

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

GUILHERME COSTA SANTOS

APLICAÇÃO DE GEOTECNOLOGIAS NA AVALIAÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS:
ESTUDO DE CASO DA FAZENDA DO GLÓRIA – UBERLÂNDIA, MG

Uberlândia

2020

GUILHERME COSTA SANTOS

APLICAÇÃO DE GEOTECNOLOGIAS NA AVALIAÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS:
ESTUDO DE CASO DA FAZENDA DO GLÓRIA – UBERLÂNDIA, MG

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof.^a Dra. Raquel Naiara Fernandes Silva.

Uberlândia

2020

GUILHERME COSTA SANTOS

APLICAÇÃO DE GEOTECNOLOGIAS NA AVALIAÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS:
ESTUDO DE CASO DA FAZENDA DO GLÓRIA – UBERLÂNDIA, MG

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental.

Uberlândia, 30 de junho de 2020.

Dra. Raquel Naiara Fernandes Silva

Dra. Anne Caroline Malvestio

Dra. Giovana Bizão Georgetti

*Dedico aos meus pais Jorge e Joseilma e
aos meus irmãos Jéssica e Gustavo.*

AGRADECIMENTOS

Pela oportunidade da vida.

À Universidade Federal de Uberlândia, ao Instituto de Ciências Agrárias e à Faculdade de Engenharia Civil pela oportunidade para desenvolvimento deste trabalho.

Ao Ivan Siqueira e à empresa “duSiqueira Geotecnologias” por todo o apoio para desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos de graduação Lúcio Carlos, Joyce Pereira, Patrícia Ferreira, João Carlos Pereira, Arthur Dias, Felipe Ferreira, Michael Douglas, Wellington Pereira e tantos outros que poderiam ser citados aqui.

Ao meu amigo de graduação Gabriel Oliveira por todo o auxílio prestado no desenvolvimento deste trabalho.

À minha amiga Maria Inês Rocha Soares e sua família que me deu apoio nos momentos mais difíceis em meu período de graduação.

Ao ex-técnico do Laboratório de Topografia Josildo por todo o apoio prestado.

Aos meus primos Deyvid, Thiago, Filipe, Layla, Natanael, Valdir Júnior, Marta e todos os demais que me ajudaram para que eu pudesse desfrutar da oportunidade de cursar o nível superior.

Às minhas tias e tios que me estenderam a mão e me deram conselhos sábios nos diversos momentos de minha vida.

À minha orientadora Prof.^a Dra. Raquel Naiara Fernandes Silva pela orientação, amizade e incentivo dado no desenvolvimento dessa pesquisa.

À minha avó Josefa e ao meu avô Severino (*in memoriam*) que me tornaram o homem que sou hoje, graças aos bons ensinamentos e educação dada durante minha infância.

Aos meus pais Jorge Antônio dos Santos e Joseilma Dias da Costa que sempre me deram apoio e me propiciaram todas as condições necessárias para que eu pudesse alcançar minha graduação.

Em especial, ao meu irmão Gustavo Costa Santos e à minha irmã Jéssica Félix da Costa.

Obrigado a todos!

RESUMO

As geotecnologias são ferramentas imprescindíveis em estudos ambientais, apresentando diversas potencialidades, seja na aquisição de dados, em seu processamento e na tomada de decisões com base nos resultados obtidos. A integração de geotecnologias pode apresentar diversas potencialidades na análise de processos de degradação do solo como a erosão. A erosão hídrica é um dos principais tipos de degradação do solo no Brasil, sendo uma área de importante relevância na garantia da preservação do solo. Este trabalho objetivou apresentar as potencialidades de aplicações de geotecnologias no diagnóstico e monitoramento de processos erosivos através de um estudo de caso em uma voçoroca localizada em Uberlândia-MG. As geotecnologias utilizadas foram: a fotogrametria aérea, a geodésia, o georreferenciamento e os sistemas de informação geográfica. O procedimento se baseou no imageamento com drones com apoio de pontos de controle utilizando receptores GNSS, sucedendo com uma análise em ferramenta de processamento, o *QGIS* e *ArcGIS*. O processamento dos pontos de controle GNSS nas ferramentas *GNSS Solutions™* e *IBGE-PPP online* permitiram realizar um comparativo constatando que o *IBGE-PPP* requer maior tempo de rastreamento para a obtenção de coordenadas precisas visto que realiza um processamento absoluto, diferentemente do *GNSS Solutions™*, que trabalha com processamento relativo e obteve coordenadas geodésicas com precisão centimétrica nos processamentos com linhas de base curtas. O processamento do ortomosaico e do modelo digital de superfície do levantamento fotogramétrico com VANT apresentou parâmetros como GSD médio e RMS planimétrico compatíveis com produtos de alta qualidade, indicando um alto grau de representação do terreno com boa qualidade da imagem, sendo o uso dos drones uma vantagem em estudos ambientais em regiões de menor área. Os produtos fotogramétricos passaram por uma análise de acurácia e tendência para enquadramento no PEC-PCD do Sistema Cartográfico Nacional (SCN), sendo aceitos em todas as escalas, inclusive na maior delas que é a de 1:1000. Com o ortomosaico e o MDS foi possível inferir aspectos como área de contribuição da voçoroca, mapeamento de uso e ocupação do solo, mapeamento hipsométrico, mapeamento de declividade bem como identificar a fisionomia do processo erosivo, demonstrando que a aplicação conjunta de geotecnologias tem grande aplicabilidade no diagnóstico e monitoramento de processos erosivos.

Palavras-chave: Fotogrametria. Geodésia. Geotecnologias. Processo erosivo. Sistemas de Informação Geográfica.

ABSTRACT

Geotechnologies are essential tools in environmental studies, presenting several potentialities, whether in data acquisition, processing and decision making based on the results obtained. The integration of geotechnologies can present several potentialities in the analysis of soil degradation processes such as erosion. Water erosion is one of the main types of soil degradation in Brazil, being an area of important relevance in ensuring soil preservation. The objective of this work was to present the potential of geotechnology applications in the diagnosis and monitoring of erosive processes through a case study in a gully located in Uberlândia-MG. The geotechnologies used were: aerial photogrammetry, geodesy, georeferencing and GIS. The procedure was based on imaging with drones with the support of control points using GNSS receivers, succeeding with an analysis in a geoprocessing tools, QGis and ArcGis. The processing of the GNSS control points in the GNSS *Solutions*™ and IBGE-PPP *online* tools allowed a comparison to be made, confirming that the IBGE-PPP, due to its absolute processing, requires more tracking time to obtain precise coordinates, differently from GNSS *Solutions*™, which works with relative processing and obtained geodetic coordinates with centimeter accuracy in short baselines processing. The processing of the orthomosaic and the digital surface model of the photogrammetric survey with UAV presented parameters such as average GSD and planimetric RMS compatible with high quality products, indicating a high degree of representation of the terrain with good image quality, with the use of drones being one advantage in environmental studies in smaller areas. The photogrammetric products underwent an analysis of accuracy and tendency to fit in the PEC-PCD of the Sistema Cartográfico Nacional (SCN), being accepted in all scales, including the largest one, the scale of 1: 1000. The orthomosaic and the MDS allowed to infer aspects such as the area of contribution of the gullet, mapping the use and occupation of the soil, mapping hypsometric, mapping the slope as well as identifying the physiognomy of the erosive process, demonstrating that the joint application of geotechnologies has great applicability in the diagnosis and monitoring of erosion processes.

Keywords: Erosive process. Geodesy. Geographic Information Systems. Geotechnologies. Photogrammetry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa global de erosividade devido às chuvas	17
Figura 2 – Fotografia aproximada do efeito <i>splash</i>	22
Figura 3 – Sequência evolutiva do processo de erosão hídrica	23
Figura 4 – Erosão em sulcos em campo extremamente cultivado na Alemanha	24
Figura 5 – Evolução de ravinas em São Francisco de Assis-RS	24
Figura 6 – Voçoroca no município de Coxim-MS	25
Figura 7 – Ilustração da ocorrência de multicaminho	30
Figura 8 – Exemplificação do posicionamento absoluto.....	31
Figura 9 – Geometria dos satélites e diluição da precisão posicional (PDOP)	32
Figura 10 – Exemplificação de posicionamento relativo	32
Figura 11 – Esquema ilustrativo de funcionamento do IBGE-PPP	34
Figura 12 – Linhas de voo e sobreposição no levantamento aerofotogramétrico	37
Figura 13 – Mapa de localização da área de estudo	41
Figura 14 – Climograma da cidade de Uberlândia-MG, série histórica de 1981 a 2015	42
Figura 15 – Pastagem em recuperação (a) e mata ciliar ao fundo da vertente (b).....	43
Figura 16 – Feições fotoidentificáveis selecionadas para o levantamento GNSS.....	44
Figura 17 – Conjunto receptor de sinal GNSS	46
Figura 18 – Vista de levantamento no processamento do ponto PBC	49
Figura 19 – Processamento das linhas de base, eventuais ajustes e geração de relatório	50
Figura 20 – Vista horária do levantamento dos pontos PBC, P1, P2 e P3	51
Figura 21 – Vista de levantamento do processamento dos pontos P1, P2 e P3	51
Figura 22 – Vista horária do levantamento do ponto P4	52
Figura 23 – <i>Layout</i> da ferramenta IBGE-PPP <i>online</i>	53
Figura 24 – Modelo de VANT multirrotor <i>Phantom4 Pro</i>	54
Figura 25 – Planejamento de voo na ferramenta <i>Drone Deploy</i>	54
Figura 26 – Demarcação dos pontos de controle com cal hidratada	55
Figura 27 – Receptores GNSS posicionados nos pontos P3 (a) e P4 (b)	65
Figura 28 – Discrepância dos valores de altitude geométrica dos processamentos GNSS	65
Figura 29 – Ortomosaico (a) e nuvem de pontos (b).....	71
Figura 30 – Sobreposição de imagens por pixel no processamento do ortomosaico	73
Figura 31 – Mapa da bacia de contribuição da voçoroca do Glória, Uberlândia-MG	79
Figura 32 – Vista aérea aproximada da voçoroca do Glória, Uberlândia-MG.....	81

Figura 33 – Vista aproximada da cabeceira da voçoroca do Glória, Uberlândia-MG	82
Figura 34 – Vista aproximada das ramificações da voçoroca do Glória, Uberlândia-MG	83
Figura 35 – Mapa de uso e ocupação do solo na área de estudo	85
Figura 36 – Mapa de declividade da área de estudo.....	87
Figura 37 – Paredes verticais no canal principal (a) e nas ramificações (b) da voçoroca	88
Figura 38 – Representação hipsométrica da nuvem de pontos 3D.....	89
Figura 39 – Projeção do ortomosaico sobre a nuvem de pontos	89
Figura 40 – Mapa hipsométrico da área de estudo	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Agentes e tipos de erosão	21
Quadro 2 – Erros das observáveis GNSS em função de sua fonte	29
Quadro 3 – Padrão de exatidão cartográfica planimétrica dos Produtos Cartográficos Digitais	39
Quadro 4 – Padrão de exatidão cartográfica altimétrica dos Produtos Cartográficos Digitais ...	40
Quadro 5 – Comparativo de vantagens e desvantagens dos <i>softwares</i> de pós-processamento	69
Quadro 6 – Sumário de processamento dos produtos fotogramétricos	71
Quadro 7 – Verificação interna da qualidade do processamento na ferramenta Pix4D	72
Quadro 8 – Opções de processamento e resultado da densificação da nuvem de pontos	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização das voçorocas quanto à profundidade e bacia de contribuição	26
Tabela 2 – GSD recomendado em função da aplicação	38
Tabela 3 – Estimativa de precisão para posicionamento GNSS relativo	45
Tabela 4 – Coordenadas geodésicas pós-processadas no IBGE-PPP e desvios-padrão.....	63
Tabela 5 – Coordenadas UTM pós-processadas no IBGE-PPP e desvios-padrão	63
Tabela 6 – Coordenadas geodésicas pós-processadas no GNSS <i>Solutions</i> TM e desvios-padrão .	64
Tabela 7 – Coordenadas UTM pós-processadas no GNSS <i>Solutions</i> TM e desvios-padrão	64
Tabela 8 – Discrepância posicional nos três eixos de coordenadas	75
Tabela 9 – Resultados das análises de tendência.....	76
Tabela 10 – Enquadramento do ortomosaico frente aos valores de referência do PEC-PCD..	77
Tabela 11 – Enquadramento da nuvem de pontos frente à PEC-PCD	78
Tabela 12 – Distribuição do uso e ocupação do solo na área de estudo.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA – Acurácia Posicional Absoluta

ASPRS – *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*

BDS – *BeiDou Navigation Satellite System*

CAR – Cadastro Ambiental Rural

CSRS-PPP – *GPS Precise Point Positioning*

DGPS – *Differential Global Positioning System*

DOP – Diluição da precisão

EGB – Espaço Geográfico Brasileiro

EP – Erro Padrão

ET-ADGV – Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais

GALILEO – Sistema de Navegação por Satélite Europeu

GLONASS – *Global Orbiting Navigation Satellite System*

GNSS – Sistema de Navegação Global por Satélite

GPS – Sistema de Posicionamento Global

GSD – *Ground Sample Distance*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ITRR – *International Terrestrial Reference Frame*

LabTOPO – Laboratório de Topografia

LIDAR – *Light Detection and Ranging*

MDS – Modelo Digital de Superfície

MDT – Modelo Digital de Terreno

MGUB – Estação de referência da RBMC em Uberlândia

NAVSTAR-GPS – *Navigation Satellite with Time and Ranging - Global Positioning System*

NBR – Norma Técnica

NRCan – *Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada*

PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica

PEC-PCD – Padrão de Exatidão Cartográfica de Produtos de Cartografia Digital

PD – Pseudodistância

PDOP – Diluição da precisão posicional

PPP – Posicionamento por Ponto Preciso

RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

RINEX – *ReceiverIndependent Exchange Format*

RMS – Erro Quadrático Médio

RTK – *Real Time Kinematic*

SCA – Sistema de Controle Ativo

SCN – Sistema Cartográfico Nacional

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SIRGAS2000 – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas em 2000.4

VANT – Veículos Aéreos Não Tripulados

VDOP – Diluição da precisão vertical

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. JUSTIFICATIVA	17
1.2. OBJETIVO GERAL	18
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. PROCESSOS EROSIVOS	19
2.1.1. PRINCIPAIS TIPOS DE EROSÃO	20
2.1.2. EROSÃO HÍDRICA E FATORES QUE INFLUEM	21
2.1.3. FORMAS DE EROSÃO HÍDRICA	22
2.1.3.1. Voçorocas	25
2.2. POSICIONAMENTO GNSS.....	27
2.2.1. OBSERVÁVEIS GNSS: CARACTERÍSTICAS E ERROS SISTEMÁTICOS.....	28
2.2.2. MÉTODOS DE POSICIONAMENTO	30
2.2.2.1. Posicionamento absoluto	31
2.2.2.2. Posicionamento relativo	32
2.2.3. SERVIÇOS DE PROCESSAMENTO.....	33
2.3. FOTOGRAMETRIA	34
2.3.1. FOTOGRAMETRIA AÉREA.....	35
2.3.1.1. Cobrimento aerofotogramétrico com VANT	36
2.3.1.2. Processamento de imagens aéreas	38
2.3.2. QUALIDADE POSICIONAL DA “GEOMETRIA DAS FEIÇÕES”	39
3. METODOLOGIA	41
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	41
3.1.1. CLIMA	41
3.1.2. GEOMORFOLOGIA, USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	42
3.2. PLANEJAMENTO DE LEVANTAMENTO GNSS.....	43
3.3. LEVANTAMENTO GNSS	46
3.4. PROCESSAMENTO DOS PONTOS DE APOIO FOTOGRAMÉTRICO.....	48
3.4.1. PROCESSAMENTO NA FERRAMENTA GNSS Solutions™	48
3.4.2. PROCESSAMENTO NA FERRAMENTA IBGE-PPP online	52

3.5.	OBTENÇÃO DE PRODUTOS E SUBPRODUTOS FOTOGRAFÉTICOS.....	53
3.6.	ANÁLISE DE TENDÊNCIA E ACURÁCIA	56
3.7.	PRODUÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS.....	58
3.7.1.	<i>MAPA DA BACIA DE CONTRIBUIÇÃO</i>	59
3.7.2.	<i>MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO</i>	59
3.7.3.	<i>MAPA DE DECLIVIDADE</i>	60
3.7.4.	<i>MAPA ALTIMÉTRICO</i>	61
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1.	COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO PÓS-PROCESSADAS.....	63
4.2.	PRODUTOS FOTOGRAFÉTICOS GERADOS	70
4.3.	ANÁLISE DE TENDÊNCIA E ACURÁCIA	75
4.4.	SUBPRODUTOS GERADOS: MAPEAMENTOS E ANÁLISES.....	78
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
	REFERÊNCIAS	97

1. INTRODUÇÃO

A vida na terra é regida graças à relação dos componentes bióticos e abióticos, que formam a biosfera. Nesta esfera, a matéria e a energia transitam em um fluxo dinâmico sob condições de equilíbrio. Porém as ações humanas alteram tais condições de equilíbrio, alterando as paisagens. Todo esse processo de desequilíbrio acarreta no processo de degradação das paisagens, devido à ultrapassagem dos limites de alteração suportável causadas pelas atividades humanas (PEREIRA JUNIOR, 2013).

As diversas componentes ambientais são passíveis de degradação devido à ação antrópica, seja o ar, a água, o solo, a flora, a fauna ou qualquer outra. A degradação pode ser apenas em uma componente ou simplesmente agir em conjunto, acarretando na degradação ecossistêmica.

O processo de degradação de uma área ocorre quando a vegetação e/ou a fauna forem removidas, destruídas ou expulsas; a camada fértil de solo perdida; e/ou a qualidade e regime de vazão do sistema hídrico forem alterados. Dessa forma, na ocorrência de perda de adaptação às características físicas, químicas e biológicas inviabilizando o desenvolvimento socioeconômico se conclui que há um processo de degradação ambiental (BRASIL; IBAMA, 1990).

O solo é um dos componentes abióticos que compõem a biosfera, sendo um dos responsáveis por propiciar a vida no planeta. Sua importância está associada principalmente aos seres vivos e aos fluxos de matéria e energia. O solo funciona como hábitat para diversas espécies de seres vivos, englobando bactérias, protistas, fungos, plantas e animais, estando envolvido também com a ciclagem de matéria nos ecossistemas, influenciando assim nos ciclos biogeoquímicos, destacando os ciclos da água e do carbono (CAPECHE, 2008; GIFFONI, 2010; GUERRA, 2007; LEPSCH, 2010).

Sob o contexto das humanidades, o solo também apresenta importância, servindo de base para todos os tipos de construções, sejam casas ou arranha-céus, servindo também para a criação de animais sob domínio de pastagem e principalmente para as atividades agrícolas que fornecem alimento a toda população do planeta (GIFFONI, 2010; LEPSCH, 2010).

O solo é um recurso vital para a humanidade, porém, tal importância por vezes é ignorada e/ou incompreendida, levando a processos de degradação, sendo que a degradação de suas condições é muito séria, não sendo facilmente reversível, pois os processos de formação e regeneração dos solos são muito lentos (ARAÚJO; ALMEIDA; GUERRA, 2017).

A degradação ocorre quando as atividades humanas alteram a paisagem, começando pela retirada da cobertura vegetal, que poderá desencadear a degradação ambiental de diversas formas como a lixiviação, acidificação, salinização, desertificação, poluição, degradação física e erosão dos solos (LEPSCH, 2010).

A degradação dos solos se apresenta sob diversas formas, sendo que a mais conhecida é a erosão do solo. Aproximadamente 2/3 dessa erosão é causada pelo escoamento superficial da água da chuva que acaba lavando o solo; e o outro 1/3 é causado pela erosão eólica (WORLD RESOURCES INSTITUTE, 1992).

Em contraparte à ocorrência desses processos de degradação ambiental e sob uma visão de gestão ambiental do território, o Estado necessita ter conhecimento de suas potencialidades e fragilidades quanto ao meio ambiente, sendo que o levantamento de informações socioambientais implica em maior conhecimento desses aspectos, se tornando imprescindíveis o monitoramento e o diagnóstico dos recursos ambientais (SILVA, 2016).

De acordo com Sánchez (2015), o monitoramento ambiental e o diagnóstico ambiental são ferramentas do processo de avaliação ambiental.

O monitoramento ambiental é importante na administração de recursos naturais, oferecendo conhecimento e informações básicas para ter compreensão dos sistemas ambientais através de uma coleta periódica e sistemática de dados, que por fim dá suporte às políticas voltadas ao meio ambiente (NEVES, 2006; SÁNCHEZ, 2015).

Já a finalidade básica de um diagnóstico ambiental é a identificação do quadro físico, biótico e antrópico de uma região, no momento presente, através de seus fatores ambientais constituintes, de modo a evidenciar o comportamento e as funcionalidades dos ecossistemas (MACEDO, 1995; SÁNCHEZ, 2015).

A necessidade de compreender o processo de ocupação e uso dos espaços propiciou o surgimento de métodos de caracterização da superfície terrestre. A evolução desses métodos acompanhou o desenvolvimento tecnológico, principalmente dos equipamentos de coleta e produção de dados (BORGES *et al*, 2017).

E sob domínio de uma era de modernidades, as geotecnologias se mostram promissoras para o monitoramento e diagnóstico ambiental. Essas ferramentas tornam possível o trabalho com dados espaciais, facilitando dessa forma a tomada de decisões ou análise de dados geográficos, dentre eles a ocorrência de processos erosivos e seu desenvolvimento ao longo do tempo.

A obtenção de dados topográficos é primordial para análise de processos erosivos, existindo diversas tecnologias para sua obtenção, sendo elas: levantamento no local; uso de

LIDAR (*Light Detection and Ranging*); aerofotogrametria e uso de satélites (TSCHIEDEL, 2018).

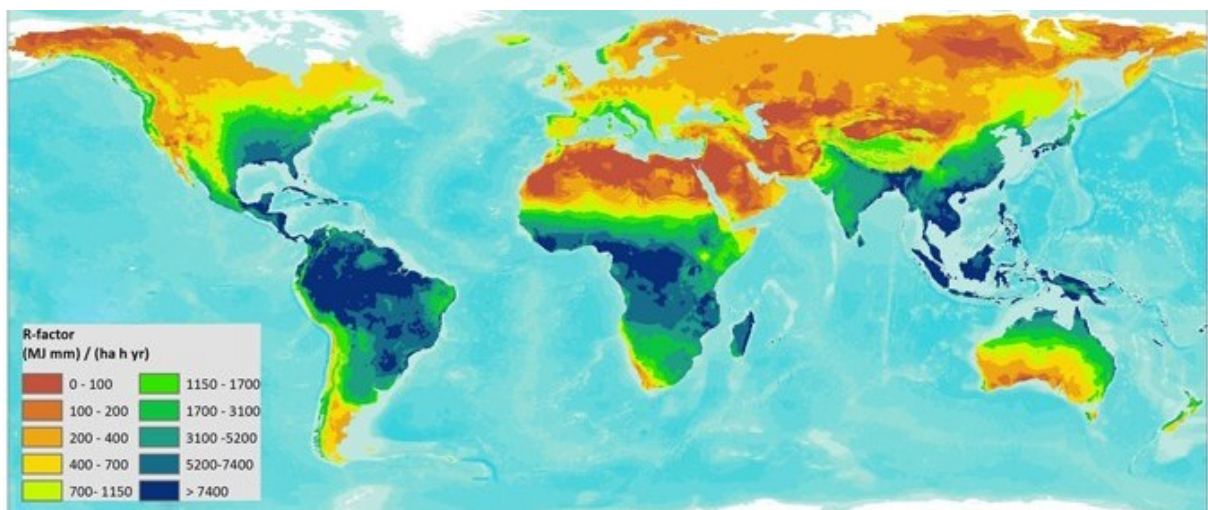
Os dados geográficos coletados para aplicação nessas ferramentas devem ter fidelidade ao seu contexto real, sendo necessário um bom entendimento do problema em estudo, garantindo que os resultados sejam mais expressivos.

Com dados de boa qualidade a sinergia entre as geotecnologias possibilita a integração destes permitindo reproduzir feições e fenômenos terrestres, possibilitando, por meio de análises, a interpretação de resultados direcionados a um objetivo específico (MENDONÇA *et al*, 2011).

1.1. JUSTIFICATIVA

O processo erosivo tem enorme impacto, acarretando na perda de solo, afetando sua capacidade produtiva. A erosão além da perda de solo, também influencia nos corpos hídricos, provocando assoreamento, afetando todo o ecossistema aquático, podendo levar a mortandade de peixes. O Brasil, como país tropical, apresenta um dos maiores riscos de erosão causados pela chuva no mundo, devendo, dessa forma, ser dada atenção a tal assunto (FIGURA 1).

Figura 1 – Mapa global de erosividade devido às chuvas



Fonte: Panagos *et al.* (2017).

Neste contexto, esta pesquisa se justifica devido à grande importância dos solos no equilíbrio ecossistêmico, sendo necessário monitoramento constante dessa componente,

avaliando a ocorrência de processos de degradação para proposição de medidas que visem sua preservação.

E sob o contexto dos processos erosivos, as geotecnologias, quando aplicadas conjuntamente podem demonstrar alta potencialidade no monitoramento desses eventos, visando obtenção de informações precisas para a análise ambiental e tomadas de decisões.

1.2. OBJETIVO GERAL

O referente trabalho teve como objetivo geral demonstrar as potencialidades da aplicação de geotecnologias visando o diagnóstico e monitoramento ambiental de processos erosivos.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo principal desta pesquisa, citam-se os seguintes objetivos específicos:

- Levantar bibliografia referente ao tema de estudo;
- Definir e reconhecer a área de estudo;
- Planejar e realizar o levantamento GNSS;
- Processar os dados GNSS em diferentes plataformas (*softwares*);
- Obter as coordenadas pós-processadas e avaliar precisões;
- Realizar um levantamento aerofotogramétrico da área de estudo;
- Obter os produtos fotogramétricos;
- Analisar estatisticamente os resultados dos produtos fotogramétricos;
- Gerar mapas e avaliar as condições ambientais da área de estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Devido à amplitude da temática de estudo neste trabalho, esta seção é subdividida, trazendo uma revisão bibliográfica referente aos assuntos: processos erosivos com ênfase na erosão hídrica, posicionamento GNSS e fotogrametria.

2.1. PROCESSOS EROSIVOS

Embora a superfície terrestre aparente ser estática, ela encontra-se em contínua transformação, apresentando uma natureza dinâmica. Dessa forma, as feições do relevo atual já passaram e ainda continuam passando por intensas modificações. Dentre os agentes modificadores do relevo, a erosão é o principal, atuando sob diversas formas (PEREIRA JUNIOR, 2013).

De acordo a NBR 6.502 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a erosão se define como a desagregação e remoção do solo ou de fragmentos e partículas de rochas pela ação única ou combinada de fatores físicos, químicos e/ou biológicos (ABNT, 1995).

Para Rocha (2007) os processos erosivos se dividem sob duas formas, sendo eles a erosão geológica caracterizada por ser um processo natural e a erosão acelerada provocada principalmente pela ação humana.

A erosão geológica – ou erosão natural – é caracterizada pelo processo de deslocamento, transporte e depósito contínuo das partículas do solo pela ação dos rios (erosão fluvial), ventos (erosão eólica), geleiras (erosão glacial) e enxurrada das chuvas (erosão pluvial), sendo responsável pelo surgimento das variadas formas de relevo como os vales e as planícies.

Por ser uma manifestação normal dos processos de modificação do relevo, a erosão geológica é reconhecida somente com o decorrer de longos períodos de atividade. A lenta remoção e a contínua formação da vegetação que cobre e protege o solo, torna possível que o desgaste erosivo seja equilibrado pelo contínuo processo de renovação do solo, sendo que todo esse processo é benéfico e responsável em sustentar a vida na terra por milhões de anos (BERTONI, LOMBARDI NETO, 2014; LEPSCH, 2010).

Além da erosão geológica têm-se a erosão acelerada. De acordo com Guerra (1993) a erosão acelerada é aquela que se forma rapidamente devido alterações do equilíbrio natural, sendo causadas principalmente pelas intervenções humanas como o desmatamento, a agricultura, cortes de terreno, etc.

Para Bertoni e Lombardi Neto (2014), o ser humano, ao explorar o solo, acaba removendo a vegetação que o protege e, dessa forma, o processo erosivo adquire velocidade e intensidade. Esse mau uso do solo acarreta em um desequilíbrio em que o desgaste dos solos se acelera progressivamente, enquanto a formação de novos solos ocorre em lentidão.

Segundo Alves (2007) são diversos os impactos causados pelos processos erosivos, sendo eles a perda de solos agricultáveis, assoreamento de corpos d'água, aumento da turbidez da água alterando fauna e flora dos ecossistemas aquáticos, além de outros que acabam afetando as esferas econômica, social e ambiental.

2.1.1. PRINCIPAIS TIPOS DE EROSÃO

Segundo Araujo (2011) a erosão é um processo observável em todo o planeta, sendo que ela pode surgir de formas diferentes, de acordo as condições dos diversos tipos de ambientes no planeta.

De acordo com Araujo *et al.* (2013) existe vários tipos de erosão, que são causados por diferentes agentes unicamente ou em combinação uns com os outros (QUADRO 1).

Para Oliveira, Santos e Araujo (2018), mesmo tendo uma atuação específica, a ação dos agentes erosivos sempre resulta na erosão. Mesmo ocorrendo simultaneamente, alguns agentes têm maior peso no processo erosivo. O autor destaca que é necessário compreender os mecanismos de ação desses agentes para tomar decisões adequadas e eficazes para a situação analisada.

A erosão hídrica é a forma erosiva mais comum no Brasil e nas regiões tropicais (ARAUJO *et al.*, 2013; CRUZ, 2012; GUERRA, 2007; PANAGOS *et al.*, 2017; SILVA, 2014), sendo dada maior ênfase neste tipo de erosão nesta publicação.

Quadro 1 – Agentes e tipos de erosão

Agente	Tipo de erosão ou processo de degradação
Água	<ol style="list-style-type: none"> 1. Efeito <i>splash</i> 2. Erosão laminar 3. Ravinamentos 4. Voçorocas 5. Erosão do canal fluvial 6. Ação em ondas 7. Dutos e solapamentos
Gelo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fluxo de sólidos (<i>solifluction</i>) 2. Erosão glacial 3. Arrancamento do gelo
Vento	A erosão eólica não pode ser subclassificada em “tipos”; ela varia principalmente por “grau”
Gravidade	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rastejamento 2. Fluxo de terra 3. Avalanches 4. Deslizamentos de terra

Fonte: Adaptada de Araujo *et al.* (2013).

2.1.2. EROSÃO HÍDRICA E FATORES QUE INFLUEM

Segundo Brito (2012) a erosão hídrica tem a água como agente erosivo. Para o autor, o ciclo hidrológico é determinante para o processo erosivo, já que uma de suas fases, o escoamento superficial, está relacionada à erosão.

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2014), a erosão é causada por forças ativas, representadas pelas chuvas, declividade, comprimento do declive do terreno e capacidade de infiltração do solo; e em forças passivas como a resistência do solo à ação erosiva e a densidade da cobertura vegetal.

Segundo Biulchi (2012), a chuva, a cobertura vegetal, o relevo, a natureza do solo e a interferência antrópica são os principais fatores que influenciam na dinâmica dos processos erosivos.

2.1.3. FORMAS DE EROSÃO HÍDRICA

Segundo Araujo *et al.* (2013), a erosão hídrica apresenta diversas formas, iniciando com a erosão causada pelo efeito *splash*, podendo progredir ao longo do processo erosivo até a formação de voçorocas e por fim causando erosão de canais fluviais.

A primeira forma erosiva é a erosão causada pelo impacto da chuva. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2014), tal processo ocasiona o rompimento dos agregados do solo, desprendendo e transportando as partículas mais finas, além de ocasionar uma compactação superficial do solo, reduzindo sua infiltração e aumentando o escoamento superficial (FIGURA 2).

Figura 2 – Fotografia aproximada do efeito *splash*

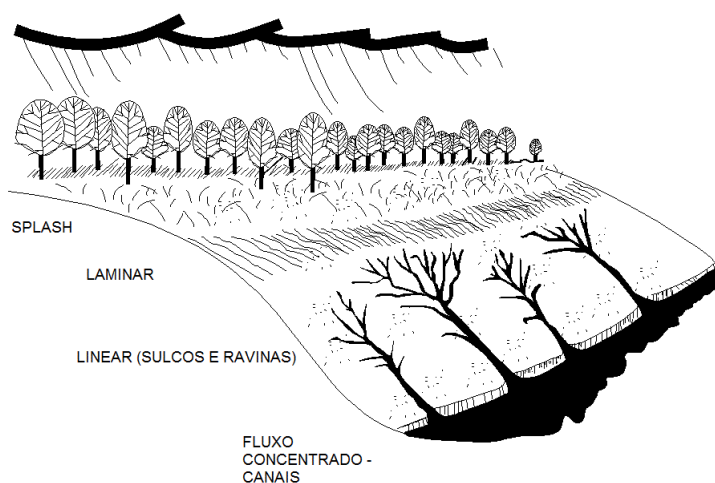


Fonte: Favis-Mortlock (1995).

Para Rocha (2007), de acordo com a forma que ocorre o escoamento superficial, a erosão poderá ser laminar ou linear. Se o escoamento for difuso têm-se a erosão laminar, porém se ocorrer à concentração de fluxo formando incisões no solo, tem-se a erosão linear.

Segundo Camapum *et al.* (2006), o processo erosivo tem uma sequência evolutiva, iniciando com a erosão laminar, os sulcos, as ravinas até surgir o estágio de voçoroca (FIGURA 3).

Figura 3 – Sequência evolutiva do processo de erosão hídrica



Fonte: Adaptado de United Nations Environment Programme (1994).

A erosão laminar ocorre com o início do escoamento superficial em lençol, apresentando fluxo difuso (GUERRA, 2007). Esse tipo de erosão é caracterizado pela remoção uniforme de uma fina camada superficial de solo (LEPSCH, 2010), sendo a forma erosiva menos notada e a mais perigosa (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2014).

De acordo com Guerra (2007), após o escoamento em lençol, tem-se o escoamento linear, caracterizado pela concentração do fluxo de água formando canais, sejam sob a forma de sulcos, ravinas ou voçorocas.

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2014), os sulcos resultam de irregularidades do terreno, fazendo a enxurrada se concentrar em alguns pontos, propiciando aumento do volume e da velocidade que passam a ser suficientes para formar canais mais ou menos profundos (FIGURA 4).

Para Camapum *et al.* (2006), os sulcos são caracterizados como pequenos canais de no máximo 10 cm de profundidade gerados pela concentração do fluxo da água. Para Araujo (2011) os sulcos são como cortes no solo, com largura e profundidade menor que 0,5 m.

Quando estão surgindo, os sulcos se dão de forma distribuída, sem grandes concentrações de água. Ao aumentar a concentração de água, os sulcos evoluem para ravinas ou voçorocas (CAMAPUM *et al.*, 2006).

Figura 4 – Erosão em sulcos em campo extremamente cultivado na Alemanha



Fonte: Helming (1994).

Segundo Araujo *et al.* (2013), o ravinamento é caracterizado na formação de canais bem definidos, com concentração de fluxo sobre o solo (FIGURA 5)

Figura 5 – Evolução de ravinas em São Francisco de Assis-RS



Fonte: Pena [201-?].

Araujo (2011) define as ravinas como processos mais intensos que os sulcos, atingindo dimensões superiores a 50 cm. Tal feição ocorre quando o fluxo da água se concentra em um canal preferencial, cuja seção transversal se assemelha a um V e não apresenta vegetação densa. Para Guerra (2007), quando as ravinas já estão estabelecidas na encosta, elas tendem a evoluir através de bifurcações em pontos de ruptura ocasionando as voçorocas.

Lepsch (2010) define as voçorocas como a forma mais espetacular do processo erosivo, parecendo rasgos na encosta podendo atingir vários metros e com paredes quase verticais.

Oliveira (2007) define as voçorocas quanto suas dimensões, sendo incisões do solo com largura e profundidade maiores que 50 cm.

Por se tratar de uma feição erosiva de maior complexidade e ser o tipo de feição abordada nesta publicação, às voçorocas foram discutidas em uma seção exclusiva.

2.1.3.1. Voçorocas

Segundo Capeche *et al.* (2008), a voçoroca (FIGURA 6) é o estágio mais avançado do processo erosivo, com poder destrutivo superior as demais feições erosivas. Sua formação ocorre pela passagem gradual da erosão laminar para a erosão em sulcos e ravinas, aumentando seu tamanho, ficando cada vez mais profunda, ou então, se forma a partir de um ponto de elevada concentração de águas sem a devida dissipação de energia.

Figura 6 – Voçoroca no município de Coxim-MS



Fonte: Modificado de Coxim (2017).

Para Capeche *et al.* (2008), o ambiente que rodeia as voçorocas propicia sua ocorrência. Para o autor, áreas com topografia mais inclinada e com baixa cobertura vegetal são propensas ao processo erosivo que forma as voçorocas. Destaca ainda que a profundidade dos solos seja uma característica de grande importância, pois se o solo for pouco desenvolvido, a rocha-matriz a uma pequena profundidade irá impedir a infiltração da água, favorecendo o escoamento superficial, aumentando a susceptibilidade ao processo erosivo.

A profundidade do horizonte C é um aspecto importante no desenvolvimento das voçorocas. A tendência é que as grandes voçorocas se desenvolvem melhor onde há um horizonte C muito profundo e horizonte A+B mais modesto. Ao longo da remoção de partículas, o horizonte C pode se tornar exposto, dessa forma a voçoroca cresce rapidamente devido a remoção das partículas pouco coesas de horizonte (CAPECHE *et al.*, 2008).

Fendrich (1997) afirma que a voçoroca é um estado avançado da erosão em canais, ocorrendo devido à ação do homem no meio ambiente, processando em quatro estágios:

- I. Erosão do canal onde há o escoamento acelerado, que ocorre de forma lenta e em função da resistência do solo;
- II. Aumento rápido em profundidade e largura, ocorrendo carreamento do material dando origem a cabeceira que se desenvolve rumo a montante;
- III. Declínio do aumento da voçoroca devido ao início do crescimento vegetal;
- IV. Estabilização da voçoroca, com seu canal em perfil de equilíbrio, com paredes estáveis e vegetação se desenvolvendo segurando o solo.

Capeche *et al.* (2008), caracteriza as voçorocas quanto a profundidade e extensão da bacia de contribuição (TABELA 1):

Tabela 1 – Caracterização das voçorocas quanto à profundidade e bacia de contribuição

	Quanto à profundidade (m)	Quanto à bacia de contribuição (ha)
Voçoroca pequena	< 2,5 m	< 10 há
Voçoroca média	2,5 - 4,5 m	10 – 50 há
Voçoroca grande	> 4,5 m	> 50 há

Fonte: Adaptado de Capeche *et al.* (2008).

Segundo Capeche *et al.* (2008), a presença de lençol freático no caminho da voçoroca favorece minações, causando a erosão interna. A água avança no interior do solo formando espaços vazios, que levam ao colapso do terreno, causando desabamento que aumenta a voçoroca ou cria novos ramos.

Para Camapum *et al.* (2006), a voçoroca é o estágio mais avançado da erosão, atuando separado ou conjuntamente vários processos como erosão superficial, erosão interna, solapamentos, desabamentos, escorregamento de taludes e quedas de blocos. Todos esses processos se conjugam tornando esse estágio da erosão, bastante complexo e com alto poder destrutivo; sendo de difícil controle e com elevado custo de recuperação.

De acordo com Capeche *et al.* (2008), as voçorocas provocam grandes perdas de solo, causando problemas sociais, econômicos e ambientais. Nisso é necessário o empenho nos estudos e desenvolvimento de tecnologias que visam minimizar ou eliminar tal processo.

2.2. POSICIONAMENTO GNSS

A necessidade de se deslocar no espaço culminou com o início da era da radionavegação, que se baseava em transmissões de frequências de rádio localizadas em posições estratégicas e conhecidas. A necessidade de melhoria nos resultados de posicionamento permitiu estudos que reduziram ao mínimo as interferências e os erros de propagação (FONTANA, 2002).

O marco desse desenvolvimento foi o surgimento do Sistema de Posicionamento Global (GPS), que engloba o Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS).

Groves (2013) define o GNSS como um termo coletivo referente aos sistemas de navegação, que fornecem aos seus usuários um posicionamento tridimensional (latitude, longitude e altitude), usando sinais de rádio transmitidos por satélites em órbita. O sistema é baseado em autoposicionamento, onde a posição desejada é calculada através de um receptor que não transmite nenhum sinal para fins de posicionamento.

Diversos sistemas fornecem cobertura global, sendo que o mais conhecido é o *Navigation Satellite with Time and Ranging - Global Positioning System* (NAVSTAR-GPS) operado pelo governo dos Estados Unidos da América, sendo conhecido simplesmente por GPS. Além do sistema norte-americano existe o *Global Orbiting Navigation Satellite System* (GLONASS) desenvolvido pela antiga União Soviética e operado atualmente pela Federação Russa, o GALILEO desenvolvido pela Agência Espacial Europeia e o *BeiDou Navigation Satellite System* (BDS) desenvolvido pela China (GROVES, 2013).

Segundo Fontana (2002), os sistemas de posicionamento são subdivididos em três segmentos: o segmento espacial formado pelos satélites; o segmento de controle formado pelas estações de solo que supervisionam e controlam os satélites e seus planos de órbitas; e o segmento de usuário no qual estão inclusos os receptores.

O princípio de localização por satélite está baseado no conceito distância-velocidade-tempo. O sistema opera sob modo bidimensional (latitude e longitude) com no mínimo três satélites, sem determinação da altitude. Quando um receptor recebe sinal de no mínimo quatro satélites, o mesmo passa a operar sob modo tridimensional, podendo, assim, determinar a altitude do ponto e trabalhar de forma mais precisa (FONTANA, 2002).

2.2.1. OBSERVÁVEIS GNSS: CARACTERÍSTICAS E ERROS SISTEMÁTICOS

O GNSS apresenta observáveis básicas que permitem determinar posição, velocidade e tempo (MONICO, 2008; SEEBER, 2003), sendo elas:

- pseudodistância a partir do código; e
- fase da onda portadora ou diferença de fase da onda portadora.

A medição da distância entre o satélite e a antena do receptor é baseada nos códigos gerados nos satélites e receptores. Os receptores geram uma réplica do código produzido no satélite. O retardo da chegada de uma transmissão do código, gerado no satélite, e a sua réplica gerada no receptor, é definido como o tempo de propagação do sinal no trajeto do satélite ao receptor (MUGUIO, 2012).

A pseudodistância (PD) é determinada pela diferença entre o tempo registrado no receptor (t_r) no instante de recepção do sinal e o tempo registrado no satélite (t^s), no instante da transmissão do sinal, multiplicado pela velocidade da luz no vácuo (MONICO, 2008). Esta distância, determinada de forma simples, não é propriamente a distância geométrica (ρ_{rs}) entre a antena do receptor e a do satélite, devido aos erros de relógios, à refração atmosférica, dos efeitos de multicaminho, além de outros. Dessa forma é necessário considerar tais observações na correção dessas interferências para obtenção da distância de forma correta (SEGANTINE, 2001). A pseudodistância é determinada conforme a equação 1.

$$\text{(Eq. 1):} \quad PD_R^S = \rho_r^S + c[dt_r - dt^s] + I_r^S + T_r^S + dm_r^S + \varepsilon_{PD_r^S}$$

Onde:

- PD_R^S = pseudodistância;
- ρ_r^S = distância geométrica entre o satélite e a antena do receptor;
- c = velocidade da luz no vácuo;
- dt_r e dt^s = contribuição dos ruídos gerados internamente no receptor e no satélite respectivamente;
- I_r^S e T_r^S = componentes da atmosfera (ionosfera e troposfera);
- dm_r^S = efeitos do multicaminho dos códigos
- $\varepsilon_{PD_r^S}$ = contribuição dos ruídos aleatórios nas medições ou erro da medida da pseudodistância.

Além da pseudodistância, tem-se a fase da onda portadora, que é uma observável muito mais precisa que a anterior, sendo utilizada na maioria das atividades envolvendo a geodésia. Essa observável é a fase de batimento da onda portadora. A fase da onda portadora (Φ_r) é dada pela diferença entre a fase do sinal do satélite, recebido no receptor (Φ_s), e a fase do sinal gerado no receptor (Φ_r), ambas no instante de recepção (t_r) (MONICO, 2008).

As observáveis GNSS estão sujeitas a erros, sejam eles aleatórios, grosseiros ou sistemáticos (MONICO, 2008). Dessa forma, as fontes de erros envolvidas nos processos de medição devem ser bem conhecidas, já que a precisão do posicionamento depende da minimização ou eliminação de erros e ruídos que afetam as medidas (HUINCA, 2009). Os diversos erros podem ser agrupados segundo suas possíveis fontes (QUADRO 2).

Quadro 2 – Erros das observáveis GNSS em função de sua fonte

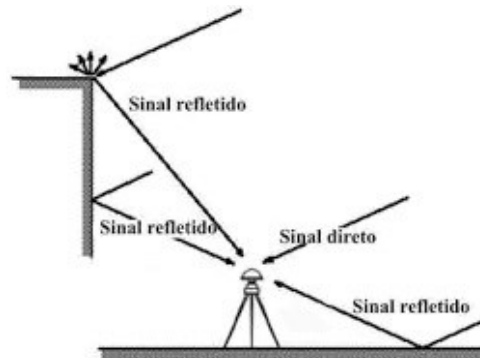
Fontes	Erros
Satélite	Erro da órbita e do relógio Relatividade Atraso entre as duas portadoras no <i>hardware</i> do satélite Centro de fase da antena do satélite Fase <i>wind-up</i>
Propagação do sinal	Refração troposférica e ionosférica Perdas de ciclos Multicaminho ou sinais refletidos Rotação da Terra
Receptor/Antena	Erro do relógio Erro entre os canais Centro de fase da antena do receptor Atraso entre duas portadoras do <i>hardware</i> do receptor Fase <i>wind-up</i>
Estação – (alguns erros são, na realidade, efeitos geodinâmicos que devem ser corrigidos.)	Erro nas coordenadas Multicaminho ou sinais refletidos Marés terrestres e carga oceânica Movimento do polo Pressão da atmosfera

Fonte: Adaptado de Monico (2008).

Monico (2008) frisa que as marés terrestres, cargas dos oceanos e da atmosfera não são necessariamente erros, mas sim variações a serem consideradas no posicionamento de alta precisão. Dentre os tipos de erro, o multicaminho se destaca por estarem associados a duas

fontes. O receptor em determinadas circunstâncias, recebe, além do sinal que chega diretamente à antena, sinais que são refletidos em superfícies vizinhas à antena (FIGURA 7).

Figura 7 – Ilustração da ocorrência de multicaminho



Fonte: Monico (2008).

O sinal que chega ao receptor pode tomar dois caminhos, um direto e um indireto. Devido a isso, os sinais que chegam ao receptor podem apresentar distorções na fase da onda portadora e na modelação sobre ela. Não existe um modelo para tratar o efeito do multicaminho, pois a forma geométrica varia de local, sendo uma forma arbitrária. Assim, as observáveis “fase da onda portadora” e “pseudodistância” são degradadas pelo multicaminho, afetando na qualidade do posicionamento (MONICO, 2008).

2.2.2. MÉTODOS DE POSICIONAMENTO

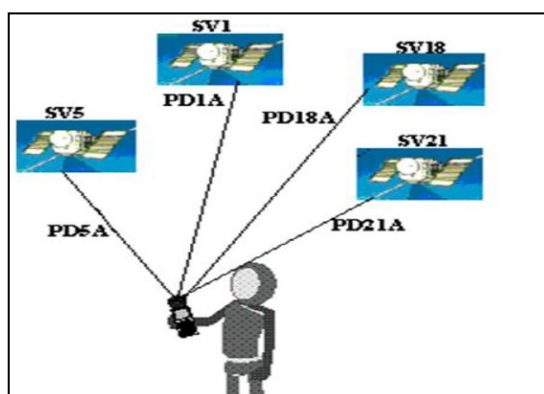
O posicionamento está associado à posição de objetos relativos a um dado referencial. O posicionamento é absoluto quando o referencial é o centro de massa da terra. Se o referencial for um ponto já materializado com coordenadas conhecidas tem-se um posicionamento relativo. Se o objeto a ser posicionado estiver em repouso o posicionamento é estático, porém se o objeto estiver em movimento o posicionamento será cinemático. A tecnologia propiciada pelo GNSS permite a combinação desses tipos de posicionamento (SEGANTINE, 2001).

Além dos tipos de posicionamentos citados, existem o *Real Time Kinematic* (RTK) e o *Differential Global Positioning System* (DGPS), que não foram abordados nesse trabalho.

2.2.2.1. Posicionamento absoluto

O posicionamento é absoluto, quando as coordenadas de um objeto estão associadas ao geocentro. Nesse tipo de posicionamento é necessário apenas um receptor (FIGURA 8) que recebem sinais de pelo menos quatro satélites (SEGANTINE, 2001).

Figura 8 – Exemplificação do posicionamento absoluto



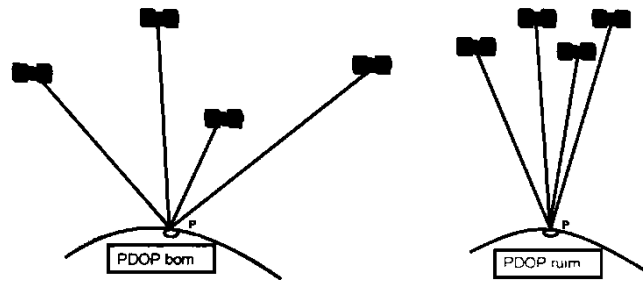
Fonte: Muguio (2012).

De acordo com Monico (2008), o posicionamento por ponto (ou absoluto) pode ser simples ou preciso. O posicionamento por ponto simples é caracterizado pela obtenção da posição de uma estação baseando em observações da observável pseudodistância, derivadas do código civil, fixando-se a órbita e demais parâmetros dos satélites aos valores com base nas mensagens de navegação (efemérides transmitidas).

Quando se utilizam a pseudodistância e a fase da onda portadora coletadas por receptores de simples ou dupla frequência utilizando efemérides precisas tem-se o posicionamento por ponto preciso (PPP). O PPP é aplicável na necessidade de alta acurácia (MONICO, 2008).

Segundo Monico (2008), pode ocorrer diluição da precisão (DOP). O DOP auxilia no resultado da precisão dos resultados que serão obtidos dependendo dessa forma da precisão de observação de pseudodistância e da configuração geométrica dos satélites. No que tange a configuração geométrica dos satélites, o autor afirma que a melhor geometria ocorre quando menores são os valores dos diferentes DOP's (FIGURA 9).

Figura 9 – Geometria dos satélites e diluição da precisão posicional (PDOP)

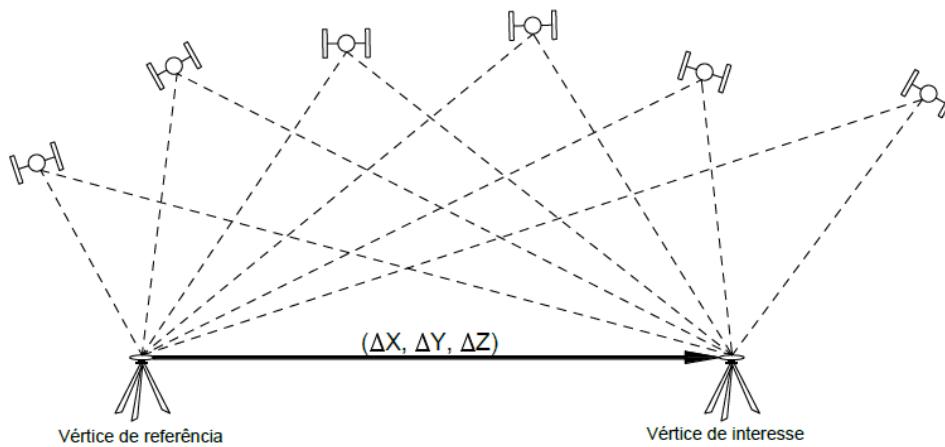


Fonte: Monico (2008).

2.2.2.2. Posicionamento relativo

De acordo o INCRA (2013), no posicionamento relativo, as coordenadas do ponto de interesse são determinadas a partir de um referencial com coordenadas já conhecidas (FIGURA 10).

Figura 10 – Exemplificação de posicionamento relativo



Fonte: INCRA (2013).

Para realizar esse tipo de posicionamento o usuário deve dispor de dois ou mais receptores. Porém com o advento dos Sistemas de Controle Ativos (SCA) o usuário pode dispor de apenas um receptor para realizar o posicionamento, porém deverá acessar os dados de uma ou mais estações pertencentes ao SCA (MONICO, 2008).

No Brasil existe a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), que segundo o IBGE (2017a), é um conjunto de estações geodésicas, equipadas com receptores GNSS de alto desempenho, que proporcionam, ao menos uma vez por dia ou em tempo real, observações para a determinação de coordenadas.

No posicionamento relativo podem ser utilizadas as observáveis: fase da onda portadora, pseudodistância, ou ambas conjuntamente. Como o posicionamento tem diversas possibilidades de se executar, o mesmo é subdividido em posicionamento relativo: estático, estático rápido, semicinemático (*stop and go*) e cinemático.

2.2.3. SERVIÇOS DE PROCESSAMENTO

Excetuando os posicionamentos em tempo real, os dados GNSS devem passar por um pós-processamento para resolução dos vetores de ambiguidades. Assim, os *softwares* de pós-processamento se tornaram importantes ferramentas para a obtenção de coordenadas geodésicas precisas.

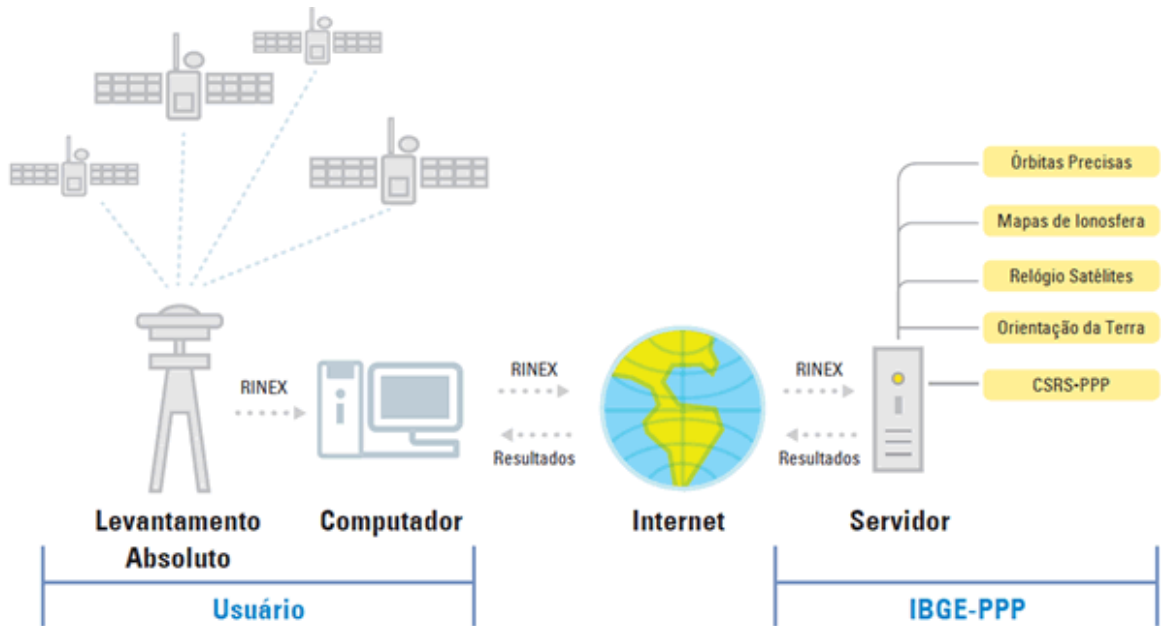
Dentre as diversas ferramentas de pós-processamento de dados GNSS, no Brasil o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) disponibiliza uma gratuita: o IBGE-PPP. O programa realiza o pós-processamento utilizando o programa *GPS Precise Point Positioning* (CSRS-PPP) desenvolvidos pela *Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada* (NRCan).

Segundo o IBGE (2017b), o programa permite a obtenção de coordenadas referenciadas ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000) e ao *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) através de posicionamento preciso para usuários com receptores GPS ou GLONASS.

A metodologia de uso da ferramenta, descrita pelo IBGE [201-], é bem simples (FIGURA 11). Os arquivos de observação devem estar no formato *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX) ou HATANAKA; devendo ser informado o tipo de posicionamento, se estático ou cinemático, o modelo e altura da antena utilizada e um endereço de *e-mail* válido. Os resultados do processamento são disponibilizados através de um *link*.

De acordo o IBGE [201-], a ferramenta IBGE-PPP processa dados GNSS (GPS e GLONASS) coletados por receptores de uma ou duas frequências no modo estático ou cinemático, sendo aceitos apenas dados rastreados a partir do dia 25 de fevereiro de 2005.

Figura 11 – Esquema ilustrativo de funcionamento do IBGE-PPP



Fonte: IBGE [201-].

Além do IBGE-PPP, existem diversos outros *softwares* que realizam o pós-processamento de dados, dentre eles o GNSS *Solutions*TM.

De acordo ao Manual de Referência (SPECTRA PRECISION DIVISION; ASHTECH SAS, 2012?), o GNSS *Solutions*TM é um *software* utilizado no pós-processamento de dados, podendo também realizar o processamento em tempo real. O *software* foi projetado para ajudar em todas as etapas de pesquisas, desde o planejamento até o processamento de dados.

As soluções da ferramenta integram um dos mais rápidos mecanismos de pós-processamento disponíveis, detectando um número superior de erros garantindo um processamento adequado dos dados GNSS.

2.3. FOTOGRAMETRIA

Para Schenk (2005) não existe um consenso sobre a definição do conceito de fotogrametria. Basicamente a fotogrametria é uma ciência que visa à obtenção de informações confiáveis sobre as propriedades da superfície e dos objetos sem a necessidade de contato físico, sendo capaz de medi-los e interpretar as informações requisitadas.

A *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) define a fotogrametria como “a arte, ciência e tecnologia de se obter informações confiáveis de objetos ou meio físico através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens

fotográficas ou padrões de radiação eletromagnética” (AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY, 1980 *apud* SCHENK, 2005).

Segundo Redweik (2007), os produtos finais da fotogrametria constituem de base geográfica para qualquer sistema de informação geográfica (SIG), ou seja, a fotogrametria é uma ferramenta para aquisição de dados para um SIG.

Segundo Paredes (1987), o rápido desenvolvimento da fotogrametria torna difícil enumerar todas as suas aplicações, porém a confecção de mapas topográficos, temáticos e mosaicos são as principais contribuições dessa ciência.

Marchetti e Garcia (1989) elucidam que mesmo que as principais aplicações da fotogrametria sejam voltadas ao mapeamento, a mesma também pode ser aplicada na geologia, agricultura, urbanismo, arquitetura e até mesmo medicina.

A fotogrametria também pode ser subdividida quanto ao posicionamento para a tomada de fotografias, sendo subdividida em aérea, espacial, terrestre e a curta distância (TOMMASELLI, 1999).

A fotogrametria terrestre consiste na tomada de fotografias em uma posição fixa do terreno, sendo aplicada, por exemplo, em levantamentos arqueológicos (TOMMASELLI, 1999) ou para análise de fachadas de prédios em projetos de recuperação de estruturas (LOCH; LAPOLLI, 1989).

A fotogrametria a curta distância pressupõe a proximidade entre a câmara e o objeto a ser fotografado, sendo aplicável na medicina, indústria, arquitetura e engenharia (TOMMASELLI, 1999).

A fotogrametria espacial abrange os aspectos da fotografia extraterrestre e suas medições subsequentes. As fotografias são tomadas através de câmaras fixas na Terra, na Lua, em satélites artificiais ou em outros corpos localizados no espaço (PAREDES, 1987; TOMMASELLI, 2009).

2.3.1. FOTOGAMETRIA AÉREA

A fotogrametria aérea ou aerofotogrametria é uma subdivisão da fotogrametria, na qual as fotografias do terreno são tomadas por uma câmara de precisão acoplada a uma aeronave (TOMMASELLI, 2009).

As fotografias aéreas em sua forma bruta não podem ser consideradas como mapas, mas o uso de métodos fotogramétricos, através de geometria plana e sólida permite a geração de mapas topográficos (MARCHETTI; GARCIA, 1989).

De acordo com Redweik (2007), a base de todas as técnicas fotogramétricas para a produção de cartas e mapas é composta pelas fases de voo fotográfico e determinação de pontos de apoio fotogramétrico.

Segundo Loch e Lapolli (1989), é realizado de forma preliminar o plano de voo, que constitui de um estudo prévio das condições da região a ser fotografada. No plano de voo são considerados aspectos primordiais para o sucesso do projeto ou produto final desejado.

As fotografias aéreas têm sido utilizadas como um sensor remoto na identificação e mapeamento de recursos naturais (LOCH; LAPOLLI, 1989).

2.3.1.1. Cobrimento aerofotogramétrico com VANT

Em levantamentos pontuais, os aerolevantamentos convencionais são inviabilizados pelo alto custo, tornando onerosos os levantamentos nas áreas a serem cobertas (BORGES *et al.*, 2017).

O advento dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) criou um cenário favorável ao desenvolvimento de equipamentos de menor custo que apresentam condições semelhantes aos equipamentos tradicionais facilitando a obtenção de produtos aerofotogramétricos.

Os VANTS podem ser categorizados quanto à aplicação, peso, dimensões, números de motores, etc. Geralmente são categorizadas em aeronaves de asa fixa ou rotatória (SILVA *et al.*, 2014).

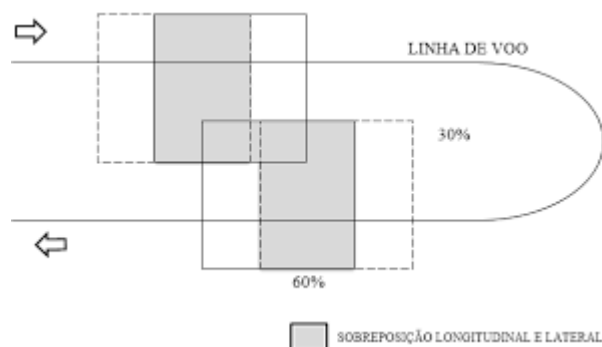
Silva e Botelho (2017) definem que a finalidade dos drones aerofotogramétricos – um tipo de VANT – é gerar produtos cartográficos com boa precisão de forma rápida e remota sendo capaz de extrair informações espaciais qualitativas e quantitativas de tal produto.

Para obtenção de tais informações deve-se garantir a estabilidade e ortogonalidade da câmera em relação ao solo e a qualidade e recobrimento entre as imagens sucessivas.

O intervalo de tempo entre as exposições feitas na câmera fotográfica transportada nos veículos aéreos é ajustado de modo que cada ponto da superfície da terra é fotografado mais de uma vez através de diferentes posições (MARCHETTI; GARCIA, 1989).

O voo aerofotogramétrico é planejado de forma que ocorra a sobreposição de áreas comuns (FIGURA 12), devendo ser respeitado a sobreposição longitudinal e a lateral para assegurar a conexão de fotos adjacentes entre as faixas de voo (ALMEIDA; OLIVEIRA, 2010).

Figura 12 – Linhas de voo e sobreposição no levantamento aerofotogramétrico



Fonte: Adaptado de Wolf e Dewitt (2004).

Além dos equipamentos se faz necessário o uso de *softwares* para o planejamento da missão, controle durante o voo e para o processamento fotogramétrico. Os *softwares* de planejamento de voo fotogramétrico são semelhantes ao da fotogrametria convencional: conhecida a distância focal da câmera, a escala ou GSD (*Ground Sample Distance*), definidas as sobreposições e as coordenadas dos cantos da área, o software lança em um mapa virtual as linhas de voo e estima o tempo necessário para o levantamento aerofotogramétrico (SILVA *et al.*, 2014).

No planejamento de voo o GSD é um dos parâmetros que define a qualidade do produto final, sendo definido como o tamanho de um pixel no terreno. Nas ferramentas fotogramétricas atuais, o GSD está usualmente na faixa de 5 a 20 mm (LUHMANN, 2019). O GSD é indicativo de qualidade da imagem final, sendo que quanto menor o valor de GSD, melhor será a qualidade da imagem (HORUS, 2018). O GSD é definido em função da aplicação dos produtos finais do aerolevanteamento (TABELA 2).

O uso de drones para geração de produtos aerofotogramétricos vem sendo aplicados em vários estudos nas mais diversas áreas do conhecimento.

Silva e Botelho (2017) mostram em seus estudos as potencialidades do uso de imagens de drone no Cadastro Ambiental Rural (CAR). Borges *et al.* (2017) verificaram as potencialidades de imagens obtidas por drones como alternativas de baixo custo para caracterização topográfica da infraestrutura de transportes no Brasil.

Tabela 2 – GSD recomendado em função da aplicação

Aplicação desejada	GSD recomendado
Índices de vegetação	15 – 30 cm
Cálculo de áreas	5 – 10 cm
Cálculo de volumes	5 – 15 cm
Curva de nível, MDS/MDT	10 – 15 cm
Georreferenciamento	5 – 10 cm
Avaliação de desmatamento	10 – 20 cm
Detecção de focos de queimada	10 – 20 cm
CAR e INCRA	5 cm
Cadastro urbano	5 – 10 cm

Fonte: Adaptado de Horus (2018).

2.3.1.2. Processamento de imagens aéreas

O ângulo de cobertura menor em levantamentos com drones acarreta na necessidade de inúmeras imagens para recobrimento da área em estudo. Dessa forma se faz necessário a junção dessas imagens em uma única imagem. O processo de junção de imagens consecutivas é denominado de montagem do mosaico, cujo produto final é um mosaico da imagem também chamado de ortomosaico (HASEGAWA; ARRUDA JÚNIOR, 2004).

Os *softwares* desenvolvidos para o processamento fotogramétrico de imagens de VANT possuem alto grau de automatização, sendo capazes de processar uma grande quantidade de imagens. Todo o processamento é realizado de forma automática gerando produtos como modelo digital de superfície (MDS), modelo digital de terreno (MDT) e ortomosaico (SILVA *et al.*, 2014).

O Pix4D é um exemplo de *software* desenvolvido para o processamento de imagens, permitindo a criação de mapas 2D e 3D georreferenciados com alta precisão a partir de aerolevantamentos com drones (PIX4D, 2017).

O processamento fotogramétrico automático pode ser finalizado utilizando apenas as posições dadas pelo sistema GNSS da plataforma de captura de imagem, porém para se obter uma precisão melhor se torna conveniente utilizar pontos de controle fotogramétrico.

Os pontos de controle são pontos nos quais conhecemos as coordenadas geodésicas (altitude, latitude e longitude), sendo obtidos em campo por triangulações geodésicas. Para que apareçam de forma mais nítida no levantamento aerofotogramétrico os pontos de controle

devem ser sinalizados antes de se realizar o voo usando sinais em forma de cruz ou cores que se destacam no ambiente (LOCH; LAPOLLI, 1989).

2.3.2. QUALIDADE POSICIONAL DA “GEOMETRIA DAS FEIÇÕES”

O Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984 estabeleceu critérios para classificação de cartas quanto à sua exatidão e distribuição de erros utilizando o “Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)” como parâmetro estatístico de qualidade posicional. Porém o desenvolvimento tecnológico propiciou o surgimento de novas formas de obtenção de dados geoespaciais, tornando necessário o estabelecimento de novos padrões (BRASIL, 2016).

O Sistema Cartográfico Nacional (SCN) estabelece escalas para representação do Espaço Geográfico Brasileiro (EGB), utilizando as escalas como parâmetro na definição de feições e nível de densificação para representação do território nacional. A Norma da Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) utiliza os termos de acurácia posicional absoluta (APA) e exatidão cartográfica como desvio padrão (ou erro padrão ou erro quadrático médio) como componentes para avaliação do produto cartográfico (BRASIL, 2016).

O enquadramento das geometrias das feições pode ser realizado em termos de PEC, que objetiva garantir a exatidão cartográfica de produtos analógicos e em termos de Padrão de Exatidão Cartográfica de Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) (BRASIL, 2016).

O enquadramento nas classes deve atender duas condições: (a) 90% dos valores de discrepância posicional devem ser iguais ou inferiores ao valor de referência da PEC em relação à escala testada e; (b) o erro quadrático médio (RMS) das discrepâncias deve ser igual ou inferior ao valor de referência do erro padrão (EP) definido pela normativa (QUADRO 3 e QUADRO 4).

Quadro 3 – Padrão de exatidão cartográfica planimétrica dos Produtos Cartográficos Digitais

PEC	PEC - PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
-	A	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70	7,00	4,25	14,00	8,51	28,00	17,02	70,00	42,55
A	B	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00	12,50	7,50	25,00	15,00	50,00	30,00	125,00	75,00
B	C	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00	20,00	12,50	40,00	25,00	80,00	50,00	200,00	125,00
C	D	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	25,00	15,00	50,00	30,00	100,00	60,00	250,00	150,00

Fonte: Brasil (2016).

Quadro 4 – Padrão de exatidão cartográfica altimétrica dos Produtos Cartográficos Digitais

PEC -PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84	2,70	1,67	5,50	3,33	13,70	8,33	27,00	16,67
B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,66	25,00	16,66	50,00	33,33
C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00

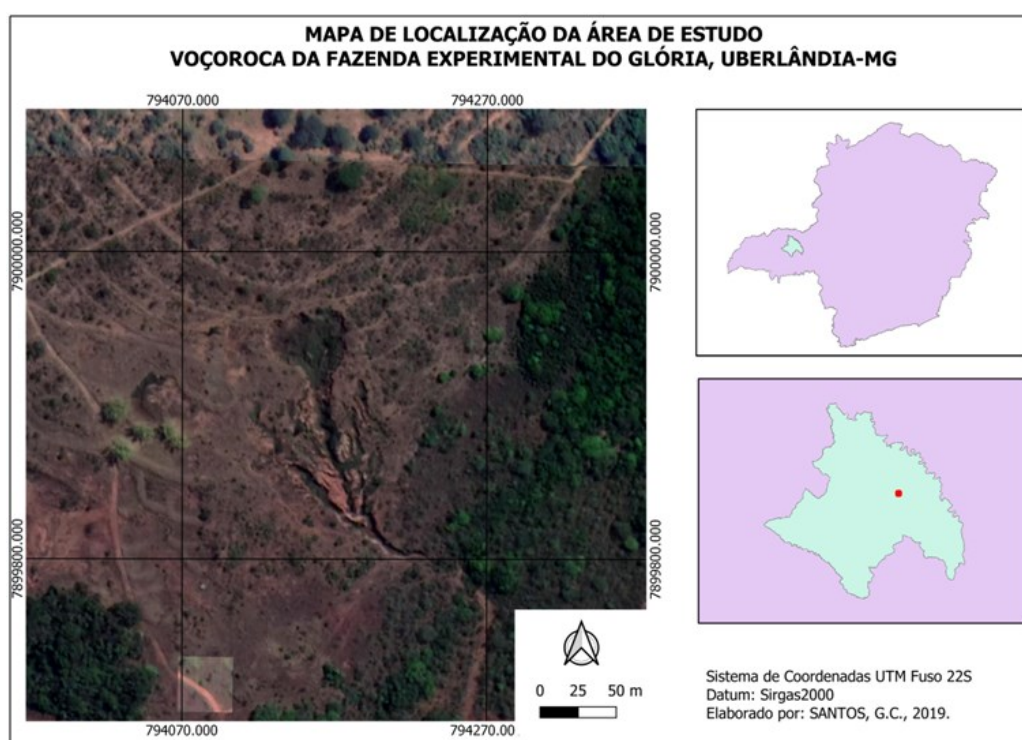
Fonte: Brasil (2016).

3. METODOLOGIA

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende uma voçoroca situada nas dependências da Fazenda Experimental do Campus Glória da Universidade Federal de Uberlândia, no sudoeste do município de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil (FIGURA 13).

Figura 13 – Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Autor.

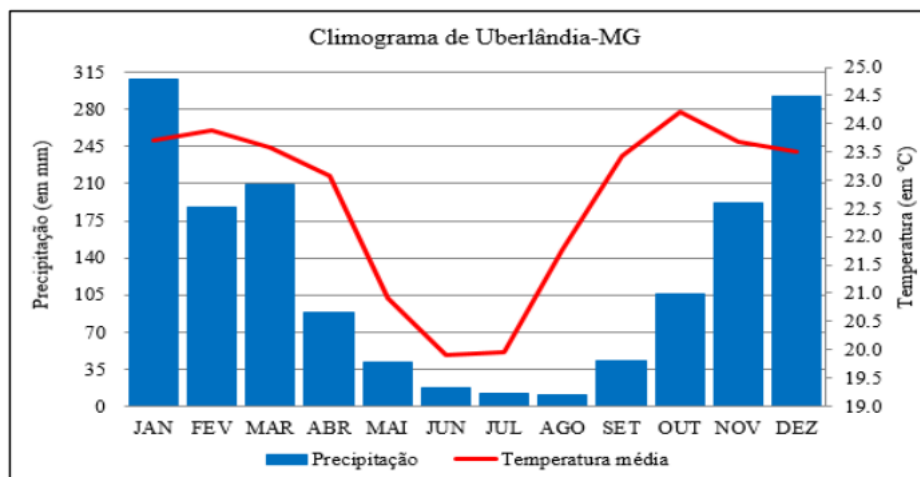
3.1.1. CLIMA

A classificação climática de Köppen (1936) define o clima de Uberlândia do tipo Aw, caracterizando um clima tropical, megatérmico, com verão chuvoso e inverno seco.

Novais, Brito e Sanches (2018) ao proporem uma nova classificação climática no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, definiram o clima de Uberlândia como Tropical Semisseco Meridional, caracterizado por seis meses secos, frentes frias periódicas e precipitação pluviométrica anual de 1350 a 1600 mm.

O climograma de Uberlândia apresentado na figura 14 demonstra o padrão climático do município.

Figura 14 – Climograma da cidade de Uberlândia-MG, série histórica de 1981 a 2015



Fonte: Petrucci (2018).

A temperatura média da cidade é de 22,6°C, com as maiores médias no período de setembro-abril. A precipitação média é de 1507 mm, sendo que a precipitação ocorre principalmente no período de outubro a março, apresentando precipitação média mensal superior a 100 mm (PETRUCCI, 2018).

3.1.2. GEOMORFOLOGIA, USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A área de estudo se localiza em uma unidade geomorfológica de relevo dissecado, apresentando declividade média de 5 a 15%, em uma vertente de colina, com comprimento de rampa de aproximadamente 1000 m de forma predominantemente convexa. A bacia do Córrego do Glória onde está situada a voçoroca apresenta topos aplainados, longas vertentes com declividade leve, que permite o uso de maquinário agrícola (BACCARO, 1989; BIULCHI, 2012).

A área de estudo é caracterizada pelo alto grau de degradação antrópica iniciada pela remoção de vegetação natural para pastoreio e posteriormente atividade de remoção de cascalho, localizado nos últimos 400 metros da vertente. O manejo e a conservação inadequada do solo propiciaram o estabelecimento da voçoroca (LEAL; RODRIGUES, 2011; PEREIRA JUNIOR, 2013).

A vegetação da Fazenda do Glória é composta por remanescentes de cerrado, sendo observado fitofisionomias de cerrado *strictu sensu*, pastagens, matas ciliares, matas mesofíticas e ilhas de cerradão (BIULCHI, 2012).

Na área próxima à voçoroca é possível verificar resquícios de pastagem degradada, que vem se recuperando, além da presença de mata ciliar do Córrego do Glória ao fim da vertente (FIGURA 15).

Figura 15 – Pastagem em recuperação (a) e mata ciliar ao fundo da vertente (b)



Fonte: Autor.

3.2. PLANEJAMENTO DE LEVANTAMENTO GNSS

O ponto de partida para execução das atividades foi a realização de um levantamento GNSS. O levantamento GNSS possibilitou a definição de coordenadas geodésicas precisas que seriam utilizadas como pontos de apoio fotogramétrico. Essa prática consistiu em duas fases: planejamento e levantamento *in loco*.

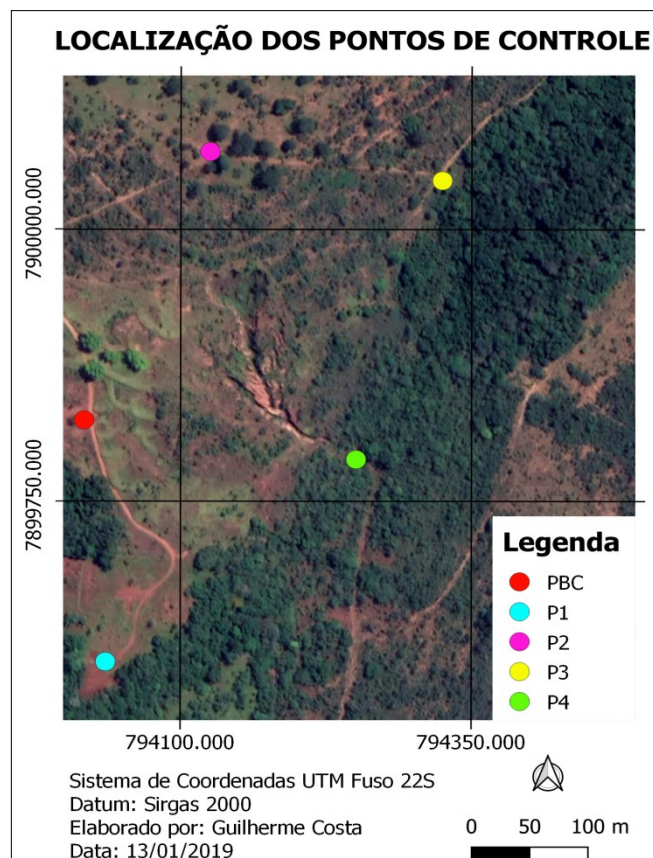
De forma prévia ao levantamento *in loco*, foi realizado um planejamento para o levantamento GNSS conforme Recomendações para Levantamentos Relativos Estáticos GPS (IBGE, 2008) e as Normas e Especificações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017a).

No planejamento foi descrito de forma sucinta a localização da área de estudo, a seleção dos pontos de controle fotogramétrico, a estação de referência a ser utilizada, o tempo de observação, a listagem e preparação dos equipamentos.

Com o auxílio da ferramenta *Google Earth* foram selecionadas cinco feições fotoidentificáveis (FIGURA 16) como cercas e cruzamentos de estradas. As feições

selecionadas foram definidas como pontos de apoio fotogramétrico para georreferenciamento das imagens obtidas no referente estudo, sendo nomeadas como pontos “PBC”, “P1”, “P2”, “P3” e “P4”.

Figura 16 – Feições fotoidentificáveis selecionadas para o levantamento GNSS



Fonte: Autor.

A quantidade de pontos de controle definidos foi de acordo à recomendação do *Pix4D* (2017), que estabelece um número mínimo de 5 pontos de controle, estimando no máximo 10 para grandes projetos. O *Pix4D* (2017) também indica que o uso de uma quantidade muito grande de pontos de controle não contribui significativamente para melhoria da precisão.

Para o levantamento GNSS determinou-se o intervalo de coleta do receptor de 15 segundos, uma máscara de elevação de 10° e o posicionamento sendo relativo estático rápido com base e *rovers*. O ponto de apoio PBC foi definido como a base de campo e os demais pontos definidos como *rovers*. A estação MGUB (Uberlândia) da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) foi definida como a estação de referência.

O tempo de rastreamento definido no planejamento foi baseado no comprimento das linhas de base (TABELA 3), conforme estabelecido nas Normas e Especificações para levantamentos

geodésicos (IBGE, 2017a). As linhas de base são definidas como, a distância entre a estação de referência com coordenadas conhecidas e a estação onde está sendo realizado o levantamento (MGUB à base de campo; base de campo aos *rovers*).

Tabela 3 – Estimativa de precisão para posicionamento GNSS relativo

Linha de Base	Tempo de observação	Equipamento Utilizado	Precisão
00 – 05 Km	05 – 10 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
05 – 10 Km	10 – 15 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
10 – 20 Km	10 – 30 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
20 – 50 Km	02 – 03 h	L1/L2	5 mm + 1 ppm
50 – 100 Km	Mínimo: 03 h	L1/L2	5 mm + 1 ppm
> 100 Km	Mínimo: 04 h	L1/L2	5 mm + 1 ppm

Fonte: IBGE, 2017a.

A linha de base da estação MGUB até o PBC foi de 7,8km. A linha de base do PBC aos demais pontos levantados (*rovers*) foram todas inferiores a 1,0km. Dessa forma o tempo de rastreio dos *rovers* ficou estipulado em 30 minutos, superando o tempo mínimo de observação especificado na norma.

Para realização do levantamento GNSS foram utilizados equipamentos cedidos pelo Laboratório de Topografia (LabTOPO) da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

Os equipamentos utilizados foram:

- 01 receptor GNSS marca *Ashtec* modelo *Promark200*;
- 02 receptores GNSS marca *Ashtec* modelo *Promark100*;
- 02receptores GNSS marca *Ashtec* modelo *Promark2*;
- 05 antenas receptora marca *Ashtec* modelo *Promark11660*;
- Tripés topográficos;
- Corpo de prova cilíndrico de concreto;
- Escavador;
- Piquetes;
- Marreta.

Na fase de planejamento foi verificada a conformidade dos equipamentos utilizados no levantamento, atentando-se principalmente à autonomia das baterias e memória dos receptores GNSS.

3.3. LEVANTAMENTO GNSS

A segunda fase do levantamento GNSS consistiu no levantamento *in loco* realizado no dia 27 de fevereiro de 2019. Em campo foram encontradas as feições fotoidentificáveis, sendo realizada a materialização dos pontos de controle utilizando corpos de prova cilíndricos de concreto.

Após a materialização dos pontos foi montado um tripé com um aparelho receptor e uma antena receptora GNSS (FIGURA 17). A base de campo – denominada neste trabalho como PBC – foi ocupada com um receptor GNSS de dupla frequência (L1/L2) modelo *Promark200*, enquanto os demais pontos de controle foram ocupados com receptores de simples frequência (L1) *Promark100* (pontos P1 e P2) e *Promark2* (pontos P3 e P4). Em todas as ocupações realizadas o modelo de antena utilizado foi a *Promark11660*.

Figura 17 – Conjunto receptor de sinal GNSS



Fonte: Autor.

As ocupações consistiram na montagem do conjunto tripé, receptor, antena e na configuração dos aparelhos receptores GNSS.

A altura da antena especificada na configuração dos aparelhos foi de 2,4m para o ponto P3 e 2,0 m para todos os demais pontos levantados. A taxa de coleta determinada foi de 15 segundos, por ser a mesma taxa de coleta das estações da RBMC.

Após a configuração do receptor foi verificado se as antenas estavam conectadas ao receptor. Depois de verificada toda a conformidade do sistema receptor, iniciou-se a coleta de dados.

A primeira ocupação realizada foi a da base de campo, após a ocupação da base, foi realizada a ocupação dos demais pontos de controle, denominados *rovers*, para o levantamento GNSS.

O tempo de rastreamento dos *rovers* foi de 30 min. O rastreamento de sinais GNSS dos *rovers* foi realizado em concomitância com o levantamento GNSS da base de campo, ou seja, o receptor da base rastreava sinais de satélite durante o levantamento GNSS dos *rovers*. Após os 30 minutos de rastreamento de sinais GNSS, os aparelhos receptores foram desligados. O último aparelho receptor a ser desligado foi o da base de campo.

No dia 12 de abril de 2019, foi realizado um retorno ao campo para o levantamento GNSS de um novo ponto de controle (P4). O levantamento do novo ponto de controle visou atender a recomendação do Pix4D (2017), indicando que a uniformidade da distribuição dos pontos de controle na paisagem deve ser realizada, minimizando erro de escala e orientação.

Para o levantamento GNSS foi seguida a mesma metodologia da primeira visita a campo, porém a materialização dos pontos foi realizada com um piquete que foi posicionado ao solo com auxílio de uma marreta. Para isso, foi montada uma base de campo com receptor GNSS *Promark100* que teve tempo de rastreamento de 2h15min e o *rover* (P4) que teve um tempo de rastreamento de 30min conforme os demais pontos. O levantamento também foi realizado de forma que houvesse concomitância durante o rastreamento de sinal GNSS do *rover* com a base.

A base de campo do segundo levantamento serviu apenas para determinação das coordenadas do ponto 4 (P4), não sendo utilizada como um ponto de controle para georreferenciamento e processamento das imagens.

Ao fim da ocupação dos pontos de controle, os aparelhos foram levados ao LabTOPO onde os arquivos coletados foram descarregados em um computador para realização da etapa de pós-processamento das coordenadas geodésicas.

3.4. PROCESSAMENTO DOS PONTOS DE APOIO FOTOGRAMÉTRICO

Com o levantamento dos dados GNSS se fez necessário realizar seu pós-processamento para obtenção de coordenadas precisas. Para efeitos de comparação foram utilizados dois *softwares* de pós-processamento de dados GNSS, sendo eles: o GNSS *Solutions*TM e IBGE-PPP.

3.4.1. PROCESSAMENTO NA FERRAMENTA GNSS *Solutions*TM

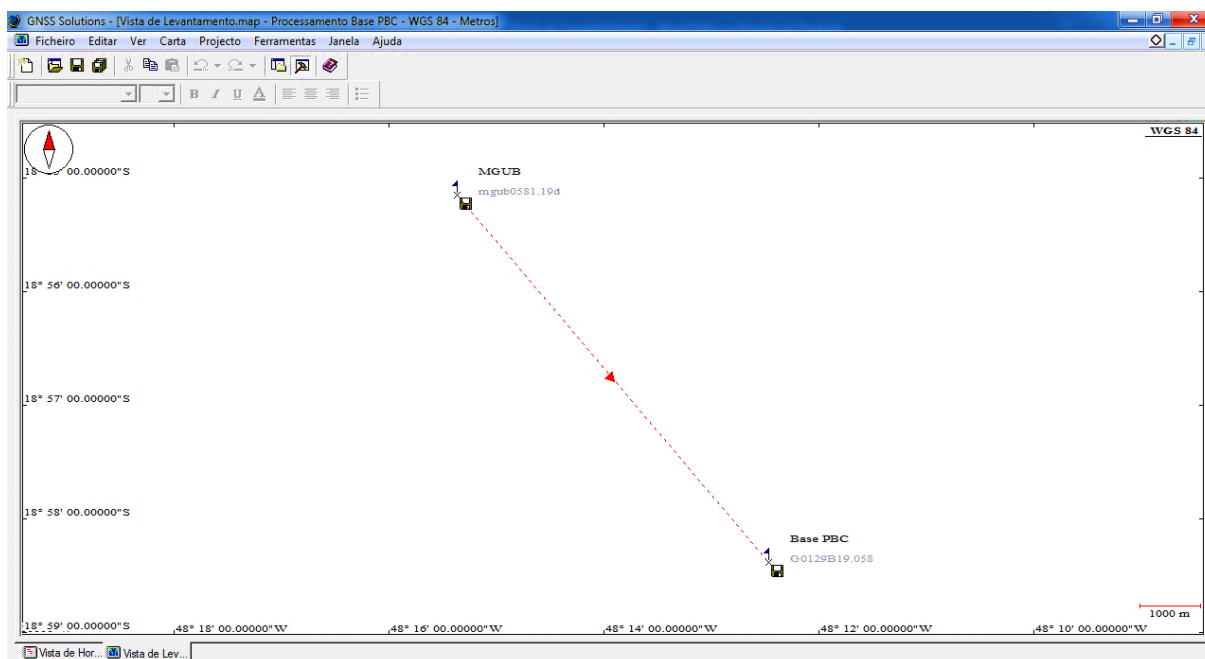
Para o processamento das coordenadas geodésicas no *software* GNSS *Solutions*TM foi necessário baixar os dados diários da estação de referência (Uberlândia - MGUB), que serviu como ponto de controle no processamento. Eles são disponibilizados na seção sobre a “Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – RBMC” na aba de “Geociências” do site do IBGE (<https://www.ibge.gov.br/>). Para acesso aos dados e informações da estação de controle foi necessário realizar um cadastro no site.

No site do IBGE, selecionaram-se a estação de referência de interesse, as datas dos levantamentos (27 de fevereiro e 12 de abril) e por fim foi realizada a consulta que leva a uma página em que foi possível baixar os dados diários e o relatório da estação.

Com os dados diários da estação iniciou-se a etapa de processamento na ferramenta GNSS *Solutions*TM. O primeiro passo foi realizar o processamento das bases de campo levantadas nas duas visitas à campo utilizando os dados diários da estação de referência como ponto de controle.

A primeira etapa do processamento consistiu em criar um novo projeto e importar os dados diários da estação (MGUB) e os dados da base de campo levantados na mesma data. Dessa forma foram criados dois projetos distintos, um para realizar o processamento dos dados da base de campo levantados no dia 27 de fevereiro e outro para os dados levantados no dia 12 de abril.

Iniciou-se com a importação dos dados sendo possível acessar uma vista do levantamento GNSS no *layout* da ferramenta (FIGURA 18), sendo que nesta condição os arquivos ainda não foram processados.

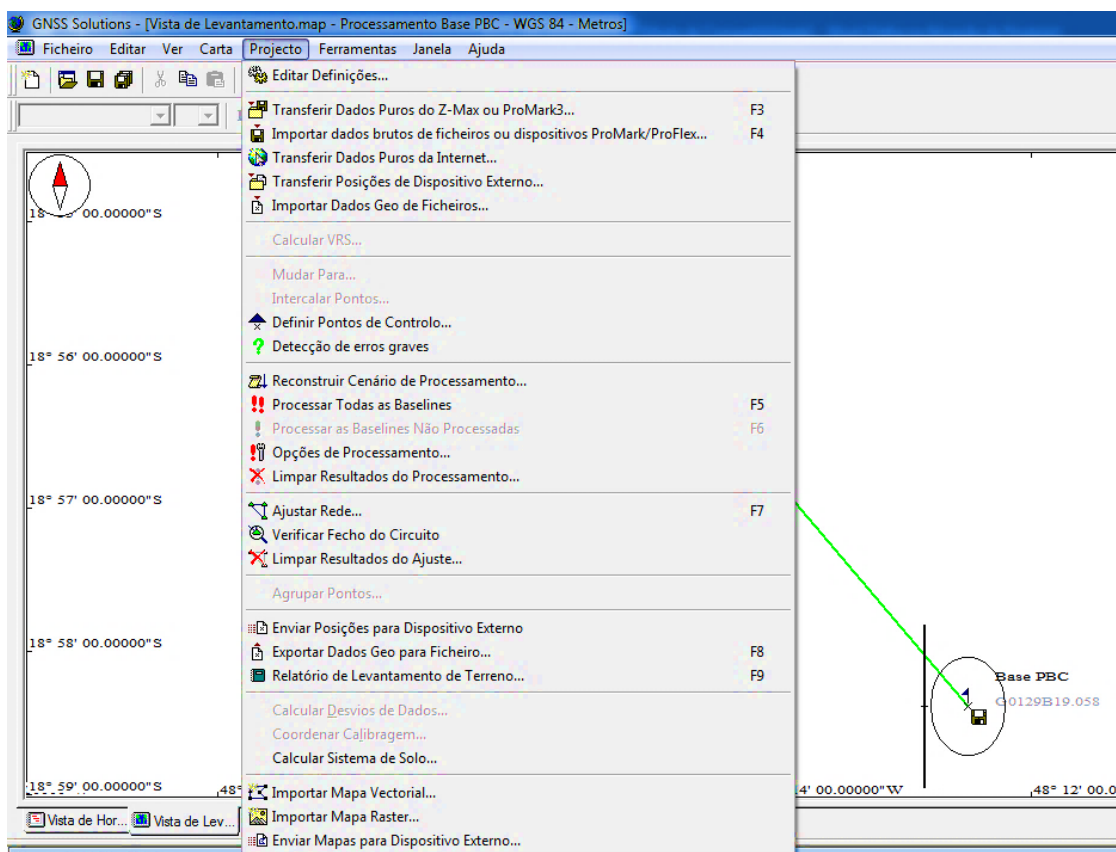
Figura 18 – Vista de levantamento no processamento do ponto PBC

Fonte: Autor.

Após abrir a vista de levantamento definiu-se a estação MGUB como ponto de controle para o processamento das coordenadas da base de campo. Na definição do ponto de controle atentou-se à correção dos valores das coordenadas geodésicas e desvio padrão da estação de referência (MGUB). As coordenadas do ponto de controle foram previamente corrigidas de acordo ao apresentado no memorial descritivo (relatório) da estação disponibilizado pelo IBGE.

Com a definição do ponto de controle, processaram-se todas as linhas de base e após o processamento foi realizado o ajuste da rede e por fim gerado um relatório do processamento (FIGURA 19).

Figura 19 – Processamento das linhas de base, eventuais ajustes e geração de relatório



Fonte: Autor.

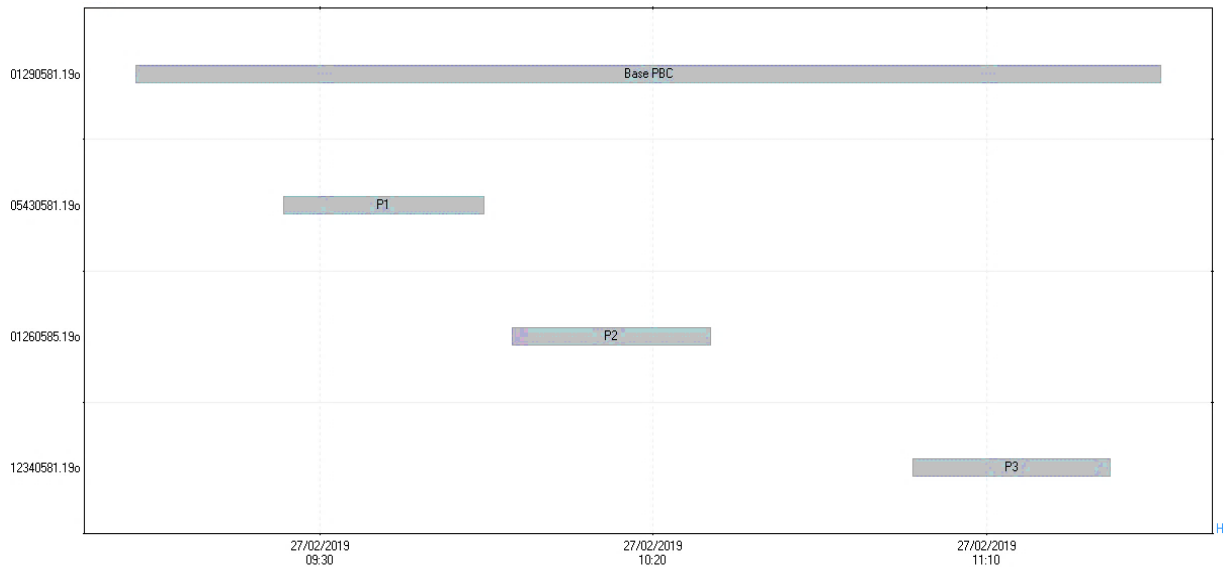
O relatório de processamento consta as informações do processamento, incluindo os valores das coordenadas geodésicas processadas das bases de campo.

Com determinação das coordenadas das bases de campo e seus respectivos desvios-padrão foi possível realizar o processamento das coordenadas dos *rovers* P1, P2, P3 e P4. Para o processamento dos *rovers* as bases de campo processadas serviram como ponto de controle, não sendo necessário utilizar os dados da estação MGUB.

Para determinação das coordenadas dos *rovers* P1, P2 e P3 foi necessário realizar a importação dos dados de tais levantamentos e os dados da base de campo (PBC) levantada no dia 27 de fevereiro. Definiu-se o PBC como ponto de controle corrigindo os valores das coordenadas e desvios-padrão conforme o obtido no processamento prévio da base.

Ao importar os dados e definir a base de campo (PBC) como ponto de controle foi possível verificar a vista de levantamento com as linhas de base existentes e a vista horária de levantamento indicando a compatibilidade de um posicionamento relativo (FIGURA 20).

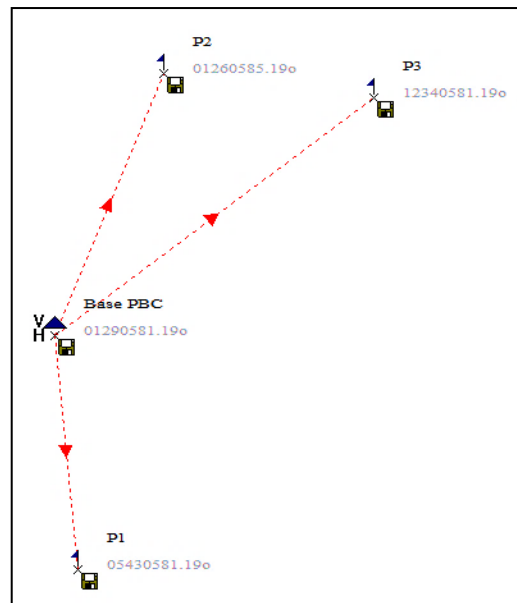
Figura 20 – Vista horária do levantamento dos pontos PBC, P1, P2 e P3



Fonte: Autor.

Antes de realizar o processamento das linhas de base foi necessário selecionar e excluir linhas de base que não interessam ao processamento das coordenadas dos *rovers* restando apenas as linhas de interesse (FIGURA 21).

Figura 21 – Vista de levantamento do processamento dos pontos P1, P2 e P3



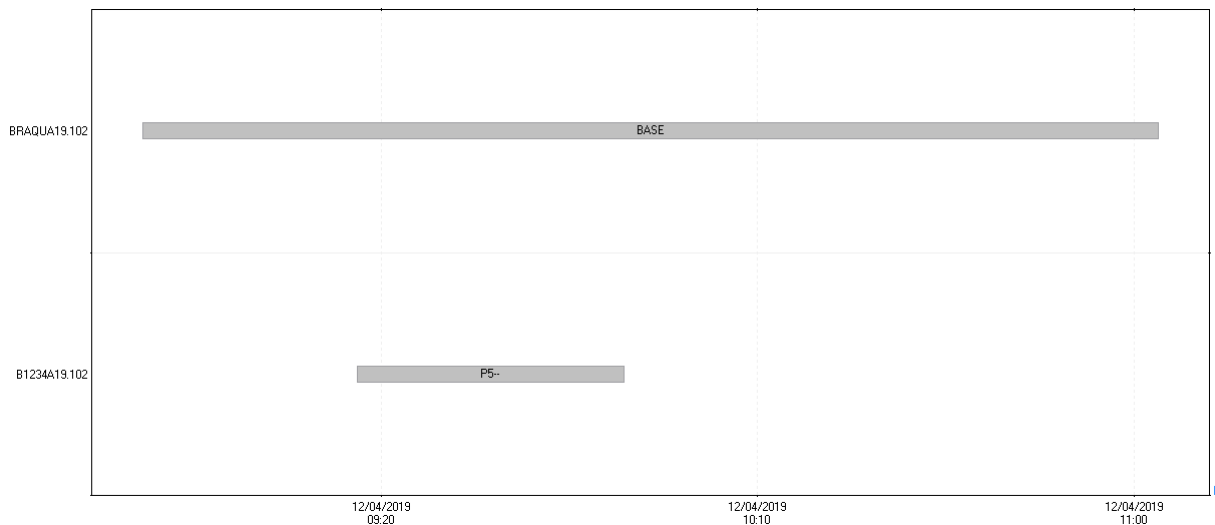
Fonte: Autor.

Com a definição das linhas de base de interesse, realizou-se o processamento e por fim o ajuste da rede. Com o processamento concluído foi gerado um relatório de processamento

que consta as coordenadas geodésicas e desvios-padrão dos pontos de apoio fotogramétrico P1, P2 e P3.

Para o processamento do ponto de apoio fotogramétrico P4 realizou-se o mesmo procedimento dos demais processamentos. Foram importados os dados da base de campo e do ponto, ambos levantados no dia 12 de abril (FIGURA 22).

Figura 22 – Vista horária do levantamento do ponto P4



Fonte: Autor.

Por fim foi realizado o processamento das linhas de base e ajuste da rede, sendo possível gerar o relatório de processamento constando as coordenadas geodésicas e respectivos desvios-padrão do ponto P4.

3.4.2. PROCESSAMENTO NA FERRAMENTA IBGE-PPP *online*

O processamento na ferramenta IBGE-PPP *online* foi realizado na seção de “Serviço online para pós-processamento de dados GNSS” na aba de “Geociências” do site do IBGE (<https://www.ibge.gov.br/>), onde se abre um *layout* simples (FIGURA 23) para aplicação da ferramenta.

Figura 23 – *Layout da ferramenta IBGE-PPP online*

Selecione o Modo de Processamento: Estático Cinemático

Selecione um arquivo RINEX: Só serão aceitos arquivos no formato .05d a .20d, .05D a .20D, .05o a .20o, .05O a .20O, .obs, .zip, .tar, .tgz, .gz, .rnz, .crx, .7z

Nenhum arquivo selecionado

Os valores selecionados abaixo serão adotados para todos os RINEX que estejam comprimidos em um único arquivo:

Tipo de Antena:

Altura da antena (m):

A altura da antena somente será alterada se esta caixa estiver marcada.

E-mail válido do usuário. (não pode conter espaços ou tabs!):

Concordo que os resultados dos processamentos poderão ser utilizados pelo IBGE para a avaliação de produtos e informações cartográficas e geodésicas, bem como para a avaliação do próprio serviço IBGE-PPP

Nota: O processamento iniciará após a transferência do arquivo, o que pode demorar alguns minutos. Caso o resultado não comece a aparecer em 2 horas, por favor reprocesse.

Fonte: Autor.

Para utilizar a ferramenta, todos os arquivos dos pontos de controle (PBC, P1, P2, P3 e P4) foram convertidos ao formato RINEX utilizando a ferramenta *RINEX Converter*, disponível pelo *GNSS Solutions*TM.

Após a conversão para o formato RINEX cada arquivo foi processado de forma isolada. O primeiro passo foi carregar o arquivo na ferramenta, em seguida selecionar o método de processamento como estático, a altura da antena (2,4m para o ponto P3 e 2,0 m para as demais) e por fim foi informado um *e-mail* válido para o qual os arquivos processados seriam enviados.

Por fim, foi gerado um sumário do processamento em que constam as coordenadas geodésicas processadas e os desvios-padrão do processamento.

3.5. OBTENÇÃO DE PRODUTOS E SUBPRODUTOS FOTOGRAMÉTRICOS

Para obtenção de produtos e subprodutos fotogramétricos foi realizado um imageamento com drone. O imageamento da área de estudo foi realizado no dia 05 de junho de 2019, utilizando um drone *Phantom4 Pro* (FIGURA 24) que segundo o fabricante (DJI, c2019) apresenta autonomia de voo de 30 minutos por bateria, sensor de detecção de obstáculos, câmera integrada de 20 *megapixels* com sistema de estabilização permitindo resultados de alta definição (4K) e um sistema integrado ao posicionamento por satélite.

Figura 24 – Modelo de VANT multirrotor *Phantom4 Pro*

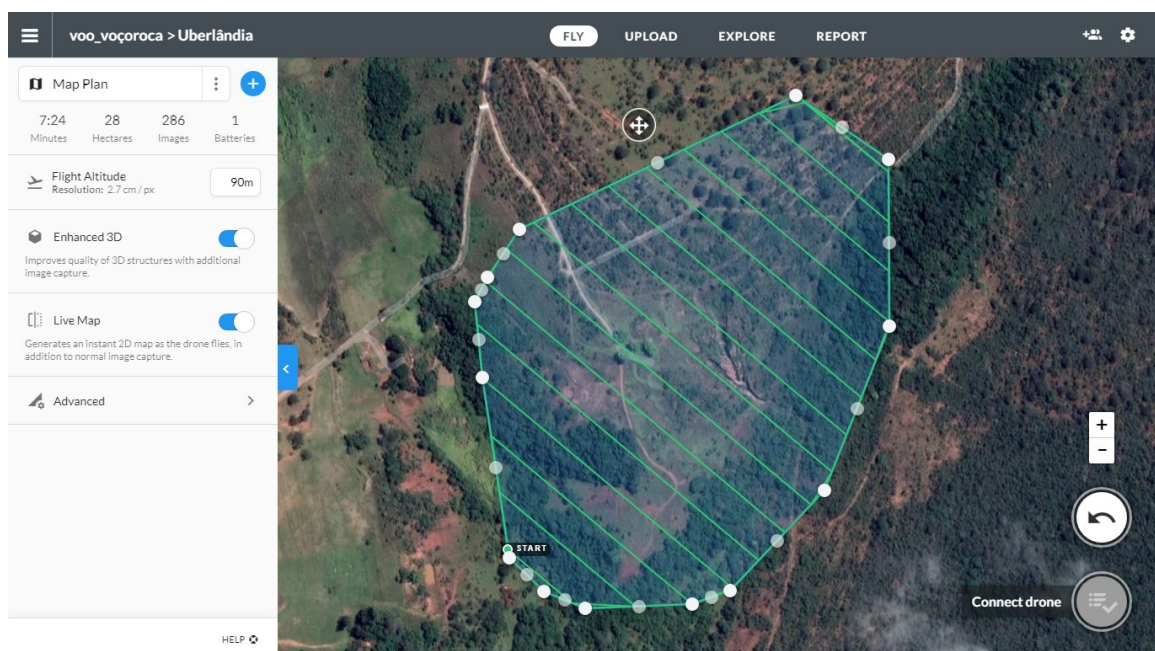


Fonte: Autor.

O processo de obtenção da imagem consistiu no preparo de um plano de voo, no voo com drone e por fim o processamento das imagens para geração do ortomosaico (imagem da área). Esse processo de obtenção da imagem foi realizado sob apoio da empresa “*duSiqueira Geotecnologias*” que disponibilizou os produtos finais da fotogrametria aérea com VANT’s, assim como os materiais para a execução do voo.

A primeira etapa para o imageamento consistiu na preparação de um plano de voo utilizando o software *Drone Deploy*, selecionando a área imageada, a altitude, direção do voo e a sobreposição das imagens (FIGURA 25).

Figura 25 – Planejamento de voo na ferramenta *Drone Deploy*



Fonte: Autor.

A sobreposição lateral foi de 60% e a longitudinal de 70%, com velocidade de voo de 10 m/s. A altura especificada foi de 90 metros de forma que o GSD médio dos resultados fosse inferior a 5 cm/pixel, além de reduzir riscos do drone colidir com fios de transmissão ou árvores.

A segunda etapa consistiu em marcar os pontos de controle do levantamento GNSS com cal hidratada. Dessa forma foi realizada uma visita aos pontos PBC, P1, P2, P3 e P4, verificando a presença do corpo de prova cilíndrico de concreto que serviu para materialização dos pontos. Colocou-se cal hidratada criando um grande desenho em forma de cruz para facilitar a detecção do ponto de controle na imagem (FIGURA 26).

Figura 26 – Demarcação dos pontos de controle com cal hidratada



Fonte: Autor.

Após a demarcação dos pontos de controle realizou-se o voo sobre a área de estudo. Com a finalização do voo, as imagens obtidas foram processadas através do software *Pix4D*, utilizando as coordenadas geodésicas pós-processadas dos levantamentos GNSS como pontos de apoio fotogramétrico. As coordenadas utilizadas foram as que apresentaram as menores discrepâncias no processamento, sendo determinadas a partir de uma análise comparativa dos resultados dos *softwares* de pós-processamento GNSS utilizados.

O processamento da imagem gerou produtos do levantamento fotogramétrico, sendo eles um ortomosaico (.GEOTIFF) e uma nuvem de pontos (.LAS) cujos arquivos foram disponibilizados pela empresa parceira para continuidade da pesquisa.

Os produtos fotogramétricos após passarem por testes de tendência e acurácia foram aplicados em *softwares* de SIG gerando subprodutos fotogramétricos.

3.6. ANÁLISE DE TENDÊNCIA E ACURÁCIA

Os produtos fotogramétricos do processamento na ferramenta *Pix4D* foram avaliados a partir das coordenadas dos pontos de controle processados na ferramenta *GNSS Solutions™*. As validações foram feitas a partir da análise de tendência pelo teste *t* de *Student* e da precisão a partir do erro médio quadrático (RMS).

A análise de tendência *t* de *Student* proposta por Merchant (1982) objetiva verificar se a média dos resíduos é estatisticamente nula, através de um teste de hipótese (EQUAÇÃO 2):

(Eq. 2): $H_0: \overline{\Delta xyz} = 0$, coordenada não tendenciosa;
 $H_1: \overline{\Delta xyz} \neq 0$, coordenada tendenciosa;

Onde: $\overline{\Delta xyz}$ equivale à média das discrepâncias das coordenadas amostradas.

O *t* de *Student* é calculado pela equação 3.

(Eq. 3):
$$t = \frac{\overline{\Delta coord}}{\sigma} \cdot \sqrt{n}$$

Onde: *n* equivale ao número de amostras, $\overline{\Delta coord}$ equivale à média da discrepância na coordenada em análise (X, Y ou Z) e σ equivale ao desvio padrão populacional.

O desvio padrão populacional em uma coordenada é obtido pela raiz quadrada positiva da variância, conforme a equação 4:

(Eq. 4):
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta coord - \overline{\Delta coord})^2}{n}}$$

Onde: $\overline{\Delta coord}$ equivale à média da discrepância em uma coordenada em análise e $\Delta coord$ equivale à discrepância posicional, sendo obtidas através das equações 5 e 6 respectivamente:

(Eq. 5):
$$\overline{\Delta coord} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta coord_i}{n}$$

(Eq. 6):
$$\Delta coord = coord_{referência} - coord_{calculado}$$

Onde: $coord_{refer\acute{e}ncia}$ equivale às coordenadas tidas como referência, sendo aquelas determinadas pelo levantamento GNSS, $coord_{calculado}$ equivale às coordenadas obtidas em pontos homólogos identificados nos produtos fotogramétricos.

Os dados para aplicação do teste foram obtidos através do relatório de processamento na ferramenta *Pix4D*. Com o cálculo do t de *Student* fez-se a inferência estatística. Foi determinado o valor t de *Student* estatístico com uma probabilidade de 90% (PEC-PCD) e grau de liberdade (dado por $n-1$) igual a 4 já que para o cálculo foram utilizadas 5 amostras.

A hipótese H_0 é aceita caso $-t_{tabela} \leq t_{calculado} \leq +t_{tabela}$, caso contrário rejeita-se a hipótese H_0 e aceita-se a hipótese H_1 .

A determinação de acurácia posicional absoluta para cada coordenada (APA_i) foi realizada a partir do erro quadrático médio (RMS) com grau de confiança de 90%, conforme Brasil (2016), sendo calculada através da equação 7:

(Eq. 7):
$$APA_i = 1,6449 * RMS$$

Onde: RMS equivale ao erro quadrático médio da coordenada de interesse, sendo calculado através da equação 8 apresentada por Almeida *et al* (2016) e Sopchaki *et al* (2018):

(Eq. 8):
$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}}$$

Onde: e_i equivale ao erro (discrepância) em uma coordenada e n equivale ao número de amostras.

O enquadramento no PEC-PCD foi realizado em aspectos de altimetria (z) e de planimetria (x, y), sendo necessário estabelecer a acurácia absoluta planimétrica (APA_{xy}), através da equação 9 apresentada por Farret *et al.* (2007):

(Eq. 9):
$$APA_{xy} = \sqrt{(APA_x)^2 + (APA_y)^2}$$

Onde: APA_x equivale à acurácia posicional absoluta na coordenada X e APA_y à acurácia posicional absoluta na coordenada Y.

O procedimento de avaliação e enquadramento do ortomosaico foi baseado em aspectos de planimetria. Já o procedimento de avaliação e enquadramento da nuvem de pontos (.LAS) foi baseado no método tradicional da norma brasileira conforme apresentado por Ferreira (2019, p.137), ou seja, foi baseado em termos de altimetria, avaliando discrepância posicional com base nos pontos de controle levantados no posicionamento GNSS.

Conforme Brasil (2016) para que um produto pudesse ser aceito como referência, os erros deveriam apresentar valores iguais ou inferiores aos previstos ao PEC-PCD. O dado espacial é considerado acurado para a escala e a classe testada quando aprovadas todas as análises de tendência e precisão conforme enquadramento.

Com o cálculo de acurácia para 90% de probabilidade (planimétrica e altimétrica) e do erro quadrático médio (planimétrico e altimétrico), o ortomosaico e a nuvem de pontos foram enquadrados junto à PEC-PCD (BRASIL, 2016) na maior escala possível para a Classe A.

3.7. PRODUÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS

Com a realização das validações estatísticas, os produtos fotogramétricos foram utilizados para sucessivas análises de caracterização da voçoroca.

A partir do ortomosaico, foram realizadas as seguintes determinações e análises:

- Delimitação da área da voçoroca de forma manual;
- Ampliação da imagem;
- Verificação da conexão do canal à rede hidrográfica do Córrego do Glória;
- Determinação de aspectos morfométricos como comprimento do talvegue, ramificações laterais e formato de cabeceira.

As análises anteriores serviram para realizar um diagnóstico da área de estudo. Também foram gerados mapeamentos que deram suporte para avaliação da área estudada.

Os mapeamentos visaram avaliar variáveis que influenciam no processo de erosão hídrica. Os mapas gerados foram: da bacia de contribuição, uso e ocupação do solo, declividade e altimetria. Para realizar os mapeamentos foram utilizadas as ferramentas *ArcGis 10.2* e *QGis 3.4.2*. E para visualização do modelo digital de superfície foi utilizado a ferramenta AutoCAD.

3.7.1. MAPA DA BACIA DE CONTRIBUIÇÃO

A chuva é o fator de maior importância na erosão dos solos. A duração, a intensidade e a frequência da chuva influenciam no volume e velocidade da enxurrada (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2014). Segundo Troeh e Thompson (2007 *apud* BIULCHI, 2012), a energia formada pela alta velocidade da água ao cair é capaz de separar e transportar as partículas de solo, incluindo as maiores.

Dessa forma, o primeiro mapeamento realizado foi da delimitação da bacia de contribuição da voçoroca. A bacia de contribuição ou área de drenagem superficial caracteriza-se pela área de captação de águas da chuva, sendo direcionada para uma seção de saída denominada exutório (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

A delimitação foi realizada utilizando as seguintes ferramentas do *ArcGis 10.2*:

- *LAS Dataset to Raster* – converteu o arquivo da nuvem de pontos para o formato *raster* usando o tipo de interpolação *binning*;
- *Fill* – visou remover imperfeições nos dados e remover os *sinks* do modelo de superfície (arquivo *raster*);
- *Flow Direction* – gerou um *raster* contendo a direção de fluxo de cada célula;
- *Watershed* – determinou a área de contribuição a partir do exutório da voçoroca, sendo o ponto caracterizado pela conexão da voçoroca à rede hidrográfica do Córrego do Glória.

3.7.2. MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A vegetação exerce importante função no controle da erosão do solo. A remoção da vegetação pela ação humana acelera o processo erosivo, enquanto a preservação da vegetação retarda a perda de solo e minimiza a erosão (ARAUJO *et al.*, 2013).

A vegetação age como uma defesa natural do terreno contra a erosão, protegendo o solo do impacto direto das gotas de chuva reduzindo sua energia cinética, dispersando a água, promovendo o aumento da infiltração da água, melhorando a estrutura do solo e diminuindo a velocidade de escoamento da água devido ao aumento da força de atrito na superfície (BERTONI, LOMBARDI NETO, 2014).

De acordo com Biulchi (2012), a susceptibilidade à erosão natural dos solos é determinada pela interação entre as condições de clima, topografia e tipo de solo; porém esse

processo natural pode ser intensificado pela ação antrópica. O processo de ocupação do solo pelo homem acarreta em degradação ambiental, intensificando os processos erosivos.

As atividades humanas são o fator central no desenvolvimento dos processos erosivos acelerados, iniciando com a remoção da cobertura vegetal causando um desequilíbrio no meio físico, no qual o desgaste será maior que o processo de recuperação (ROCHA, 2007).

Biulchi (2012) destaca que os processos erosivos são diretamente proporcionais às áreas sem cobertura vegetal. E de acordo com Fujihara (2002), a ocupação desordenada associada às condições naturais do solo em região de clima tropical provoca aceleração dos processos erosivos que resultam na degradação do solo e da água, refletindo nos aspectos ambientais, econômicos e sociais.

Sob tal aspecto, o segundo mapeamento realizado consistiu da determinação do uso e ocupação do solo.

A determinação das classes de uso e ocupação do solo foi realizada através de uma classificação supervisionada de pixel, utilizando o *plug-in* “Dzetsaka” da ferramenta *QGis*

3.4.2, sendo categorizadas três classes de uso:

- Vegetação média/alta;
- Pastagem;
- Pastagem degradada/solo exposto.

3.7.3. MAPA DE DECLIVIDADE

Segundo Botelho (2010), as formas de relevo são fatores que influenciam as condições locais, criando condições hidrológicas específicas. Destaca ainda que a inclinação das encostas associadas à cobertura vegetal e rugosidade do terreno é responsável pela velocidade dos fluxos de água que atua nos processos erosivos.

Segundo Cruz (2012), a inclinação do terreno tem relação direta à intensidade do processo erosivo, pois quanto mais inclinada for a vertente, maior será a energia cinética da água que escoar pela superfície e menor será a taxa de infiltração dessa água no solo, potencializando o escoamento superficial.

Dessa forma, o terceiro mapeamento realizado foi o de declividade utilizando o *software QGis* 3.4.2. A partir do arquivo *raster* de elevação obtido através da conversão da nuvem de pontos (.LAS), utilizou-se a ferramenta “Declividade” na seção “Raster”.

O mapa de declividade elaborado para a área imageada foi dividido em 5 classes conforme Embrapa (1979) *apud* Silva e Oliveira (2015):

- <3% (plano);
- 3 – 8% (suave-ondulado);
- 8 – 20% (ondulado);
- 20 – 45% (forte-ondulado);
- >45% (montanhoso).

Para determinação das classes, fez-se a alteração da banda de origem para banda simples falsa-cor, estipulando assim os intervalos de interesse e cores de representação.

3.7.4. MAPA ALTIMÉTRICO

O mapeamento altimétrico foi realizado na ferramenta *QGis 3.4.2*. utilizando o modelo de superfície no formato *raster*. Para visualização dos aspectos de altimetria, realizou-se uma classificação do *raster* estipulando 8 faixas de altitude com intervalo de 5 metros, com classes compreendidas entre 835 e 860 metros acima do nível do mar.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO PÓS-PROCESSADAS

Os levantamentos GNSS foram realizados nos dias 27 de fevereiro (PBC, P1, P2 e P3) e 14 de abril de 2019 (P4) no período da manhã. Os dados brutos do levantamento foram convertidos ao formato RINEX e pós-processados. A partir dos resultados dos processamentos feitos na ferramenta IBGE-PPP foram obtidas as coordenadas geodésicas (TABELA 4) e UTM (TABELA 5) dos pontos PBC, P1, P2, P3 e P4.

Tabela 4 – Coordenadas geodésicas pós-processadas no IBGE-PPP e desvios-padrão

IBGE-PPP						
Feição	Latitude	σ (m)	Longitude	σ (m)	H (m)	σ (m)
Base	-18° 58' 22,9551"	0,014	-48° 12' 28,1242"	0,015	834,82	0,027
P1	-18° 58' 30,1768"	0,773	-48° 12' 27,3754"	1,332	825,77	1,882
P2	-18° 58' 14,8780"	0,879	-48° 12' 24,5621"	1,466	853,63	2,224
P3	-18° 58' 15,6472"	1,197	-48° 12' 17,7528"	1,628	842,94	3,094
P4	-18° 58' 24,1539"	1,571	-48° 12' 20,0577"	1,651	827,16	3,097

Fonte: Autor.

H: altitude geométrica (m); σ : desvio padrão (m).

Tabela 5 – Coordenadas UTM pós-processadas no IBGE-PPP e desvios-padrão

IBGE-PPP				
Feição	N	σ (m)	E	σ (m)
Base	7899824,732	0,014	794017,152	0,027
P1	7899602,213	0,773	794035,544	1,882
P2	7900071,779	0,879	794125,295	2,224
P3	7900044,739	1,197	794324,274	3,094
P4	7899784,106	1,571	794252,660	3,097

Fonte: Autor.

σ : desvio padrão (m).

As coordenadas geodésicas dos pontos PBC, P1, P2, P3 e P4 também foram pós-processadas no *software* GNSS Solutions™. No processamento da base de campo considerou-se a RBMC MGUB (Uberlândia) como estação de controle, obtendo ao fim do processamento

as coordenadas geodésicas (TABELA 6) e UTM (TABELA 7) e respectivos desvios-padrão dos pontos de estudo.

Tabela 6 – Coordenadas geodésicas pós-processadas no GNSS *Solutions*TM e desvios-padrão

GNSS <i>Solutions</i> TM						
Feição	Latitude	σ (m)	Longitude	σ (m)	H (m)	σ (m)
PBC	-18° 58' 22,95579"	0,013	-48°12' 28,12432"	0,010	834,843	0,021
P1	-18° 58' 30,17776"	0,002	-48°12' 27,37020"	0,002	825,493	0,003
P2	-18° 58' 14,88113"	0,002	-48°12' 24,56504"	0,002	853,514	0,002
P3	-18° 58' 15,64233"	0,002	-48°12' 17,73263"	0,002	843,479	0,003
P4	18° 58' 24,10215"	0,002	-48° 12' 20,0741"	0,002	826,209	0,002

Fonte: Autor.

H: altitude geométrica (m); σ : desvio padrão (m).

Tabela 7 – Coordenadas UTM pós-processadas no GNSS *Solutions*TM e desvios-padrão

GNSS <i>Solutions</i> TM				
Feição	N	σ (m)	E	σ (m)
Base	7899824,710	0,013	794017,148	0,021
P1	7899602,181	0,002	794035,696	0,003
P2	7900071,471	0,002	794125,262	0,002
P3	7900044,880	0,002	794324,867	0,003
P4	7899785,706	0,002	794252,205	0,002

Fonte: Autor.

σ : desvio padrão (m).

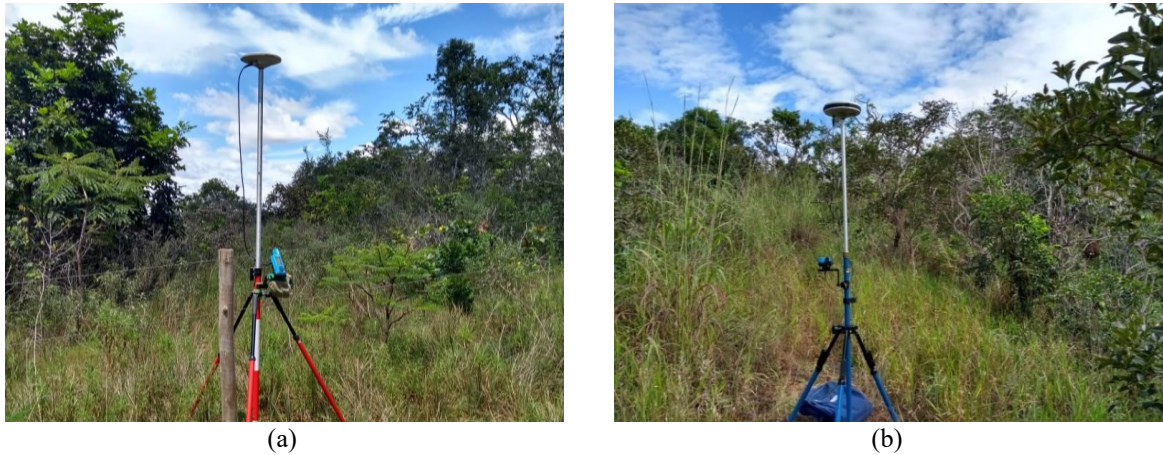
No processamento com o *software* IBGE-PPP a base de campo (PBC), em comparação aos demais pontos levantados, apresentou o menor erro nas três coordenadas (latitude, longitude e altitude), apresentando desvios-padrão ajustados de ordem centimétrica devido ao maior tempo de rastreamento (2 horas e 34 minutos) em relação aos *rovers* (30 minutos).

Os pontos P1 e P2 processados no IBGE-PPP apresentaram erros de ordem decimétrica para a latitude e erros de ordem métrica para a longitude e altitude, enquanto que os pontos P3 e P4 apresentaram desvios-padrão de ordem métrica para todas as três coordenadas.

Os pontos P3 e P4 processados no IBGE-PPP apresentaram os maiores desvios-padrão nas três coordenadas dentre os vértices levantados. O baixo tempo de rastreamento nesses pontos

associado à presença de vegetação próxima aos receptores (FIGURA 27) de simples frequência pode indicar relação entre a baixa precisão e a possível ocorrência do efeito de multicaminho.

Figura 27 – Receptores GNSS posicionados nos pontos P3 (a) e P4 (b)

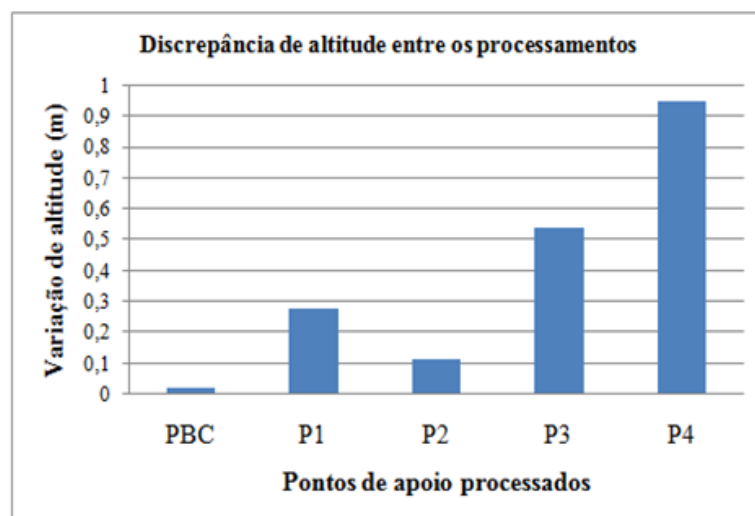


Fonte: Autor.

Os resultados do processamento no *software* comercial GNSS *Solutions*TM apresentaram coordenadas processadas com desvios-padrão na ordem centimétrica para a base de campo (PBC) e milimétrica para os *rovers* (P1, P2, P3 e P4). Tais resultados podem ser associados ao tempo de rastreamento e às linhas de base relativamente curtas.

Os processamentos nos *softwares* apresentaram discrepância nos valores de altitude geométrica para todos os pontos, porém as diferenças mais significativas de altitude foram observadas nos pontos P3 e P4 (FIGURA 28).

Figura 28 – Discrepância dos valores de altitude geométrica dos processamentos GNSS



Fonte: Autor.

Comparativamente, as coordenadas processadas no *software* IBGE-PPP apresentaram desvios-padrão maiores em relação ao processamento no *software* GNSS *Solutions*TM. A partir dos resultados obtidos foram abordadas discussões diante de referenciais bibliográficos.

Verificou-se que o IBGE-PPP realiza um processamento absoluto das coordenadas, ou seja, o processamento não considera a existência de uma estação base coletando dados simultaneamente. O processamento é realizado com dados de um único receptor, considerando as órbitas precisas e as correções nos relógios do satélite para definição das coordenadas precisas.

Dentro dos referenciais para planejamento do posicionamento GNSS, como IBGE (2017a) e IBGE (2008) não existem indicações de se considerar de forma prévia, as ferramentas de uso para pós-processamento de dados.

O desconhecimento das limitações das ferramentas de pós-processamento a serem utilizadas interferiu na obtenção de coordenadas com alta precisão e acurácia. Com tais observações, a principal recomendação é se atentar as limitações das ferramentas no planejamento de levantamento GNSS.

Enquanto o IBGE-PPP limita-se ao processamento absoluto, o GNSS *Solutions*TM permite realizar o processamento relativo, considerando uma estação de controle no processamento de pontos, indicando as melhores precisões obtidas no processamento com a ferramenta.

A constatação anterior se assemelha ao que é descrito por Dockhorn (2006). O autor expressa que no método relativo os dados coletados da estação base são processados simultaneamente aos dados dos *rovers*, obtendo melhores precisões devido a resolução do vetor de ambiguidades.

O processamento com o *software* IBGE-PPP permitiu identificar o tempo de rastreamento como uma importante variável no processamento. Identificou-se que quanto menor o tempo de rastreamento, menor será a precisão das coordenadas pós-processadas, sendo tal variável importante na resolução das ambiguidades que acarretam em diluição da precisão.

Em estudos associando o tempo de rastreamento à acurácia de levantamentos GNSS, Perdigão e Santos (2010) identificaram que o IBGE-PPP não estabelece um tempo mínimo de rastreamento, porém elucidam que há associação entre a precisão dos pontos levantados com a resolução das diferenças de fase da onda portadora, esta última associada ao tempo de rastreamento, tipo de equipamento, etc.

No processamento com IBGE-PPP, a base de campo (PBC) apresentou os melhores padrões de precisão, tendo um tempo de rastreamento superior a 2 horas, enquanto a precisão dos *rovers* – cujo tempo de rastreamento foi de 30 minutos – foi consideravelmente menor.

Tais constatações também foram observadas por Perdigão e Santos (2010) que concluíram que levantamentos com tempo de rastreamento superior a 30 minutos apresentaram resultados com precisão satisfatória, porém levantamentos com tempo de rastreamento superior a duas horas apresentaram tendência e precisão mais condizentes a padrões de alta acurácia.

Os levantamentos GNSS apresentam diversas especificidades como métodos de levantamento, aparelhos receptores utilizados, processamento de dados entre outros. Dessa forma é necessário compreender todo o conjunto para que os resultados obtidos se aproximem dos objetivos desejados.

É importante ressaltar ainda que o tempo de rastreamento não é a única variável a influenciar na precisão das coordenadas obtidas. Perdigão e Santos (2010) explicitam que os padrões de alta acurácia não estão associados unicamente ao tempo de rastreamento, mas também ao modo de processamento e ao tipo de receptor (L1 ou L1/L2) que podem interferir na qualidade dos resultados.

O uso de dois modelos distintos de receptores GNSS no levantamento dos *rovers* pode ter influenciado na precisão obtida no processamento com o IBGE-PPP. Para Gomes e Teixeira (2017) os receptores apresentam diferenças significativas, cada qual apresentando funcionalidades distintas, onde cada equipamento apresenta sua maneira própria para obtenção das coordenadas precisas.

Os receptores *Promark2* e *Promark100* apresentam diferenças substanciais que junto ao tempo de rastreamento podem ter influenciado na precisão dos resultados do processamento no IBGE-PPP. Os pontos P1 e P2, rastreados com o receptor *Promark100*, apresentaram erros com ordem de grandeza menor do que os pontos P3 e P4 rastreados com o receptor *Promark2*.

A quantidade de canais dos receptores GNSS é uma das diferenças observadas. O receptor *Promark2* apresenta 10 canais independentes de sinal, enquanto o receptor *Promark100* possui 45 canais paralelos. A Topcon (c2019) elucida que os receptores mais antigos apresentavam quantidade limitada de canais, que recebiam sinais de uma determinada frequência, de um específico satélite de uma constelação específica, limitando a captura de sinais.

Desta forma, pode-se constatar que o aumento da constelação de satélites e de frequências disponíveis faz com que os receptores mais antigos como o *Promark2* apresentem

desvantagens frente aos receptores mais modernos como o *Promark100*, que tem capacidade de receber e trabalhar simultaneamente com uma quantidade maior de sinais de satélite.

Outra observação realizada foi que a presença de vegetação próxima aos pontos P3 e P4 pode indicar a ocorrência de efeitos de multicaminho que diluem a precisão das coordenadas processadas. Os receptores GNSS podem receber sinais refletidos por superfícies vizinhas como vegetação e construções, distorcendo a modulação da fase de onda portadora (MONICO, 2008) que é uma observável utilizada no processamento pelo IBGE-PPP. Farret *et al.* (2007) também identificaram efeitos da cobertura vegetal nos valores de desvio padrão das coordenadas, acarretando em menores precisões.

Nas especificações técnicas do receptor *Promark100* constatou-se que o mesmo possui uma capacidade mais avançada na mitigação de efeitos de multicaminho quando comparado aos receptores mais antigos como o *Promark2* utilizado nos pontos P3 e P4. Tal constatação pode explicar as melhores precisões obtidas nos processamentos com o IBGE-PPP nos pontos P1 e P2.

Carvalho *et al.* (2018) elucidam que a portadora L2 sofre maior influência dos efeitos do multicaminho, porém se faz importante ainda o uso de receptores de dupla frequência para modelação dos efeitos de primeira ordem da ionosfera em coletas de dados para PPP.

Com a elucidação anterior, o ideal era que o levantamento GNSS dos *rovers* fosse realizado com receptores de dupla frequência, garantindo melhor precisão em relação aos resultados obtidos devido à possibilidade de resolução de ambiguidades.

Os referenciais teóricos apresentam diversas recomendações para atenuar os efeitos de multicaminho, sendo que o ideal é evitar levantamentos em locais propícios a tal efeito. Tal condição não foi possível de ser atendida neste estudo, pois, os pontos de apoio fotogramétrico deveriam ser distribuídos de forma homogênea na área a ser imageada, implicando na necessidade de realizar levantamentos GNSS em áreas onde a vegetação era mais densa.

Para tentar minimizar os efeitos de multicaminho, determinou-se uma maior altura da antena (no ponto P3) e os processamentos foram realizados considerando uma máscara de elevação de 10°.

Uma possibilidade aplicável para atenuar os efeitos de multicaminho é o uso de estratégias de localização através da associação de técnicas de levantamento GNSS com técnicas de topografia.

A associação consiste em realizar um levantamento GNSS em uma área aberta sem construções ou vegetação próxima, a partir da coordenada definida se apoia em técnicas de

topografia com medições de ângulos e distâncias para determinar a posição realmente desejada (SOUZA, 2004).

Dessa forma, mesmo com limitações para levantamentos GNSS em áreas com maior densidade vegetal, as geotecnologias promovem potencialidades de uso quando trabalhadas conjuntamente.

O processamento na ferramenta GNSS *Solutions*TM não apresentou variação da precisão das coordenadas processadas dos *rovers*, principalmente pela ferramenta realizar o processamento considerando duas estações, sendo uma delas como estação de base. A única variação observada foi a precisão do ponto PBC que apresentou erros com ordem de grandeza maior que os *rovers*, devido a maior linha de base no processamento desta coordenada.

O processamento permitiu observar que as ferramentas de pós-processamento apresentam diversas nuances, com vantagens e desvantagens específicas na obtenção de coordenadas precisas. As principais vantagens e desvantagens das ferramentas são apresentadas no quadro 5.

Quadro 5 – Comparativo de vantagens e desvantagens dos *softwares* de pós-processamento

Software	Vantagens	Desvantagens
IBGE-PPP <i>online</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gratuito; ▪ Facilidade de uso; ▪ Processa dados com qualquer tempo de rastreamento; ▪ Processa dados de simples e dupla frequência; ▪ Resultados referenciados ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Necessário acesso à internet; ▪ Impossibilita alterações nas estratégias de processamento; ▪ Necessário uso de receptores de dupla frequência para posicionamento de precisão; ▪ Tempo de rastreamento influencia na obtenção de resultados com alta acurácia.
GNSS <i>Solutions</i> TM	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Possibilita alterações nas estratégias de processamento; ▪ Realiza a correção com efemérides precisas; ▪ Requisita menor tempo de rastreamento para obtenção de coordenadas precisas; ▪ Processa dados com qualquer tempo de rastreamento; ▪ Processa dados de simples e dupla frequência; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Não é gratuito.

Fonte: Autor.

A principal vantagem do IBGE-PPP frente ao GNSS *Solutions*TM se deve ao aplicativo ser gratuito, porém, a impossibilidade de modificar estratégias de processamento e a necessidade de maior tempo de rastreamento para obtenção de coordenadas precisas são as principais desvantagens.

Em estudos comparativos de aplicativos comerciais com o IBGE-PPP, Almeida e Dal Poz (2016) também concluíram que o aplicativo comercial *Leica GeoOffice* com processamento relativo apresentava os melhores resultados em termos de acurácia e a menor quantidade de desvantagens, assim como o observado no comparativo do IBGE-PPP com o GNSS *Solutions*TM.

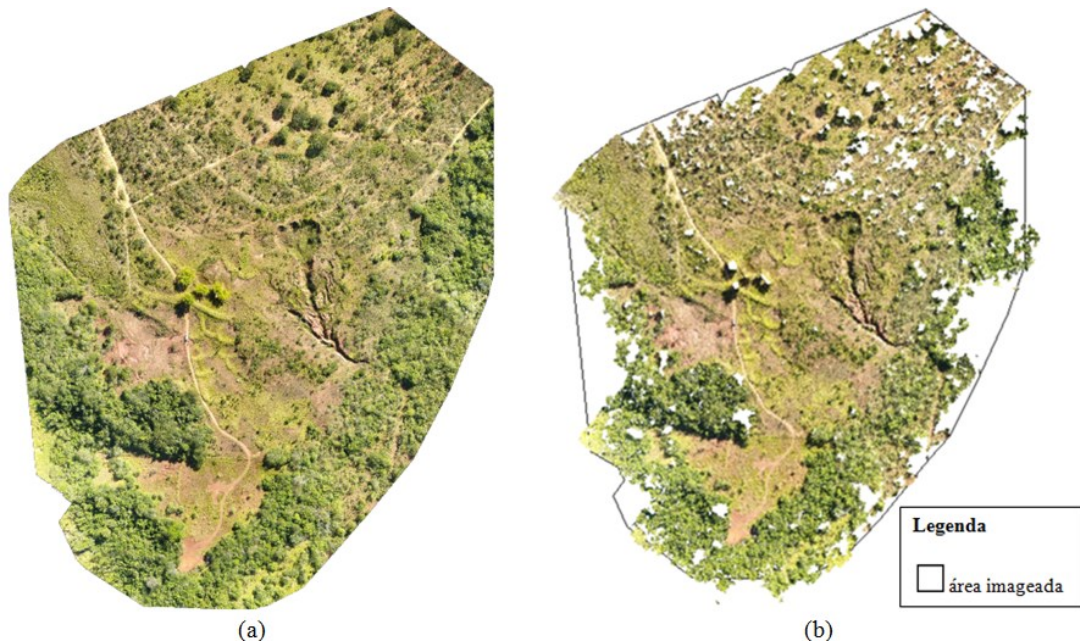
4.2. PRODUTOS FOTOGRAFAMÉTRICOS GERADOS

Após a realização do levantamento aerofotogramétrico, realizou-se o processamento das imagens na ferramenta Pix4D para obtenção dos produtos fotogramétricos. O processamento na ferramenta gerou um relatório de qualidades do processamento. Os relatórios e produtos do processamento na ferramenta Pix4D foram disponibilizados em sua totalidade pela empresa “*duSiqueira Geotecnologias*” na continuidade desta pesquisa.

Para gerar os produtos georreferenciados os pontos de apoio fotogramétrico utilizados foram os processados na ferramenta GNSS *Solutions*TM visto que apresentaram as menores discrepâncias posicionais dentre as ferramentas de pós-processamento GNSS utilizadas.

O ortomosaico e a nuvem de pontos (FIGURA 29) foram os produtos finais, sendo possível utilizá-los em mapeamentos visando análise da área de estudo, quando verificada a conformidade do processamento.

Figura 29 – Ortomosaico (a) e nuvem de pontos (b)



Fonte: Autor.

O ortomosaico (2D) apresentou boa qualidade, enquanto a densificação da nuvem de pontos (3D) apresentou falhas na interpolação de pontos 3D, principalmente nas bordas da área imageada.

A conformidade dos produtos finais foi constatada com o relatório de processamento. O primeiro ponto de destaque do relatório é o sumário do processamento (QUADRO 6) que consta as informações básicas do projeto.

Quadro 6 – Sumário de processamento dos produtos fotogramétricos

Nome do projeto	ufu – voçoroca
Data de processamento	05-06-2019 15:36:43
Modelo da câmera	FC330_3.6_4000x3000 (RGB)
<i>Ground sample distance</i> (GSD) médio	3,17 cm/pixel ou 1,24 polegadas/pixel
Área coberta	0,2749 km ² /27,4929 ha
Hora do processamento inicial	01h:11m:24s

Fonte: Autor.

No processo final de aerolevanteamento foi apurado que a área imageada possui mais de 27 hectares. Uma observação a ser ressaltada é que a área da voçoroca compreendia apenas uma pequena porção do total imageado. De acordo a Aero Drone Brasil (2017), por normalidade as






áreas imageadas são superiores às áreas de estudo possibilitando a eliminação quando identificado distorção nas bordas do ortomosaico.

O GSD médio apurado foi de 3,17 cm/pixel, ou seja, cada pixel da imagem representa linearmente 3,17 cm no terreno. Em termos de área, cada pixel equivale a 10,05 cm² (3,17cm*3,17cm). As imagens tomadas no projeto não apresentam igualmente o mesmo GSD, isso ocorre devido às diferenças de altitude do terreno e mudanças no ângulo da câmera durante a captura de imagens. O Pix4D ao criar o ortomosaico gera um GSD médio que é o determinado no relatório.

O GSD médio apurado está bem abaixo do que referenciais teóricos (HORUS, 2018) indicam para modelos digitais de superfície (10 – 15 cm) e análises de vegetação (10 – 20 cm), indicando um alto grau de representação do terreno com boa qualidade da imagem; sendo uma vantagem dos aerolevantamentos com drones em regiões de menor área.

Os produtos do processamento passam por um processo de verificação da qualidade, identificando possíveis erros, causas e as soluções correspondentes. A verificação da qualidade do processamento é apresentada no quadro 7.

Quadro 7 – Verificação interna da qualidade do processamento na ferramenta Pix4D

Imagens coletadas	277 de 286 imagens calibradas (96%), todas imagens ativadas	
Otimização dos parâmetros da câmera	Diferença relativa de 2,38% entre parâmetros iniciais e otimizados	
Imagens	Mediana de 62404 pontos-chave por imagem	
Interpolação de imagens	Mediana de 15786,2 correspondências por imagem	
Georreferenciamento	Sim, 5 PCs, erro RMS médio = 0,052 m	

Fonte: Autor.

Todos os parâmetros de verificação apresentados estavam de acordo com os critérios da ferramenta de processamento. Durante o levantamento aerofotogramétrico foram coletadas 286 imagens, sendo que desse total 277 (96%) foram calibradas e interpoladas no ponto inicial de processamento, ou seja, foram utilizadas na construção do modelo.

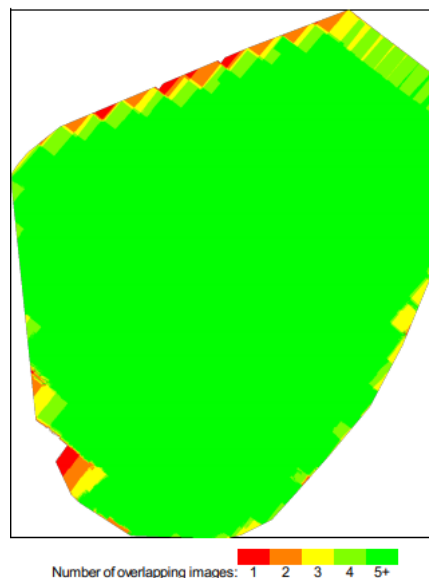
A otimização dos parâmetros da câmera foi de 2,38%. O valor obtido está associado ao comprimento focal da câmera e seus parâmetros de transformação. Segundo o Aero Drone Brasil (2017) é normal que o comprimento focal e os parâmetros de transformação sejam

diferentes entre projetos, porém atendendo os limites aceitáveis estabelecidos na ferramenta de processamento.

Ao analisar-se as imagens de forma individual, foram apresentados 62404 pontos-chave, indicando uma boa qualidade, já que a ferramenta foi capaz de captar grande quantidade de pontos característicos. A mediana da interpolação foi de 15786,2 interpolações por imagem, indicando uma boa quantidade de pontos em comum no processo de sobreposição das imagens que formam o ortomosaico e a nuvem de pontos.

Um aspecto importante para a qualidade dos produtos é a sobreposição de imagens por pixel do ortomosaico (FIGURA 30), indicando quantas vezes uma mesma área foi imageada.

Figura 30 – Sobreposição de imagens por pixel no processamento do ortomosaico



Fonte: Autor.

Percebeu-se que a maior parte da área de estudo apresentou uma alta sobreposição de imagens (áreas verdes), enquanto que as bordas são as áreas com menor sobreposição (áreas vermelhas). As áreas vermelhas são indicativas de baixa qualidade do ortomosaico. As áreas verdes indicam que cada pixel do ortomosaico pode ser visualizado em pelo menos 5 imagens, indicando uma interpolação de alto nível qualitativo, ou seja, indicam resultados de boa qualidade do ortomosaico.

A densificação da nuvem de pontos também é expressa no relatório, especificando detalhes de opções do processamento e os resultados obtidos (QUADRO 7).

Quadro 8 – Opções de processamento e resultado da densificação da nuvem de pontos

Opções de processamento	
Escala da imagem	Multiescala, 1/4 (1/4 do tamanho da imagem, rápido)
Densidade de pontos	Baixo (rápido)
Número mínimo de correspondências	3
Resultados do processamento	
Número de blocos processados	1
Número de pontos em 3D densificados	1.201.867
Densidade média (m ³)	10,69

Fonte: Autor.

O processamento da nuvem de pontos considerou a escala de 1/4 da imagem original além de utilizar o padrão de multiescala. As imagens de 1/4 calculam uma menor quantidade de pontos 3D em relação a imagens maiores, porém conseguem calcular pontos em áreas que não podem ser facilmente correspondidas, como áreas de vegetação, sendo dessa forma recomendado pela Pix4D (c2011-2019a) em projetos que envolvam vegetação.

O padrão de multiescala adiciona pontos 3D considerando várias escalas da imagem, começando pela selecionada, no caso deste estudo a imagem de 1/4 e depois para imagens de 1/8. A Pix4D (c2011-2019a) recomenda o uso desse padrão em áreas de vegetação, garantindo também a manutenção de detalhes em áreas sem vegetação.

O processamento de densificação considerou uma baixa densidade de pontos. O parâmetro considera que um ponto 3D é calculado a cada número N de pixels, definidos pela razão 16/escala da imagem. A escala definida no processamento foi de 1/4, dessa forma cada ponto 3D seria calculado a cada 64 pixels da imagem original.

Usar razão de escala em valor absoluto maior garante uma maior quantidade de pontos 3D calculados, porém não refletem necessariamente a qualidade desses pontos. Forsman (2011) destaca que a nuvem de pontos mais densa não tem utilidade se apresentar pontos correspondentes de baixa qualidade devido a correspondências incorretas ou imprecisas das imagens.

Para o projeto, utilizou-se uma correspondência de no mínimo 3 imagens, ou seja, todos os pontos 3D calculados na densificação são reprojeteáveis em pelo menos 3 imagens. O número de correspondências utilizado no projeto é padrão, porém é possível realizar um processamento com mais correspondências, melhorando a qualidade da nuvem, porém reduzindo a quantidade de pontos 3D calculados.

A nuvem de pontos gerou mais de 1,2 milhões de pontos 3D, apresentando uma densidade de 10,69 pontos 3D/m³. A quantidade de pontos gerados depende do tamanho da imagem, do conteúdo da imagem e das opções de processamento (Pix4D, c2011-2019b), dessa forma não há parâmetro de avaliação dos resultados. Usualmente são aplicados testes estatísticos para avaliação de padrões de qualidade quando são gerados modelos digitais de terreno (MDT).

4.3. ANÁLISE DE TENDÊNCIA E ACURÁCIA

A aplicação de pontos de controle na produção de dados espaciais visou obtenção de produtos com alta qualidade, apresentando fidelidade ao contexto real.

Ao considerar o georreferenciamento com os pontos de controle, a ferramenta *Pix4D* determina a discrepância posicional das coordenadas de referência e as coordenadas homólogas nos produtos fotogramétricos, calculando também a média das discrepâncias, o desvio padrão populacional (σ) e o erro quadrático médio (RMS). Todos os valores dos parâmetros estatísticos citados (TABELA 8) são apresentados no relatório de processamento da ferramenta.

Tabela 8 – Discrepância posicional nos três eixos de coordenadas

Ponto de controle	$\Delta\bar{x}$ (m)	$\Delta\bar{y}$ (m)	$\Delta\bar{z}$ (m)
PBC	- 0,065	- 0,099	-0,020
P1	- 0,042	0,068	- 0,010
P2	0,065	- 0,039	0, 008
P3	- 0,010	0,037	- 0,012
P4	0,066	0,061	0,082
Média (m)	0,002910	0,005640	0,009689
σ (m)	0,054156	0,064746	0,037413
RMS (m)	0,054340	0,064991	0,038648

Fonte: Autor.

A média do erro foi calculada através do erro dos pontos de controle em cada uma das coordenadas. Observou-se que o erro médio na coordenada Z é maior do que nas coordenadas planimétricas (X e Y).

Featherstone, Dentith e Kirby (1998) indicam que a coordenada Z é 1,5 a 2 vezes menos precisa que as coordenadas planimétricas. Determinando o módulo do erro das componentes

planimétricas (x e y) e comparando ao erro em Z, percebeu-se que o erro da altitude no levantamento está aos limites observados pelos autores.

O erro médio na coordenada Z pode ser indicativo de erros sistemáticos no levantamento dos pontos de controle, sendo importante realizar análise de tendência para corroborar tal observação. Arana (2004) indica que a altitude levantada por técnicas de GNSS é intrinsecamente influenciada pela geometria dos satélites, isso por serem observados acima do horizonte da antena acarretando na diluição da precisão vertical (VDOP).

O sigma indica o desvio padrão populacional do erro nas coordenadas, tal valor pode ser associado ao erro quadrático médio, indicando dessa forma erros sistemáticos.

Comparando os valores de sigma e RMS na tabela percebeu-se que pode ter ocorrido a existência de erros sistemáticos. Tal constatação se deve ao sigma indicar a probabilidade de os pontos apresentarem erros em intervalos determinados, sem considerar erros sistemáticos, enquanto o RMS não os desconsidera.

Sob a perspectiva de possível ocorrência de erros sistemáticos, aplicou-se o teste *t* de *Student* para determinar se houve ou não tendência a erros sistemáticos nas três coordenadas.

Com os dados da tabela 8 foi possível realizar o teste *t* de *Student* ao nível de 90% de probabilidade com 5 amostras (n) e 4 graus de liberdade (n – 1). A regra de decisão com G.L.=4 e p=90% foi: se $-t_{\text{tabelado}} \leq t_{\text{calculado}} \leq +t_{\text{tabelado}}$ a hipótese H_0 é aceita indicando que estatisticamente a coordenada não apresenta tendência a erros sistemáticos, caso contrário a hipótese H_0 é rejeitada e H_1 é aceita indicando tendência a erros sistemáticos na coordenada em análise.

Os resultados das análises de tendência são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados das análises de tendência

Coordenada analisada	t_{calculado}	t_{tabelado}	Rejeição/Aceitação da hipótese H_0
Coordenada X	0,120		Aceita
Coordenada Y	0,195	2,132	Aceita
Coordenada Z	0,579		Aceita

Fonte: Autor.

A análise de *t* de *Student* visou analisar se a resultante planimétrica (EN) e a altimétrica (Z) estavam isentas de tendência ao erro sistemático. Através do cálculo do valor *t* e sua comparação ao tabelado, constatou-se que a hipótese H_0 foi aceita indicando que os dados não apresentavam tendência nas três coordenadas.

Usualmente encontra-se tendência a erros sistemáticos em aerolevantamentos, o que não foi observado neste estudo. O uso de pontos de controle com tempo de rastreamento homogêneo (30 minutos) e com processamento relativo garantiu produtos fotogramétricos de boa qualidade.

Sopchaki *et al.* (2018) demonstraram que aerolevantamentos sem o uso de pontos de controle apresentaram tendências nas coordenadas, o que seria comum, uma vez que haveria erros intrínsecos ao posicionamento GNSS. O tempo de rastreamento em estudos do tipo demonstrou ser uma importante variável que interferiu nos resultados dos autores.

A tendência a erros é inerente aos sistemas de levantamento GNSS, sendo muito observável a relação dos tipos de erros ao tempo de rastreamento de pontos de controle. Segundo Hillebrand e Dal’Forno (2014), levantamentos com tempo de rastreamento pequeno podem fazer com que os erros sistemáticos sejam camuflados por erros aleatórios, não permitindo constatar tendências causadas pelos erros sistemáticos.

O enquadramento do ortomosaico no PEC-PCD foi realizado em aspectos de planimetria, dessa forma calculou-se a acurácia posicional absoluta planimétrica (x, y). Com os valores de acurácia fez-se o enquadramento com o padrão para produtos de cartografia digital para todas as escalas na classe A (TABELA 10).

Tabela 10 – Enquadramento do ortomosaico frente aos valores de referência do PEC-PCD

Acurácia 90% ¹	RMS _{xy}	Escala	Valor referência ²		Aceitação/Rejeição do enquadramento
			PEC	RMS	
0,139	0,0845	1:1.000	0,28	0,17	Aceita
		1:2.000	0,56	0,34	Aceita
		1:5.000	1,40	0,85	Aceita
		1:10.000	2,80	1,70	Aceita
		1:25.000	7,00	4,25	Aceita
		1:50.000	14,00	8,51	Aceita
		1:100.000	28,00	17,02	Aceita
		1:250.000	70,00	42,55	Aceita

Fonte: Autor.

¹ Acurácia posicional planimétrica;

² Valores de referência apresentados por Brasil (2016).

A análise de tendência e de precisão possibilitou enquadrar o ortomosaico produzido em todas as escalas da Classe A apresentada pela ET-ADGV (BRASIL, 2016).

O enquadramento da nuvem de pontos no PEC-PCD foi realizado em aspectos de altimetria. Com os valores de acurácia fez-se o enquadramento com o padrão para produtos de cartografia digital para todas as escalas na classe A (TABELA 11).

Tabela 11 – Enquadramento da nuvem de pontos frente à PEC-PCD

Acurácia 90% ¹	RMS _z	Escala	Valor referência ²		Aceitação/Rejeição do enquadramento
			PEC	RMS	
0,064	0,0387	1:1.000	0,27	0,17	Aceita
		1:2.000	0,27	0,17	Aceita
		1:5.000	0,54	0,34	Aceita
		1:10.000	1,35	0,84	Aceita
		1:25.000	2,70	1,67	Aceita
		1:50.000	5,50	3,33	Aceita
		1:100.000	13,70	8,33	Aceita
		1:250.000	27,00	16,67	Aceita

Fonte: Autor.

¹ Acurácia posicional altimétrica;

² Valores de referência apresentados por Brasil (2016).

A análise de tendência e de precisão possibilitou enquadrar a nuvem de pontos produzida em todas as escalas da Classe A apresentada pela ET-ADGV (BRASIL, 2016).

O enquadramento dos produtos fotogramétricos em todas as classes foi indicativo de que o procedimento realizado para obtenção dos mesmos, desde o levantamento de pontos de controle até o aerolevanteamento, seguiu bons padrões de qualidade.

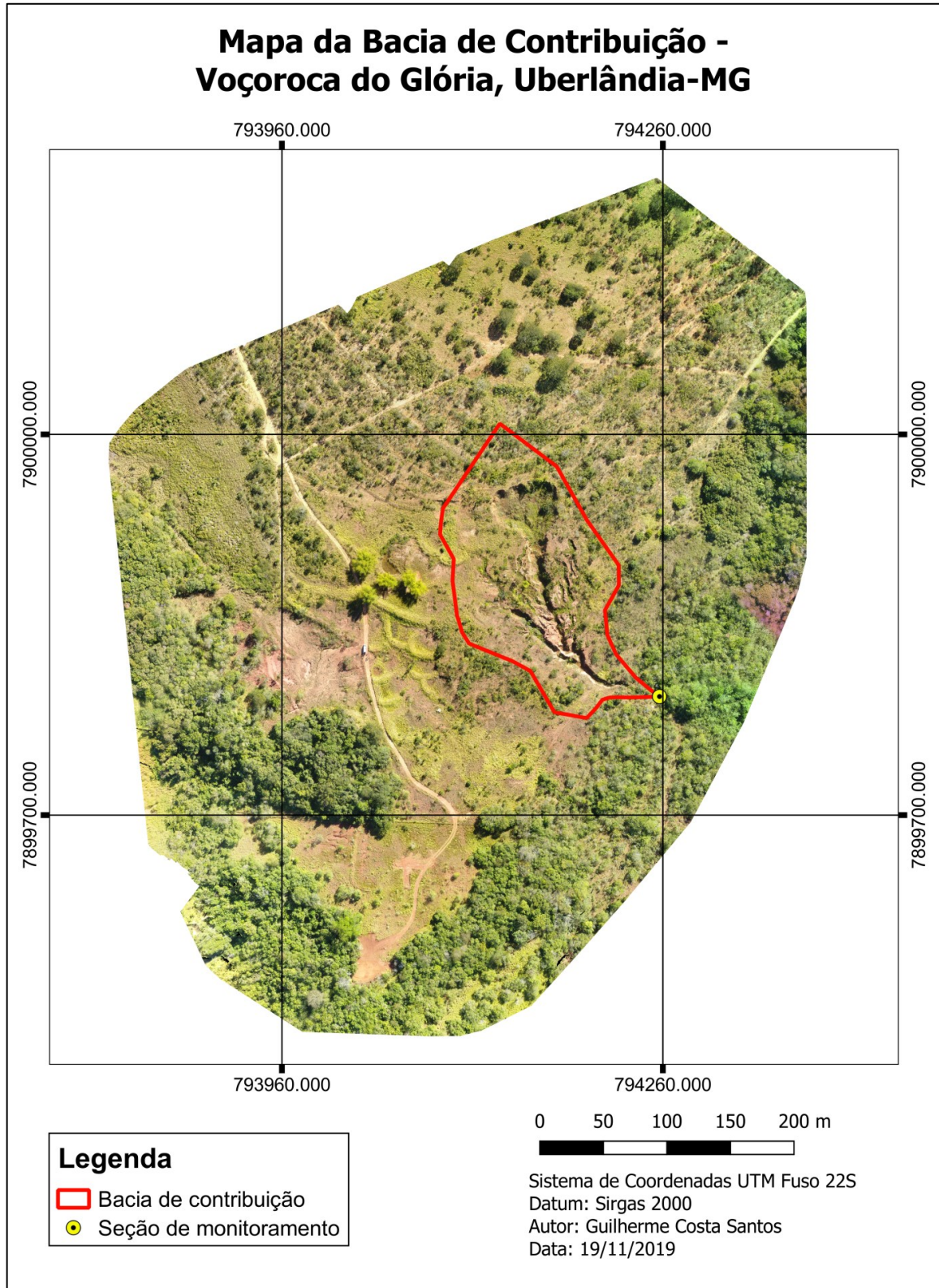
Aspectos como o tempo de rastreamento dos pontos de controle, processamento desses pontos, de sua disposição em campo e o uso de aeronaves melhores em termos de estabilidade e qualidade da câmera garantiram produtos fotogramétricos que podem ser classificados junto ao SCN na classe A na maior escala possível (1:1000).

4.4.SUBPRODUTOS GERADOS: MAPEAMENTOS E ANÁLISES

Os produtos do aerolevanteamento permitiram desenvolver mapeamentos e realizar análises das condições ambientais da área de estudo, como mapas de localização, uso e ocupação do solo e declividade, modelos digitais de superfície, bacia de contribuição da voçoroca, etc.

Através da nuvem de pontos foi possível delimitar a bacia de contribuição da voçoroca (FIGURA 31).

Figura 31 – Mapa da bacia de contribuição da voçoroca do Glória, Uberlândia-MG



Fonte: Autor.

A voçoroca compreende uma área de aproximadamente 0,5 ha, apresentando seções com solo exposto e outras com desenvolvimento vegetal. Os valores encontrados se aproximam aos observados por Leal e Rodrigues (2011) que estimaram a área da voçoroca em 0,4 ha, ou seja, percebe-se indícios de um ligeiro aumento do processo erosivo. O comprimento do talvegue do canal principal – da cabeceira da voçoroca à seção de deságue no Córrego do Glória – é de 230 metros.

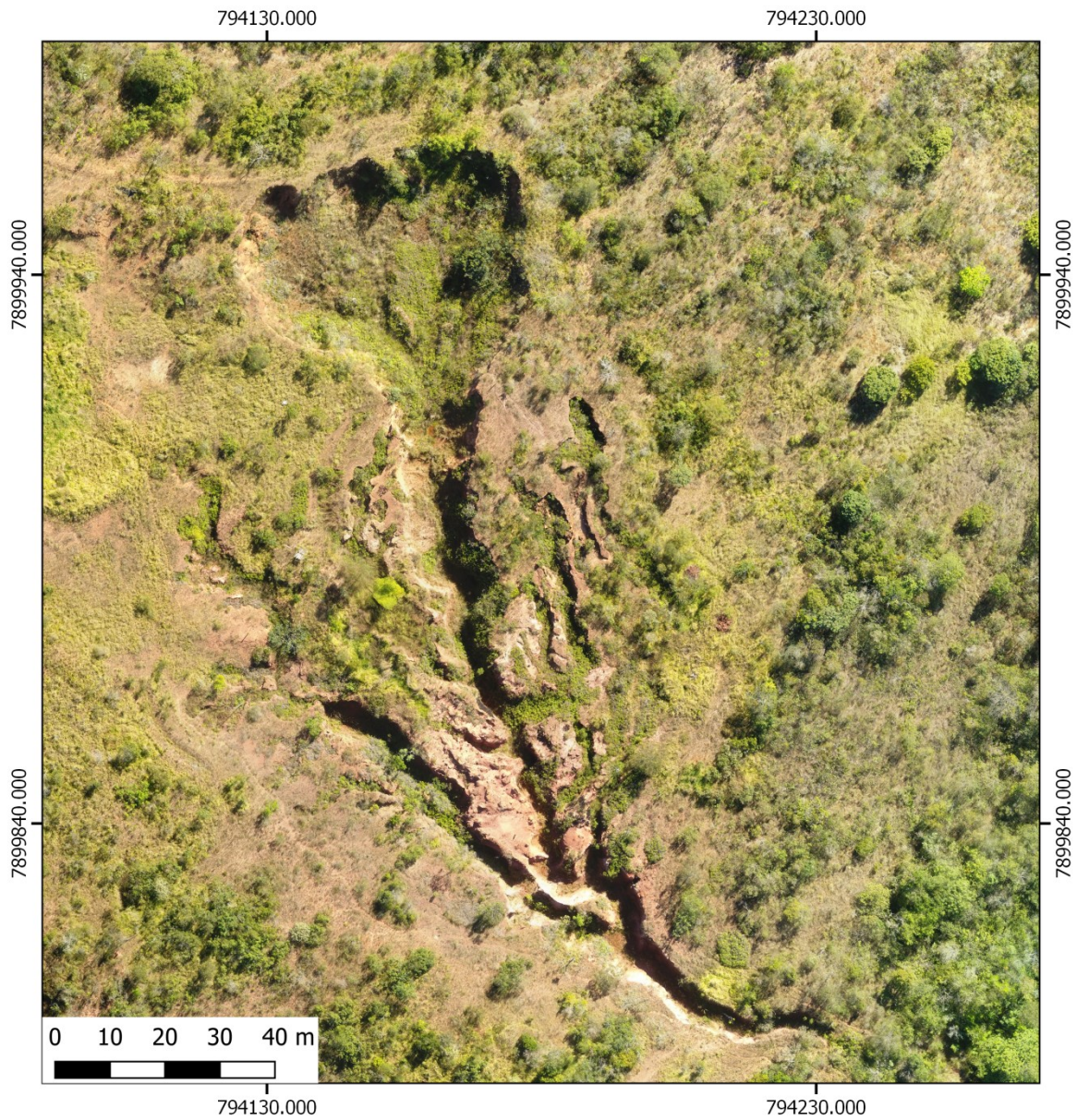
A bacia de contribuição foi delimitada a partir de um exutório, definido neste estudo como o ponto de encontro da voçoroca à rede de drenagem (Córrego do Glória). A bacia de contribuição possui 2,1 ha. Toda a água precipitada na bacia de contribuição, obrigatoriamente passa pelo exutório, ou seja, contribui para continuidade do processo erosivo caso não sejam tomadas medidas de mitigação e recuperação da área.

O tamanho da bacia de contribuição se aproxima ao determinado por Leal e Rodrigues (2011) que utilizaram do método de DGPS, determinando a bacia de contribuição com 2,16 ha.

De acordo a classificação de Capeche *et al.* (2008), quanto ao tamanho da bacia de contribuição, a voçoroca em estudo é categorizada como uma voçoroca pequena. O autor também classifica as voçorocas conforme sua profundidade, sendo a voçoroca deste estudo categorizada como voçoroca grande devido a porções de seu canal apresentar uma profundidade de até 8 metros, conforme citado por Alves (2007), e verificado neste estudo através de informações altimétricas da nuvem de pontos.

A partir do ortomosaico formado foi possível inferir análises a partir de uma aproximação da área da voçoroca (FIGURA 32).

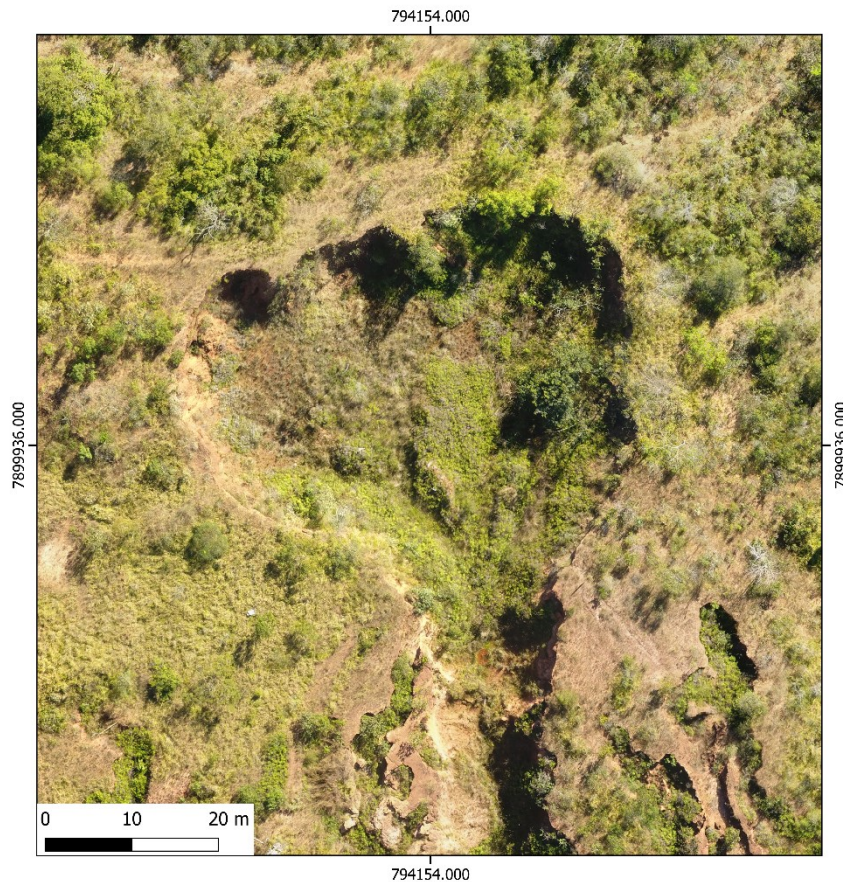
Figura 32 – Vista aérea aproximada da voçoroca do Glória, Uberlândia-MG



Fonte: Autor.

Percebe-se que a voçoroca está em um estágio de desenvolvimento avançado, se caracterizando pela conexão com a rede de drenagem, ligada diretamente ao Córrego do Glória. Em aspectos morfométricos, a voçoroca se caracteriza pela formação em leque de sua cabeceira (FIGURA 33).

Figura 33 – Vista aproximada da cabeceira da voçoroca do Glória, Uberlândia-MG



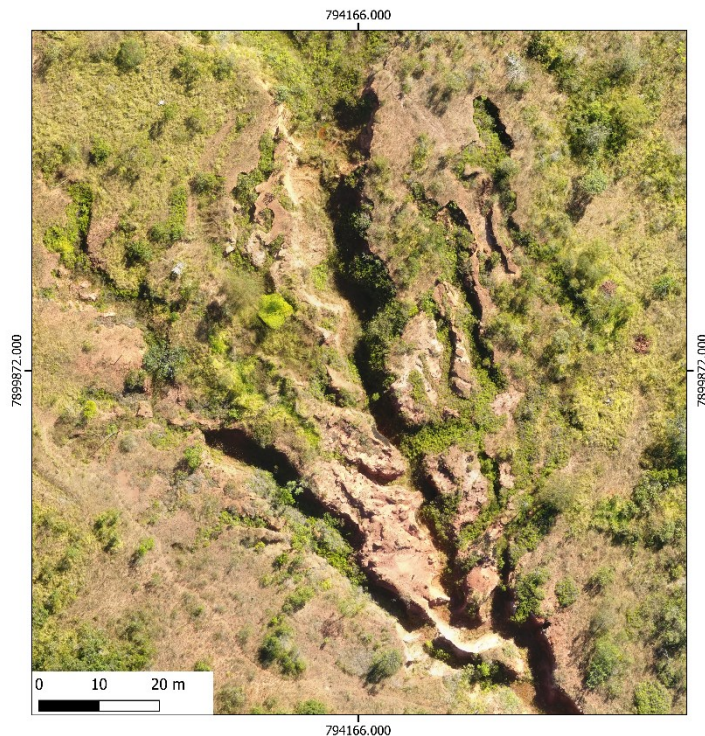
Fonte: Autor.

A cabeceira de drenagem da feição erosiva apresenta vegetação em desenvolvimento no fundo da voçoroca, com gramíneas e algumas plantas arbustivas. Alves (2007) não constatou o desenvolvimento vegetal nas imagens utilizadas em seu estudo, dessa forma se deduz que o desenvolvimento vegetal é algo mais recente e que de certa forma propicia a recuperação da área degradada.

A cabeceira da voçoroca apresenta um formato semicircular, com canal estreito e linear. As características se assemelham as descritas por Beserra Neta (2007), que também caracterizam as voçorocas em leque quanto à inclinação média (85°) e formato da base do canal (formato em U).

Além do formato em leque da cabeceira, a voçoroca apresenta ramificações laterais em sulcos e ravinas (FIGURA 34), indicando potencialidade da voçoroca aumentar em tamanho.

Figura 34 – Vista aproximada das ramificações da voçoroca do Glória, Uberlândia-MG



Fonte: Autor.

Ao se observar a ramificação bilateral, percebeu-se que canais mais distantes do canal principal são mais largos, enquanto os canais mais próximos são mais estreitos. Alves (2007) constata o mesmo, indicando que os canais mais distantes se apresentam dessa forma por apresentarem um material superficial pouco consolidado, friável e com susceptibilidade ao processo erosivo.

Sabe-se que a erosão varia quanto à natureza do solo, sendo que suas propriedades físicas, químicas e biológicas exercem diferentes influências no processo erosivo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2014).

Sob tal aspecto, percebe-se que os canais da lateral esquerda da voçoroca são ligeiramente maiores em comparações aos canais do lado direito. Tais observações podem ser associadas a dois aspectos: o tamanho da bacia de contribuição lateral e natureza do solo.

As observações anteriores também foram realizadas por Alves (2007), onde explica que o material sedimentar dos canais do lado direito da voçoroca apresentava boa permeabilidade, que associada à pequena bacia de contribuição lateral minimizava a formação de escoamento superficial.

Segundo Silva (2010), a permeabilidade do solo é controlada pela sua porosidade, afetando a taxa de infiltração de água no solo. Dessa forma, solos que apresentam maior

porosidade são mais permeáveis, tendo uma boa infiltração, promovendo um menor escoamento superficial e conseqüentemente menor erosão e perdas de solo, justificando dessa forma as diferenças entre as ramificações laterais observadas neste estudo.

Algumas ravinas não possuem conexão direta com o canal principal que seja visível na imagem. A presença dessas ravinas sem conexão pode indicar a ocorrência de erosão em dutos, ou seja, as ravinas sem conexão visível se conectam por dutos subterrâneos com o canal principal. Alves (2007) indica que a voçoroca do Glória apresenta erosão por dutos que é o principal fator no avanço do processo erosivo, já que a área de contribuição não consegue formar escoamento superficial suficiente para afetar a estabilidade do solo.

A ramificação tende a ampliar o processo erosivo em direção ao divisor de águas da bacia de contribuição. Segundo Coelho Netto (2003), o avanço dos canais erosivos em direção a seções de maior gradiente topográfico ocasiona em instabilização dos taludes e eventuais movimentos de massa.

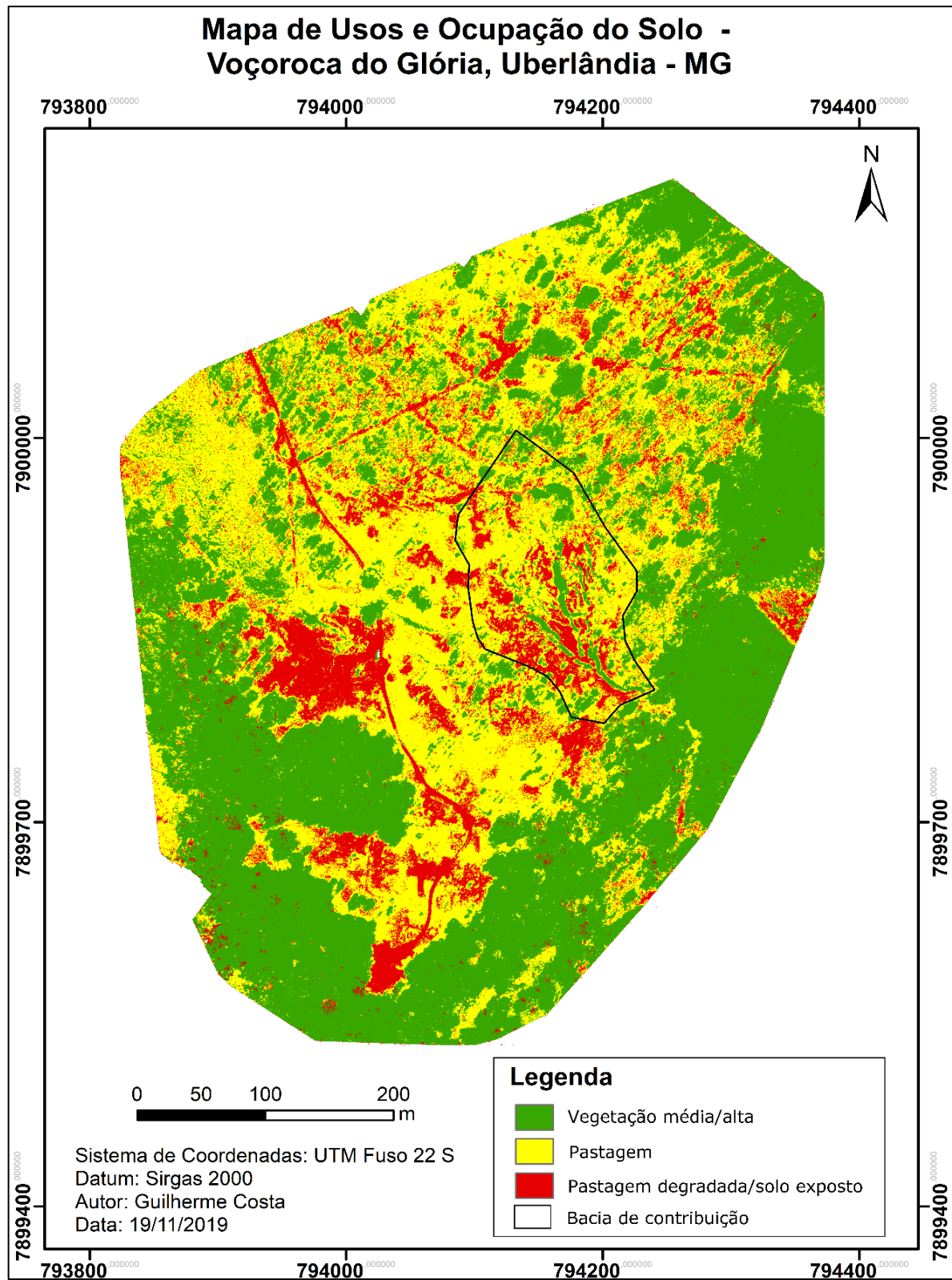
As geotecnologias utilizadas nesse estudo apresentaram algumas limitações e algumas potencialidades quanto a análises específicas da natureza do solo, como aspectos de granulometria, friabilidade e tipos de solo,

Os mapeamentos de tipos de solos são possíveis de serem realizados, porém não foram contemplados neste estudo, sendo que tais mapeamentos podem auxiliar em análises de processos erosivos, sendo uma potencialidade das geotecnologias.

Além dos mapas de tipos de solo, as geotecnologias podem auxiliar na caracterização das feições erosivas, conforme este trabalho, dando suporte às análises geológicas e pedológicas das áreas de estudo. Mesmo que não isentem da necessidade de visitas de campo para análises de solo, o uso das geotecnologias pode fornecer informações imprescindíveis para compreensão mais detalhada dos processos erosivos.

O ortomosaico e a nuvem de pontos possibilitaram mapeamentos individualizando fatores que influenciam a erosão, como por exemplo, os mapas de uso e ocupação do solo e declividade. O mapa de uso e ocupação do solo (FIGURA 35) gerado permitiu extrair informações como vegetação, construções, plantações, entre outros.

Figura 35 – Mapa de uso e ocupação do solo na área de estudo



Fonte: Autor.

O uso e ocupação do solo é caracterizado pela presença de pastagem, vegetação média/alta, pastagem degradada e solo exposto. Na área imageada predomina a existência de

vegetação média/alta e pastagem, apresentando algumas áreas com pastagem degradada (TABELA 11).

Tabela 12 – Distribuição do uso e ocupação do solo na área de estudo

Uso e ocupação do solo	Área (ha)
Vegetação média/alta	12,96
Pastagem	10,76
Pastagem degradada/Solo exposto	3,87

Fonte: Autor.

Na área da bacia de contribuição da voçoroca, observou-se predominância de pastagem e de solo exposto indicando que a ausência de vegetação possui relação com o processo erosivo. A área circundante à voçoroca apresenta grande quantidade de pastagem com pouca cobertura vegetal por espécies arbóreas.

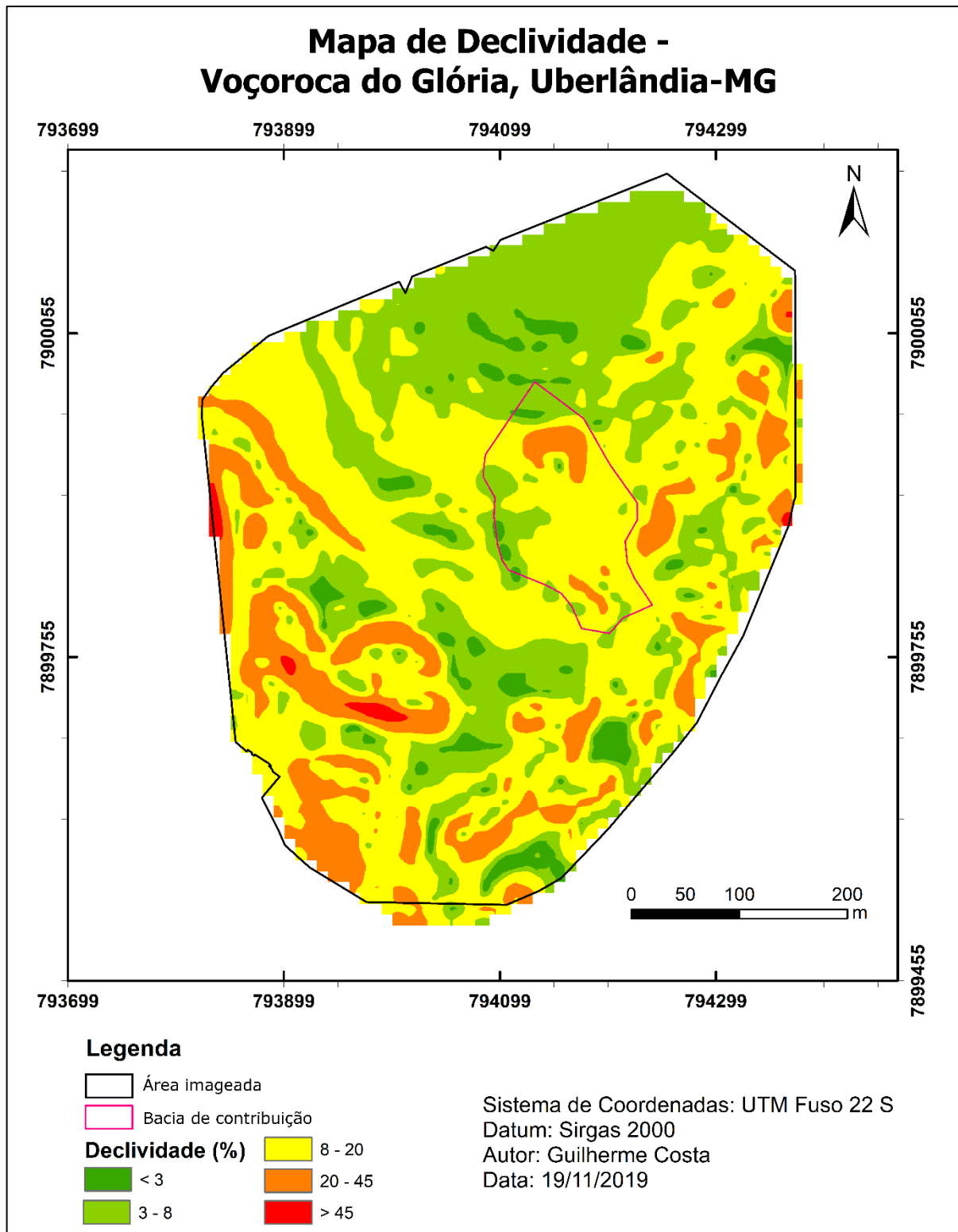
Na área da cabeceira da voçoroca e em porções das ramificações laterais apresentam solo exposto. A área sudoeste da bacia de contribuição da voçoroca apresenta solo exposto em grande parte de sua extensão, podendo contribuir para aumento de ramificações e possibilitar a ocorrência de deslizamentos de terra.

Por se tratar de erosão hídrica, o desenvolvimento do processo erosivo está diretamente associado à presença de vegetação, sendo necessária maior cobertura vegetal para minimizar o carreamento de sedimentos.

Diversos estudos relacionam a vegetação com o controle da erosão, cujo papel é reduzir a carga cinética da chuva e do escoamento superficial, minimizando as perdas de solo (ARAÚJO *et al*, 2013; BERTONI, LOMBARDI NETO, 2014).

A declividade é outro parâmetro que influencia nas condições hidrológicas que propiciam o processo erosivo. O mapa de declividade (FIGURA 36) permite identificar áreas que possuem maior susceptibilidade à ocorrência de processos erosivos.

Figura 36 – Mapa de declividade da área de estudo

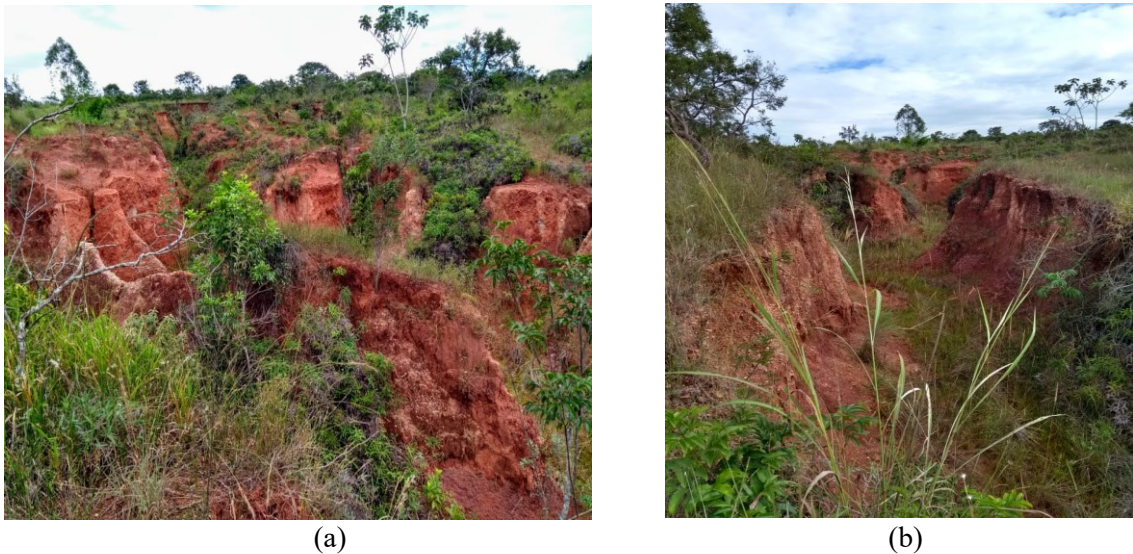


Fonte: Autor.

A maior parte da área imageada apresenta relevo ondulado (8 – 20%) ou suave ondulado (3 – 8%).

Considerando a bacia de contribuição, há predominância do relevo ondulado, sendo perceptível na cabeceira da voçoroca declividades com relevo fortemente ondulado. A alta declividade percebida na cabeceira da voçoroca e em algumas seções das ramificações laterais e do canal principal são indiciadas pela alta profundidade do processo erosivo, formando seções com paredes verticais (FIGURA 37).

Figura 37 – Paredes verticais no canal principal (a) e nas ramificações (b) da voçoroca



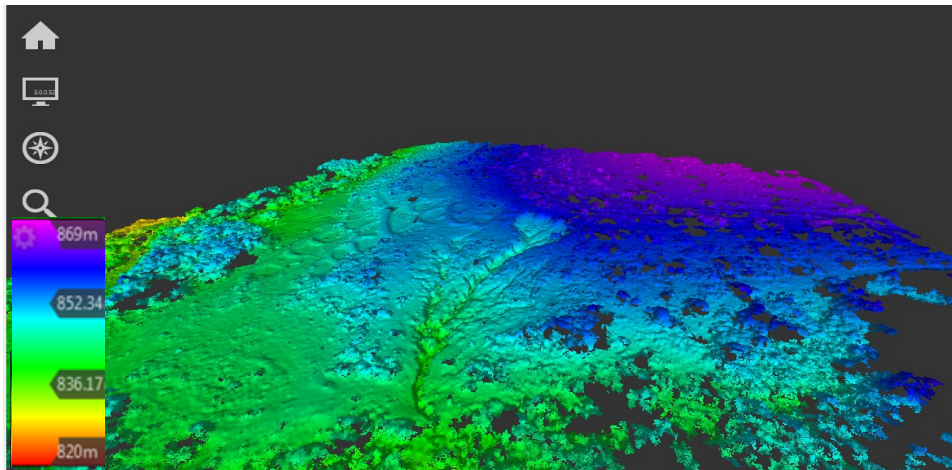
Fonte: Autor.

Segundo Alves (2007), a rampa principal da bacia de contribuição da voçoroca apresenta uma declividade de 6%, porém Giffoni (2010) destaca que os processos erosivos tendem a ocorrer em áreas com declividade média a alta. Sob tal aspecto, a declividade se torna variável de influência no processo erosivo em áreas com relevo ondulado e/ou forte-ondulado e cujo comprimento do talvegue seja grande o suficiente para gerar escoamento superficial com alta carga cinética.

Aspectos como a conversão do arquivo .LAS para o formato *raster* pode ter influenciado nos resultados do mapeamento de declividade, sendo importante avaliar os processos de conversão considerando o tamanho dos pixels. Para este estudo considerou-se uma conversão com tamanho de pixel de 3 metros, o que pode ter impedido uma melhor representação da declividade nos canais da voçoroca. Dessa forma, é importante se atentar a todos os processos realizados nas ferramentas de SIG para que os mesmos não gerem limitações nas análises.

A nuvem de pontos (FIGURA 38) permitiu a visualização de um modelo de superfície a partir dos padrões de altitude da área imageada utilizando a ferramenta AutoCAD.

Figura 38 – Representação hipsométrica da nuvem de pontos 3D



Fonte: Autor.

Na ferramenta *ArcGis 10.2*, foi possível realizar uma projeção do ortomosaico sobre o modelo digital de superfície (FIGURA 39), permitindo uma visualização próxima à realidade do processo erosivo em estudo.

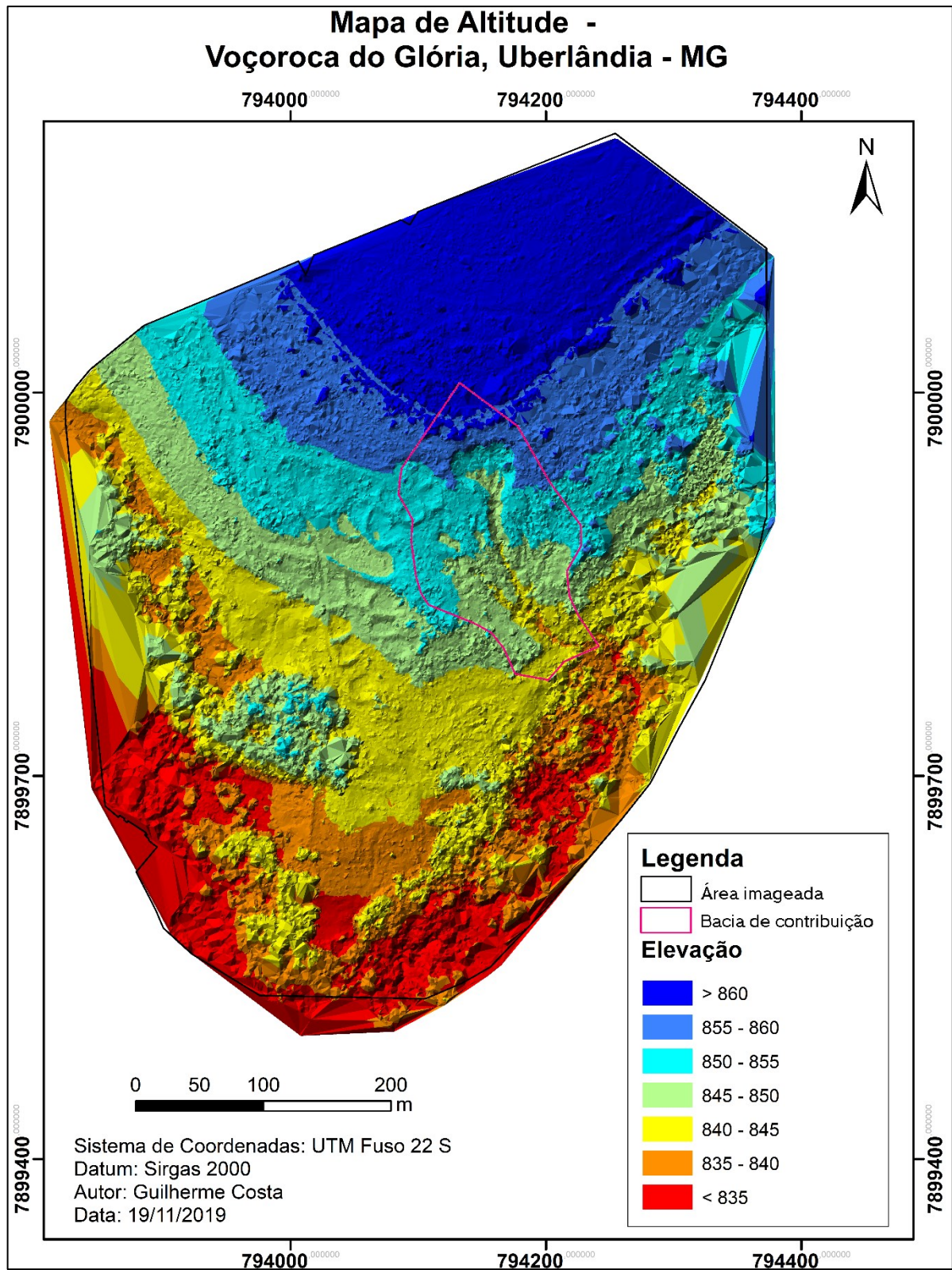
Figura 39 – Projeção do ortomosaico sobre a nuvem de pontos



Fonte: Autor.

Com o modelo digital de superfície foi criado um modelo numérico de elevação (FIGURA 40) com 8 classes de altimetria. O ponto mais alto detectado está a uma altitude de 868 metros e o ponto mais baixo a 821 metros acima do nível do mar.

Figura 40 – Mapa hipsométrico da área de estudo



Fonte: Autor.

O canal erodido está compreendido entre as classes 835-840 e 850-855 metros, sendo possível perceber a interrupção da classe de altitude da voçoroca com a classe das áreas vizinhas.

O mapa hipsométrico foi produzido a partir de um modelo digital de superfície (MDS) que considera a vegetação e edificações, interferindo dessa forma nas inferências realizadas, sugerindo-se aplicar técnicas de filtragem para construção de um MDT fiel a representação topográfica.

Oliveira *et al.* (2017) afirma que o MDT possui aspectos mais suave e homogêneo que o MDS, pois o processo de filtragem remove feições como edificações e vegetação, porém áreas com alta variação de declividade e densa cobertura vegetal acarretam em erros, sendo necessário aprimorar o processo de filtragem.

Devido a algumas inconsistências na nuvem de pontos, o mapa hipsométrico apresentou falhas na área onde houve ausência de pontos 3D calculados, sendo possível realizar um melhor processo de filtragem, ou realizar a tentativa de novo processamento considerando a necessidade da maior produção de pontos 3D ou uma interpolação mais adequada dos mesmos.

Os processos de filtragem e o reprocessamento das imagens para geração de uma nova nuvem de pontos não foram contemplados nessa pesquisa. A maior parte das falhas na geração de pontos 3D não afetou a principal área de interesse neste estudo, que foi a área compreendida pela bacia de contribuição da voçoroca, dessa forma, não se justifica a necessidade dessas correções.

Em aspectos gerais, as geotecnologias apresentaram limitações e potencialidades neste estudo. As principais limitações observadas são associadas a aspectos intrínsecos ao uso das geotecnologias, como posicionamento GNSS em áreas vegetadas, processamentos internos em ferramentas de processamento digital de imagens e SIG, entre outros já discutidos.

Em contraparte, as potencialidades de aplicação são grandes, devendo se atentar bastante aos objetivos finais dos estudos, considerando a necessidade de realização de um planejamento sólido e que contemple o máximo possível de informações antes do uso destas tecnologias.

Aspectos do posicionamento GNSS, processamento das imagens, geração de ortomosaico e nuvem de pontos possibilitam sucessivas análises quanto aos processos erosivos, porém não isentam da necessidade de visitas a campo, dessa forma, funcionam como ferramentas de suporte às análises ambientais, que podem ser de grande valia na compreensão desses processos de degradação do solo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O referente estudo permitiu demonstrar a aplicabilidade de variadas geotecnologias na avaliação de processos erosivos, permitindo inferir distintas análises a partir dos produtos fotogramétricos produzidos.

Para atingir os objetivos propostos, este estudo foi delineado em várias etapas, iniciando-se pela escolha da área de estudo, depois pelo levantamento de pontos de apoio fotogramétrico utilizando do posicionamento GNSS, seguido do levantamento e processamento aerofotogramétrico e por fim nas aplicações dos produtos fotogramétricos em ferramentas de SIG.

O marco inicial foi realizar a delimitação e caracterização da área de estudo. A área de estudo consistiu em uma voçoroca em estágio avançado de desenvolvimento, tendo a chuva como principal agente erosivo. Tal escolha foi baseada na facilidade de desenvolvimento da pesquisa e importância de se elaborar um programa de recuperação da área degradada.

Com a delimitação da área de estudo, deu-se direcionamento a aplicação do posicionamento GNSS, tendo-se como primeira etapa o planejamento do levantamento GNSS.

O principal aspecto do planejamento GNSS foi escolher feições fotoidentificáveis, sugerindo-se as que estejam localizadas em regiões abertas, evitando dessa forma erros associados ao multicaminhamento, o que não foi possível de ser atendido em dois pontos de apoio fotogramétrico deste estudo.

Na impossibilidade de escolher regiões abertas, deve-se considerar metodologias para minimizar os efeitos de multicaminho, sendo que a associação do posicionamento GNSS com técnicas de topografia é o método mais simples.

Com o planejamento delineado, fez-se a realização do levantamento GNSS e do pós-processamento dos dados. A partir das coordenadas processadas dos pontos de apoio fotogramétrico, fez-se inferências a respeito das ferramentas de pós-processamento utilizadas.

Uma análise comparativa permitiu identificar vantagens e desvantagens das ferramentas utilizadas. O IBGE-PPP apresentou algumas desvantagens sobre o GNSS *Solutions*TM, porém, a gratuidade de uso da primeira ferramenta se apresentou como uma vantagem relevante.

Através das inferências realizadas, conclui-se que o IBGE-PPP é dependente do tempo de rastreio e do uso de receptores de dupla frequência para a obtenção de coordenadas pós-processadas em padrões de alta acurácia, sendo também incapaz de alterar as estratégias de processamento.

Através dos resultados obtidos, conclui-se que a ferramenta IBGE-PPP tem capacidade de processar dados com altos padrões de acurácia e precisão – com desvios-padrão de ordem centimétrica nas três coordenadas – em levantamentos com receptores de dupla frequência e tempo de rastreamento superior a duas horas.

A ferramenta GNSS *Solutions*TM apresentou pequenas discrepâncias no processamento dos pontos de controle, sendo que o tempo de rastreamento não foi de grande influência na precisão.

Através dos resultados observados, conclui-se que coordenadas com padrões de alta acurácia – com desvios-padrão de ordem centimétrica ou milimétrica – podem ser obtidas considerando um levantamento relativo com base de dupla frequência e tempo de rastreamento superior a duas horas e *rovers* de simples frequência, com tempo mínimo de rastreamento de 30 minutos considerando linhas de bases curtas.

O processo de obtenção de coordenadas precisas a partir do posicionamento GNSS se dá a partir de um planejamento sólido. Dessa forma, a ausência de aspectos que se julgam importantes considerar de forma prévia em um processo de levantamento GNSS, podem influenciar nos resultados finais da etapa de pós-processamento.

Tal ocorrência pode ser evidenciada nesse trabalho. O desconhecimento das limitações da ferramenta de pós-processamento IBGE-PPP quanto a capacidade de alteração das estratégias de processamento interferiu na obtenção de coordenadas com alta precisão e acurácia nos pontos com menor tempo de rastreamento.

A incapacidade de alterar estratégias, limita a ferramenta apenas ao posicionamento absoluto, desconsiderando totalmente aspectos do planejamento de levantamento GNSS como a definição de levantamento relativo. Entre os principais referenciais para planejamento do posicionamento GNSS, não existem indicações de se considerar de forma prévia, as ferramentas de uso para pós-processamento de dados.

Manuais que deveriam ser orientativos, ao desconsiderarem nuances que possam parecer banais à profissionais da área, mas não para iniciantes e/ou inexperientes, pode afetar de forma negativa no sucesso de obtenção de dados espaciais.

Com tais observações, a principal recomendação é se atentar as limitações das ferramentas de pós-processamento já no planejamento de levantamento GNSS, elencando todos os aspectos possíveis, minimizando a necessidade de retorno à campo.

Com a determinação das coordenadas precisas dos pontos de apoio fotogramétrico, foi possível realizar o levantamento aerofotogramétrico.

O aerolevanteamento com drone e posterior processamento das imagens utilizando pontos de controle processados no GNSS *Solutions*TM resultaram em bons produtos fotogramétricos, corroborados pelo relatório de processamento na ferramenta Pix4D.

O aspecto mais relevante dessa etapa se dá pela necessidade de um planejamento prévio que deve estar alinhado ao planejamento de levantamento GNSS, considerando aspectos como sobreposição de imagens, altura de voo, distribuição e marcação dos pontos de apoio fotogramétrico.

A etapa de produção do ortomosaico e da nuvem de pontos é de grande importância, devendo-se atentar nas opções de processamento. A partir dos resultados obtidos, conclui-se que opções de processamento das imagens podem interferir nos produtos finais, como visto na dificuldade de interpolação de pontos 3D da nuvem de pontos.

A partir do processamento, os produtos fotogramétricos passam por validações estatísticas que corroboram a qualidade posicional dos produtos georreferenciados.

A qualidade posicional testada em termos de exatidão com o teste *t* de *Student* indicou que os produtos fotogramétricos não possuem tendência a erros sistemáticos nas três coordenadas cartesianas (x , y , x). A aceitação de que estatisticamente os erros sejam iguais a 0 indicou que o procedimento adotado foi eficiente para obtenção de produtos de boa qualidade.

A análise de acurácia com grau de confiança de 90% indicou que o ortomosaico e a nuvem de pontos podem ser enquadrados na maior escala conforme a PEC-PCD, permitindo produtos com boa representação do terreno.

Com base nas análises estatísticas, conclui-se que os subprodutos fotogramétricos apresentaram um alto grau de fidelidade ao contexto real, permitindo realizar inferências e análises sobre o objeto deste estudo: a voçoroca.

Com as devidas validações estatísticas e enquadramentos, os produtos fotogramétricos alimentaram ferramentas de SIG na obtenção de relevantes informações a respeito dos processos erosivos. Com base nas análises realizadas a partir do ortomosaico, conclui-se que a voçoroca está em um estágio avançado de desenvolvimento, apresentando solo exposto e regiões com cobertura vegetal.

As análises permitiram determinar aspectos morfométricos da voçoroca e realizar um comparativo com determinações semelhantes em estudos anteriores. Com base nos resultados e análises comparativas, conclui-se que houve ligeiro aumento da área da voçoroca, o que pode ser indicativo de aumento do processo erosivo.

Em aspectos de classificação, conclui-se que a voçoroca é definida como grande de acordo sua profundidade e pequena de acordo sua bacia de contribuição. A voçoroca possui

uma cabeceira em forma de leque, sendo conectada à rede de drenagem próxima, indicando dessa forma que o processo erosivo pode influenciar em aspectos de qualidade das águas superficiais da Bacia do Córrego do Glória.

A partir das observações e discussões a respeito das ramificações laterais da voçoroca, conclui-se que a disposição dos canais laterais está associada à aspectos de relevo e natureza do solo. Alguns sulcos e ravinas que compreendem as ramificações laterais não apresentaram conexão aparente com o canal principal da voçoroca, dessa forma pode-se dizer que tal descontinuidade entre os canais seja indicativo de processos de erosão em dutos.

A ocorrência de solo exposto na porção sudoeste da bacia de contribuição, associada à maior tendência erosiva nas ramificações laterais do lado esquerdo indica a necessidade de atenção para que não ocorra evolução dos canais erosivos em termos de tamanho.

A partir das observações dos aspectos de declividade, conclui-se que a voçoroca apresenta declividade forte em sua cabeceira e em porções dos canais, onde se estabeleceram paredes verticais devido a profundidade do processo erosivo. A bacia de contribuição associada a baixa declividade da vertente não é suficiente para provocar um escoamento superficial com grande quantidade de energia, indicando, dessa forma, que processos de erosão em dutos e, ocasionalmente, solapamentos possuem maior influência no aumento do processo erosivo.

Com todas as aplicações das geotecnologias apresentadas, conclui-se que o conhecimento das observáveis, dos erros envolvidos, das metodologias de processamento, de aspectos dos métodos de posicionamento GNSS, da aerofotogrametria e das aplicações de SIG foram importantes, auxiliando o entendimento dos resultados obtidos, identificando potencialidades e limitações das tecnologias frente à avaliação de processos erosivos.

De forma geral, a aplicação das geotecnologias apresentou algumas limitações. Por meio dos resultados, conclui-se que a aplicação da fotogrametria com pontos de apoio fotogramétrico em áreas com vegetação mais densa possa ser influenciada por efeitos de multicaminhamento na etapa de posicionamento GNSS para obtenção das coordenadas precisas.

Conclui-se também que os processamentos internos nas ferramentas de processamento digital das imagens e de SIG podem influenciar nos resultados finais limitando análises sobre os processos erosivos. Dessa forma, é importante se atentar aos procedimentos de processamento interno dos *softwares*, potencializando seus resultados.

Quanto as aplicações nas ferramentas de SIG, as principais limitações observadas quanto aos processos erosivos estavam associadas à dificuldade na obtenção de informações a respeito da natureza do solo, como aspectos de textura e friabilidade.

Sob aspectos gerais, as limitações das geotecnologias na avaliação de processos erosivos existem, porém podem ser contornadas a partir de um planejamento que contemple estratégias e o máximo de informações antes do uso de tais tecnologias.

O uso das geotecnologias na avaliação de processos erosivos não isenta da necessidade de visitas de campo e de análises específicas de solo, porém possibilitam diversas análises que dão suporte no entendimento da situação de estudo.

É considerável perceber que a aplicação das geotecnologias é importante, visto que as aplicações das mesmas acabam possibilitando a melhor compreensão do desenvolvimento de processos de erosão hídrica, permitindo análises mais profundas, que possibilitam uma melhor articulação na formulação de estratégias de proteção e recuperação de áreas com solos degradados.

Como sugestões a futuros trabalhos ficam a aplicação de técnicas de filtragem do MDS para geração de MDT, permitindo o cálculo de volumes em análises de monitoramento contínuo da área; avaliação da precisão do levantamento GNSS e eventual qualidade posicional do ortomosaico utilizando outras técnicas e *softwares* no levantamento GNSS, além do uso de diferentes tempos de rastreamento; e análises com séries temporais de imagens da voçoroca visando seu monitoramento contínuo.

REFERÊNCIAS

- AERO DRONE BRASIL. **Relatório de acurácia técnica:** composição e processamento de produtos fotogramétricos: duplicação do viaduto sobre a BR-040 / MG. Contagem: Aero Drone Brasil, 2017. Disponível em: https://www.aerodronebrasil.com/projetos/engesolo/topografiaceasa/Relatorio_de_Acuracia_Tecnica_032_2017..pdf. Acesso em: 9 nov. 2019.
- ALMEIDA, J. A. P. de; OLIVEIRA, P. J. de. **Sensoriamento remoto I.** São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, CESAD, 2010.
- ALMEIDA, M. S.; DAL POZ, W. R.. Posicionamento por ponto preciso e posicionamento relativo com GNSS: qual é o método mais acurado atualmente?. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 22, n. 1, p. 175-195, 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/bcg/v22n1/1982-2170-bcg-22-01-00175.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2019.
- ALVES, R. R. **Monitoramento dos processos erosivos e da dinâmica hidrológica e de sedimento de uma voçoroca:** estudo de caso na Fazenda do Glória na zona rural de Uberlândia-MG. 2007. 109 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/16269>. Acesso em: 15 set. 2018.
- ARANA, J. M.. O uso do GPS na determinação de altitudes ortométricas. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 2004, Florianópolis. **Anais [...]**. UFSC: Florianópolis, 2004. Disponível em: <http://www2.fct.unesp.br/docentes/carto/arana/cobrac2004.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2019.
- ARAÚJO, G. H. S.; ALMEIDA, J. R. de; GUERRA, A. J. T. **Gestão ambiental de áreas degradadas.** 12. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2017.
- ARAÚJO, T. P. de. **Estudo do desencadeamento das erosões lineares concentradas em uma área do município de São Pedro –SP.** 2011. 177 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-06122011-104236/pt-br.php>. Acesso em: 19 set. 2018.
- ABNT. **NBR 6.502:** define os termos relativos aos materiais da crosta terrestre, rochas e solos, para fins de engenharia geotécnica de fundações e obras de terra. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- BACCARO, C. A. D. Estudos geomorfológicos no município de Uberlândia. **Revista Sociedade e Natureza**, Uberlândia, ano 1, n. 1, p. 17-21, jun, 1989.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** 9. ed. São Paulo: Ícone, 2014.
- BESERRA NETA, L. C. **Análise evolutiva da paisagem da serra Tepequém - Roraima e o impacto da atividade antrópica.** 2007. 193 f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Petrologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

BIULCHI, D. F. **Uso de leguminosas arbóreas no controle da evolução de voçoroca no domínio do cerrado**. 2012. 280 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15952>. Acesso em: 25 set. 2018.

BORGES, R. O. *et al.* Utilização de drones de pequeno porte como alternativa de baixo custo para caracterização topográfica da infraestrutura de transportes no Brasil. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA*, 27., 2017, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Escola Naval, 2017. Disponível: <http://www.cartografia.org.br/cbc/2017/trabalhos/4/635.html>. Acesso em: 07 out. 2018

BOTELHO, R. G. M.. Planejamento ambiental em microbacia hidrográfica. *In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M.. (org.). Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações*. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. p. 269-300.

BRASIL. **Norma da especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais de defesa da força terrestre (ET-ADGV DEFESA F Ter)**. 2. ed. Brasília, DF: Ministério da Defesa. 2016. Disponível em: <http://www.geoportal.eb.mil.br/portal/index.php/inde2?id=140>. Acesso em: 30 abr. 2019.

BRASIL; IBAMA. **Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: técnicas de revegetação**. Brasília: IBAMA, 1990.

BRITO, A. O. **Estudos da erosão no ambiente urbano, visando planejamento e controle ambiental no Distrito Federal**. 2012. 78f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/10876>. Acesso em: 19 set. 2018.

CAMAPUM, J. C. *et al.* Processos erosivos. *In: CAMAPUM, J. C. et al. Processos erosivos no Centro-Oeste brasileiro*. Brasília: FINATEC, 2006.p. 39-91.

CAPECHE, C. L. *et al.* Degradação do solo e da água: impactos da erosão e estratégias de controle. *In: TAVARES, S. R. L. et al. Curso de recuperação de áreas degradadas: a visão da Ciência do Solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008. p. 105-132.

CARVALHO, G. N. *et al.* Influência do multicaminhamento de sinais dos satélites GNSS e do tempo de rastreamento na precisão do PPP para vértices de limites da NTGIR. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 10, n. 1, p. 11-26, mar. 2018. Disponível em: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/967>. Acesso em: 24 nov. 2019.

COELHO NETTO, A. L. Evolução de cabeceiras de drenagem no médio vale do rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a formação e o crescimento da rede de canais sob controle estrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, DF, ano 4, n.2, p.69-100, 2003. Disponível em: <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/25>. Acesso em: 27 nov. 2019.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia: para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013. 336p.

COXIM. **Voçoroca em Coxim-MS**. Coxim: Polícia Militar Ambiental, 2017. 1 Fotografia. Disponível em: <http://idest.com.br/images/noticias/2017/08/51911.jpg>. Acesso em: 5 nov. 2018.

CRUZ, L. M. **A geração de sedimentos e seus reflexos no assoreamento da PCH Piedade – Monte Alegre de Minas – MG**. 2012. 109f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/16144>. Acesso em: 23 set. 2018.

DJI. **Phantom 4 Pro Especificações**. [S. l.]: DJI, c2019. Disponível em: <https://www.dji.com/br/phantom-4-pro>. Acesso em: 1 jun. 2019.

DOCKHORN, E. S. **Comparação de dois tipos de solução no posicionamento com receptores GPS**. 2006. 67 f. Dissertação (Mestrado em Geomática) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/9606/ERIKADOCKHORN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 21 mar. 2019.

FARRET, J. C. *et al.* A precisão possível com GPS 11/CA em georreferenciamento: o desafio do multicaminho – análise de um receptor. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 13, n. 1, p.211-229, jan-jun, 2007. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/8253>. Acesso em: 21 mar. 2019.

FAVIS-MORTLOCK, D. **Water and soil splashed by the impact of a single raindrop**.UK: The Soil Erosion Site, 1995. 1 fotografia. Disponível em: <http://soilerosion.net/img/raindrop.jpg>. Acesso em: 02 Dez. 2018

FEATHERSTONE, W. E.; DENTITH, M. C.; KIRBY, J. F. Strategies for the accurate determination of orthometric heights from GPS. **Survey Review**, New York, v. 34, n. 267, p. 278-296, 1998. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/42428340_Strategies_for_the_Accurate_Determination_of_Orthometric_Heights_from_GPS. Acesso em: 11 nov. 2019.

FENDRICH, R. (org.). **Drenagem e controle da erosão urbana**. 4. ed. Curitiba: Universitária, 1997.

FERREIRA, F. R. **Propostas para a avaliação da acurácia altimétrica dos dados LIDAR**. 2019. 201 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-21112019-084218/publico/FlaviaRenataFerreiraCorr19.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2019.

FONTANA, S. **GPS: a navegação do futuro**. 2. ed. Porto Alegre: Mercado Aberto, 2002.

FORSMAN, M. **Point cloud densification**. 2011. 71 f. Master thesis (Master in Engineering Physic) – Department of Physics, Umeå University, Umeå, Sweden, 2011. Disponível em: <https://people.cs.umu.se/tfy98mfn/exjobb/report.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2019.

FUJIHARA, A. K. **Predição de erosão e capacidade de uso do solo numa microbacia do oeste paulista com suporte de geoprocessamento**. 2002. 136 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11142/tde-12112002-141046/pt-br.php>. Acesso em: 29 set. 2018.

GIFFONI, S. N. **Caracterização comportamental das feições erosivas na Bacia do Córrego Campo Alegre com base nos estudos geológico-geotécnicos - perímetro urbano de Uberlândia-MG**. 2010. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14147>. Acesso em: 28 out. 2018.

GOMES, A. M. de A.; TEIXEIRA, N. N. Análise da Diferença de Precisão de Coordenadas e Área Obtidas por Receptores GPS/GNSS de Navegação e Geodésico, Para Fins de Medições de Custos em PRAD. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. São Paulo, ano 2, v. 1., p. 174-184, jun. 2017. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/geografia/precisao-de-coordenadas>. Acesso em: 14mar. 2019.

GUERRA, A. J. T. **Dicionário geológico-geomorfológico**. 8. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1993.

GUERRA, A. J. T.. O início do processo erosivo. *In*: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. (org.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p. 17-55.

GROVES, P.D. **Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems**. 2. ed. Boston, MA: Artech House, 2013.

HASEGAWA, J. K.; ARRUDA JÚNIOR, E. R. de. Mosaico com imagens digitais. **Boletim Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 10, n. 1, p.31-50, jan-jun, 2004. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/bcg/article/download/1458/1212>. Acesso em: 16 mar. 2019.

HELMING, K. **Eroding rill in field in eastern Germany**. Germany, 1994.1 fotografia. Disponível em: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e1/Eroding_rill_in_field_in_eastern_Germany.jpg. Acesso em: 13 nov. 2018.

HILLEBRAND, F. L.; DAL' FORNO, G. L. Precisão de coordenadas planimétricas obtidas com receptores GNSS L1/L2 de pontos situados sob redes elétricas de alta tensão. *In*: SEMANA DA GEOMÁTICA, 5., 2014, Santa Maria, RS. **Anais [...]**. Santa Maria: Colégio Politécnico da UFSM, 2014, p. 51-61. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328027271_Precisao_de_coordenadas_planimetricas_obtidas_com_receptores_GNSS_L1L2_de_pontos_situados_sob_redes_eletricas_de_alta_tensao. Acesso em: 15 out. 2019.

HORUS. **Qual o GSD ideal para cada resultado?**. Florianópolis: Horus, 2018. Disponível em: <https://horusaeronaves.com/qual-o-gsd-ideal-para-cada-resultado/>. Acesso em: 01 ago. 2019

HUINCA, S. C. M. **Calibração relativa de antenas GNSS na BCAL/UFPR**. 2009. 130f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/24922>. Acesso em: 17 out. 2018.

IBGE. **Especificações e normas para levantamentos geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017a. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/normas_levantamentos_geodesicos.pdf. Acesso em: 05 fev. 2019.

IBGE. **Manual do Usuário Aplicativo Online IBGE-PPP Versão: Abril 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017b. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>. Acesso em: 15 out. 2019.

IBGE. **Recomendações para levantamentos relativos estáticos – GPS**. Rio de Janeiro: IBGE, 2008. Disponível em: http://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/recom_gps_internet.pdf. Acesso em: 09 dez. 2018

IBGE. **Serviço online para pós-processamento de dados GNSS (IBGE-PPP)**. Rio de Janeiro: IBGE, [201-]. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/default.shtm>. Acesso em: 09 dez. 2018.

INCRA. **Manual Técnico de Posicionamento: georreferenciamento de imóveis rurais**. 1.ed. Brasília: INCRA, 2013.

KÖPPEN, W. Das geographische system der klimate. *In*: KÖPPEN, W.; GEIGER, G. (ed.). **Handbuch der Klimatologie**. Gebrüder: Borntraeger, 1936. p. 1-44.

LEAL, P. C. B.; RODRIGUES, S. C. Uso e comparação do método de estaqueamento, o método DGPS e geoprocessamento no monitoramento de uma área erosiva na Fazenda do Glória – Uberlândia-MG. **GEOUSP – Espaço e Tempo**, São Paulo, n. 29, p. 18-35. 2011. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/74184/77827>. Acesso em: 06 set. 2019.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

LOCH, C.; LAPOLLI, E. D. **Elementos básicos da fotogrametria e sua utilização prática**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1989.

LUHMANN, T. *et al.* **Close Range Photogrammetry and 3D Imaging**. 3. ed. Germany: Walter De Gruyter Inc., 2019

MACEDO, R. K.. Equívocos e propostas para a avaliação ambiental. *In*: TAUK-TORNISIELO, M.; GOBBI, N.; FOWLER, H. G.. **Análise ambiental: uma visão multidisciplinar**. 2. ed. São Paulo: Editora da UNESP, 1995. p. 33-44

MARCHETTI, D. A. B.; GARCIA, G. J. **Princípios de fotogrametria e fotointerpretação**. São Paulo, Livraria Novel S.A., 1989.

MENDONÇA, R. A. M. *et al.* **Uso das Geotecnologias para Gestão Ambiental: Experiências na Amazônia Meridional**. Cuiabá: ICV, 2011.

MERCHANT, D. C. Spatial accuracy standards for large scale line maps. *In: AMERICAN CONGRESS ON SURVEYING AND MAPPING*, 42., 1982, Denver, Colorado. **Proceedings** [...]. Falls Church, VA: Technical Papers of the ACSM, 1982, p.222-231.

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

MUGUIO, M. R. **Implantação e análise da estação GNSS para o monitoramento contínuo da barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá**. 2012. 114f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/29626?show=full>. Acesso em: 16 out. 2018.

NEVES, R. L. S. **Avaliação da contaminação de óleo no ambiente estuarino da Baía de Guanabara (RJ) pela determinação fluorimétrica de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) na bÍlis de peixes *Mugilliza***. 2006. 121 f. Dissertação (Mestrado em Química Analítica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=8681@1>. Acesso em: 13 set. 2018.

NOVAIS, G. T.; BRITO, J. L. S.; SANCHES, F. O. Unidades climáticas do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, ano 14, v. 23, p. 223-243, jul./dez. 2018. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/58520/36660>. Acesso em: 30 Ago. 2019

OLIVEIRA, D. R. *et al.* Geração de modelo digital do terreno a partir de imagens obtidas por veículos aéreos não tripulado. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 69, n. 6, p. 1143-1151, jun. 2017. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44316>. Acesso em: 29 nov. 2019.

OLIVEIRA, F. F.; SANTOS, R. E. S. de; ARAUJO, R. C. de. Processos erosivos: dinâmica, agentes causadores e fatores condicionantes. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, Itapetininga, v. 5, n.3, p. 60-83, abr./jun. 2018. Disponível em: <https://periodicos.itp.ifsp.edu.br/index.php/IC/article/view/699/928>. Acesso em: 19 set. 2018.

OLIVEIRA, M. A. T.. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. *In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M.. (org.). Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações*. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p. 57-99.

PANAGOS, P. *et al.* Global rainfall erosivity assessment based on high temporal resolution rainfall records. **Nature**, London, v.7, n.4175, p. 1-12, 2017. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-04282-8>. Acesso em: 28 Out. 2018.

PAREDES, E. A. **Introdução à aerofotogrametria para engenheiros**. Maringá: Editora UEM, 1987.

PENA, R. F. A. **Exemplo da formação de ravinas no relevo**. In: BRASIL Escola, [S. l.], [201-?]. 1 fotografia. Disponível em: <https://s3.static.brasilecola.uol.com.br/img/2014/08/ravina.jpg>. Acesso em 03 de Nov. de 2019

PERDIGÃO, T. D.; SANTOS, A. P. Avaliação da acurácia a partir de diferentes tempos de rastreamento utilizando a solução PPP on-line do IBGE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 3., 2010, Recife. **Anais [...]**. Recife: CTG/UFPE, 2010. p. 1-7.

PEREIRA JUNIOR, R. A. **Uso de barreiras físicas em voçoroca e seus efeitos na retenção de sedimentos: um estudo de caso**. 2013. 99 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geografia. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/16224>. Acesso em: 23 ago. 2018.

PETRUCCI, E. **Características do clima de Uberlândia-MG: análise da temperatura, precipitação e umidade relativa**. Dissertação. 2018. 245 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/20810>. Acesso em: 03 dez. 2018.

PIX4D. **Pix4D mapper 4.1: user manual**. Lausanne, Switzerland: Pix4D AS, 2017. Disponível em: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204272989-Offline-Getting-Started-and-Manual-pdf.pdf>. Acesso em: 14 Jul. 2019

PIX4D. **How many Points are generated during step 2. Point Cloud and Mesh?**. Lausanne, Switzerland: Pix4D AS, c2011-2019b. Disponível em: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/203269885-How-many-Points-are-generated-during-step-2-Point-Cloud-and-Mesh>. Acesso em: 11 Nov. 2019.

PIX4D. **Menu Process > Processing Options... > 2. Point Cloud and Mesh > Point Cloud**. Lausanne, Switzerland: Pix4D AS, c2011-2019a. Disponível em: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557799-Menu-Process-Processing-Options-2-Point-Cloud-and-Mesh-Point-Cloud>. Acesso em: 11 Nov. 2019.

REDWEIK, P. **Fotogrametria aérea**. Lisboa: Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/268329721>. Acesso em: 03 nov. 2018.

ROCHA, E. A. V. **Avaliação do processo evolutivo e da dinâmica erosiva: um estudo de caso no município de Ipameri-GO**. 2007. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geografia. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/16268>. Acesso em: 15 set. 2018.

ROCHA, E. A. V. **Processos de voçorocamento na bacia hidrográfica do ribeirão Vai Vem (Ipameri-GO)**. 2012. 171f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15947>. Acesso em: 30 out. 2019.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015

SANTOS, L. F. B. dos. **Avaliação de modelo digital de terreno através de VANT em planícies pantaneiras**. 2016. 53 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Faculdade de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2016

SCHENK, T. **Introduction to photogrammetry**. Columbus, OH: The Ohio State University, 2005. Disponível em: <http://www.mat.uc.pt/~gil/downloads/IntroPhoto.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2019.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods and applications**. Berlin: Walter de Gruyter, 2003.

SEGANTINE, P. C. L. **Estudo do sinergismo entre os sistemas de informação geográfica e o de posicionamento global**. 2013. 237 f. Tese (Livre docência) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/18/tde-02102007-092045/pt-br.php>. Acesso em: 16 out. 2018.

SILVA, A. H. da. **Medidas física e biológicas com potencial para uso em recuperação de voçoroca no município de Uberlândia-MG**. 2010. 134 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/16095>. Acesso em: 03 out. 2018.

SILVA, D. C. *et al.* Qualidade de ortomosaicos de imagens de VANT processados com os softwares APS, PIX4D e PHOTOSCAN. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO*, 5., 2014, Recife. **Anais [...]**. Recife:UFPE, 2014, p. 747-754. Disponível em: <https://www3.ufpe.br/geodesia/imagens/simgeo/papers/150-577-1-PB.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2018.

SILVA, G.G.; OLIVEIRA, L.N. de. Análise da suscetibilidade e potencial à erosão laminar no município de São Miguel do Araguaia – GO. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 17., 2015, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: INPE, 2015, p. 6511-6518. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1412.pdf>

SILVA, J. B. da. **Do diagnóstico às unidades geodinâmicas e de fragilidade ambiental: uma contribuição a educação e gestão ambientais em Veríssimo-MG**. 2016. 185f. Tese (Doutorado em Geografia e Gestão do Território) – Instituto de Geografia. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/16018>. Acesso em: 13 set. 2018

SILVA, J. E. C. F.; BOTELHO, M. F. Cadastro Ambiental Rural utilizando imagem de drone aerofotogramétrico. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 9, n. 2, p. 73-84, jun. 2017. Disponível em: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/963>. Acesso em: 25 abr. 2019

SOPCHAKI, C.H. *et al.* Verificação da qualidade de ortomosaicos produzidos a partir de imagens obtidas com aeronave remotamente pilotada sem o uso de pontos de apoio.

RevistaRa'eGa, Curitiba, v.43, p. 200 -214 , fev. 2018. Disponível em:

<https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/56564>. Acesso em: 16 nov. 2019.

SOUZA, E. M. de. **Efeito de multicaminho de alta frequência no posicionamento relativo GPS estático: detecção e atenuação utilizando wavelets**. 2004. 141 f. Dissertação

(Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2004. Disponível em: http://www2.fct.unesp.br/pos/cartografia/docs/teses/d_souza_em.pdf.

Acesso em: 26 jun. 2019.

SPECTRA PRECISION DIVISION; ASHTECH SAS. **GNSS Solutions™**: Reference manual. Westminster, CO: Spectra Precision Division, 2012?. Disponível em:

https://ashgps.com/2/GNSS%20Solutions/manuals/English/GNSSolutions_RM_F_en.pdf.

Acesso em: 13 fev. 2019.

TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria básica**: introdução. Santa Catarina: UDESC, 2009. Disponível em:

http://www.faed.udesc.br/arquivos/id_submenu/891/introducao_a_fotogrametria.pdf. Acesso em: 16 fev. 2019.

TOMMASELLI, A. M. G. *et al.* Fotogrametria: aplicações a curta distância. *In*:

MENEGUETE JÚNIOR, M.; ALVES, N. (org.), **FCT 40 anos, Perfil Científico – Educacional**, Presidente Prudente, 1999.p. 147-159. Disponível em:

https://www.researchgate.net/profile/Mauricio_Galo/publication/267035028_FOTOGRAFIA_aplicacoes_a_curta_distancia/links/544282270cf2a76a3ccb00e7/FOTOGRAFIA-aplicacoes-a-curta-distancia.pdf. Acesso em: 1 nov. 2018.

TOPCON. **Universal Tracking**: the truly scalable technology. USA: Topcon, c2019.

Disponível em: <https://www.topconpositioning.com/insights/universal-tracking-truly-scalable-technology>. Acesso em: 9 dez. 2019.

TSCHIEDEL, A. F. *et al.* Construção de um modelo digital de superfície de uma voçoroca a partir do uso de drone. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE

SEDIMENTOS, 13., 2018, Vitória. **Anais [...]**. Vitória: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2018.p. 1-8. Disponível em: <http://anais.abrh.org.br/works/4064>. Acesso em: 15 set. 2018.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Types of erosion**. USA: United Nations Environment Programme,1994. 1 desenho. Disponível em:

https://www.researchgate.net/figure/Four-stage-Erosion-Process_fig1_263087967. Acesso em: 7 nov. 2018.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. **World Resources 1992-93**: a guide to the global environment. Nova York: Oxford University Press, 1993. Disponível em:

https://wriorg.s3.amazonaws.com/s3fs-public/pdf/worldresources1992-93_bw.pdf. Acesso em: 13 set. 2019.

WOLF, P.R.; DEWITT, B.A. **Elements of fotogrammetry:** with Application in GIS. 3. ed.
USA: McGraw-Hill, 2004.