS no geral tivemos resultados satisfatórios, com desvios mínimos, inferiores a 0,23%. Exceto o resultado do voo 8, para o qual obteve-se uma variação de 8,9% entre o estimado e o medido manualmente, todos os outros resultados ficaram abaixo de 4% de diferença. Indicando que a metodologia aplicada ao experimento proporcionou excelentes resultados as medições.

Um dos grandes problemas das medições de erosão são as escalas das imagens obtidas por satélite que muitas vezes é maior que a escala dos processos erosivos naturais e humanos existentes na região (Meinen; Robinson, 2021). Tornando assim o uso do ARP mais eficiente e preciso com escalas centimétrica. A metodologia usada nos sobrevoos para obtenção das imagens para as medidas, pode ser considerada em alguns casos mais precisa que a medição manual. Onde os seus pixels ficaram com resolução média de 1,54cm nos eixos X e Y e na Z com 2,74cm, e como o processamento cria uma nuvem densa de pontos com mais de 70 milhões de

pontos e o modelo 3D com mais de 14 milhões de pontos baseadas na resolução das imagens do sobrevoo da área do estudo. E na medição manual foi utilizado uma malha de 25 cm o que se equipararia a um pixel de 25 cm.

Com os dados das análises foi possível observar os atributos do solo caracterizados como intemperizados de regiões subtropical e tropical úmida com cultivo intensivo e apresenta pH abaixo de 5 e matéria orgânica (MO) igual o inferior a 10 g/kg ou ($\leq 1\%$) (Jien; Wang, 2013). Classificar os solos, identificar os estágios de degradação em sua estabilidade estrutural e compreender os processos de movimentação do solo.

7.3.2 Perda de solo pela RUSLE

AS limitações da RUSLE é que não leva em conta a variação espacial e temporal dos fatores. Não existem estimativas precisas de erosão para um evento específico. A erosão causada por fluxos concentrados (voçorocas) e deposição não são avaliadas. Faltam informações sobre tamanho, densidade, área superficial e outras propriedades necessárias para estimar o potencial de deposição, adsorção e transporte de sedimentos degradados do solo. Apesar das limitações, a RUSLE é considerada uma excelente ferramenta para prever a perda por erosão superficial (Back, 2023).

Com a popularização das Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) e de automação na fotogrametria com aplicativos gratuitos conseguiremos um avanço nas tecnologias de sensoriamento remoto para medir a movimentação do solo (Meinen; Robinson, 2021).

A equação foi desenvolvida por Wischmeier & Smith (1978) e adaptada às condições do Estado de São Paulo por Bertoni & Lombardi Netto (1990). O uso da equação universal de perda de solo revisada não quantifica processos mais avançados de erosão, sendo assim adequado para o experimento apenas como comparativo tendo em vista alguns fatores limitantes da RUSLE, como o comprimento total da rampa que ultrapassa os 180m recomendados pela fórmula, tem elevada margem de erro. A não quantificação dos sedimentos, extrapolação de valores para adequar a fórmula e por se tratar de uma fórmula multivariável qualquer alteração mínima como citado em alterar o valor de (C) (K) e (P) o resultado fica completamente diferente indo de 7,7 ton/ha/ano para 236,732 ton/ha/ano.

Usando os dados das **Tabelas 8 e 9** é possível observar a dinâmica de sedimentos nas áreas das erosões. Por ser no terço médio da rampa recebendo material do terço superior e perdendo para o terço inferior e logo para a barragem.

Outro fator frágil no uso é a pluviosidade utilizada para quantificar o fator erosividade já que além da precipitação deve ser acrescido a laminar de irrigação aplica, valor esse não fornecido, mas que alteraria consideravelmente os dados, valores esses que também mostraram a fragilidade ao compara com os quantificados nas erosões através do aerolevante tabela 4 e 5, com o calculado para área confirmado o citado por Demarchi; Piroli; Zimback (2019).

Os fatores C e P da RUSLE podem ser mudados por práticas conservacionistas na agricultura conseguindo assim maior resistência a erosão hídrica para isso é uma prática para esse controle bastante difundido é o terraceamento, (Galdino *et al.*, 2017). Na área de estudo na **Figura 24** é possível identificar o rompimento de um dos terraços no terço superior que levou ao acúmulo de água e sedimento no terraço seguinte o fazendo romper para a estrada. Esse provavelmente foi a causa do início da erosão observada no dia 11/07/2022 conforme **Figura 20**.

Utilizamos a RUSLE para estimar a taxa de perda de solo por erosão laminar a montante do reservatório (**Tabela 12**) é possível observar que as áreas de estradas por estar descobertas têm valores bem elevados mesmo com 2,6ha ficando próximo ao obtidos no canavial, e nas áreas do canavial o valor pode estar subestimado já que parte do ano tem queimadas e colheita, eliminado parte dos nutrientes e matéria orgânica do solo e a própria cobertura vegetal.

A extração de parâmetros de solo através de ARP tem sido dada pouca relevância, principalmente para a RUSLE onde o Fator prática de cultura (C) pode sua utilização de forma eficiente nas estimativas de cobertura e manejo do solo para modelagem de erosão (Felix; Cândido; Moraes, 2023). Com também declividade e comprimento da encosta (LS).

A tolerância de perdas de solo devido à erosão pode ser aplicada juntamente com a Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE). Qualquer seleção de técnicas agrícolas, analisada por meio da RUSLE, precisa garantir que as perdas de solo sejam mantidas abaixo do limite aceitável, de modo a controlar eficazmente o processo de erosão (Oliveira. *et al.*, 2008). Assim é possível observar que as perdas na região estão acima do tolerável.

7.4 Rede de drenagem

Ao caracterizar a rede de drenagem da área de estudo permitiu identificar e compreender o que está levando ao aumento dos processos erosivos em determinados trechos do relevo e que tentativas de desvio de fluxo não foram tão eficientes, já que o fluxo hídrico volta para a estrada. Com a rede de drenagem permite identificar as áreas que estão ocorrendo as erosões laminar, em sulco.

O escoamento da água da chuva proporciona intenso processo erosão hídrica com a movimentação do solo podendo formar voçorocas, com prejuízos direto aos proprietários rurais e, indiretamente, à toda sociedade. (Leite *et al.*, 2021) Na portaria Nº 83, de 13 de setembro de 2022 Levantamento de Informações, pela Fiscalização, para a Caracterização do Dano Ambiental, os processos erosivos podem alterar o carreamento de sólidos na superfície, sua fertilidade, quantidade de biomassa e matéria orgânica no solo e nos valores ambientais e econômicos do solo.

7.5 Pluviosidade

A quantificação das chuvas permitiu fazer um comparativo dos volumes erodidos e sedimentado de solo com os volumes das chuvas nos períodos iniciais, observado até o voo 8 uma oscilação com ganho e perda de solo. perdendo um pouco a relação a partir do momento que iniciou a irrigação da área, com 1496,3mm no ano acima da média histórica de 1.266 mm (Francisco; Santos, 2017).

Eventos de chuvas intensas em área de contribuição, os sedimentos podem ser depositados nas áreas de depressão, apresentando assim o declínio na capacidade de armazenamento de água, essas chuvas têm maior capacidade de danificar as microondulações e por consequência o relevo nas encostas cultivadas. (Zhao *et al.*, 2023).

Com a contabilidade adequada da água e a aplicação de regulamentações mais estritas de captação, a adoção de sistemas de irrigação altamente eficientes poderia reduzir o consumo ineficiente no âmbito das bacias fluviais em mais de 70%, mantendo o nível atual de produtividade das culturas e permitindo a realocação de água para outros usos, incluindo a restauração ambiental (UNESCO, 2021).

7.6 Monetização da perda de solo

Ao dar valores monetários as perdas de solo conseguimos facilitar o entendimento do prejuízo que a falta de um manejo adequado da produção pode

causar, não apenas no proprietário como no caso também na população que utilizam dos recursos hídricos atingidos pela erosão.

A Lei nº 9.605/1998, que trata das condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, em seu artigo 19 “A perícia de constatação do dano ambiental, sempre que possível, fixará o montante do prejuízo causado para efeitos de prestação de fiança e cálculo de multa.” E em seu artigo 20 “fixará o valor mínimo para reparação dos danos causados pela infração, considerando os prejuízos sofridos pelo ofendido ou pelo meio ambiente.” Assim com a melhor precisão da mensuração dos danos podemos aplicar a valoração de forma mais assertivas.

Conseguindo ter uma boa precisão das escalas dos mapas, onde forma gerados MDSs com alta qualidade espacial permitiu que as mensurações de área e volume tivesse uma precisão com margem de diferença inferior a 0,5% torna o quantificável pelo método aceitável. Sendo assim foi possível quantificar com exatidão os volumes de solo perdidos nas duas erosões.

Como os volumes e a caracterização dos solos da região foi possível atribuir escala de grandeza ao dano no solo. Usando os valores da SINAPI de janeiro de 2024 para dois materiais que mais se assemelham ao perdido ficamos com valores entre R\$ 9.504,12 e R\$ 23.730,54. Ressaltamos que esses valores não contemplam o transporte do material e nem atribui valor aos serviços ecossistêmicos que o solo tem, até mesmo a perda do volume hídrico do reservatório.

Na nota técnica MPMS (2018), utiliza critérios para pontuar os danos ao meio ambiente pontuando em entre 1, 2 e 3 aos níveis de dano aos recursos naturais, no que se refere a água temos alguns pontos relacionados ao solo: comprometimento do aquífero podendo ser pontuado em 3 comprovado, 2 fortes indícios e 2 suposto. E em dano ao solo e/ou subsolo, decorrente do dano à água; comprovado 2 pontos suposto 1. O questionário de Solo e Subsolo pontua nos seguintes aspectos: comprometimento do aquífero, decorrente do dano ao solo/subsolo; assoreamento de corpos hídricos; alteração na capacidade de uso da terra; Alteração na vazão/volume de água, os valores tanto para solo quanto para água são multiplicados por 1,5.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados e discussões apresentadas, conclui-se que o uso de ARP associado a medidas de campo e a programas de geoprocessamento possui grande potencial na Ciência do Solo como ferramenta precisa na identificação e monitoramento de solo e de eventos extremos. Tal ferramenta permitiu a compreensão dos processos que envolve os eventos erosivos, possibilitou avaliar de forma monetária os danos da degradação do solo em uma escala de precisão.

Os Modelos Digitais de Superfície (MDS) oferecem informações importantes para análise da declividade do terreno e redes de drenagem, e uso de fotografias georreferenciadas que podem melhor auxiliar na locação dos terraços, e diminuir o comprimento das rampas. Com a modelagem em 3D podemos levar valores mais precisos aos volumes erodidos e assim auxiliando na tomada de decisão de intervenções ou até desenvolvimento de novos modelos de equação de perda de solo, modelos de plantio em encosta melhora no uso de curvas de nível buscando redução significativa as suas perdas.

Por fim a valoração das perdas de solo tornam mais precisas mesmo com uso de equipamentos de baixo custo e técnicas simples de levantamento se mostrou uma alternativa viável no monitoramento do solo, tornado a técnica replicável com excelente nível de confiabilidade possibilitando também valores mais precisos na monetarização do dano ao solo.

8.1 Sugestões

A fim de melhor o refinar do uso de ARP tanto para quantificar as perdas de solo como gerar fatores de refinamento das equações de perda de solo, sugerimos a utilização das metodologias de medição em campo e uso de GCPs como barras de escala. A fim de gerar série de informações podendo desenvolver modelos de predição de perda de solo com base no ARP.

Testar outros ARP em alturas distintas para observar se há variação de resultado no mapeamento de erosões, a fim de identificar melhor altura e taxa de sobreposição na obtenção de dados.

REFERÊNCIAS

- AESA (Agência Executiva de Gestão das Águas). **Meteorologia – chuvas**. Paraíba: Agência Executiva de Gestão das Águas, 2024. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/>. Acesso em: 05 de janeiro. 2024.
- ANDERS, N. *et al.* Impact of flight altitude and cover orientation on Digital Surface Model (DSM) accuracy for flood damage assessment in Murcia (Spain) using a fixed-wing UAV. **Earth Science Informatics**, v. 13, p. 391–404, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12145-019-00427-7>.
- BACK, Á. J. **Estimativas de perdas de solo por erosão hídrica por meio da Equação Universal de Perdas de Solo**. Florianópolis: Epagri, 2023. 80 p.
- BAILLIE, I. C. *et al.* Stoichiometry of cationic nutrients in Phaeozems derived from skarn and Acrisols from other parent materials in lowland forests of Thailand. **Geoderma Regional**, v. 12, p. 1-9, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.11.002>.
- BARAN, A. *et al.* Content of nutrients, trace elements, and ecotoxicity of sediment cores from Roznów reservoir (Southern Poland). **Environmental Geochemistry and Health**, v. 41, p. 2929–2948, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00363-x>.
- BELIKOV, V. V. *et al.* Use of accumulation basins to reduce silting of reservoirs of hydroelectric power plants located on mountain rivers. **Power Technology and Engineering**, v. 53, n. 4, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10749-019-01095-9>.
- BEZAK, N. *et al.*, Towards multi-model soil erosion modelling: An evaluation of the erosion potential method (EPM) for global soil erosion assessments. **Catena**, v. 234, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107596>.
- BORRELLI, P. *et al.* Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). **Pnas**, v. 117, n. 36, p. 21995-22001, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117>.
- BOUFELDJA, S. *et al.* Identification of zones at risk of erosion by the combination of a digital model and the method of multi-criteria analysis in the arid regions: case of the bechar wadi watershed. **Applied Water Science**, v. 10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01191-6>.
- BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA). Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis>. Acesso em: 25 out. 2023.
- CDBD. **Apresentação das Barragens**. Brasil: Comitê Brasileiro de Barragens, 2010. Disponível em: <http://cbdb.org.br/apresentacao-das-barragens>. Acesso em: 10 jan. 2024.

COUTINHO, L. M. *et al.* Cálculo do fator LS da Equação Universal de Perdas de Solos (EUPS) para a bacia do Rio da Prata, Castelo-ES. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 8, n. 1, p. 01-09, janeiro-abril, 2014. DOI: .

DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L.; ZIMBACK, C. R. L. Estimativa de perda de solos por erosão laminar e linear na bacia hidrográfica do Ribeirão das Perobas (SP), nos anos 1962 e 2011. **Ra'e Ga**, v. 46, p. 110 -131, 2019. DOI: 10.5380/raega.

DONG, L. *et al.* Comparison and quantitative assessment of two regional soil erosion survey approaches. **International Soil and Water Conservation Research**, v.11, n. 4, p.660-668, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.04.004>.

DUAN, L. *et al.* Land use conversion and lithology impacts soil aggregate stability in subtropical China. **Geoderma**, v. 389, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114953>.

FAO. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture: Systems at breaking point**. Rome: Synthesis report, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb7654en>.

FELIX, F. C.; CÂNDIDO, B. M.; MORAES, J. F. L. Improving RUSLE predictions through UAV-based soil cover management factor (C) assessments: A novel approach for enhanced erosion analysis in sugarcane fields. **Journal of Hydrology**, v. 626, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130229>.

FIGUEIREDO, E. O.; FIGUEIREDO, S. M. M. **Planos de voo semiautônomos para fotogrametria com aeronaves remotamente pilotadas de classe 3**. Rio Branco: Embrapa, 2018. 56 p.

FRANCISCO, P. R. M; SANTOS, D. **Climatologia do Estado da Paraíba**. 1 ed., Campina Grande: EDUFCEG, 2017. 75 p.

_____. *et al.* Atualização do mapa de solos do Estado da Paraíba utilizando geotecnologias. **Revista Geama**, v. 9, n. 2, p. 20–28, 2023.

GALDINO, S. *et al.* Mapeamento da contribuição de terraços agrícolas na redução da erosão do solo em sub-bacias do noroeste do Estado de São Paulo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2017. 27 p.

GARCÍA-ALÉN, G. *et al.* Analysis of two sources of variability of basin outflow hydrographs computed with the 2D shallow water model Iber: Digital Terrain Model and unstructured mesh size. **Journal of Hydrology**, v. 612, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128182>.

GUERRA, C. A. *et al.* Global vulnerability of soil ecosystems to erosion. **Landscape Ecology**, v. 35, p. 823–842, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-020-00984-z>.

HAN, Y. *et al.* Water and wind erosion response to ecological restoration measures in China's drylands. **Geoderma**, v. 435, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116514>.

IBAMA. Portaria nº 83, de 13 de setembro de 2022. Institui Procedimento Operacional Padrão (POP) para o levantamento de informações, pela fiscalização, para caracterização do dano ambiental em áreas alteradas ou degradadas por processos de supressão de vegetação nativa sem prévia licença/autorização ou em desacordo com licença/autorização válida. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 186 ed., p. 36, 22 setembro 2022.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Manuais técnicos em geociências**: Manual técnico de pedologia. 3 ed. Rio de Janeiro: IBGE, n. 4, 2015. p. 430.

_____. **Geociências**. Brasil, 2021 Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 05 de jun. 2022.

ISRIC. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Information, 2024. Disponível em: <https://www.isric.org/explore/wrb>. Acesso em 02 fev. 2024.

IUSS. International Union of Soil Sciences. **World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps**. 4 ed., Vienna: Working Group WRB, 2022.

JIEN, S. H.; WANG, C. S. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. **Catena**, v. 110, p. 225-233, 2013 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.06.021>.

JULIAN, C.; NUNES, J. O. R. Uso de VANT e geoprocessamento para cálculo de solo erodido em voçoroca localizada no distrito de Amadeu Amaral. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 4, 2020. DOI: <http://doi.org/10.20502/rgb.v21i4.1818>.

KOU, P. *et al.* Multi-temporal UAV data for assessing rapid rill erosion in typical gully heads on the largest tableland of the Loess Plateau, China. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 79, p. 1861–1877, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01631-x>.

LUND, A. *et al.* Tracing the inclusion of health as a component of the food-energy-water nexus in dam management in the Senegal River Basin. **Environmental Science & Policy**, v. 133, p. 74-86, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.005>.

LEITE, A. F. G. *et al.* **Estradas Rurais**: orientações para construção, adequação e manutenção. 1 ed. Brasília: MAPA (Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento), 2021. 42 p.

MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* **Climate Change and Land**: An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Genebra: IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2020. 36 p.

MEINEN, B. U.; ROBINSON, D. T. Agricultural erosion modelling: Evaluating USLE and WEPP field-scale erosion estimates using UAV time-series data. **Environmental Modelling & Software**, v. 137, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.104962>.

MIGUEL, P. *et al.* Mapeamento da erodibilidade e erosão potencial do solo em uma bacia hidrográfica de encosta. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 26, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220190235>.

MIKHA, M. M. *et al.* Land management affects soil structural stability: Multi-index principal component analyses of treatment interactions. **Soil and Tillage Research**, v.235, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105890>.

MPMS (Ministério Público do Estado de Mato Grosso do Sul). **Nota técnica:** orientações para valoração de dano ambiental em procedimentos do Ministério Público de Mato Grosso do Sul. Mato Grosso do Sul, março 2018, 74 p.

OECD. Programme of Work to Develop a Consensus Solution to the Tax Challenges Arising from the Digitalisation of the Economy: Inclusive Framework on BEPS. Paris: OECD/G20, 2019. 40 p.

OLIVEIRA, F. P. *et al.* Tolerância de perda de solo por erosão para o Estado da Paraíba. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 8, n. 2, p. 60-71, 2008.

ONU. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. 2019. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 15 novembro 2023.

PAVLU, L. *et al.* Estimation of the stability of topsoil aggregates in areas affected by water erosion using selected soil and terrain properties. **Soil and Tillage Research**, v. 219, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105348>.

PEARSON, C. J.; NORMAN, D. W.; DIXON, J. **Sustainable dryland cropping in relation to soil productivity**. Rome: FAO. n. 72, 1995. 157 p.

PES, L. Z.; GIACOMINI, D. A. **Conservação do solo**. Universidade Federal de Santa Maria: Rede e-Tec Brasil, 2017. 69 p.

PLUER, E. G. M. *et al.* Pairing soil sampling with very-high resolution UAV imagery: An examination of drivers of soil and nutrient movement and agricultural productivity in southern Ontario. **Geoderma**, v. 379, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114630>.

QI, J. *et al.* Soil structural stability following decades of straw incorporation and use of ryegrass cover crops. **Geoderma**, v. 406, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115463>.

QIAO, X. *et al.* Assessing current and future soil erosion under changing land use based on InVEST and FLUS models in the Yihe River Basin, North China.

International Soil and Water Conservation Research, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.07.001>.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 5. ed., 2018. 356 p.

SANTOS, R. D. *et al.* **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7 ed., Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015. 101 p.

SCHAEFER, M. *et al.* Low-cost UAV surveys of hurricane damage in Dominica: automated processing with co-registration of pre-hurricane imagery for change analysis. **Natural Hazards**, v. 101, p. 755–784, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03893-1>.

SIMÕES, V. J. L. P. *et al.* Indicadores de sustentabilidade com base na qualidade do solo e acúmulo de fitomassa em pastagens degradadas. **Agrarian Academy**, v. 5, n. 9, p. 253-274, 2018. DOI:10.18677/Agrarian_Academy_2018a26.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos e análise de solos**. 3 ed. Brasília: Embrapa, 2017. 573 p.

TOMAZ, P. **Curso de Manejo de Águas Pluviais: - RUSLE- Equação revisada universal de perda de solo** *In*: TOMAZ, P. Curso de Manejo de Águas Pluviais. São Paulo, Guarulhos. 2013. Cap.23. 18 p.

UNESCO. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2021: O valor da água**. Colombella: UNESCO, 2021. 11 p.

WELTZ, M. *et al.* A strategic plan for future USDA Agricultural Research Service erosion research and model development. **Journal of Soil and Water Conservation**. v. 75, n. 6, 2020. DOI: <https://doi.org/10.2489/jswc.2020.0805A>.

WEN, B. *et al.* Spatiotemporal dynamics and driving factors of soil erosion in the Beiluo River Basin, Loess Plateau, China. **Ecological Indicators**, v. 155, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110976>.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington: Agriculture Handbook, n. 537, 1978. 58 p.

YIN, C.; ZHAO, W.; PEREIR, P. Soil conservation service underpins sustainable development goals. **Global Ecology and Conservation**, v. 33, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01974>.

ZARRINABADI, E. *et al.* Agricultural activities lead to sediment infilling of wetlandscapes in the Canadian Prairies: Assessment of contributions by tillage, water and wind erosion. **Geoderma**, v. 438, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116621>.

ZHAO, X. *et al.* Effect of microrelief features of tillage methods under different rainfall intensities on runoff and soil erosion in slopes. **International Soil and Water Conservation Research**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.10.001>.

ZIROU, Y. *et al.* Potentially toxic elements contamination, risk and source analysis in sediments of Beiyun River supplied with reclaimed water, China. **Ecological Indicators**, v. 154, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110622>.