UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA

JOEL ZUBEK DA ROSA

DIAGNÓSTICO DE PROCESSOS EROSIVOS EM SOLOS AGRÍCOLAS MEDIANTE ANÁLISE DE MODELOS NUMÉRICOS DO TERRENO

PONTA GROSSA
2018

JOEL ZUBEK DA ROSA

DIAGNÓSTICO DE PROCESSOS EROSIVOS EM SOLOS AGRÍCOLAS MEDIANTE ANÁLISE DE MODELOS NUMÉRICOS DO TERRENO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, curso de Mestrado em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.
Orientação: Profa. Dra. Selma Regina Aranha Ribeiro

PONTA GROSSA
2018

Rosa, Joel Zubek da
R788 Diagnóstico de processos erosivos em solos agrícolas mediante análise de modelos numéricos do terreno/ Joel Zubek da Rosa. Ponta Grossa, 2018.
91 f.;

Dissertação (Mestrado Computação Aplicada - Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Profa. Dra. Selma Regina Aranha Ribeiro

1. GNS Geodésico. 2. RPA asa fixa. 3. RPA multirotor. 4. Sistema de Informação Geográfica. 5.Modelo de estimativa de perda de solo. I. Ribeiro, Selma Regina Aranha. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Mestrado em Computação Aplicada. III. T.

CDD : 006.3
Ficha catalográfica elaborada por Maria Luzia F. Bertholino dos Santos– CRB9/986

TERMO DE APROVAÇÃO

Joel Zubek da Rosa

"DIAGNÓSTICO DE PROCESSOS EROSIVOS EM SOLOS AGRÍCOLAS MEDIANTE ANÁLSIE DE MODELOS NUMÉRICOS DO TERRENO"

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora:

Profª. Drª. Selma Regina Aranha Ribeiro
UEPG

Prof. Dr. Luiz Gilberto Bertotti
UNICENTRO

Profª. Drª. Alaine Margarete Guimarães
UEPG

Ponta Grossa, 10 de agosto de 2018.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, namorada, irmãs, familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, não posso deixar de agradecer a minha orientadora, Professora Doutora Selma Regina Aranha Ribeiro, por toda a paciência, empenho e seriedade com que sempre me orientou neste trabalho e em todos aqueles que realizei desde a graduação até o mestrado. Muito obrigado pela motivação e inspiração.

Agradeço a todos os meus colegas e ao corpo docente do Curso de Mestrado em Computação Aplicada e a toda a comunidade da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Agradeço por último, à minha família, namorada Elizane Nascimento e amigos pelo apoio, companheirismo e incentivo.

E a loucura nem sempre é uma doença.
Por muitas vezes, é um ato de coragem.
(Mia Couto)

RESUMO

Entre os principais problemas relacionados à conservação ambiental em áreas agrícolas está a degradação dos solos por meio da erosão hídrica que ocasiona a remoção das camadas mais férteis de solo e o transporte de partículas de solo para as partes mais baixas do relevo, o que contribui para o assoreamento dos recursos hídricos. Portanto, o presente estudo teve como objetivo diagnosticar processos erosivos em uma área de produção agrícola localizada na Fazenda Escola Capão da Onça – FESCON – UEPG, mediante análise de dados obtidos por Sistema de Navegação Global por Satélite (*Global Navigation Satellite System - GNSS*) e Aeronaves Remotamente Pilotadas (*Remotely Piloted Aircraft - RPA*). Para a realização do trabalho foi implantada uma grade regular com pontos de 45 x 45 metros de distância, totalizando 140 pontos em uma área de aproximadamente 26 hectares. Foram realizados georreferenciamento dos pontos da grade regular por meio de receptores de sinal GNSS Geodésico pós-processado e a coleta de atributos do solo (textura do solo). Os dados de textura do solo levantados na grade regular proporcionaram gerar modelos para o cálculo do fator de erodibilidade do solo para área de estudo. Com os valores altimétricos das coordenadas levantadas nos pontos da grade regular foi possível avaliar a precisão vertical de Modelos Numéricos do Terreno - MNT gerados por meio de dados obtidos com RPA. Foram avaliados os modelos gerados com dados obtidos por meio de equipamentos de RPA de asa fixa e multirotor com a distribuição de diferentes números de pontos de controle e sem pontos de controle. Mediante a análise estatística aplicada em relação entre a dispersão das diferenças altimétricas geradas nos MNT e os pontos da grade regular usados como referência, o MNT gerado com os dados de RPA asa fixa com pontos de controle apresentou o melhor resultado. Diante da constatação do melhor MNT foi modelado o fator topográfico para a área de estudo. A utilização de Sistema de Informação Geográfica - SIG proporcionou integrar todos os dados em um único ambiente computacional; gerar modelos por meio de interpolação; analisar a precisão dos modelos; implementar as equações para o cálculo dos fatores de erodibilidade e topográfico e também a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (*Revised Universal Soil Loss Equation – RUSLE*); além das representações das informações. O resultado obtido com o modelo gerado mediante o cálculo da RUSLE apresentou a estimativa que mais de 70 % da área de estudo está com baixa suscetibilidade à erosão ou ligeira perda de solo. O restante da área de estudo apresentou perda de solos acima de 10 tonelada/ha.ano, indicando média e alta suscetibilidade à erosão.

Palavras-chave: GNSS Geodésico, RPA asa fixa, RPA multirotor, Sistema de Informação Geográfica, Modelo de estimativa de perda de solo.

ABSTRACT

Among the major problems related to environmental conservation in agricultural areas is soil degradation through water erosion, which causes the removal of the most fertile soil layers and the transport of soil particles to the lower parts of the relief, which contributes to the silting up of water resources. Therefore, the present study aimed to diagnose erosive processes in an area of agricultural production located at Fazenda Escola Capão da Onça - FESCON - UEPG, by analyzing data obtained by the Global Navigation Satellite System (GNSS) and Remotely Piloted Aircraft (RPA).For the accomplishment of the work a regular grid with points of 45 x 45 meters of distance was implanted, totaling 140 points in an area of approximately 26 hectares. Georeferencing of the regular grid points was carried out by means of post-processed GNSS signal receivers and the soil attributes collection (soil texture). The soil texture data collected in the regular grid provided the model for calculating the soil erodibility factor for the study area. With the altimetric values of the coordinates raised at the points of the regular grid it was possible to evaluate the vertical accuracy of Numerical Terrain Models generated through data obtained with RPA. The models generated with data obtained by means of fixed-wing and multi-rotor RPA equipment with the distribution of different numbers of control points and without control points were evaluated. by means of the statistical analysis applied in relation between the dispersion of the altimetric differences generated in the Numerical Terrain Model and the points of the regular grid used as reference, the Numerical Terrain Model generated with the fixed wing RPA data with control points presented the best result. In view of the finding of the best NTM, the topographic factor was modeled for the study area. The use of Geographic Information System - GIS provided to integrate all the data in a unique computational environment; generate models through interpolation; analyze the accuracy of the models; implement the equations for the calculation of the erodibility and topographic factors and also the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE); beyond the representations of the information. The result obtained with the model generated by RUSLE calculation showed that more than 70% of the study area is low susceptibility to erosion or slight soil loss. The rest of the study area presented soil loss above 10 ton / ha.year, indicating medium and high susceptibility to erosion.

Keywords: Geodetic GNSS, fixed wing RPA, multirotor RPA, Geographic Information System, soil loss estimation model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelos de RPA……..24
Figura 2: Receptores de sinal GNSS……31
Figura 3: Localização da área de estudo……36
Figura 4: Diagrama com sequência das etapas para a realização do trabalho..……..38
Figura 5: Distribuição espacial da grade regular……...40
Figura 6: Ponto controle……...41
Figura 7: Levantamento aerofotogramétrico……42
Figura 8: Orientação das fotografias e nuvem de pontos espaçada……....43
Figura 9: Nuvem de pontos densa……...……44
Figura 10: Nuvem de pontos classificada……44
Figura 11: Modelos altimetria interpolados……...48
Figura 12: Gráfico com a correlação de valores de altitudes gerados pelos modelos interpolados…..……51
Figura 13: Modelos de textura do solo……...53
Figura 14: MNT gerados por cinco combinações diferentes dados de RPA e pontos de controle.……54
Figura 15: Gráfico com a diferença de altimetria do modelo gerado com RPA asa fixa sem pontos de controle.……56
Figura 16: Gráfico com a diferença de altimetria do modelo gerado com RPA asa fixa com 6 pontos de controle……56
Figura 17: Gráfico com a diferença de altimetria do modelo gerado com RPA multirotor sem pontos de controle……..……57
Figura 18: Gráfico com a diferença de altimetria do modelo gerado com RPA multirotor com 6 pontos de controle……..……57
Figura 19: Gráfico com a diferença de altimetria do modelo gerado com RPA multirotor com 14 pontos de controle…….……....58
Figura 20: Modelos dos fatores para a aplicação da RUSLE……..…….....61
Figura 21: Estimativa de perdas anuais de solo por erosão……..62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de altitude dos pontos aleatórios e interpoladores……..50
Tabela 2: Valores das diferenças das altitudes interpoladas…….52
Tabela 3: Resultados dos cálculos estatísticos das diferenças de altitudes dos MNT gerados com RPA…….….59
Tabela 4: Estimativa e perda de solo……...……..62

LISTA DE SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
AP	Agricultura de Precisão
APP	Área de Proteção Permanente
ASP	*American Society of Photogrammetry*
DECEA	Departamento de Controle de Espaço Aéreo
DEM	*Digital Elevation Model*
DGPS	*Differential Global Positioning System*
DSM	*Digital Surface Model*
DTM	*Digital Terrain Model*
EGNOS	*European Geostationary Navigation Overlay Service*
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESALQ	Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
FAO	*Food and Agriculture Organization*
FESCON	Fazenda Escola Capão Da Onça
GLONASS	*Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema*
GNSS	*Global Navigation Satellite System*
GSD	*Ground Sample Distance*
ICAO	*International Civil Aviation Organization*
IDW	*Inverse Distance Weighted*
IGS	*International GNSS Service*
LIDAR	*Light Detection And Ranging*
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelos Numéricos do Terreno
MNT	Modelos Numéricos do Terreno
NAVSTAR-GPS	*Navigation System With Timing And Ranging - Global Positioning System*
PPP	Posicionamento Por Ponto Preciso
PRN	*Pseudo Randon Noise*
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RMSE	*Root Mean Square Error*
RPA	*Remotely Piloted Aircraft*
RTK	*Real Time Kinematic*
RUSLE	*REVISED UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION*

SfM	*Structure from Motion*
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SIG	Sistemas de Informações Geográfica
SRTM	*Shuttle Radar Topography Mission*
UAV	*Unmanned Aerial Vehicle*
UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa
ARS	*Agricultural Research Service*
USLE	*Universal Soil Loss Equation*
USP	Universidade de São Paulo
VANT	Veículos Aéreos Não Tripulados
WAAS	*Wide Area Augmentation System*
WGS84	*World Geodetic System 1984*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....14
2 OBJETIVOS.....16
2.1 OBJETIVO GERAL.....16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....16
3 REVISÃO DE LITERATURA.....17
3.1 EROSÃO E MODELOS DE PREDIÇÃO.....17
3.2 MODELO NUMÉRICO DO TERRENO.....21
3.3 AERONAVES REMOTAMENTE PILOTAS.....23
3.3.1 Fotogrametria com Imagens de RPA.....25
3.4 POSICIONAMENTO POR SATÉLITES.....27
3.4.1 Funcionamento do GNSS.....28
3.4.2 Métodos de posicionamento e receptores GNSS.....30
3.5 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA.....33
4 METODOLOGIA.....36
4.1 ÁREA DE ESTUDO.....36
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....37
4.2.1 Equipamentos utilizados.....37
4.2.2 Sequência das etapas do trabalho.....37
4.2.3 Implementação de grade regular.....39
4.2.4 Amostragem.....40
4.2.5 Recobrimento Aerofotogramétrico com RPA.....41
4.2.5 Utilização de SIG.....45
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....48
5.1 MODELAGEM COM DADOS GNSS.....48
5.2 MODELAGEM COM DADOS DE RPA.....53
5.3 DIAGNÓSTICO DE PROCESSOS EROSIVOS.....60
6 CONCLUSÕES.....64
REFERÊNCIAS.....66
ANEXOS.....76

1 INTRODUÇÃO

A utilização de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA - R*emotely Piloted Aircraft*), conhecidas como Drones (do inglês Zangão, devido ao som emitido por esses equipamentos) ou ainda Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), termo advindo de *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), vem se popularizando para o desenvolvimento de aplicações em diversas áreas nas últimas décadas.

As aplicações com RPA começaram no uso militar a partir da segunda metade do século 20. Com o desenvolvimento de microequipamentos embarcados, como câmeras de pequeno formato e receptores de Sistemas de Navegação Global por Satélite (*Global Navigation Satellite System - GNSS*), a partir da década de 1990 as RPA começaram a serem utilizadas em aplicações de uso civil.

Na área de mapeamentos, as RPAs proporcionam gerar imagens com píxeis que representam aproximadamente 3 cm, em unidades do terreno (GSD - *Ground Sample Distance*), que até então eram impossíveis de se alcançar mediante dados obtidos com as plataformas clássicas de mapeamento (aviões e satélites).

O baixo custo dos levantamentos de dados com RPA para pequenas áreas é o grande atrativo dessa geotecnologia como solução para o uso agrícola. A integração de GNSS, Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e o advento das RPA, mudou o cenário agrícola e tem direcionado a gestão das áreas de produção, proporcionando a prática de Agricultura de Precisão (AP), com maior grau de detalhamento espacial das informações.

As aplicações de mapeamentos na área agrícola com RPA são direcionadas principalmente para gerar dados de variabilidade espacial das áreas cultivadas no sentido de quantificar a produtividade e detectar anomalias. Entre as vantagens que essas informações podem proporcionar aos produtores agrícolas, estão a agilidade na tomada de decisão que consequentemente aumenta o lucro da produção com a redução de custos em insumos.

Os orthomosaicos estão sendo cada vez mais utilizados na agricultura embasando tomadas de decisão a fim de impactar no aumento da produtividade. Os MNT também devem ser incorporados para melhorar o manejo das áreas de produção agrícola no sentido de direcionar a organização espacial das áreas agrícolas mediante as condições naturais da paisagem para minimizar os impactos ambientais ocasionados por está pratica.

Com representações que evidenciem maiores detalhes de processos de degradação atuantes em áreas agrícolas, os MNT gerados por meio dos dados de RPA são produtos que proporcionam informações com grandes detalhes das condições geomorfológicas e a integração de outras informações podem possibilitar a detecção de locais com erosão ou susceptíveis.

A erosão dos solos agrícolas é um problema global que afeta tanto países subdesenvolvidos como também os altamente desenvolvidos em tecnologias na área agrícola. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (*Food and Agriculture Organization* – FAO) em 2015, 30% dos solos agricultáveis estão degradados e a principal causa é a erosão acelerada dos solos.

As representações de processos erosivos em sua grande maioria utilizam MNT com média resolução espacial, como uma das variáveis nas equações para estimar as perdas de solos e ou indicar locais susceptíveis à erosão, em estudos que normalmente englobam regiões de bacias hidrográficas. Nesse sentido os MNT gerados por meio dos dados obtidos com alta resolução espacial por meio de equipamentos de RPA associados com pontos de controle obtidos com receptores GNSS aprimoram a qualidade da precisão das representações de processos erosivos.

O estudo da viabilidade para a utilização das tecnologias que envolve o processo para a geração de modelos com dados de RPA se faz necessário devido ao crescente número de produtores rurais, com pequenas e médias áreas de produção agrícolas, que vem adotando o uso de RPA. A avaliação da qualidade dos MNT gerados mediante os dados de RPA é essencial para o conhecimento das diferenças que são representadas nos modelos em relação à realidade.

As aplicações dos modelos gerados neste trabalho com dados de RPA são no sentido de verificar se são viáveis para diagnosticar processos erosivos e onde estão suscetíveis a ocorrerem na área de estudo. A área de estudo selecionada é exemplo das áreas agrícolas da região dos Campos Gerais, onde a maioria da paisagem é composta por relevo com declividades que variam do plano ao fortemente ondulados e solos susceptíveis a erosão.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- O presente estudo tem como objetivo geral diagnosticar processos erosivos em área agrícola localizada na Fazenda Escola Capão da Onça – FESCON - UEPG, mediante análise de dados obtidos por RPA e GNSS.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar dados levantados por meio de receptores GNSS Geodésico mediante a aplicação dos interpoladores *Inverse distance weighted* – IDW; *Kriging* e *Spline,* para verificar qual modelo representa a altimetria da área de estudo com as menores distorções.
- Modelar dados obtidos por meio de RPA por meio do processamento fotogramétrico digital com a combinação de diferentes configurações de pontos de controle para a geração de MDE/MNT e ortomosaico.
- Avaliar a precisão de MNT gerados por meio de dados obtidos por GNSS e RPA.
- Gerar modelo de suscetibilidade de processos erosivos com os modelos gerados com dados de GNSS e RPA mediante a aplicação da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (*Revised Universal Soil Loss Equation* - RUSLE).

3 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura realizada neste trabalho apresenta uma breve descrição dos problemas ocasionados pela erosão e os modelos de predição de processos erosivos; os Modelos Numéricos do Terreno; as tecnologias para coleta de dados (RPA e GNSS); e a utilização de SIG.

3.1 EROSÃO E MODELOS DE PREDIÇÃO

O termo erosão originou-se do latim, do verbo *erodere* (escavar) e nas ciências ambientais define-se erosão como o processo de desprendimento e/ou desgaste e transporte de partículas de solo pela ação da água, vento ou gelo, incluindo arraste gravitacional (VEIGA et al., 1994). Os mecanismos dos processos erosivos básicos variam no tempo e no espaço, e a erosão ocorre a partir do momento em que as forças que removem e transportam materiais excedem aquelas que tendem a resistir (GUERRA, 2007).

A erosão é definida como fenômeno de desgaste da superfície da Terra por meio da chuva, vento, gelo ou outros agentes naturais ou antropogênicos, com a capacidade de mover o solo de um ponto da superfície e depositá-lo em outro (SOIL SCIENCE OF AMERICA, 2008).

No Brasil, a erosão hídrica é a que possui maior potencial para a degradação dos solos (FERREIRA, 1981). “A erosão hídrica consiste basicamente numa série de transferências de energia e matéria geradas por um desequilíbrio do sistema água/solo/cobertura vegetal, as quais resultam numa perda progressiva do solo” (GUERRA, 2005).

O processo erosão hídrica consiste basicamente em três eventos sequenciais, caracterizados pelo desprendimento, arraste e deposição de partículas do solo. O desprendimento é definido como a liberação de partículas de agregados, e uma vez desprendidas, elas podem permanecer próximas ao agregado ou serem transportadas (CARVALHO et al., 2002).

O estágio inicial da erosão hídrica é o mais significativo, constituído a partir do desagregamento ou desprendimento das partículas de solo que ocorre pelo efeito integrado da energia de impacto das gotas de água da chuva e da força cisalhante do escoamento superficial (BAHIA et al., 1992). A capacidade dos agentes como a água da chuva em causar erosão é conhecida como erosividade (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006). A intensidade da chuva é o parâmetro mais importante

para predizer as perdas de solo, pois quanto maior a intensidade e o tempo da precipitação, maior será o escoamento superficial e, consequentemente, maior a erosão (CORRÊA, 2015).

O arraste, ou transporte das partículas de solo, é feito pela ação do vento e, em maior escala, pelo escoamento superficial da água (PANACHUKI et al., 2006). Para Nishiyama (1995), o comprimento de rampa é um dos fatores que intensificam a erosão do solo, pois com o aumento do comprimento da rampa, ocorre um aumento no volume de escoamento superficial, produzindo um aumento na intensidade de erosão, principalmente sob a forma de sulcos.

Quando as forças que agem para o deslocamento das partículas de solo se reduzem até a condição de ausência de movimento, ocorre o fenômeno de deposição (CARVALHO, 2008). A deposição ocorre após a diminuição e ou cessar da velocidade e turbulência das enxurradas das chuvas, as partículas de solo são então depositadas nas porções mais rebaixadas do relevo.

As formas de erosão hídrica mais comuns relatadas na literatura são a laminar, linear ou em sulcos e voçorocas: Erosão laminar remove finas camadas de solo em uma área homogênea, razão pela qual a erosão não pode ser evidenciada por simples inspeção visual; Erosão linear é uma forma de erosão resultante da concentração da enxurrada em alguns pontos do terreno, atingindo volume e velocidades suficientes para formar sulcos mais ou menos profundos; Voçorocas podem ser formadas através da conexão da erosão superficial, erosão subsuperficial e movimentos de massa (BACELLAR, 2006).

Os principais fatores que influenciam no desenvolvimento de processos erosivos são as características das chuvas; a declividade e o comprimento de rampa; a capacidade que o solo tem de absorver água e a densidade da cobertura vegetal (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1999). A textura do solo, fator que influencia a absorção de água no solo, afeta os processos de desagregação e transporte de partículas de solo, uma vez que, enquanto grandes partículas de areia resistem ao transporte, solos de textura fina (argilosos) também resistem à desagregação, sendo a areia fina e o silte as texturas mais suscetíveis à desagregação e ao transporte (LAL,1988).

A erosão hídrica é o processo de degradação que mais tem afetado a capacidade produtiva dos solos agrícolas devido a remoção da camada superior mais fértil do solo, onde a matéria orgânica e os nutrientes estão concentrados,

além de causar sérios danos ambientais, como o assoreamento e poluição dos recursos hídricos (ZARTL et al., 2001; COGO et al., 2003; PANACHUKI et al. 2006).

Na maioria dos casos, as taxas de erosão que ocorrem em áreas agrícolas é maior do que a taxa de formação dos solos (GARCÍA-RUIZ et al., 2015). A erosão em todo território brasileiro ocasiona a perda de milhões de toneladas de solos agrícolas a cada ano. As perdas por erosão são elevadas devido a não utilização de técnicas de manejo adequadas à conservação dos solos por uma parcela significativa de produtores agrícolas (OLIVEIRA et al., 2009).

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (2016) um estudo envolvendo 600 pesquisadores de 60 países, coordenado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), mostrou que mais de 30% dos solos do planeta estão degradados com problemas de erosão, compactação e perda de matéria orgânica. A erosão em solos agrícolas e de pastagens intensiva varia entre cem a mil vezes a taxa de erosão natural e o custo anual de fertilizantes para substituir os nutrientes perdidos pela erosão chega a 150 bilhões de dólares.

Os modelos gerados para representar as taxas de perdas de solos são obtidos por vários procedimentos de aquisição de dados, onde os resultados são gerados por diferentes métodos em diversas escalas (GARCÍA-RUIZ et al., 2015). Entre os trabalhos pesquisados em relação a erosão dos solos em áreas agrícolas, a maioria aplica o modelo que utiliza a RUSLE *(REVISED UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION*) que é um modelo preditivo desenvolvido pelo USDA - Agricultural Research Service para uso como planejamento de conservação projetado para prever as médias anuais da perda de solo a longo prazo.

O modelo RUSLE deriva do modelo da USLE *(Universal Soil Loss Equation)* que foi amplamente difundido para a estimativa de perda de solos, por ser prático e utiliza variáveis de fácil obtenção. A USLE foi desenvolvida visando à estimativa das perdas de solo a longo prazo em glebas sob condições específicas de cultivos e práticas de manejo (WISCHMEIER; SMITH, 1978). Apesar de ser revisada, a RUSLE utiliza o mesmo modelo de equação da anterior. As duas modificações representativas são: aplicação em áreas maiores, como, por exemplo, em bacias hidrográficas, pois a anterior era aplicada apenas em pequenas glebas e vertentes; e a junção de fatores (L e S) (C e P) que eram tabulados e calculados separadamente (SILVA, 2008).

O modelo da equação da RUSLE é representada pelos seguintes fatores:

$$A = R. K. LS. CP$$

Onde:

A= Estimativa de erosão específica, ou seja, é a perda de solo por unidade de área e por unidade de tempo.

R= Fator erosividade da precipitação, é a capacidade da chuva de desprender e transportar as partículas de solo.

K= Fator de erodibilidade do solo, que representa a susceptibilidade de diferentes solos a serem erodidos de acordo com suas características físicas, químicas e biológicas.

LS = Fator topográfico englobando a declividade e comprimento de rampa (adimensional);

CP = Fator de uso do solo e praticas conservacionistas.

A erosão hídrica é fortemente influenciada pelo fator comprimento do declive (fator L) e declividade do terreno (fator S) (BESKOW; MELLO; NORTON, 2009). A declividade é informação básica de topografia utilizada nas metodologias de identificação de áreas potenciais aos processos de erosão (FUJIHARA, 2002).

Os processos de escoamento e erosão são tipicamente representados em modelos com resolução espacial insuficientes. Essas representações normalmente não conseguem incorporar os efeitos importantes de heterogeneidade topográfica na geração de modelos de escoamento superficial e erosão do solo (HUTTON; NICHOLAS; BRAZIER, 2014).

A escala espacial da declividade, fator S, normalmente é obtida de MNT gerados por meio de dados de sensoriamento remoto com média resolução espacial obtidos por meio de plataformas orbitais ou aéreas tripuladas, medições de campo com estações totais, receptores GNSS de precisão ou com scanners a laser. Mas nos últimos anos com o advento das plataformas RPA, os modelos de processos erosivos vem sendo amplamente beneficiados, sobretudo pela elevada resolução espacial dos modelos gerados (FARIA, et al., 2017).

Ouédraogo et al. (2014) geraram MNT por meio de dados de RPA, para uma bacia hidrográfica sob manejo agrícola, com uma resolução de 1 m e compararam os resultados com os dados de varredura laser terrestre. A avaliação de erro mostrou que o modelo derivado de dados de varredura laser terrestre foi mais

preciso que o modelo derivado de dados de fotogrametria com RPA. No entanto, o modelo de varredura laser terrestre não conseguiu representar sulcos de erosão individuais em solos agrícolas.

Estudos de processos erosivos com dados de alta resolução espacial obtidos por aerofotogrametria utilizando RPA vem sendo realizados em diferentes locais. No estudo realizado por D'Oleire-Oltmanns et al., (2012) a aplicação de sensoriamento remoto usando RPA foi utilizada para o monitoramento da erosão do solo em Taroudant no Marrocos. Stöcker, Eltner, Karrasch (2015) realizaram a combinação de dados de RPA e lazer terrestres para a geração de modelos para representações de voçorocas em Andaluzia na Espanha. Glendell et al., (2017) Utilizaram modelos gerados com dados de RPA para estimar a extensão da erosão do solo de terras altas, na Inglaterra e País de Gales, definindo os diferentes tipos de erosão e suas características em diferentes tipos de solo.

3.2 MODELO NUMÉRICO DO TERRENO

O Modelo Numérico do Terreno - MNT é definido como uma representação matemática da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre (BURROUGH, 1986; FELGUEIRAS, 1998; WEIBEL, HELLER, 1999).

Os MNT são representados por coordenadas tridimensionais (x, y, z), onde z, o parâmetro a ser modelado, é função de xy, ou seja: z = f(x,y). Estes dados são usualmente adquiridos segundo uma distribuição irregular, ou com espaçamento regular, no plano xy ao longo de cotas com mesmo valor de **z** (FELGUEIRAS, CÂMARA, 2001).

Existem diversas aplicações de MNT: mapas topográficos para análises de corte para aterro, projeto de estradas e barragens; elaboração de mapas de declividade e exposição para apoio a análise geomorfológica e erodibilidade; análise de variáveis geofísicas e geoquímicas e representação tridimensional em combinação com outras variáveis (BURROUGH,1986).

De acordo com Felgueiras (1998), o processo de geração de MNT envolve as seguintes etapas:

• Aquisição dos dados representativos do fenômeno em análise (amostragem);

• Modelagem envolvendo a elaboração de um modelo matemático a partir da criação de estruturas de dados e de funções de interpolação, resultando na definição de

superfícies de ajuste com uma representação contínua do fenômeno em análise, mediante amostragem;

• Utilização do modelo gerado, em substituição à superfície real, com diferentes metodologias de análise para diversas aplicações.

A aquisição de dados para amostragem pode ser realizada com a utilização de equipamentos como teodolitos, estação total, receptores de sinal GNSS, varredura à laser do terreno (LIDAR - *Light Detection And Ranging*) que pode ser aerotransportada ou terrestre, fotografias aéreas e sensores orbitais (ex. SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*).

Tradicionalmente os métodos de levantamento de dados em campo para geração de MNT são muito dispendiosos e demorados devido o levantamento pontual das coordenadas. Com o tempo, a fotografia aérea tornou-se um dos principais métodos de coleta de dados para gerar MNT. Recentemente, o sistema de varredura à laser (LiDAR) aerotransportado também tornou-se uma maneira poderosa de produzir MNT devido à vantagem de coletar dados tridimensionais de forma muito eficaz ao longo de grandes áreas com alta resolução espacial (POLAT, UYSAL, 2015).

A principal desvantagem das plataformas aéreas tripuladas, como os aviões, é que são caras, especialmente para levantamentos de dados de pequenas áreas. As Aeronaves Remotamente Pilotadas (*Remotely Piloted Aircraft* – RPA) estão sendo utilizadas a cada dia com mais intensidade com o objetivo de gerar dados com custo mais acessível (REMONDINO et.al., 2011).

A aplicação de fotografias aéreas obtidas por meio de RPA para geração de MNT com alta resolução espacial é uma técnica vantajosa, em relação ao custo beneficio dos demais levantamentos, para quantificar e qualificar as alterações de superfície do terreno (ELTNER, et al., 2015).

Os produtos gerados em ambiente digital mediante MNT são conhecidos como: Modelo Digital de Superfície MDS (Digital Surface Models – DSM) onde são representadas todas as feições da superfície (terreno, vegetação, edificações) e o Modelo Digital do Terreno (Digital Terrain Models - DTM) que representa somente as formas do terreno estimada pela altitude. O modelo gerado pelo processo de subtração do MDT por MDS é conhecido como MDS normalizado onde são representados as elevações dos objetos acima do terreno.

Durante o processo de geração de MDT, são removidos objetos que não pertencem ao terreno, como as formas vegetais (árvores) e edificações (LOHMAN, KOACH, 1999). A filtragem dos objetos é um passo essencial para separar pontos que são da superfície do terreno e os objetos não pertencentes ao terreno (VOSSELMAN, 2000; AXELSSON, 2000).

Distinguir a superfície do terreno de objetos que não o pertencem pode ser um desafio considerável em regiões com alta variabilidade superficial. Entretanto MNT precisos só podem ser gerados se os pontos não pertencentes ao terreno forem removidos com sucesso (SHAN, SAMPTH, 2005).

3.3 AERONAVES REMOTAMENTE PILOTAS

As Aeronaves Remotamente Pilotadas são equipamentos capazes de deslocar-se no espaço aéreo e podem ser controlados remotamente por um piloto em uma estação de controle ou podem voar de forma autônoma usando planos de voo pré-programados (EISENBEISS, 2009).

Foram desenvolvidas inicialmente para o uso em aplicações militares. Entretanto, as aplicações na esfera civil na última década cresceram progressivamente em diversos segmentos com a utilização de RPA em apoio e suporte na coleta de dados e informações para: infraestrutura; transporte; segurança; mídia e entretenimento; fotogrametria; agricultura; mineração; monitoramento de florestas; topografia.

O DECEA (Departamento de Controle de Espaço Aéreo), define uma RPA de forma semelhante a uma aeronave convencional tripulada, porém com o diferencial de não ter o piloto a bordo; por isso, a autorização para que uma RPA trafegue pelo espaço aéreo está condicionada à apresentação de documentos que comprovem os requisitos necessários para voo como qualquer outra aeronave.

De acordo com a ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil (2017) as RPA estão divididas em três classes, de acordo com o peso máximo de decolagem, no qual deve ser considerado os pesos da bateria ou combustível do equipamento e de carga eventualmente transportada. A classificação é aplicável apenas para as RPA e não para os aeromodelos:

Classe 1 – Peso máximo de decolagem maior que 150 kg

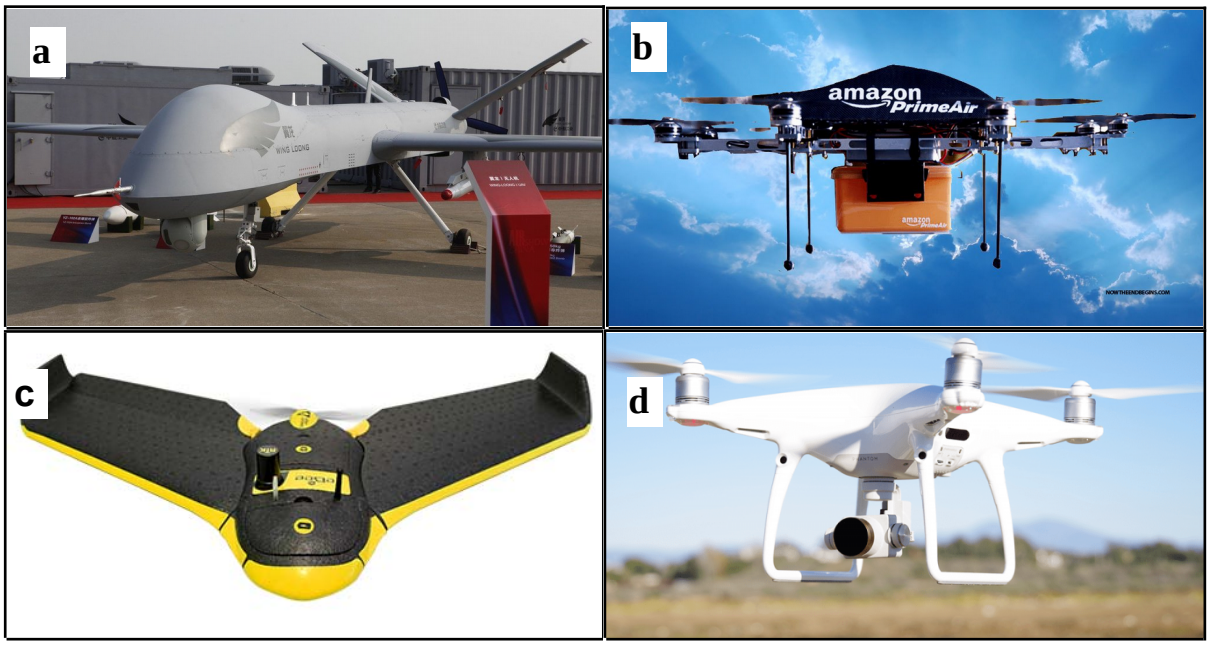
Classe 2 – Peso máximo de decolagem maior que 25 kg e até 150 kg

Classe 3 – Peso máximo de decolagem de até 25 kg

A diferença entre aeromodelos e RPA é que aeromodelos são equipamentos para uso recreacional e RPA são para uso profissional em aplicações de atividades comerciais ou pesquisa. As RPA são distinguidas em dois modelos principalmente, asas fixas e multirotores.

A figura 1 mostra alguns modelos de equipamentos RPA de acordo com as classes do peso de decolagem: 1-a, RPA classe 1 de asa fixa com 200 kg para uso militar; 1-b, RPA multirotor classe 2 para entregas de até 25 kg; 1-c, RPA classe 3 de asa fixa com 630 gramas para mapeamentos; 1-d, RPA classe 3 multirotor com 1,380 kg para o registro de imagens para diversas finalidades.

Figura 1: Equipamentos RPA.



Fonte: *Arab News; Amazon; Santiago e Cintra Geotecnologias; DJI.*

Segundo Morgenthal e Hallermann (2014), as RPA apresentam certas limitações, principalmente os menores e mais leves. Devido ao seu tamanho e peso reduzido o sistema de voo é bastante sensível às mudanças meteorológicas, como chuvas e ventos mais fortes. Dentre as vantagens ressalta-se a capacidade de transferência de dados em tempo real entre a RPA e a estação de controle, além do armazenamento de dados a bordo durante todo o voo.

3.3.1 Fotogrametria com Imagens de RPA

A fotogrametria com imagens de RPA envolve algumas das mesmas técnicas da fotogrametria realizada por meio de aeronaves pilotadas com a combinação de programas de computador que automatizam a maioria dos processamentos para geração dos produtos (MNT, orthomosaicos).

De acordo com RAY (1963), a fotogrametria foi definida como o registro instantâneo dos detalhes do terreno que se determina principalmente pela distância focal da lente da câmera, pela altura de voo do avião no momento da exposição e pelo filme e filtros usados. Para a *American Society Of Photogrammetry* - ASP (1966) a fotogrametria, é a arte, ciência e tecnologia de obter informações sobre objetos e do meio ambiente com o uso de processos de registros, medições e interpretações das imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética registradas.

A fotogrametria envolve dois conceitos: estereoscopia e paralaxe. A estereoscopia diz respeito à visualização de um mesmo foco por dois mecanismos de captação de imagens. A paralaxe é o deslocamento aparente na posição de um objeto, em relação a um ponto de referência, causado por uma mudança na posição de observação (TOMMASELLI, 2009).

Na fotogrametria aérea a elaboração do plano de voo representa a primeira etapa no processo de levantamento e sua qualidade pode comprometer todo o desenvolvimento do projeto. O objetivo final do levantamento deve ser considerado na elaboração do plano de voo para definir a escala a ser utilizada. Após definida a escala, deve-se definir o limite da área a ser recoberta, sinalização de alvos (pontos de controle), cálculo da sobreposição lateral e longitudinal das fotografias e os eixos das faixas de voo preferencialmente no sentido Norte-Sul ou Leste-Oeste.

Depois do levantamento das fotografias aéreas é necessário realizar fototriangulação, que permite determinar coordenadas de pontos de interesse no espaço objeto. Esse método para determinar as coordenadas é possível devido à relação geométrica entre as fotografias adjacentes, o controle de campo mediante pontos de apoio, em conjunto de valores aproximados de parâmetros de orientação da fotografia (LUGNANI, 1987). O maior objetivo da fototriangulação é fornecer coordenadas precisas para os pontos necessários na orientação de modelos fotogramétricos para a restituição de ortofotos (ANDRADE, 1998).

De acordo com Coelho Filho e Brito (2007), o objetivo da restituição é interpretar as inúmeras feições naturais ou artificiais do terreno, além de extraí-las com suas referências geográficas ao espaço-objeto.

O imageamento por meio de câmeras de pequeno formato instaladas em RPA, deu início as pesquisas referentes a elaboração de produtos cartográficos. A popularização das câmeras digitais portáteis em meados dos anos 2000, mesmo não sendo projetadas para aplicações de fotogrametria, mas devido ao baixo custo de aquisição instigaram muitos pesquisadores à realizarem testes em que obtiveram informações confiáveis (MACHADO et al. 2003; DISPERATI et al. 2007).

De acordo com Woodget et al. (2015), a emergência de pequenas RPAs contribuiu significativamente para a mudança metodológica em levantamentos topográficos. Fonstad et al. (2013), consideram que tal ferramenta produz dados de qualidade e resolução comparáveis com os obtidos por sensores tipo LiDAR ou pela fotogrametria clássica, mas com maior facilidade de aquisição de dados e menor custo.

A combinação de imagens de RPA com o algoritmo Structure-from-Motion (SfM) fornece uma estrutura eficiente, de baixo custo e rápida para sensoriamento remoto para mapeamentos. Esta metodologia foi adequada para levantamentos topográficos repetidos em áreas remotas ou pouco acessíveis (CLAPUYT; VANACKER; OOST, 2016). As técnicas SfM se tornaram parte do kit de ferramentas dos geomorfólogos, devido ao potencial para expandir ainda mais a escala na qual caracterizamos a topografia e monitoramos as mudanças geomórficas (SMITH; VERICAT, 2015).

A fotogrametria por meio de RPA, além de apresentar uma alternativa de baixo custo em relação a fotogrametria aérea tripulada clássica, possibilita trabalhar a uma altura de voo mais baixa do que os sistemas tripulados e com isso é possível obter imagens com maior resolução espacial (EVERAERTS, 2008). As imagens de RPA, além de proporcionarem a coleta de dados com maior resolução espacial também incluem maior homogeneidade radiométrica que as imagens obtidas com aeronave tripulada ou imagens de satélite devido à baixa altitude de aquisição (LELONG, et. al. 2008).

Embora as RPAs não sejam adequadas para coletar imagens de grandes áreas para mapeamento devido à restrições de autonomia no tempo de voo e também pela dificuldade computacional de processar grandes números de

fotografias com alta resolução espacial, elas são adequados para criar e atualizar mapas topográficos locais (BENDEA, et. al., 2007; HAARBRINK; EISENBEISS, 2008; LI, 2011).

Estudos como os realizados por Ribeiro Júnior (2011), Ferreira (2014) e Silva et al. (2015), demonstraram que a fotogrametria digital com VANT utilizando câmera de pequeno formato, pela computação de similaridades entre imagens sobrepostas devidamente orientadas, é um produto com precisão e confiabilidade, desde que utilizados pontos de apoio de solo pré-sinalizados para a devida orientação das aerofotos.

De acordo com Costa e Silva (2012) o emprego de alvos pré-sinalizados envolve custos adicionais significativos em termos de planejamento, implantação e medições, para um projeto de mapeamento por fotogrametria, mas pode ser a garantia da precisão exigida quando forem usados sistemas alternativos com câmeras digitais não métricas.

3.4 POSICIONAMENTO POR SATÉLITES

Os sistemas de posicionamento por satélites, ou GNSS possibilitam suprir as necessidades de orientação (localização geográfica) sobre qualquer ponto do globo terrestre. E o desenvolvimento das RPA para coleta de dados espaciais está fortemente atrelado a essa tecnologia que atualmente possibilita conhecer a posição espacial de objetos com alta precisão.

O termo GNSS *(Global Navigation Satellite System)* foi instituído em 1991 pela *International Civil Aviation Organization - ICAO*, durante a décima Conferência de Navegação Aérea, de forma a representar os sistemas de posicionamento por satélite com cobertura global (SEEBER, 2003).

A solução para os problemas de posicionamento global surgiu de fato na década de 1970, quando os Estados Unidos lançaram a proposta do NAVSTAR-GPS (*Navigation System with Timing and Ranging - Global Positioning System*) no uso de atividades militares e aberto para uso civil a partir da década de 80. Essa foi uma etapa que marcou a história da navegação, pelo fato de que revolucionou, praticamente, todas as atividades que dispunham do interesse de determinar posições no espaço (MONICO, 2008).

O NAVSTAR-GPS tornou-se totalmente operacional em 1993, mas somente depois do ano 2000 que o Departamento de Defesa dos Estados Unidos desligou o

sistema que degradava o sinal do GNSS para usuários civis que introduzia erros de posicionamento na ordem de 100 e 140 metros (TRAGUETA; CARDOSO, 2009).

Além deste sistema, outros sistemas foram desenvolvidos ou estão em fase de implementação, tais como o *GLobalnaya NAvigationnaya Sputnikovaya Sistema - GLONASS* da Federação Russa, o *Galileo* da União Européia e o *BeiDou* da República Popular da China. Existem ainda sistemas locais que complementam o aumento capacidade do *GNSS*, como o *European Geostationary Navigation Overlay Service - EGNOS* de cobertura Europeia e o Wide Area Augmentation System - *WAAS* que cobre a América do Norte.

Com o aumento da qualidade do sinal para o uso civil, acompanhado do desenvolvimento de receptores com configurações mais avançadas, o GNSS tornou-se o sistema de posicionamento mais utilizado para auxiliar as metologias de levantamentos de dados para a Geodésia, Topografia e Aerofotogrametria (IBGE, 2008). Outras aplicações que são essencialmente integradas ao GNSS são as navegações aéreas, marítimas e terrestres. Recentemente, a localização proporcionada pelo GNSS é fundamental para o funcionamento de diversos aplicativos móveis.

De acordo com Monico (2008) o GNSS tornou-se uma tecnologia que já faz parte do cotidiano não só da comunidade científica, mas também de usuários em geral. Devido à precisão que o GNSS possibilita no posicionamento, ele tem sido utilizado para diversos fins operacionais, desde uma simples navegação por aventureiros, até a realização de posicionamento de ordem milimétrica.

3.4.1 Funcionamento do GNSS

O princípio de funcionamento do GNSS está baseado no conceito da medida de distâncias entre uma fonte transmissora e uma fonte receptora por meio de rádio-sinais. São necessárias pelo menos três distâncias medidas e o conhecimento da posição absoluta das três fontes transmissoras (satélites) que proporcionam determinar a posição da fonte receptora (usuários) a partir do processo de triangulação. As distâncias são computadas a partir do tempo e velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas (MONICO, 2008).

Os satélites transmitem os sinais continuamente em duas frequências da banda L, denominadas de L1 (1575,42 MHz) e L2 (1227,60 MHz). Sobre as frequências são modulados a mensagem de navegação e os códigos

pseudoaleatórios (PRN – Pseudo Randon Noise). A transmissão do sinal GNSS ocorre por meio da fase de batimento da onda portadora e/ou da pseudodistância derivadas do código C/A. A precisão da medida da fase da onda portadora pode ser da ordem de milímetros, ela é a observável indispensável na obtenção de posicionamentos que requeiram melhor precisão. A pseudodistância é mais utilizada em posicionamentos com precisão de ordem métrica (MONICO, 2008).

Segundo Monico (2008), o GNSS é composto por três segmentos: espacial (satélites); controle e usuários (Descrição com base na organização do NAVSTAR-GPS).

- O espacial é distribuído em seis planos orbitais e contém no mínimo 24 satélites, distribuídos em 4 satélites por órbita, separados de forma idêntica, estando a uma altitude média de 20.200 km. Os planos orbitais possuem uma inclinação de 55° relacionada ao Equador e seu período orbital é de 12 horas siderais.
- O segmento de controle é responsável em realizar o monitoramento e controle do sistema de órbita dos satélites, predizer as efemérides (calculando as correções dos relógios dos satélites) e atualizar as mensagens de navegação de cada satélite de forma periódica. Este segmento é composto por cinco estações de monitoramento do GPS (Hawaii, Kwajalein, Ascension Island, Diego Garcia e Colorado Springs), sendo que há três delas que realizam a transmissão de dados aos satélites e uma estação é nominada como a de controle central.
- O segmento de usuários está diretamente ligado aos receptores GNSS, os quais são adequados para suas relativas finalidades (geodésia, navegação).

As observações GNSS, como qualquer outro tipo de observação, estão sujeitas a erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros que causam ambiguidades.

Entre os erros envolvidos, pode-se citar os erros devido ao relógio do satélite, órbitas, efeitos atmosféricos, erro do relógio do receptor e efeito do multicaminho. Tais erros deterioram a qualidade das observáveis GNSS (código e fase da onda portadora) e precisam ser tratados adequadamente, para que seja possível realizar posicionamento de ordem milimétrica (SOUZA, 2006).

Com os sinais de código, é enviada uma mensagem que contém diversas informações sobre as efemérides. De acordo com Seeber (2003), as efemérides transmitidas são preditas e comunicadas aos usuários através de mensagens de navegação, enquanto que as efemérides precisas são provenientes de estimativas

feitas por centros subordinados ao IGS (International GNSS Service) a partir de elementos orbitais observados.

Monico (2008) afirma que o uso das efemérides transmitidas tem sido feito principalmente no processamento de bases curtas e aplicações na topografia, enquanto as efemérides precisas têm sido utilizadas no processamento de linhas de base longas e em aplicações que requeiram grandes precisões, como geodinâmica.

3.4.2 Métodos de posicionamento e receptores GNSS

A utilização do GNSS aumentou consideravelmente em diversas aplicações que são dependentes do posicionamento terrestre com precisão. Como mencionado anteriormente, as aplicações com GNSS englobam desde aplicativos para localização de endereços ou direcionamento de rotas, instalados em dispositivos móveis, com precisão que atualmente chega à aproximadamente 5 metros; a navegação aérea e marítima; e os levantamentos de dados para a Geodésia, Topografia e Aerofotogrametria, que dependendo das configurações dos receptores e métodos de posicionamento, podem processar o sinal GNSS com precisão de alguns centímetros ou milímetros.

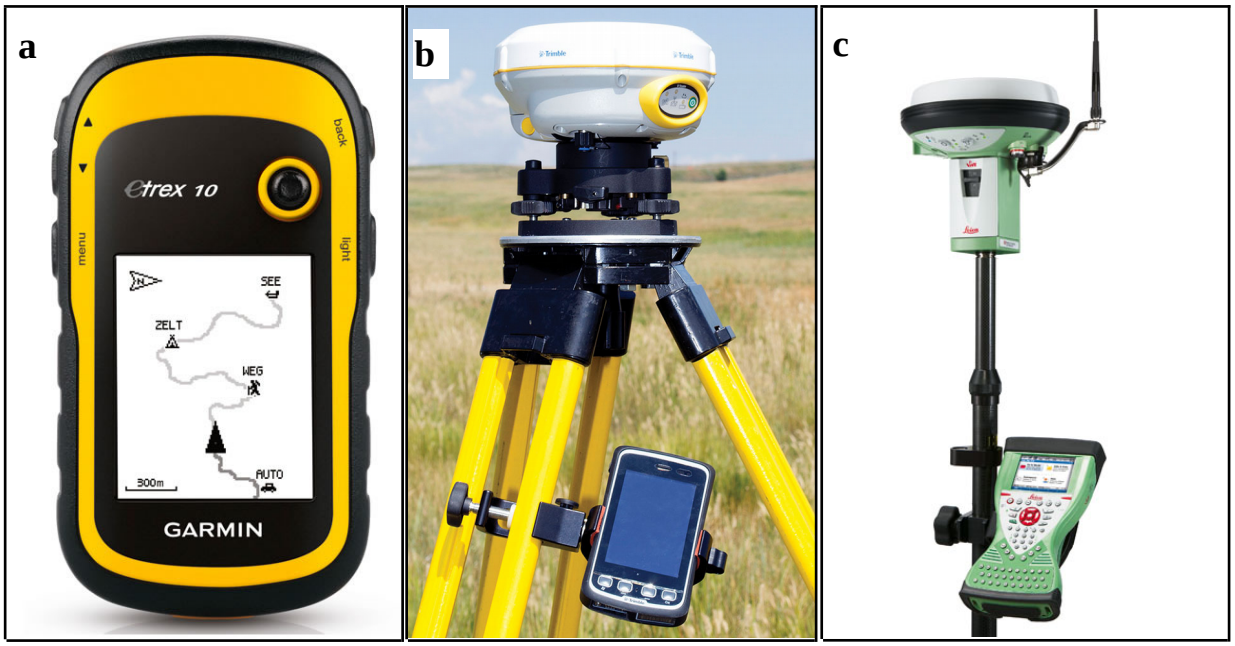
Os receptores podem ser classificados, segundo sua utilização, como: navegação que são destinados à navegação terrestre, marítima e aérea e utiliza as observações das pseudodistâncias derivadas do codigo C/A; topográfico que são capazes de rastrear a fase da onda portadora L1 e o código C/A, podem proporcionar posicionamento preciso quando utilizados em conjunto com receptores localizados em estações de referência, mas a sua utilização fica restrita a um de raio de aproximadamente 10 km; geodésico – receptores capazes de rastrear a fase da onda portadora nas duas frequências e pode utilizar linhas de base até que 100 km.

O emprego de receptores de dupla frequência é uma solução muito utilizada para reduzir os efeitos da ionosfera em linhas de base com comprimento superior a 10 km. Usuários que possuem receptores de simples frequência têm a possibilidade de utilizar modelos regionais da ionosfera (CAMARGO, 1999).

O posicionamento com GNSS é realizado por meio de diferentes técnicas e observáveis, as quais fornecem níveis de precisão que variam desde algumas dezenas de metros até poucos milímetros. A observável utilizada no processo de estimação das coordenadas é um dos principais fatores que influenciam os níveis de precisão alcançados (IBGE, 2008).

A figura 2 mostra diferentes tipos de receptores de sinal GNSS: exemplo 2-a receptor de mão para navegação com precisão de 5 metros, 2-b receptor pós-processado topográfico com precisão de alguns milímetros; 2-c receptor RTK em tempo real com precisão de centímetros.

Figura 2: Receptores de sinal GNSS.



Fonte: *Garmin; Trimble; GeoCAD*

Os métodos de posicionamento de GNSS são divididos de acordo com o número de receptores utilizados no levantamento de dados. A utilização de somente um receptor para o levantamento de dados é denominada de posicionamento absoluto ou por ponto. A utilização de dois ou mais receptores é denominada de posicionamento relativo e podem ser classificadas como estáticos; estático-rápido; semicinemático e cinemáticos (em movimento), e também de acordo com o resultado que podem ser obtidos mediante pós-processamento ou em tempo real (RTK - Real Time Kinematic), com correções diferenciais (DGPS - Differential Global Positioning System), dentre outros (SEEBER, 2003 e MONICO, 2008).

No posicionamento absoluto, as coordenadas de um ponto localizado na superfície terrestre são determinadas diretamente em relação ao centro da terra, ou seja, ao centro de massa da Terra. Este método de posicionamento é a partir do código C/A e proporciona precisão inferior aos demais métodos e técnicas de posicionamento existentes. O Posicionamento por Ponto Preciso- PPP compreende

uma técnica de posicionamento com um único receptor pós-processada, que fornece a depuração dos erros e consequentemente uma melhor precisão, enquanto que o método de navegação utiliza somente o código C/A (pseudodistância) para a determinação das coordenadas aproximadas e instantâneas das estações em relação ao referencial: elipsóide WGS84 (World Geodetic System 1984), (MONICO, 2008 e CHUERUBIM, et. al. 2013).

O levantamento pelo método posicionamento relativo estático, para a fixação de base, tem duração que varia de 20 minutos até várias horas. Para as linhas de base maiores que 10 km recomenda-se a utilização de receptores de dupla frequência. A precisão conseguida com esta técnica de posicionamento pode chegar a alguns milímetros. Para o posicionamento relativo estático-rápido, que é conhecido como pseudocinemático, o levantamento é realizado de forma similar ao estático. A grande diferença entre estas técnicas está no intervalo de tempo do rastreio, que no estático-rápido é inferior a 20 minutos.

O posicionamento relativo semicinemático conhecido como pseudoestático, é um método de posicionamento intermediário entre o posicionamento relativo estático e cinemático. Conhecido como *stop and go*, é similar ao estático-rápido, onde o diferencial está também no tempo de rastreio em cada ponto e na necessidade do receptor permanecer ligado durante todo o período do levantamento. O posicionamento relativo cinemático é um método no qual o receptor base fica parado enquanto que o receptor rover desloca-se entre os pontos durante todo o levantamento (MONICO, 2008).

O levantamento em tempo real - RTK é um método de posicionamento rápido e preciso, o seu princípio de funcionamento é fundamentado na transmissão de correções diferenciais da estação de referência, para estação que se deseja conhecer as coordenadas. As estações devem ser equipadas com receptores GNSS, e um meio de comunicação para transmissão dos dados). A transmissão dos dados é feita por meio de um enlace que pode ser rádio de comunicação, linha telefônica, sub-portadora FM (RDS) ou satélites de comunicação (TALBOT, 1996).

A maioria dos erros de propagação gerados nos levantamentos é consequentemente da disposição da geométrica dos satélites e denomina-se DOP (*Dilution Of Precision*). Podem ser calculados previamente a partir do conhecimento das coordenadas aproximadas da localidade e das órbitas preditas dos satélites.

Para obter levantamentos precisos com boa qualidade, o ideal são valores de DOP abaixo de 5 (FGCC, 1989).

Para aplicações geodésicas em território brasileiro é necessário que as estações de referência façam parte do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), cujas características são apresentadas por Costa e Fortes (2000). Destaque deve ser dado à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC), que é operada e mantida pelo IBGE. Trata-se de uma rede geodésica ativa que elimina a necessidade do usuário ocupar estações passivas do SGB em alguns casos (PEREIRA et. al., 2003).

3.5 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

O surgimento dos SIG está relacionado com o desenvolvimento da tecnologia da informação, que a partir de meados do séc. XX proporcionou análises do mundo real em ambientes digitais. De acordo com Longley et. al. (2013) o primeiro SIG foi o Sistema de Informação Geográfica do Canadá, concebido em meados da década de 1960 como um sistema computadorizado de mensuração de mapas. Com os avanços da informática que popularizaram os computadores entre a sociedade civil a partir da década de 80, os SIG que eram utilizados principalmente por setores governamentais, começam a ter amplas utilidades em vários setores.

Segundo Burrough (1998) SIG é um conjunto poderoso de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e exibir dados espaciais do mundo real para um conjunto particular de propósitos composto por quatro componentes básicos: *hardware*, *software*, base de dados e ambiente organizacional. Atualmente os SIGs permitem ver, entender, questionar, interpretar e visualizar dados de diversas maneiras para revelar relações, padrões e tendências na forma de mapas, relatórios e gráficos. (ESRI, 2013).

Câmara (1994) apresenta o conjunto básico de funções de um Sistema de Informações Geográficas (SIG):

• Análise Geográfica - mediante operações algébricas (adição, subtração, sobreposição e multiplicação de mapas ou exponenciação e transformações logarítmicas), operações de distância, consulta a banco de dados, análises de vizinhança, dentre outras.

• Processamento Digital de Imagens - tratamento de imagens de satélite e fotografias aéreas por meio de técnicas de filtragem, análise de histograma, classificação supervisionada e não supervisionada, além de outras.

• Modelagem Numérica de Terreno - que representa o relevo em uma estrutura matemática, que permite sua visualização em um formato bi ou tridimensional. Por meio destes modelos, é possível a extração de informações como, por exemplo, declividade e orientação do terreno.

• Modelagem de Redes - redes são estruturas lineares conectadas que armazenam dados sobre recursos que fluem entre localizações distintas. Mediante técnicas de geoprocessamento é possível, por exemplo, calcular o caminho ótimo e crítico para a instalação das redes.

• Produção Cartográfica - produção digital de mapas com recursos sofisticados de apresentação gráfica, permitindo a colocação de legendas, textos explicativos etc.

Nos últimos anos, os SIGs passaram a assumir papel importante na integração de diversas outras tecnologias, como o sensoriamento remoto de alta resolução espacial, GNSS e a internet, promovendo novos níveis de funcionalidade e acessibilidade (SHIMABUKURO; MAEDA; FORMAGGIO, 2015).

Essa capacidade de integração de dados com diferentes formatos (imagens, tabelas e vetores), com a disponibilidade de diversas ferramentas de modelagens para geração de informações espaciais e também a possibilidade de implementação de ferramentas para análises específicas, em conjunto com a experiência dos analistas, destaca os SIG para além de programas de computador.

Os sistemas mais recentes incorporam, além das tradicionais análises geográficas, ferramentas para processamento digital de imagens de sensoriamento remoto, além da captura e tratamento de dados coletados por meio de GNSS. Existem diversos SIGs comerciais e gratuitos disponíveis para os mais variados tipos de aplicação, desde o manejo dos recursos naturais, planejamento agrícola, planejamento urbano, arrecadação de impostos até o marketing (ARAÚJO, 2017).

De acordo com Wu et al. (2009), os SIG tem sido utilizados para planejamento na agricultura, inventário do uso da terra, gerenciamento dos recursos naturais e suporte à decisão com o gerenciamento de informações, à análise da variabilidade espacial e para aplicações diversas. Nesse sentido os processamentos em SIG são as fases principais da agricultura de precisão (GOSWAMI, SAXENA, BAIRAGI, 2012).

Nos processamentos de modelagem do terreno em SIG são utilizados interpoladores para estimar valores de determinadas características em locais que não se tem informação. As interpolações são realizadas por meio das coordenadas e as distâncias de separação entre os pontos para estimar o valor nos locais desconhecidos.

Os métodos de interpolação são baseados no conceito de dependência espacial, que estima valores mais semelhantes em locais próximos do que em locais separados por uma distância maior, até um limite em que a semelhança entre um par de pontos qualquer não é mais afetada pela dependência espacial. Existem diversos métodos de interpolação disponíveis, entretanto o melhor método e modelo pode variar para cada situação, não sendo possível afirmar que um método sempre apresentará desempenho superior ao outro (TREVISAN; MOLIN, 2014).

O potencial da integração de dados de sensoriamento remoto obtidos com RPA e GNSS integrados em SIG é destacado por fornecer informações mais rápidas e mais baratas sobre as condições de determinada área em comparação com técnicas tradicionais sem perder em precisão (CASELLA, et al., 2014).

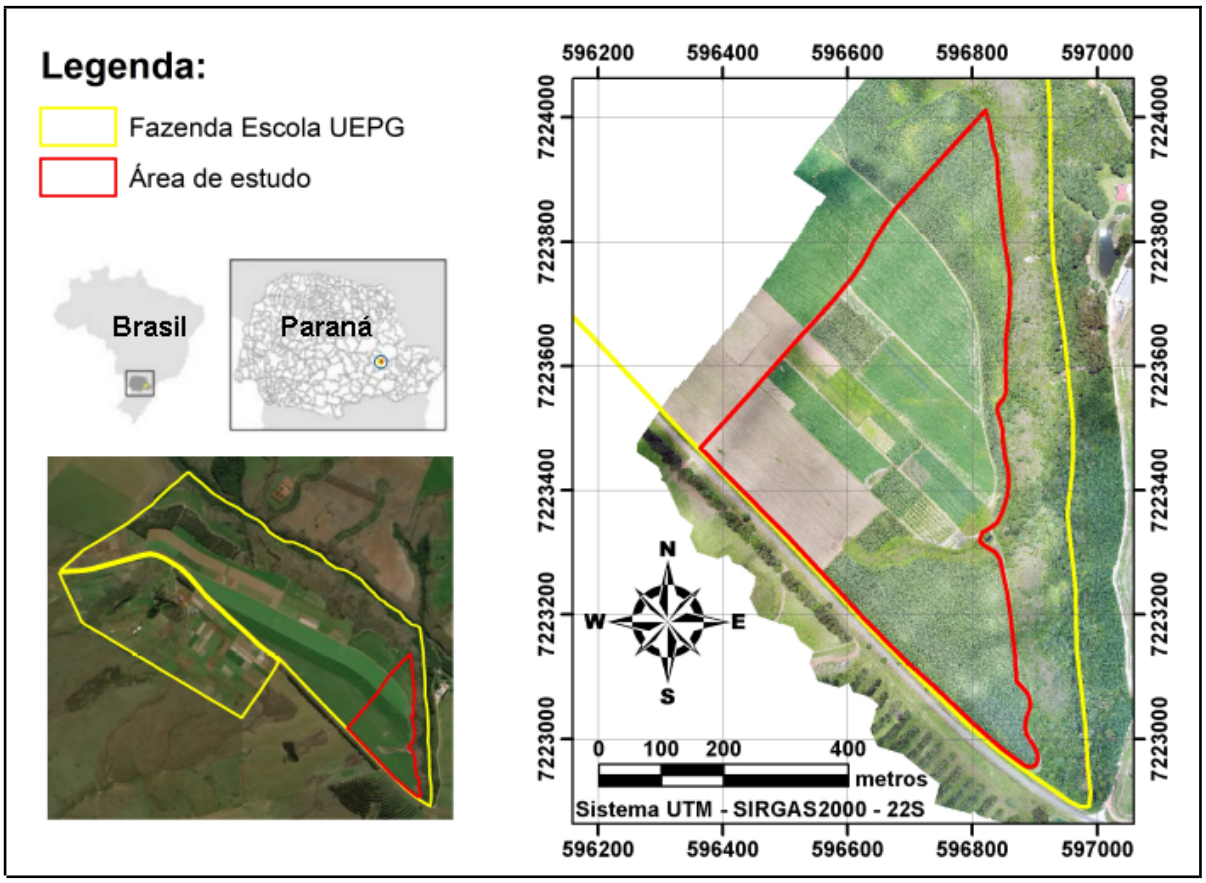
4 METODOLOGIA

Este trabalho utilizou métodos e técnicas de topografia, processamento digital de imagens e análise integrada de dados em ambiente SIG, para modelar o cenário de uma gleba de produção agrícola por meio da interpretação e análise de agentes formadores da paisagem com a finalidade de diagnosticar processos erosivos.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo selecionada para o levantamento de dados deste trabalho é uma gleba de aproximadamente 26 hectares, localizada na Fazenda Escola Capão da Onça – FESCON – UEPG no município de Ponta Grossa – PR. A Figura 3 apresenta a localização da área de estudo.

Figura 3: Localização da área de estudo



Fonte: O autor

A Fazenda Escola da UEPG está localizada no segundo planalto paranaense, em uma região caracterizada com o clima do tipo Cfb (subtropical úmido

mesotérmico), com pluviosidade anual entre 1400 e 1800 milímetros e a temperatura média anual é de 17,5 °C (CRUZ, 2007). Os solos na região são classificados como Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2013), originário do retalhamento de folhelho da Formação Ponta Grossa e Furnas (MELO, 1999) e o relevo é caracterizado, principalmente, como suave ondulado (FERREIRA, 2009).

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Equipamentos utilizados

• Teodolito eletrotônico e trena métrica. Utilizados para medir ângulos e distâncias da grade regular.

• Receptores GNSS Trimble R4 dupla frequência Geodésico de precisão pós-processado para georreferenciar os pontos marcados na grade regular e pontos de controle para o aerolevantamento com RPA.

• Trado Holandês para coleta de amostras de solo.

• RPA (asa fixa) eBee fabricada pela senseFLY, equipada com câmera de formato pequeno SONY Cyber-Shot WX RGB com 18.2 megapixels e RPA (multi-rotor) Phantom 4 Pro fabricado pela DJI, equipada com câmera de formato pequeno sensor CMOS RGB de 20 megapixels e obturador mecânico. As RPAs foram utilizados para levantamento de fotografias aéreas.

• Computador com processador Intel i7 - 6700, 3.4GHz e 32 Gb de memória com placa gráfica GeFprce GTX 745 (1032 MHz, 2048 MB).

Softwares utilizados:

• Trimble Business Center. Pós-processamento de dados GNSS.

• eMotion (eBee) e Drone Deploy (Phantom). Configuração de plano de voo.

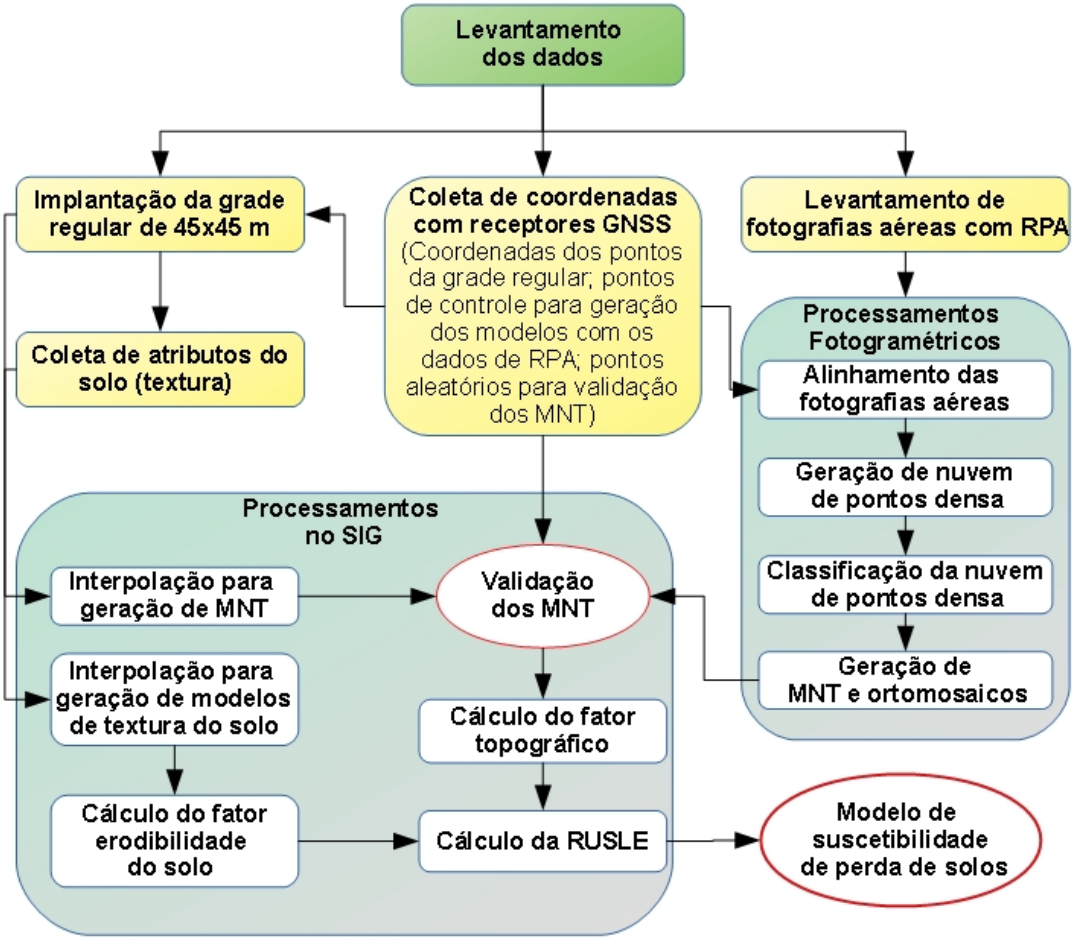
• PhotoScan. Fotogrametria mediante dados obtido com RPA.

•ArcGIS. Ambiente SIG. Integração dos dados, processamento, análise e representação das informações.

4.2.2 Sequência das etapas do trabalho

As etapas de levantamentos de dados e processamentos para a execução deste trabalho estão representadas sequencialmente no diagrama apresentado na Figura 4.

Figura 4: Diagrama com sequência das etapas para a realização do trabalho



Fonte: O autor

De acordo com a Figura 4, nas etapas de levantamento de dados em campo, foram utilizadas técnicas de topografia para definir grade regular com pontos de 45x45 metros. O georreferenciamento dos pontos da grade foi realizado mediante a coleta das coordenadas planialtimétricas por meio de receptores de sinal GNSS de precisão pós-processado, e a coleta de atributos do solo foi mediante tradagem. Esses dados levantados em campo com a grade regular serviram como base para avaliar os MNT obtidos com os dados levantados com RPA e gerar modelo para o diagnostico de processos erosivos na área de estudo.

O levantamento de fotografias aéreas com RPA foi realizado em dois recobrimentos. O primeiro aconteceu no dia 05 de abril de 2016 com o equipamento de RPA de asa fixa com a implantação de 6 pontos de controle distribuídos pela área de estudo. O segundo recobrimento foi realizado no dia 07 de fevereiro de 2018 com equipamento de RPA multi-rotor e foram implantados 14 pontos de controle. O

programa de fotogrametria foi utilizado no processamento das fotografias aéreas para a geração dos MNT e ortomosaico.

O SIG foi utilizado para a integração dos dados, armazenamento em banco de dados, interpolações dos dados levantados com a grade regular para gerar MNT, as avaliações entre os modelos obtidos e para a representação das informações.

Os detalhes de cada etapa do trabalho que foi apresentado na Figura 4 estão descritos nos próximos sub-capítulos da metodologia.

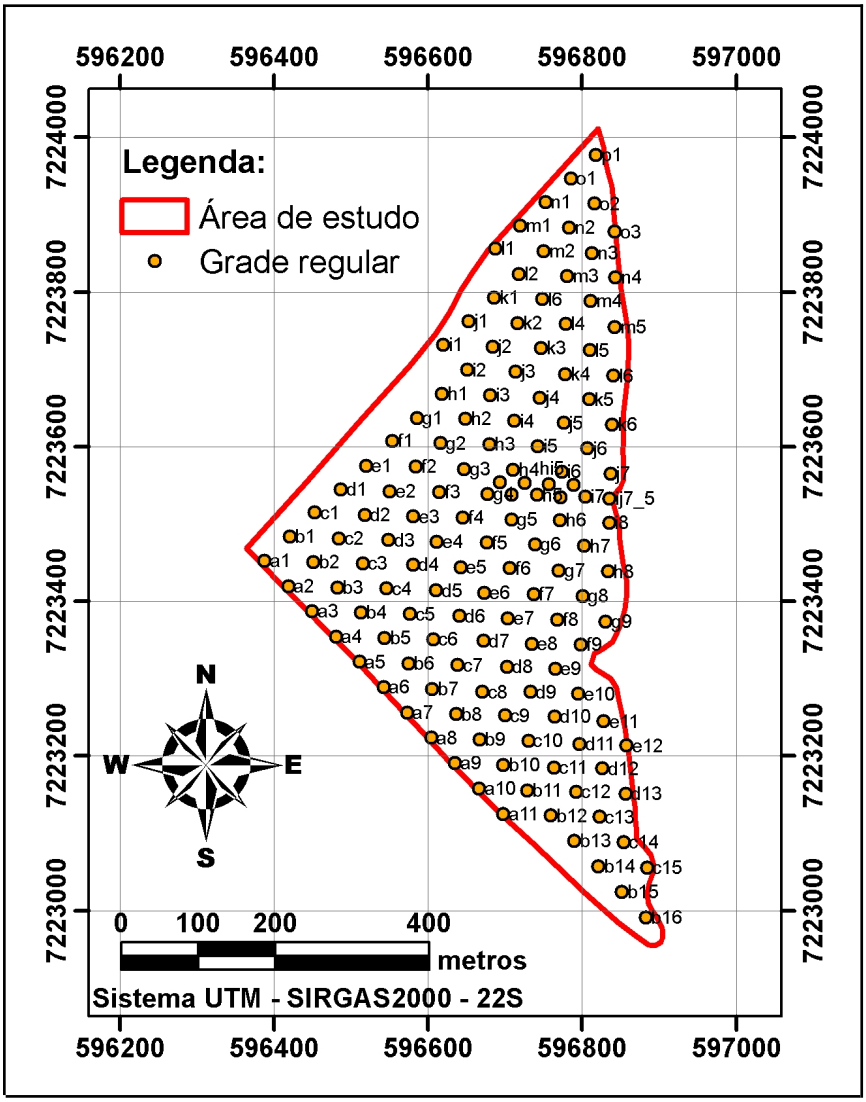
4.2.3 Implementação de grade regular

A grade regular foi implantada por meio da demarcação de ângulos retos obtidos por meio de teodolito eletrônico e referenciados a partir de pontos notáveis no campo (postes de energia elétrica e palanques de cerca paralelos a rodovia) e as distâncias de 45 metros entre os pontos da grade foram medidas por meio de trena. Em um local onde há uma feição de erosão linear foram marcados e coletados pontos intermediários com 22,5 m. No total foram marcados 140 pontos para a implantação da grade. A Figura 5 apresenta a distribuição espacial deste levantamento.

Para o georreferenciamento da grade regular foram utilizados receptores de sinal GNSS pós-processado. O levantamento planialtimétrico foi mediante fixação de base pelo método de posicionamento relativo estático no campo durante o período mínimo de seis horas para a correção e locação das coordenadas. E foi utilizado o método de posicionamento relativo estático-rápido, com permanência de quinze minutos em cada ponto, para a locação das coordenadas dos pontos da grade regular.

O pós-processamento das coordenadas foi realizado com a correção de linhas de base, pelas estações de referência de Curitiba e Guarapuava, ambas no Paraná e com distância menor que 150 km da base, disponibilizadas pela Rede de Monitoramento Contínuo (RBMC/IBGE).

Figura 5: Distribuição espacial da grade regular.



Fonte: O autor

4.2.4 Amostragem

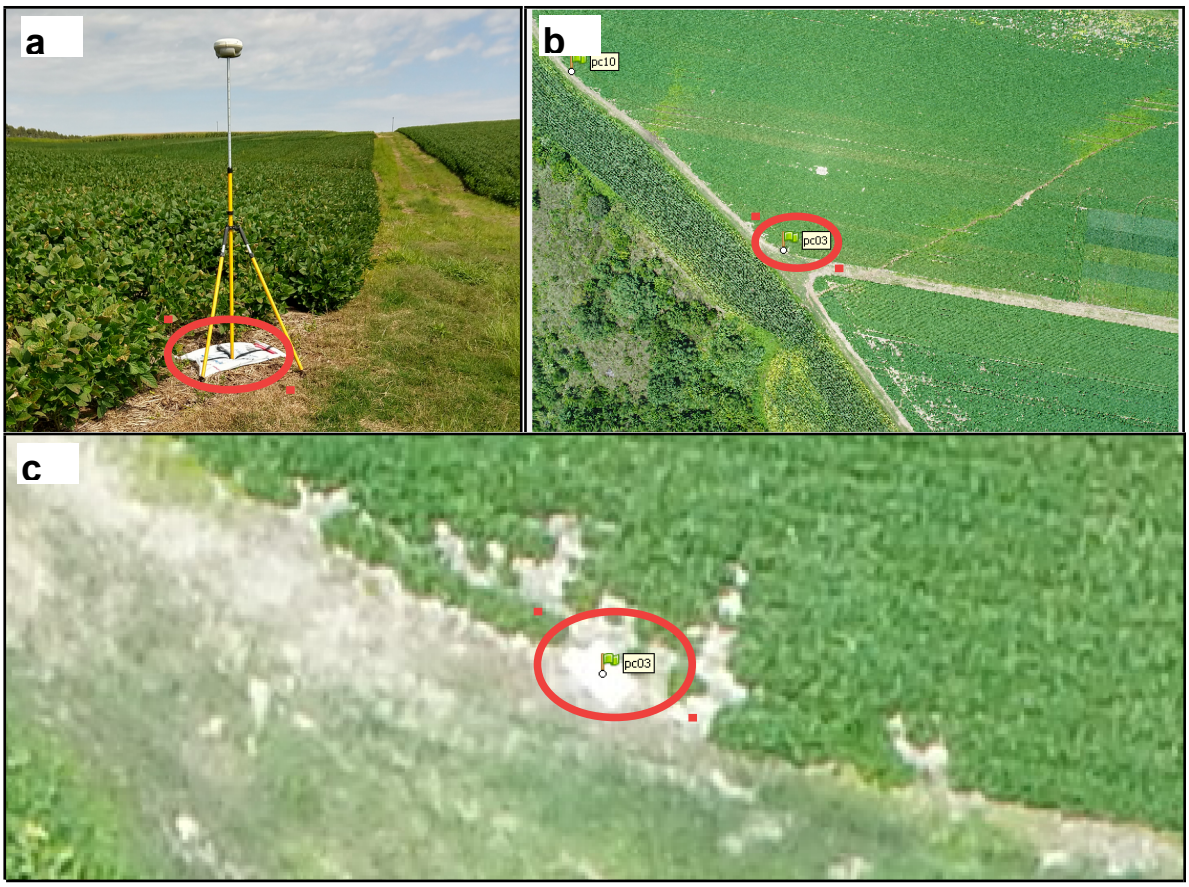
As amostragens de solo coletadas nos pontos da grade foram realizadas mediante tradagem até 1,2 m de profundidade ou até substrato rochoso em cada ponto, para posterior análise física e química no laboratório da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (USP/ESALQ). Neste trabalho só foram utilizadas as informações dos atributos da textura do solo, em relação a porcentagem de areia, silte e argila, para o cálculo do fator de erodibilidade do solo.

4.2.5 Recobrimento Aerofotogramétrico com RPA

Para a realização do recobrimento aerofotogramétrico, na primeira etapa foram implantados pontos de controle com marcas no terreno e a coleta de coordenadas com receptor GNSS pelo método estático rápido para gerar o alinhamento das fotografias (fototriangulação). Na área de estudo foram realizados testes com a distribuição de 6 pontos de controle para o primeiro aerolevantamento e 14 pontos de controle para o segundo.

Na figura 6-a está representado a implantação de alvo para marcação de ponto de controle no campo com a coleta de coordenadas de receptor de sinal GNSS. A figura 6-b mostra uma das fotografias aéreas obtidas com dimensões 4864 x 3648 pixeis e a identificação do ponto de controle. Em média foi identificado o mesmo ponto de controle em 12 fotografias diferentes. E na figura 6-c está representado o zoom na fotografia para demonstrar o mesmo ponto de controle identificado.

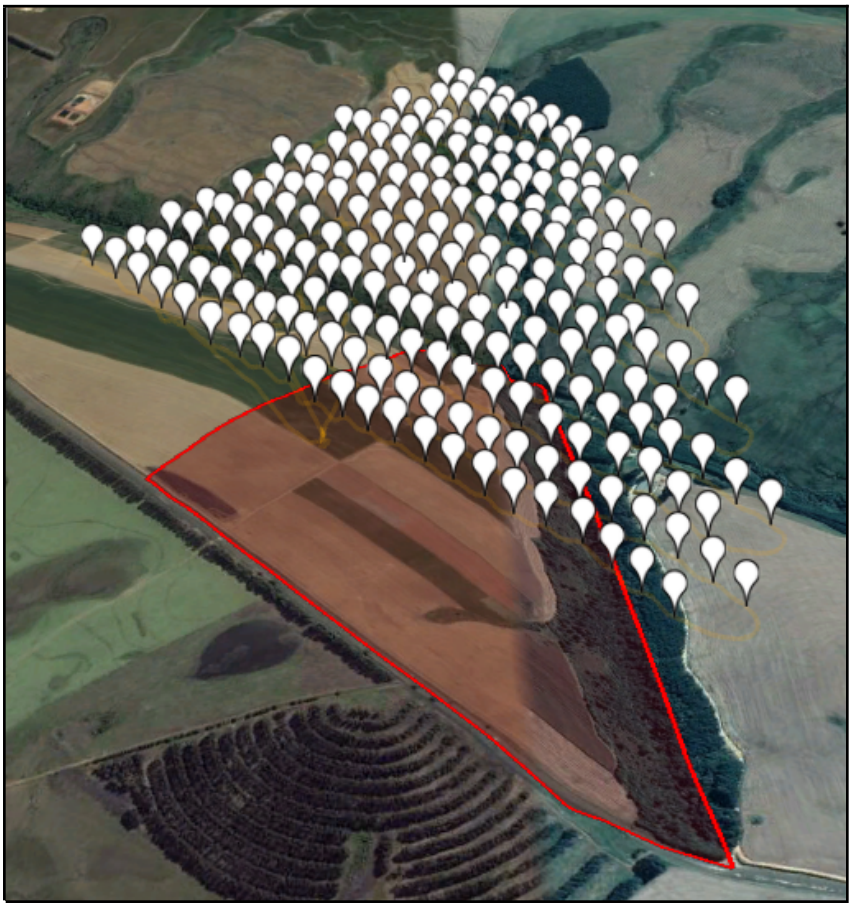
Figura 6: Ponto controle



Fonte: O autor

Para o levantamento das fotografias aéreas os planos de foram voo foram gerados com alturas de aproximadamente 120 metros com sobreposição lateral de 60% e longitudinal de 80%. Com esses parâmetros de configuração do plano de voo foi possível captar fotografias com pixeis de aproximadamente 4 cm. A figura 7 demonstra a posição do sensor no momento do registro das fotografias aéreas em um dos levantamentos aerofotogramétricos realizados na área de estudo.

Figura 7: Levantamento aerofotogramétrico



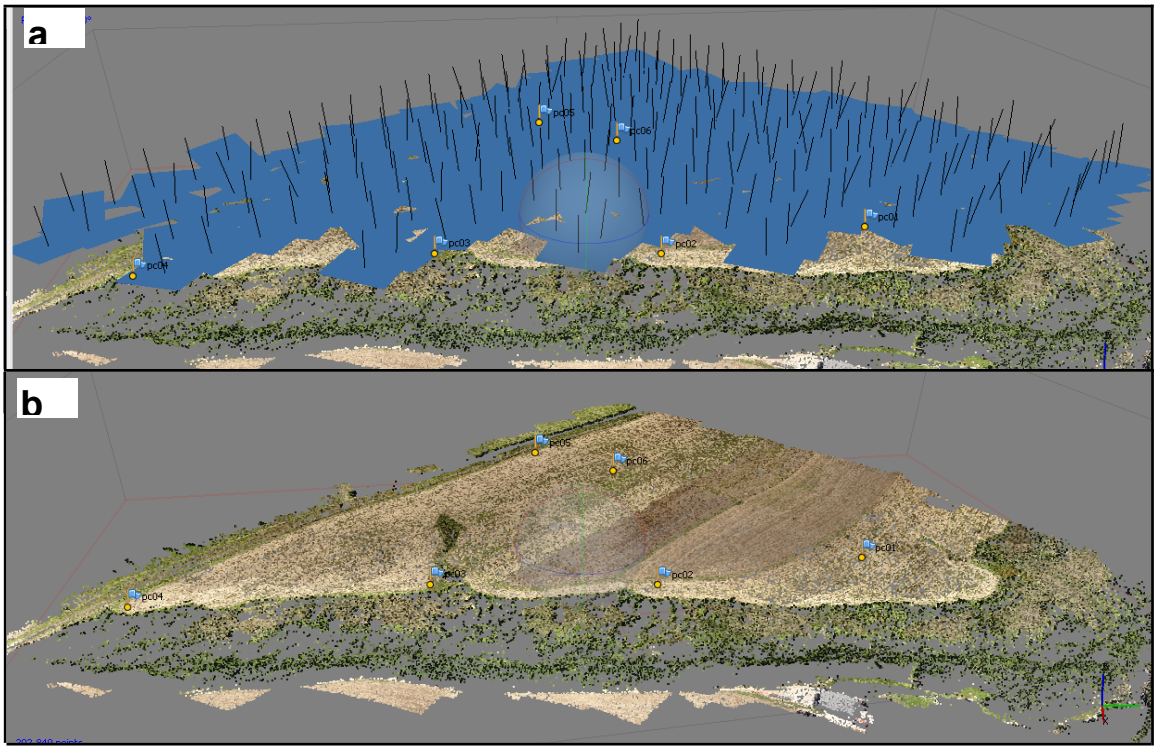
Fonte: O autor

O processamento das fotografias obtidas com RPA, para gerar orto-mosaico e MNT, foi realizado conforme informações descritas no manual do usuário Agisoft (2016) seguindo as seguintes etapas:

- O Alinhamento das Fotos: é o primeiro processamento executado para a realização do processo de foto triangulação. Esta etapa do processamento consiste no alinhamento das imagens, no qual o programa busca semelhanças entre as imagens com o cálculo dos parâmetros, as posições do ponto principal e os parâmetros da rotação das imagens. Nesse

processamento as fotografias são posicionadas por meio dos parâmetros de orientação exterior e interior da câmera e inseridas as coordenadas dos pontos de controle. Com o conhecimento da posição das fotografias são determinadas as coordenadas horizontais e verticais de pontos correlatos identificados em duas ou mais fotografias. A figura 8-a mostra a posição das fotografias após os ajuste dos parâmetros de orientação e em relação aos pontos de controle, e na figura 8-b a está nuvem de pontos espaçada gerada mediante o reconhecimento de feições similares nas fotografias.

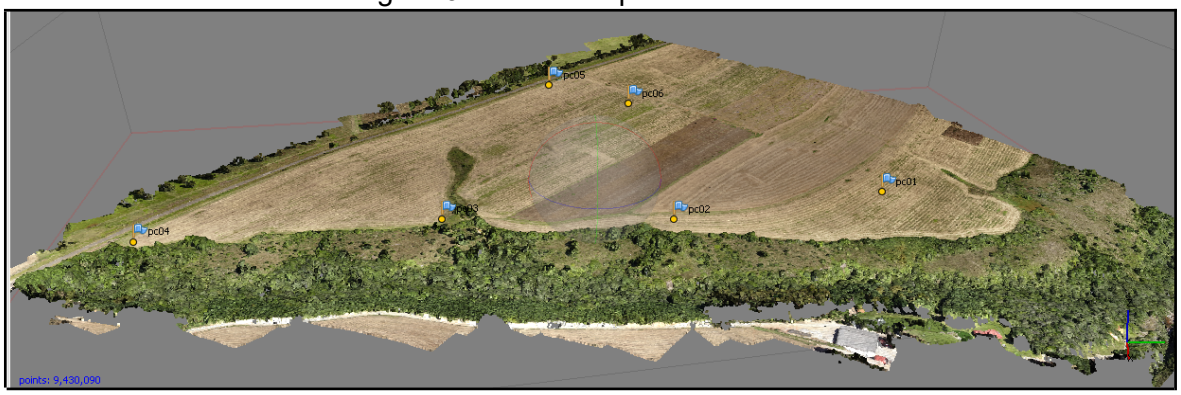
Figura 8: Orientação das fotografias e nuvem de pontos espaçada.



Fonte: O autor

- Construir Nuvem de Pontos Densificada: tem a função de densificar a nuvem de pontos espaçada gerada no processo anterior, o software aumenta a quantidade de pontos na nuvem de pontos por meio da reconstrução de objetos a partir de medições dos ângulos em pontos similares reconhecidos em duas ou mais fotografias aéreas. A Figura 9 mostra a nuvem de pontos densa gerada após a densificação da nuvem de pontos criada no processo anterior reduzindo os espaços vazios.

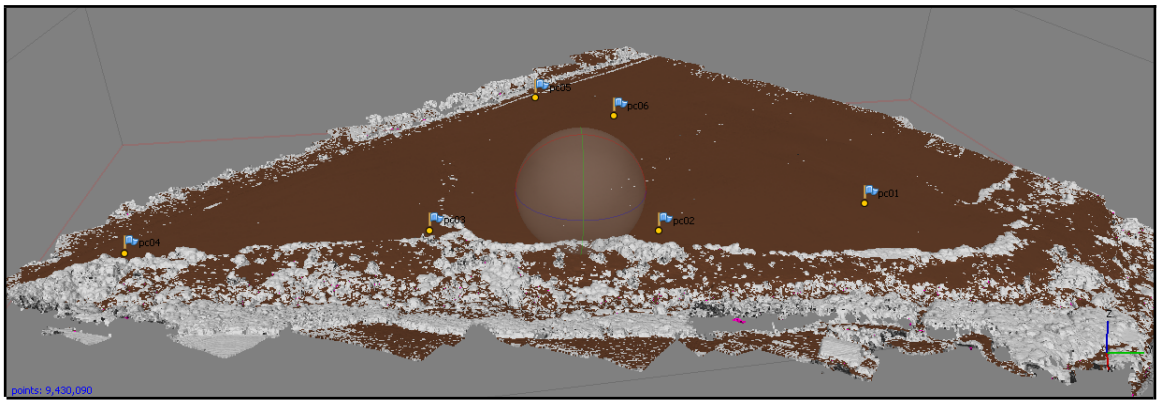
Figura 9: Nuvem de pontos densa



Fonte: O autor

- Classificar Nuvem de Pontos Densificada: é uma etapa utilizada para filtrar os pontos que são pertencentes somente ao terreno, excluindo os pontos que representam superfícies não pertencentes ao terreno (árvores, edificações). Nesse processo foram inseridos os parâmetros de declividade máxima do terreno da área, altura mínima a partir do terreno dos objetos que serão filtrados e o intervalo máximo entre os pontos pertencentes ao terreno. A Figura 10 apesenta o modelo com a classificação da nuvem de pontos densificada.

Figura 10: Nuvem de pontos classificada



Fonte: O autor

A classificação de nuvem de pontos é executada em dois passos. Inicialmente a nuvem foi dividida em células com tamanhos iguais e em cada célula o ponto mais baixo foi identificado e a triangulação destes pontos gerou uma primeira aproximação do modelo de terreno. Em seguida, o novo ponto foi adicionado à classe *ground,* quando as condições foram satisfeitas: (i) se este ponto está situado a uma certa distância do modelo de terreno; (ii) se o ângulo entre o modelo de

terreno e a linha para conectar este a um ponto da classe ground é menor que um certo ângulo. Esta etapa foi repetida enquanto houvia pontos a serem verificados.

- Construção do DEM (Modelo Digital de Elevação): os produtos gerados foram uma representação 2D em formato raster do MDS e ou MDT dependendo dos pontos selecionados na nuvem de pontos densa.
- Geração o mosaico de ortofotos: inicialmente foi realizado o processo de ortorretificação das imagens por meio do DEM, onde as feições das imagens são projetadas ortogonalmente com escala constante, não apresentando os deslocamentos devidos ao relevo e à inclinação da câmera. Com as imagens devidamente corrigidas o *software* realizou a mosaicagem das ortofotos e cria um único produto.

4.2.5 Utilização de SIG

O ambiente SIG foi utilizado para as seguintes etapas no desenvolvimento do trabalho.

1. Integração dos dados de diferentes formatos (raster, vetor, tabela), com a configuração de todos os dados para o mesmo sistema de referência de coordenadas (UTM – SIRGAS 2000 – 22S) e armazenamento em banco de dados GeoDataBase,
2. A interpolação dos dados de altimetria foi gerada mediante a aplicação dos interpoladores IDW, Krigagem e Spline para gerar MNT representando a altitude e variáveis do solo;

- O Interpolador IDW se baseia na dependência espacial, supõe-se que quanto mais próximo estiver um indivíduo do outro, maior será a correlação desse indivíduo com seus vizinhos. Dessa forma atribui maior peso para os indivíduos mais próximos do que para os mais distantes do ponto a ser interpolado (LANDIM, 2003).
- A Krigagem, entendida como um estimador que se baseia numa série de técnicas de análise de regressão, sejam essas lineares ou não. Procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio levando em consideração a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço (ISAAKS, SRIVASTAVA, 1989).
- Interpolação Spline é uma técnica de aproximação que consiste em se dividir o intervalo de interesse em vários subintervalos e interpolar da forma mais

suave possível nestes subintervalos com polinômios de grau pequeno (KIRCHNER et al., 1989).

3. Avaliação dos MNT mediante a extração pontual dos valores de altimetria para os cálculos da variância, desvio padrão e a raiz do erro médio quadrático (*RMSE - ROOT MEAN SQUARE ERROR*).

4. Aplicação de álgebra de mapas para o cálculo do fator erodibilidade, fator topográfico e a RUSLE.

- O potencial erosivo das chuvas (fator R) foi extraído de Waltrick et al. (2015). Para o município de Ponta Grossa: R = 6790 MJ mm (ha.h.ano)$^{-1}$. Para aplicação na RUSLE, este fator é entendido como o valor médio anual da erosividade e são necessários no mínimo 15 anos de observação de dados obtidos normalmente de pluviogramas (RODRIGUES et al., 2017).
- A erodibilidade (fator K), foi calculada pelo método indireto através da expressão de Bouyoucos (MANNIGEL et al., 2002).

$$K = \frac{(\%areia + \%silte)/(\%argila)}{100}$$

K = fator erodibilidade do solo (t.ha.h/ ha.MJ.mm).

- O Fator LS foi calculado através da equação desenvolvida por Bertoni e Lombardi Neto (1999).

$$LS = 0{,}00984 \times L^{0{,}63} \times S^{1{,}18}$$

Onde: LS = fator topográfico; L = comprimento de rampa (vertente) em m; S = declividade (%).

- O fator CP (uso do solo e práticas conservacionistas) foi definido somente de acordo com duas classes identificadas no orthomosaico gerado com os dados de RPA. As classes identificadas foram: agricultura praticada em sistema de plantio direto e vegetação nativa em Área de Proteção Permanente (APP). Os pesos das classes foram adaptados de Bertol e Almeida (2000) para

agricultura com plantio direto = 0,0271; e a classe vegetação nativa = 0,0004, adaptado de Silva et al. (2010).

- Implementação da RUSLE por meio de álgebra de mapas mediante a multiplicação dos modelos gerados para diagnosticar a perda de solos na área de estudo.

5. Representação das informações geradas pelos modelos e mapa da estimativa de perdas anuais de solo por erosão da área de estudo.

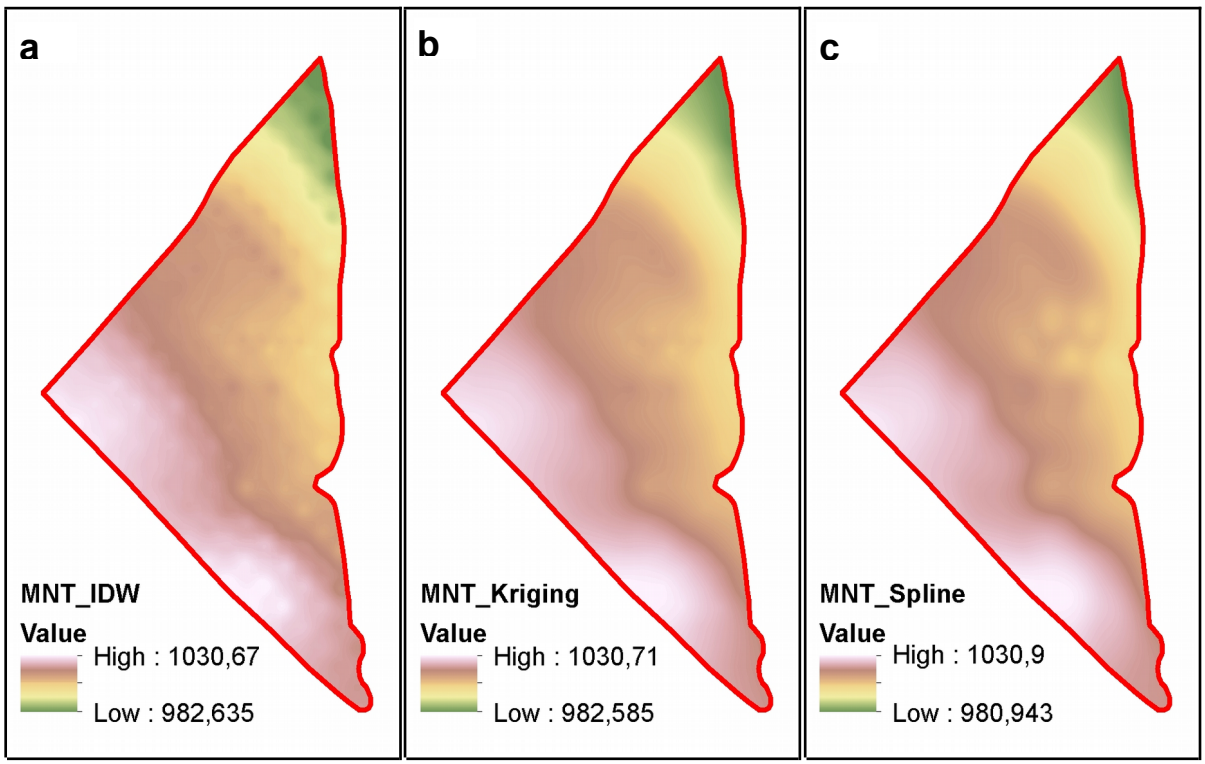
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 MODELAGEM COM DADOS GNSS

O pós-processamento das coordenadas obtidas com receptores de sinal GNSS, levantadas pelo método de posicionamento relativo estático, para corrigir as bases de referências implantadas no campo e obteve erro médio de 0,006 metro para precisão horizontal e 0,009 metro para precisão vertical. O erro médio dos levantamentos das coordenadas dos pontos da grade regular de 45x45 metros obtidos pelo método relativo estático rápido foi de 0,011 metro para a precisão horizontal e 0,013 metro para a precisão vertical.

Com as coordenadas levantados em campo dos pontos georreferenciados da grade regular, foram gerados Modelos Numéricos do Terreno (MNT) mediante a aplicação dos interpoladores IDW, Kriging e Splime para representar a altitude na área de estudo. A representação gráfica dos modelos podem ser observadas na Figura 11.

Figura 11: Modelos de altimetria interpolados: (a) MNT IDW; (b) MNT Kriging; (c) MNT Splime.



Fonte: O autor

O aspecto visual do modelo representado na Figura 11-a gerado pelo interpolador IDW aparenta ter as maiores discrepâncias. O efeito “bolha” gerado no modelo por esse interpolador possivelmente é ocasionado devido à influência do raio de cada ponto que quanto mais próximo estiver um do outro, maior será a correlação desse ponto com seus vizinhos. O modelo gerado pelo interpolador Kriging (Figura 11-b) foi o qual a apresentou ter as menores discrepâncias em relação ao efeito “bolha”.

Esse efeito “bolha” observado no modelo gerado pelo interpolador IDW é consequência da influência de quanto mais próximo do ponto a ser estimado, maior é o peso atribuído ao ponto amostrado pela estimativa da variável ao longo do espaço, que pondera os pesos de cada um dos n postos mais próximos (JIMENEZ; DOMECQ, 2008). Devido essa característica o método de interpolação IDW é recomendado para regiões com alta densidade de amostras (DEUS et al., 2010).

No modelo gerado pela interpolação Spline (Figura 11-c), também foi possível observar o efeito “bolha”, mas em menor proporção e suavizadas no local onde foram densificados os pontos na grade regular. De acordo com Oyala, (2011), o interpolador Spline utiliza as localizações com dados conhecidos como pontos fixadores do modelo gerado com a superfície real, adequando uma variação suave de valores para localizações sem dados. Nesse sentido, os pontos densificados na grade regular foram destacados diante das demais amostras da grade ocasionando maior influência no raio de dispersão dos valores desses pontos.

A interpolação pelo método Kriging (Figura 11-b) foi a qual gerou o modelo aparentemente sem a influência do efeito “bolha” observado nos demais modelos. Esse resultado provavelmente foi possível devido às características desse interpolador que leva em consideração tanto a distância entre as amostras como o seu agrupamento. Segundo Bettini (2007), os valores associados às amostras são calculados com base na distância entre a amostra e o ponto estimado, na continuidade espacial e no arranjo geométrico do conjunto.

Quando se trabalha com interpolação geoestatística, os casos devem ser tratados de forma independente, pois a modelagem está ligada às percepções de quem a manipula (BERVEGLIERI et al., 2011).

Neste sentido, para avaliar a precisão dos interpoladores, todos os modelos foram gerados com as configurações padrão implementadas no programa. O ajuste das configurações poderiam gerar resultados com menores diferenças.

Para avaliar estatisticamente a qualidade da precisão altimétrica dos valores interpolados nos modelos foram coletados 14 pontos aleatoriamente, além dos 140 pontos da grade regular que foram utilizados para gerar os modelos. A Tabela 1 apresenta os valores de altitude dos pontos aleatórios, coletados como verdade de campo, e os valores obtidos com os interpoladores.

Tabela 1: Valores de altitude dos pontos aleatórios e interpoladores.

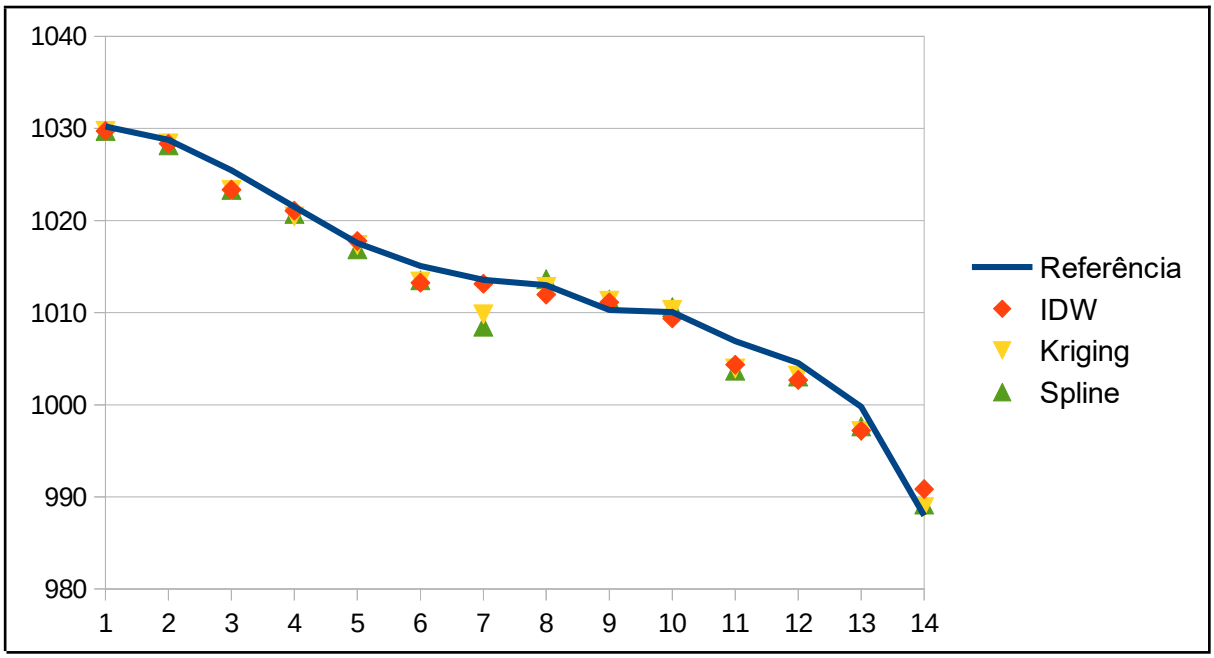
Id dos pontos	Altitudes de referência	Altitudes interpoladas		
		IDW	Kriging	Spline
01	1030,20 m	1029,73 m	1029,72 m	1029,72 m
02	1028,76 m	1028,36 m	1028,37 m	1028,18 m
03	1025,46 m	1023,35 m	1023,32 m	1023,32 m
04	1021,48 m	1021,07 m	1020,44 m	1020,71 m
05	1017,57 m	1017,78 m	1017,35 m	1016,89 m
06	1015,06 m	1013,26 m	1013,38 m	1013,52 m
07	1013,58 m	1013,14 m	1009,81 m	1008,48 m
08	1012,98 m	1011,96 m	1012,80 m	1013,63 m
09	1010,30 m	1011,12 m	1011,30 m	1011,45 m
10	1010,07 m	1009,38 m	1010,32 m	1010,60 m
11	1006,92 m	1004,35 m	1003,95 m	1003,72 m
12	1004,53 m	1002,68 m	1003,16 m	1003,06 m
13	999,80 m	997,20 m	997,15 m	997,65 m
14	987,98 m	990,85 m	988,90 m	989,17 m

Fonte: O autor

Os valores de altimetria apresentados na tabela anterior são correlacionados entre os pontos de referência e os valores dos modelos interpolados no gráfico representado na Figura 12. No gráfico o eixo vertical representa a altimetria e o eixo

horizontal a identificação (id) dos pontos coletados como verdade de campo para a validação dos modelos interpolação.

Figura 12: Gráfico com a correlação de valores de altitudes gerados pelos modelos interpolados.



Fonte: O autor

O gráfico apresentado na figura 12, mostra que os valores obtidos com os interpoladores tiveram tendências similares em relação as variações dos valores de altimetria na maioria dos pontos e a diferença entre os valores de referência e os interpolados foram maiores nos pontos 3, 7 e 11 com valores abaixo da referência. A diferença dos valores da dispersão entre as altitudes de referência e as altitudes interpoladas foram avaliadas estatisticamente por meio dos cálculos do desvio padrão, variância e RMSE.

A Tabela 2 apresenta as variações das diferenças de altitude dos modelos interpolados em cada ponto e o resultado dos cálculos do desvio padrão, variância e RMSE.

Tabela 2: Valores das diferenças das altitudes interpoladas.

Id dos pontos	Diferença de altitudes interpoladas		
	IDW	Kriging	Spline
01	-0,47 m	-0,48 m	-0,48 m
02	-0,40 m	-0,39 m	-0,58 m
03	-2,11 m	-2,14 m	-2,14 m
04	-0,41 m	-1,04 m	-0,77 m
05	+0,21 m	-0,22 m	-0,68 m
06	-1,80 m	-1,67 m	-1,54 m
07	-0,44 m	-3,77 m	-5,10 m
08	-1,02 m	-0,18 m	+0,65 m
09	+0,82 m	+1,00 m	+1,15 m
10	-0,69 m	+0,25 m	+0,53 m
11	-2,57 m	-2,97 m	-3,20 m
12	-1,85 m	-1,37 m	-1,47 m
13	-2,60 m	-2,65 m	-2,75 m
14	+2,87 m	+0,92 m	+1,19 m
Desvio padrão	1,46 m	1,44 m	1,78 m
Variância	2,14 m	2,09 m	3,19 m
RMSE	1,65 m	1,81 m	2,11 m

Fonte: O autor

O modelo gerado pelo Interpolador IDW apresentou o melhor RMSE que foi de 1,65 metro e entre os valores a menor diferença pontual foi 0,21 metro e a maior foi de 2,87 metros. O Desvio padrão e a variância, com 1,46 e 2,14 metros respectivamente, obtidos pelos valores do modelo gerado pelo interpolador IDW foram inferiores aos valores obtidos com modelo gerado pelo interpolador Kriging.

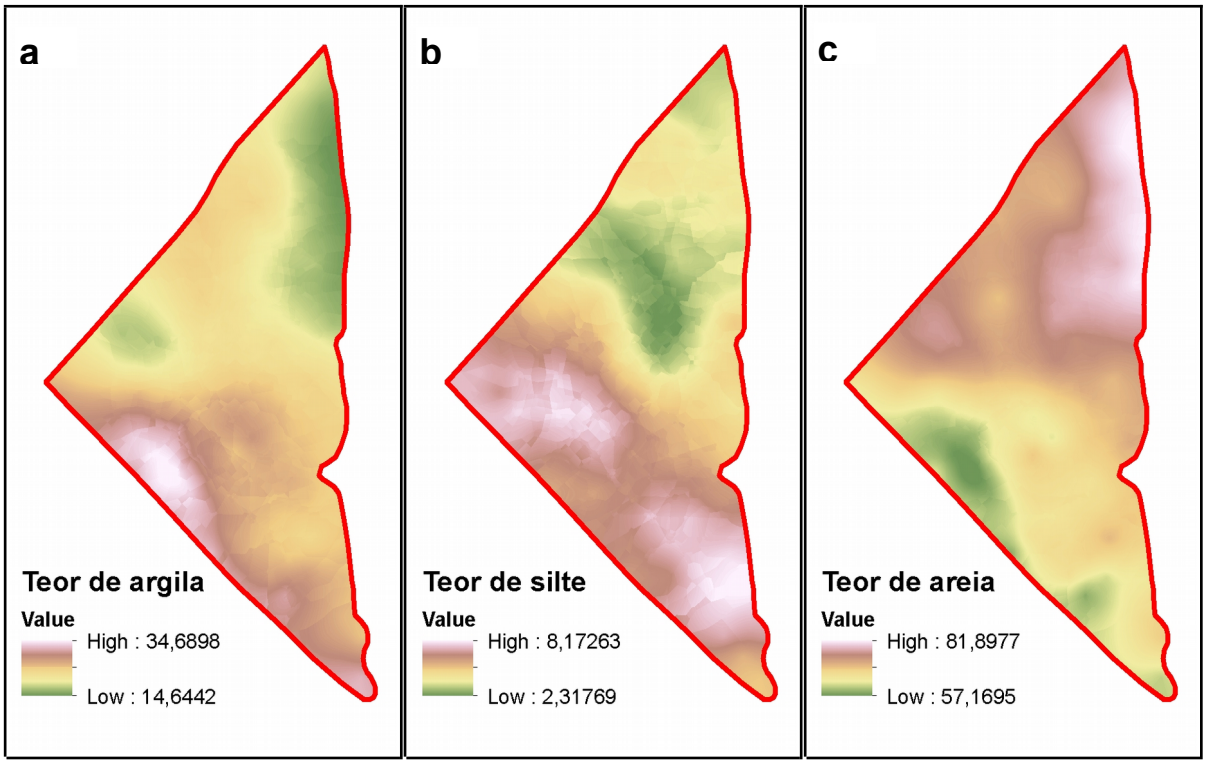
No modelo gerado pelo interpolador Kriging o desvio padrão e a variância tiveram os melhores resultados, com 1,44 e 2,09 metros respectivamente e o RMSE foi de 1,81 metro. Também foi constatada a menor diferença pontual de -0,18 metro no ponto 08 entre os três modelos. O interpolador Spline obteve a maior diferença

pontual de -5,10 metros no ponto 07 que determinou valores altos para o RMSE, desvio padrão e variância comparado aos resultados dos outros dois modelos.

Diante da constatação dos melhores resultados do interpolador Kriging em relação ao desvio padrão e da variância dos valores da diferença de altitude em relação à referência e também pela melhor representação gráfica entre os modelos gerados para representar a área de estudo, foi utilizado este interpolador para gerar os modelos que representam textura do solo para o cálculo o fator de erodibilidade do solo (K).

A Figura 13 apresenta os modelos gerados por meio da interpolação Kriging para representar a textura do solo na área de estudo. A figura 12-a, b, c mostram a porcentagem do teor de argila, silte e areia respectivamente

Figura 13: Modelos de textura do solo: (a) teor de argila; (b) teor de silte e (c) teor de areia .

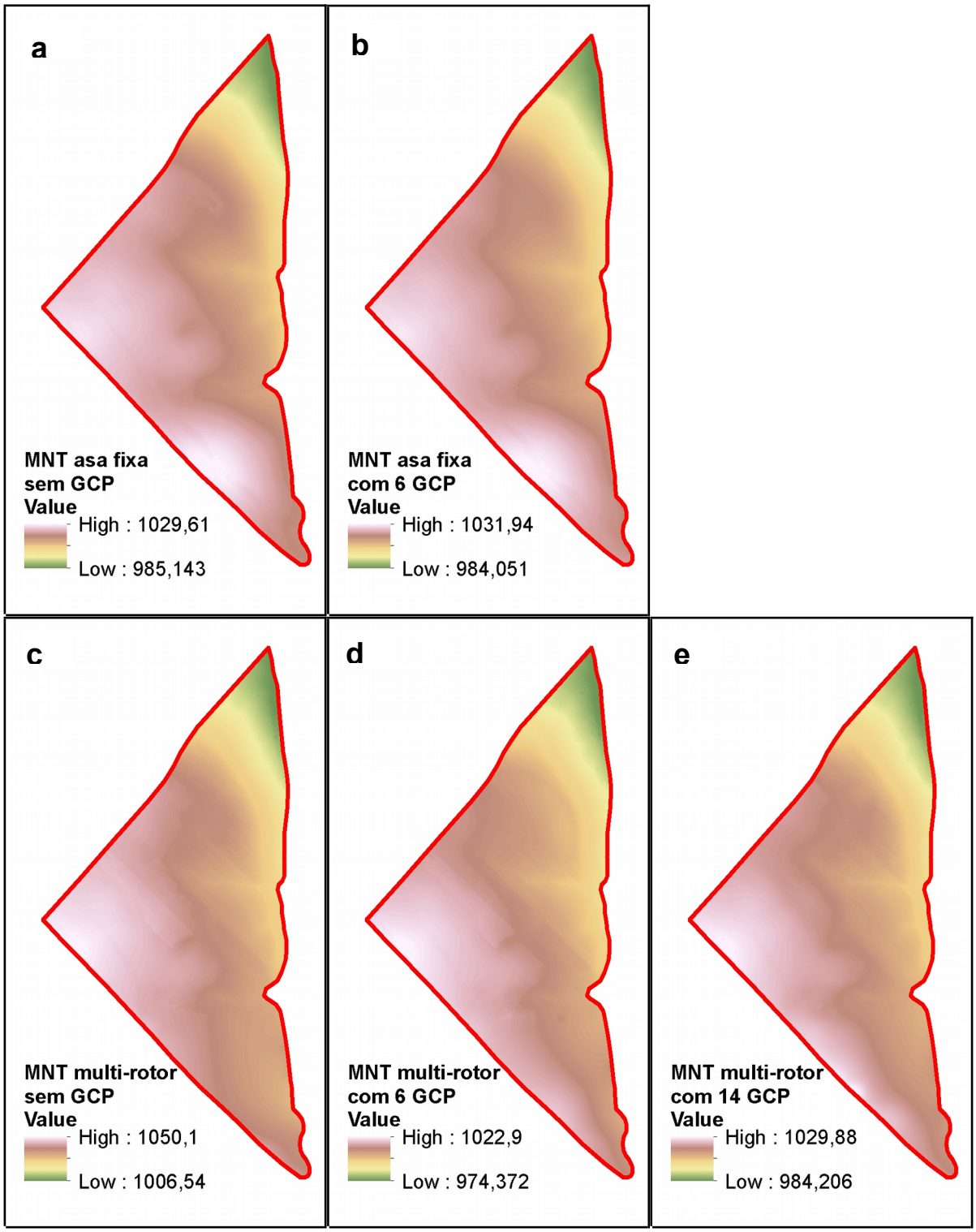


Fonte: O autor

5.2 MODELAGEM COM DADOS DE RPA

A modelagem com os dados de RPA para geração de MNT foi realizada por meio de cinco combinações diferentes de dados de RPA e pontos de controle. As representações gráficas dos cinco MNT são apresentadas na Figura 14.

Figura 14: MNT gerados por cinco combinações diferentes dados de RPA e pontos de controle: (a) RPA de asa fixa sem pontos de controle; (b) RPA de asa fixa com 6 pontos de controle; (c) RPA multi-rotor sem pontos de controle; (d) RPA multi-rotor com 6 pontos de controle; (e) RPA multi-rotor com 14 pontos de controle.



Fonte: O autor

Foram gerados dois modelos com o equipamento RPA de asa fixa, um sem pontos de controle (figura 14-a) e o outro com 6 pontos de controle (figura 14-b), e com o equipamento de RPA multirotor foram gerados três modelos: sem pontos de controle; com 6 e 14 pontos de controle (figura 14-c; d; e). Mediante análise visual das representações gráficas não foi possível constatar diferenças entre os modelos.

Quanto aos pontos de controle de solo, são recomendados para a melhoria da qualidade dos MNT, no entanto, o georreferenciamento dos modelos pode ser feito apenas com as coordenadas fornecidas diretamente pelo sistema de navegação das RPA. Neste caso, os modelos resultantes possuem baixa exatidão posicional (VITTI, 2017). Segundo a PCI Geomatics (2010), a qualidade dos modelos gerados por meio de dados de RPA depende diretamente da quantidade e distribuição dos pontos de controle.

No trabalho realizado por Zanetti et al. (2017) para avaliar a influência do número e distribuição de pontos de controle para geração de modelos a partir de levantamento de dados obtidos por RPA, foram comparados modelos gerados com 5, 10 e 15 pontos de controle para uma área de 16,30 hectares inserida em uma região de planície. Os resultados da avaliação dos modelos apresentaram classificações, quanto ao Decreto-lei n° 89.817 / ET-CQDG para a escala 1:1.000, com 5 e 10 pontos de controle obtiveram classe B (0,5 metro) e com 15 pontos de controle apresentou classe A (0,28 metro).

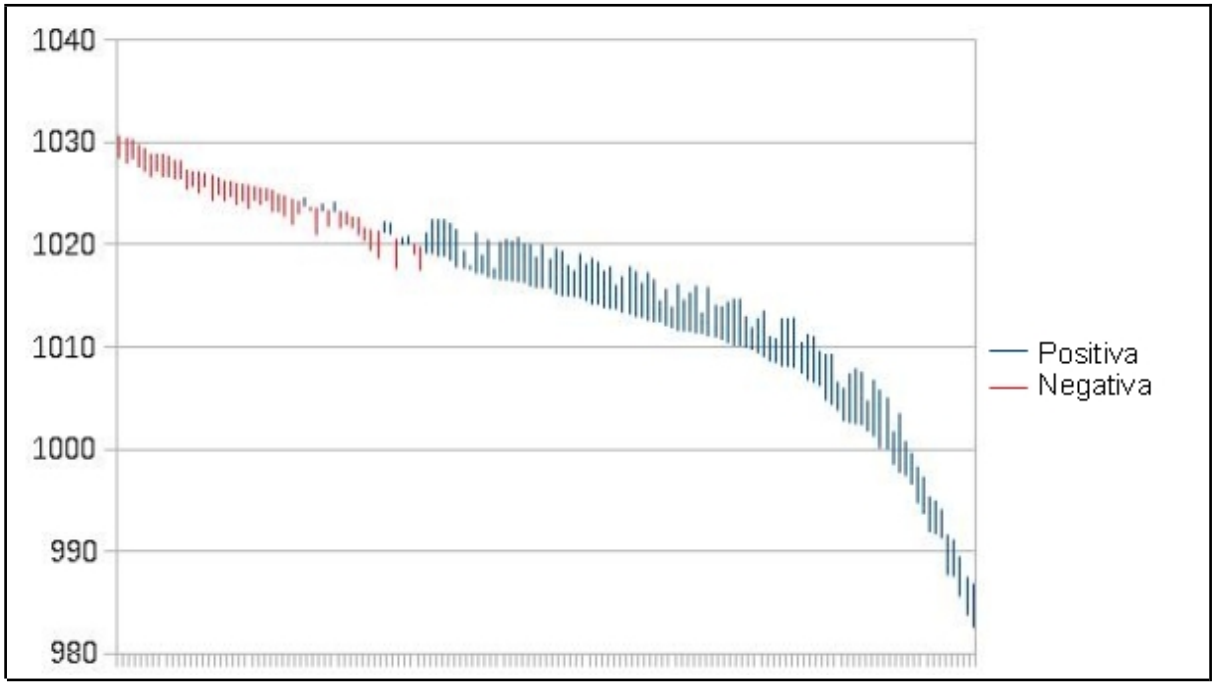
De acordo com Hugenholtz, et al. (2013) no estudo realizado para uma área de 1.95 km² com formações eólicas nas Pradarias do sul do Canadá, com o objetivo de avaliar a precisão vertical de MNT, com 99 pontos coletados por meio de receptor de sinal GNSS/RTK. O RMSE vertical do MNT foi de 0,29 metro, o que é equivalente ao RMSE de levantamento por meio varredura laser terrestre para o mesmo local.

Mancini et. al. (2013) avaliaram com 126 pontos as diferenças verticais absolutas entre MNT gerado por meio de dados de RPA com 10 pontos de controle e modelo obtido com laser scanner para uma área de dunas com 2,5 hectares localizada em Ravena Itália. Os resultados mostraram que a média de distância entre MNT gerado com dados de RPA foi de 0,06 m na vertical e o RMSE foi 0,11 m. O modelo gerado pelos dados do *laser scanner* apresentou RMSE de 0,22 m.

Para avaliar a qualidade em relação à precisão das altitudes geradas pelos cindo modelos deste trabalho foram utilizadas as altitudes coletadas com receptores GNSS dos 140 pontos da grade regular como verdade de campo. As figuras 15, 16,

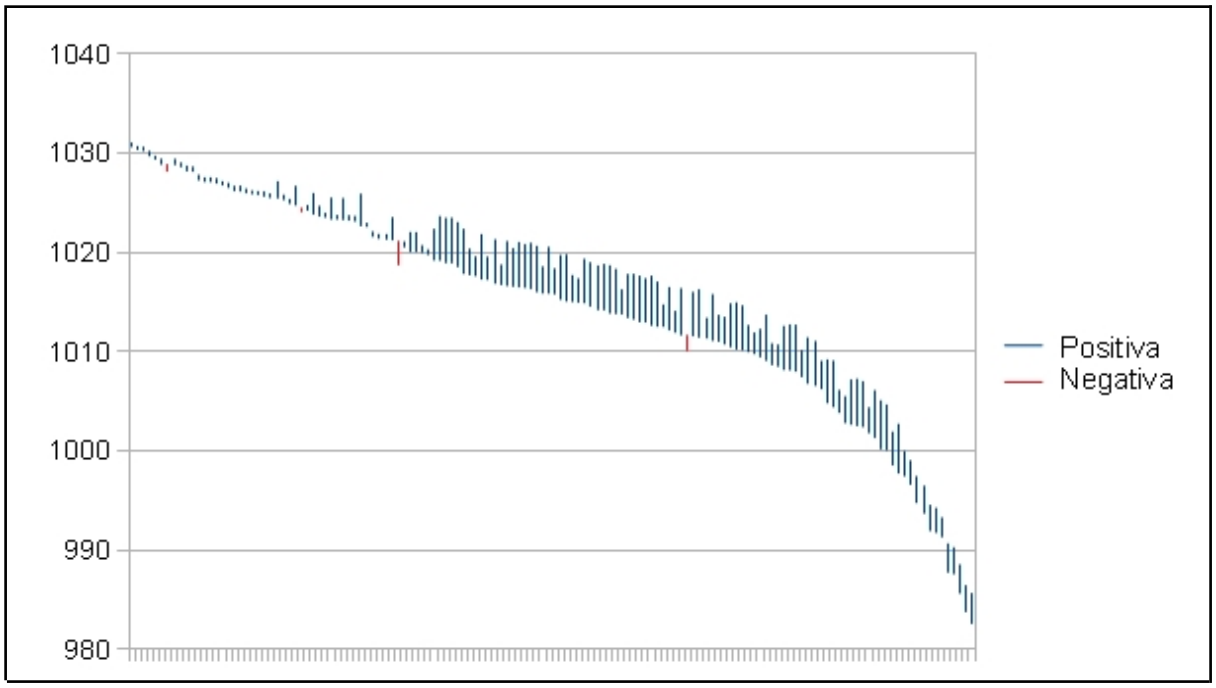
17, 18 e 19, apresentam gráficos com a diferença dos valores de altimetria gerados pelos modelos obtidos com os dados de RPA.

Figura 15: Gráfico com a diferença de altimetria do modelo gerado com RPA asa fixa sem pontos de controle.



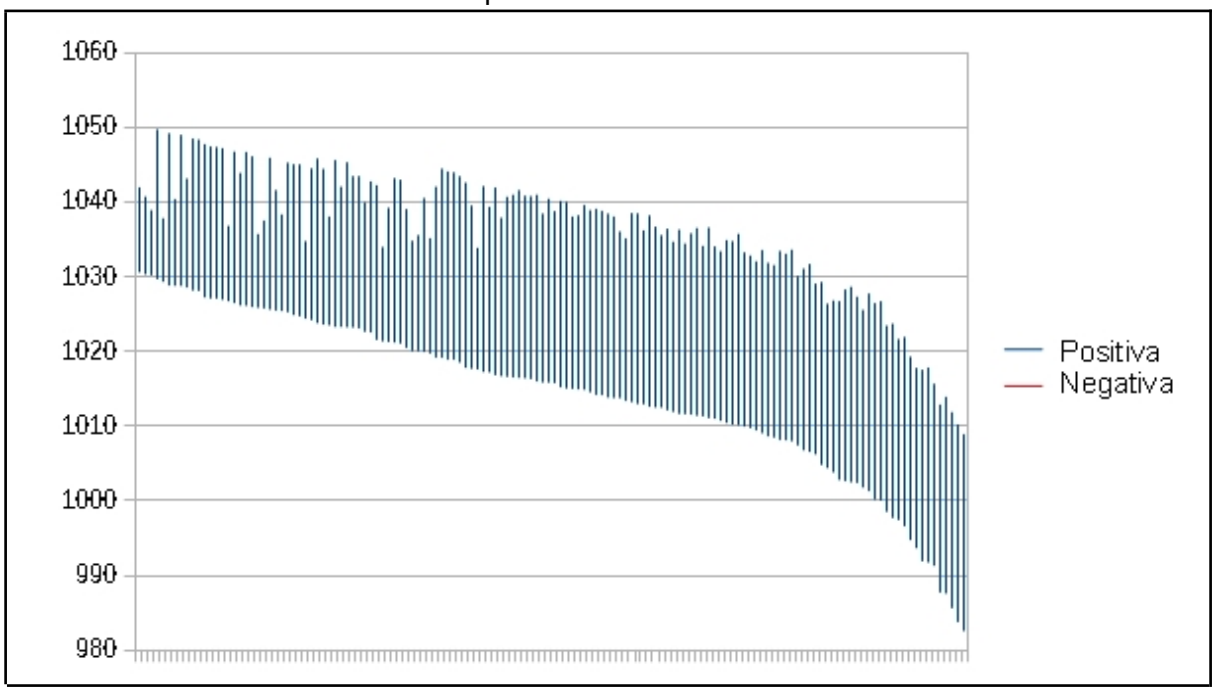
Fonte: O autor

Figura 16: Gráfico com a diferença de altimetria do modelo gerado com RPA asa fixa com 6 pontos de controle.



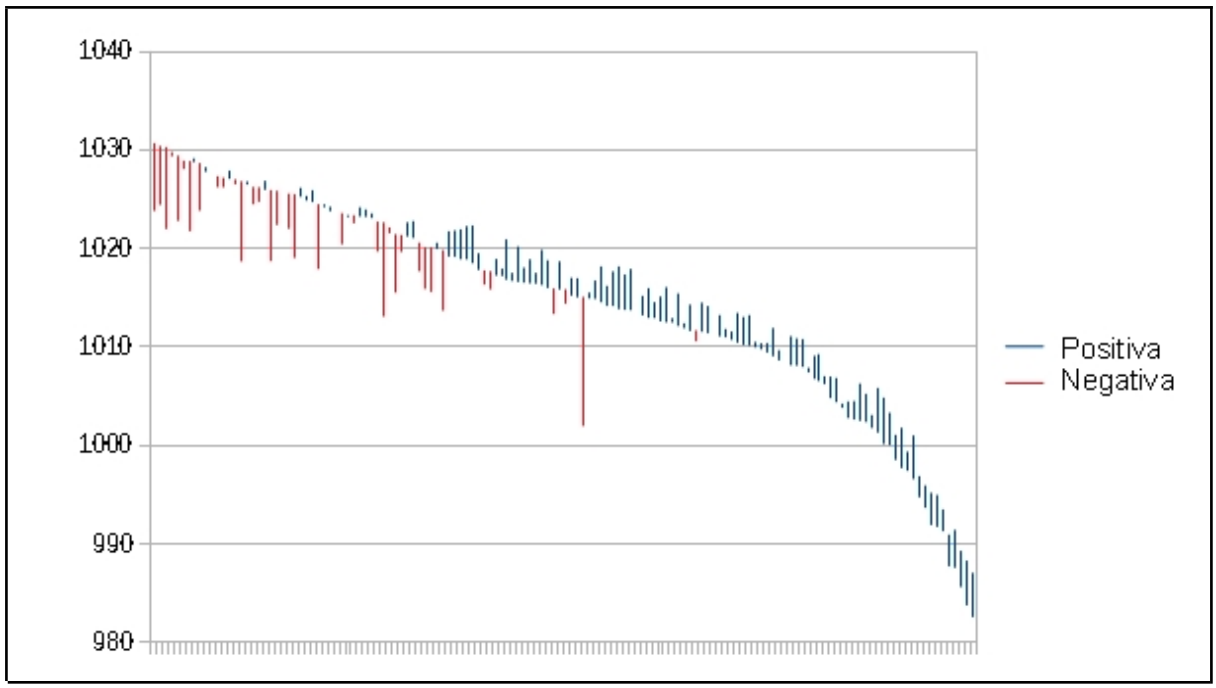
Fonte: O autor

Figura 17: Gráfico com a diferença de altimetria do modelo gerado com RPA multirotor sem pontos de controle.



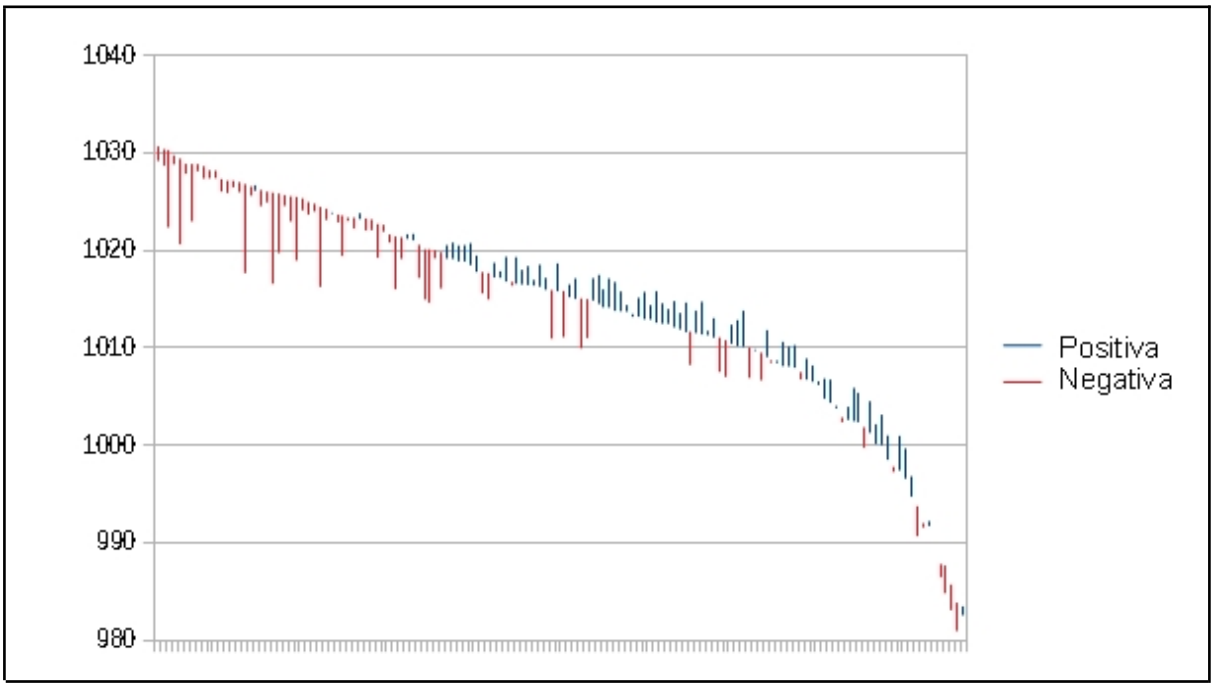
Fonte: O autor

Figura 18: Gráfico com a diferença de altimetria do modelo gerado com RPA multirotor com 6 pontos de controle.



Fonte: O autor

Figura 19: Gráfico com a diferença de altimetria do modelo gerado com RPA multirotor com 14 pontos de controle.



Fonte: O autor

Pela análise visual dos gráficos foi possível constar que os modelos representados nas Figuras 15 e 16 gerados pelo equipamento RPA de asa-fixa obtiveram melhores respostas em relação a dispersão dos dados. A variação das altitudes nos dois modelos mantiveram correlação entre os pontos mais próximos e não apresentaram variações pontuais significativas. No modelo gerado com seis pontos de controle, representado no gráfico representado na figura 16, também é possível constatar que houve melhora para as altitudes negativas obtidas abaixo dos valores de referência das coordenadas dos pontos da grade regular.

Os modelos gerados por meio dos dados do equipamento de RPA multirotor apresentaram menor correlação entre os pontos mais próximos. O gráfico representado na Figura 17 mostra que apesar de haver tendência na dispersão de grande parte dos dados, os valores de altitudes obtido gerados sem pontos de controle foram muito superiores que as altitudes de referência. Nos modelos representados pelos gráficos das Figuras 18 e 19 a dispersão dos dados apresentaram características semelhantes, mas a dispersão pontual foi maior no modelo gerado com 6 pontos de controle.

Com a diferença da dispersão de erro em cada ponto dos valores das altitudes geradas pelos modelos foram calculadas a estatística descritiva, o desvio

padrão e a variância dos dados, calculou-se também o RMSE. A Tabela 3 apresenta os resultados dos cálculos do desvio padrão, variância RMSE.

Tabela 3: Resultados dos cálculos estatísticos das diferenças de altitudes dos MNT gerados com RPA.

	Diferença de dispersão de altitudes dos MNT gerados com RPA				
	Asa fixa sem GCP	Asa fixa com 6 GCP	Multi-rotor sem GCP	Multi-rotor com 6 GCP	Multi-rotor com 14 GCP
Desvio padrão	2,58	1,76	4,24	3,24	2,83
Variância	6,70	3,13	18,03	10,54	8,02
RMSE	3,15	3,10	22,24	3,28	2,85

Fonte: O autor

Pelos resultados dos cálculos estatísticos o modelo gerado pelo equipamento RPA de asa fixa com 6 pontos de controle apresentou o melhor desempenho em relação ao desvio padrão e a variância dos dados, o RMSE foi o segundo melhor. No modelo gerado pelo equipamento RPA multi-rotor com 14 pontos de controle o RMSE foi o que apresentou o melhor resultado, mas o desvio padrão e a variância foram piores que os dois modelos gerados pelos dados obtidos com RPA de asa-fixa.

Os resultados dos cálculos estatísticos demonstraram que em relação a precisão da altimetria os modelos gerados com dados obtidos por meio de RPA de asa-fixa são superiores aos modelos gerados com dados de RPA multi-rotor. Mesmo sem pontos de controle o modelo gerado com os dados de RPA asa fixa obteve o RMSE com valor próximo aos modelos gerados com pontos de controle. O desvio padrão e variância também foram melhores que dos modelos gerados pelos dados de RPA multi-rotor com pontos de controle.

Comparando o RMSE da precisão vertical dos modelos gerados neste trabalho, avaliados por meio das altitudes dos 140 pontos coletados na grade regular, com os resultados obtidos por Hugenholtz, et al. (2013) e Mancini et al. (2013) a diferença foi mais de dois metros. A condição do relevo da área de estudo pode ter sido o fator que ocasionou resultados inferiores, pois as maiores diferenças de altitudes foram nos locais com maior porcentagem de declividade.

A precisão horizontal dos modelos em relação RMSE, de acordo com os relatórios dos processamentos de fotogrametria, conseguiu alcançar 0,02 metro para o modelo gerado por meio dos dados obtidos com RPA de asa fixa com 6 pontos de controle. Para o modelo gerado com RPA multirotor com 14 pontos de controle a precisão horizontal foi 0,36 metro.

A precisão vertical apresentada nos relatórios para os modelos mostrou melhores valores dos que os obtidos com a validação por meio da comparação com as altitudes da grade regular, alcançando 0,006 metro de RMSE.

Os relatórios dos processamentos de fotogrametria para geração dos MNT e orthomosaicos que apresentaram os melhores resultados em relação precisão horizontal e vertical estão no anexo A e B. No anexo A está o relatório do processamento gerado com os dados de RPA asa fixa com 6 pontos de controle, e no anexo B está o relatório do processamento gerado com os dados de RPA multirotor com 14 pontos de controle.

5.3 DIAGNÓSTICO DE PROCESSOS EROSIVOS

O diagnostico de processos erosivos atuantes na área de estudo foi realizado mediante a aplicação dos MNT na equação da RUSLE que possibilitou estimar a perda de solo em tonelada/ha.ano. Para a aplicação dos fatores na RUSLE foram calculados o modelo que representa o fator da erodibilidade, por meio dos modelos interpolados de textura do solo, e o modelo do fator topográfico que foi obtido por meio dos MNT gerados com os dados de RPA.

A erosividade, Fator R, que representa o potencial natural da chuva de provocar erosão, neste trabalho foi adaptado o valor de erosividade para o município de Ponta Grossa: R = 6790 MJ mm $(ha.h.ano)^{-1}$, calculado por de Waltrick et al. (2015).

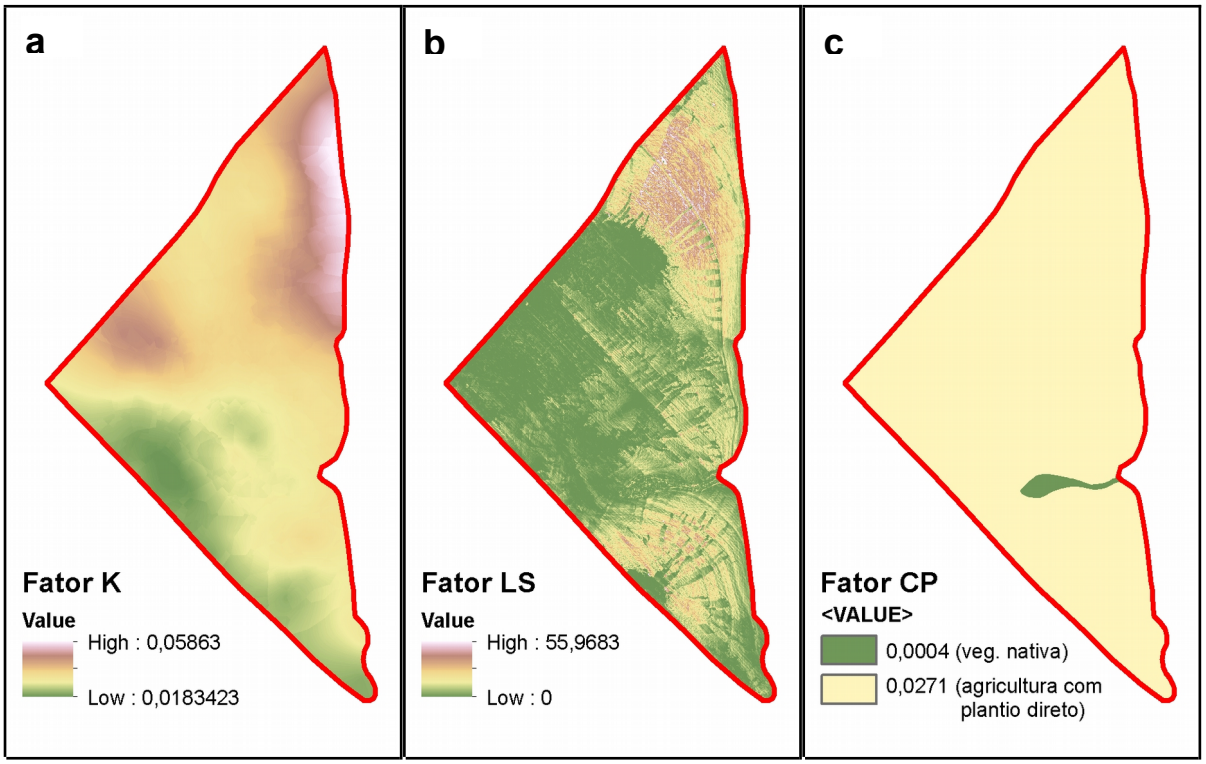
A erodibilidade foi calculada mediante a aplicação dos modelos interpolados de textura do solo, apresentados na Figura 12, na equação de Bouyoucos (MANNIGEL et al., 2002). A Figura 20-a mostra o modelo de erodibilidade (Fator K) para a área de estudo.

Para estimar o fator topográfico (LS) para a aplicação dos modelos na RUSLE, foi calculada a equação proposta por Bertoni e Lombardi Neto (1999). A

Figura 20-b mostra o modelo do fator topográfico gerado por meio do MNT gerado com os dados de RPA

O fator de uso, manejo e práticas conservacionistas do solo (CP) foi obtido por meio de fotointerpretação do orthomosaico gerado com dados obtidos com RPA de asa fixa (anexo A). A Figura 20-c mostra o modelo gerado para representar o fator CP, os valores das classes foram adaptados de Bertol e Almeida (2000) para agricultura com plantio direto e a classe vegetação nativa de Silva et al. (2010).

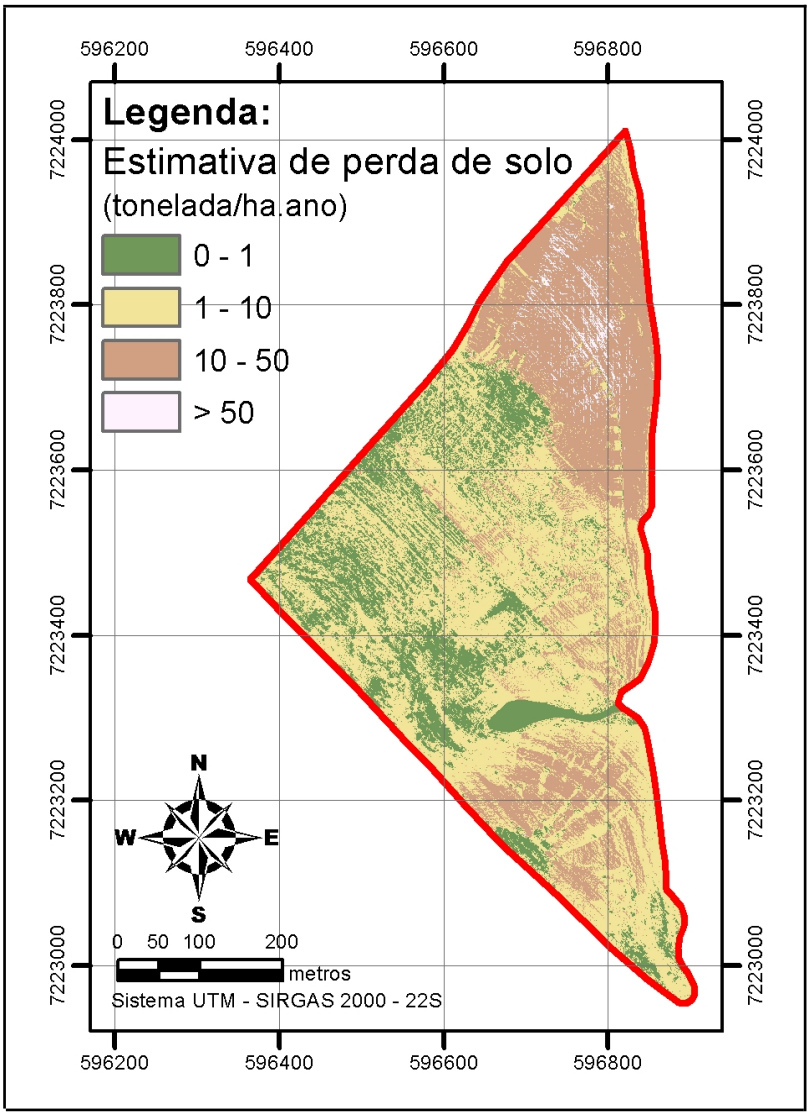
Figura 20: Modelos dos fatores para a aplicação da RUSLE:
(a) Fator K; (b) Fator LS; (c) Fator CP.



Fonte: O autor

A distribuição espacial da estimativa de perdas anuais de solo por erosão, obtida por meio da aplicação da RUSLE, para a área de estudo está representada na figura 21.

Figura 21: Estimativa de perdas anuais de solo por erosão.



Fonte: O autor

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos por meio da aplicação da RUSLE para classificação da estimativa de perda de solo anual, apresentada na Figura 21.

Tabela 4: Estimativa e perda de solo.

Classes de estimativa de perda de solo	Porcentagem	Hectares
0 - 1	27,24	7,21
1 - 10	44,13	11,68
10 - 50	27,32	7,23
> 50	1,32	0,34

Fonte: O autor

O resultado da estimativa de perdas de solo anual apontou que apenas 1,31% da área de estudo apresenta perda de solos acima 50 t.ha1.ano-1 e, segundo FAO (1980), estas áreas se enquadram na classe de alto grau de susceptibilidade à erosão.

Com grau médio de susceptibilidade à erosão, 27,32% da área de estudo encontra-se no intervalo entre10 e 50 t.ha-1.ano-1 de perdas de solo.

As perdas de solo estimadas para 27,24% da área de estudo apresentaram valor menor que 1 t.ha-1.ano-1, e 44,13% apresentaram perdas de solo entre 1 e 10 t.ha-1.ano-1 podendo ser classificada, segundo FAO (1980), como de baixa susceptibilidade à erosão ou ligeira perda de solo.

As áreas com alto grau de susceptibilidade à erosão perda de solos encontram-se em locais, com maiores declividades, onde o Fator topográfico (Figura 20-b) obteve os maiores valores. O fator topográfico também demonstrou correlação com as demais classes de susceptibilidade à erosão do solo.

O fator de uso, manejo e práticas conservacionistas do solo (Figura 20-c) também apresentou correlação na classe vegetação nativa, apontado valores baixos para erosão. O fator de erodibilidade do solo (Figura 20-a) demonstrou baixa correlação com a estimativa de perdas anuais de solo por erosão, somente em locais com alto valor de erodibilidade que foi percebido sua influência.

6 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que a utilização dos dados obtidos por meio de receptores de sinal de GNSS foram fundamentais para a geração de modelos mediante interpolação e para avaliar a precisão altimétrica dos modelos gerados com dados obtidos por meio de RPA.

O modelo obtido por meio do interpolador Kriging, representando a variação do relevo na área de estudo, apresentou a melhor avaliação visual e mediante am análise estatística obteve os melhores resultados em relação ao desvio padrão e a variância. Em consequência disto, este interpolador foi utilizado para geração dos modelos de textura do solo, aplicados para calcular o fator de erodibilidade do solo.

A avaliação da precisão altimétrica dos modelos gerados com dados obtidos com RPA, testados por diferentes combinações de pontos de controle e sem pontos de controle, mostrou que os dados coletados pelo equipamento de asa fixa é superior ao multirotor em relação a precisão vertical.

A utilização de pontos de controle para a geração dos modelos melhorou consideravelmente a precisão vertical, principalmente para os modelos gerados com os dados obtidos com RPA multirotor, o que demonstra a necessidade da coleta de coordenadas com receptores de sinal GNSS de precisão para geração de modelos com dados de RPA para representações mais próximas a realidade.

O modelo gerado com os dados obtidos com RPA asa fixa (com 6 pontos de controle) obteve os melhores resultados estatísticos, em relação ao desvio padrão e variância, diante disto este modelo foi utilizado para calcular o fator topográfico.

A RUSLE implementada no SIG apresentou-se como uma técnica eficaz na estimativa de perdas anuais de solo por erosão, permitindo identificar os locais com maior suscetibilidade de erosão na área de estudo.

Mais de 70 % da área de estudo apresentou baixa susceptibilidade à erosão ou ligeira perda de solo, o principal fator que possivelmente ocasionou este resultado foi a prática da agricultura com plantio direto. O restante da área de estudo, que apresentaram média e alta susceptibilidade à erosão, está diretamente relacionada aos locais que apresentam fator topográfico com valores altos.

O uso de outras praticas de conservação do solo, além do plantio direto, como a implantação de terraços e o plantio em nível, em áreas onde o relevo possui as maiores declividades e grandes comprimentos de rampa, pode diminuir a ação

erosiva da água nos locais com maiores valores de estimativas de suscetibilidade de perda de solos por ano.

Em relação à aplicabilidade de dados obtidos com receptores GNSS e RPA, a utilização das técnicas de fotogrametria e processamentos modelagem em ambiente SIG para a realização deste trabalho, concluiu-se que a integração destas tecnologias são importantes para auxiliar no processo de organização e gestão das áreas de produção agrícola mediante as condições dos fatores compõem a paisagem.

Como recomendação para trabalhos futuros: a geração de modelos obtidos com dados de RPA com mais pontos de controle, em locais com maiores declividades, para aumentar a precisão dos modelos; e a realização de levantamentos com menores intervalos de tempo para gerar análises temporais entre os modelos com o objetivo de monitorar processos erosivos lineares.

REFERÊNCIAS

AGISOFT LLC. Agisoft photoscan user manual: professional edition, version 1.2. [S.l.]: **Agisoft LLC**, 2016.

ANDRADE, J. B. Fotogrametria. **SBEE**. Curitiba. 258p. 1998.

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. Orientações Para Usuários de Drone. **Assessoria de Comunicação Social – ASCOM** 1ª Edição – Maio de 2017.

ARAÚJO, M. H. Siqueira de Fundamentos de geoprocessamento aplicados à mineração / Marcelo Henrique Siqueira de Araújo._ Cruz das Almas, BA: **UFRB**, 2017.

ASP – American Socirty of Photogrammetry. **Manual of Photogrammetry**, 1220p. 1966,

AXELSSON, P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. Int. Arch. **Photogramm. Remote Sensing**. 110–117. 2000.

BACELLAR, L. A. P. **Processos de Formação de Voçorocas e Medidas Preventivas e Corretivas. Viçosa,** 2006.

BAHIA, V.G.; CURI, N.; CARMO, D.; MARQUES, J.J.G.S.M. Fundamentos de erosão do solo. **Informe agropecuário.** Belo Horizonte, v.16, n.176, p.25-31, 1992.

BENDEA, H. F.; CHIABRANDO, F.; TONOLO, F. G.; MARENCHINO, D. Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV the Augusta Bagiennorum Test site, In: **XXI International Symposium**, Athens, Greece. 2007.

BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 657-668, mai. 2000.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO. F. Conservação do solo. 4. ed. São Paulo: **Ícone,** 1999.

BERVEGLIERI, A.; MENEGUETTE JUNIOR, M.; PITERI M. A. Aplicação do interpolador krigagem em modelos digitais de terrenos, comparando-se os casos de isotropia e anisotropia. INPE, **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, 2011.

BESKOW, S.; MELLO, C.R.; NORTON, L. D. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, v. 79(1), p. 49-59, 2009.

BETTINI, C. “Conceitos básicos de Geoestatística.” Em Geomática: modelos e aplicações ambientais. Editado por Margareth S. P. Meirelles, Gilberto Câmara e Claudia. M. de Almeida, 193 - 234. Brasília: **Embrapa**, 2007.

BRASIL. **Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional**. Brasília, DF. Jun. 84.

BURROUGH, P. A. Principles of Geographic Information Systems for Land Resource Assessment. Monographs on Soil and Resources Survey No. 12, **Oxford Science Publications**, New York, 1986.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R.A. Principles of geographical information systems. **Oxford, Oxford University Press**, 1998.

CAMAPUM DE CARVALHO, et al. Processos erosivos. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M.M.; SOUZA, N.M.; MELO. M.T.S. (Org.). Processos erosivos no centro oeste brasileiro. **Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC,** 2006.

CAMARA, G. Anatomia de um SIG. **Fator GIS**. Curitiba, n ◦4, 1994.

CAMARGO, P. O. Modelo Regional da Ionosfera para uso em Posicionamento com Receptores de uma Frequência. **Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná**, Curitiba. 191p. 1999.

CARVALHO, D. F.; MONTEBELLER, C. A., CRUZ, E. S.; CEDDIA, M. B.; LANA, A. M. Q. Perda de solo e água em Argissolo Vermelho Amarelo, submetido a diferentes intensidades de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.3, p.385-389, 2002.

CARVALHO, N. de O. Hidrossedimentologia prática. 2ª ed., rev., atual e ampliada. Rio de Janeiro: **Interciência**, 2008.

CASELLA, E et al. Study of wave runup using numerical models and low-altitude aerial photogrammetry: A tool for coastal management.Estuarine, **Coastal and Shelf Science**,149, 160-167, 2014.

CHUERUBIM, M. L.; GOMES, P.; PIRES, A.; SILVA, L. A.; MATOS, S. C. Diagnóstico preliminar da Rede GNSS local da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), campus Santa Mônica: realidade atual e perspectivas futuras no contexto das ciências geodésicas. In: XVI **SBSR – Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.** 2013.

CLAPUYT, F.; VANACKER, V; OOST, K. V. Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. **Geomorphology**, v. 260, p. 4-15, 2016.

COELHO FILHO, L. C. T.; BRITO, J. L. N. e S. Fotogrametria Digital. Rio de Janeiro: **EDUERJ**, 196 p. 2007.

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.

CORRÊA, A. Estudo da Erodibilidade de uma Unidade Geotécnica no Campo de Instrução de Santa Maria como base para o seu planejamento ambiental. **Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências**, RS, 2015.

COSTA, G. C.; SILVA, D. C. Pré-sinalização de pontos de apoio em aerofotogrametria com câmeras de pequeno formato. **IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação**. Recife – PE, 2012

COSTA, S. M. A.; FORTES, L. P. S. Nova Hierarquia da Rede Planimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro. **Seminário sobre Referencial Geocêntrico no Brasil – IBGE**; Rio de Janeiro, RJ, 2000.

CRUZ, G. C. F. Alguns aspectos do clima dos Campos Gerais. In: MELLO, M. S.; MORRO, R. S.; GUIMARÃES, G. B. Patrimônio natural dos Campos Gerais do Paraná. Ponta Grossa: **Ed. UEPG**, p. 59-72, 2007.

DCEA – **Departamento de Controle do Espaço Aéreo**. https://www.decea.gov.br/?i=utilidades&p=rpa-drone

DEUS, B. V.; ZEILHOFER, P.; ARAUJO, G. C.; SANTOS, A. S. L. Interpolação pluviométrica na Bacia do Alto e Médio Rio Teles Pires: uma análise de séries históricas e interpoladores. In: **Simpósio Brasileiro de Clências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, 3., 2010, Recife. Anais... Recife: UFPE, 2010.

DISPERATI, A.A.; AMARAL, R.F.; SCHULER, C. A. B. Fotografias aéreas de pequeno formato: aplicações ambientais. **UNICENTRO,** p.179-218. 2007.

D'OLEIRE-OLTMANNS, S. et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. **Remote Sensing**, [S.l.], v. 4, n. 11, p. 3390–3416, Nov. 2012.

EISENBEISS, H. UAV PHOTOGRAMMETRY A dissertation submitted to **ETH Zurich** for the degree of Doctor of Sciences, 2009.

ELTNER, A.; BAUMGART, P.; MAAS, H. G.; FAUST, D. Multi-temporal UAV data for automaticmeasurement of rill and interrill erosion onloess soil. Earth Surf. **Process. Landforms**, v. 40, 741–755, 2015.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3 ed. rev. ampl. Brasília, 353p., **EMBRAPA**, 2013.

EMBRAPA. Estudo revela que 30% dos solos do mundo estão degradados. **Portal da Embrapa, Noticias, Recursos Naturais**. 12/07/2016. Disponível em: Acesso em : 19/10/2016

ESRI, **Environmental Systems Research Institute**. What is GIS? Disponível em: <http://www.esri.com/what-is-gis/overview#overview_panel> Acesso em: 01 out. 2013.

EVERAERTS J. O uso de veículos aéreos não tripulados (UAVS) para detecção remota e mapeamento. **IAPRS & SIS** 37 (B1): 1187-1192, 2008.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. La erosión del suelo por el agua: Algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo. Cuadernos de fomento agropecuário de la Organización de Las Naciones Unidas, Roma, n.81, 1980

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Status of the World's Soil Resources: Main Report. Rome, Italy. 2015.

FARIA, K. M. S.; SOARES NETO, G. B.; COSTA, J. V. S.; FERREIRA, M. E. Dinâmica erosiva de processos tropicais: três décadas da erosão chitolina. XVII **Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Instituto de Geociências – Unicamp**, 2017.

FGCC. **Federal Geodetic Control Committee. Geometric Geodetic Accuracy** Standards and Specifications for Using GPS Relative Positioning Techniques (Version 5.0 Reprinted with corrections). United States National Geodetic Survey, NOAA. Rockville. 01 de agosto de 1989

FELGUEIRAS, C. A. “Modelagem Numérica de Terreno”. In: CÂMARA, G. & MEDEIROS, J. S. (eds.). **Geoprocessamento para Projetos Ambientais. São José dos Campos: INPE**, cap. 4, p. 4-1 – 4-38, 1998.

FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G. Modelagem numérica de terreno. In: CÂMARA, G. et. al. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. Cap 7. 36p, 2001.

FERREIRA, A. M. R. Avaliação de câmara de pequeno formato transportada por veículo aéreo não tripulado – VANT, para uso em aerolevantamentos. 2014. 97 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – **Instituto de Geociências, Universidade de Brasília**, Brasília, 2014.

FERREIRA, A. O. Compartimentos da matéria orgânica como indicadores do sequestro de carbono em sistema plantio direto de longa duração. Ponta Grossa, **Universidade Estadual de Ponta Grossa**. 98P, 2009.

FERREIRA, P. H. M.; Princípios de manejo e conservação do solo. 2. ed. São Paulo: **Nobel**, 1981.

FONSTAD, M. A.; DIETRICH, J. T.; COURVILLE, B. C.; JENSEN, J. L.; CARBONNEAU, P. E. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. **Earth Surface Processes and Landforms**. Vol. 38. n.º 4, p. 421-430. 2013.

FUJIHARA, A. K. Predição de erosão e capacidade de uso do solo numa microbacia do Oeste Paulista com suporte em geoprocessamento. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) **Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ)**, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

GARCÍA-RUIZ, J.M., BEGUERÍA, S., NADAL-ROMERO, E., GONZÁLEZ-HIDALGO, J. C., LANARENAULT, N., SANJUÁN, Y. **A meta-analysis of soil erosion rates across the world. Geomorphology**, v. 239, n.15, 2015.

GLENDELL, M. et al. Testing the utility of structure-from-motion photogrammetry reconstructions using small unmanned aerial vehicles and ground photography to estimate the extent of upland soil erosion. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 42, n. 12, p. 1860–1871, 2017.

GOSWAMI, S. B.; SAXENA, M. S. A.; BAIRAGI, G. D. A review: the application of remote sensing , GIS and GPS in **Agriculture. International Journal of Advanced Technology and Engineering Research**, v. 2, p. 50-54, 2012.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. M. G. (orgs). **Erosão e Conservação do Solo: conceito, temas e aplicações**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.

GUERRA, Antônio José Teixeira, et al, Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações, 2 ed. – Rio de Janeiro: **Bertrand Brasil**, 2005.

HAARBRINK, R. B.; EISENBEISS, H. Accurate DSM production from unmanned helicopter systems. In: The International Archives of the Photogrammetry, **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Beijing, China. 2008.

HUGENHOLTZ, C. H.; WHITEHEAD, K.; BROWN, O. W.; BARCHYN, T. E.; MOORMAN, B. J.; LECLAIR, A.; RIDDELL, K.; HAMILTON, T. Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. **Geomorphology**, v. 194, p. 16-24, 2013.

HUTTON, C.; NICHOLAS, A.; BRAZIER, R. Sub-grid scale parameterization of hillslope runoff and erosion processes for catchment-scale models ofsemi-arid landscapes. **Hydrological Processes**, v. 24, 1713–1721p, 2014.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Recomendações para Levantamentos Relativos Estáticos - GPS**. 2008.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R.M. An Introduction to Applied Geostatistics. NY: **Oxford University Press**, Inc., 1989.

JIMENEZ, K. Q.; DOMECQ, F. M. Estimação de chuva usando métodos de interpolação. Porto Alegre: **Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, p.16, 2008.

KIRCHNER, F. F. et al. O uso de funções Spline no cálculo de volume de árvores. **Revista Florestal**, v. 19, p. 116-112, 1989.

LAL, R. Erodibility and erosivity. In: LAL, R. et al. Soil erosion research methods. Washington: **Soil and Water Conservation Society**, p. 141-160. 1988.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos.** 2. ed. São Paulo: Unesp, 2003.

LELONG C. C. D.; BURGER P.; JUBELIN G.; ROUX B.; LABBE S.; BARETT F. Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. **Sensors**, Vol. 8 :3557–3585. 2008.

LI, S. The use of Low-altitude unmanned aerial vehicle system in the measurement of large scale topographic maps —Take the 1:2000 mapping of PuWen as an example. Paper presented at 11th South East Asian Survey Congress and **13th International Surveyors' Congress Innovation towards Sustainability**, Malaysia, 22-27p. 2011.

LOHMANN, P.; KOCH, A. Quality assessment of laser-scannerdata. **ISPRS Workshop on Sensing and Mapping from Space, University of Hanover**, Germany. 1999.

LONGLEY, Paul A; et al. Sistemas e ciência da informação geográfica. 3 Ed. Porto Alegre, **Bookman**, 2013

LUGNANI, J. B. Introdução à Fototriangulação. Curitiba: **Universidade Federal do Paraná**, 134p. 1987,

MACHADO, A. M. L; MITISHITA, E. A; SANTOS JR, R. L; BARBOSA, F. P. Verificação da Estabilidade Geométrica dos parâmetros de calibração de uma câmara digital de pequeno Formato Sony DSC-F717. In: **Série em Ciências Geodésicas**, v. 3. p. 292-3009. 2003.

MANCINI, F.; DUBBINI, M.; GATTELLI, M.; STECCHI, F.; FABBRI, S.; GABBIANELLI, G. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution

Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. **Remote Sensing**, v. 5, n. 12, 2013.

MANNIGEL, A.R.; CARVALHO, M.P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L.R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002.

MELO, M. S. **Análise sedimentológica dos depósitos da Lagoa Dourada, Vila Velha, Ponta Grossa**, PR. Ponta Grossa, UEPG, Relatório Final de Pesquisa, 74p., 1999.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: ed. UNESP. 480p. 2008.

MORGENTHAL, G.; HALLERMANN, N. Quality assessment of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based visual inspection of structures, Advances in Structural **Engineering**, v. 17, n. 3, 2014.

NISHIYAMA, L. **Erosão do solo: uma visão integrada dos fatores e processos que condicionam o seu desenvolvimento**. São Carlos. 95p. Revisão Bibliográfica, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 1995.

OLIVEIRA, J. F.; GRIEBELER, N. P.; CORRECHEL, V; SILVA, C. V. Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento em solos de estradas não pavimentadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v3, p.955-960, 2009.

OUÉDRAOGO, M. M.; DEGRÉ, A.; DEBOUCHE C.; LISEIN, J. The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds. **Geomorphology**, v. 214, p. 339–355, 2014.

OLAYA, Víctor. Sistemas de Información Geográfica. **Licença Creative Commons**. V.1.0. 2010. Rev.2011.

PANACHUKI, E.; SOBRINHO, T. A.; VITORINO, A. C. T.; CARVALHO, D. F.; URCHEI, M. A. Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.2, p.261-268, 2006.

PCI Geomatics Inc. Geomatica Software Solutions. **OrthoEngine: User guide**. Canada, 2010.

PEREIRA, K. D.; FAZAN, J. A.; FORTES, L. P. S. RBMC: Sete anos fornecendo referência a posicionamentos GPS no Brasil e Exterior. **XXI Congresso Brasileiro de Cartografia**, Belo Horizonte, MG, 2003.

POLAT, N., UYSAL, M. Investigating performance of airborne lidar data filtering algorithms for DTM generation. **Measurement**, 61–68. 2015.

RAY, R. G. Aerial photographs in geolgical interpretation ana mapping. U.S Geological Survey, paper 373, Washington, U.S.A., 88pp. 1963

REMONDINO, F., BARAZZETTI, L., NEX, SCAIONI, F. M., SARAZZI, D. UAV Photogrammetry for mapping and 3D modeling current status and future perspectives. **ISPRS ICWG I/V UAV-g Conference**, Zurich, Switzerland. 2011.

RIBEIRO JÚNIOR, S. **Determinação de volumes em atividades demineraçãoutilizando ferramentas do sensoriamento remoto**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

RODRIGUES, J. A. M.; MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; RODRIGUES M. C. Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica do rio Cervo – MG. São Paulo, **UNESP, Geociências**, v. 36, n. 3, p. 531 – 542, 2017

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications**. 2. ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 589p. 2003.

SHAN, J., SAMPATH, A. Urban DEM generation from raw LiDAR data: a labeling algorithm and its performance, Photogramm. **Eng. Remote Sens**. 217–226. 2005.

SILVA, C. A; DUARTE, C. R.; SOUTO, M. V. S. SABADIA, J. A. B. Utilização de VANT para geração de ortomosaicos e aplicação do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). In: **Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, 14. (SBSR)**, 2015, João Pessoa. Anais... João Pessoa: INPE, 2015.

SOUZA, D. V. Avalização de Distorções da RAFB no sul/sudeste do Brasil usando o Geóide e GPS. **Instituto de Astronomia, Geofísica, Universidade de São Paulo**. 2006.

SHIMABUKURO, Y. E.; MAEDA, E. E.; FORMAGGIO, A. R. Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas aplicados ao estudo dos recursos agronômicos e florestais. **Ceres**, v. 56, n. 4, p. 399–409, 2015.

SILVA, F. D. G.; MINOTTI, F.; LOMBARDI NETO, F.; PRIMAVESI, O.; CRESTANA, S. Previsão da perda de solo na Fazenda Canchim–SP (EMBRAPA) utilizando geoprocessamento e o USLE 2D. **Eng Sanitaria Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 141-148, 2010

SMITH, M. W.; VERICAT, D. From experimental plots to experimental landscapes: topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from Structure-fromMotion photogrammetry. **Earth Surf. Process. Landforms**, v. 40, p. 1656–1671, 2015.

Soil Science of America, Glossary of Soil Science terms. **Soil Science of America**, Madison, WI. Pp. 93. 2008.

STÖCKER, C.; ELTNER, A.; KARRASCH, P. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry: a case study from Andalusia, Spain. **Catena**, v. 132, p. 1–11, 2015.

TALBOT, N.C. Compact data transmission standard for high-precision GPS. In: **ION GPS 1996**, Kansas City, Missouri, p.861-871, 1996.

TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria Básica**. Edição do Autor, Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”, Campus de Presidente Prudente, São Paulo, 2009

TRAGUETA, N. L.; CARDOSO, L. G. Desempenho de receptores de GPS de navegação no cálculo de área e perímetro segundo diferentes configurações. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 24, n. 1, p. 105- 120, 2009.

TREVISAN, R. G.;MOLIN, J. P. Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para Agricultura de Precisão. Agricultura de Precisão, **Boletim Técnico 01, ESALQ-USP**, 2014.

VEIGA, M.; BASSI, L.; ROSSO, A. Degradação do solo e da água. In: SANTA CATARINA. Secretaria de Estado da Agricultura e Abastecimento. **Manual de uso, manejo e conservação do solo e da água: Projeto de recuperação, conservação e manejo dos recursos naturais em microbacias hidrográficas.** 2a edição. Florianópolis. EPAGRI, 1994

VITTI, D. M. C. **Exatidão Posicional de produtos cartográficos digitais com RPAS (Remotely Piloted Aerial System) para mapeamento da área seca de resercatório.** Tese – Programa de Pós_Graduação e Área de concentração em Ciências da Engenharia ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos da Universiade de São Paulo, 2017.

VOSSELMANN, G. Slope based filtering of Laser altimetry data. Int. Arch. Photogrammetry. **Remote Sensing**. 935–942. 2000.

WALTRICK, P. C.; MACHADO, M. A. M.; DIECKOW, J; OLIVEIRA, D. Estimativa da erosividade de chuvas no estado do paraná pelo método da pluviometria: atualização com dados de 1986 a 2008. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, 39:256-267, 2015.

WEIBEL, R.; HELLER, M. “Digital Terrain Modelling”. In: LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. (eds.). **Geographic Information Systems and Science**. 2nd ed., v. 1, cap. 19, p. 269-297, 1999.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses - **A guide to conservation planning**. Washington, USDA, 58p., 1978.

WOODGET A. S.; CARBONNEAU P. E.; VISSER F.; MADDOCK I. P. Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry. **Earth Surf Process Landf.** 40(1):47–64, 2015.

WU, W.; LIU, H.; DAI, H.; LI, W.; SUN, P. The management and planning of citrus orchards at a regional scale with GIS. **Precision Agriculture**, v. 10, p. 247-261, 2009.

ZANETTI, J.; GRIPP JUNIOR, J.; SANTOS, A. P.; Influência do número e distribuição de pontos de controle em ortofotos geradas a partir de um levantamento por vant. **Revista Brasileira de Cartografia**. v 69, n.2, 2017

ZARTL, A.S.; KLIK, A.; HUANG, C. Soil detachment and transport processes from interrill and rill areas. **Phys. Chem Earth**, 26:25-26, 2001.

ANEXOS

ANEXO A: Relatório do processamento de dados RPA de asa fixa.

Agisoft PhotoScan

Processing Report

11 May 2018



Survey Data

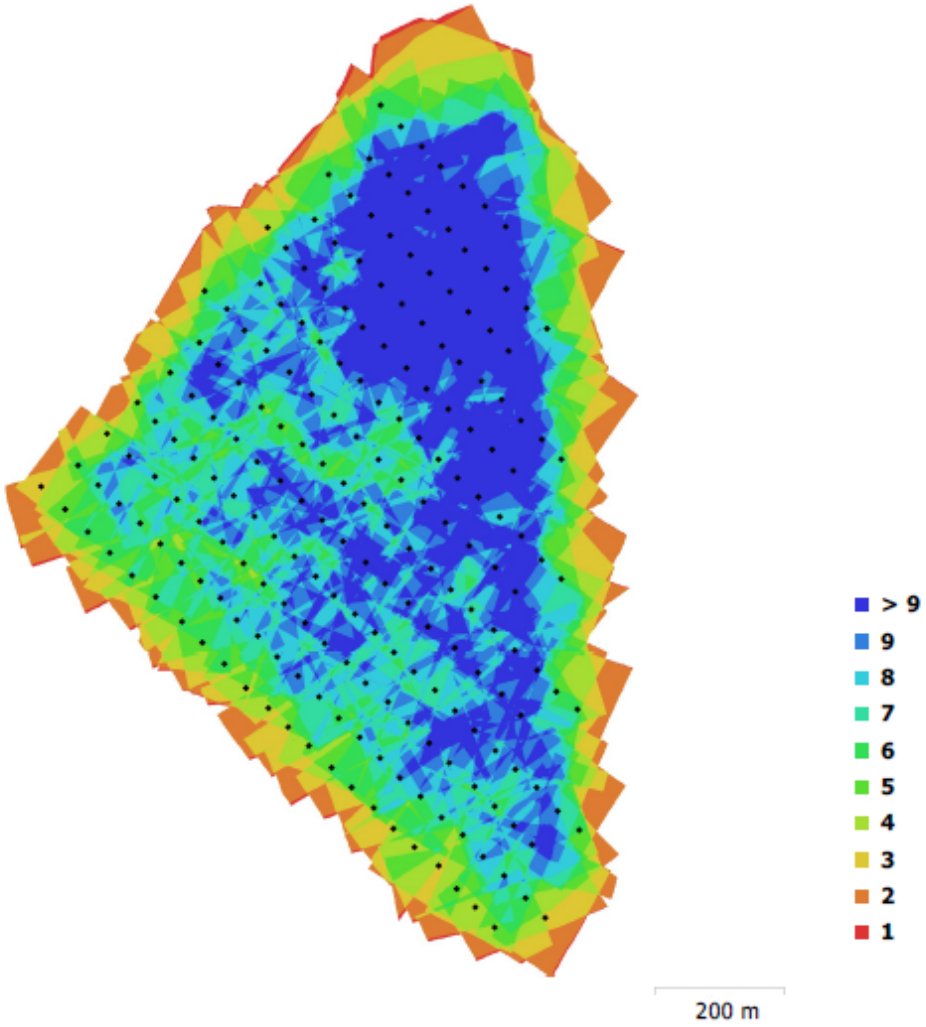


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	210	Camera stations:	210
Flying altitude:	153 m	Tie points:	231,193
Ground resolution:	3.96 cm/pix	Projections:	730,604
Coverage area:	0.884 km²	Reprojection error:	0.836 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
DSC-WX220 (4.45 mm)	4896 x 3672	4.45 mm	unknown	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

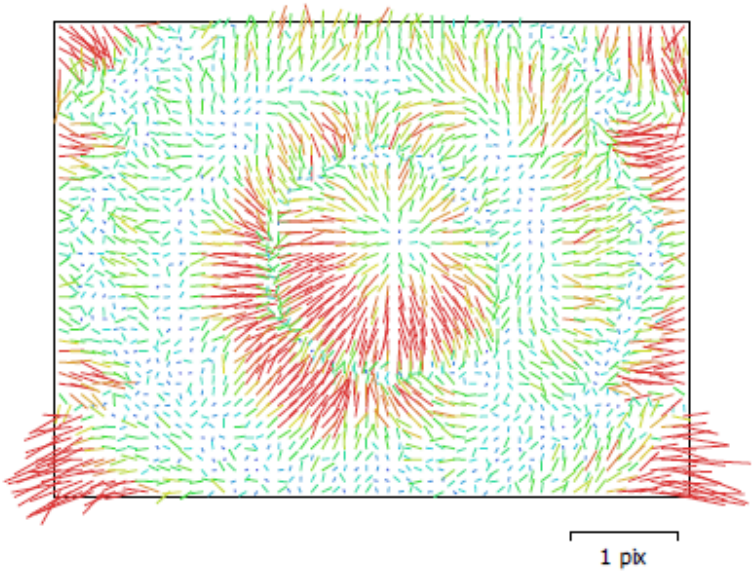


Fig. 2. Image residuals for DSC-WX220 (4.45 mm).

DSC-WX220 (4.45 mm)
210 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	**4896 x 3672**	**4.45 mm**	**unknown**

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K3
K2	-0.0253454								
P1	0.00444976								
P2	0.00368283								
F	3618.06	0.14	1.00	0.08	-0.10	0.19	0.08	-0.04	0.07
Cx	45.8003	0.038		1.00	0.01	-0.04	0.39	0.01	-0.02
Cy	40.8045	0.036			1.00	-0.51	-0.03	-0.01	-0.02
B1	0.211412	0.01				1.00	0.01	-0.06	0.03
B2	0.698846	0.011					1.00	0.07	-0.00
K1	0.00194944	1.3e-05						1.00	-0.79
K3	0.0204748	3e-05							1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

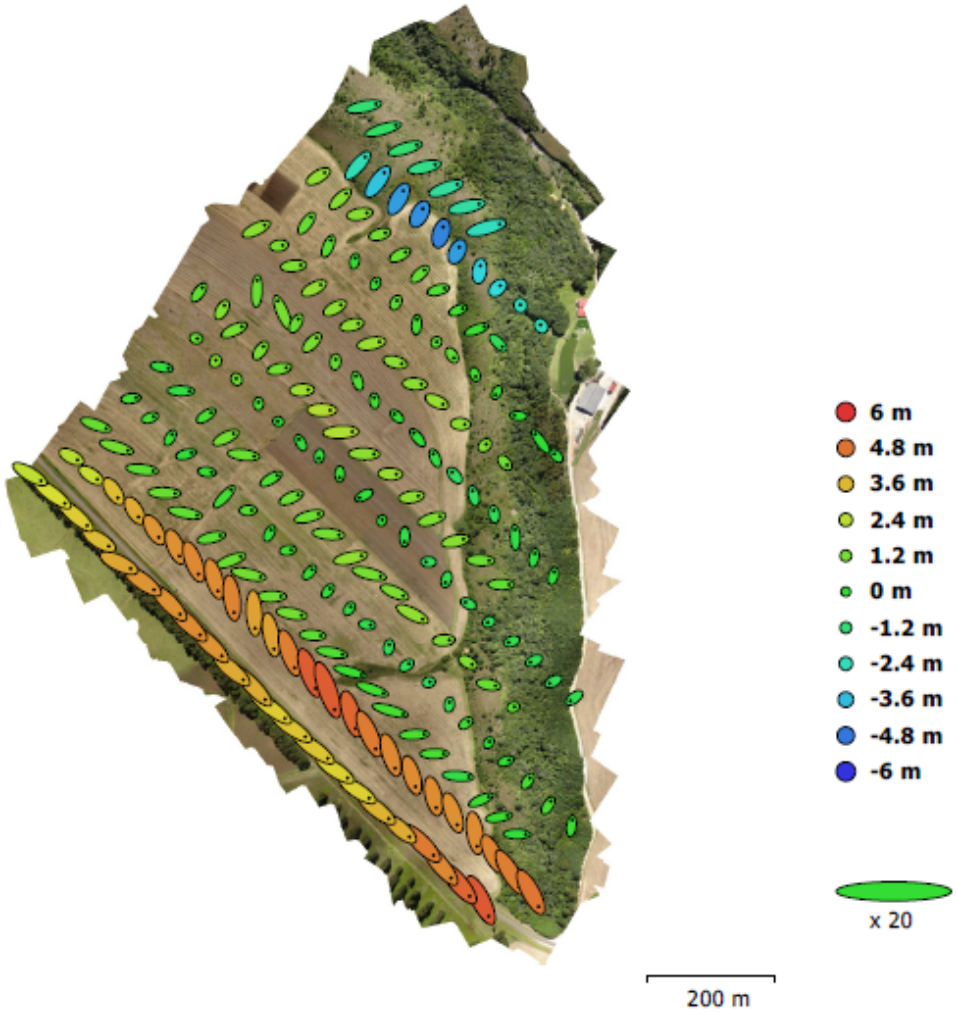


Fig. 3. Camera locations and error estimates.
Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
1.11743	0.987917	2.23525	1.49152	2.68719

Table 3. Average camera location error.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Ground Control Points



Fig. 4. GCP locations.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
6	1.81506	1.93321	0.695745	2.65174	2.74149

Table 4. Control points RMSE.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
pc01	2.18883	1.98785	-0.110096	2.95883	0.496 (14)
pc02	-3.01404	0.637596	-0.746566	3.16991	0.499 (13)
pc03	1.24997	-0.213481	1.32308	1.83263	0.242 (8)
pc04	-0.658339	0.599966	-0.445463	0.995895	0.399 (7)
pc05	-1.26773	1.01356	-0.450941	1.68458	0.241 (7)
pc06	1.51269	-4.07834	0.427285	4.37077	0.448 (8)
Total	**1.81506**	**1.93321**	**0.695745**	**2.74149**	**0.425**

Table 5. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

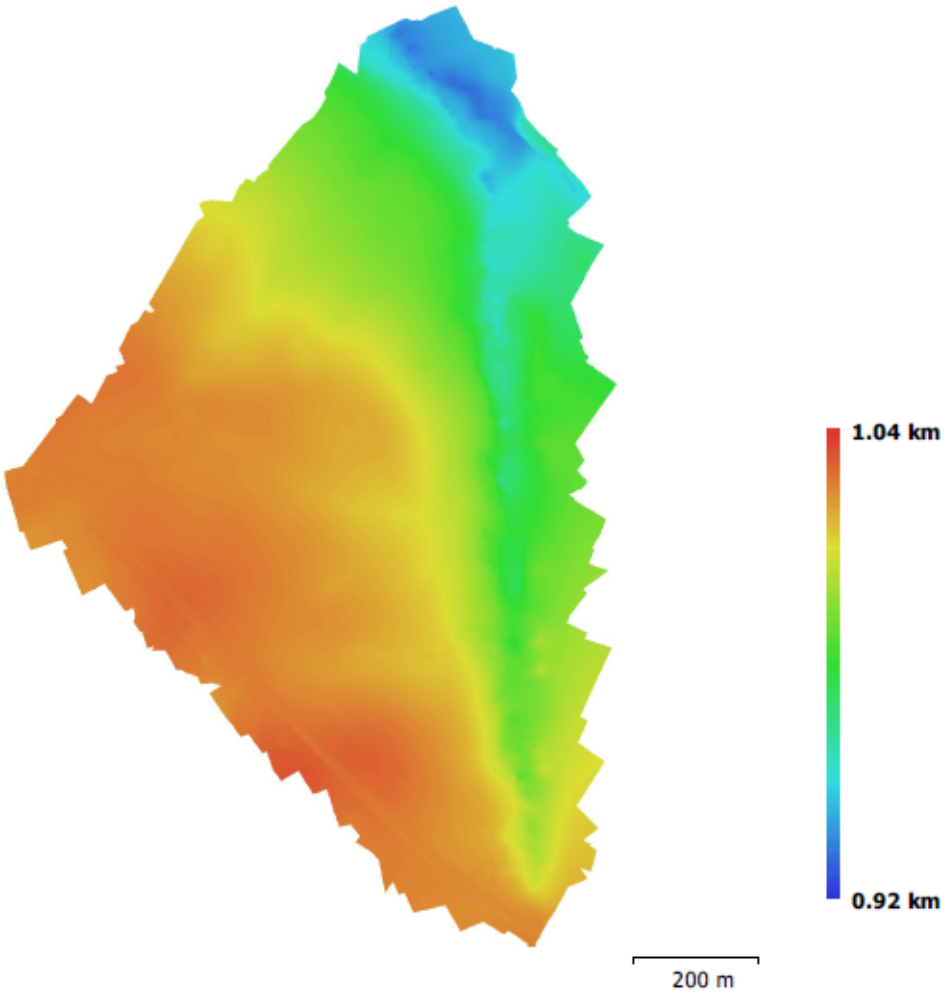


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Processing Parameters

General	
Cameras	210
Aligned cameras	210
Markers	6
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S (EPSG::31982)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	231,193 of 246,744
RMS reprojection error	0.237136 (0.835687 pix)
Max reprojection error	1.18211 (31.645 pix)
Mean key point size	3.60857 pix
Effective overlap	3.27154
Alignment parameters	
Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Yes
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	12 minutes 56 seconds
Alignment time	59 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1, k3
Fit rolling shutter	No
Optimization time	2 seconds
Dense Point Cloud	
Points	149,494,995
Reconstruction parameters	
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	3 hours 6 minutes
Dense cloud generation time	31 minutes 7 seconds
DEM	
Size	15,602 x 21,636
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S (EPSG::31982)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	5 minutes 6 seconds
Orthomosaic	
Size	25,333 x 38,439
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S (EPSG::31982)
Channels	3, uint8
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable color correction	No
Enable hole filling	Yes
Processing time	6 minutes 39 seconds
Software	
Version	1.3.0 build 3772
Platform	Windows 64

ANEXO B: Relatório do processamento de dados RPA multirotor.

Agisoft PhotoScan

Processing Report

18 May 2018



Survey Data

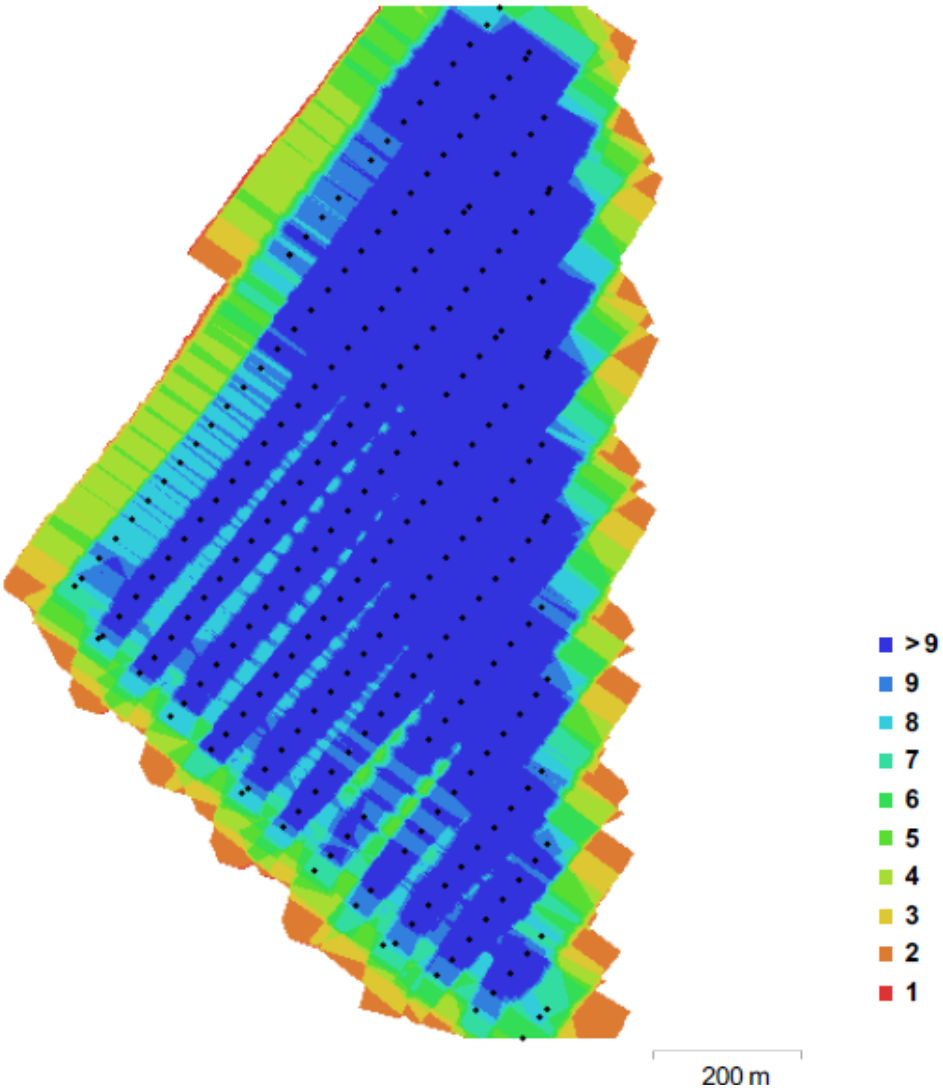


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	236	Camera stations:	234
Flying altitude:	191 m	Tie points:	161,452
Ground resolution:	4.27 cm/pix	Projections:	512,732
Coverage area:	8.15e+05 sq m	Reprojection error:	1.98 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310 (8.8 mm)	4864 x 3648	8.8 mm	2.61 x 2.61 um	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

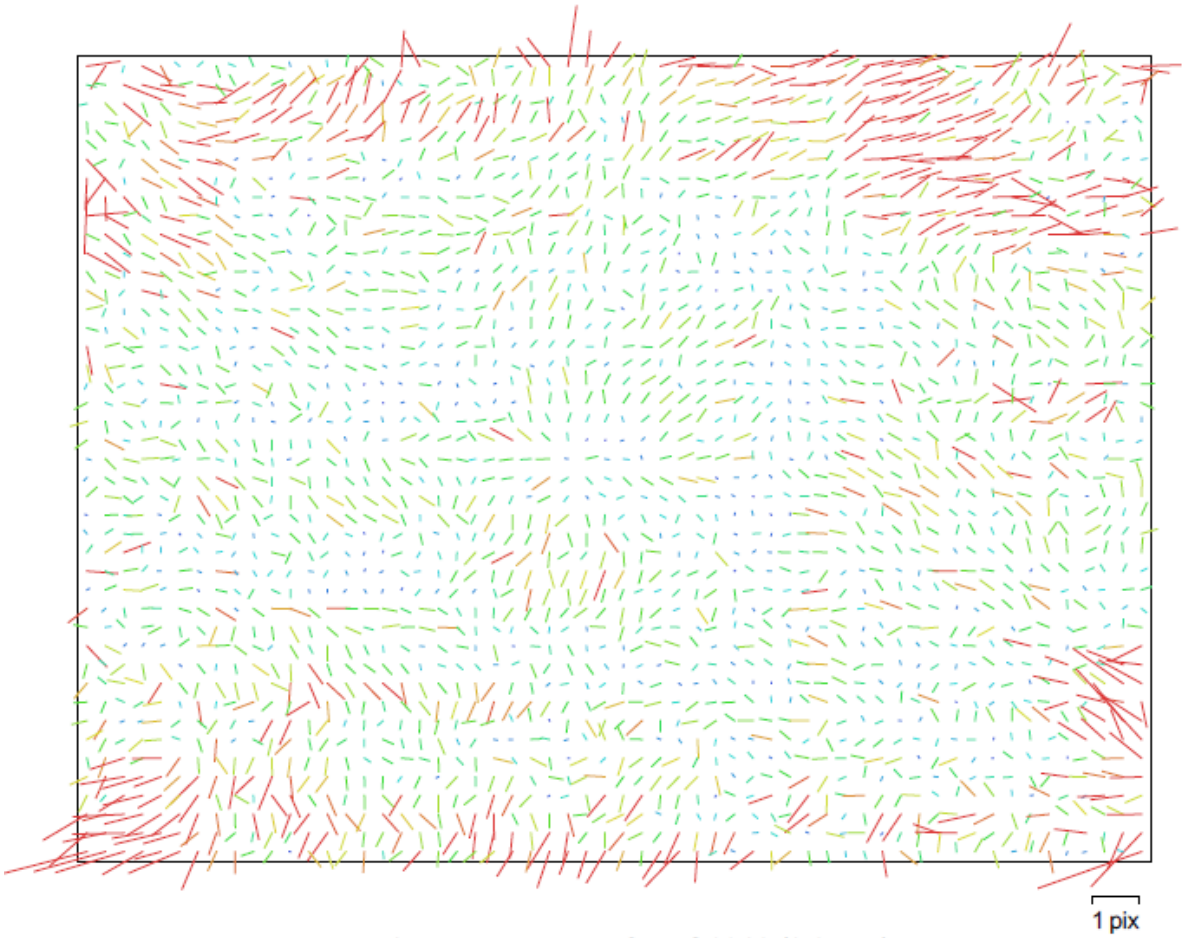


Fig. 2. Image residuals for FC6310 (8.8 mm).

FC6310 (8.8 mm)
236 images

Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
4864 x 3648	**8.8 mm**	**2.61 x 2.61 um**	**No**

Type:	Frame	Skew:	0
Fx:	4050.53	Cx:	2430.64
Fy:	4050.53	Cy:	1816.16
K1:	0.00763493	P1:	-0.000290611
K2:	-0.0327736	P2:	0.000239394
K3:	0.0381315	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Camera Locations

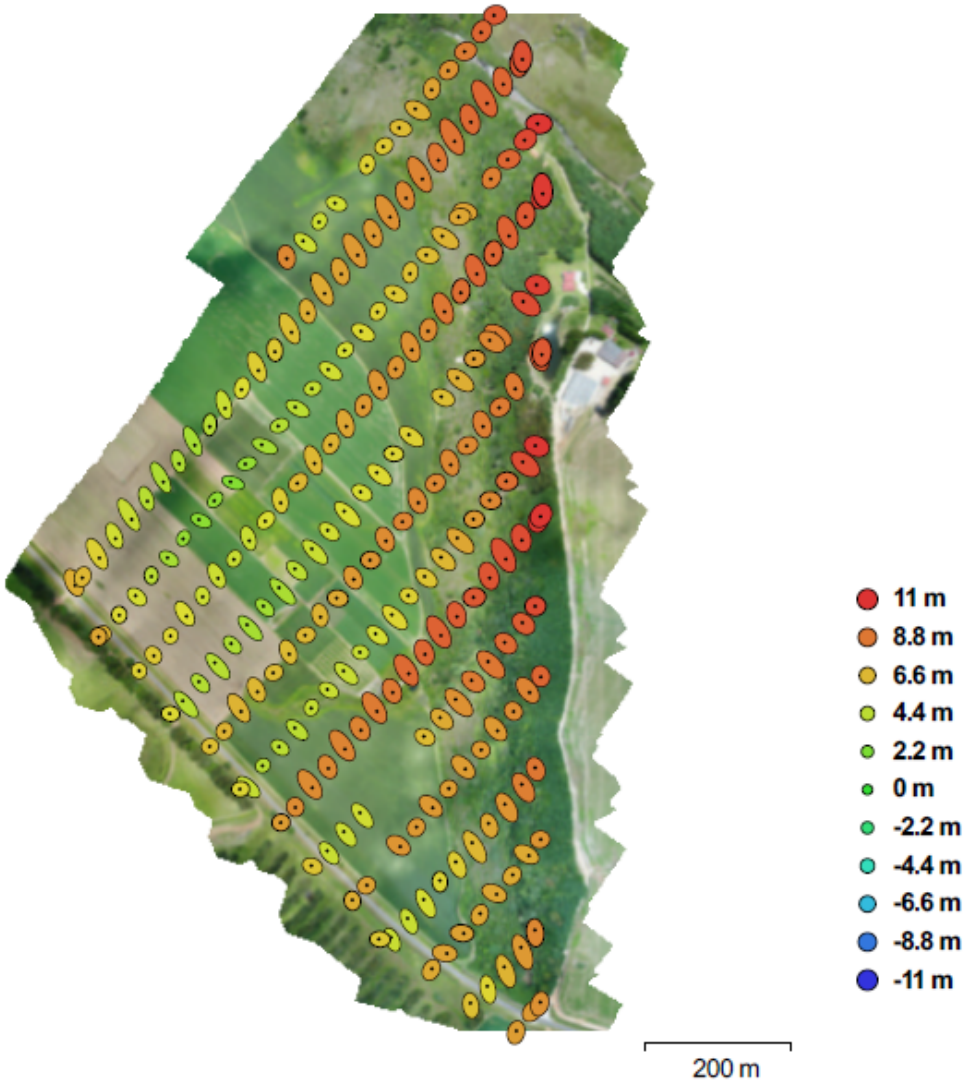


Fig. 3. Camera locations and error estimates.
Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	XY error (m)	Z error (m)	Total error (m)
4.30343	5.88103	7.28738	7.18768	10.2357

Table 2. Average camera location error.

Ground Control Points



Fig. 4. GCP locations.

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
pc01	0.0515073	0.0378241	0.0639036	12	0.196
pc02	0.372645	-0.0336834	0.374164	9	0.459
pc03	0.111877	0.005914	0.112033	13	0.346
pc04	0.165275	-0.0233841	0.166921	8	0.327
pc05	0.537614	0.017021	0.537883	10	0.847
pc06	0.0374207	0.014332	0.0400714	11	0.118
pc07	0.0197534	-0.0057932	0.0205854	10	0.284
pc08	0.114167	-0.0258698	0.117062	12	0.200
pc09	0.0309049	-0.00741628	0.0317823	12	0.127

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
pc10	0.104324	0.0118163	0.104991	14	0.311
pc11	0.378089	0.0861047	0.387769	9	0.599
pc12	1.09762	-0.0694962	1.09982	12	0.774
pc13	0.132529	0.011792	0.133052	12	0.319
pc14	0.0181712	-0.00732963	0.0195938	7	0.098
Total	**0.364756**	**0.0348221**	**0.366414**		**0.420**

Table 3. Control points.

Digital Elevation Model

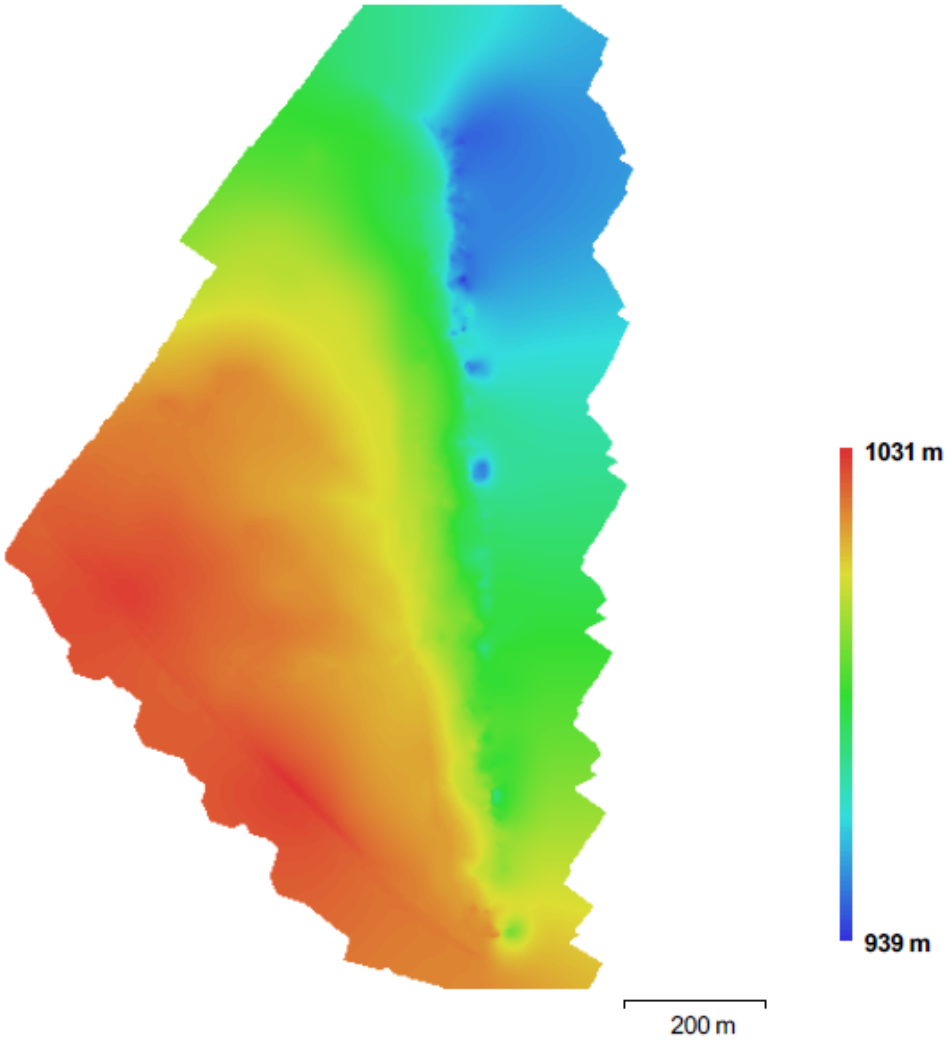


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution:	17.1 cm/pix
Point density:	34.229 points per sq m

Processing Parameters

General	
Cameras	236
Aligned cameras	234
Markers	14
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S (EPSG::31982)
Point Cloud	
Points	161,452 of 250,189
RMS reprojection error	0.310828 (1.98059 pix)
Max reprojection error	32.6139 (130.295 pix)
Mean key point size	8.42238 pix
Effective overlap	3.18956
Alignment parameters	
Accuracy	Medium
Pair preselection	Reference
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Constrain features by mask	No
Matching time	42 minutes 37 seconds
Alignment time	22 minutes 58 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Optimization time	3 minutes 47 seconds
Dense Point Cloud	
Points	21,578,471
Reconstruction parameters	
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Processing time	28 minutes 8 seconds
DEM	
Size	6,523 x 10,870
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S (EPSG::31982)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Orthomosaic	
Size	21,132 x 37,632
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S (EPSG::31982)
Channels	3, uint8
Blending mode	Mosaic
Reconstruction parameters	
Surface	DEM
Enable color correction	No