

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

MAURICIO ZOLET DA SILVA

**PERDAS DE SOLO POR EROSÃO HÍDRICA EM LAVOURAS ANUAIS POR MEIO DE
MODELOS HIDROLÓGICOS DISTRIBUIDOS**

DISSERTAÇÃO

PATO BRANCO – PR
2024

MAURICIO ZOLET DA SILVA

**PERDAS DE SOLO POR EROSÃO HÍDRICA EM LAVOURAS ANUAIS POR MEIO DE
MODELOS HIDROLÓGICOS DISTRIBUIDOS**

Soil losses due to water erosion in crop annually using distributed hydrological models

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de
Concentração: Ciências do solo, no Programa de
Pós-Graduação em Agronomia da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo da Rocha Campos

Co-Orientador: Profa. Dra. Rachel Muylaert Locks
Guimarães

PATO BRANCO - PR

2024



4.0 Internacional

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Pato Branco



MAURICIO ZOLET DA SILVA

**PERDAS DE SOLO POR EROSÃO HÍDRICA EM LAVOURAS ANUAIS POR MEIO DE MODELOS
HIDROLÓGICOS DISTRIBUIDOS**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como
requisito para obtenção do título de Mestre Em Agronomia
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Solos E Sistemas Integrados De
Produção Agropecuária.

Data de aprovação: 27 de Março de 2024

Dr. Jose Ricardo Da Rocha Campos, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Andre Felipe Barion Alves Andrean, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Barbara Pereira Christofaro Silva, Doutorado - Universidade Estadual Paulista - Unesp

Dra. Danielli Batistella, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Regis Luis Missio, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 10/04/2024.

Dedico esse trabalho à toda comunidade,
visando contribuir com o avanço nas
pesquisas vinculadas a este tema.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a minha família, em especial meu pai, Ilso José da Silva (*in memorian*), e minha mãe Roseli de Fátima Zolet, por terem sido minha base, ensinando-me valores e princípios, os quais levarei por toda minha vida. Da mesma forma, agradeço meus avôs, Alcides Pedro Zolet e Salet Maria Denardi Zolet, por todo o apoio e cuidado comigo. A vocês sou eternamente grato.

Agradeço ao orientador Prof. Dr. José Ricardo da Rocha Campos e coorientadora Profa. Dra. Rachel Muylaert Locks Guimarães pela oportunidade, dedicação, paciência e todo o conhecimento transmitido nesta jornada acadêmica. Muito obrigado.

À Dra. Danielli Batistella por todo ensinamento, atenção e ajuda nos processamentos das imagens aéreas com Drone e uso dos demais softwares, os quais foram de extrema importância para realização deste trabalho, e ao Eng. Amb. Jeverson Longaretti pela disponibilidade na aquisição dos dados em campo com Drone e GNSS RTK, bem como toda a experiência compartilhada sobre este procedimento.

À todos os meus colegas do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGAG), Igor, Vacilania, Esmailson, Jaqueline, e demais colegas, pelos bons momentos, conversas, auxílios e companheirismo durante essa etapa.

À todos os professores do PPGAG, com os quais tive a oportunidade de aprimorar meus conhecimentos, pelas conversas sempre produtivas, e pela transferência de experiências do mundo acadêmico.

Meus sinceros agradecimentos a todos que participaram direto ou indiretamente na realização deste trabalho, bem como meus amigos e minha namorada pela paciência e apoio nesta caminhada.

A coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, campus Pato Branco, (PPPAG-PB) e a Secretaria de Pós-Graduação Stricto Sensu – DIRPPG, pela atenção e cuidado com seus pós-graduandos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná (FA) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Os processos erosivos ocasionados pelo uso intensivo do solo e práticas agrícolas inadequadas no Estado do Paraná resultou em grandes prejuízos a partir da década de 70. Desde então, práticas agrícolas como o Sistema de Plantio Direto e a implementação de terraços foram medidas importantes no controle da erosão no estado. Porém, a partir dos anos 2000 os processos erosivos se intensificaram novamente com a retirada dos terraços por grande parte dos produtores, principalmente na região sudoeste paranaense, onde o predomínio do relevo ondulado e o forte potencial erosivo das chuvas, reacenderam o alerta em relação ao aumento das perdas de solo. Neste sentido, torna-se importante quantificar, estimar e simular os processos erosivos nestes ambientes, a fim de manejá-lo de forma adequada e garantir uma produção agrícola sustentável. Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar as perdas do solo por erosão hídrica utilizando Drone, GRASS GIS e coletores portáteis instalados no solo. Foram avaliadas as perdas de solo sob condições naturais em dois cultivos anuais separadamente, feijão e aveia branca, cultivados sucessivamente. O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado com quatro tratamentos na cultura do feijão e cinco tratamentos na cultura da aveia branca, ambos com três repetições. Os tratamentos na cultura do feijão foram compostos por T1 = solo descoberto, T2 = baixa cobertura do solo, T3 = cobertura intermediária do solo e T4 = máxima cobertura do solo, e os tratamentos da aveia branca foram compostos pelos T1 = solo descoberto, T2 = baixa cobertura do solo, T3 = cobertura intermediária do solo, T4 = alta cobertura do solo e T5 = máxima cobertura do solo. As coletas de perdas de solo por erosão hídrica foram realizadas de 27/02/2023 a 10/08/2023 após cada evento chuvoso por meio de calhas confeccionadas com aço galvanizado instalados sobre a superfície do solo e direcionadas para um recipiente. O solo coletado nos recipientes em cada evento chuvoso foi filtrado e seco em estufa a 45°C por 5 dias. Com o drone, foram obtidas imagens aéreas no local de estudo para construção do Modelo Digital de Terreno (MDT), o qual foi utilizado para elaborar os mapas de Fluxo Acumulado por meio do complemento GRASS no software QGIS. Ao final de todas as coletas, foram avaliadas as seguintes variáveis respostas: gramas de solo (g); gramas de solo por milímetro de chuva (g mm^{-1}); gramas de solo por intensidade pluviométrica ($\text{g mm}^{-1} \text{h}^{-1}$); e gramas de solo por metro quadrado (g m^{-2}). As perdas totais de solo foram determinadas utilizando o mapa de Fluxo Acumulado para identificar a área de contribuição nos pontos de coleta de solo e posteriormente transformado para Quilogramas por hectare (Kg ha^{-1}). Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que a elevada resolução espacial dos MDTs obtidos com o Drone interferem diretamente nos resultados dos modelos hidrológicos construídos e as perdas de solo em ambas as culturas tenderam a ser influenciadas pelo índice de cobertura vegetal e pluviométrico e permite concluir que os coletores portáteis utilizados, associados ao uso do Drone e GRASS GIS, são eficientes para avaliações das perdas de solo por erosão hídrica em lavouras anuais sob condições naturais.

Palavras-chave: VANT; Modelo hidrológico; Sensoriamento Remoto; Conservação do Solo.

ABSTRACT

Erosive processes caused by intensive soil use and inadequate agricultural practices in the State of Paraná resulted in major losses from the 1970s onwards. Since then, agricultural practices such as the Direct Planting System and the implementation of terraces have been important measures in controlling soil erosion in the state. However, from the 2000s onwards, erosion processes intensified again with the removal of terraces by many producers, mainly in the southwest region of Paraná, where the predominance of undulating relief and the strong erosive potential of rains, rekindled the warning regarding the increased soil losses. In this sense, it is important to quantify, estimate and simulate erosion processes in these environments, to manage them appropriately and guarantee sustainable agricultural production. Therefore, this work aimed to evaluate soil losses due to water erosion using Drone, GRASS GIS and portable collectors installed in the soil. Soil losses under natural conditions were evaluated in two annual crops separately, beans and white oats, cultivated successively. The design used was completely randomized with four treatments in the bean crop and five treatments in the white oat crop, both with three replications. The bean crop treatments were composed of T1 = bare soil, T2 = low soil coverage, T3 = intermediate soil coverage and T4 = maximum soil coverage, and the white oat treatments were composed of T1 = bare soil, T2 = low soil coverage, T3 = intermediate soil coverage, T4 = high soil coverage and T5 = maximum soil coverage. Soil losses due to water erosion were collected from 02/27/2023 to 08/10/2023 after each rainy event using gutters made of galvanized steel installed on the soil surface and directed towards a container. The soil collected in the containers in each rainy event was filtered and dried in an oven at 45°C for 5 days. With the drone, aerial images were obtained at the study site to build the Digital Terrain Model (MDT), which was used to prepare the Accumulated Flow maps using the GRASS complement in the QGIS software. At the end of all collections, the following response variables were evaluated: grams of soil (g); grams of soil per millimeter of rain (g mm^{-1}); grams of soil per rainfall intensity ($\text{g mm}^{-1} \text{h}^{-1}$); and grams of soil per square meter (g m^{-2}). Total soil losses were determined using the Accumulated Flow map to identify the contribution area at the soil collection points and subsequently transformed into Kilograms per hectare (Kg ha^{-1}). The results obtained in this work demonstrate that the high spatial resolution of the MDTs obtained with the Drone directly interfere with the results of the hydrological models constructed and soil losses in both crops tended to be influenced by the vegetation and rainfall coverage index and allows us to conclude that the portable collectors used, associated with the use of Drone and GRASS GIS, are efficient for assessing soil losses due to water erosion in annual crops under natural conditions.

Keywords: UAV; Hydrological model; Remote sensing; Soil conservation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Codificação da direção do fluxo no (a) ArcGIS e (b,c) GRASS GIS	38
Figura 2 - Raster de saída com as direções de fluxo e fluxo acumulado por r.watershed.....	39
Figura 3 - Localização do Município de Pato Branco-PR.....	41
Figura 4 - (a) Drone modelo DJI Air 2 S e (b) GNSS RTK modelo HI-TARGET V90 PLUS. Pato Branco-PR, 25/03/2023.....	42
Figura 5 - Ponto de controle (a) confeccionado com EVU e (b) desenhado com cal sobre o solo. Pato Branco-PR, 25/03/2023.....	43
Figura 6 - Dimensões do coletor: (a) Comprimento; (b) Profundidade; (c) Borda superior; e (d) Borda inferior. Pato Branco-PR, 25/05/2023.....	46
Figura 7 - Dimensões dos recipientes de coleta: (a) Altura e (b) diâmetro do recipiente. Pato Branco-PR, 10/07/2023.....	47
Figura 8 - Posição dos coletores no local de estudo. Pato Branco-PR, 2023	48
Figura 9 - Sistema de coleta e armazenamento de sedimento instalado no campo com seu, respectivo, pluviômetro. Pato Branco-PR, 27/02/2023.....	49
Figura 10 - (a) Recipientes contendo solo e água após evento chuvoso e (b) filtragem do material coletado. Pato Branco-PR, 23/03/2023	50
Figura 11 - Modelo Digital de Terreno construído por meio de curvas de níveis (MDT_{ET}) obtidas com estação total e Mapa do Fluxo Acumulado gerado a partir do MDT_{ET} no software GRASS GIS. Pato Branco-PR, 2023.....	54
Figura 12 - Modelo Digital de Terreno construído no software OpenDroneMaps (MDT_{ODM}) por meio de imagens aéreas realizadas com drone e Mapa do Fluxo Acumulado gerado a partir do MDT_{ODM} no software GRASS GIS. Pato Branco-PR, 2023.....	55
Figura 13 - Modelo Digital de Terreno construído no software CloudCompare (MDT_{CC}) por meio de imagens aéreas realizadas com drone e Mapa do Fluxo Acumulado gerado a partir do MDT_{CC} no software GRASS GIS. Pato Branco-PR, 2023.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de médias das variáveis gramas de solo (g), gramas de solo por pluviosidade (g mm^{-1}) e gramas de solo por intensidade pluviométrica ($\text{g mm}^{-1} \text{h}^{-1}$) na cultura do feijão. Pato Branco-PR, 2023.....	59
Tabela 2 - Precipitação acumulada e intensidade pluviométrica na cultura do feijão. Pato Branco-PR, 2023	60
Tabela 3 - Comparação de médias da variável gramas de solo por metro quadrado (g.m^{-2}) obtidas por meio de MDT_{ET} , MDT_{ODM} e MDT_{CC} na cultura do feijão. Pato Branco-PR, 2023.....	62
Tabela 4 - Perdas totais de solo durante o ciclo do feijão utilizando o número de células obtido por meio do MDT_{ET} , MDT_{ODM} e MDT_{CC} . Pato Branco-PR, 2023	63
Tabela 5 - Comparação de médias das variáveis gramas de solo (g), gramas de solo por pluviosidade (g.mm^{-1}) e gramas de solo por intensidade pluviométrica ($\text{g.mm}^{-1}.\text{h}^{-1}$) na cultura da aveia. Pato Branco-PR, 2023.....	64
Tabela 6 - Precipitação acumulada e intensidade pluviométrica na cultura da aveia branca. Pato Branco-PR, 2023.....	65
Tabela 7 - Tabela 7 – Comparação de médias das variáveis gramas de solo por metro quadrado (g.m^{-2}) obtidas por meio de MDT_{ET} , MDT_{ODM} e MDT_{CC} na cultura da aveia branca. Pato Branco-PR, 2023.....	67
Tabela 8 - Perdas totais de solo durante o ciclo da aveia branca utilizando o número de células obtido por meio do MDT_{ET} , MDT_{ODM} e MDT_{CC} . Pato Branco-PR, 2023.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
CO ₂	Dióxido de carbono
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DMC	Diâmetro médio dos cristais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Fe	Ferro
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro ou óxido férrico
GIS	Geographic Information System
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRASS	Geographical Resources Analysis Support System
ha	Hectare
IAF	Índice de Área Foliar
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MDT _{CC}	MDT Cloud Compare
MDT _{ET}	MDT Estação Total
MDT _{ODM}	MDT Open Drone Map
MOS	Matéria orgânica do solo
OH	Hidroxila
PR	Paraná
RPA	Remotely-Piloted Aircraft
RTK	Real Time kinematic
Si	Silício
SIMEPAR	Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
Ti	Titânio
TiO ₂	Dióxido de titânio
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
Zr	Zircônio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Objetivos.....	15
1.1.1. Objetivo Geral.....	15
1.1.2. Objetivos Específicos	15
2. REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1. Solos de Basalto do Sudoeste Paranaense.....	16
2.2. Processos Erosivos em Solos do Paraná.....	21
2.3. Levantamento Planialtimétrico com Drone e Cartografia Digital.....	27
2.4. Modelagem Hidrológica a partir de MDT.....	34
3. METODOLOGIA.....	41
3.1. Área de estudo	41
3.2. Equipamentos e Softwares	42
3.3. Aquisição de dados geoespaciais.....	43
3.4. Processamento das imagens aéreas e Qualidade Cartográfica	43
3.5. Geração do Modelo Digital de Terreno e dos Modelos Hidrológicos Distribuídos	44
3.6. Coleta de solo por processos erosivos	45
3.7. Dados Meteorológicos.....	50
3.8. Análise Estatística	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1. Geração de MDT e Modelos Hidrológicos Distribuídos com imagens Geradas por Drones.....	53
4.2. Perdas de solo por processos erosivos	59
4.2.1. Perdas de solo por processos erosivos em lavoura de feijão	59

4.2.2. Perdas de solo por processos erosivos em lavoura de aveia branca.....	64
5. CONCLUSÕES.....	70
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

1. INTRODUÇÃO

Os solos da região Sudoeste do Paraná são formados a partir do intemperismo de rochas basálticas, pertencentes a Formação Serra Geral (HARTMANN, 2014; OLIVEIRA; GUTIERREZ; NONOSE, 2023). O Basalto é constituído, principalmente, por minerais como anfibólios, piroxênios, olivinas e plagioclásios que, ao sofrerem intemperismo, dão origem a solos com elevados teores de argilas e óxidos de ferro (SCHIAVON; REDONDO; YOSHIDA, 2007; OLIVEIRA; GUTIERREZ; NONOSE, 2023). Na região Sudoeste do Paraná predominam os Latossolos e os Nitossolos que, na camada superficial, apresentam estrutura forte, muito pequena e do tipo granular, o que faz com estes solos sejam altamente susceptíveis a erosão hídrica (LEPSCH, 2021).

Devido a elevada capacidade produtiva dos seus solos, a agricultura na região possui papel importante na economia estadual e nacional (BERTOL et al., 2019). Por outro lado, a partir da década de 70 houve um aumento considerável na erosão do solo no Paraná, devido ao passivo ambiental do desmatamento e intensa agricultura. O manejo inadequado do solo foi um dos responsáveis pela sua rápida degradação, fazendo-se necessárias políticas públicas para implementação de medidas de controle. Por meio das diversas pesquisas relacionadas a este tema, as principais medidas adotadas para controlar a erosão no estado foi a utilização de terraços agrícolas, para reduzir o escoamento superficial, e o sistema de semeadura direta, o qual rapidamente se tornou muito popular entre os produtores, fazendo do Paraná uma referência nacional e internacional em práticas conservacionistas (TELLES et al., 2023).

Contudo, a partir do ano 2000, devido ao aumento no tamanho das máquinas agrícolas e a dificuldade de realizar operações em contorno, grande parte dos produtores removeram os terraços de suas áreas agrícola de forma indiscriminada. A remoção dos terraços e o cultivo nas encostas, principalmente no sentido da declividade do terreno, foram responsáveis pelo ressurgimento dos processos erosivos no estado, mesmo com a consolidação do sistema de plantio direto, com perdas de solo estimadas entre 15 e 20 t ha⁻¹ ano⁻¹ nas áreas com intensa mecanização (ZONTA et al., 2012; TELLES et al., 2023). Ademais, o predomínio de relevo ondulado no Sudoeste Paranaense, aliado ao alto potencial erosivos das chuvas, principalmente nos meses de maio e outubro,

contribuem para o aumento considerável nas perdas de solo por erosão hídrica (BALENA; BORTOLINI; TOMAZONI, 2009; WALTRICK et al., 2015).

No Brasil, a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) de Renard et al. (1997) é um dos modelos de previsão de erosão mais utilizados, o qual leva em consideração os fatores: i) erosividade das chuvas, ii) erodibilidade do solo, iii) uso e manejo do solo, iv) práticas conservacionistas e o v) fator topográfico, tal como comprimento e a declividade da rampa (BÓCOLI; LENSE; DOS SANTOS, 2019). Entretanto, a execução da RUSLE demanda uma estrutura considerável, o que onera as pesquisas neste tema, além de demandar muito tempo e ser difícil a sua replicação. Neste sentido, nos últimos anos os drones e os softwares de última geração, para o tratamento das imagens obtidas, têm passado por avanços tecnológicos significativos, especialmente na área de topografia, os quais permitem levantamentos planialtimétricos de elevada precisão (VIANA, 2017). Estas ferramentas possibilitam a construção de Modelos Digitais de Terreno (MDT) com elevada resolução espacial e temporal, utilizados em softwares de Sistemas de Informações Geográficas (GIS) para a geração de modelos hidrológicos distribuídos que auxiliam na identificação de áreas mais susceptíveis a erosão (MITASOVA; NETELER, 2013; VIANA, 2017).

Diante disso, o emprego destas tecnologias para obtenção de informações referente ao relevo e modelos hidrológicos distribuídos, bem como de métodos simplificados de coletas de solo resultantes da erosão hídrica em ambientes produtivos agrícolas, pode se apresentar como uma alternativa aos modelos tradicionais aplicados aos estudos de perdas de solo, visando a redução de custos e tempo necessários para construção de estruturas normalmente utilizadas nestes experimentos, e possibilitando maiores informações sobre a ocorrência e danos provocados pela erosão hídricas nestes ambientes.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar as perdas de solo por erosão hídrica em dois ciclos de cultivo - verão e inverno – utilizando um sistema portátil de captação de sedimentos e um modelo digital do terreno de alta precisão gerado por drone.

1.1.2. Objetivos Específicos

Gerar um modelo digital do terreno de alta precisão por meio de imageamento por drone.

Elaborar mapas de fluxo acumulado por meio do GRASS GIS.

Monitorar as perdas de solo por erosão hídrica durante o período de estudo utilizando coletores portáteis instalados no solo em lavoura de cultivos anuais em condições naturais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Solos de Basalto do Sudoeste Paranaense

O Terceiro Planalto Paranaense ocupa 68% da área do Estado do Paraná, com aproximadamente 135.000 km², compreendendo as mesorregiões Norte, Nordeste, Noroeste, Centro-Oeste, Centro-Sul e Sudoeste (OLIVEIRA; GUTIERREZ; NONOSE, 2023). Este Planalto é formado por rochas vulcânicas do período Mesozoico, denominado Formação Serra Geral, com deposições de sedimentos arenosos do período Cretáceo na mesorregião Noroeste do Estado, Formação Arenito Caiuá (BORDIN et al., 2020; OLIVEIRA; GUTIERREZ; NONOSE, 2023). A Formação Serra Geral abrange uma área total no Estado do Paraná de aproximadamente 109.000 km² e espessura máxima de até 1.400 metros, observada na região do Alto Pequiri (MANASSES et al., 2011). Segundo Hartmann (2014), cada derrame da Formação Serra Geral possui composição química particular sem repetição na estratigrafia, resultando na zonalidade de distribuição de rochas vulcânicas com muitos tipos químicos de lava, pois cada derrame pode ser considerado um tipo químico. Esta formação rochosa pode ser vista como um conjunto de mais de 100 derrames em cada seção, sendo cada derrame considerado equivalente a um campo de derrames. Estes derrames possuem grandes extensões, variando de 1 a 100 km ou mais, apresentando arquitetura de interdigitação com derrames de outras formações vizinhas podendo alcançar 2.000 km, correspondendo a distância entre o Sul do Uruguai e Mato Grosso.

O Sudoeste Paranaense corresponde uma área aproximada de 8.675 Km², limitada a norte pelo rio Iguaçu, a sul pelo Estado de Santa Catarina, a leste pelo rio Chopim e a oeste pela Argentina (MANASSES et al., 2011). A formação rochosa desta mesorregião é resultante de derrames vulcânicos de fissura continental, constituída principalmente por rochas vulcânicas efusivas básicas toleíticas, com basaltos maciços e amigdaloides, textura afanítica, cinzentos a pretos, com raras presenças de andesitos (OLIVEIRA; GUTIERREZ; NONOSE, 2023). Ademais, as rochas vulcânicas oriundas da Formação Serra Geral, tais como basalto e andesito, compreendem 95% do volume total de rochas formadas, e 5% correspondem as rochas riolito e riolito, esta última em menor volume (HARTMANN, 2014). Os basaltos são rochas formadas a partir do

resfriamento e solidificação do magma, constituídas principalmente de óxidos de ferro, sílica, alumínio, magnésio, potássio, cálcio e sódio, na forma de piroxênios (augita), plagioclásio (labradolita) e magnetita (SCHIAVON; REDONDO; YOSHIDA, 2007).

As rochas de basalto, também denominado material de origem, ao sofrerem ação dos fatores ambientais ao longo do tempo, tais como, clima, organismos e relevo, são responsáveis pela formação do solo na parte superior da crosta terrestre. Ao analisar uma sequência de amostras da rocha em direção a superfície, é possível observar alterações na concentração dos componentes químicos em virtude do acúmulo de elementos químicos menos móveis e a perda de elementos mais móveis ou mais solúveis. Ao longo do processo de intemperismo do material de origem as deposições residuais são produtos do intemperismo diferencial e da lixiviação, resultando na remoção dos elementos mais leves e solúveis do perfil, como Si, e mantendo os elementos relativamente menos móveis e mais pesados, como o Fe, Al, Ti e Zr (OLIVEIRA; GUTIERREZ; NONOSE, 2023).

O estudo realizado por Oliveira, Gutierrez e Nonose (2023) com objetivo de avaliar a distribuição dos atributos químicos e mineralógicos em um perfil de solo desenvolvido sobre basalto oriundo da Formação Serra Geral, observou uma tendência definida na distribuição dos elementos totais em função da profundidade do solo, sendo possível verificar a evolução do sistema ao se comparar com os teores dos elementos totais presente na rocha. Os autores observaram os teores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e TiO_2 são maiores no solo, enquanto CaO e SiO_2 são maiores na rocha, indicando o típico comportamento de evolução dos solos em que a lixiviação de bases e silício, elementos mais leves e solúveis, permanecendo nos horizontes superficiais grandes quantidade de Fe e Al, os quais são hidratados e formam oxihidróxidos de Fe e Al, e caulinita. Além da caulinita, os autores supracitados também verificaram picos característicos de hematita e gibbsita no perfil avaliado.

A caulinita, por sua vez, é um argilo-mineral com estrutura simples de camadas 1:1, composto por silício, alumínio, oxigênio e OH. Esse mineral secundário é formado, preferencialmente, em ambientes muito diluídos, com lixiviação intensa ou na presença de ácidos orgânicos e CO_2 , oriundos de compostos ricos em matéria orgânica. Em solos oriundos de basalto é possível inferir que há acréscimo nos teores de caulinita com a

profundidade, em função da maior concentração de Si nas porções mais profundas do perfil. Dependendo do ambiente pedogenético e do material de origem, a caulinita pode apresentar variações na sua cristalinidade devido a substituição isomórfica de silício por alumínio nos tetraedros e de alumínio para ferro nos octaedros (OLIVEIRA; GUTIERREZ; NONOSE, 2023).

Assim como a caulinita, a gibbsita também é uma das formas minerais do hidróxido de alumínio. Esse mineral secundário é formado em solos com intenso intemperismo químico, onde há hidrólise total de rochas com altos teores de feldspatos ou outros minerais contendo alumínios em sua composição expostos a ambientes de climas quentes e úmidos, em solos com boa drenagem. Por outro lado, em solos que possuem o basalto como material de origem, a gibbsita é formada principalmente pela alteração da caulinita, pois os basaltos são pobres em feldspatos potássicos e ricos em plagioclásios (OLIVEIRA; GUTIERREZ; NONOSE, 2023).

Entre os minerais secundários, os óxidos mais abundantes na fração argila dos solos oriundos de basalto em climas quentes e úmidos são os óxidos de ferro, seguido, geralmente, pelos óxidos de alumínio. Os óxidos de ferro, representados pela hematita e goethita, são considerados coloides minerais e de forma geral apresentam estruturas mais complexas e com maiores variações quando comparados com a caulinita e a gibbsita. A hematita encontra-se dispersa no solo, com cristalinidade variada, na forma de finas partículas, capeando outros minerais ou complexados com a matéria orgânica do solo (HANKE et al., 2015; OLIVEIRA; GUTIERREZ; NONOSE, 2023).

Os óxidos de Fe e Al são considerados os principais minerais responsáveis pela sorção de compostos orgânicos e os mais importantes na estabilização da matéria orgânica do solo (MOS). A interação entre os óxidos e a MOS está relacionada principalmente com dois mecanismos: 1) Presença dos grupos carboxila, os quais realizam troca de ligantes e de interação eletrostática; 2) Presença dos grupos C-O-Alquil, o qual representam as estruturas orgânicas mais lábeis da MOS, tal como o carboidrato. Estes óxidos da fração argila apresentam elevada área superficial específica e alta densidade de cargas dependente do pH, oriundas dos grupos Ferrol (-FeOH) e Aluminol (Al-OH). De modo geral, o pH do ponto de carga zero (pH PCZ) desses óxidos ocorrem em valores elevados (entre 7,0 e 9,0), sendo que em condições normais dos solos

tropicais e subtropicais (pH entre 4,0 e 7,0) os grupos Ferrol e Aluminol encontram-se em suas formas protonadas ($-\text{FeOH}_2^{+0,5}$ e $-\text{AlOH}_2^{+0,5}$), o que confere a eles a capacidade de adsorção dos compostos orgânicos. Entretanto, espera-se interações mais fortes, tais como complexos de esferas internas, entre os grupos orgânicos e os minerais de hematita e goethita, devido à grande densidade de hidroxilas monocoordenadas presentes na superfície desses óxidos de Fe. Ao passo que, a maior proporção de hidroxilas bicoordenadas presente na superfície planar da gibbsita, resulta em interações mais fracas, normalmente formadas por ligações de hidrogênio e interações de dipolo com a MOS (HANKE et al., 2015).

A interação destes minerais secundários com a MOS promove a alteração no diâmetro médio dos cristais (DMC). Está interação é responsável pela redução no DMC, sendo essa correlação negativa, entre o DMC e os atributos da MOS, mais forte sobre os óxidos de Fe, como é o caso da hematita, do que sob a caulinita. A redução do DMC destes organominerais tem a capacidade de aumentar a área superficial e atividade da fração argila, resultando, por exemplo, em reações de fixação de P e metais pesados de forma mais intensa, bem como, bloquear os sítios de adsorção específica dos grupos ferrol e aluminol, e assim, reduzir as ligações específicas com cátions e ânions, quando a interação entre os minerais da fração argila e a MOS for muito forte. Em termos práticos, os maiores teores de argilas e matéria orgânica favorecem a formação de grumos, aumentando a resistência do solo à erosão hídrica, ao passo que, solos com elevados teores de areia fina e silte apresentam-se mais suscetíveis (RUTHES et al., 2012; HANKE et al., 2015).

O município de Pato Branco, localizado na mesorregião Sudoeste Paranaense, possui área territorial de 53.847,76 ha, com área urbana de 2.559,37 ha e 51.288,39 ha de área rural (LUZ; TOMAZONI; POKRYWIECHI, 2019). O estudo utilizando sensoriamento remoto e técnicas de Sistema de Informações Geográficas realizado por Balena; Bortolini; Tomazoni, (2009), identificaram que os principais solos desenvolvidos no território de Pato Branco, originários da Formação Serra Geral, pertencem as ordens dos Nitossolos (44,66%), Cambissolos (26,27%), Latossolos (19,80%) e Neossolos (9,27 %), com a predominância do Nitossolo Vermelho Distrófico, abrangendo 17.376,84 hectares (32,24% da área total), seguido do Cambissolo distrófico (22,19%), Latossolo

Vermelho háplico (15,00%), Nitossolo Vermelho eutrófico (12,42%), Neossolo Litólico eutrófico (9,27%), Cambissolo eutrófico (4,08%), Latossolo Vermelho eutrófico (3,68%) e Latossolo Vermelho distrófico (1,12%). Além das classes de solos citadas, observou-se a predominância do relevo ondulado no território municipal, com declividade entre 10 e 15% em aproximadamente 24,40% da área total, seguido de relevo plano e suave ondulado (0 a 5% de declividade) com 22,70% da área total, ondulado (15 a 20%) com 22,12% e os demais níveis de declividade correspondendo a 30,78% (BALENA; BORTOLINI; TOMAZONI, 2009).

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018), a ordem dos latossolos é predominante no território brasileiro, representando aproximadamente 31,8% de todos os nossos solos. Do mesmo modo, entre as classes de solo do estado paranaense, os Latossolos são predominantes e compreendem uma área total de 61.406,59 km², correspondendo a 30,76 % da área total do estado (BHERING et al., 2009). Estes solos são constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte superficial, com exceção ao horizonte Hístico. Os Latossolos são solos extremamente evoluídos, típicos de regiões equatoriais e tropicais, geralmente dispostos na paisagem em relevo plano e suave ondulado, embora também possam ocorrer em áreas relevos mais acidentados, inclusive montanhoso. Normalmente são solos muito profundos, sendo raros os casos de solum com espessura inferior a 1 m, e considerados solos com boas condições de drenagem. Diante do seu avançado grau de intemperismo, estes solos são destituídos de minerais primários ou secundários menos resistentes ao intemperismo e possuem baixa capacidade de troca catiônica da fração argila, geralmente inferior a 17 cmolc kg⁻¹ de argila, admitindo valores de ki mais altos (em torno de 2 a 2,2), em solos com predomínio da caulinita, até valores de ki extremamente baixos, nos solos oxídicos. São normalmente solos fortemente ácidos e com baixa saturação por bases (EMBRAPA, 2018).

Nitossolos são solos constituídos de material mineral, com 350 g kg⁻¹ ou mais de argila, inclusive no horizonte A, que apresentam horizonte B nítico abaixo do horizonte A. O horizonte B nítico apresenta argila de atividade baixa ou caráter alítico na maior parte do horizonte B dentro de 150 cm da superfície do solo. O Nitossolos de cores vermelhas

ou vermelho-escuros, são solo argilosos ou muito argilosos, com estruturas em blocos fortemente desenvolvidas, derivados de rochas básicas e ultrabásicas, sendo pouco notável a diferenciação dos seus horizontes. Os Nitossolos Vermelhos estão presentes nos planaltos basálticos que se estendem desde o Estado de São Paulo até o Rio Grande do Sul. Esta classe possui grande importância agronômica, respondendo bem à aplicação de corretivos, mesmo os distróficos e álicos, tornando-os aptos para todos os usos agropastoris e florestais adaptados às condições climáticas. Por outro lado, apresentam alto risco de erosão devidos aos relevos acidentados em que esses solos estão associados. Assim como os Nitossolos, os Cambissolos geralmente são encontrados em relevos acidentados. São solos poucos profundos constituídos por material mineral com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial (exceto hístico com 40 cm ou mais de espessura) ou horizonte A chernozêmico, quando o B incipiente apresentar argila de atividade alta e saturação por bases alta. Esta classe representa apenas 3% dos solos no território brasileiro, geralmente são ácidos e apresentam baixa fertilidade (EMBRAPA, 2018).

Além das classes citadas anteriormente, os Neossolos também são recorrentes na mesorregião sudoeste do Paraná. Esta classe está normalmente associada à relevos muito inclinados, proporcionando a formação de solos rasos, com fortes limitações ao seu uso devido à baixa disponibilidade hídrica, pedregosidade na superfície e alta suscetibilidade à erosão. São solos pouco evoluídos, constituídos por material mineral ou orgânico com menos de 20 cm de espessura, sem a presença de horizonte B diagnóstico, sendo normalmente observados apenas o horizonte A sobre o C, ou sobre a rocha de origem. Os Neossolos ocorrem em aproximadamente 14% do território brasileiro (EMBRAPA, 2018).

2.2. Processos Erosivos em Solos do Paraná

Aproximadamente um terço do território paranaense, compreendendo uma área total de 7.500.000 hectares de terras, são utilizadas para produção agrícola (BERTOL et al., 2019). Mesmo com o agronegócio apresentando retração de 10,87% em relação ao mesmo período de 2021, principalmente, devido as menores quantidades de soja e milho colhidas na safra 2021/2022, este setor foi responsável por R\$ 31.334 milhões,

correspondendo a 19% do Produto Interno Bruto Estadual no primeiro trimestre de 2022 (IPARDES, 2022). Embora apresente um importante papel na economia estadual e nacional, sendo o segundo estado brasileiro em produção de grãos, o uso intenso do solo e as práticas agrícolas inadequadas são os principais responsáveis pela sua degradação (WALTRICK et al., 2015; BERTOL et al., 2019; TELLES et al., 2023).

Tanto antes, quanto depois da sua emancipação política em 1853, a ocupação do estado do Paraná foi caracterizada por diversos ciclos econômicos intimamente ligados ao setor agrícola. Em seus primórdios, a economia Paranaense foi movida pela extração de ouro, arrimo (comércio de mulas e transporte de produtos por meio de tropas de animais de carga), erva-mate, madeira e café. Entre as décadas de 1920 e 1950, as exportações de madeira e erva-mate eram as principais atividades econômicas do estado e o gado era criado de forma extensiva em pastagens naturais. Entre 1920 e 1980, a área ocupada pela vegetação nativa do estado passou de 85% para apenas 5%. Em 1990, devido a expansão do assentamento de terras, apenas 2,6% do território estadual permaneceu ocupado pela vegetação nativa, predominantemente em parques nacionais ou demais áreas de proteção e conservação (TELLES et al., 2023).

Entre 1916 e 1925, a exploração da madeira teve seu apogeu, sendo o segundo produto agrícola Paranaense em termos econômicos. Nesse período, a cafeicultura se intensificou no Norte do estado, mesmo com a crise de 1929 e a queda do preço do café. A expansão da cafeicultura no Norte e Oeste do estado foi a principal responsável pelo rápido desmatamento das florestas tropicais e subtropicais entre as décadas de 1930 e 1960. A partir da década de 1960, o café tornou-se o principal produto agrícola no estado do Paraná, assumindo a posição de maior produtor nacional, participando de 28% do mercado global nas safras de 1961 e 1962 (TELLES et al., 2023).

Embora o café seja uma cultura perene, foi durante o período da cafeicultura tradicional que os processos de degradação e erosão do solo aumentaram gradativamente. Esses processos tornaram-se mais intenso com as fortes geadas nas regiões cafeicultoras do Paraná em 1969, 1970 e principalmente em 1975 que dizimaram quase todas as plantações de café no estado e sua produção chegando a praticamente zero. Com isso, em poucos anos os cafeicultores afetados pelas fortes geadas rapidamente substituíram seus cafezais tradicionais pelos cultivos anuais, principalmente

soja e trigo em sistemas consorciados, seguindo o desenvolvimento tecnológico que iniciou na década de 1960 com a Revolução Verde (TELLES et al., 2023).

Durante esse período, dois fatores principais foram responsáveis pelo agravamento dos processos erosivos no Paraná. O primeiro deveu-se a cafeicultura tradicional, mesmo sendo uma cultura perene e tradicionalmente cultivada em contorno e em terraços, fortes erosões eram observadas nos cafezais cultivados em áreas altamente suscetíveis, como os solos arenosos provenientes da Formação Arenito Caiuá na mesorregião noroeste do Paraná. Concomitantemente, o segundo fator foi o cultivo anual que se expandiu rapidamente no estado, fomentado por créditos subsidiados pelo Governo do Estado, grandes extensões de terras foram destinadas à novas culturas anuais e novas áreas de cultivo foram estabelecidas no oeste do Paraná (região que ainda era composta por vegetação nativa), as quais adotaram o modelo de produção advento da Revolução Verde, com a utilização de produtos químicos (fertilizantes e pesticidas), variedades de plantas melhoradas e mecanização, resultando na mobilização intensiva do solo (TELLES et al., 2023).

Embora a erosão dos solos agrícolas do Paraná já ocorrerá desde o início do século XX, foi a partir da década de 1970 que o passivo ambiental do desmatamento e da agricultura intensa se tornou mais evidente. Entre 1978 e 1988, o Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) estimou as perdas de solo em parcelas experimentais na região da Formação Arenito Caiuá em $57 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$, valores extremamente altos. Devido ao manejo inadequado do solo, a erosão foi identificada como a principal causa da degradação do solo e da água no território Paranaense, fazendo-se necessário a implementação de programas e políticas públicas voltadas a conservação dos recursos naturais. Os primeiros programas de conservação basearam-se na utilização de terraços agrícolas com o objetivo de controlar o escoamento superficial. Em seguida, somaram-se as estratégias de controle, as práticas agrícolas para aumentar a infiltração de água no solo, utilizando a rotação de cultura, adubação verde e métodos alternativos de preparo do solo, como o Sistema de Plantio Direto (SPD). Rapidamente, o SPD tornou-se popular entre os agricultores, pois além de reduzir as perdas de solo, também reduziu o número de operações agrícolas em relação ao cultivo tradicional, reduzindo a carga de trabalho e os custos de produção (TELLES et al., 2023).

O Paraná é considerado o estado brasileiro pioneiro no SPD. Este sistema de cultivo, surgiu com o propósito de melhorar a resistência das terras agrícolas aos danos decorrentes dos processos erosivos, tendo em vista o potencial erosivo das chuvas presentes no estado (BERTOL et al., 2019; WALTRICK et al., 2015). As regiões que apresentam maiores índices de erosividades médias anuais são o Sudoeste, Oeste e Litoral, com os maiores valores mensais nos meses de janeiro, maio e outubro. Além disso, nas regiões Sudoeste e Oeste paranaense, observou-se o aumento no potencial erosivo das chuvas em relação a última estimativa realizada por Rufino et al., (1993), com valores atuais superiores a $10.000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ (WALTRICK et al., 2015). Entretanto, quando empregado de forma incorreta, este sistema por si só não é capaz de impedir os processos erosivos, e consequentemente, a degradação do solo. Muitos produtores paranaenses, ao implantarem o SPD em suas terras agrícolas, negligenciaram a importância de terraços, cultivos em nível e rotação de culturas (BERTOL et al., 2019). Portanto, o uso do conjunto de práticas conservacionistas é indispensável para o controle de perdas de solo e água, visando o máximo do retorno financeiro sem reduzir da capacidade produtiva (ZONTA et al., 2012).

A cobertura vegetal nas entrelinhas, bem como durante o período de entre safra, são eficientes em reduzir o impacto das gotas de chuva ou de irrigação por aspersão sobre o solo, e desta forma, evitar a formação de camada compactada sobre a superfície. Além disso, as plantas de cobertura auxiliam na manutenção da temperatura do solo. Nestas condições, a menor temperatura do solo favorece a preservação da matéria orgânica, melhorando a estabilidade dos agregados e a infiltração e retenção da água no solo. Neste sentido, a prática de rotação de culturas, além de promover melhorias na infiltração de água no perfil do solo, também contribui positivamente na fertilidade pelo aprofundamento de diferentes sistemas radiculares e no controle de pragas e doenças (ZONTA et al., 2012). Esta prática consiste no cultivo de culturas diferentes, numa mesma área produtiva, de tal forma a evitar a utilização da mesma espécie num período de aproximadamente seis safras (BERTOL et al., 2019).

Almeida et al. (2016) avaliando o efeito da cobertura vegetal em diferentes sistemas de cultivos (cultivo de soja em sistema convencional, cultivo de soja em sistema de plantio direto, pastagem estabelecida e solo exposto) sobre a erosão do solo de um

Argissolo Vermelho distrófico típico, no estado do Mato Grosso do Sul, observaram que nas áreas de plantio de soja sob o preparo convencional e baixa cobertura vegetal da superfície do solo, a desagregação do solo e os processos erosivos ocorrem com intensidade similar aos solos expostos. Por outro lado, as pastagens com elevada cobertura vegetal são eficientes em reduzir a suscetibilidade do solo aos processos erosivos. Da mesma forma, o cultivo de soja sob SPD, com menor revolvimento do solo e elevada cobertura vegetal, demonstrou eficiência na minimização dos processos erosivos, ao passo que, ao diminuir a cobertura vegetal e aumentar o revolvimento do solo, acelera a desagregação das partículas do solo pela ação do impacto das gotas da chuva, aumentando a suscetibilidade destas áreas à erosão (ALMEIDA et al., 2016).

Além disso, o uso de terraços agrícolas é uma das principais práticas conservacionistas de caráter mecânico. Esta técnica utiliza de cortes e aterros para construir uma barreira física no sentido transversal ao declive do solo, com espaçamentos dimensionados, visando diminuir o comprimento da rampa de declive e reduzir a energia da enxurrada sobre a superfície do solo. Para o seu dimensionamento, levam-se em questão a declividade do terreno, o tipo de solo, o sistema de cultivo e a intensidade e duração das chuvas. Entretanto, para conferir eficiência ao sistema de terraceamento, este deve ser combinado com demais práticas conservacionistas, como as operações em nível, a rotação de culturas, manutenção da cobertura vegetal sobre o solo, entre outros (ZONTA et al., 2012).

Todas essas práticas não dispensam a realização de cultivos e todas as operações mecanizadas em curvas de nível. Quando as operações são realizadas em nível, tem-se um aumento da rugosidade da superfície do solo, formando sulcos perpendiculares ao declive, os quais agem como uma barreira física ao escoamento superficial, reduzindo sua capacidade erosiva. Além disso, deve-se evitar o tráfego de máquinas no sentido do pendente e nos mesmos caminhos, pois promovem a compactação gradativa do solo, diminuindo a capacidade de infiltração da água e formando caminhos de escoamento, o que favorece a erosão (ZONTA et al., 2012).

Os processos erosivos diminuem a capacidade produtiva dos solos, aumentando os custos de produção e reduzindo os lucros dos produtores (ZONTA et al., 2012). Além disso, a erosão pode interferir na qualidade das vias de acesso às propriedades,

dificultando o acesso aos moradores, escoamento dos produtos agrícolas e o recebimento dos insumos, os quais em alguns casos demandam de um grande fluxo de veículos diariamente (ZONTA et al., 2012; BERTOL et al., 2019). Caprario et al. (2017), observaram que o uso e ocupação do solo e a topografia na influenciam diretamente a produção de sedimentos em sub-bacias sobre um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na região sudoeste do Paraná, sendo as menores quantidades de perdas de solo observada na sub-bacia com predomínio de floresta (4,77 a 7,72 Mg ha⁻¹) e os maiores valores na sub-bacia com predomínio da agricultura (211,27 a 264,66 Mg ha⁻¹).

Mesmo com o sucesso e reconhecimento pelas iniciativas implementadas a partir da década de 1970 no controle da erosão no estado do Paraná, atualmente os problemas ambientais associados às perdas de solo trouxeram novamente à tona esta questão. O não cumprimento das práticas conservacionistas pelos agricultores, e a remoção parcial ou total dos terraços agrícolas, principalmente a partir dos anos 2000, bem como a substituição da semeadura em contorno pela semeadura no sentido do declive, foi responsável pelo aumento na degradação do solo Paranaense nas últimas décadas. Reforçando a necessidade de novas iniciativas públicas e privadas na conservação do solo e da água para garantir a produção sustentável da agricultura no estado (TELLES et al., 2023). Para isso, o monitoramento das perdas de solo é fundamental para o melhor entendimento dos processos erosivos em cada ambiente. Contudo, Anache et al. (2017) ao realizar uma meta análise com 52 estudos distribuídos em cinco regiões brasileiras, salientam que para maior precisão nos dados obtidos, é importante o monitoramento de parcelas experimentais por um grande período, fato que está na contramão do cenário observado no Brasil, tendo em vista que metade dos estudos experimentais possuem 2 anos ou menos de dados monitorados.

Diante do exposto, atualmente, no Paraná, a Lei Estadual nº 8.014, de 14 de dezembro de 1984, determina o solo agrícola como Patrimônio Nacional, incumbindo a todos a obrigação pelo adequado uso e conservação do solo, detentores ou não, de qualquer parcela de solo, assim como os responsáveis por assistência técnica privada ou pública, os órgãos ambientais, instituições de pesquisas, financeiras e os administradores públicos de áreas rurais ou urbanas. Esta lei é regulamentada por meio do Decreto Estadual nº 6.120, de 13 de agosto de 1985, a Resolução nº 172, de 03 de

setembro de 2010, da Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento – SEAB, e a Portaria nº 272, de 23 de setembro de 2014, da Agência de Defesa Agropecuária do Paraná – Adapar. Sendo de competência da Adapar, a fiscalização do uso do solo agrícola do Paraná com base na legislação mencionada (BERTOL et al., 2019).

2.3. Levantamento Planialtimétrico com Drone e Cartografia Digital

No dia 4 de outubro de 1957 a então União Soviética deu início a era espacial com o lançamento do primeiro satélite, denominado Sputnik 1, e alguns dias depois, em 3 de novembro do mesmo ano, o Sputnik 2 foi lançado em órbita. Embora ambos os satélites emitissem fracos sinais de rádios, foram importantes para a determinação do campo gravitacional da Terra a partir do espaço, e possibilitaram determinar o achatamento do nosso planeta em uma única etapa e muito mais precisa do que as determinações obtidas com triangulações terrestres realizado por geodestas em aproximadamente 150 anos de trabalho (RUMMEL, 2020).

Determinar o ponto absoluto de um objeto sobre a superfície da Terra, nada mais é do que atribuir-lhe coordenadas. A partir da década de 1960, iniciou-se o desenvolvimento dos sistemas de posicionamentos globais por satélites com o objetivo de melhorar a navegação e a determinação do posicionamento sobre a superfície da Terra (KRUEGER et al., 2020). Na década de 1970, os Estados Unidos da América, dá início a proposta do NAVSTAR-GPS (*Global Positioning System*) com o propósito de revolucionar a determinação das posições. Nesta mesma década, a então URSS desenvolveu de forma paralela e independente o GLONASS (*Global Orbiting Navigation Satellite System*). Na década de 1990, a Agência Espacial Europeia propõe o desenvolvimento do sistema denominado Galileo, o qual teve seu primeiro satélite lançado em 2005. Além destes sistemas, algumas expansões do sistema GPS foram realizadas pelos Estados Unidos, Europa, Japão e Índia. Diante disso, em 1991, na 10ª Conferência de Navegação Aérea, determinou-se que todos estes sistemas são chamados de GNSS (*Global Navigation Satellite System*), o qual foi reconhecido pela Associação Internacional de Aviação Civil como a fonte primária para navegação no século XXI (MONICO, 2008).

Apenas em 1995 o Sistema de Posicionamento Global (GPS) se tornou operacional e completo, mas com precisão limitada ao usuário devido a política de segurança americana. Tal política impossibilitava que os usuários civis tivessem acesso ao código P original, para evitar possíveis fraudes. Estes usuários tinham acesso ao posicionamento absoluto, instantâneo, ou por ponto, com precisão horizontal de 100 metros e precisão vertical de 150 metros, em nível de probabilidade de 95%. Tendo em vista que as precisões até então eram insuficientes para algumas aplicações, como por exemplo as navegações aéreas, marítimas e terrestres, fez-se necessário o posicionamento com valores mais precisos, denominado de DGPS (*Differential Global Positioning System*) (KRUEGER et al., 2020).

Em seu primeiro momento, o DGPS foi capaz de melhorar a precisão posicional, mas ainda estavam sujeitos a erros que variavam entre 0,5 e 5 metros, devido ao uso da pseudodistância (VIANA, 2017). Este sistema efetuava apenas uma linha de base e utilizava observáveis e correções diferenciais do código e do código suavizado pela onda portadora. Em seguida, a fase da onda portadora também recebeu correções que possibilitaram a resolução das ambiguidades em tempo real, método que ficou conhecido por RTK (Real Time kinematic) (KRUEGER et al., 2020). Esta técnica possibilitou elevada acurácia do posicionamento em tempo real devido a transmissão dos dados de uma estação de referência, denominada popularmente de base, para um receptor móvel, por meio de uma conexão via internet ou rádio. Neste caso, a estação de referência é instalada sobre um ponto de coordenadas conhecidas, enquanto o receptor móvel é posicionado no ponto que se deseja fornecer suas coordenadas em tempo real. Para que estas coordenadas desejadas apresentem acurácia elevada, a base é responsável por enviar correções ao receptor móvel de forma contínua e simultânea. Além disso, o RTK pode obter elevada acurácia posicional, na ordem centimétrica, sem a necessidade de um pós-processamento dos dados, desde que a solução das ambiguidades obtida seja confiável. Desta forma, o posicionamento obtido pelo método RTK é determinado com relação a um ou mais vértices materializados de coordenadas conhecidas, o qual é denominado de posicionamento relativo (VIANA, 2017).

No presente, assim como o método RTK, a aquisição de dados espaciais pode ser realizada por meio de imagens aéreas obtidas com um Veículo Aéreo Não Tripulado

(VANT). Desde a sua criação, os VANT's evoluíram com o surgimento de novas tecnologias, tornando-os mais baratos e menores. Nas últimas décadas, com o desenvolvimento dos sistemas de navegação por satélite, a redução do tamanho dos sistemas inerciais, câmeras digitais compactas e leves e programas computacionais capazes de gerar ortomosaicos, essas aeronaves ganharam destaque e popularidade (VIANA, 2017). Atualmente os VANTs são considerados uma ferramenta de uso civil que pode ser empregada em diversas áreas, como engenharia, geologia, monitoramentos ambientais, agricultura, mapeamentos topográficos, entre outros (ALMEIDA et al., 2016; DE OLIVEIRA et al., 2020).

Segundo a Agência Nacional da Aviação Civil (ANAC) os VANT's são definidos como Aeronaves Remotamente Pilotada (Remotely-Piloted Aircraft – RPA), isso significa que são aeronaves não tripuladas, utilizadas para diversos fins, controladas por uma estação de pilotagem remota (ANAC, 2017). No Brasil, as operações destes equipamentos, seja para fim recreativo, corporativo, comercial ou experimental, estão condicionadas as normas da ANAC, seguindo as determinações do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) (KNEIPP, 2018). Com objetivo de garantir a segurança das pessoas e tornar viáveis as suas operações, a ANAC aprovou em maio de 2017 o regulamento especial para utilização destas aeronaves, o Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial – RBAC-E nº 94. Este regulamento divide as aeronaves não tripuladas em aeromodelos, drones para fins recreativos, e RPA utilizados para operações comerciais, corporativas ou experimentais (KNEIPP, 2018).

Entre os modelos utilizados, destacam-se os drones e as aeronaves de asa fixa. Os drones são aeronaves que utilizam asas rotativas para gerar elevação, similar ao funcionamento do helicóptero, possuindo de três a oito rotores. Estas aeronaves geralmente apresentam dimensões menores do que as de asa fixa, tornando-as mais versáteis e de fácil operação, pois decolam e pousam no sentido vertical. Seu sistema de sustentação permite ficar parado no ar, em altitudes menores e caso algum rotor pare de funcionar, o drone é capaz de retornar ao ponto de decolagem em segurança. Sua autonomia de voo é entre 20 e 30 minutos, variando conforme o modelo e a velocidade dos ventos durante sua operação. Portanto, são eficientes para voos baixos e lentos, com

pouca visibilidade, e proporcionam resultados mais detalhados. Diante de suas características, são excelentes para monitoramentos diversos, modelagens 3D, e capazes de realizar mapeamentos em pequenas e médias áreas para confecção de Ortomosaicos, Modelo Digital de Superfície (MDS), Modelo Digital de Terreno (MDT), entre outros (KNEIPP, 2018).

Por outro lado, as aeronaves de asa fixa usam o mesmo princípio de aviões tradicionais, possuem asas fixas e estáticas gerando elevação e sustentação com a velocidade de avanço. Isso possibilita menor gasto de energia em sustentar a aeronave em função da sua aerodinâmica. Essas características proporcionam voos com maiores altitudes e velocidade de deslocamento, cobrindo maiores áreas num único voo. A velocidade de deslocamento é limitada pela câmera embarcada na aeronave e a luminosidade, pois se a câmera não for de alta qualidade e a luminosidade for elevada, as altas velocidades de deslocamento resultarão em imagens de menor qualidade. Sendo assim, essas aeronaves são ótimas para Ortomosaicos e modelos 2D, mas demandam de operadores experientes e treinados (KNEIPP, 2018).

Na agricultura, os imageamentos aéreos realizados com o drone possibilitam analisar o estado nutricional e sanitário das plantas, níveis de irrigação, falhas de plantio e acompanhamento do desenvolvimento da safra. Nos últimos anos tem-se estudado a aplicabilidade de drones na pulverização de produtos químicos, sendo essa estratégia uma opção que proporciona economia no produto utilizado e viabilidade de aplicação em locais de difícil acesso ou em condições de solo indesejadas ao tráfego de máquinas. Além disso, com o uso de softwares específicos pode-se obter Ortomosaicos de fotos, os quais são utilizados para cálculos vetoriais, determinação do uso e ocupação do solo, Modelos Digitais de Superfície e Terreno, entre outros (ARANTES et al., 2019; GONÇALVES; CAVICHIOLI, 2021). Atualmente, com o avanço da fotogrametria digital, os Modelos Digitais de Terreno (MDT) de alta precisão está sendo amplamente utilizados para os mais diversos fins, como a cartografia, topografia, hidrologia mineração e engenharias. O MDT é uma representação digital da superfície topográfica ou batimétricas do terreno, sem edificações ou cobertura vegetal, diferentemente do Modelo Digital de Superfície (MDS), o qual representa a superfície topográfica e todos os objetos existente sobre ela (OLIVEIRA et al., 2017; VIANA, 2017).

O primeiro passo para realização de um MDT é a aquisição dos dados. Nesta etapa, são levantados os “pontos notáveis” do terreno por meio de técnicas pontuais de aquisição de dados, tal como o GNSS RTK, ou por meio de sensores, sendo esta última possível de ser realizada com RPAs. Esses pontos coletados representam as feições da área, obtendo as informações planimétricas e altimétricas. O segundo passo consiste na recriação digital da superfície interpolando os dados para toda a área. A interpolação utiliza os dados que eram pontuais como base para o cálculo do Modelo Digital de Terreno, estes processos podem ser determinísticos (triangulação com interpolação linear, curvatura mínima, inverso ponderado da distância, entre outros) ou probabilísticos (estimadores krigagem). O terceiro passo corresponde a manipulação dos dados para atender a finalidade do levantamento topográfico. E por fim, o quarto passo consiste na utilização dos modelos produzidos e suas aplicações em diversas finalidades. Entretanto, quanto maior a complexidade da área levantada, maior será a demanda por números de pontos notáveis. Para obtenção do MDT com boa representação da área, é importante realizar a coleta dos dados em número adequado e com distribuição espacial satisfatória. A subamostragem ou superamostragem podem ocasionar problemas durante a interpolação dos dados. A subamostragem consiste na amostragem insuficiente dos dados, resultando em modelos pobres, com a tendência de suavizar os terrenos. Ao passo que, a superamostragem, ao utilizar dados redundantes, tende a sobrecarregar o sistema e aumenta o custo do levantamento, devido ao excesso de informações (VIANA, 2017).

Entretanto para garantir a qualidade do produto cartográfico por meio das imagens obtidas com RPAs, faz-se necessário a aquisição de pontos identificáveis nas imagens obtidas com o Drone utilizando técnicas de coletas de dados mais precisas. Para isso, uma das técnicas utilizadas é a coleta de dados com receptores GNSS (Global Navigation Satellite System), denominados pontos de controle e pontos de checagem. Os pontos de controle são pontos foto identificáveis, com coordenadas e cotas obtidos por meio de receptores GNSS em campo, tal como o RTK, utilizados para corrigir o erro posicional das informações destes pontos obtidos pelo Drone antes do processamento das imagens aéreas. E os pontos de checagem também são pontos foto identificáveis obtidos por receptores GNSS no campo, e são utilizados para conferir a precisão do produto

cartográfico produzido por meio das imagens aéreas capturadas pelo Drone, possibilitando comparar a discrepância entre os valores obtidos pelas duas técnicas e calculado o valor da Raiz do Erro Médio Quadrático – root mean square (RMS), o qual, juntamente com os valores de erro padrão, são utilizados para classificar o padrão de acurácia posicional definido pelo Decreto 89.817/ET-CQDG quanto a tendência e precisão (VIANA, 2017).

Em 20 de junho de 1984, foi criado o Decreto nº 89.817, estabelecendo critérios para classificação da qualidade dos documentos cartográficos quanto à sua exatidão e à distribuição dos erros, utilizando indicadores estatísticos quanto a qualidade posicional, denominado de “Padrão de Exatidão Cartográfica” (PEC). Inicialmente, o principal objetivo deste decreto foi assegurar a exatidão cartográfica dos produtos analógicos, respeitando as particularidades de cada escala, bem como determinar os elementos obrigatórios de uma carta, o Sistema Geodésico Brasileiro, entre outros. Aproximadamente 30 anos atrás a maioria dos produtos cartográficos eram produzidos sob processos óptico-mecânico-manuais, os quais eram aplicados sobre bases celulósicas, como por exemplo mapas ou cartas em papéis, bem como filmes e películas fotossensíveis para plástico-gravura, cronaflex, entre outros. Desta forma, tais processos estavam sujeitos a erro posicional resultado de um conjunto de erros ocasionados por diferentes componentes durante a produção de um documento cartográfico. Como componentes destes erros, pode-se citar a orientação manual dos modelos estereoscópicos, a perfuração dos diapositivos, ou até mesmo a própria qualidade da impressão em papel carta destinada ao usuário final (DSG, 2011).

Mas, com a evolução tecnológica dos equipamentos e dos processos para aquisição dos dados em campo, houve a redução ou eliminação do erro em alguns processos e outras fontes de erros surgiram, embora em menores magnitudes quando comparados com os erros presentes nos métodos tradicionais. Atualmente, com o avanço do geoprocessamento, dos Sistemas de Informações Geográficas (GIS), do conhecimento e o acesso aos equipamentos que utilizam dados e informações geoespaciais, aliado ao aumento na demanda pelos consumidores finais, fez-se necessário o estabelecimento de novos padrões de qualidade destes produtos cartográficos. Por tanto, para atender a estas necessidades, as Especificações Técnicas

dos Produtos dos Conjuntos de Dados Geoespaciais (ET-PCDG) determinaram os elementos da qualidade para cada tipo de produto cartográfico. Em 2010 a Diretoria do Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (DSG) publicou as Especificações Técnicas de Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV), a qual foi atualizada para segunda versão em 2016, criando uma classe específica para os produtos cartográficos digitais. Neste mesmo ano, a DSG elaborou as Especificações Técnicas para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG), visando padronizar a avaliação da qualidade dos dados geoespaciais do Sistema Cartográfico Brasileiro (DSG, 2011; VIANA, 2017).

Na prática, utilizam-se pontos de checagem para avaliar a acurácia posicional de um produto cartográfico construído por meio imagens obtidas com Drone. Estes pontos, denominados dados de referência, comumente chamados de pontos de checagem, normalmente são obtidos em campo com equipamentos de alta precisão ou de outros produtos que apresentem acurácia desejada. Com as informações das coordenadas dos pontos homólogos ao produto a ser testado dos pontos de referências, é possível calcular a discrepância, ou seja, as diferenças posicionais entre eles, que serão utilizados em equações matemáticas para determinar a acurácia planimétrica e altimétrica do produto cartográfico, demonstradas nas Equações 1 e 2 (VIANA, 2017).

$$(1) \quad \text{Discrepância planimétrica} = \sqrt{(X_{teste} - X_{ref})^2 + (Y_{teste} - Y_{ref})^2}$$

$$(2) \quad \text{Discrepância altimétrica} = Z_{teste} - Z_{ref}$$

Onde,

X_{teste} , Y_{teste} , Z_{teste} = Coordenadas testadas;

X_{ref} , Y_{ref} , Z_{ref} = Coordenadas referências.

Sendo assim, para que determinado produto cartográfico seja classificado quanto ao padrão brasileiro de acurácia posicional, este deve possuir 90% dos pontos checados com discrepâncias iguais ou inferiores aos valores do PEC tabelados em relação à escala e a classe testada. Além disso, a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMS) da discrepância dos dados posicionais deve ser igual ou inferior à tolerância do Erro Padrão (EP) definido

pela norma. O RMS representa a tendência e a precisão presente nos dados, enquanto o desvio padrão representa a variabilidade dos elementos testados em torno de um valor médio amostral. O valor do RMS é obtido com a raiz quadrada da soma dos quadrados das discrepâncias dos dados amostrais dividido pelo número de amostras, definido pela Equação 3 (VIANA, 2017).

$$\text{RMS} = \sqrt{\sum \frac{(di)^2}{n}}$$

(3) Onde,

di = discrepância entre as coordenadas;

n = número de pontos de controle.

Embora os produtos digitais apresentem-se precisos e eficientes, esses também podem apresentar erros, assim como nos métodos tradicionais. Como por exemplo a geração de um MDT utilizando a nuvem de pontos obtida pelo MDS, o qual passa por um processo de filtragem dos pontos de tal forma a representar somente os pontos atrelados ao solo. Esta nuvem de pontos é interpolada para preencher os espaços vazios entre os pontos selecionados na filtragem, objetivando eliminar os pontos que representam os objetos, vegetações, pessoas, entre outros. Porém, este procedimento é passível de incertezas quanto a sua acurácia (VIANA, 2017). Neste sentido, assim como para os produtos cartográficos obtidos pelos métodos tradicionais, os produtos cartográficos digitais possuem classes estabelecidas e os valores de tolerância do PEC e seu respectivo EP quanto a acurácia planimétrica e altimétrica para os produtos cartográficos digitais, MDT, MDE e MDS (DSG, 2011). Portanto, a análise da qualidade cartográfica é indispensável para determinar o emprego adequado do produto obtido, seja ele em relação a sua acurácia posicional, de atributos ou temporal. Pois a cartografia visa representar da realidade através de modelos que possibilitem estudos, monitoramentos, simulações, planejamentos, tomadas de decisões, e outros, e quanto maior a qualidade destas informações mais assertivas serão (VIANA, 2017).

2.4. Modelagem Hidrológica a partir de MDT

Os Sistemas de Informações Geográficas (GIS), são normalmente descritos como integração de dados, hardwares e softwares utilizados em gestão, processamento,

análise e visualização de dados georreferenciados. Inicialmente, esse sistema era utilizado por um grupo de pessoas altamente especializadas, entre eles destacavam-se os grupos de pesquisadores, engenheiros e funcionários públicos, os quais o utilizavam desde para obtenção de melhores rotas viárias até a gestão de desastres naturais. Porém, situações mais complexas voltadas ao planejamento urbano e regional, a gestão empresarial e a proteção ambiental demandavam de melhores ferramentas e conhecimento especializado. Neste sentido, a tecnologia GIS (Geographic Information System) evoluiu para atender as demandas passadas e atualmente abrange muitas aplicações, que envolvem operações simples até as mais complexas, como por exemplo as análises espaciais, as modelagens e simulações (MITASOVA; NETELER, 2013).

No presente, o GIS é considerado um aplicativo de código aberto, permitindo a liberdade de executar o programa para qualquer finalidade, estudar seu funcionamento e adaptá-lo às necessidades futuras, redistribuir cópias e divulgar suas melhorias ao público. Por estes motivos, os resultados obtidos em pesquisas nas universidades e nos laboratórios governamentais contribuem para a inovação e melhoria contínua do software, possibilitando a adaptação da tecnologia GIS e acesso aos usuários que não podem ou não desejam obter softwares de domínio privado (MITASOVA; NETELER, 2013).

Dentro do ambiente GIS, outros softwares complementares podem ser utilizados para estudos hidrológicos. Entre eles, destaca-se o TauDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models). Este software representa um conjunto de ferramentas para extração e análise de informações hidrológicas por meio de Modelos Digitais de Elevações (MDE), tais como SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), ou Modelos Digitais de Terreno (MDT), como por exemplo os produtos cartográficos construídos por meio de imagens aéreas obtidas por Drones. O TauDEM é um recurso muito utilizado por hidrólogos em ambientes de computação (YILDIRIM, 2016), o qual permite a delimitação automática de bacias hidrográficas, bem como a delimitação e traçado da rede hidrográfica que a compõem. Estas informações são de extrema importância para o planejamento e gestão dos recursos hídricos na agricultura, indústria e abastecimento urbano, possibilitando a construção de modelos tridimensionais e simulações na dinâmica da paisagem sobre o comportamento de uma bacia hidrográfica, como por

exemplo o potencial de inundações (JUNIOR; MENDES, 2019; DOS SANTOS et al., 2023).

Estes procedimentos tornaram-se mais eficientes devido a evolução dos produtos cartográficos, atualmente dominados pela cartografia digital, possibilitando delimitações mais precisas e mais rápidas, principalmente em bacias hidrográficas de grandes extensões (RIZZATTI et al., 2016; JUNIOR; MENDES, 2019). Por outro lado, fazer mão de MDE/MDT de baixa resolução para a análise morfometria em escala regional pode induzir ao surgimento erros, pois a baixa resolução destes modelos pode atenuar os valores de altitudes e afetar diretamente a distribuição dos parâmetros calculados. Nos últimos anos cresceu rapidamente a disponibilidade de MDE/MDT com resolução média a alta. Entretanto, o uso destes produtos cartográficos de alta resolução para estudos em grandes áreas pode ser limitado por restrições computacionais, sendo necessário nesses casos a derivação dos parâmetros morfométricos básicos com dados de resolução elevada e posteriormente reamostrá-los para uma resolução inferior, viabilizando seu processamento em função das limitações computacionais (GROHMANN, 2015).

Assim como o TauDEM, outros softwares podem ser utilizados para análises hidrológicas, tais como: GRASS, ArcSWAT, ArcHYDRO e IDRISI. Do mesmo modo, todos estes softwares utilizam MDE/MDT em sistemas de informações geográficas (GIS). De Amaral Macedo; Moreau (2019) com objetivo de avaliar o desempenho dos softwares citados anteriormente na delimitação automática de bacias hidrográficas, observaram que o software ArcHYDRO apresentou resultados diferentes dos demais softwares, com valores de área e perímetro da bacia inferiores aos resultados obtidos com os softwares ArcSWAT, TauDEM e GRASS. Já o software IDRISI apresentou valores próximos de área de delimitação, porém com valores de perímetro inferiores aos softwares ArcSWAT, TauDEM e GRASS. Estes, por sua vez, apresentaram resultados próximos de área e perímetro da bacia hidrográfica, bem como, a delimitação do polígono destes softwares apresentou representações mais próximas da realidade. Desta forma, os autores recomendam o uso ArcSWAT, TauDEM e GRASS, os quais apresentaram poucas diferenças entre si nos valores das variáveis observadas.

O Geographical Resources Analysis Support System, comumente referido como GRASS GIS, é um Sistema de Informação Geográfica (GIS) de código aberto, que

utiliza rasters e vetores combinados com subsistemas integrados de processamento de imagens e visualização de dados (MITASOVA; NETELER, 2013; EHLSCHLAEGGER, 2023). Este sistema proporciona um ambiente analítico completo com um vasto número de ferramentas auxiliares, bem como o acesso a vários tipos de dados via GDAL/OGR e álgebra avançada de mapas (JASIEWICZ, J.; METZ, 2011). O GRASS GIS pode ser utilizado para gerenciamento e análise de dados geoespaciais, processamento de imagens, produção de mapa e gráficos, modelagem espacial e visualização (EHLSCHLAEGGER, 2023).

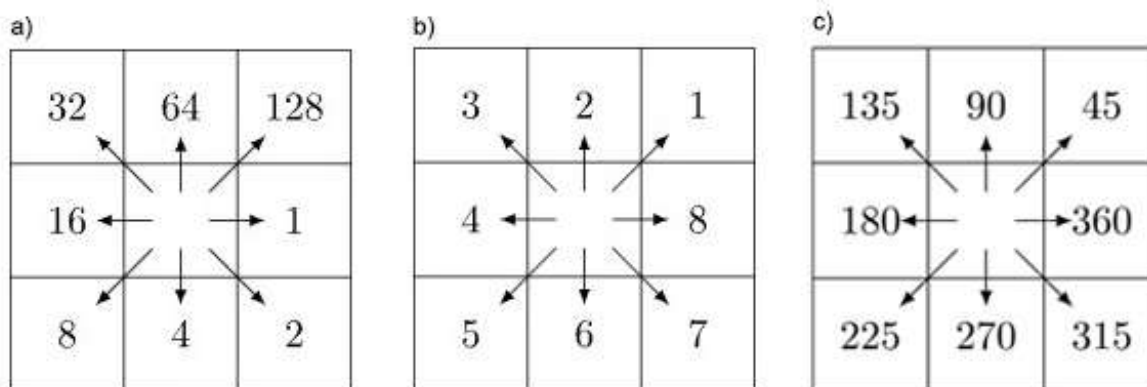
Entre as opções disponíveis no GRASS GIS, tem-se o módulo hidrológico denominado de *r.watershed*, o qual permite ao usuário calcular parâmetros hidrológicos e fatores RUSLE (EHLSCHLAEGGER, 2023). Entre os parâmetros calculados pelo *r.watershed*, este módulo possibilita utilizar MDE/MDT para extrair informações quanto a direção de fluxo (Flow Direction) e acúmulo de fluxo (Flow Accumulation), baseando-se no cálculo da acumulação do fluxo a montante, bem como a delimitação das bacias hidrográficas da paisagem. Nele os algoritmos partem do pressuposto de que a água naturalmente segue a direção mais íngreme e curta ao longo do relevo, acumulando-se nas áreas planas, planícies, vales e depressões (AMATULLI et al., 2020; EHLSCHLAEGGER, 2023).

No GRASS GIS, o módulo *r.watershed* oferece dois métodos para calcular o fluxo superficial. A determinação da direção de fluxo (Flow Direction) de cada célula para as células vizinhas ou descendentes é realizada pelos métodos D8 (Direção de Fluxo Única) e MFD (Direção de Fluxo Múltipla), sendo o método MFD habilitado por padrão neste software (EHLSCHLAEGGER, 2023). O método D8 modela a direção do fluxo de cada célula para sua célula vizinha mais íngreme na encosta (ESRI, 2016). O resultado da ferramenta Flow Direction executada no *r.watershed*, sobre um MDE/MDT por meio do método D8, é um raster completo com valores atribuídos que variam de 1 a 8 (Figura 1b), diferentemente do mesmo método empregado ao ArcGIS o qual utiliza potências de 2 a estes valores (Figura 1a), porém mantendo-se o princípio. Estes valores de cada célula, que compõem o raster, irão determinar a direção de fluxo (EHLSCHLAEGGER, 2023).

No GRASS GIS, as 8 direções são numeradas no sentido anti-horário, começando pelo número 1 na direção nordeste. A direção de fluxo é determinada ao multiplicar os

valores positivos por 45 (360° fracionado em 8 direções, resultando em 45° para cada direção), fornecendo a direção em graus em que o escoamento superficial se deslocará a partir da célula de processamento. Como exemplo, se a direção mais íngreme em relação a célula analisada for à esquerda, a direção de fluxo a partir da célula em processamento será codificada a 180° (Figura 1c), e assim sucessivamente (ESRI, 2016; EHLSCHLAEGGER, 2023).

Figura 1 – Codificação da direção do fluxo no (a) ArcGIS e (b,c) GRASS GIS.

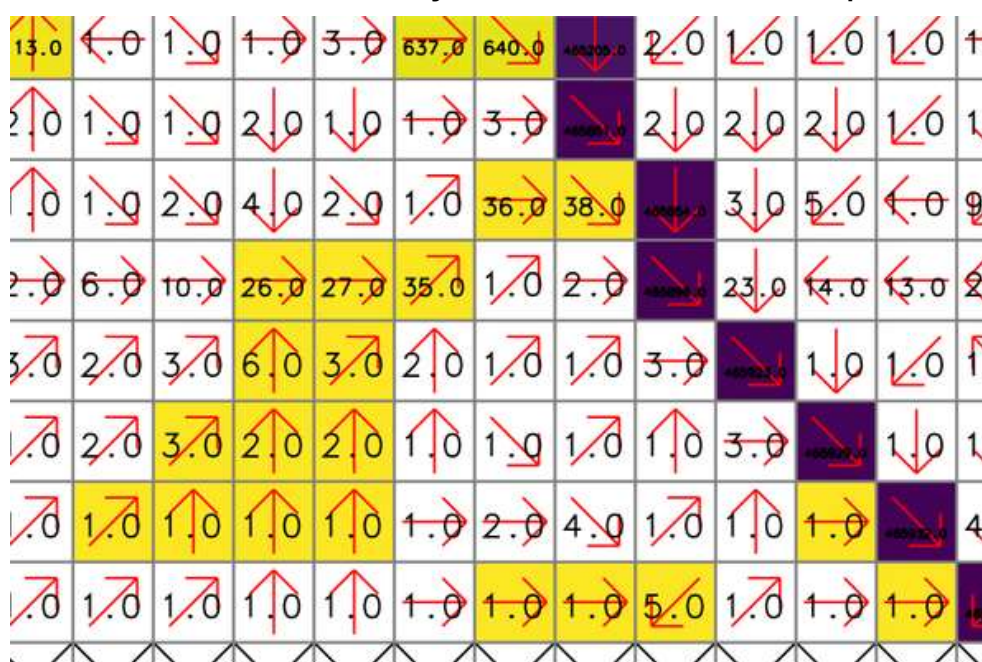


Fonte: Adaptado de CHO (2023)

Toda a análise de fluxo superficial baseia-se nos dados de elevação, tais como MDE/MDT. Neste caso, as células vazias (NULL) são ignoradas, e os valores zero ou negativos são classificados como dados de elevação inválidos pelo algoritmo, não sendo necessário o preenchimento de todas as células do mapa de elevação, pois o módulo r.watershed utiliza um algoritmo de menor custo, projetado para minimizar o impacto de possíveis erros de dados no MDE/MDT (EHLSCHLAEGGER, 2023). Caso a célula em processamento tiver valor menor do que as oito células vizinhas, essa célula receberá o valor do seu vizinho mais baixo e o fluxo será definido em direção a esta células. Mas caso todas as células vizinhas tiverem o valor inferior ao valor da célula em processamento, a célula ainda receberá o valor mais baixo, porém seu fluxo será definido pelo método MFD (ESRI, 2016; EHLSCHLAEGGER, 2023). O método MFD possibilita a distribuição do fluxo superficial para todas as células vizinhas com menor elevação, utilizando a inclinação direcionada às células vizinhas como fator de ponderação para a distribuição proporcional do fluxo, possibilitando a determinação do fluxo acumulado (Flow Accumulation) (EHLSCHLAEGGER, 2023).

O raster de saída do mapa de fluxo especifica a quantidade de unidades de fluxo superficial que cada célula (ou pixel) irá contribuir para o modelo da bacia hidrográfica. E o raster de saída do fluxo acumulado (Flow Accumulation) obtido por meio do módulo `r.watershed`, o qual se baseia na elevação fornecida pelo MDE/MDT e o resultado de direção de fluxo (Flow Direction), especifica a quantidade de fluxo superficial que atravessa cada célula do mapa (EHLSCHLAEGER, 2023). A Figura 2 demonstra o raster de saída contendo a direção de fluxo e fluxo acumulado construído com `r.watershed`.

Figura 2 – Raster de saída com as direções de fluxo e fluxo acumulado por `r.watershed`.



Setas vermelhas representam as direções de fluxo e os números representam o fluxo acumulado por `r.watershed`. Fonte: CHO (2023).

Sendo assim, Amatulli et al. (2020) reforçam que do ponto de vista computacional, o software GRASS no ambiente GIS permite funções mais rápidas e flexíveis para modelagem hidrológica, utilizando operações sequenciais de trabalho por meio de scripts automatizados, e possibilita o processamento de conjunto de dados muito grande utilizando algoritmos eficientes e bom gerenciamento de memória. Além disso, Neteler et al. (2012) destacam o GRASS como um exemplo de sucesso de desenvolvimento colaborativo, pois este sistema tende a proporcionar que o usuário baixe o código subjacente e o inspecione, avalie, compare e aprimore todos os algoritmos e métodos

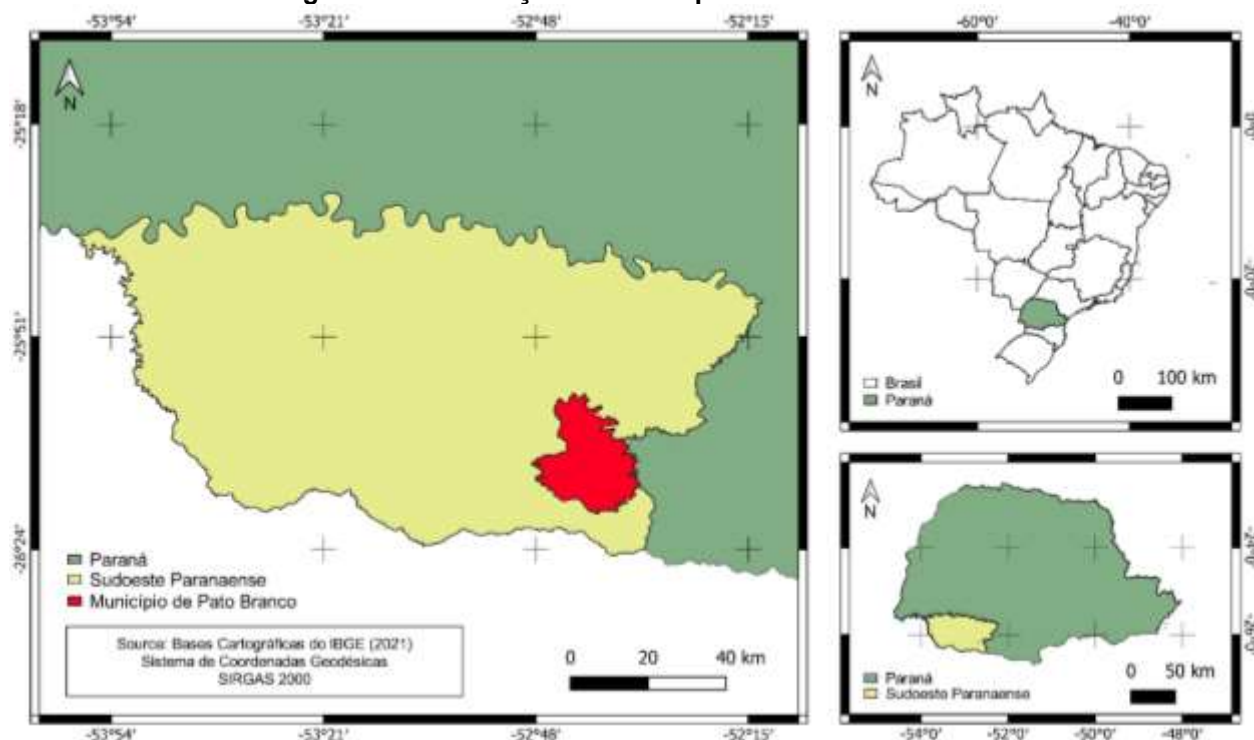
disponíveis, proporcionado ao GRASS uma estrutura continuamente melhorada e com adaptações locais para necessidades específicas, principalmente os estudos relacionados as questões ambientais.

3. METODOLOGIA

3.1. Área de estudo

O presente estudo foi realizado no município de Pato Branco, mesorregião sudoeste do Estado do Paraná, na área experimental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, coordenadas geográficas 26°10'34.57"S e 52°41'23.69"O (Figura 3). A altitude do local do experimento é de 758 metros. O solo foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico, com textura muito argilosa (77,4% argila, 20,3% areia e 2,3% silte).

Figura 3 – Localização do Município de Pato Branco-PR.



Fonte: Autoria própria (2024)

O clima no local é do tipo Cfa, de acordo com a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013), com temperatura média anual entre 14 e 22°C e precipitação média anual de 2109,79 mm ano⁻¹ (TABALIPA; FIORI, 2008). As chuvas são bem distribuídas durante o ano, sem estação seca definida, característico de um clima subtropical úmido. Agosto é considerado o mês com o menor índice pluviométrico e menores temperaturas. Outubro

é o mês mais chuvoso e as maiores temperaturas médias são observadas no mês de janeiro. A umidade relativa do ar fica em torno de 74% para todos os meses do ano e a velocidade média dos ventos de 10 km h^{-1} em várias direções (TABALIPA; FIORI, 2008).

3.2. Equipamentos e Softwares

A aquisição dos dados geoespaciais em campo foi realizada com o Drone modelo DJI Air 2 S (Figura 4a) e receptor GNSS RTK Hi-Target modelo V90 Plus com precisão vertical de 15mm e precisão horizontal de 8mm (Figura 4b). O plano de voo para aquisição das imagens aéreas obtidas com o Drone foi realizado utilizando o aplicativo DroneDeploy. O processamento destas imagens foi realizado com o software OpenDroneMap e o software CloudCompare foi utilizado para confeccionar o Modelo Digital de Terreno. A conversão das altitudes geométricas em ortométricas foi realizada com o software MAPGEO2015, e o software GeoPEC foi utilizado para determinar a qualidade cartográfica. Além dos softwares citados anteriormente, utilizou-se o software QGIS 3.22.11 com o complemento GRASS (Geographical Resources Analysis Support System) para obtenção dos resultados referentes ao Número de Células que drenam para o ponto amostral (Fluxo Acumulado), por meio do algoritmo r.watershed. Todos os softwares são disponibilizados pelos criadores gratuitamente.

Figura 4 – (a) Drone modelo DJI Air 2 S e (b) GNSS RTK modelo HI-TARGET V90 PLUS. Pato Branco-PR, 25/03/2023.



Fonte: Autoria própria (2024)

3.3. Aquisição de dados geoespaciais

A aquisição dos dados com o Drone ocorreu no dia 25/03/2023 às 11 horas, momento em que o sol estava posicionado perpendicularmente em relação ao solo, a fim de evitar sombreamentos dos objetos ou vegetações nas imagens. O voo foi realizado com o aplicativo DroneDeploy a 120 metros de altura, totalizando 99 imagens com dimensões de 5472 x 3648 pixel cada.

Aliado ao imageamento aéreo, para garantir a qualidade planialtimétrica do produto cartográfico, realizou-se aquisição de seis pontos de controle e cinco pontos de checagem com GNSS RTK. Alguns destes pontos foram confeccionados com material EVU (Figura 5a) e outros desenhados com cal virgem (Figura 5b) sobre o solo. Os locais destes pontos foram previamente determinados analisando o local de estudo na ferramenta Google Earth, de tal forma que possibilitasse sua identificação nas imagens aéreas e melhor representassem as informações do terreno.

Figura 5 – Ponto de controle (a) confeccionado com EVU e (b) desenhado com cal sobre o solo. Pato Branco-PR, 25/03/2023.



Fonte: Autoria própria (2024)

3.4. Processamento das imagens aéreas e Qualidade Cartográfica

O processamento das imagens aéreas foi realizado com pontos de controle, portanto foi realizado o procedimento de pontaria destes pontos. Este procedimento tem como objetivo posicionar as imagens obtidas com o drone usando como referência as

informações dos seis pontos de controle obtidas em campo com o GNSS RTK, aumentando, assim, a acurácia planialtimétrica do produto cartográfico.

Este processamento foi realizado nos padrões pré-estabelecidos pelo software OpenDroneMap, resultando em uma nuvem de pontos composta por 13.339.979 pontos, abrangendo uma área total de 194.870,68 m² e um produto cartográfico com GSD (Ground Sample Distance) de 10,15 cm, ou seja, valor que representa o tamanho do pixel da imagem em unidades de terreno.

Para determinar a qualidade cartográfica do processamento, foi utilizado o software GeoPEC. Para isso, foi realizada a identificação das coordenadas e cotas dos cinco pontos de checagem utilizando o ortomosaico e comparados com as mesmas informações obtidas em campo com o GNSS RTK. Os resultados obtidos com o software GeoPEC, o qual utiliza-se da metodologia proposta por Santos et al. (2016), apontam que as análises de precisão planimétrica e altimétrica correspondem a Classe A para escala 1:1000, ou seja, a melhor precisão determinada pelo Decreto 89.817 / ET-CQDG.

3.5. Geração do Modelo Digital de Terreno e dos Modelos Hidrológicos Distribuídos

Neste trabalho, foram construídos três modelos digitais de terreno (MDT), os quais serviram como base para obtenção dos Modelos Hidrológicos Distribuídos. O primeiro MDT foi construído por meio de curvas de níveis de um metro obtidas com estação total. No software QGIS, as curvas de nível vetorizadas foram transformadas em raster e posteriormente em superfície, tendo como resultado um MDT com pixel de 4 m² (Figura 11).

O segundo MDT foi desenvolvido no software OpenDroneMap a partir das imagens aéreas. Este MDT resultou em pixels com área de 0,01 m² (Figura 13). Entretanto, no presente estudo, a precisão excessiva não foi favorável, tendo em vista que o dossel da cultura do feijão foi identificado como variação do micro relevo. Além disso, o software OpenDroneMap não possui ferramentas de classificação da nuvem de pontos, e, desta forma, obter o MDT desejado.

O terceiro MDT foi construído no software CloudCompare, o qual possibilitou a classificação automática e/ou manual da nuvem de pontos obtida no processamento com

o software OpenDroneMap. No software CloudCompare foi adicionada a nuvem de pontos e realizado um procedimento de agrupamento de vértices da nuvem, criando uma malha triangular suavizada. Em seguida, foi extraída uma amostra da nuvem de pontos desta malha suavizada, com densidade de dez pontos por metro quadrado. Com a nova nuvem de pontos, foi realizada uma filtragem com o filtro CFS, cujo resultado obtido ao final deste processo corresponde a nuvem de pontos associada somente com a cota altimétrica do terreno. A construção deste MDT ocorreu rasterizando a nuvem de pontos referente as cotas altimétricas do terreno, onde, na conversão da nuvem de pontos para arquivo raster foi utilizada a projeção “z” e em cada célula da grade foi determinado como referência a altitude mínima, resultando no MDT com pixels representando 0,25 m² cada (Figura 15).

Com os arquivos MDTs criados, foram realizadas as análises hidrográficas do local de estudo. Estas análises foram realizadas pelo algoritmo r.watershed, onde, na interface deste comando foram adicionadas as camadas MDT separadamente, realizando análises individuais para cada MDT obtido neste estudo. Neste sentido, para todas as análises foi determinado o número mínimo de 150 células para cada bacia, em função da área total do produto cartográfico e com o intuito de padronizar esta variável, e construídos os mapas de Fluxo Acumulado, o qual representa o número de pixels que convergem para determinado ponto da paisagem.

Importante ressaltar que para obter os resultados do algoritmo r.watershed foi utilizada a área total de cada MDT, pois os resultados obtidos pelo GRASS GIS dependem das informações a montante do local de estudo.

3.6. Coleta de solo por processos erosivos

As coletas de solo, resultantes dos processos erosivos, foram realizadas no local de estudo utilizando três coletores portáteis de aço galvanizado, instalados sobre a superfície do solo. Todos os coletores foram confeccionados na forma de trapézio isósceles com as mesmas medidas: 30,0 cm de comprimento (Figura 6a); 10,0 cm de profundidade (Figura 6b); 17,0 cm na borda superior (Figura 6c); 7,5 cm na borda inferior (Figura 6d); 6,0 cm de altura lateral.

Figura 6 – Dimensões do coletor: (a) Comprimento; (b) Profundidade; (c) Borda superior; e (d) Borda inferior. Pato Branco-PR, 25/05/2023



Fonte: Autoria própria (2024)

O solo erodido, direcionado pelo coletor até um recipiente instalado no solo, logo abaixo da borda inferior, foi coletado em recipiente com formato cilíndrico com 9,0 cm de altura (Figura 7a) e 11,0 cm diâmetro (Figura 7b), totalizando um volume aproximado de 855,30 cm³ e área total de 501,02 cm².

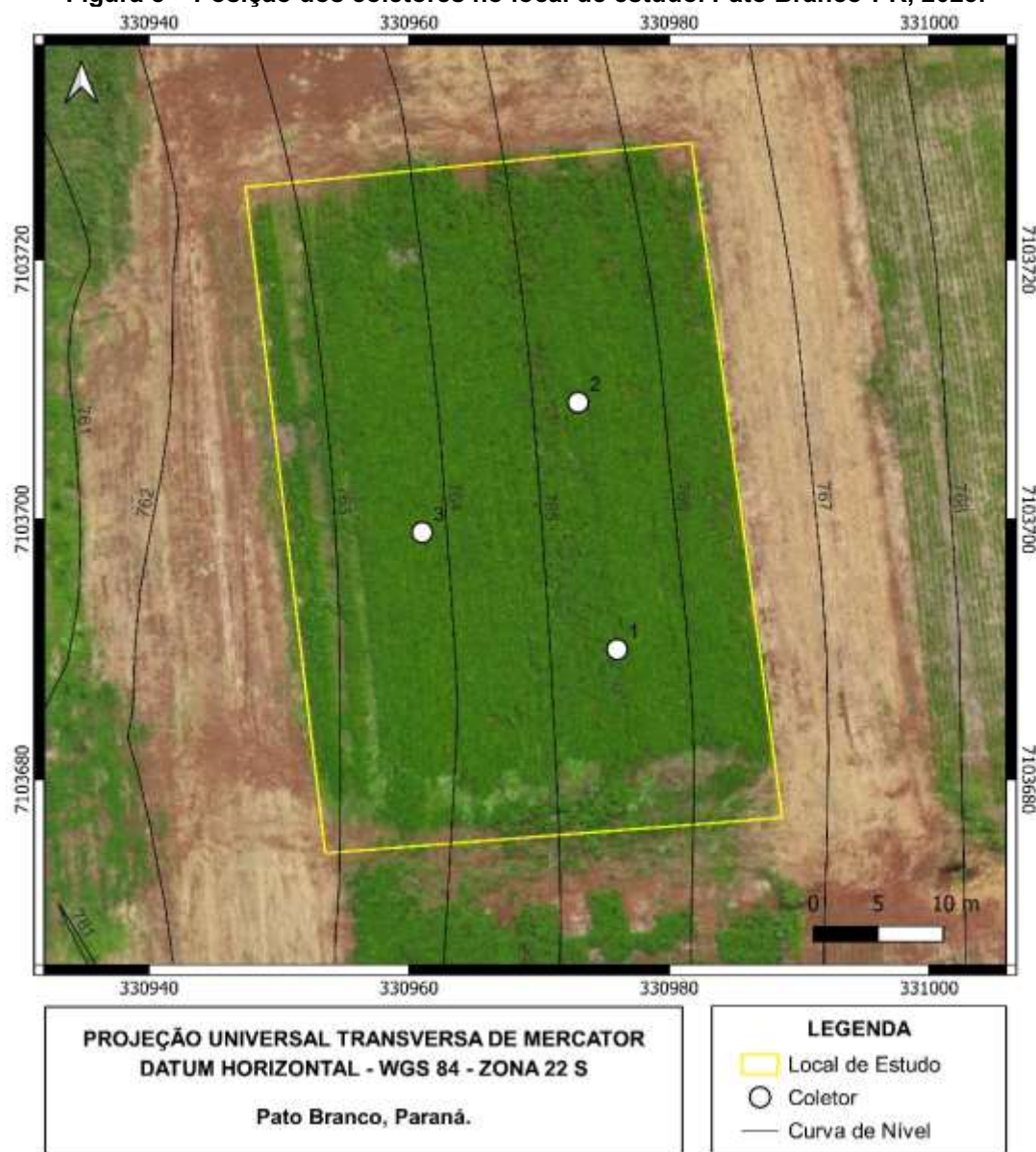
Figura 7 – Dimensões dos recipientes de coleta: (a) Altura e (b) diâmetro do recipiente. Pato Branco-PR, 10/07/2023.



Fonte: Autoria própria (2024)

Os três coletores e recipientes foram instalados em área cultivada com feijão (*Phaseolus vulgaris*) no início do estágio fenológico V4 (Figura 8), e ao lado de cada coletor foi instalado um pluviômetro para aferir a pluviosidade em cada coleta (Figura 9). O referido talhão possui aproximadamente 1800 metros quadrados de área total, com 35 metros de largura e 50 metros de comprimento.

Figura 8 – Posição dos coletores no local de estudo. Pato Branco-PR, 2023.



Fonte: Autoria própria (2024)

As coletas foram realizadas após cada evento chuvoso, totalizando 12 coletas ao longo do ciclo do feijão. As coletas no estágio fenológico V4 ocorreram nos dias 27/02/2023, 01/03/2023 e 03/03/2023. As coletas de solo erodido no período que compreende os estágios R5 e R6 ocorreram nos dias 07/03/2023, 10/03/2023 e 13/03/2023, e as coletas dos dias 15/03/2023, 23/03/2023 e 11/04/2023 corresponderam aos estágios R7, R8 e R9. No dia 14/04/2023 foi aplicado dessecante no feijão e no dia 18/04/2023 os restos culturais foram triturados com o equipamento Triton, com o intuito

de simular a exposição do solo após colheita do feijão, com coletas realizadas nos dias 20/04/2023, 27/04/2023 e 03/05/2023.

No dia 25/05/2023 foi realizada a semeadura de aveia branca (*Avena sativa* L.) neste talhão, com a semeadeira Semeato SHM 11/13 e distância entre linhas de 18 centímetros. Tanto o feijão quanto a aveia branca foram semeadas em contorno, ou seja, orientado paralelamente em relação a direção do declive. As coletas de solo erodido ao longo da cultura da aveia branca ocorreram nos dias 25/05/2023, 29/05/2023, 12/06/2023, 16/06/2023, 23/06/2023, 26/06/2023, 10/07/2023, 11/07/2023, 14/07/2023 e 10/08/2023, totalizando dez coletas ao longo do ciclo da aveia branca.

Figura 9 – Sistema de coleta e armazenamento de sedimento instalado no campo com seu, respectivo, pluviômetro. Pato Branco-PR, 27/02/2023.



Fonte: Autoria própria (2024)

Após cada evento chuvoso, os recipientes contendo o solo erodido (Figura 10a) eram devidamente substituídos por outro recipiente idêntico e encaminhado para o laboratório de Física do Solo da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco, onde foi realizada a separação das partículas do solo erodido por meio da filtragem, utilizando filtros comerciais de papel no tamanho grande (Figura 10b).

Figura 10 – (a) Recipientes contendo solo e água após evento chuvoso e (b) filtragem do material coletado. Pato Branco-PR, 23/03/2023.



Fonte: Autoria própria (2024)

Após filtragem, os filtros contendo o solo erodido foram secos em estufa a 45°C por 6 dias, até atingirem peso constante, e posteriormente subtraído o valor médio dos filtros secos em estufa, resultando somente na massa do solo erodido.

3.7. Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos no local de estudo, referente a precipitação pluviométrica (mm), foram obtidos por meio de três pluviômetros instalados ao lado de cada coletor, e os valores de intensidade pluviométrica (mm h^{-1}) foram estimados pela pluviosidade de cada evento chuvoso dividido pelo tempo aproximado de duração da chuva em cada coleta, com dados observados no site do Simepar e Windy.

3.8. Análise Estatística

Com os resultados de perdas de solo, foram determinadas quatro variáveis respostas para as duas culturas individualmente. São elas: gramas de solo (g), gramas de solo por milímetro de chuva (g mm^{-1}), gramas de solo por intensidade pluviométrica ($\text{g mm}^{-1} \text{h}^{-1}$) e gramas por metro quadrado (g m^{-2}).

A variável resposta gramas de solo (g) levou em consideração somente a massa de solo que foi erodido para cada coletor. A variável gramas de solo por milímetro de chuva (g mm^{-1}) foi obtida pela razão entre a massa de solo erodido e captada em cada coletor e o volume pluviométrico observado em cada coleta. A variável gramas de solo por intensidade pluviométrica ($\text{g mm}^{-1} \text{h}^{-1}$), por sua vez, foi determinada pela razão entre a massa de solo erodido em cada coletor e a intensidade de cada evento chuvoso no período de coleta. Para determinar as perdas totais de solo foi utilizado o valor total de gramas de solo coletado em cada coletor com a sua respectiva área de contribuição e padronizado para gramas por metro quadrado (g m^{-2}) para cada cultura, feijão e aveia branca, sendo, posteriormente transformado para quilo gramas por hectare (kg.ha^{-1}).

Foram avaliadas as perdas de solo sob condições naturais em dois cultivos anuais separadamente, feijão e aveia branca, cultivados sucessivamente. Os tratamentos na cultura do feijão foram compostos pelos níveis de cobertura vegetal sobre o solo, sendo o tratamento T1 = período de solo descoberto – pós colheita, tratamento T2 = baixa cobertura do solo, tratamento T3 = cobertura intermediária do solo e o tratamento T4 = máxima cobertura do solo. Do mesmo modo para a cultura do feijão, os tratamentos da aveia branca foram determinados pelos níveis de cobertura vegetal sobre o solo, compostos pelos tratamentos T1 = solo descoberto, tratamento T2 = baixa cobertura do solo, tratamento T3 = cobertura intermediária do solo, tratamento T4 = alta cobertura do solo e tratamento T5 = máxima cobertura do solo.

Os dados obtidos para análise estatística da perda de solo em campo, deu-se pelas médias das coletas em cada tratamento, e as repetições representadas pelos coletores 1, 2 e 3. Estes valores médios foram utilizados para diminuir a variabilidade das perdas de solo em cada tratamento. Sendo as análises do feijão compostas por quatro tratamentos e três repetições, e da aveia-branca por cinco tratamentos e três repetições, ambos com Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC).

Devido à grande variabilidade da massa de solo coletado em cada evento chuvoso, os dados foram transformados pela função raiz cúbica e todas as variáveis analisadas atenderam aos pressupostos da normalidade dos resíduos e homogeneidade de variâncias, ambos a 5% de significância de acordo com o teste de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Atendendo aos pressupostos, os dados foram comparados de acordo com o teste F e analisados pelo teste de Duncan com 10% de probabilidade de erro. Sendo que, para análise e comparação de todos os dados, foi utilizado o software estatístico R Studio (versão 2023.09.0+463).

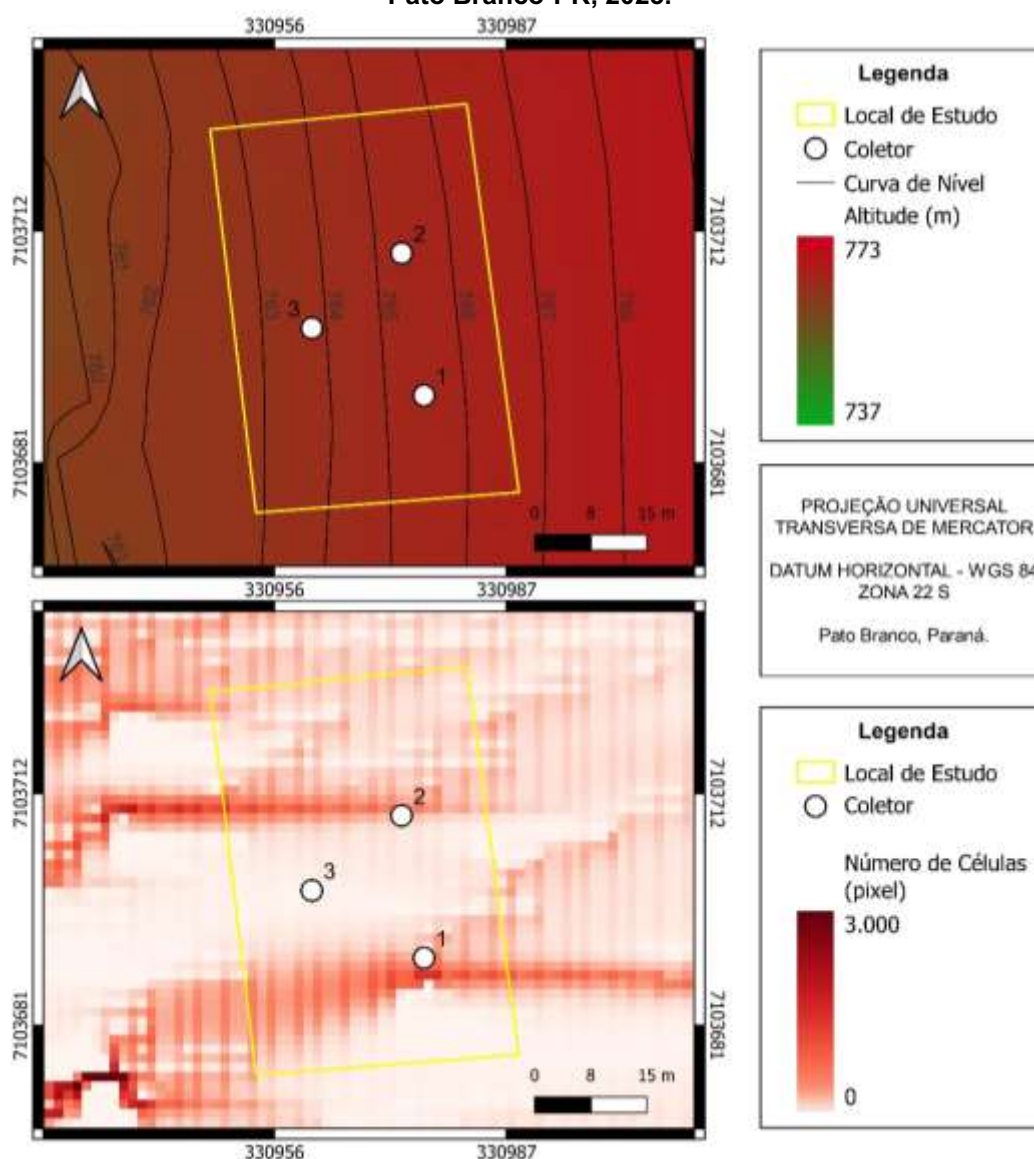
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Geração de MDT e Modelos Hidrológicos Distribuídos com imagens Geradas por Drones.

Durante o processamento dos dados, pode-se observar uma relação direta entre os Modelos Digitais de Terreno (MDT) e os resultados produzidos pelo softwares GRASS GIS, os quais compreendem as informações referentes as análises hidrográficas do algoritmo *r.watershed*. Esta relação entre os MDTs e as análises hidrográficas pode ser explicada pela diferença de detalhamento e valores de altitudes representados nos três MDTs (Figuras 11, 12 e 13), um obtido por meio de curvas de níveis com estação total e dois construídos por meio de Modelo Digital de Superfície (MDS) obtido com as imagens aéreas capturadas pelo Drone.

O Modelo Digital de Terreno construído por meio das curvas de nível levantadas em campo com estação total (MDT_{ET}) resultou em um mosaico que reproduz, de forma mais fidedigna, a altitude real de cada ponto no terreno, quando comparado aos modelos gerados por imagens de drone (Figura 11). Por outro lado, a resolução espacial deste MDT, 4 m² por pixel, é inferior aos dois MDTs gerado por meio das imagens obtidas com o drone. Este menor detalhamento proporcionado pelo MDT_{ET} reflete-se na qualidade das informações hidrológicas em relação ao fluxo acumulado gerado pelo algoritmo *r.watershed* (Figura 11) e, conseqüentemente, no cálculo da área de contribuição de cada ponto coletado. Neste caso, o número de células que convergem para os coletores 1, 2 e 3, são: 368,68, 185,82 e 17,78, respetivamente. Portanto, tendo em vista que cada pixel deste MDT apresenta área de 4 m², a área de contribuição do coletor 1 resultou em 1.474,72 m², o coletor 2 resultou em 743,28 m² e o coletor 3 resultou em 71,12 m², valores maiores do que os resultados observados nos dois MDTs realizados com imagens aéreas capturadas com o drone.

Figura 11 – Modelo Digital de Terreno construído por meio de curvas de níveis (MDT_{ET}) obtidas com estação total e Mapa do Fluxo Acumulado gerado a partir do MDT_{ET} no software GRASS GIS. Pato Branco-PR, 2023.

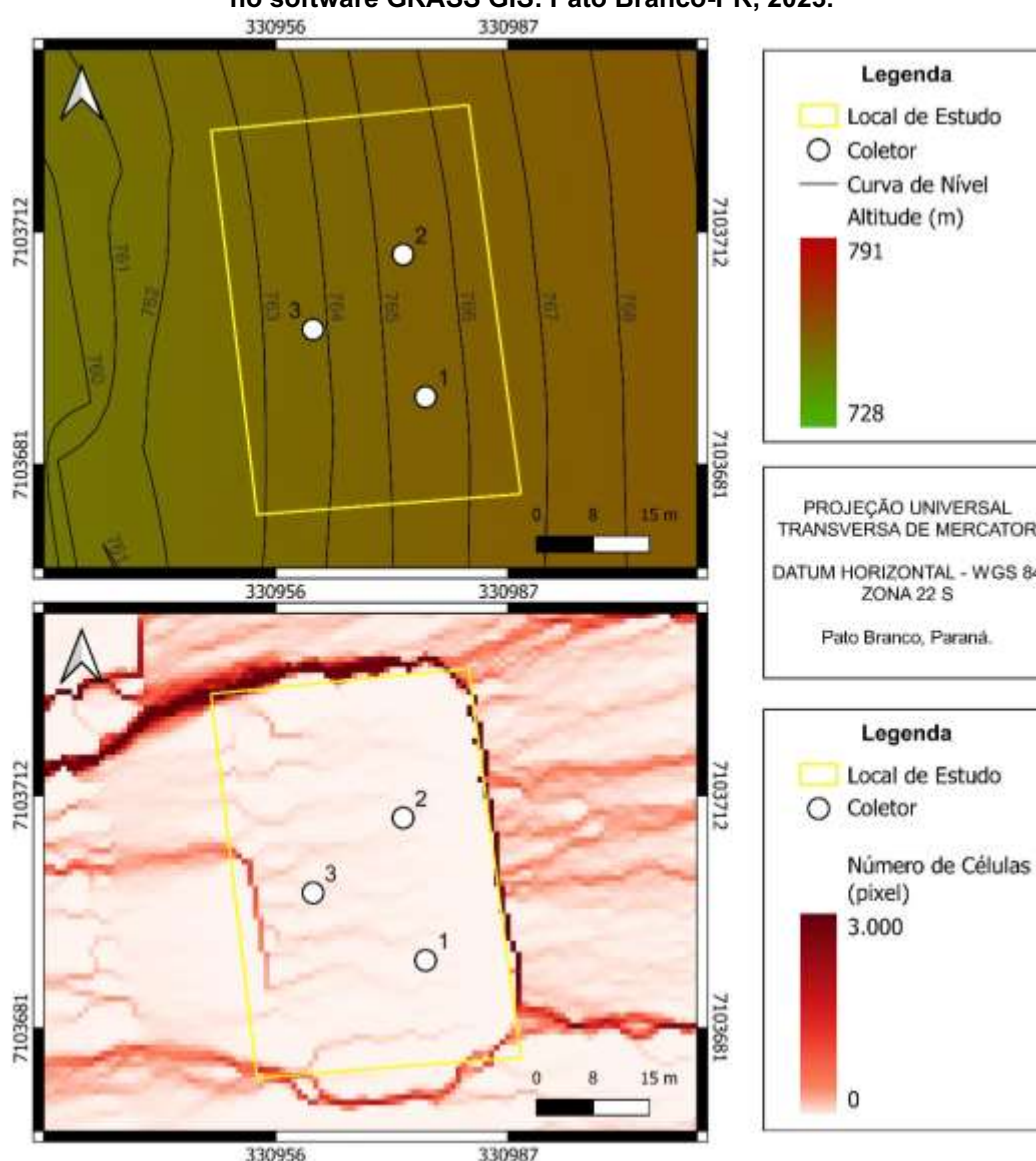


Fonte: Autoria própria (2024)

Por outro lado, o MDT gerado a partir de imagens de drones e construído no software OpenDroneMap (MDT_{ODM}) apresentou o maior detalhamento entre os três MDTs construídos neste trabalho, resultando em pixel com área de 0,01 m². Em contrapartida, o pequeno valor atribuído a área de cada pixel, aliado a incapacidade deste software em remover a cobertura vegetal do talhão contendo os coletores, resultou em valores de cotas ligeiramente superiores as cotas relacionadas ao solo, pois o software identifica os pontos que incidem sobre a cobertura vegetal como pertencentes as cotas do terreno

(Figura 12). Neste caso, ao contrário da situação anterior, é possível observar que devido ao excesso de detalhamento e a pequena área de cada pixel, nota-se no mapa de fluxo acumulado gerado por meio do MDT_{ODM} (Figura 12) que a trajetória do escoamento superficial tende a contornar o local de estudo, pois o algoritmo r.watershed identificou este local com cotas mais elevadas em relação as cotas do solo exposto as margens do talhão, interferindo no números de células resultantes para cada coletores.

Figura 12 – Modelo Digital de Terreno construído no software OpenDroneMaps (MDT_{ODM}) por meio de imagens aéreas realizadas com drone e Mapa do Fluxo Acumulado gerado a partir do MDT_{ODM} no software GRASS GIS. Pato Branco-PR, 2023.



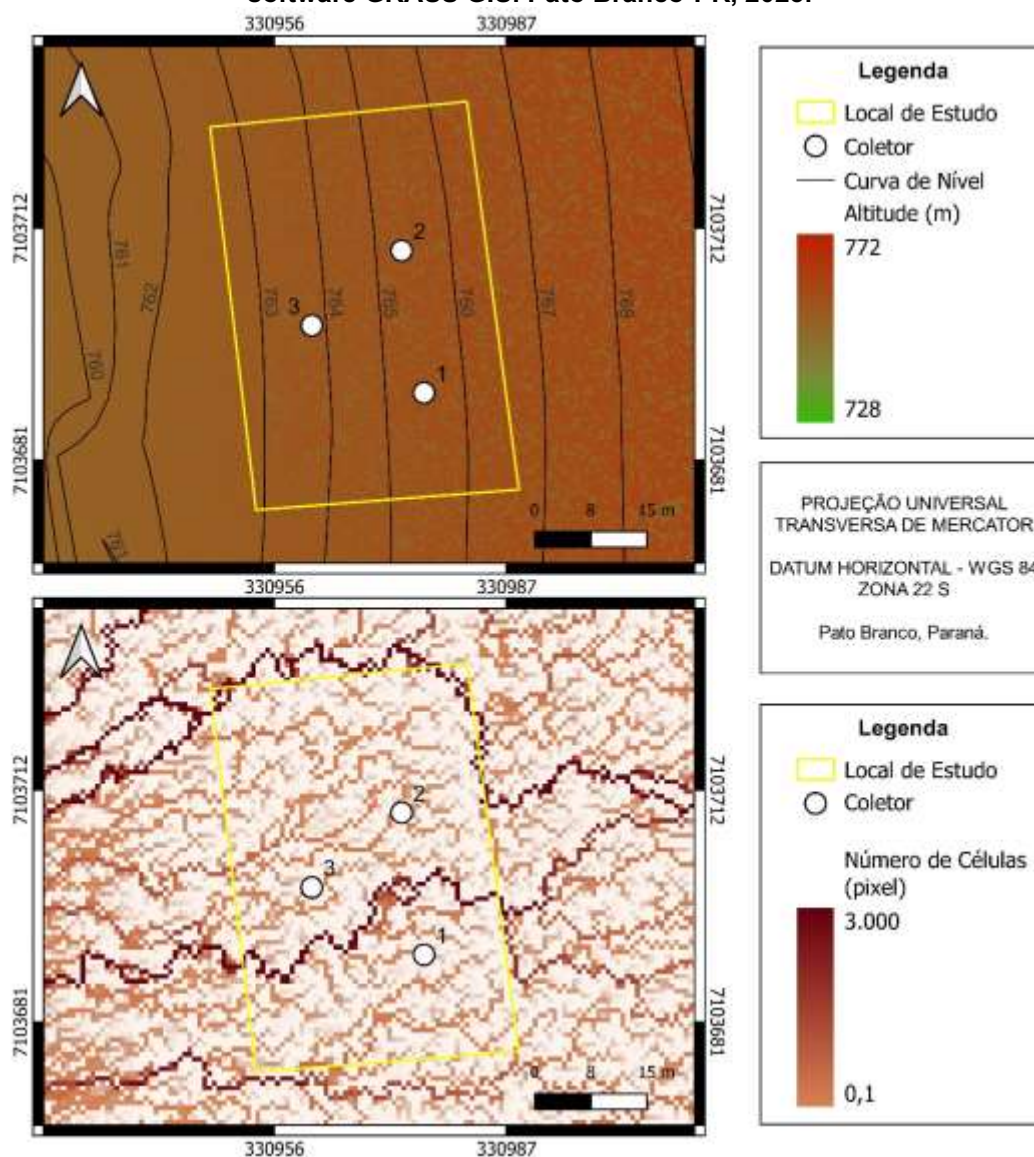
Fonte: Autoria própria (2024)

Segundo Amatulli et al., (2020) este módulo utiliza algoritmos para determinar o caminho natural da água sobre o solo, partindo das altitudes mais elevadas em direção aos declives mais íngremes e curtos da paisagem, até o seu acúmulo nas áreas planas, planícies, depressões e vales. Sendo assim, o número de células resultante no coletor 1 é de 7,57 células, no coletor 2 de 6,99 células e no coletor 3 de 25,34 células, resultando na área de contribuição para os coletores 1, 2 e 3, de: 0,08 m², 0,07 m² e 0,25 m², respectivamente (Figura 12). Valores estes, consideravelmente inferiores aos observados para os números de células gerados a partir do MDT_{ET}.

Em relação ao Modelo Digital de Terreno construído com o software CloudCompare (MDT_{CC}) (Figura 13) que utiliza um sistema de filtragem da nuvem de pontos e permite a eliminação de pontos que correspondem as cotas dos objetos sobre o solo, como é o caso do dossel das plantas no talhão onde foram instalados os coletores, resultou em um MDT com valores de altitudes relacionados somente com as cotas do solo e cada pixel com área de 0,25 m². O MDT_{CC} (Figura 13) resultou nas melhores informações sobre o número de células que atravessam o local de estudo. É possível observar no mapa de Fluxo Acumulado (Figura 13) uma redução na tendência de contornar o local do talhão onde estão instalados os coletores, quando comparado com o mapa de Fluxo Acumulado obtido com o MDT_{ODM} (Figura 12), e maior detalhamento no resultado de número de células no interior do talhão quando comparado com os dois mapas de Fluxo Acumulado anteriores (Figuras 11 e 12).

Segundo Ehlschlaeger (2023), os melhores resultados sobre o Fluxo Acumulado obtidos com o MDT_{CC} (Figura 13) ocorreu em função do algoritmo de menor custo, utilizado pelo módulo r.watershed, em ignorar as células vazias do MDT para a determinação das informações de fluxo superficial, onde neste caso as células vazias correspondem aos objetos sobre o solo, os quais foram eliminados pelo filtro do software CloudCompare durante a construção do MDT por meio do MDS, mantendo-se somente as informações das cotas dos pontos sobre o solo e reduzindo o impacto de possíveis erros de dados no MDT. Desta forma, o número de células nos coletores 1, 2 e 3 resultaram em 23,85, 2,63 e 9,29, respectivamente, correspondendo a uma área de contribuição no coletor 1 de 5,96 m², no coletor 2 de 0,67 m² e no coletor 3 de 2,32 m².

Figura 13 – Modelo Digital de Terreno construído no software CloudCompare (MDT_{cc}) por meio de imagens aéreas realizadas com drone e Mapa do Fluxo Acumulado gerado a partir do MDT_{cc} no software GRASS GIS. Pato Branco-PR, 2023.



Fonte: Autoria própria (2024)

Embora o MDT_{ET} tenha representado somente as cotas do terreno, a baixa resolução espacial, quando comparado com a resolução obtida pelas imagens do drone, resultou em baixa precisão quanto a área de contribuição de cada coletor. O valor observado pelo MDT_{ET} foi muito maior do que o observado nos resultados obtidos com os MDT construídos por meio das imagens aéreas do drone.

A diferença observada nos números de células obtidos por meio das imagens aéreas com drone (Figuras 12 e 13), ocorre devido à dificuldade de se obter valores das

cotas relacionadas ao nível do solo no MDT construído por meio do MDS gerado com as imagens do Drone. Esta dificuldade também foi observada por Oliveira et al. (2017) ao avaliar a aplicabilidade e as limitações de um Modelo Digital de Terreno (MDT) extraído por meio da filtragem de um Modelo Digital de Superfície (MDS) construído a partir de imagens obtidas com VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado).

Oliveira et al. (2017) utilizou imagens obtidas com VANT para extrair o MDT por meio do MDS e posteriormente comparou este MDT com o levantamento topográfico realizado em campo utilizando GNSS RTK e concluiu que nos locais com maiores declividades e densa cobertura vegetal, maiores erros são esperados, pois normalmente os softwares utilizados para geração de MDT são dependentes de pontos visíveis no terreno para remover a cobertura vegetal por meio de algoritmos, os quais realizam a remoção da classe de alvo pelas variações que ocorrem na borda em direção ao centro do dossel (OLIVEIRA et al., 2017).

Portanto, os resultados obtidos pelo módulo *r.watershed* apresentaram comportamentos diferentes ao interceptarem o local de cultivo das plantas, pois nesta área o MDT_{ODM} possui altitudes ligeiramente superiores em comparação as altitudes dos demais MDTs. Neste local, a cobertura vegetal proporcionada pela área de cultivo do feijão, com altura média em relação ao solo de 30 cm; 35 m de largura e 55 m de comprimento, bem como a declividade média de 8,66%, dificultaram a obtenção dos pontos relacionadas ao solo, principalmente no centro deste talhão, pois o software utiliza as informações dos pontos que representam o solo, os quais, para este caso, encontram-se principalmente na periferia do talhão. Diante disso, foi necessário realizar a filtragem da nuvem de pontos com o software CloudCompare, o qual foi capaz de identificar os pixels visíveis que representam as cotas do solo no interior do dossel e eliminar as demais células que representam as informações dos objetos que estão sobre o solo, resultando em um MDT com maior representatividade da superfície do solo (MDT_{CC}) e melhores informações quanto ao Fluxo Acumulado com o software GRASS GIS, o qual baseou-se apenas nas células contendo as cotas do terreno para a análise de fluxo superficial.

4.2. Perdas de solo por processos erosivos

4.2.1. Perdas de solo por processos erosivos em lavoura de feijão

Em relação as perdas de solo, não foi observado diferenças significativas entre os tratamentos que representam o período de solo descoberto (T1), a baixa cobertura vegetal (T2) e a cobertura intermediária do solo (T3) que perderam, respectivamente, 4,94 g, 7,68 e 3,70 g de solo. Entretanto, as menores perdas foram observadas no tratamento T4, que representa a máxima cobertura de solo observada durante o período de estudo (1,36 g de solo), mas que não diferiu da massa de solo perdida pelo T3 que, por sua vez, representa uma cobertura intermediária do solo (Tabela 1).

Por outro lado, os valores médios de gramas de solo coletadas por milímetro de chuva e gramas de solo por pluviosidade, não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos avaliados no presente estudo (Tabela 1).

Tabela 1 – Comparação de médias das variáveis gramas de solo (g), gramas de solo por pluviosidade (g mm^{-1}) e gramas de solo por intensidade pluviométrica ($\text{g mm}^{-1} \text{h}^{-1}$) na cultura do feijão. Pato Branco-PR, 2023.

Tratamento	g	g	solo g mm^{-1}	$\text{g mm}^{-1} \text{h}^{-1}$
T1	4,94	a*	0,12	a
T2	7,68	a*	0,21	a
T3	3,70	ab	0,06	a
T4	1,36	b	0,12	a
Coefficiente de variação (%)	19,15		20,66	22,23

*Dados não seguidos por mesma letra, na coluna, diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Duncan, em nível de 10% de probabilidade de erro. T1 (período de solo descoberto – pós colheita), T2 (baixa cobertura do solo – estágio vegetativo de referência V4), T3 (cobertura intermediária do solo – estágio vegetativo de referência R9), T4 (máxima cobertura do solo – estágio vegetativo de referência R6). Fonte: Autoria própria (2024)

Os maiores valores médios de perdas de solo observados nos tratamentos T1 e T2 possivelmente estão atrelados aos menores índices de cobertura vegetal nesses dois momentos e maiores valores de intensidade pluviometria, 7,78 e 14,06 mm.h^{-1} , respectivamente (Tabela 2). É importante ressaltar que o valor atribuído a intensidade pluviométrica foi estimado pela razão entre a pluviosidade total e o tempo de duração do evento chuvoso.

Tabela 2 – Precipitação acumulada e intensidade pluviométrica na cultura do feijão. Pato Branco - PR, 2023.

Tratamento	Precipitação acumulada mm	Intensidade pluviométrica mm.h ⁻¹
T1	115,0	7,78
T2	82,5	14,06
T3	157,5	2,27
T4	47,5	1,15
Total	402,5	-

T1 (período de solo descoberto – pós colheita), T2 (baixa cobertura do solo – estágio vegetativo de referência V4), T3 (cobertura intermediária do solo – estágio vegetativo de referência R9), T4 (máxima cobertura do solo – estágio vegetativo de referência R6). Fonte: Autoria própria (2024).

As maiores intensidades pluviométricas observadas nestes dois tratamentos foram observadas durante os meses de maior erosividade das chuvas na região, corroborando dados apresentados por Waltrick et al. (2015) com dados pluviométricos no período entre 1986 e 2008 para todo o estado do Paraná. Segundo os autores, os maiores valores de erosividade observados na mesorregião sudoeste do Paraná ocorrem nos meses de janeiro ($1100 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{mês}^{-1}$), maio ($1100 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{mês}^{-1}$) e outubro ($1900 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{mês}^{-1}$), sendo a média anual de Pato Branco igual a $11861 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

No presente estudo, os maiores índices de intensidades pluviométricas estimados nos tratamentos T1 e T2 estão relacionadas as maiores erosividades das chuvas no momento das coletas, sendo as coletas do tratamento T1 (período de solo descoberto – pós colheita) realizadas no final de abril e maio, meses em que a erosividade média é em torno de 800 a $1200 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{mês}^{-1}$, e as coletas do tratamento T2 (baixa cobertura do solo – estágio vegetativo de referência V4) realizadas no final de fevereiro e início de março, com erosividades médias em torno de 800 a $1000 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{mês}^{-1}$ (WALTRICK et al., 2015).

A associação destes fatores provavelmente favoreceu o processo de desagregação das partículas do solo provocados pelo impacto das gotas de chuva. Além disso, a ausência de cobertura vegetal favorece ao fenômeno de salpicamento das partículas dispersadas, as quais podem ter sido coletadas diretamente pelos coletores instalados no campo. Ademais, o salpicamento contribui com a obstrução dos poros, favorecendo a formação do selamento superficial do solo, reduzindo as taxas de infiltração da água, intensificando o escoamento superficial e as perdas de solo. Segundo

Ruthes et al. (2012), solos com textura argilosa ou muito argilosa, e baixos teores de areia e silte, tal como os Latossolos, geralmente apresentam maior agregação entre as partículas, conferindo maior resistência do solo à ação da água, resultando em menores números de partículas dispersas, reduzindo a desagregação e o transporte de sedimentos. Toda via, os autores observaram elevados valores de erodibilidade neste tipo de solo em estudo conduzido na região sudoeste do Paraná, pois possivelmente a formação da crosta superficial é responsável pela redução da capacidade de infiltração da água e aumento no escoamento superficial.

A maior cobertura do solo durante o período de coletas foi observada no tratamento T4. Embora estudos realizados em diferentes densidades populacionais ou sob diferentes espaçamentos entre aspersores observaram a tendência de incremento no índice de área foliar (IAF) com o avanço dos estágios fenológicos da cultura do feijão, sendo maior nas fases de desenvolvimento das vagens à maturação (REZENDE, et al., 2002; SILVA; LIMA; MENEZES, 2007), é importante destacar que durante o período de estudo o tratamento T3, sofreu drástica redução na cobertura vegetal no estágio R9 devido a aplicação de dessecante sobre a cultura e, por consequência, a coleta realizada após esta aplicação, com pluviosidade total de 105 mm, apresentou o terceiro maior valor de perdas de solo entre todas as coletas, provavelmente devido a maior exposição do solo ao impacto das gotas de chuva e o alto índice pluviométrico. Além disso, durante o estágio fenológico do tratamento T3, foi observado o maior valor pluviométrico acumulado entre os tratamentos, totalizando 157,50 mm. Neste caso, o grande índice pluviométrico acumulado possivelmente excedeu a capacidade de infiltração da água no perfil, favorecendo o escoamento superficial e resultando em maiores perdas de solo.

Por outro lado, o tratamento T4 apresentou o menor valor médio de perda de solo, sendo significativamente inferior aos tratamentos T1 e T2. Este comportamento possivelmente está atrelado a maior cobertura vegetal deste tratamento em relação aos tratamentos que apresentaram maiores perdas de solo. Dechen et al. (2015) ao estudarem as perdas e custos relacionados a erosão hídrica sobre diferentes taxas de cobertura do solo e mantendo os demais fatores constantes, observaram que o aumento na taxa de cobertura favoreceu a retenção das partículas do solo e controlou suas perdas em relação ao solo descoberto. Além disso, os baixos valores de precipitação acumulada

(47,50 mm) e intensidade pluviométrica ($1,15 \text{ mm.h}^{-1}$) neste tratamento (T4) durante o período de estudo possivelmente permitiu a infiltração da água da chuva no solo, contribuindo para os baixos valores médios de perdas de solo neste tratamento (Tabela 1).

A variável gramas de solo por metro quadrado (g.m^{-2}) foi determinada para cada MDT gerado neste estudo, pois o número de células obtido por meio do algoritmo r.watershed, o qual representa o número de pixel que drenam para o ponto de coordenada de cada coletor, apresenta resultados diferentes para cada MDT utilizado neste procedimento. É possível observar que os valores de perdas de solo por metro quadrado possuem o mesmo comportamento entre cada MDT utilizado na análise hidrológica, mas não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos para nenhuma das análises (Tabela 3).

Tabela 3 – Comparação de médias da variável gramas de solo por metro quadrado (g.m^{-2}) obtidas por meio de MDT_{ET}, MDT_{ODM} e MDT_{CC} na cultura do feijão. Pato Branco-PR, 2023.

Tratamento	solo (g.m^{-2})		
	MDT _{ET}	MDT _{ODM}	MDT _{CC}
T1	0,0229 a*	68,9539 a	4,7706 a
T2	0,0350 a	107,1855 a	7,0607 a
T3	0,0256 a	43,4883 a	3,0649 a
T4	0,0036 a	21,7814 a	1,5446 a
Coeficiente de variação (%)	56,07	33,54	54,71

*Dados não seguidos por mesma letra, na coluna, diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Duncan, em nível de 10% de probabilidade de erro. T1 (período de solo descoberto – pós colheita), T2 (baixa cobertura do solo – estágio vegetativo de referência V4), T3 (cobertura intermediária do solo – estágio vegetativo de referência R9), T4 (máxima cobertura do solo – estágio vegetativo de referência R6). Fonte: Autoria própria (2024)

As perdas totais de solo durante o ciclo produtivo do feijão foram determinadas por meio do somatório da massa de solo por metro quadrado coletado nos três coletores em todos os eventos chuvosos e para cada MDT construído (Tabela 4).

MDT_{ET}, com área de pixel de 4 m^2 , apresentou o menor valor de perdas totais de solo de $7,838 \text{ Kg.ha}^{-1}$ na cultura do feijão. Por outro lado, o MDT_{ODM} apresentou o maior valor de perdas de solo entre os resultados obtidos, totalizando $17598,70 \text{ Kg.ha}^{-1}$, sendo estes influenciados pela reduzida área do pixel deste MDT ($0,01 \text{ m}^2$) e a variação do relevo no local de instalação dos coletores, resultando em baixos valores de números de células em cada coletor, e por consequência, elevados resultados de perdas de solos

totais. O MDT_{CC} , por sua vez, resultou em valor de perdas totais de solo de 1497,70 $Kg.ha^{-1}$ durante o período de estudo na cultura do feijão (Tabela 4).

Tabela 4 – Perdas totais de solo durante o ciclo do feijão utilizando o número de células obtido por meio do MDT_{ET} , MDT_{ODM} e MDT_{CC} . Pato Branco-PR, 2023.

Coletor	Solo g	Área Pixel m^2	N. Células Und.	Área Contribuição m^2	Solo $g.m^{-2}$	solo $Kg.ha^{-1}$
MDT_{ET}						
1	32,05	4	368,68	1474,72	0,0217	0,217
2	80,59	4	185,82	743,28	0,1084	1,084
3	46,49	4	17,78	71,12	0,6537	6,537
Total	159,14	-	-	-	0,7838	7,838
MDT_{ODM}						
1	32,05	0,01	7,57	0,08	423,43	4234,30
2	80,59	0,01	6,99	0,07	1152,96	11529,60
3	46,49	0,01	25,34	0,25	183,48	1834,80
Total	159,14	-	-	-	1759,87	17598,70
MDT_{CC}						
1	32,05	0,25	23,85	5,96	5,38	53,80
2	80,59	0,25	2,63	0,66	122,57	1225,70
3	46,49	0,25	9,29	2,32	20,02	200,20
Total	159,14	-	-	-	147,97	1497,70

Fonte: Autoria própria (2024)

A diferença entre os resultados de perdas de solo por metro quadrado (Tabela 3) e perdas totais de solo (Tabela 4) obtidos pelos modelos testados no presente estudo ocorre em função de três fatores básicos: i) das diferenças de resolução espacial (tamanho do pixel); ii) de irregularidades na topografia do terreno; iii) da influência do dossel da vegetação que pode interferir na geração dos dados pelo drone que, ao medir a altura da planta, a considera como uma variação do relevo.

Os resultados de perdas totais de solo obtidos com o MDT_{CC} apresentaram-se compatíveis com os resultados observados na literatura. Cogo; Levien; Schwarz (2003) ao avaliar as perdas de solo por erosão hídrica em solo, classificado como Latossolo Vermelho distroférico típico com textura muito argilosa ($650 g kg^{-1}$ de argila na camada de 0-20 cm de profundidade), sob chuva natural no estado do Rio Grande do Sul, em lavoura com declividade entre 8 e 12% sob semeadura direta, observaram valores entre 216 e 1160 $Kg.ha^{-1}.ano^{-1}$ para a cultura da soja. Zolin et al. (2016) observaram perdas de

827 kg ha⁻¹, 756 kg ha⁻¹ e 677 kg ha⁻¹ em cada safra com sucessão soja-milho, cultivado em Latossolo Vermelho-Amarelo com textura muito argilosa sob um relevo suave-ondulado, com perdas médias iguais a 753 kg ha⁻¹ durante os três anos de avaliação. Ao passo que, os resultados de perdas totais de solo obtidos com o MDT_{ET} e MDT_{ODM} aparentemente subestimaram e superestimaram estes valores, respectivamente.

4.2.2. Perdas de solo por processos erosivos em lavoura de aveia branca

Diferentemente do observado na cultura do feijão, as perdas médias de solo entre os estágios fenológicos da aveia branca não apresentaram diferenças significativas, variando na ordem 0,82 g no tratamento que representou a baixa cobertura do solo (T2), correspondendo ao estágio de início do perfilhamento, até 2,10 g no tratamento com alta cobertura do solo (T4), caracterizado por estágio de crescimento avançado (Tabela 5).

Por outro lado, a variável gramas de solo por pluviosidade (g.mm⁻¹) apresentou diferenças significativas entre os tratamentos avaliados, sendo o tratamento que representa a cobertura intermediária do solo (T3), caracterizado pelo estágio de perfilhamento intenso, superior ao tratamento com a máxima cobertura do solo (T5), o qual corresponde ao estágio de maturação (Tabela 5).

Do mesmo modo, para a variável gramas de solo por intensidade pluviométrica (g.mm⁻¹.h⁻¹), o tratamento correspondente a cobertura máxima do solo (T5) apresentou o menor valor médio de perda de solo por intensidade pluviométrica (Tabela 5).

Tabela 5 – Comparação de médias das variáveis gramas de solo (g), gramas de solo por pluviosidade (g.mm⁻¹) e gramas de solo por intensidade pluviométrica (g.mm⁻¹.h⁻¹) na cultura da aveia. Pato Branco-PR, 2023.

Tratamento	solo g	solo g. mm ⁻¹	solo g.mm ⁻¹ .h ⁻¹
T1	1,80 a*	0,049 ab	0,770 a
T2	0,82 a	0,025 ab	0,768 a
T3	2,07 a	0,089 a	1,532 a
T4	2,10 a	0,061 ab	0,771 a
T5	0,88 a	0,023 b	0,276 b
Coeficiente de variação (%)	19,58	19,07	18,30

***Dados não seguidos por mesma letra, na coluna, diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Duncan, em nível de 10% de probabilidade de erro. T1 (solo descoberto – emergência), T2 (baixa cobertura – perfilhamento), T3 (cobertura intermediária – perfilhamento intenso), T4 (alta cobertura do solo – crescimento avançado), T5 (máxima cobertura do solo – maturação). Fonte: Autoria própria (2024)**

Mesmo durante o período de emergência das plantas, onde se espera maiores perdas de solo em função do fluxo superficial, bem como pelo impacto das gotas de chuva diretamente sobre o solo exposto, este comportamento não se manteve. Provavelmente, os restos culturais do feijão, triturados e espalhados sobre a superfície do solo, bem como a sua rebrota entre o período de colheita do feijão até a semeadura da aveia branca, protegeram a estrutura do solo do impacto das gotas de chuva e a sua consequente desfragmentação. Além disso, foi possível observar menores discrepâncias nas precipitações acumuladas e a intensidade pluviométrica entre os tratamentos durante o ciclo da aveia branca quando comparados com os dados observados durante o ciclo do feijão (Tabela 6).

Tabela 6 – Precipitação acumulada e intensidade pluviométrica na cultura da aveia branca. Pato Branco-PR, 2023.

Tratamento	Precipitação acumulada	Intensidade pluviométrica
	mm	mm.h ⁻¹
T1	70,0	4,58
T2	82,5	2,23
T3	50,0	3,33
T4	90,0	5,42
T5	70,0	5,83
Total	362,2	-

T1 (solo descoberto – emergência), T2 (baixa cobertura – perfilhamento), T3 (cobertura intermediária – perfilhamento intenso), T4 (alta cobertura do solo – crescimento avançado), T5 (máxima cobertura do solo – maturação). Fonte: Autoria própria (2024).

Outrossim, a uniformidade das perdas de solo observadas na cultura da aveia branca, possivelmente, também, está atrelada as características fisiológicas desta planta. O sistema radicular destas plantas é constituído por raízes seminais e adventícias, sendo estas responsáveis por aproximadamente 95% do volume radicular total, produzidas continuamente durante o ciclo inicial da cultura até a antese, com taxas de alongamento que variam entre 0,5 e 3,0 cm dia⁻¹ na raiz primária e possibilidade de relação raiz/parte aérea superior em condições de baixas temperaturas (CASTRO; DA COSTA; NETO, 2012). Estas características referentes ao sistema radicular da aveia branca contribuem para aumentar a porosidade do solo, favorecendo a infiltração da água no solo, e sua resistência à desagregação pela enxurrada, proporcionando maior resistência do solo à erosão hídrica (LUCIANO et al., 2009).

Assim como o sistema radicular, a parte aérea dessas gramíneas também contribuem para reduzir as perdas de solo por processos erosivos (LUCIANO et al., 2009). As plantas desse gênero emitem sua haste, a partir da qual há emissões de perfilhos primários nas axilas das folhas mais baixas e velhas. Em seguida, a partir da terceira folha expandida, a cada emissão destas folhas pode ocorrer a formação de um afilho, resultado do desenvolvimento das gemas laterais (CASTRO; DA COSTA; NETO, 2012). Sendo assim, o grande número de colmos produzidos pelo sistema aéreo da aveia branca tende a proporcionar maior capacidade de reter os sedimentos de solo durante as possíveis ocorrências de enxurradas (LUCIANO et al., 2009).

Está característica de conter os sedimentos de enxurradas pela presença do grande número de colmos sobre o solo e de proporcionar maior infiltração e estabilidade dos agregados devido ao sistema radicular fasciculado, torna-se ainda mais eficiente em cultivos dispostos em contorno. Isso se dá pela rugosidade superficial ocasionada pela semeadura na direção perpendicular ao sentido da declividade do terreno, resultando em sulcos com a capacidade de armazenar a água. Este comportamento foi observado por Luciano et al. (2009) ao comparar as perdas de solo em aveia branca semeadas em contorno e no sentido do declive, em um Cambissolo Húmico alumínico léptico argiloso, onde os autores constataram que o tempo necessário para o início da enxurrada foi 2,8 vezes maior no local semeado em contorno em comparação com a semeadura na direção do declive, resultando em 12% a menos de perdas de solo.

Outra característica importante para conter as perdas de solo em áreas cultivadas com aveia branca é a elevada cobertura vegetal que esta cultura proporciona. O maior IAF nesta espécie é observado antes do florescimento, coincidindo com o momento de emergência completa da última folha, atingindo valor próximo a 4, capaz de interceptar mais de 95% da radiação solar incidente. Além do elevado IAF, culturas como a aveia branca apresentam duração da área foliar, principalmente após a antese, variando entre 1,56 e 2,27 dia⁻¹ ha⁻¹ (CASTRO; DA COSTA; NETO, 2012). Portanto, o elevado IAF proporcionado pela aveia branca e a sua duração, favorecem a cobertura vegetal do solo durante o seu período de cultivo, reduzindo o impacto das gotas de chuva sobre o solo e seus processos erosivos.

Desta forma, embora o tratamento T5, composto pelos estágios fenológicos

inflorescência e maturação, apresentou a maior intensidade pluviométrica (5,83 mm.ha⁻¹) durante o período do experimento (Tabela 6), os menores valores médios de perdas de solo em função da pluviosidade acumulada e da intensidade pluviométrica neste tratamento provavelmente estão atrelados ao maior IAF durante os estágios de inflorescência e maturação, momento de máxima cobertura do solo durante o período de estudo (CASTRO; DA COSTA; NETO, 2012).

Assim como para a cultura do feijão, as perdas de solo por metro quadrado (g.m⁻²) foi determinada para cada MDT gerado neste estudo e não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos para nenhuma das análises realizadas por meio de cada MDT (Tabela 7).

Tabela 7 – Comparação de médias das variáveis gramas de solo por metro quadrado (g.m⁻²) obtidas por meio de MDT_{ET}, MDT_{ODM} e MDT_{CC} na cultura da aveia branca. Pato Branco-PR, 2023.

Tratamento	solo (g.m ⁻²)					
	MDT _{ET}		MDT _{ODM}		MDT _{CC}	
T1	0,0113	a*	21,6609	a	1,1697	a
T2	0,0039	a	10,9247	a	0,4994	a
T3	0,0097	a	27,4929	a	1,1180	a
T4	0,0050	a	32,1015	a	1,0205	a
T5	0,0029	a	12,6279	a	0,3567	a
Coeficiente de variação (%)	52,26		33,10		29,23	

***Dados não seguidos por mesma letra, na coluna, diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Duncan, em nível de 10% de probabilidade de erro. T1 (solo descoberto – emergência), T2 (baixa cobertura – perfilhamento), T3 (cobertura intermediária – perfilhamento intenso), T4 (alta cobertura do solo – crescimento avançado), T5 (máxima cobertura do solo – maturação). Fonte: Autoria própria (2024)**

Assim como na cultura do feijão, o MDT_{ET}, com área de pixel de 4 m², apresentou o menor valor de perdas totais de solo totalizando 1,97 Kg ha⁻¹ durante o período de cultivo da aveia branca. Do mesmo modo, o MDT_{ODM} apresentou o maior valor de perdas de solo entre os resultados obtidos, totalizando 5093,70 Kg ha⁻¹ na cultura da aveia branca. Assim como na cultura anterior, estes valores foram influenciados pela reduzida área do pixel deste MDT (0,01 m²) e a variação do relevo no local de instalação dos coletores, resultando em baixos valores de números de células em cada coletor, e por consequência, elevados valores de perdas de solos totais. O MDT_{CC}, por outro lado, resultou em perdas totais de solo de 249,80 Kg ha⁻¹ na cultura da aveia branca durante o período de estudo (Tabela 8).

Tabela 8 – Perdas totais de solo durante o ciclo da aveia branca utilizando o número de células obtido por meio do MDT_{ET}, MDT_{ODM} e MDT_{CC}. Pato Branco-PR, 2023.

Coletor	Solo g	Área Pixel m ²	N. Células Und.	Área Contribuição m ²	Solo g.m ⁻²	solo Kg.ha ⁻¹
MDT _{ET}						
1	23,96	4	368,68	1474,72	0,016	0,16
2	10,45	4	185,82	743,28	0,014	0,14
3	11,89	4	17,78	71,12	0,167	1,67
Total	46,03	-	-	-	0,197	1,97
MDT _{ODM}						
1	23,96	0,01	7,57	0,08	312,95	3129,50
2	10,45	0,01	6,99	0,07	149,50	1495,00
3	11,89	0,01	25,34	0,25	46,92	469,20
Total	46,03	-	-	-	509,37	5093,70
MDT _{CC}						
1	23,96	0,25	23,85	5,96	3,97	39,70
2	10,45	0,25	2,63	0,66	15,89	158,90
3	11,89	0,25	9,29	2,32	5,12	51,20
Total	46,03	-	-	-	24,98	249,80

Fonte: Autoria própria (2024)

Diante dos três resultados de perdas totais de solo obtidos neste trabalho, as perdas de solo totais utilizando o MDT_{CC} apresentou-se compatível com os resultados observados na literatura. Luciano et al. (2009) ao estudar as perdas de solo por erosão hídrica, em um Cambissolo Húmico alumínico léptico argiloso em lavoura cultivada com aveia branca semeada em contorno e no sentido do declive, com declividade média de 11,9%, observaram perdas de 524 e 596 Kg.ha¹, respectivamente. Cogo; Levien; Schwarz (2003) ao avaliar as perdas de solo por erosão hídrica sob chuva natural no estado do Rio Grande do Sul, classificado como Latossolo Vermelho distroférico típico com textura muito argilosa (650 g kg⁻¹ de argila na camada de 0-20 cm de profundidade), em lavoura com declividade entre 8 e 12% sob semeadura direta, observaram valores de 156 Kg.ha¹.ano⁻¹ para aveia. Do mesmo modo observado nos resultados de perdas totais de solo para a cultura do feijão, os valores observados com o MDT_{ET} aparentemente subestimaram as perdas totais de solo e o MDT_{ODM} superestimou estes valores.

Diante exposto, o presente estudo demonstrou que os resultados obtidos pelo algoritmo r.watershed com o MDT realizado com imagens aéreas de drone e filtragem da nuvem de pontos pelo software CloudCompare apresentou valores condizentes com os

dados observados na literatura brasileira, mesmo com o monitoramento realizado em apenas um ano agrícola, permitindo inferir que a metodologia utilizada se demonstrou eficiente.

5. CONCLUSÕES

A aquisição de dados com o Drone, associado ao GNSS RTK, proporcionaram a construção de Modelo Digital de Terreno de alta qualidade, com precisão planimétrica e altimétrica correspondente a Classe A para escala 1:1000.

É possível elaborar mapas de Fluxo Acumulado utilizando o algoritmo `r.watershed` do software GRASS GIS sobre os Modelos Digitais de Terreno construído por meio de curvas de níveis obtidas com estação total e por imageamento aéreo realizado com Drone.

Os coletores instalados no solo demonstraram-se eficientes para monitorar as perdas de solo por erosão hídrica em cada evento chuvoso.

A avaliação das perdas totais de solo por erosão hídrica em dois ciclos de cultivo – verão e inverno – por meio de coletores portáteis instalados no solo, modelo digital do terreno de alta precisão gerado por drone e o módulo `r.watershed` do software GRASS GIS demonstrou-se eficiente e condizente com os resultados observados na literatura.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os mapas de Fluxo Acumulado, obtidos com o módulo `r.watershed` do software GRASS GIS, apresentam-se dependentes da acurácia planialtimétrica do Modelo Digital de Terreno (MDT) utilizado como base para os cálculos dos parâmetros relacionados aos modelos hidrológicos. Desta forma, a elevada resolução espacial do MDTs (MDT_{CC} e MDT_{ODM}) construído por meio do Modelo Digital de Superfície (MDS) dificultou a análise hidrológica nos locais em que o solo não se apresenta exposto, sugerindo a aquisição dos dados com o Drone quando o solo se encontra descoberto, como por exemplo durante a semeadura ou pós-colheita.

A associação do uso do Drone, GRASS GIS e coletores instalados no solo proporcionaram resultados satisfatórios, demonstrando a viabilidade desta metodologia na avaliação de perdas de solo por erosão hídrica sobre condições naturais. Contudo, é importante salientar que para otimizar estes resultados em trabalhos futuros nesta mesma mesorregião do Estado do Paraná, faz-se necessário o monitoramento em campo das perdas de solo por erosão hídrica por um período maior e contemplando o mês de outubro, mês com maior índice pluviométrico e elevado potencial erosivo das chuvas na mesorregião Sudoeste do Paraná.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, W. S. D.; CARVALHO, D. F. D.; PANACHUKI, E.; VALIM, W. C.; RODRIGUES, S. A.; VARELLA, C. A. A. Erosão hídrica em diferentes sistemas de cultivo e níveis de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1110–1119, 2016.

ALMEIDA, I. D. C.; COSTA, G. C.; SILVA, D. C.; MEDEIROS, J. R. B. Estudo sobre o uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para mapeamento aéreo com fins de elaboração de projetos viários. **Universidade Católica de Pernambuco. Recife**, 2016.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.

AMATULLI, G.; SETHI, T.; SHEN, L.; GARCÍA-MÁRQUEZ, J. R.; KIESEL, J.; DOMISCH, S. A new and extendable global watershed and stream network delineation using GRASS-GIS. **Geomorphometry**, 205, 205-208. 2020.

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial – RBAC-E nº 94. Requisitos Gerais para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil, Resolução nº 419, 2 de maio de 2017**. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94/@@display-file/arquivo_norma/RBACE94EMD00.pdf>. Acesso em: 04 de junho de 2022.

ANACHE, J. A.; WENDLAND, E. C.; OLIVEIRA, P. T.; FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience. **Catena**, 152, 29-39. 2017.

ARANTES, B. H. T.; ARANTES, L. T.; COSTA, E. M.; VENTURA, M. V. A. Drone aplicado na agricultura digital. **Ipê Agronomic Journal**, v. 3, n. 1, p. 14–18, 2019.

BALENA, R.; BORTOLINI, E.; TOMAZONI, J. C. Caracterização dos tipos de solos do município de Pato Branco através técnicas de geoprocessamento. **Synergismus scyentifica UTFPR**, v. 4, n. 1, p. 1–3, 2009.

BERTOL, I.; MARIA, I. D.; SOUZA, L. D. S. Manejo e conservação do solo e da água. **Alimentação saudável e sustentabilidade ambiental nas escolas do paraná**, p. 197, 2019.

BHERING, S. B.; DOS SANTOS, H. G.; BOGNOLA, I. A.; CURCIO, G. R.; CARVALHO JUNIOR, W. D.; CHAGAS, C. D. S.; SILVA, J. D. S. Mapa de solos do Estado do Paraná, legenda atualizada. In: **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 32., 2009, Fortaleza. O solo e a produção de bioenergia: perspectivas e desafios: anais. [Viçosa, MG]: SBCS; Fortaleza: UFC, 2009.

BÓCOLI, F. A.; LENSE, G. H.; DOS SANTOS, W. J. Estimativa de perdas de solo por erosão hídrica em diferentes cultivos. **11ª Jornada Científica e Tecnológica e 8º Simpósio da Pós-Graduação do IFSULDEMINAS**. ISSN: 2319-0124. 2019.

BORDIN, I.; DOS SANTOS SILVA, N.; DA SILVA, T. R. B.; SANTOS, J. B.; GIL, L. G.; DOS SANTOS CANALLI, L. B.; LLANILLO, R. F. Sistemas de produção de soja em solo originado do Arenito Caiuá no Noroeste do Paraná. **Semina: Ciências Agrárias**, 41(5supl1), 2061-2070. 2020.

CAPRARIO, J.; RECH, A. S.; CAPRARIO, G. N.; FINOTTI, A. R. Simulação Hidrossedimentológica da Bacia Hidrográfica do Rio Quatorze, Francisco Beltrão (Paraná, Brasil). **Anuário do Instituto de Geociências**, 40(1), 102-114. 2017.

CASTRO, G. S. A.; DA COSTA, C. H. M.; NETO, J. F. Ecofisiologia da aveia branca. **Scientia Agraria Paranaensis**, 11(3), 1-15. 2012.

CECCATO, H. D. Processo erosivo: estudo de caso da estrada de acesso a cascata do salso – Caçapava do sul, RS. p. 113, 2018.

CHO, H. Memory-efficient flow accumulation using a look-around approach and its OpenMP parallelization. **Environmental Modelling & Software**, 167, 105771. 2023.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27, 743-753. 2003.

DE OLIVEIRA, A. J.; DA SILVA, G. F.; DA SILVA, G. R.; DOS SANTOS, A. A. C.; CALDEIRA, D. S. A.; VILARINHO, M. K. C.; DE OLIVEIRA, T. C. Potencialidades da utilização de drones na agricultura de precisão. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 64140–64149, 2020.

DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. D. F.; MARIA, I. C. D. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, v. 74, p. 224–233, 2015.

DOS SANTOS, A. C. R.; CAIXETA, S. P.; DE AZEVEDO SILVA, P. A.; HIRSCH, A. Modelagem da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba Através do TauDEM e Dinâmica da Cobertura Vegetal e Uso da Terra. 2023.

DSG. Editoração e impressão pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro, 2ª Edição, 2011.

EHLSCHLAEGER, C, Faster sorting algorithm and MFD support. **U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory**. Markus Metz <markus.metz.giswork@gmail.com> Retention for flow distribution by Andreas Gericke (IGB Berlin). 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5.ed. Brasília, 356p. 2018.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **An overview of the Hydrology toolset**. 2016. Disponível em: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/raster-analysis/an-overview-of-the-hydrology-toolset.htm>. Acesso: 10 dez. 2023.

GONÇALVES, V. P.; CAVICHIOLI, F. A. Estudo Das Funcionalidades Dos Drones Na Agricultura. **Revista Interface Tecnológica**, v. 18, n. 1, p. 321–331, 2021.

GROHMANN, C. H. Effects of spatial resolution on slope and aspect derivation for regional-scale analysis. **Computers & Geosciences**, 77, 111-117. 2015.

GUERRA, A. J. T. Experimentos e monitoramentos em erosão dos solos. **Revista do Departamento de geografia**, v. 16, p. 32–37, 2005.

HANKE, D.; MELO, V. D. F.; DIECKOW, J.; DICK, D. P.; BOGNOLA, I. A. Influência da matéria orgânica no diâmetro médio de minerais da fração argila de solos desenvolvidos de basalto no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39, 1611-1622. 2015.

HARTMANN, L. A. A história Natural do Grupo Serra Geral desde o Cretáceo até o Recente. **Ciência e Natura**, p. 173–182, 31 out. 2014.

IPARDES. Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. **PIB DO PARANÁ - RESULTADOS DO 1º TRIMESTRE DE 2022**. Disponível em: https://www.ipardes.pr.gov.br/sites/ipardes/arquivos_restritos/files/documento/2022-06/Nota_de_divulga%C3%A7%C3%A3o_PIB_1o_Trim_2022.pdf. Acesso em: 05/07/2022.

JASIEWICZ, J.; METZ, M. A new GRASS GIS toolkit for Hortonian analysis of drainage networks. **Computers & Geosciences**, v. 37, n. 8, p. 1162-1173, 2011.

JUNIOR, S. M.; MENDES, A. T. Delineation of the Matança River Basin by the TauDEM automatic demarcation tool. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, 6(11). 2019.

KNEIPP, R. B. O estado da arte na utilização de drones para inspeção naval e offshore. Trabalho de Conclusão de Curso Graduação em Engenharia Naval. **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2018.

KRUEGER, C. P.; DE OLIVEIRA JUNIOR, P. S.; DOS ANJOS GARNÉS, S. J.; MARRA, D. B. Posicionamento GNSS em Tempo Real: Evolução, Aplicações Práticas e Perspectivas para o Futuro. **Revista Brasileira de Cartografia**, 72, 1359-1379. 2020.

LEPSCH, I. F. 19 lições de pedologia. **Oficina de textos**. 2021.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. [s.l.] Oficina de textos, 2010.

LUCIANO, R. V.; BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; VÁZQUEZ, E. V.; FABIAN, E. L. Perdas de água e solo por erosão hídrica em duas direções de semeadura de aveia e ervilhaca. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33, 669-676. 2009.

LUZ, E.; TOMAZONI, J. C.; POKRYWIECHI, T. S. Monitoramento da qualidade da água e avaliação da capacidade de autodepuração do rio ligeiro no município e Pato Branco-Pr. **Revista Geociências**, 38(3), 755-768. 2019.

MANASSES, F.; ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C.; BITTENCOURT, A. V. L. Estudo hidrogeológico da Formação Serra Geral na região sudoeste do estado do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 65. 2011.

MITASOVA, H.; NETELER, M. Open-Source GIS: A GRASS GIS approach (**3rd ed., Kluwer international series in engineering and computer science**). Springer. 2013.

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações. **2ª ed. São Paulo: Editora UNESP**, ISBN 978-85-7139-788-0. 2008.

NEARING, M. A.; XIE, Y.; LIU, B.; & YE, Y. Natural and anthropogenic rates of soil erosion. **International Soil and Water Conservation Research**, 5(2), 77-84. 2017.

NETELER, M.; MITASOVA, H. Open source GIS: a GRASS GIS approach. (3rd ed., Kluwer international series in engineering and computer Science). **Springer Science & Business Media**, 2013.

NETELER, M.; BOWMAN, M. H.; LANDA, M.; METZ, M. GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS. **Environmental Modelling & Software**, 31, 124-130. 2012.

OLIVEIRA, A.; GUTIERREZ, N. H. M.; NONOSE, G. T. Caracterização e peculiaridades de um perfil típico de solo residual de basalto. **Geosul**, 38(88), 489-513. 2023.

OLIVEIRA, D. R., CICERELLI, R. E.; DE ALMEIDA, T.; MAROTTA, G. S. A. geração de modelo digital do terreno a partir de imagens obtidas por veículo aéreo não tripulado. **Revista Brasileira de Cartografia**. 2017.

REZENDE, R.; GONÇALVES, A. C. A.; FRIZZONE, J. A.; DE FREITAS, P. S. L.; BERTONHA, A.; ANDRADE, C. A. B. Uniformidade de aplicação de água, variáveis de produção e índice de área foliar da cultivar de feijão lapar 57. **Acta Scientiarum. Agronomy**, 24, 1561-1568. 2002.

RIZZATTI, M.; CASSOL, R.; COSTA, I. T.; BATISTA, N. L. Comparação entre dados geográficos: as cartas topográficas do exército e o TauDEM. **Revista Geonorte**, 7(26),

78-89. 2016.

RUMMEL, R. Earth's gravity from space. **Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali**, v. 31, n. S1, p. 3–13, out. 2020.

RUTHES, J. M.; TOMAZONI, J. C.; GUIMARÃES, E.; GOMES, T. C. Propriedades do solo da bacia hidrográfica do Rio Catorze que intensificam a erosão laminar. **Revista Brasileira de Geografia Física**. 2012.

RUTHES, J. M.; TOMAZONI, J. C.; GOMES, T. C. Influência do uso e ocupação do solo no processo erosivo laminar do município de Francisco Beltrão–Sudoeste do Paraná. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, n. 2, p. 264–274, 2016.

SCHIAVON, M. A.; REDONDO, S. U. A.; YOSHIDA, I. V. P. Caracterização térmica e morfológica de fibras contínuas de basalto. **Cerâmica**, v. 53, n. 326, p. 212–217, jun. 2007.

SILVA, A. O.; LIMA, E. A.; MENEZES, H. E. Rendimento de grãos de Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivado em diferentes densidades de plantio. 2007.

TABALIPA, N. L.; FIORI, A. P. Estudo do clima do município de pato branco, Paraná. **Synergismus scientifica UTFPR**, v. 3, n. 4, 3. 2008.

TELLES, T. S.; BARBOSA, G. M. D. C.; MERTEN, G. H.; PELLINI, T.; DIDONÉ, E. J.; GUIMARÃES, M. D. F. Soil governance as a requirement for agricultural land conservation: a historical overview. **Revista Ciência Agronômica**, 54, e20218315. 2023.

VIANA, D. C. Análise da qualidade cartográfica de MDS e MDE gerados por VANT e refinados com uso de dados GNSS RTK. 2017.

WALTRICK, P. C.; MACHADO, M. A. D. M.; DIECKOW, J.; OLIVEIRA, D. D. Estimativa da erosividade de chuvas no estado do Paraná pelo método da pluviometria: Atualização com dados de 1986 a 2008. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 39, p. 256–267, 2015.

YILDIRIM, A. A.; TARBOTON, D.; LIU, Y.; SAZIB, N. S.; WANG, S. Accelerating TauDEM for Extracting Hydrology Information from National-Scale High Resolution Topographic Dataset. 2016.

ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; MATOS, E. D. S.; MAGALHÃES, C. A. D. S.; ALMEIDA, F. T. D.; SOUZA, A. P. D.; MINGOTI, R. Perda de solo e água sob integração lavoura-floresta e em sucessão soja-milho. **Pesquisa agropecuária brasileira**, 51, 1223-1230. 2016.

ZONTA, J. H.; SOFIATTI, V.; COSTA, A. G. F.; SILVA, O. R. R. F.; BEZERRA, J. R. C.; DA SILVA, C. A. D.; BARBOSA, H. F. Práticas de conservação de solo e água. 2012.