

PEDRO HENRIQUE ARAÚJO ALMEIDA

**USO DE VANT NO ESTUDO DA DINÂMICA TEMPORAL DAS ALTERAÇÕES NA
PAISAGEM DE AMBIENTE GLACIAL NA ANTÁRTICA MARÍTIMA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

A447u
2019
Almeida, Pedro Henrique Araújo, 1989-
Uso de Vant no estudo da dinâmica temporal das alterações
na paisagem em ambiente glacial na Antártica Marítima / Pedro
Henrique Araújo Almeida. – Viçosa, MG, 2019.
x, 72 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Marcio Rocha Francelino.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Fotogrametria aérea - Antártica. 2. Monitoramento
ambiental - Antártica. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e
Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 526.982

PEDRO HENRIQUE ARAÚJO ALMEIDA

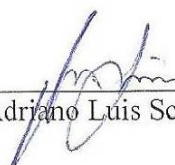
USO DE VANT NO ESTUDO DA DINÂMICA TEMPORAL DAS ALTERAÇÕES NA
PAISAGEM DE AMBIENTE GLACIAL NA ANTÁRTICA MARÍTIMA

Dissertação apresentada à Universidade Federal
de Viçosa, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição
de Plantas, para obtenção do título de *Magister
Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2019.



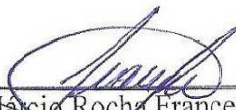
Mayara Daher de Paula



Adriano Luís Schünemann



Elpídio Inácio Fernandes Filho
(Coorientador)



Márcio Rocha Francelino
(Orientador)

*Ao meu querido avô Aristeu (in memoriam),
dedico.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa e todos seus colaboradores por proporcionar toda estrutura e condições para o desenvolvimento dessa pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo concedimento da bolsa de Mestrado.

À todos os amigos Antárticos, que de alguma forma contribuíram para a obtenção dos dados dessa pesquisa, durante as Operações Antárticas XXXVI e XXXVII.

Ao orientador e amigo Márcio Rocha Francelino pela amizade e pelas diversas oportunidades de trabalho e aprendizagem.

Ao professor Elpídio Inácio Fernandes Filho por abrir as portas do Labgeo e por todo o ensinamento ao longo desses anos de trabalho.

Ao INCT-Criosfera, na pessoa do professor Carlos Ernesto R. Schaefer, pela oportunidade de integrar a equipe durante as Operações Antárticas XXXIII, XXXIV, XXXV, XXXVI e XXXVII.

Aos amigos do Labgeo e Terrantar pela amizade e troca de conhecimento durante todos esses anos de trabalho.

À Marinha do Brasil pelo apoio logístico durante os trabalhos de campo.

À minha amiga e companheira Raíssa R. Almeida, por todos esses anos de carinho e parceria.

Aos familiares pelos ensinamentos e pelos conselhos.

Aos amigos da República Sítio Boa Fé e República Estância pela amizade durante esses anos de Viçosa.

Ao Projeto Geoespaço, pelos dados da base GPS situados na Península Keller.

BIOGRAFIA

PEDRO HENRIQUE ARAÚJO ALMEIDA, filho de Paulo César Silveira de Almeida e Mariza Araújo Almeida, nasceu no dia 05 de outubro de 1989 em Barbacena, Minas Gerais.

Iniciou sua trajetória profissional ao concluir curso Técnico em Ecologia e Meio Ambiente em julho de 2008 pela antiga Escola Agrotécnica Federal de Barbacena, hoje Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais - Campus Barbacena.

Concluiu seu curso de graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa em Dezembro de 2016. Deu início ao mestrado em Solos e Nutrição de Plantas no ano de 2017 pela mesma universidade.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
Introdução Geral	1
Referências bibliográficas	3
CAPÍTULO 1	4
Resumo.....	4
Abstract	5
1. Introdução.....	6
2. Material e Métodos	8
2.1 Área de estudo	8
2.2 Metodologia utilizada.....	9
2.2.2 Obtenção das imagens aéreas:	10
2.2.2 Obtenção dos pontos de controle e de validação:	12
2.2.3 Processamento Fotogramétrico:.....	14
2.2.4 Triangulação aérea	14
2.3.5 Geração dos Modelos Digitais de Superfície e de Terreno	14
2.2.6 Geração do ortofotomosaico de imagens aéreas	15
2.3 Análise da qualidade dos produtos gerados:.....	15
2.3.1 Análise do Padrão de distribuição espacial	16
2.3.2 Análise de tendência.....	17
2.3.3 Análise de precisão.....	17
3. Resultados e discussão	19
3.1. Análise dos processamentos das imagens	19
3.2 Análise da dinâmica de cobertura na Península Keller	30
4. Conclusão	35
5 - Referências bibliográficas	36
CAPÍTULO 2	39
Resumo.....	39
Abstract	40
1. Introdução.....	41
2. Material e Métodos	43
2.1 Área de estudo	43
2.1.1 Sítio de estudo nº 1 - Área adjacente às geleiras de circo	45

2.2.2 Sítio de estudo nº 2 - Morro Flagstaff	47
2.2.3 Sítio de estudo nº 3 - Área próxima ao Refúgio Ipanema	48
2.2.4 Sítio de estudo nº 4 - Área próxima ao Refúgio 2.....	49
2.3 Metodologia empregada:	51
2.3.1 Levantamento Laser Scanner Terrestre (LST).....	51
2.3.2 Levantamento Aéreo	52
2.4 Pós Processamento dos dados.....	53
2.4.1 Dados do Laser Scanner Terrestre	53
2.4.2.Dados dos aerolevantamentos.....	53
2.4.3. Comparação tridimensional das nuvens de pontos	54
3. Resultados e discussão	55
3.1. Laser scanner	55
3.1.1 Sítio 1.....	56
3.1.2 Sítio 2.....	61
3.1.3 Sítio 3.....	63
3.1.4 Sítio 4.....	64
3.1.5 Área do entorno da EACF	67
4. Conclusão	67
5. Referências Bibliográficas.....	69
Conclusões Gerais.....	72

RESUMO

ALMEIDA, Pedro Henrique Araújo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Uso de Vant no estudo da dinâmica temporal das alterações na paisagem de ambiente glacial na Antártica Marítima.** Orientador: Márcio Rocha Francelino. Coorientadores: Elpídio Inácio Fernandes Filho e Carlos Ernesto Reynald Schaefer.

O uso de novas tecnologias de sensoriamento remoto em trabalhos e estudos de monitoramento ambiental, potencializou a coleta de informações resultando em produtos mais precisos e detalhados. Novos equipamentos e *softwares* foram concebidos para minimizar esforços durante a geração e processamento de dados cartográficos, permitindo sua aplicação nas diferentes áreas da geociência. Na Antártica, grande parte da base de dados utilizada em trabalhos de monitoramento ambiental, é formada por imagens aéreas e orbitais. Devido ao alto custo operacional, a utilização de aeronaves apresenta restrições para a concepção de séries temporais. Já imagens orbitais apresentam a desvantagem de utilização em locais de alta incidência de nuvens, como ocorre em regiões da Antártica Marítima. Sendo assim, a busca por soluções alternativas torna-se necessária para o aprofundamento dos trabalhos de monitoramento ambiental dessa região. O desenvolvimento de equipamentos que utilizam a tecnologia de dados *LIDAR* representou uma evolução na captura e elaboração de dados topográficos, sendo esta técnica utilizada no ano de 2015 para realizar a atualização cartográfica da Península Keller, localizada na Ilha Rei George. Em curto intervalo de tempo, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) também conhecidos como Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA), ganharam destaque em mapeamentos e estudos cartográficos. Permitiram a redução dos custos operacionais de levantamentos aerofotogramétricos, com grande potencial de uso em áreas remotas e inóspitas como a Antártica. Neste sentido o presente trabalho teve os seguintes objetivos: i) elaborar uma base cartográfica detalhada para a Península Keller utilizando dados de RPA, atestando a qualidade dos produtos gerados de acordo com as normas brasileiras de cartografia; ii) utilizar dados *Lidar* para avaliação da dinâmica geomorfológica da Península Keller, identificando e caracterizando os processos atuantes. Para tanto, utilizou-se dados topográficos obtidos nos anos de 2015, 2018 e 2019, além de imagens aéreas históricas e obtidas pelo RPA. Para a restituição fotogramétrica, foi utilizado *software* baseado em processamento de dados da técnica Estrutura do Movimento (SfM), sendo produzidos dois ortofotomosaicos e um Modelo Digital de Elevação (MDE). As técnicas empregadas nesse trabalho permitiram a obtenção de uma base de dados detalhada da Península Keller, o que possibilitou avaliar os processos de transformação

ambiental atuantes. Os produtos gerados apresentam grande potencial de uso no monitoramento ambiental dessa área, permitindo aprofundar os estudos relacionados a dinâmica e ecologia dos ecossistemas terrestres da Península Keller.

ABSTRACT

ALMEIDA, Pedro Henrique Araújo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Use of Vant in the study of the temporal dynamics of changes in the landscape of glacial environment in the Antarctic Maritime.** Adviser: Márcio Rocha Francelino. Co-advisers: Elpídio Inácio Fernandes Filho and Carlos Ernesto Reynald Schaefer.

The use of new remote sensing technologies in environmental monitoring studies has enhanced the collection of information and has enabled its accurate and detailed data collection. New equipment and software were designed to minimize efforts in cartographic data generation, allowing more improvements in scale and expansion of its applications in several areas. In Antarctica, most of the database used in environmental monitoring works is formed by aerial and orbital images. Due to the high operational cost, the use of aircraft presents restrictions regarding the design of time series. Orbital images have the disadvantage of being used in places with a high cloud incidence, as occurs in regions of the Antarctic Sea. Therefore, the search for alternative solutions becomes necessary to deepen the environmental monitoring work in this region. The development of equipment using data technology LIDAR (Light Detection And Ranging) represented an evolution in the capture and elaboration of topographic data, being this technique used in the year of 2015 to update Peninsula Keller's cartographic data. In a short time, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) also known as Remotely Piloted Aircraft (RPA) have gained prominence in mapping studies. The aerial photogrammetric surveys are technically and financially more feasible with the development of these equipments. They have great use potential in remote and inhospitable areas such as Antarctica, given the low acquisition and operation costs. In this sense, the present work had the following objectives: i) to elaborate a detailed cartographic base for the Keller Peninsula using RPA data, and to certify the quality of the products generated according to Brazilian cartography standards: ii) to use Lidar data to evaluate the geomorphological dynamics of the Keller Peninsula, identifying and characterizing its active processes. For that, two topographic surveys were carried out in the years 2018 and 2019, in addition to using data obtained in the year 2015 for comparison purposes. An RPA was used to obtain two orthophotomosaics and a Digital Elevation Model. The SfM processing technique was chosen for the processing of aerial images, while software using cloud of points were used for data processing and identification of altimetric discrepancies. The use of these techniques allowed the achievement of a detailed data base, allowing the evaluation of the dynamics of the present landscape transformation processes. Such data sets will allow the deepening of the environmental monitoring works of this region, allowing the refining of

existing databases, as well as the deepening of studies related to the dynamics and ecology of terrestrial ecosystems of the Keller Peninsula.

Introdução Geral

A busca por informações detalhadas do território desperta a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias para mapeamento ambiental. Tais inovações devem proporcionar a resolução de problemas em diferentes escalas, além de apresentarem custos reduzidos para aquisição da tecnologia e sua operação.

Os trabalhos de mapeamento na Antártica representam um desafio, pois as condições de terreno e climáticas ali encontradas, dificultam a logística e acesso a esses ambientes. A utilização do sensoriamento remoto nessas áreas permite solucionar problemas relacionados a coleta de dados, possibilitando mapear grandes áreas em um curto espaço de tempo e obter informações da superfície terrestre (BREMER et al., 2004). Além de permitirem a realização de análises temporais, identificando e estabelecendo relações de desenvolvimento dos ecossistemas das áreas afetadas por congelamento e descongelamento do substrato.

No contexto do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), a Península Keller, localizada na Ilha Rei George, apresenta importância estratégica para o país, encontrando-se instalada nesse local a Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) (SANTOS, 2005). Local de pesquisas brasileiras, a área de influência da Estação passou por uma completa alteração da sua paisagem, potencializada pelo incêndio que destruiu a antiga EACF e obras de reconstrução da nova estação.

A Península Keller foi mapeada pela primeira vez na década de 1950, e tem sido alvo de atualizações cartográficas desde então. Ao longo desse tempo a utilização de aeronaves na Antártica possibilitou a coleta de informações em detalhe, influenciadas pelo desenvolvimento de sensores mais modernos e execução de levantamentos em menores altitudes. As aeronaves contribuíram também para resolver em parte a problemática relacionada a grande cobertura de nuvens nesses locais, como ocorre nas ilhas ao norte da Península Antártica.

Além de imagens aéreas, equipamentos topográficos de elevada tecnologia e baixa complexidade operacional podem ser utilizados para complementar os trabalhos de monitoramento ambiental nessas áreas, possibilitando realizar atualizações cartográficas periódicas. O laser scanner terrestre (LST), equipamento baseado na tecnologia LIDAR (*Light Detection And Ranging*), vem sendo utilizado em trabalhos de dinâmica da paisagem (LAGUE et al., 2013), sendo seu uso registrado pela primeira vez no arquipélago Shetlands do Sul por Schünemann et al. (2018). A partir desse levantamento detalhado, a base de dados

da Península Keller ganhou um rico conjunto de dados topográficos, permitindo seu uso em estudos de geomorfologia, solos e ciências ambientais.

A utilização de imagens para análises temporais das áreas livres de gelo tem sido bastante explorada em estudos de glaciologia, em que a combinação de imagens aéreas e orbitais, permitem a obtenção de padrões e taxas de recuo de geleiras (BRAUN, 2001; BREMER et al., 2004). Levantamentos mais detalhados como realizados por Francelino (2004) e Schünemann et al. (2018) na Península Keller, permitem a utilização dessas informações em um âmbito mais local, possibilitando estabelecer relações ecológicas entre o substrato presente e comunidades vegetais, além de contribuir nos estudos da dinâmica ambiental, como em trabalhos de geomorfometria.

Com a evolução das Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) e sua rápida difusão no mercado, torna-se necessário o estudo da sua utilização na produção de dados cartográficos detalhados, como os Ortofotomosaicos e Modelos Digitais de Elevação em ambientes extremos como a Antártica. Com esses produtos é possível explorar os ambientes a partir de dados de elevada resolução espacial, permitindo estudar com detalhes as paisagens dessas regiões. Sendo assim, o objetivo geral desse trabalho foi investigar a utilização de técnicas de sensoriamento aplicadas no monitoramento ambiental em uma área da Antártica Marítima, sendo produzidos em capítulos, onde foram abordados os seguintes temas:

O primeiro capítulo teve como objeto geral refinar a base de dados da Península Keller, a partir de dois produtos gerados por um RPA. Esses produtos foram analisados quanto a sua qualidade posicional, sendo enquadrados de acordo com as normas de cartografia brasileira.

O segundo capítulo teve como objeto geral analisar a utilização de dados LIDAR na identificação de processos de alteração ambiental ocorridos na Península Keller, bem como caracterizar essas alterações.

Referências bibliográficas

BRAUN, M. et al. An improved topographic database for King George Island: compilation, application and outlook. **Antarctic Science**, v. 13, n. 01, p. 41–52, 2003.

BREMER, U. F.; ARIGONY-NETO, J.; SIMÕES, J. C. Teledeteção de mudanças nas bacias de drenagem do gelo da ilha Rei George, Shetlands do Sul, Antártica, entre 1956 e 2000. **Pesquisa Antártica Brasileira/Brazilian Antarctic Research**, v. 4, p. 37–48, 2004.

FRANCELINO, M. R. Geoprocessamento aplicado ao monitoramento ambiental da antártica marítima: solos, geomorfologia e cobertura vegetal. **Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas**, p. 113, 2004.

SANTOS, I. R. et al. Heavy metal contamination in coastal sediments and soils near the Brazilian Antarctic Station, King George Island. *Marine pollution bulletin*. Volume 50, n. 2, p. 185–94, 2005.

SCHÜNEMANN, A. L. et al. High-resolution topography for digital terrain model (Dtm) in Keller Peninsula, Maritime Antarctica. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 2001–2010, 2018.

SIMÕES, J. et al. A GIS for the Antarctic Specially Managed Area of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. **Geo-Spatial Information Science**, v. 4, n. 2, p. 8–14, 2001.

CAPÍTULO 1

Utilização de Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) no mapeamento dos aspectos ambientais da Antártica – Atualização cartográfica da Península Keller, Ilha Rei George

Resumo

A realização de levantamentos aerofotogramétricos em mapeamentos ambientais, foi potencializada após o surgimento das aeronaves remotamente pilotadas, principalmente para áreas inóspitas como a Antártica. Os dados gerados por esse equipamento apresentam uma grande variedade de aplicações, com destaques para mapas temáticos de cobertura do solo e os modelos digitais de elevação. Esse trabalho teve como objetivo geral produzir uma base cartográfica de alta resolução espacial, sendo atestada a sua exatidão de acordo com as normas de cartografia brasileira. O material obtido servirá para compor o banco de dados espaciais existente, potencializando os trabalhos de monitoramento ambiental já existentes na área. Para a tomada de imagens aéreas foi utilizado conjunto fotográfico digital de pequeno formato, embarcado em um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), também denominado Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) de acordo com as normas brasileiras. Para a produção de um material cartográfico consistente, utilizou-se receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de alta precisão. As coletas de dados foram realizadas nos meses de janeiro e fevereiro dos anos 2018 e 2019, sendo geradas duas bases de dados distintas. Com o objetivo de realizar a análise temporal das alterações ambientais ocorridas, dois conjuntos de imagens aéreas dos anos de 1956 e 2003 foram reprocessadas. Para isso foram utilizadas técnicas baseadas em Estrutura do Movimento (SfM). Foram gerados dois ortofotomosaicos de alta resolução espacial, com distância amostral de solo ou Ground Sample Distance (GSD) de 0,05 m (2018) e 0,04 m (2019), além de dois modelos digitais do terreno (MDT), com resoluções espaciais de 0,30 (2018) e 0,38 m (2019). Posteriormente foi realizada a análise de qualidade posicional nos dados obtidos em 2019. Os produtos foram atestados a partir de um conjunto de 36 pontos independentes, avaliando a acurácia altimétrica e planimétrica. Os produtos gerados apresentaram RMSE planimétrico de 0,1149 m e altimétrico de 0,2488 m. Quanto ao enquadramento na norma de Padrão de Exatidão Cartográfica PEC, o ortofotomosaico foi classificado como classe A e o MDT classe B, ambos testados na escala de 1:1000. A técnica de coleta e processamento de dados permitiu analisar aspectos naturais e antrópicos da área estudada, sendo promissora a sua aplicação na avaliação da dinâmica ambiental das áreas livres de gelo da Antártica.

Palavras chave: aerofotogrametria, monitoramento ambiental, geotecnologias

Use of Remotely Piloted Aircraft (RPA) to mapping the environmental aspects of Antarctica - Keller Peninsula, King George Island cartographic update

Abstract

The aerial photogrammetric survey is technically and financially more feasible after the arising of remotely piloted aircraft, especially in inhospitable areas such as Antarctica. The data generated by this equipment presents a wide variety of applications, with highlights for thematic maps of ground cover and digital elevation models. The aim of this work was to produce a cartographic base of high spatial resolution, being attested its accuracy according to Brazilian cartography norms. The material obtained will serve to compose the existing spatial database, potentializing the already existing environmental monitoring works in the area. To take aerial images, a small-format digital photographic set was used, in an Unmanned Aerial Vehicle (UAV), also called Remotely Piloted Aircraft (RPA) by Brazilian standards. For the production of a consistent cartographic material, high precision GNSS (Global Navigation Satellite System) receivers were used. The data collections were carried out in January and February of the years 2018 and 2019, and two different databases were generated. To carry out the temporal analysis of environmental changes, two sets of aerial images from the years 1956 and 2003 were reprocessed. For this, techniques based on Structure of Movement (SfM) were used. The results obtained were two orthophotomosaics with GSD (*Ground sample distance*) of 0.05 m (2018) and 0.04 m (2019), in addition to two digital terrain models (MDT) generated from the three-dimensional cloud interpolation of which had a high density of points. The spatial resolutions obtained for the MDTs were 0.30 m (2018) and 0,38 m (2018). Subsequently, the positional quality analysis was performed on the data obtained in 2019. The products were attested from one of a set of 36 independent points, evaluating the altimetric and planimetric accuracy. The products generated presented planimetric RMSE (Root Mean Square Error) of 0.1149 m and altimetric of 0.2488 m. As for the classification in the PEC's cartographic accuracy of digital products, these products were classified as class A in the scale of 1:1000. The historical aerial images have enabled an environmental analysis related to natural and anthropic aspects. The technique of data collection with RPA and processing in SfM software has demonstrated great potential in producing high quality cartographic products in Antarctica's region.

Keywords: aerial photogrammetry, environmental monitoring, geotechnology

1. Introdução

Nos estudos ambientais, a caracterização de áreas naturais e antrópicas vem sendo potencializada com a evolução das técnicas de Sensoriamento Remoto (SR). Com o princípio básico de coletar informações remotamente e de forma automática, possibilita a exploração de diferentes extensões territoriais, permitindo gerar bases cartográficas com escalas diferenciadas (CRÓSTA, 1992).

Nesses estudos, dentre as técnicas de SR que mais se destacam, estão a utilização de imagens orbitais e sub-orbitais. Para Machado et al, (2010) a imagem orbital apresenta-se como uma valiosa ferramenta devido sua característica de recobrimento de grandes áreas, possibilitando sua aplicação em diferentes estudos, sobretudo aqueles relacionados a mudanças na superfície terrestre e seu monitoramento. Estas técnicas proporcionam em grandes dimensões, maior frequência de passagem do sensor com custos operacionais reduzidos (MENDONÇA et al., 2007).

Quando o objetivo do trabalho é obter informações no espectro visível, o uso de sensores orbitais podem apresentar restrições em locais que apresentem condições de alta nebulosidade (SILVEIRA et al., 2017) condição esta encontrada frequentemente na região da Antártica (FRANCELINO, 2004). Nessa região, especificamente no arquipélago Shetlands do Sul, a utilização de imagens aéreas possui seus primeiros registros realizados no início do ano de 1950 por pesquisadores britânicos da *Directorate of Overseas Surveys* (DOS), que em 1968 publicaram o primeiro mapa confiável da Ilha Rei George (IRG), na escala de 1:200.000, a partir da restituição de fotografias aéreas obtidas no verão de 1956-1957 (BREMER et al., 2004). Já em 1980 a Academia Polonesa de Ciências realizou uma compilação de dados topográficos, batimétricos e fotografias aéreas dos anos 1978 e 1979, e apresentou um mapa topográfico da Baía do Almirantado, na escala de 1:25.000 (JÚNIOR et al., 2012).

Com a criação da Área Antártica Especialmente Gerenciada da Baía do Almirantado (AAEG), localizada na Ilha Rei George, foram intensificados os trabalhos de levantamento e compilação de dados dessa região. Simões et al., (2001) propuseram a criação de uma base de dados espaciais padronizada para subsidiar o monitoramento ambiental, sendo realizado por Arigony neto et al., (2001) a caracterização de bacias glaciais a partir de ferramentas de SR.

Os últimos registros aéreos que se tem conhecimento dessa área foram realizados em janeiro de 2003. O levantamento realizado por Francelino (2004), apresentou uma escala de voo de 1:2500, sendo coletadas imagens no espectro do visível com câmera de pequeno formato (70 mm), cujo conjunto fotogramétrico (câmera Hasselblad 500) foi embarcado em

um helicóptero de propriedade da Marinha do Brasil. Para a ortorectificação das imagens aéreas foi utilizado por esse autor um modelo Modelo Digital de Terreno (MDT) produzido a partir de dados vetoriais de (BRAUN et al., 2003), além de dados coletados em campo com receptor GNSS. O segundo levantamento foi realizado pelo *Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile* (SHOA), o qual apresentou escala de voo de 1:50.000, sendo produzido por Júnior et al., 2012, um ortofotomosaico e uma carta topográfica na escala de 1:5000.

Os materiais produzidos por esses autores são grande interesse para as atividades do Programa Antártico Brasileiro, pois desde 1984 está instalada na Península Keller, na Ilha Rei George, a Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) (SANTOS, 2005). A partir de técnicas mais recentes e sofisticadas, a base topográfica da Península Keller foi atualizada por Schünemann et al., (2018), resultando em um MDT com resolução espacial de 0,20 m. Neste levantamento foi utilizado um sistema Laser Scanner Terrestre (LST) para a captura dos dados tridimensionais do terreno. Segundo esses autores, os dados obtidos possuem grande potencial de utilização em trabalhos de monitoramento e dinâmica ambiental dessa área, por se tratar de um conjunto de pontos de alta densidade e grande detalhamento.

Tendo em vista o impulso tecnológico dos últimos anos, as Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA), também conhecidas com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), vêm ganhando destaque em sua utilização para tomada de informações da superfície terrestre, apresentando baixo custo operacional, elevada qualidade do material gerado e a possibilidade de trabalhar em escala detalhada. Esses veículos podem transportar tanto sensores ópticos multiespectral, bem como laser, permitindo além de obtenção de ortofotomosaicos, dados topográficos com alto detalhamento (VITTI, 2017). O emprego de imagens de pequeno formato não calibradas em mapeamentos diversos tornaram-se possíveis com o desenvolvimento de *softwares* que utilizam o método Estrutura do Movimento (SfM) para o processamento de dados (ROBERTS et al., 2011).

A técnica do SfM difere da fotogrametria clássica devido a possibilidade de cálculo dos parâmetros da câmera posteriormente ao seu uso, permitindo correções geométricas nas imagens e referenciá-las a um sistema de coordenadas. O método SfM está fundamentado nos princípios básicos da fotogrametria estereoscópica, em que é necessária a existência de sobreposição entre imagens, para que algoritmos robustos busquem a identificação de pontos homólogos entre imagens, permitindo, assim, a restituição tridimensional do terreno (MESAS-CARRASCOSA et al., 2016).

A junção da técnica de obtenção de dados por RPA e processamento de imagens pelo método SfM vem despertando o interesse de produtores e usuários de dados cartográficos,

permitindo o emprego da técnica em situações de recursos limitados, produzindo mosaicos de imagens aéreas e modelos digitais de elevação de alta resolução (FORSMOO et al., 2018).

Outra vantagem do uso de RPA é a possibilidade de realizar o sobrevoo no momento mais oportuno, o que o difere dos sistemas orbitais, onde a maioria dos satélites possuem rota pré-definida. Isso permite seu uso com sucesso em regiões em que na maior parte o céu apresenta elevada cobertura por nuvens, podendo, inclusive, voar abaixo delas. Esse é o caso da região Antártica, que apresenta céu encoberto na maior parte do tempo.

Na Península Keller os últimos registros aéreos publicados e disponíveis foram produzidos a mais de 15 anos, sendo desconhecida até o momento a utilização de um RPA para fins de mapeamento dessa área. Alterações ambientais de origem antrópicas e naturais ocorreram ao longo desse tempo, sobretudo aquelas ligadas às obras de reconstrução da nova EACF e retração de geleiras. Sendo assim o objetivo desse trabalho foi gerar uma base cartográfica da Península Keller, localizada na ilha Rei George, na Antártica, através de um levantamento com RPA, sendo atestada sua viabilidade de uso para trabalhos de monitoramento ambiental, através da avaliação da qualidade dos dados obtidos de acordo com o Decreto-lei 89.817/ET-ADGV (BRASIL, 1984).

2. Material e Métodos

2.1 Área de estudo

Localizada no arquipélago Shetlands do Sul, a Ilha Rei George (IRG) é a maior entre as vinte e nove que o compõem, possuindo cerca de 93% de sua área coberta por gelo (BRAUN, 2000). A Península Keller (Figura 1D), por sua vez está localizada na Baía do Almirantado, sendo delimitada ao norte pelos Glaciares Domeyko e Stenhouse a $62^{\circ}03'20''$ S, enquanto seu limite ao sul é determinado pela latitude $62^{\circ}5'40''$ S. Sua extremidade oeste é delimitada pela Enseada Mackellar, enquanto a leste é determinada pela Enseada Martel. Abrange uma área de aproximadamente 451 hectares, com eixo principal norte-sul com 3.728 m e leste-oeste de 1.818 m (FRANCELINO et al., 2011). Possui temperatura média mensal variando de -6.4 °C em julho a $+2.3$ °C em fevereiro, e com precipitação média anual de 367 mm (INPE/CPTEC, 2009).

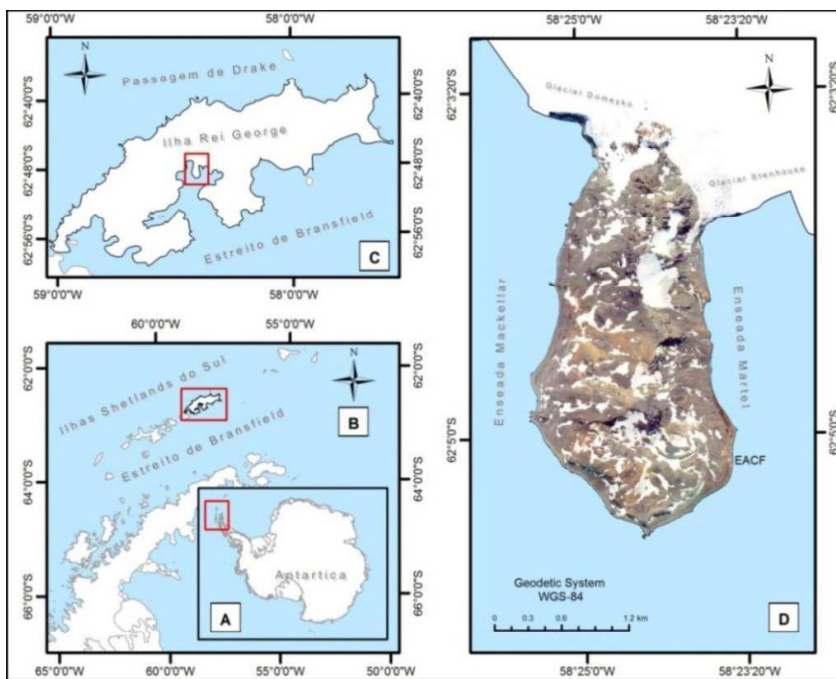


Figura 1 - Localização da área de estudo no continente Antártico (A) e Península Antártica (B). Localização da Península Keller na Ilha Rei George (C). A Península Keller está representada na figura D.

2.2 Metodologia utilizada

Determinados os modelos e demais equipamentos disponíveis, o procedimento aerofotogramétrico foi subdividido em 4 etapas, exibidas no fluxograma apresentado na Figura 2.

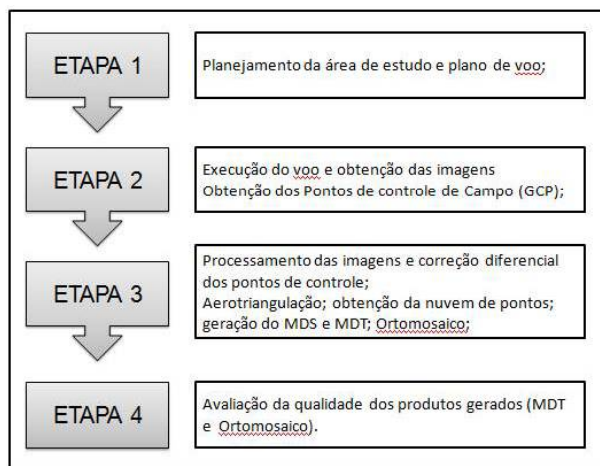


Figura 2 - Fluxograma do procedimento metodológico adotado para aquisição, processamento e avaliação dos produtos obtidos com o RPA.

2.2.2 Obtenção das imagens aéreas:

Foram capturadas imagens de alta resolução utilizando câmera digital embarcada em um RPA. O equipamento utilizado, modelo Phantom 4 Pro (Figura 3), produzido pela empresa DJI, é um equipamento multi-rotor, com partida e pouso na vertical. Utiliza bateria ion-lithium de 15.2 V para dar funcionamento do sistema, apresentando autonomia de voo variando de 15 a 30 min. Pode ser operado no modo manual ou automático, apresentando baixo custo de aquisição e operação. Alcança uma velocidade de até 50 km h^{-1} , com tolerância a rajadas de ventos de aproximadamente 36 km h^{-1} .



Figura 3 - RPA utilizado nos trabalhos de campo.

As imagens foram capturadas com câmera do mesmo fabricante do RPA, modelo FC6310 RGB, com distância focal de 24 mm e dimensão do sensor de 13,2 x 8,8 mm gerando uma imagem de 4864 x 3648 pixels. O equipamento é composto por uma aeronave, uma estação de controle e um terminal de dados. A estação de controle e o terminal de dados possibilitam o monitoramento da aeronave, possuindo este um receptor de sinais de satélite de posicionamento – GNSS e um sistema de medição inercial (*Inertial Measurement Unit – IMU*), fornecendo os dados de atitude do sensor.

Imagens obtidas em 1956 pelos britânicos do DOS e disponibilizadas pelo USGS (2018), além de imagens obtidas por Francelino (2004), foram reprocessadas em ambiente SfM, com objetivo de investigar alterações na paisagem ocorridas na área estudada, abordando aspectos antrópicos e naturais.

O trabalho de campo foi realizado nos meses de janeiro e fevereiro dos anos 2018 e 2019. Foram realizados voos autônomos planejados e executados no aplicativo DroneDeploy (2019). Foi estabelecida a sobreposição entre imagens de 65% de recobrimento lateral e 75%

longitudinal. A altura de voo escolhida foi de 150 m, com inclinação do eixo óptico vertical ao terreno, sendo classificada de acordo com Wolf e Dewitt (2004) como fotografias verticais.

Com o objetivo de manter o GSD constante no mosaico final, a área da Península foi subdividida por classes de altimetria. Para isso, a espacialização dos planos de voo foram baseados no MDT gerado por Schünemann et al. (2018) (Figura 4), onde foram estabelecidos 12 planos de voos para cobrir toda a área. O tempo estabelecido para cada um deles foi de 15 minutos, sendo coberta uma área média de 46 ha por voo, o que somou 560 ha sobrevoados.

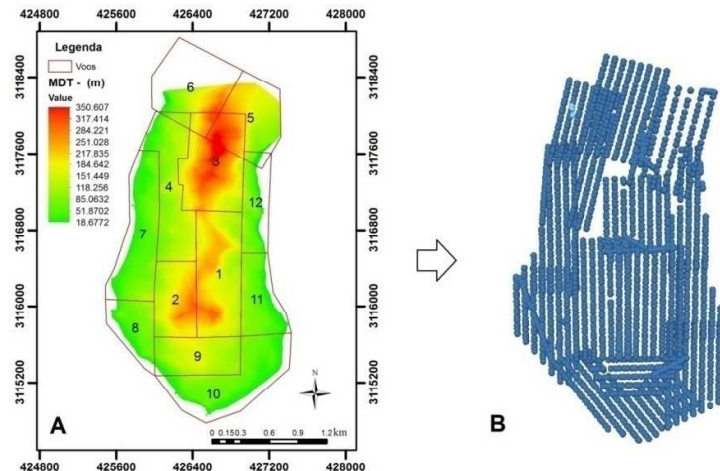


Figura 4 - Classes de altitudes subdivididas a partir do MDT demonstrado em (A), e disposição espacial dos centróides das imagens obtidas em campo em (B).

De acordo com Almeida et al., (2016), com os dados de distância focal da câmera e altura de voo, obtêm-se a escala cartográfica. Com as dimensões físicas do sensor, pode-se realizar o cálculo do GSD correspondente a resolução espacial da imagem, sendo esta a menor distância do terreno representada na imagem. A resolução espacial GSD corresponde ao tamanho do pixel no terreno e pode ser obtida pela equação abaixo:

$$(1)$$

onde;

h_v = Altura de voo,

f = Distância focal da câmera,

d = Dimensões físicas do pixel no sensor CCD

De acordo com os parâmetros pré estabelecidos o GSD do ortofotomosaico deverá apresentar valor de 0,044 m após a obtenção das imagens.

O RPA utilizado possui um receptor GNSS embarcado, registrando as coordenadas geográficas da posição de cada foto registrada (Figura 4 B), com valores armazenados nos metadados das mesmas. Posteriormente esses valores foram utilizados como parâmetros iniciais no processamento fotogramétrico.

2.2.2 Obtenção dos pontos de controle e de validação:

A utilização de pontos de controle tem como objetivo ajustar o sistema de coordenada em campo, realizar a correção geométrica do bloco fotogramétrico, além de possibilitarem a avaliação da qualidade dos produtos gerados (COSTA e SILVA, 2012). O processo de amostragem pode variar de acordo com a distância entre os pontos de controle e conformação espacial dos mesmos, podendo apresentar-se de forma regular ou irregular, também conhecida como amostragem aleatória. Segundo Schünemann (2016), a distribuição, a densidade e a forma de aquisição de dados influenciam diretamente no fenômeno estudado.

Sendo assim os pontos de controle foram distribuídos por toda a área imageada, sendo observadas a geometria, topografia do terreno e planos de voos executados. As coordenadas foram determinadas por posicionamento estático rápido com receptor Leica CS 08 Plus de dupla frequência. O referencial tridimensional adotado como base foi o marco localizado na Base G, com coordenadas UTM 21 S 427338,686 (E) e (N) 3115751,399 (N), e altitude elipsoidal de 28,479 m.

No processamento das imagens obtidas no ano de 2018 foram utilizados um total de 53 pontos de controle, sendo 24 pontos obtidos por posicionamento estático e 29 pontos obtidos na nuvem de pontos obtida por Schünemann et al. (2018). Esse procedimento foi necessário devido à baixa disponibilidade de pontos de controle disponíveis na data do processamento dos dados. Devido a utilização desse método, os produtos de 2018 não tiveram sua qualidade avaliada, por entender que existem erros sistemáticos de posicionamento superior a classe PEC pretendida.

No ano de 2019, cerca de 69 pontos de controle foram obtidos por posicionamento estático rápido, sendo utilizados 33 pontos para o ajuste do bloco fotogramétrico e 36 pontos utilizados para avaliação da exatidão posicional. O Datum utilizado em ambos os levantamentos foi o WGS-84 e Sistema de Projeção UTM Fuso 21S.

Para a avaliação da exatidão altimétrica do MDT gerado no levantamento de 2019, utilizou-se um conjunto 56 pontos extras obtido por Schunemann et al., (2017), com o intuito de analisar a alteração do RMS utilizando-se 36, 72 e 92 pontos de validação e a influência na classificação PEC-PCD.



Figura 05 - Detalhe para objetos encontrados na área que foram utilizados como pontos de controle. À esquerda o ponto identificado na ortoimagem e à direita o ponto de controle sendo obtido em campo.

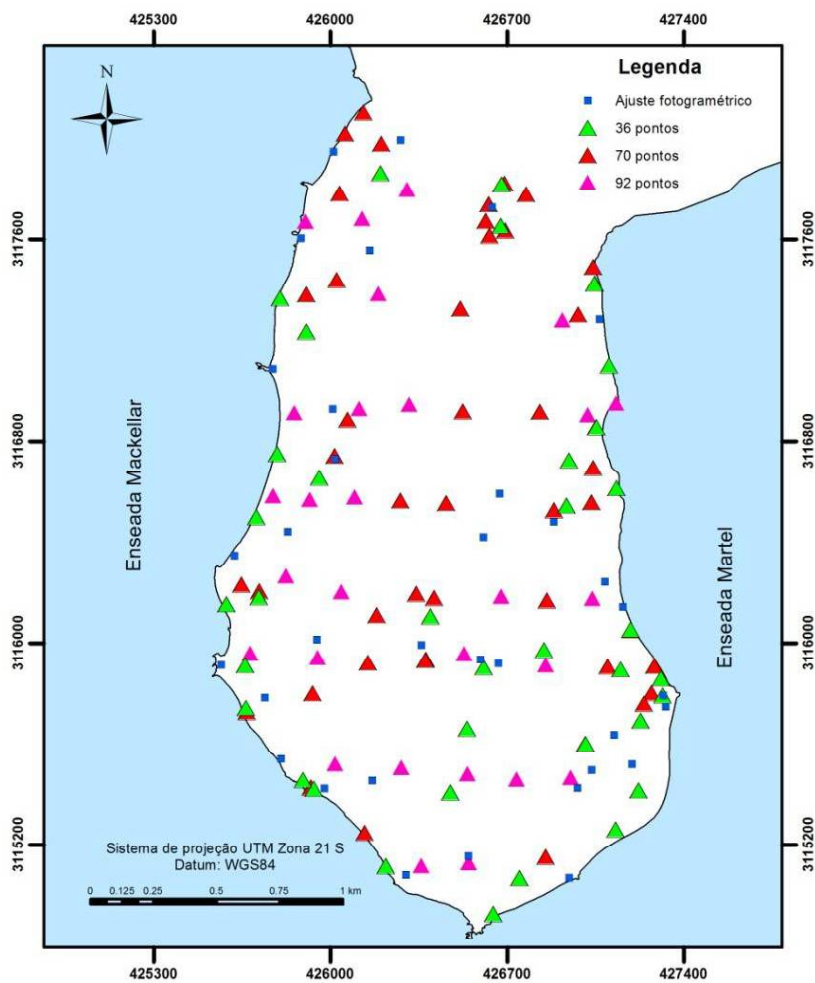


Figura 06 - Disposição dos pontos de controle para georreferenciamento da nuvem de pontos.

2.2.3 Processamento Fotogramétrico:

O processamento fotogramétrico foi realizado no software Agisoft 1.2.6, baseado em processamento de dados da técnica Estrutura do Movimento (SfM). Para redução de erros no processamento foi utilizada a metodologia proposta pela USGS, (2017). O processamento foi dividido em cinco fases, sendo: triangulação aérea, geração do Modelo Digital de Superfície (MDS) e posterior geração do MDT, retificação de imagens individuais, mosaicagem e análise da precisão dos produtos gerados.

2.2.4 Triangulação aérea

No primeiro estágio, o PhotoScan detecta pontos nas fotos de origem que são estáveis sob as variações do ponto de vista e iluminação, gerando um descritor para cada ponto com base em sua vizinhança local. Esses descritores são usados posteriormente para detectar correspondências nas fotos (Figura 7).



Figura 07 - Processo utilizado pelo algoritmo para a busca de pontos homólogos.

Para que seja realizada a restituição e a obtenção dos produtos fotogramétricos, o objeto deve ser imageado a partir de pelo menos dois pontos de vista diferentes. As técnicas SfM extraem características individuais em cada imagem do bloco fotogramétrico, sendo posteriormente realizada a busca por seu correspondente na imagem seguinte (CARRIVICK, 2016). Através desse procedimento a posição relativa do sensor durante o voo é obtida, permitindo calcular sua orientação no momento da tomada da imagem aérea (MESAS-CARRASCOSA et. al., 2016).

2.3.5 Geração dos Modelos Digitais de Superfície e de Terreno

Uma vez obtidos os pontos homólogos, partiu-se para a etapa de geração dos modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT). Para isso foi realizado procedimento para

densificação dos pontos tridimensionais do terreno, possibilitando a obtenção de uma nuvem de pontos com aproximadamente 44,5 milhões de pontos. Realizou-se uma limpeza para retirada de *outliers* com o objetivo de minimizar os erros interpolação. Por fim obteve-se o MDS realizando-se a rasterização dessa nuvem de pontos.

Para a obtenção do MDT foram realizadas a filtragem de pontos acima do solo, tais como construções e demais objetos. De acordo com Hung et al., (2017), a classificação e filtragem automática da nuvem de pontos baseiam-se no ângulo, altura e distância de cada ponto, permitindo diferenciar o relevo das demais feições (vegetação e construções).

Como o receptor GNSS coletou a altitude elipsoidal, ao final do processamento foi realizado o ajuste do MDT para altitude geoidal. Para isso utilizou-se o modelo EGM96, para obter a ondulação geoidal para a área. No *software* ArcMap 10.2, utilizado a ferramenta *Raster calculator*, realizou-se o ajuste para o modelo geoidal de altitude, onde subtraiu-se o valor de 21,896 m (ondulação geoidal) da altitude elipsoidal.

2.2.6 Geração do ortofotomosaico de imagens aéreas

Nesse procedimento foi realizada a ortoretificação das imagens aéreas. Esse procedimento tem como finalidade corrigir geometricamente a imagem, pixel a pixel, das distorções decorrentes do relevo, transformando a foto de uma projeção cônica para uma perspectiva ortogonal e, assim, manter a constância da escala em toda a imagem ortoretificada. Segundo Toutin (2004), as distorções geométricas no processo de aquisição de imagens podem ser originadas do sistema de aquisição quando estão relacionadas à plataforma, do sensor embarcado, além do instrumento utilizado para medição. Quando relacionadas ao sistema observado, podem ser originadas de efeitos de refração, curvatura e relevo, além do de transformações de sistema de projeção baseados no elipsóide para o plano topográfico.

2.3 Análise da qualidade dos produtos gerados:

A base cartográfica definida para cada projeto afeta diretamente no uso dos resultados obtidos em projetos de monitoramento ambiental. Sendo assim, além de se atentar a resolução espacial dos produtos gerados, analisar sua precisão torna-se uma importante ferramenta para avaliação da qualidade do trabalho realizado, sendo determinante na definição da utilização dos dados para cada tipo de trabalho.

Sabendo-se que acurácia posicional refere-se a proximidade que um dado espacial está em relação à sua realidade no terreno, torna-se necessário definir uma amostra de checagem independente aos dados utilizados para produzir determinada carta topográfica. Comparadas

as posições encontradas no material produzido, confronta-se as coordenadas obtidas com o conjunto amostral de checagem, obtendo-se um conjunto de discrepâncias posicionais (Santos et al., 2016).

Porém, um problema recorrente está relacionado à falta de análise efetiva da distribuição dos pontos amostrados, sendo contempladas metodologias empíricas nas atuais normais para a determinação do padrão de distribuição espacial da amostra (Santos et al., 2016). Uma amostra de checagem que apresente o padrão de distribuição espacial do tipo agrupado pode comprometer a avaliação posicional do mesmo, sendo tal análise incoerente para o restante da área trabalhada (SANTOS et al., 2016).

Os pontos denominados de checagem foram separados do conjunto de pontos utilizados no ajuste do bloco fotogramétrico. Para atestar a qualidade altimétrica e planimétrica, as informações de altitude foram extraídas do Modelo Digital de Elevação e do Ortofotomosaico utilizando-se as ferramentas de análise espacial do *software* Arcmap 10.1 (ESRI, 2018).

2.3.1 Análise do Padrão de distribuição espacial

Os métodos mais simples de análise do padrão de distribuição espacial de pontos são baseados principalmente, na contagem de pontos em uma determinada região da área de estudo ou na distância entre o ponto e o vizinho mais próximo (SANTOS et al., 2016). Métodos robustos como a técnica do Vizinho Mais Próximo de altas ordens e a Função K de Ripley também podem ser utilizadas (RIPLEY, 1977; WONG e LEE, 2005). Esses métodos avaliam se a distribuição espacial se mantém constante em diferentes escalas, ou seja, sob um intervalo de distâncias (SANTOS, 2010).

Neste trabalho utilizou-se a estatística do vizinho mais próximo para detectar o padrão espacial dos dados. De acordo com Santos et al. (2016), este método compara a distância média entre vizinhos mais próximos com um conjunto de pontos que têm um padrão definido teoricamente. Este teste é normalmente utilizado apenas na primeira ordem, porém pode ser utilizando em k ordens, onde a segunda ordem utiliza a segunda menor distância entre os pontos e assim sucessivamente para outras k ordens (SANTOS et al., 2016).

Após obter a média das distâncias, calcula-se o índice R para a ordem k , sendo este a razão média observada da distância k vizinho mais próximo com a média esperada para uma distribuição aleatória dos pontos. Se a média for igual ao padrão ($R=1$), a amostra segue o padrão de distribuição aleatório; se a média for menor que o padrão ($R < 1$), a amostra segue o padrão de distribuição agrupado, e ; se a média for maior que o padrão ($R > 1$) a amostra segue

o padrão de distribuição disperso. Neste teste foi utilizado o teste Z, recomendado para amostra com mais de 30 elementos (MONTGOMERY e RUNGER, 2008).

2.3.2 Análise de tendência

Outra fator importante a analisar é identificar se os dados possuem ou não tendência, o que pode ser realizado por testes estatísticos, sendo importante para identificação da presença de erros sistemáticos, condição esta indesejada em aplicações em monitoramentos ambientais, podendo-se gerar análises que não condizem com a realidade encontrada em campo (SANTOS et al., 2016).

Para realizar a análise de tendência, Monico et al. (2009), Galo e Camargo (1994), além de Santos et al. (2016), propuseram a utilização do teste t de *student* conforme descrito por Merchant (1982), considerando neste teste que a amostra de discrepâncias posicionais tenham distribuição normal. Entretanto nos casos em que a distribuição não apresente normalidade, estatísticas espaciais simples podem ser utilizadas, as quais retornam a média direcional das discrepâncias e a variabilidade da média, podendo-se concluir se o dado espacial possui ou não tendência (SANTOS et al., 2016).

2.3.3 Análise de precisão

Segundo Carvalho e Silva (2018), no Brasil o decreto nº 89.817 de 20 de Junho de 1984 (BRASIL, 1984), é responsável por definir os parâmetros de qualidade para os dados planialtimétricos, sendo definido o conceito de PEC. Valores padrões de qualidade são divididos em categorias (A, B, C) de acordo com a sua precisão. Quando testados no terreno, não deverão apresentar discrepância superior ao PEC planimétrico e altimétrico estabelecido. Em termos de categorias, tem-se que os dados altimétricos são classificados de acordo com a equidistância das curvas de nível (EC), conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2. O termo equidistância aqui utilizado se refere ao espaçamento vertical entre cada curva de nível. O valor EP é definido como sendo o erro padrão, sendo este tratado como equivalente ao erro médio quadrático (RMSE) e desvio padrão.

De acordo com metodologia proposta por Santos et. al (2016), é necessário que se obtenha uma amostra de discrepâncias, onde o RMSE é confrontado com os limites no Decreto-lei e de acordo com as Especificações Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG). Nessa metodologia deve-se atender a dois pressupostos para atestar a acurácia dos dados. O primeiro é que 90% das discrepâncias testadas tem que ser menor ou igual ao PEC para a classe e escala testada. O segundo é que o RMSE da amostra de discrepâncias testadas, tem que ser menor ou igual ao Erro-Padrão (EP) para a classe e

escala testada. A equação utilizada para avaliação do RMSE pode ser deduzida a partir da equação descrita abaixo (WILLMOTTW & MATSUURA, 2005).

$$RMSE = \left[n^{-1} \sum_{i=1}^n |e_i|^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

onde:

$RMSE$ = raiz quadrada do erro médio quadrático, em m;

e_i = cada diferença entre os valores de elevação preditos e os valores originais das coordenadas X, Y e Z de referência, em m.

Para realizar a avaliação da acurácia posicional recorreu-se ao *software* GeoPEC v3.5 (2018), o qual possibilita ao usuário gerar relatórios com os resultados e classificações de acordo com o Decreto-lei 89.817/ET-ADGV, sendo realizada testes de tendência e de padrões de distribuição dos dados, segundo metodologia proposta por Santos et al. (2016).

Tabela 1 – Padrão de Exatidão Cartográfica da Planimetria dos Produtos Cartográficos Digitais - Adaptado de ET ADGV 2ª Edição (2016)

PEC	PEC - PCD	1:1000		1:2000		1:5.000	
		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
A	B	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50
B	C	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50
C	D	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,0

EP = Erro padrão;

PEC-PCD = Padrão de Exatidão Cartográfica de Produtos Cartográficos Digitais.

Tabela 2 – Padrão de Exatidão Cartográfica da Altimetria dos Produtos Cartográficos Digitais - Adaptado de ET ADGV 2ª Edição (2016)

PEC	1:1000		1:2000		1:5.000	
	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
B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66
C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80
D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00

3. Resultados e discussão

3.1. Análise dos processamentos das imagens

Durante os trabalhos de campo na Antártica as condições climáticas foram os grandes desafios encontrados para execução dos trabalhos com RPA, sendo o vento o fator principal para o estabelecimento das poucas janelas de voo encontradas durante os trabalhos de campo. Apesar das baixas temperaturas o RPA empregado nesse estudo mostrou-se eficiente para as condições climáticas encontradas, demonstrando sua aplicabilidade ao gerar dados precisos e acurados.

Após obtidas as imagens aéreas pelo RPA, procedeu-se o processamento das imagens conforme metodologia descrita anteriormente, obtendo-se quatro ortofotomosaicos referente aos dados coletados em 1956, 2003, 2018 e 2019 (Figuras 8, 9, 10 e 11), respectivamente. Neste trabalho é apresentado o MDT gerado a partir dos dados de 2019 (Figura 12). A avaliação da qualidade posicional e altimétrica foi realizada para os produtos originados em 2019 a partir do RPA.

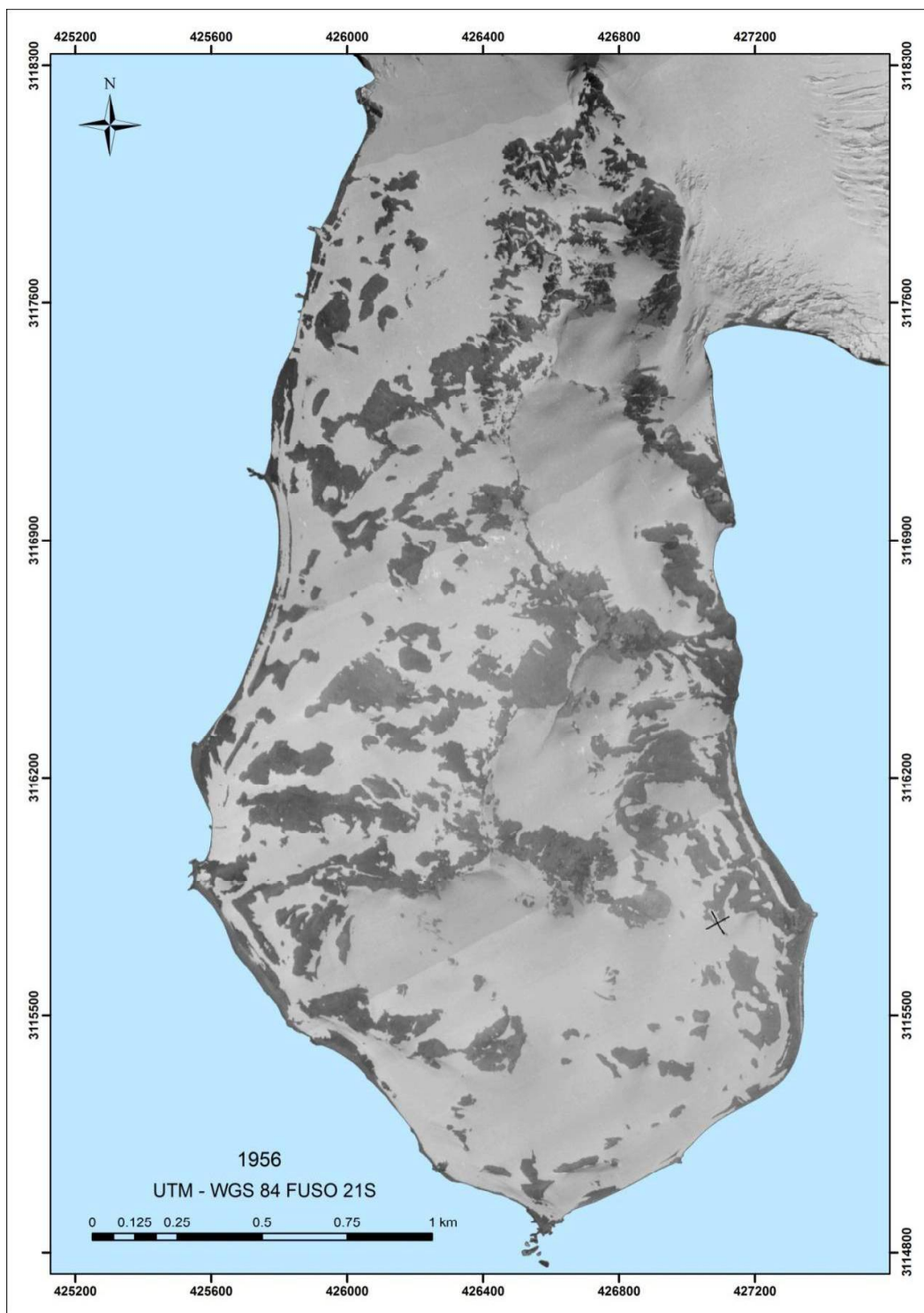


Figura 8 - Mosaico de imagens aéreas obtidas em dezembro de 1956 (DOS, 1956) e reprocessadas nesse trabalho.

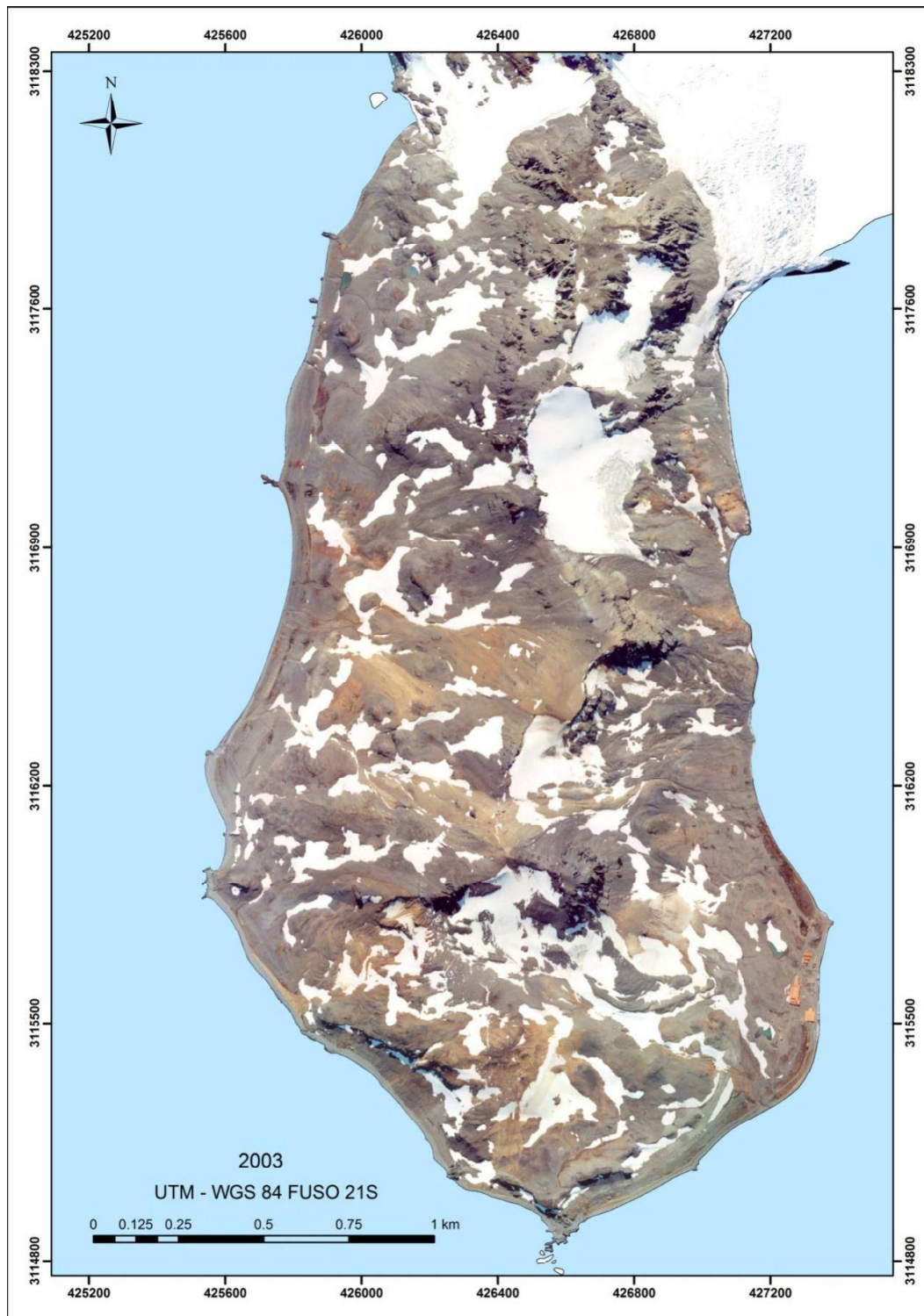


Figura 9 - Mosaico de imagens aéreas obtidas em janeiro de 2003 (FRANCELINO, 2004) e reprocessadas nesse trabalho.

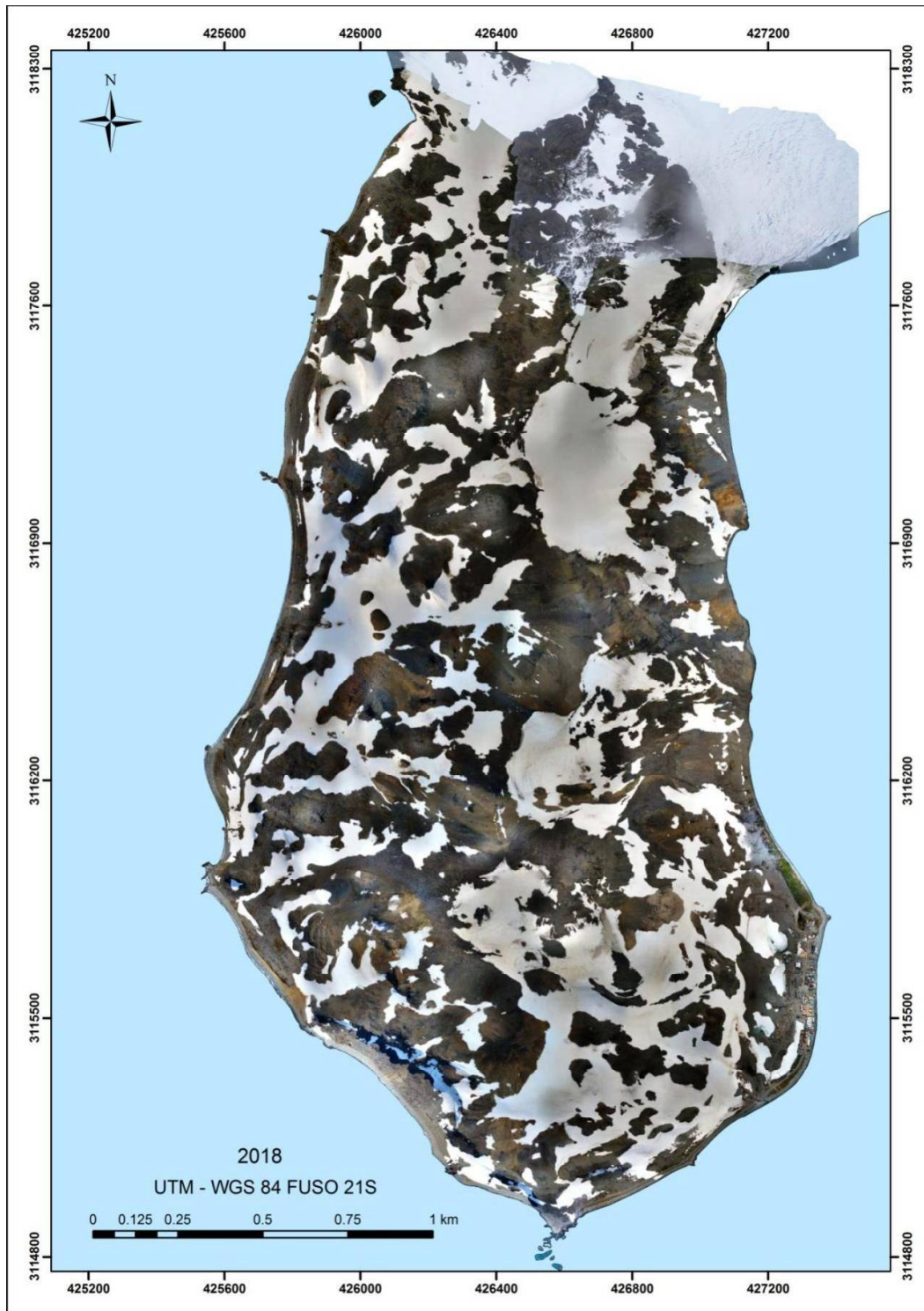


Figura 10 - Mosaico de imagens aéreas obtida no ano de 2018.

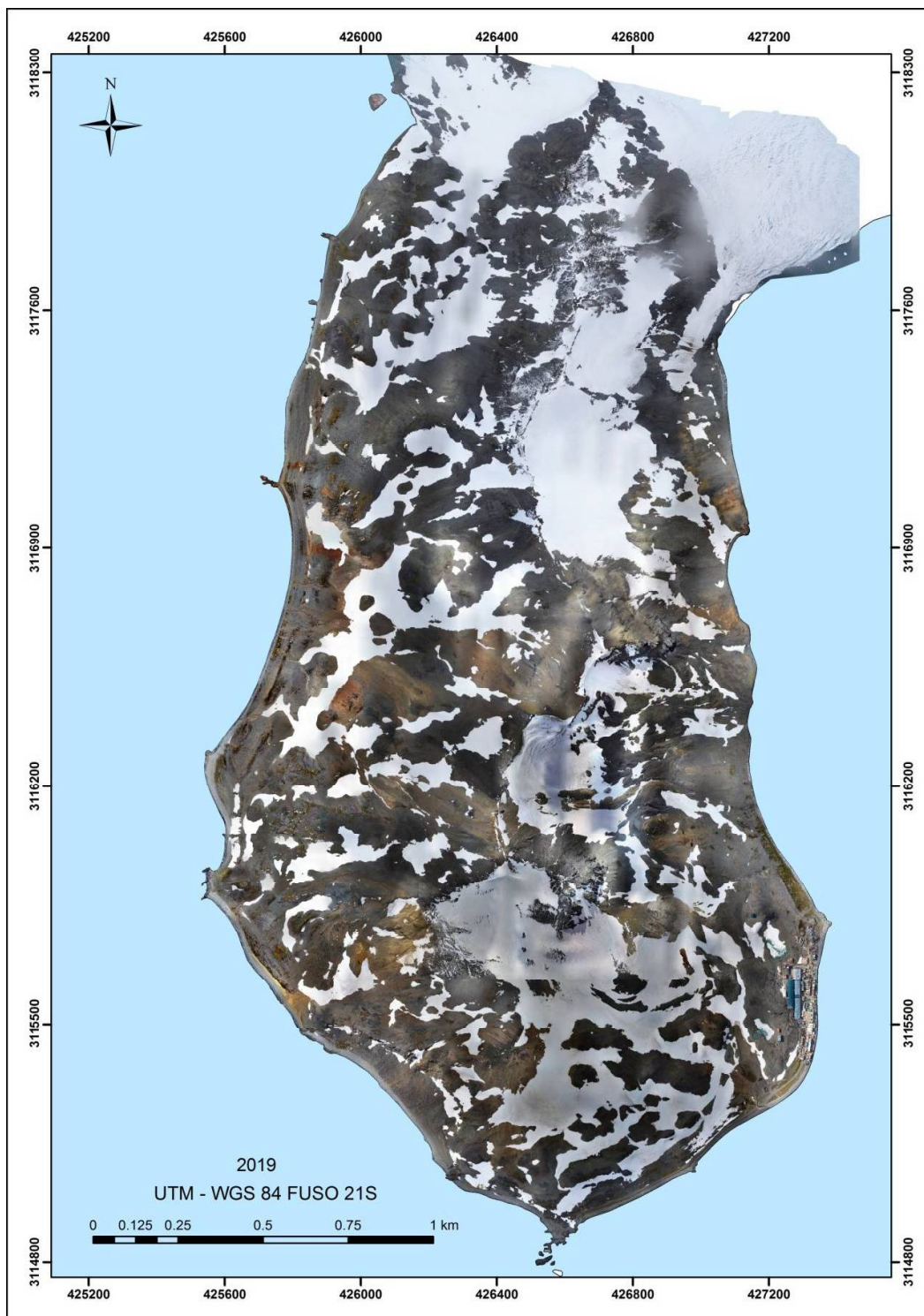


Figura 11- Mosaico de imagens aéreas obtida no ano de 2019.

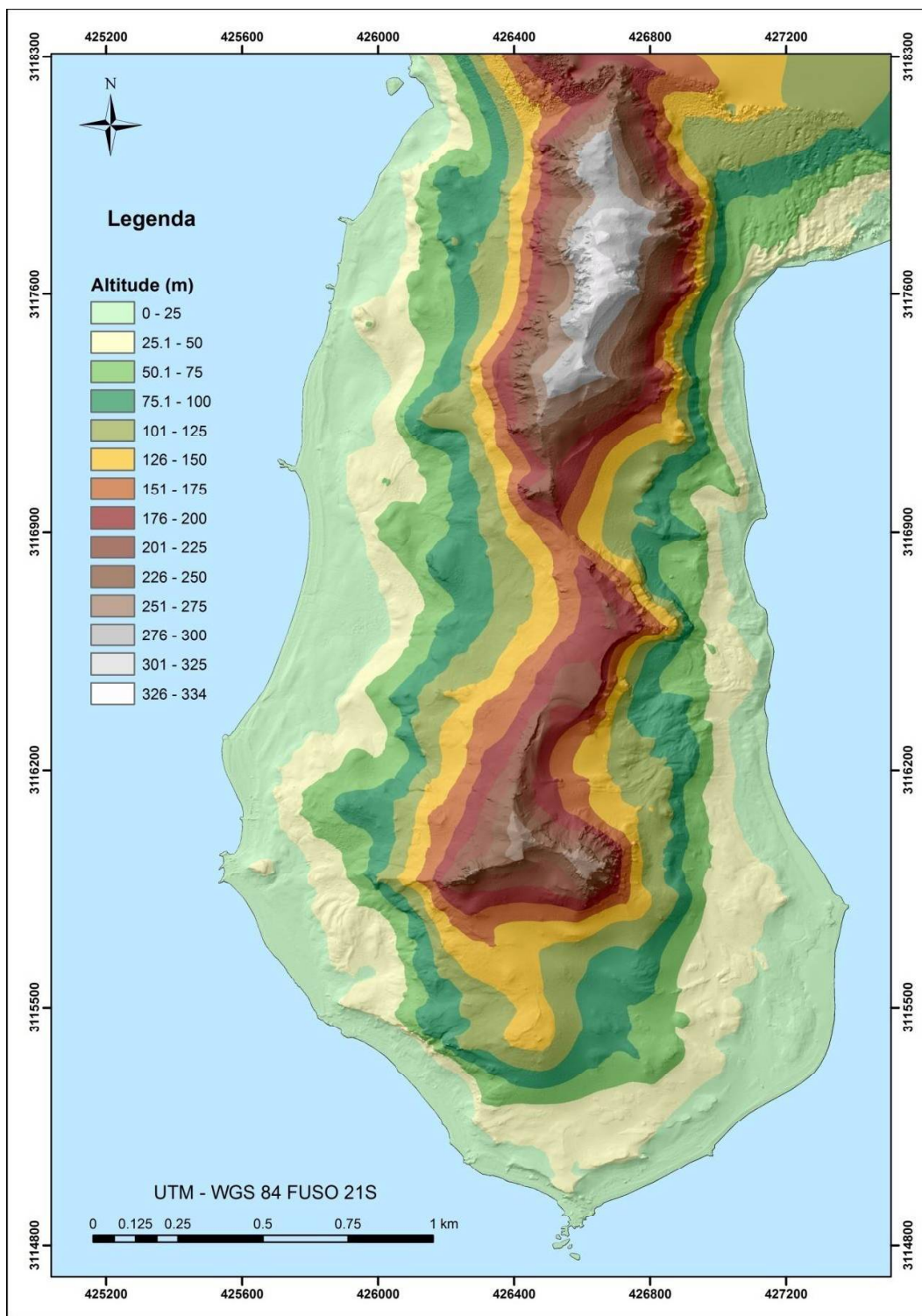


Figura 12 - Modelo Digital de Terreno obtido no ano de 2019.

Como observado nas imagens 8 e 9, o uso da técnica SfM possibilitou o reprocessamento de dois conjuntos de imagens históricas da Península Keller, referenciadas ao sistema de coordenadas da área, sendo possível a realização de análises temporais e avaliação dos aspectos ambientais presentes à época de obtenção das mesmas.

A técnica SfM permitiu a obtenção dos parâmetros de orientação exterior e interior da câmera, posteriormente a obtenção das imagens, sendo realizada as correções necessárias para a produção de material cartográfico. Sendo assim foram calculados a distância focal f ; pontos principais no sistema de coordenadas da câmara x_0 , y_0 ; os coeficientes de distorção radial K_1 , K_2 , K_3 e os coeficientes de distorção descentrada P_1 e P_2 . O processo de otimização da câmera foi realizado após a inserção dos pontos de controle.

A nuvem de pontos 3D obtida foi composta de aproximadamente 45 milhões de pontos (Figura 13). O software de processamento possibilita a exportação dessa nuvem de pontos densa, sendo possível a sua utilização em trabalhos de geomorfometria, identificando alterações diretamente em nuvem, como em trabalhos de James et al. (2017) e Westoby et al. (2015) que utilizaram aerofotogrametria por RPA para obtenção dos dados de terreno.

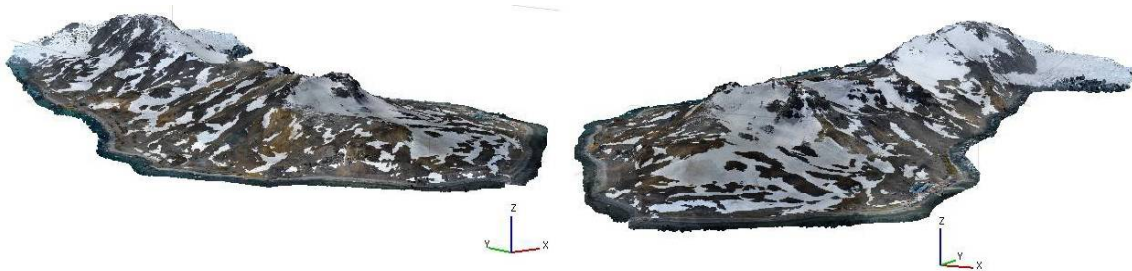


Figura 13 - Nuvem tridimensional de pontos gerada a partir da aerotriangulação.

Essa nuvem densa foi utilizada para a geração do Modelo Digital de Superfície a partir de interpolação realizada no próprio *software* de processamento. Posteriormente com a retirada das benfeitorias e demais objetos acima do solo, obteve-se o Modelo Digital de Terreno (Figura 12).

Na tabela 4 são exibidos os valores dos resultados do processamento das imagens. O valor de RMSE corresponde ao ajuste realizado pelo software. O ajuste dos dados obtidos pelo RPA em 2019 foi superior aos demais. Resultado este que ressalta a importância da utilização de pontos de controle no ajuste do bloco fotogramétrico, sendo este superior ao ajuste encontrado por Júnior et al. (2012) que obteve o valor de 0,92 m. O ajuste para os dados de 1956 não seguiu o mesmo padrão, o que pode ser explicado pela dificuldade de se encontrar pontos notáveis na imagem devido a menor resolução espacial da mesma.

Tabela 4 - Resultados dos processamentos

Características do Levantamento	Valores observados			
	1956	2003	2018	2019
Altura do voo em relação a base	4530 m	1220 m	189 m	184 m
Número de imagens	3	40	3783	2327
Resolução espacial MDT	7,75 m	0,71 m	0,38 m	0,38 m
Resolução espacial Ortofotomosaico	1,94 m	0,35 m	0,048 m	0,048 m
RMSE Planialtimétrico	13,63 m	0,33	0,19 m	0,14 m

Os resultados exibidos na tabela 4 demonstram o alto nível de detalhamento alcançado nos voos realizados com RPA, apresentando valores superiores àqueles encontrados nos materiais reprocessados de Francelino (2004) e DOS (1956). Esses valores já eram esperados, visto que os voos realizados com aeronaves foram realizados em altitude superior ao realizado pelo RPA, apresentando escalas menores de voo.

A obtenção da qualidade dos dados foi realizada a partir de testes estatísticos, sendo avaliada a distribuição dos pontos de controle, acurácia posicional e altimétrica, além de testes de tendência.

Na tabela 5 são apresentados os valores do teste do vizinho mais próximo para avaliação da distribuição espacial dos pontos de controle. Neste teste, foi avaliada o conjunto amostral de 36 pontos utilizados para a validação dos resultados, apresentando estes a densidade de 0,13 pontos por km².

Observa-se que todas as ordens testadas apresentaram o índice R maior que 1, sendo classificado a princípio como padrão disperso. Porém deve-se analisar se esse padrão é estatisticamente significativo a um intervalo de confiança de 95% quando submetido ao teste Z. Os resultados demonstram que apenas a segunda e terceira ordem apresentaram o Z_{calc} maior que o Z_{tab} , sendo rejeitada a hipótese H_0 , sendo esses resultados significativos estatisticamente.

Tabela 5 - Resultados estatísticos da Distribuição espacial. Estatística do vizinho mais próximo e teste Z

Ordem	Ordens		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Área (km ²)		5	
R _{obs} (m)	195,7053	326,3971	390,9496
R _{exp} (m)	186,339	279,5085	349,3856
R	1,0503	1,1678	1,1172
Z _{calc}	0,577	2,7733	2,3921
Padrão	Disperso	Disperso	Disperso
Teste z (z _{tab} =1,96)	Não significativo	Significativo	Significativo

De acordo com Santos et al. (2016), ao se utilizar várias ordens na análise do vizinho mais próximo é possível compreender como o padrão de distribuição espacial se comporta em nível local ou regional. A primeira ordem apresenta uma análise local, sendo as demais responsáveis por detectar padrões heterogêneos ocorrendo em diferentes escalas. Portanto o padrão espacial encontrado neste trabalho pode ser classificado como localmente agrupado e regionalmente disperso.

Na avaliação da qualidade planimétrica e altimétrica foi utilizado o conjunto amostral de 35 pontos de referência e confrontados com conjunto de pontos obtidos no MDT e ortofotomosaico gerado. Na Figura 09 são exibidas as discrepâncias posicionais e altimétricas, sendo observada em geral baixas discrepâncias, indicando uma boa precisão dos produtos gerados. O desvio no eixo Z foi maior que os desvios em X e Y, sendo encontrado valor máximo de 0,674 m e mínimo de 0,014 m (Figura 14).

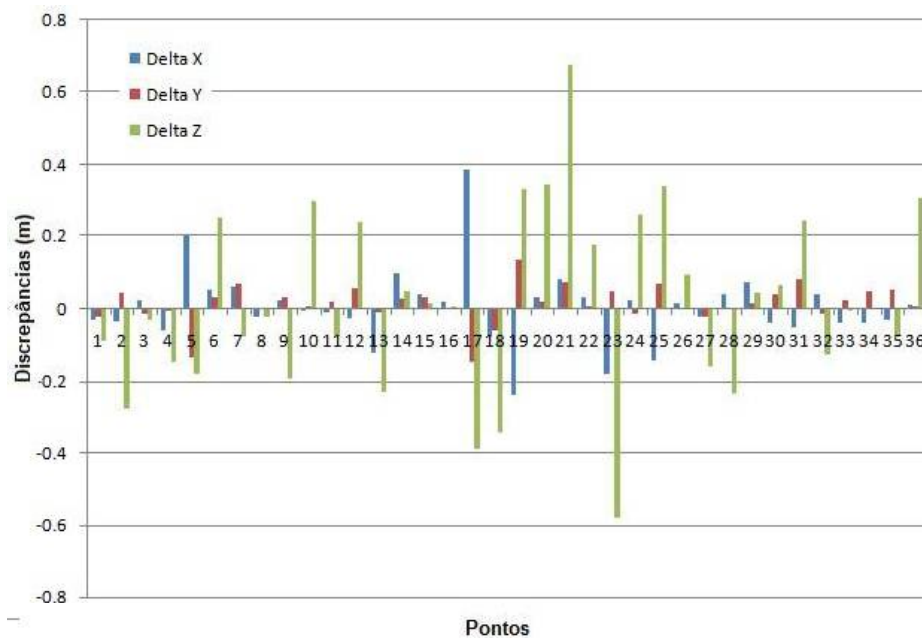


Figura 14 – Gráfico das discrepâncias posicionais por ponto.

O RMSE altimétrico utilizando 36 pontos foi de 0,2488 m, para 70 pontos foi de 0,2395 m e para 90 pontos foi de 0,327 m (Tabela 6). Observa-se que apesar de aumento de quase 50%, ele ainda foi abaixo que ao encontrado por Schünemann et al., (2018) quando utilizou um Laser Scanner Terrestre (LST) e um conjunto de 56 pontos de validação. Neste trabalho os autores encontraram o valor de RMSE de 1,74 m, sendo encontrados 4 valores considerados *outliers*. Quando estes foram eliminados o RMSE foi ajustado para 0,726 m. Para a visualização de *outliers* nesse trabalho foi utilizado o gráfico de boxplot (Figura 15),

não sendo encontrados valores discrepantes classificados como *outliers* para nenhum conjunto amostral testado.

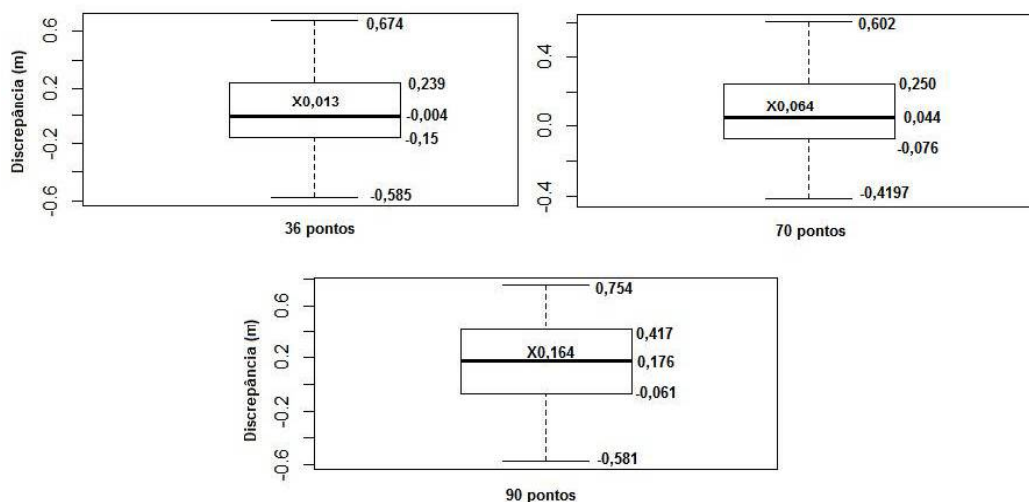


Figura 15 - Gráfico boxplot dos valores de discrepâncias altimétrica

Quanto à planimetria observa-se na tabela 6 que o valor de RMSE posicional foi de 0,114 m, sendo este próximo ao encontrado por Silva et al. (2015) e Mesas-Carrascosa et al., (2016) que também utilizaram um RPA multirotor.

Tabela 6 - Resultados estatísticos da validação da Acurácia Posicional

Estadística	Este	Norte	Posicional	Z	Z	Z
nº pontos	36	36	36	36	70	90
média	0,002	0,0134	0,0803	0,0138	0,064	0,151
desvio	0,103	0,0528	0,0833	0,252	0,2323	0,2923
variância	0,011	0,003	0,007	0,064	0,054	0,085
RMSE	0,1015	0,0537	0,1149	0,2488	0,2395	0,3278
máximo	0,386	0,136	0,413	0,674	0,6023	0,6858
mínimo	-0,2387	-0,147	0,009	-0,5815	-0,419	-0,581
curtose	7,0092	5,0037	8,3654	3,0245	2,330	2,131
assimetria	1,0295	-0,9247	2,2779	0,1521	0,140	-0,093
soma	0,371	0,098	0,243	0,497	4,527	13,647
<i>outliers</i>	3	0	3	0	0	0

Observa-se na figura 11 o gráfico *boxplot* das discrepâncias planimétricas. Ocorrem três valores classificados como *outliers*, sendo estes 0,413 m; 0,274 m e 0,24 m. Retirando esses três valores da análise o RMSE chegou a 0,072 m. Por ser este um valor próximo ao

obtido com 36 pontos, e distante do EP da escala investigada, optou-se por não retirar esses valores da análise final.

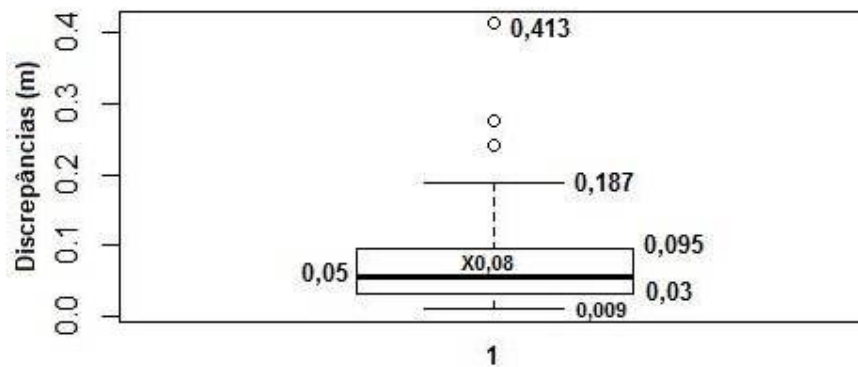


Figura 16 - Gráfico boxplot dos valores de discrepância planimétrica

O resultado para planimetria atestou para a não normalidade dos dados, sendo rejeitada a hipótese nula H_0 . Tal resultado impossibilitou a utilização do teste *t de student*, sendo utilizada a estatística espacial Média Direcional/Variância circular para atestar a tendência dos dados de acordo com metodologia proposta por Santos et al. (2016). De acordo com esses autores quanto mais próximo o valor de 1, mostra que os vetores de discrepâncias estão em direções opostas, inferindo que não há presença de efeitos sistemáticos no produto testado. O resultado encontrado para a variância circular foi de 0,71, não sendo detectada portanto a presença de tendência no ortofotomosaico.

As médias das discrepâncias altimétricas apresentaram a distribuição normal de acordo com teste de Shapiro-Wilk, sendo realizado o teste *t de student* para analisar a tendência dos dados. Nesse teste o resultado apontou um t calc superior ao de t tab, apontando que não há tendência dos dados.

Para avaliação do teste de precisão aplicou-se o padrão de acurácia posicional descrito no Decreto-lei nº 89.817/ET-ADGV, utilizando como referência a escala de 1:1.000. Os resultados dos procedimentos utilizando o padrão brasileiro são apresentados na Tabela 7, indicando que a ortoimagem atendeu às duas condições do Decreto-lei 89.817/ET-ADGV, para a escala de 1:1000 na Classe A (PEC-PCD). Aplicando o teste de precisão para a equidistância de curvas de 1 m, tem-se que o RMS foi de 0,2488, sendo este reprovado para a classe A, e acurado para a classe B.

Tabela 7 - Resultado do teste de precisão do ortofotomosaico e MDT

Itens	Resultado	
	Planimétrico	Altimétrico
Média	0,080	0,0138
RMSE	0,114	0,248
Desvio-padrão	0,083	0,252
nº de amostras	36	36
Análise de tendência	Não tendencioso	Não tendencioso
PEC-PCD (1:1000)	0,28	0,27
EP (1:1000 - Classe A)	0,17	0,17
% de discrepâncias < PEC	97,222	72,222
RMS < EP	Sim	Não
Dado espacial é preciso?	Sim	Não
Dado espacial é acurado?	Sim	Não

3.2 Análise da dinâmica de cobertura na Península Keller

Tendo em vista a alta resolução espacial e acurácia dos dados, os produtos gerados nessa pesquisa possibilitarão aprofundar os trabalhos de monitoramento ambiental da Península Keller, permitindo análise detalhada de aspectos ambientais presentes, como alterações na paisagem ocorridas por processos naturais e por interferência antrópica. As alterações naturais mais notáveis estão relacionadas ao processo de retração de geleiras e circos glaciais, processo este presente na Península. Simões et al., (2000) apontaram uma redução de aproximadamente 50% da área das geleiras de circo em comparação a 1956.

Na figura 17 observa-se as frentes de geleiras presentes na área estuda, observando uma marcante retração da geleira Stenhouse nas duas faces da Península, sendo 170 metros na face leste e 220 metros na face oeste, comparando os ortofotomosaicos gerados em 1956 e 2003. Utilizando a imagem de 2019 observa-se que o processo de retração encontra-se ativo, observando um recuo de 7 metros em relação a 2003.

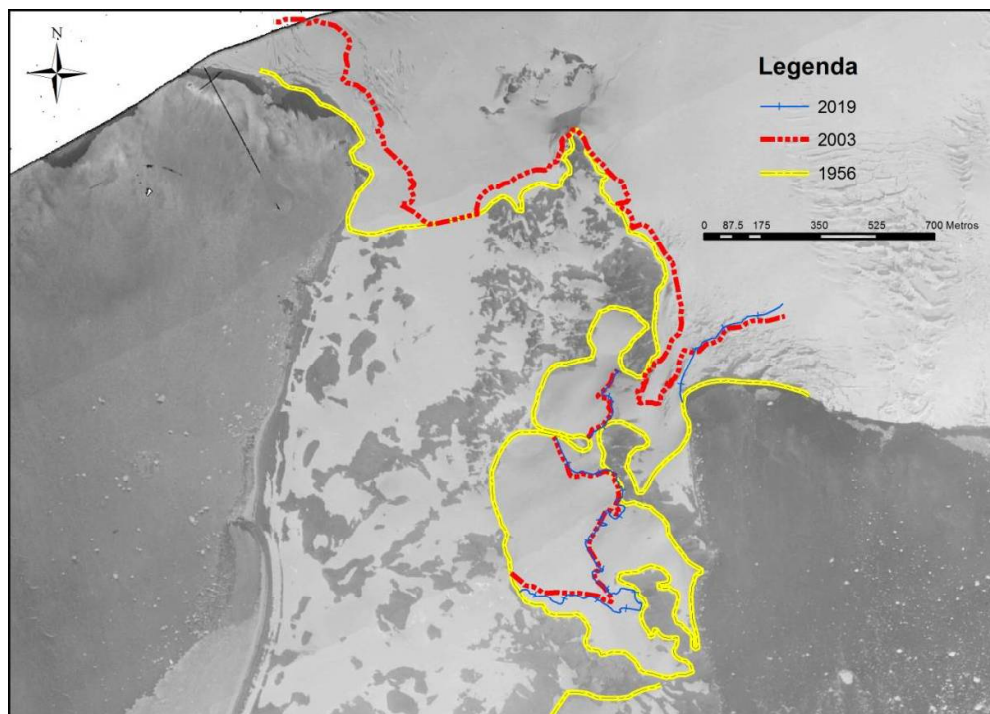


Figura 17 - Limites dos glaciares presentes na Península Keller nos anos 1956, 2003 e 1956.

Alterações relacionadas à presença antrópica também são identificadas nas imagens, sobretudo na região de abrangência da Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF). Analisando as imagens de 2003 e 2018 e 2019, observa-se alterações marcantes na cobertura e uso do solo nesse local. Essas alterações foram motivadas principalmente pelo incêndio que destruiu a EACF em 2012, sendo posteriormente implantado o MAE (Módulo Antártico Emergencial), seguido pela instalação de canteiro de obras para a reconstrução da nova EACF (Figura 18). Observa-se sobretudo a grande concentração de material nos terraços marinhos e uma redução na área de vegetação de aproximadamente 1.849,79 m², sendo possível constatar que foram tomadas medidas de minimização dos impactos ambientais com o replantio em áreas adjacentes.

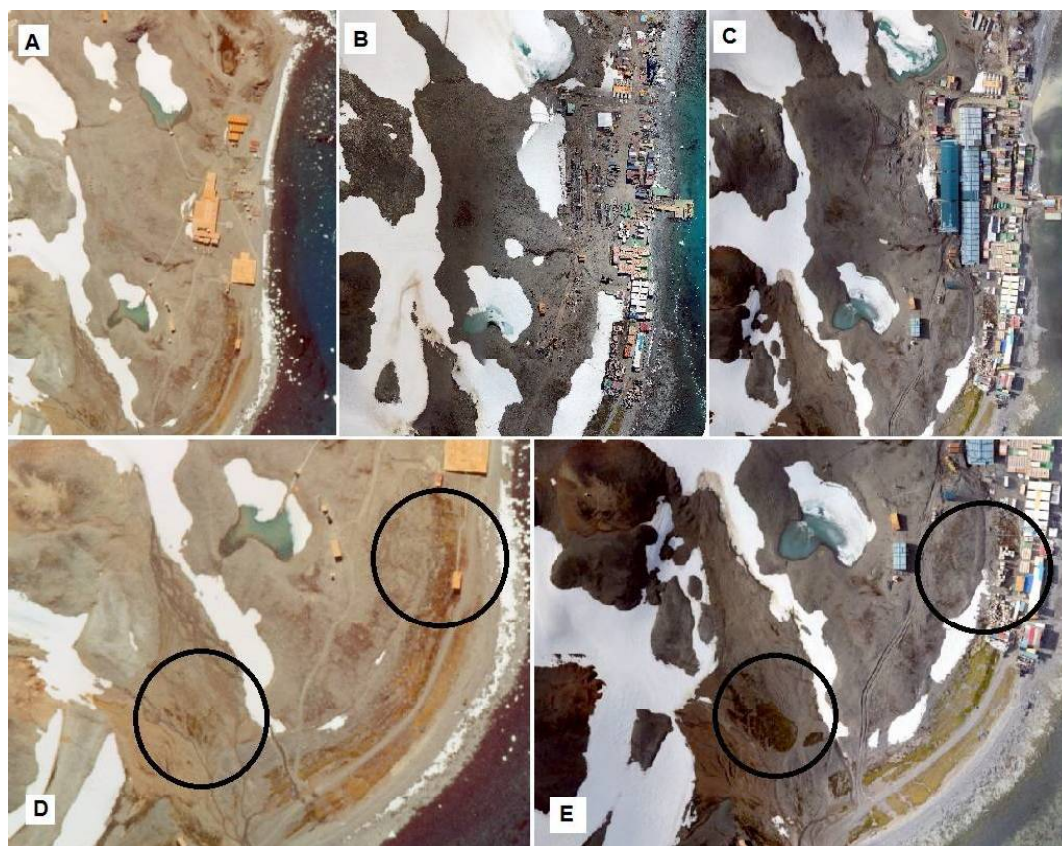


Figura 18 - Figuras dos anos 2003 (A), 2018 (B) e 2019 (C) da área do entorno da EACF. Em D e E observa-se os locais de alteração da cobertura do solo.

Do ponto de vista do mapeamento da cobertura do solo, os produtos gerados pelo RPA ganham destaque na espacialização e identificação das comunidades vegetais presentes. Trabalhos realizados por Francelino (2004) e Pereira et al. (2009) mapearam e classificaram as comunidades vegetais presentes nessa área, sendo utilizadas imagens aéreas, receptores GNSS, trenas e bússolas para espacializar e mapear as comunidades vegetais presentes. De acordo com Francelino (2004), o mapeamento das comunidades vegetais é importante para se avaliar a sua dinâmica temporal e estudar em maior detalhe as relações ecológicas com os diferentes atributos do meio físico, auxiliando também nas estimativas de estoque de carbono nos ecossistemas da Antártica e sua evolução. Com a elevada resolução espacial do ortofotomosaico por RPA será possível refinar os mapas de vegetação presente, como observado na figura 19, onde são representados campos de musgos.



Figura 19 - Delimitação de comunidade vegetal em ortofotomosaico obtido em 2019

A influência da declividade e substrato no estabelecimento de comunidades vegetais fica clara ao analisar as comunidades vegetais presentes. Na figura 20 foram identificadas duas comunidades vegetais, com domínio de *Deschampsia antarctica* e *Politrichastrum alpinum*, ocorrendo em declividade média de 13,4 graus. O substrato presente também pode ser analisado, onde observa-se a presença de material mais grosseiro como blocos de pedra e cascalho, em área de *Politrichastrum alpinum*. Com necessidade do estabelecimento de raízes para o seu desenvolvimento a *Deschampsia antarctica* está presente em área de menor declividade, costeiras e com presença de ninhais de aves (FRANCELINO, 2004).

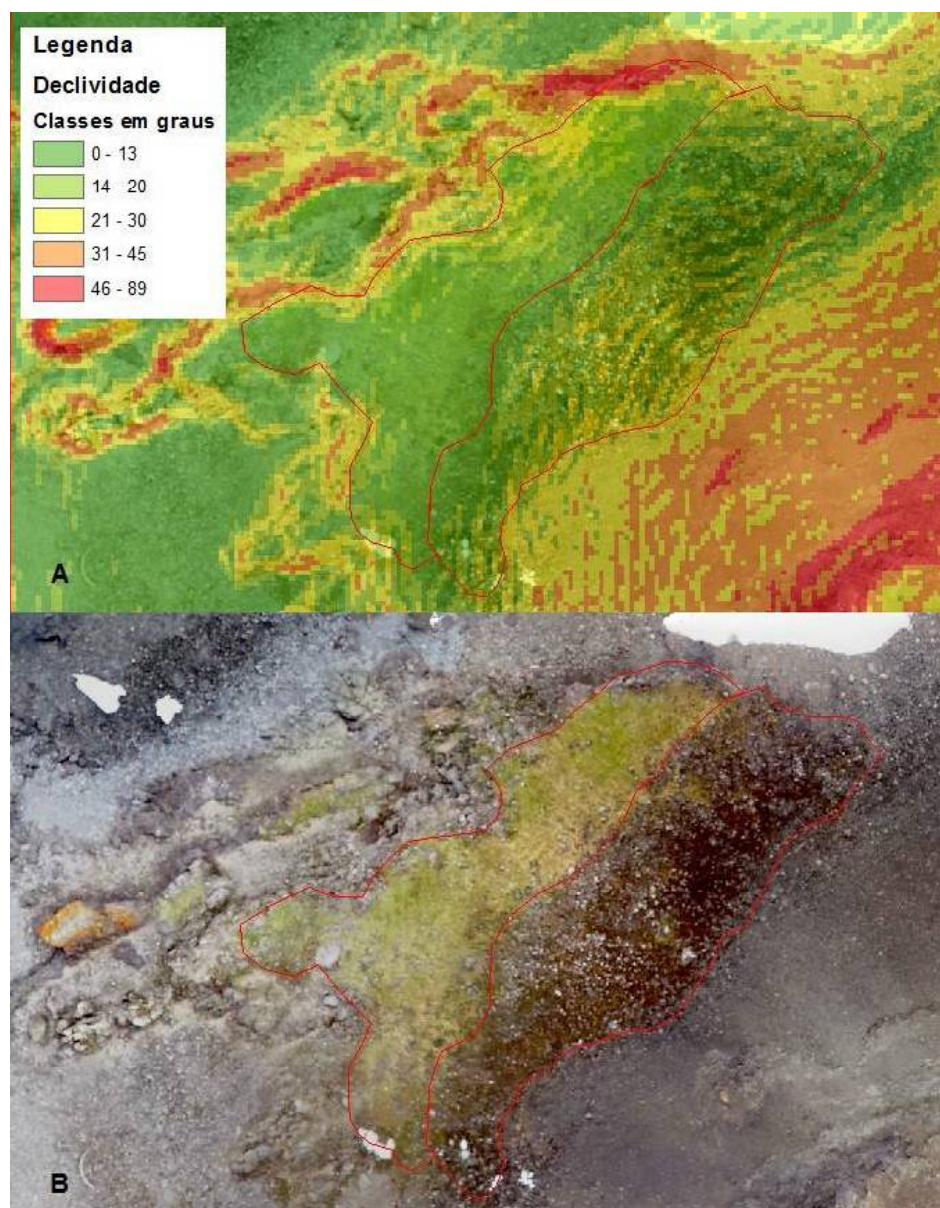


Figura 20 - Comunidades vegetais presentes e influência da declividade. Em (A) observa-se as classes de declividade, e em (B) as comunidades com predomínio de *Deschampsia antarctica* (à esquerda) e *Politrichastrum alpinum* (à direita).

4. Conclusão

Constatou-se que o uso do RPA é uma técnica eficiente na coleta de dados de superfície em ambiente antártico, além de representar baixo custo operacional e grande potencial de gerar produtos detalhados.

A técnica utilizada para processamento de dados mostrou-se adequada para o processamento das imagens, sendo possível resgatar acervos históricos, verificando-se as alterações de cobertura ocorridas na Península Keller ao longo de 63 anos.

A metodologia proposta por Santos et al. (2016) mostrou-se adequada para a a verificação da qualidade dos dados, indo além da análise do RMSE. Incorpora importantes parâmetros de avaliação, como distribuição espacial dos pontos de controle e avaliação de tendências.

Aplicadas as tolerâncias da PEC-PCD da ET-CQDG, o mosaico de imagens aéreas apresentou-se acurado 1:1000. O resultado do PEC-PCD foi Classe A, sendo esse produto avaliado como preciso e não tendencioso.

De acordo com os resultados PEC-PCD o MDT gerado foi acurado como classe B para a equidistância atestada (1 m), sendo este um produto livre de tendências.

5 - Referências bibliográficas

AGISOFT, L. L. C. Agisoft PhotoScan user manual. Professional Edition, Version 1.2.6 (acesso 10.01. 2019.). http://www.agisoft.ru/pscan/help/en/pscan_pro.pdf, 2019.

ALMEIDA, I. DE C. et al. Estudo sobre o uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para mapeamento aéreo com fins de elaboração de projetos viários. **VI Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, p. 24–25, 2016.

ARIGONY NETO, J.; FRANZ BREMER, U.; CARDIA SIMÕES, J. Variações nas frentes de gelo da Enseada Martel, Ilha Rei George, Antártica, entre 1956 e 2000. **Anais X SBRS**, p. 709–711, 2001.

BRASIL, Decreto nº 89.817 de junho de 1984 - Normas Técnicas da Cartografia Nacional, Diário Oficial da União, Brasília, Brasil, 1984.

BRAUN, M. et al. An improved topographic database for King George Island: compilation, application and outlook. **Antarctic Science**, v. 13, n. 01, p. 41–52, 2003.

BREMER, U. F.; ARIGONY-NETO, J.; SIMÕES, J. C. Teledeteção de mudanças nas bacias de drenagem do gelo da ilha Rei George, Shetlands do Sul, Antártica, entre 1956 e 2000. **Pesquisa Antártica Brasileira Brazilian Antarctic Research**, v. 4, p. 37–48, 2004.

CARRIVICK, Jonathan L.; SMITH, Mark W.; QUINCEY, Duncan J. Background to structure from motion. **Structure from Motion in the Geosciences**, p. 37-59, 2016.

COSTA, G. C.; SILVA, D. C. DA. Pré-Sinalização De Pontos De Apoio Em. **IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, n. May, p. 1–9, 2012.

CRÓSTA, A. P. Análise de imagens de sensoriamento remoto. 1992.

DE CARVALHO, J. A.; SILVA, D. Métodos para avaliação da acurácia posicional altimétrica no Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 70, n. 2, p. 725–744, 2018.

DSG. Norma da Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais– . **ET-CQDG. 1ª Edição. Brasília–DF**, 2016.

FORSMOO, J. et al. Drone-based structure-from-motion photogrammetry captures grassland sward height variability. **Journal of Applied Ecology**, v. 55, n. 6, p. 2587–2599, 2018.

FRANCELINO, M. R. **Geoprocessamento aplicado ao monitoramento ambiental da Antártica Marítima: solos , geomorfologia e cobertura vegetal**. Tese (Doutorado em Solos) - Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 113. 2004.

GALO, M.; CAMARGO, P. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. **Congresso Brasileiro De Cadastro Técnico Multifinalitário**, n. 1, p. 41–48, 1994.

JAMES, M. R.; ROBSON, S.; SMITH, M. W. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry and precision maps. **Geophysical Research Abstracts EGU General Assembly**, v. 19, n. November, p. 2017–7200, 2017.

JÚNIOR, C. W. M. et al. A new topographic map for Keller Peninsula, King George Island, Antarctica. **Brazilian Antarctic Research**, v. 5, p. 105–113, 2012.

- LEOTTI, V. B.; BIRCK, A. R.; RIBOLDI, J. Comparação dos Testes de Aderência à Normalidade Kolmogorov-smirnov, Anderson-Darling, Cramer–Von Mises e Shapiro-Wilk por Simulação. **Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agrônômica**, v. 11, p. 192, 2005.
- MACHADO, M. L. et al. Mapeamento de áreas cafeeiras (*Coffea arabica* L.) da Zona da Mata Mineira usando sensoriamento remoto. **Coffee Science**, v. 5, n. 2, p. 113–122, 2010.
- HUNG, M.N.W.B. et al. Levantamento com veículo aéreo não tripulado para geração de modelo digital do terreno em bacia experimental com vegetação florestal esparsa. **RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 43, p. 145–162, 2017.
- MENDONÇA, J. C. et al. avaliação temporal de eventos de inundação na baixada campista, região norte fluminense, Rj, pelo uso de imagens digitais orbitais do sensor modis. **Revista Brasileira de Cartografia**. 235–239, 2007.
- MERCHANT, D. C. Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps. **Proceedings of the Technical Congress on Surveying and Mapping**, 222-231, 1982.
- MESAS-CARRASCOSA, F. J. et al. An analysis of the influence of flight parameters in the generation of unmanned aerial vehicle (UAV) orthomosaics to survey archaeological areas. **Sensors (Switzerland)**, v. 16, n. 11, 2016.
- MONICO, J. F. G. et al. Acurácia e precisão: Revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 3, 2009.
- MONTGOMERY, D.C; RUNGER, G.C. Applied Statistics and Probability for Engineers. 2010.
- PEREIRA, A. B. et al. Plant Communities From Ice-Free Areas of Keller Peninsula, King George Island, Antarctica. **Oecologia Brasiliensis**, v. 11, n. 1, p. 14–22, 2009.
- PEREIRA, Antonio Batista; PUTZKE, Marisa Terezinha Lopes; PUTZKE, Jair. Biological communities of Keller Peninsula, King George Island-Antarctica. **Caderno Pesquisa Série Biol**, v. 20, n. 3, p. 63-74, 2008.
- RIPLEY, B.D. Modeling Spatial Patterns. *Journal of the Royal Statistical Society*. 172–212.1977.
- ROBERTS, R. et al. Structure from motion for scenes with large duplicate structures. **Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, p. 3137–3144, 2011.
- SANTOS, A. P. et al. Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais utilizando técnicas de estatística espacial: proposta de método e exemplo utilizando a norma brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 4, p. 630–650, 2016.
- SANTOS, A. P. Controle de Qualidade Cartográfica: metodologias para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais. Tese (Doutorado em Engenharia Civil / Informações Espaciais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. p.172. 2010.

SANTOS, I. R. et al. Heavy metal contamination in coastal sediments and soils near the Brazilian Antarctic Station, King George Island. *Marine pollution bulletin*. Volume 50, n. 2, p. 185–94, 2005.

SCHÜNEMANN, A.L. **Geotecnologias para mapeamento digital na antártica marítima**. 2016. Tese (Doutorado em Solos em Nutrição de Plantas) - Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. p.114. 2016.

SCHÜNEMANN, A. L. et al. High-resolution topography for digital terrain model (Dtm) in keller peninsula, maritime antarctica. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 2001–2010, 2018.

SILVA, C. A. et al. Avaliação Da Acurácia Dos Ortofotomosaicos E Modelos Digitais Do Terreno Gerados Pelo Mvant / Dnrm. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 7, n. 1808-0936, p. 1479–1495, 2015.

SILVEIRA, H. L. F. DA et al. Análise da cobertura de nuvens no nordeste do Brasil e seus impactos no sensoriamento remoto agrícola operacional. **XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto -SBSR**, p. 7883–7890, 2017.

SIMÕES, J. et al. A gis for the antarctic specially managed area of admiralty bay, king george island, antarctica. **Geo-Spatial Information Science**, v. 4, n. 2, p. 8–14, 2001.

TOUTIN, T. Geometric processing of remote sensing images: Models, algorithms and methods. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 10, p. 1893–1924, 2004.

UNAVCO. Available online: <https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/geoidheight-calculator/geoid-height-calculator.html> (acesso em 01/02/2019).

VITTI, D. M. DE C. Exatidão posicional de produtos cartográficos digitais com RPAS (Remotely Piloted Aerial System) para mapeamento da área seca de reservatório Exatidão posicional de produtos cartográficos digitais com RPAS (Remotely Piloted Aerial System) para mapeamento. Tese (**Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental, ênfase em Planejamento e Gerenciamento de Recursos Hídricos**) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlo. p. 202. 2017.

WESTOBY, M.; DUNNING, S.; HEIN, A. Inter-annual surface evolution of an Antarctic blue-ice moraine using multi-temporal DEMs. **Earth Surface Dynamics Discussions**. n 3,p. 1317-1344, 2015.

WOLF, Paul R.; DEWITT, Bon A. Elements of photogrammetry: with applications in GIS. New York: McGraw-Hill, 2000.

WONG, D.W.S; LEE, J. Statistical Analysis of Geographic Information with ArcView GIS and ArcGIS. **John Wiley & Sons**, 2005.

CAPÍTULO 2

Utilização de dados LIDAR na identificação de processos de movimentação de massa, Península Keller, Ilha Rei George, Antártica

Resumo

As áreas livres de gelo da Antártica estão sujeitas aos processos de reajuste do terreno, sendo estes acentuado durante os períodos mais quentes do ano. A partir de técnicas de identificação e quantificação de alterações ambientais, podem-se obter mais informações a respeito da evolução dos ambientes periglaciais. Essas técnicas podem ser aplicadas para a obtenção de taxas de transporte de material, auxiliando no entendimento de padrões e processos geomorfológicos atuantes. A substituição dos métodos tradicionais de monitoramento da paisagem por tecnologias atuais, possibilita analisar grandes áreas, obtendo resultados mais precisos e detalhados. A paisagem da Península Keller está marcada por topografia montanhosa, apresentando movimentos de vertente e ocorrência de permafrost em áreas descontínuas. Possui temperaturas médias acima de zero grau durante o verão, influenciando no processo de descongelamento do material durante esse período. Com o objetivo de identificar os principais processos atuantes na paisagem da Península Keller, foi utilizada a tecnologia de dados LIDAR para avaliar a dinâmica em quatro ambientes diferentes. Para a base de dados de referência utilizou-se a nuvem de pontos obtida em 2015, realizando-se uma campanha de campo no ano de 2018 para obter o conjunto de comparação. Optou-se por utilizar a técnica de comparação direta na nuvem de pontos, através do algoritmo m3c2, realizado no software *CloudCompare v.2.10*. Obteve-se uma nuvem de pontos com a informação da distância vertical entre pontos, com limiar médio de 0,20 m para descoberta significativa de mudança. Os resultados foram relacionados com as feições geomorfológicas presentes e variáveis morfométricas do relevo. O sítio um, que compreende parte dos circos glaciais presentes na área, apresentou processos predominantemente relacionados a sistemas crionivais e de vertente. O sítio dois compreendeu parte do Morro Flagstaff, constatando-se processos envolvidos por forças gravitacionais e processos de vertente, sendo a declividade o fator preponderante para as alterações em rampas de tálus. O terceiro sítio, apresentou processos ocorrendo nas cotas mais elevadas, como quedas de blocos em escarpas, além de processos crionivais ocorrendo em rampas e nichos de nivação. O quarto sítio foi aquele que apresentou a menor taxa de alteração altimétrica, ocorrendo alterações em terrenos saturados, posicionados em cotas elevadas e declividade moderada. A utilização de dados *Lidar* e imagens aéreas de alta resolução, demonstrou-se adequada para identificação de processos geomórficos em grandes áreas. Possibilitou cobrir áreas inacessíveis e identificar pequenas alterações no terreno, apesar do pequeno intervalo de tempo analisado.

Palavras chave: geomorfometria, permafrost, movimentos de massa

Use of LIDAR data in the identification of mass movement processes, Keller Peninsula, King George Island, Antarctica

Abstract

Antarctic ice-free areas are subjected to land readjustment processes, which are accentuated during the hottest periods of the year. From the techniques of identification and quantification of environmental changes, more information about the evolution of periglacial environments can be obtained. These techniques can be applied to obtain material transport rates, helping in the understanding of working patterns and geomorphological processes. The replacement of traditional methods of landscape monitored by current technologies makes it possible to analyze large areas, obtaining more precise and detailed results. The landscape of the Keller Peninsula is marked by mountainous topography, presenting slope movements and occurrence of permafrost in discontinuous areas. It has average temperatures above zero degree during summer, influencing the thawing processes of the material during this period. With the objective of identifying the main processes in the landscape of the Keller Peninsula, the LIDAR data technology was used to evaluate the dynamics in four different environments. For the reference database, it was used a cloud of points obtained in 2015 and a field campaign which was carried out in 2018 to obtain the comparison set. We chose to use the direct comparison technique in the cloud of points, through the algorithm m3c2, realized in the software CloudCompare v.2.10. A cloud of points was obtained with the information of the vertical distance between points, with an average threshold of 0.20 m for significant change detection. The results were related to the present geomorphological features and morphometric variables of the relief. Site one, which comprises part of the glacial cirques present in the area, presented processes predominantly related to crionival and slope systems. The site two comprised part of the Flagstaff Hill, being verified processes involved by gravitational forces and slope processes, with slope being the preponderant factor for the changes in talus ramps. The third site, presented processes occurring high altitude, such as falls of cliffs on escarpments, besides crionival processes occurring in ramps and niches. The fourth site was the one which presented the lowest rate of altimetric change, with changes occurring in saturated terrains, positioned in high elevations and moderate slope. The use of Lidar data and high-resolution aerial images proved to be adequate in the identification of geomorphic processes in large areas. It made it possible to cover inaccessible areas and identify small changes in the terrain, despite the small time interval analyzed.

Key words: geomorphometry, permafrost, mass movements

1. Introdução

Áreas periglaciais são locais em que a evolução da paisagem está relacionada a frequente ciclos de congelamento e descongelamento sazonal do terreno, podendo possuir ou não permafrost (FRENCH, 2007; SLAYMAKER, 2011). As alterações geomórficas são constantes e têm-se movimentos de massa como componentes integrantes da resposta da erosão da paisagem. Apresentam estreita relação na pedogênese, estabelecimento da vegetação e drenagem de uma área, condicionando a formação da paisagem local. Eventos estimulados por fatores naturais como o descongelamento da camada ativa em terrenos declivosos, podem desencadear alterações marcantes na topografia do terreno, principalmente em áreas que possam apresentar condições de remobilização de materiais, como os processos de solifluxão (FRANCELINO et al., 2011).

Como fatores de interferência adicionais têm-se o substrato presente, como rochas e solos (VARNES, 1978). Em áreas periglaciais as condições de congelamento e descongelamento do substrato, com ocorrência de degradação de permafrost (FRENCH, 2007), são importantes fatores na alteração geomórfica desses ambientes. Já as composições químicas, mineralógicas e texturais distintas dos solos, com coeficientes de expansão e contração diferenciados, aliados a atividade da água e temperatura, atuam diretamente nas contrações térmicas, que podem originar fissuras nesses locais.

O litotipo, as atividades tectônicas atuais e passadas, além do relevo, contribuem para a intensidade e frequência dos movimentos de massa. A declividade das vertentes com maior ou menor interferência da gravidade, também influencia as taxas de deslocamento de material, associados ou não pelo substrato saturado. Este processo, quando associado ao congelamento e descongelamento, é denominado de solifluxão (BALLANTYNE; HARRIS, 1994; FRENCH, 1996; FRANCELINO, 2004; MATSUOKA, 2001).

Segundo Varnes (1978), o movimento de massa em vertente também pode ser denominado como escorregamento e queda, tombamento, expansão lateral, corrida/escoamento. Pode ser ainda classificado de acordo com o seu nível de atividade (CRUDEN e HU, 1993), sendo ativo quando ainda apresenta movimento. Se moveu durante o último ano, mas apresenta-se inativo atualmente, é classificado como suspenso. Podem ser classificados ainda como dormente, quando moveu-se a mais de dois anos, e reativado, quando o substrato está movendo atualmente depois de estar suspenso ou dormente.

De acordo com López-Martínez et al. (2012) o ambiente periglacial úmido das Ilhas Shetlands do Sul é muito ativo, com intensos processos em declives e plataformas, sendo diferenciados cinco subsistemas morfodinâmicos básicos: resistência de leitos de rochas,

processos de gravidade, permafrost e camada ativa, crionival, e *thermokarst*. Atualmente essa região experimenta extrema variabilidade de clima e aquecimento significativo do ar, aumentando em média 2,5 °C nos últimos 50 anos (TURNER et al., 2005) o que pode intensificar a alteração de paisagens glaciais, como vem ocorrendo na Ilha Rei George nesse período, com a diminuição de 7,7 % (3,5 km²) da sua área de gelo (ARIGONY NETO et al., 2001).

A exposição de novas áreas livre de gelo faz com que essas superfícies fiquem sujeitas a atuação de um novo conjunto de fatores, à medida que sistemas eólicos e fluviais operam em direção ao reequilíbrio do então ambiente não glacial (BEN; EVANS, 2010). Além do ambiente periglacial, áreas que sofrem influência de geleiras podem ser classificadas em Proglaciais e Paraglaciais. O ambiente Proglacial localiza-se às margens do glaciário, sendo que a dinâmica erosiva de materiais subglaciais acompanham a margem da geleira (EMBLENTON-HAMMAN, 2004). Em áreas sob o regime de processos Paraglaciais o terreno deglaciado está inicialmente em estado instável e, portanto, vulnerável às modificações promovidas por agentes subaéreos, apresentando paisagens diretamente condicionadas pela glaciação e deglaciação (BALLANTYNE, 2002).

Essa dinâmica ambiental proporciona alterações geomórficas de diferentes magnitudes, mesmo quando apresenta baixas velocidades de deslocamento. De acordo com Matsuoka (2001), no monitoramento do processo de solifluxão métodos não eletrônicos podem ser utilizados, como a marcação de pedras ou instalação de tubos em profundidade. Os métodos eletrônicos também são citados por esse autor como a utilização de clinômetro ou sonda de tensão. Porém, quando o objetivo é avaliar grandes áreas e deslocamentos em maior velocidade, métodos mais sofisticados podem ser utilizados. Nesses casos a utilização do sensoriamento remoto (SR), como a utilização de imagens aéreas, orbitais e dados LIDAR viabilizam esse tipo de estudo em extensas áreas, apresentando a vantagem de realizar medições em áreas com acessibilidade restrita (CUI et al., 2008).

O uso de equipamentos com tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*), possibilita a obtenção de uma nuvem de pontos tridimensionais de alta densidade, a partir do SR ativo, utilizando pulsos laser na faixa do infravermelho para a coleta de informações (SCHAFER e LOSCHI, 2005). Quando georreferenciados por receptores GNSS permitem a utilização em avaliação de deslocamentos de massa (DUNNING et al., 2009; LAGUE et al., 2013; MCKEAN e ROERING, 2004; VEHLING et al., 2016) podendo ser utilizada ao nível de solo (*Terrestrial Laser Scan*), e quando aerotransportada (*Aerial Laser Scan*) possibilita cobrir extensas áreas. Na Antártica, Westoby et al (2015) avaliaram a evolução topográfica de morainas em Patriots Hills, Fountain et al. (2017) deslocamentos de massa ocorridos na

região do DryValleys, e Schünemann et al. (2018) a atualização topográfica da Península Keller, Ilha Rei George.

As técnicas citadas permitem a obtenção de um grande volume de dados, sendo estes muitas vezes analisados a partir de elaboração de Modelos Digitais de Elevação (MDE). Porém a análise direta em um MDE pode apresentar restrições. Em terrenos escarpados ou paredes de rochas podem ocorrer distorções devido a interpolações e generalizações realizadas. Outro fator que não é levado em consideração é a rugosidade do terreno, sendo esta condição variável em áreas periglaciais, onde depósitos de material apresentam tamanhos diferenciados. Visto essas restrições, o método de avaliação direta em nuvens de pontos apresenta-se como potencial ferramenta em estudos geomorfológicos, podendo ser aplicadas em levantamentos topográficos multitemporais e de alta resolução (LAGUE et al., 2013; WESTOBY et al., 2015).

Na península Keller, Ilha Rei George, a paisagem está fortemente marcada pela dissecação do relevo, com uma diversidade de padrões de transporte de material com diferentes tipos e tamanhos. Face ao exposto, o objetivo desse trabalho foi analisar a movimentação de materiais influenciados pelos processos de congelamento e descongelamento em ambiente periglacial na região da Antártica Marítima através da comparação direta de nuvens de pontos para detectar movimentos de massa, a partir de dados geradas por laser scanner terrestre.

2. Material e Métodos

2.1 Área de estudo

As áreas estudadas estão localizadas na Península Keller, Ilha Rei George, arquipélago Shetlands do Sul (Figura 1). Essa Península possui uma área de 451 ha, limitando-se ao norte pelos Glaciares Domeyko e Stenhouse, com coordenadas 62°03'20" S, enquanto seu limite ao sul é determinado pela latitude 62°5'40" S com a Baía do Almirantado. Sua extremidade oeste é delimitada pela enseada Mackellar, enquanto a leste é determinada pela Enseada Martel. Suas temperaturas médias variam de -6,4 °C em julho a 2,3 °C em fevereiro, com precipitação anual de 367 mm, para o período de 1982 a 2002 (FERRON et al., 2004).

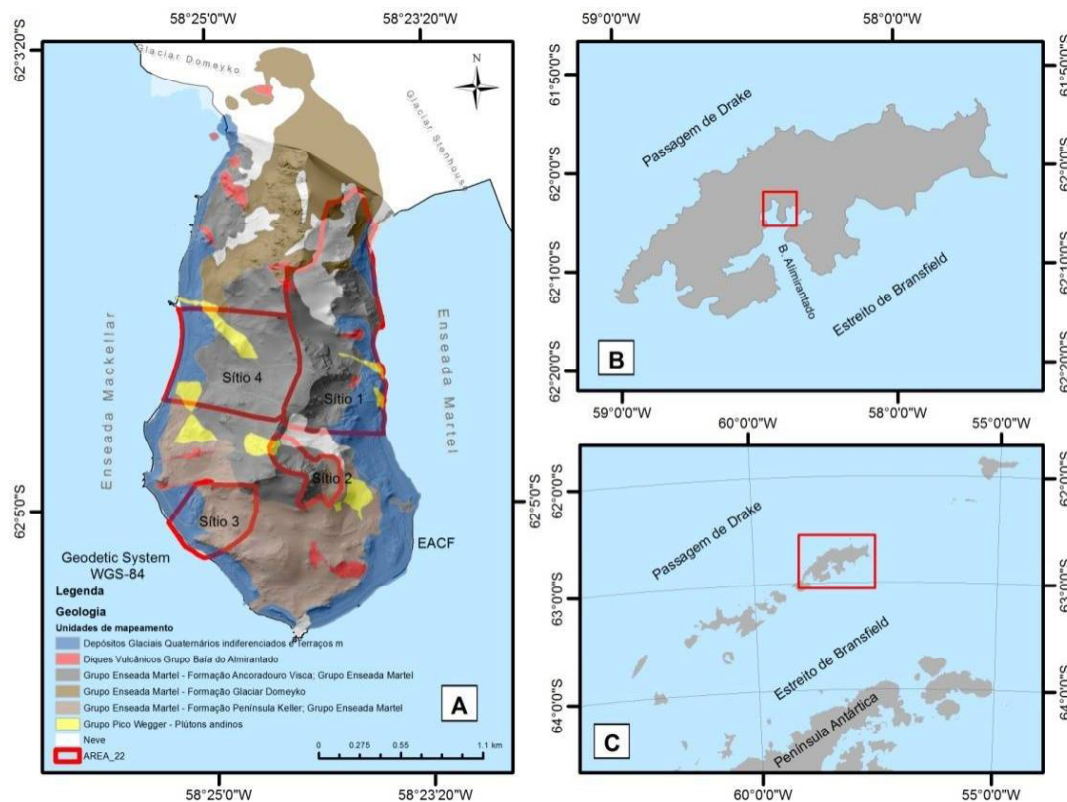


Figura 1 - Mapa de Localização da Península Keller e dos grupos geológicos presentes na área. A área circundada em vermelho corresponde aos locais que foram realizadas as varreduras com o LST.

A Ilha Rei George é dominada por basaltos jurássicos Superiores, basalto-andesitos e andesitos piritizados (HAWKES, 1961). De acordo com Francelino (2004) os eventos vulcânicos na Península Keller são distinguíveis por uma sucessão de rochas variando de basaltos andesíticos, aluminosos, até rochas andesíticas, tufos e aglomerados.

Os solos de maior ocorrência são os Criosolos, Leptosolos, Fluvisolos e Regossolos (FRANCELINO et al., 2011). Durante o verão estes encontram-se saturados, apresentando diferenças relacionadas a exposição de vertentes e colonização de aves e plantas, ocorrendo alterações em nível microclimático (FRANCELINO, 2004).

Condições climáticas encontradas nesse local propiciam o ciclo de congelamento e descongelamento dos solos e sedimentos presentes nas áreas livres de gelo, sendo a solifluxão o processo erosivo mais característico da Península Keller (FRANCELINO et al., 2011). Ocorrem ainda cristas e cumes favorecendo os movimentos de vertente, solos com padrões, geleiras de rocha e campos de prótalus (FRANCELINO et al., 2011; LÓPEZ-MARTÍNEZ et al., 2012).

Segundo Poelking et al. (2014) essa região da Antártica representa uma área de alta sensibilidade climática, estando em posição climática próxima do limite térmico de ocorrência de permafrost na Antártica. Bremer et al. (2004) cita as alterações climáticas ocorridas nessa região como provável responsável pelo recuo das geleiras presentes na Ilha Rei George. Tais transformações são representadas na figura 2, observando-se o recuo de geleiras adjacentes a Keller e parte da Baía do Almirantado, transformando a paisagem local e expondo novas áreas livres de gelo.

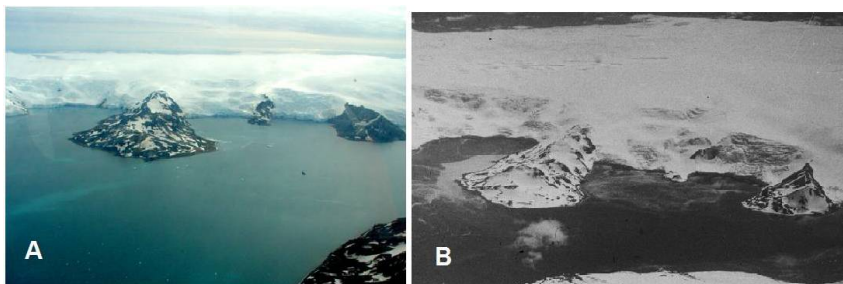


Figura 2 - Fotografias aéreas dos anos 2003(A) (Fonte: (FRANCELINO, 2003) e 1956 (B) (Fonte: USGS, 2018). Observa-se a retração de geleiras e circos glaciais, expondo novas áreas livres de gelo e reajuste das condições de estabilidade do terreno.

2.1.1 Sítio de estudo nº 1 - Área adjacente às geleiras de circo

Área localizada na face leste da Península, abrange uma área de 80,83 ha, apresentando topografia acidentada, com cristas escarpadas, afloramentos rochosos e depósitos glaciais (Figura 3). Limita-se ao sul pelo Glaciar Flagstaff e ao norte pelo Glaciar Babylon, compreendendo parte do Glaciar Noble. De acordo com Simões et al. (2004) estes glaciares passam por um processo de retração, ocorrendo perda de área de pelo menos 50% nos últimos 50 anos. Possui geformas relacionadas aos depósitos glaciais como Tálus e Protálus (FRANCELINO et al., 2011), sendo estes últimos classificados como Geleiras de Pedra por López-Martinez et al. (2012). Nas áreas com declividade mais suave apresenta áreas classificadas como rampa de deposição (*scree slope*) e faixa de praia próxima ao litoral norte da Península (FRANCELINO et al., 2011).

É dominada por rochas do Grupo Enseada Martel, formações Ancoradouro Visca, formação Península Keller e formação Glaciar Domeyko. Possui Dique vulcânico do Grupo Baía do Almirantado sendo estes relacionados a zonas de falhas de dimensões decamétricas até métricas (FRANCELINO, 2004). Apresenta ainda Depósitos glaciais quaternários indiferenciados e terraços marinhos. Na área conhecida como "Yellow Point", estão presentes plútons andinos do Grupo Pico Wegger, com composição variando de quartzo-gabro até

quartzo-diorito, sendo frequentemente associados com mineralizações sulfetadas do tipo quartzo-pirita/calcopirita (BIRKENMAJER, 2001, FRANCELINO, 2004).

Possui altitude máxima de 313 metros e mínima ao nível do mar, com altitude média de 117 metros. A declividade varia desde terrenos planos localizados em terraços marinhos à escarpado nas áreas de afloramentos rochosos. As faces de exposição predominantes são leste e sudeste.

Ao total foram realizadas varreduras em 18 pontos em 2015 e 13 em 2018 (Figura 4).



Figura 3 - Imagens da área estudada. Área de influência direta da geleira de circo Noble, observada na imagem

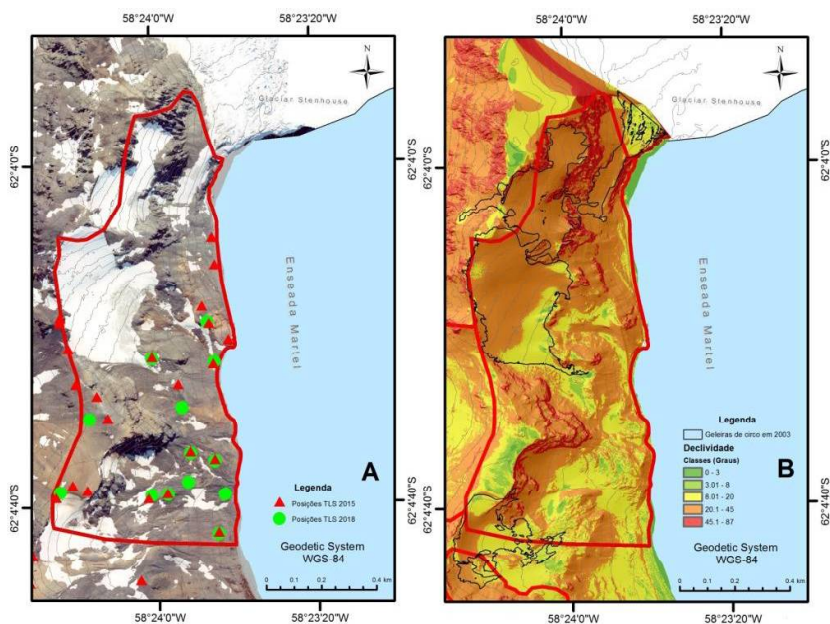


Figura 4 - Limite da área analisada com as referentes posições LST dos anos de 2015 e 2018. Em B observa-se o mapa com as classes de declividade.

2.2.2 Sítio de estudo nº 2 - Morro Flagstaff

Área também está localizada na face leste da Península, abrange uma área de 11,47 ha, apresentando topografia acidentada dominada por rampas de tálus, com cristas escarpadas e afloramentos rochosos (Figura 5). Nas áreas com declividade mais suave apresenta pequena área classificada como Felsenmeer (FRANCELINO et al., 2011).

Dominada por rochas do Grupo Enseada Martel, formações Ancoradouro Visca (oeste) e formação Península Keller (leste), abrange parte do Glaciar Flagstaff ao norte. Ao sul estão presentes depósitos de tálus adjacente ao Morro Flagstaff. Possui altitude máxima de 263,44 metros e mínima de 95,26 metros, com altitude média de 178,27 metros. A declividade varia desde terrenos suave ondulados localizados próximo ao circo glacial, e escarpado nas áreas de afloramentos rochosos. As faces de exposição predominantes são leste e nordeste.



Figura 5 - Sítio de Estudo 02. No centro da imagem observa-se o Morro Flagstaff e os depósitos de tálus no entorno deste. Observa-se também parte do Glaciar Flagstaff.

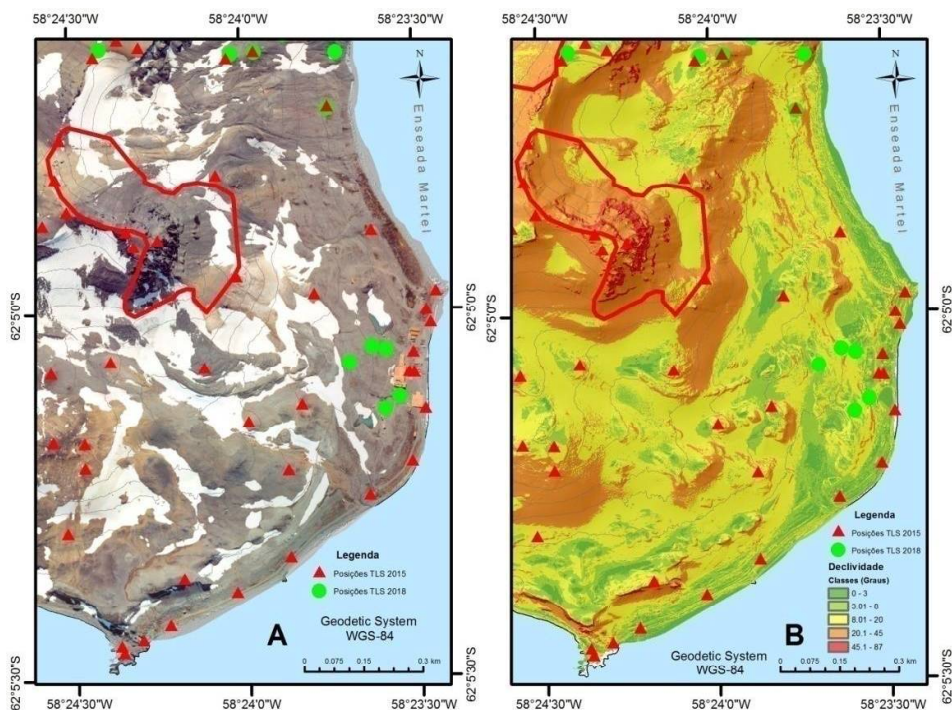


Figura 6 - Limite da área analisada com as referentes posições TLS dos anos de 2015 e 2018. Em B observa-se o mapa com as classes de declividade.

2.2.3 Sítio de estudo nº 3 - Área próxima ao Refúgio Ipanema

Localizada na face leste da Península, abrange uma área de 21,07 ha, com topografia montanhosa, limitando-se a sudoeste na Enseada Mackellar e a nordeste por cristas e afloramentos rochosos (Figuras 7 e 8).

Possui a geoforma de tálus no sopé de afloramentos rochosos e locais de maior declividade. Nas áreas com declividade mais suave apresenta áreas classificadas como *screeslope*, e próximo ao litoral possui área de planície flúvio glacial e áreas de terraços marinhos (FRANCELINO et al., 2011). Depósitos de neve e campo de Protálus dominam a paisagem, sendo este último classificado por López-Martinez et al. (2012) como sendo uma geleira de pedras, condição esta que exigiria a presença de permafrost. De acordo com Francelino et al. (2011) essa área é classificada como Protalus, sendo alvo de pesquisa realizada por Schünemann et al. (2015) onde detectou-se taxa de deslocamento de $0,104 \text{ ma}^{-1}$.

É dominada em grande parte por rochas do Grupo Enseada Martel, formação Península Keller e Depósitos glaciais Quaternários indiferenciados e terraços marinhos. Nas cotas mais elevadas possui rochas da formação Ancoradouro Visca. Possui altitude máxima de 254 metros e mínima ao nível do mar, possuindo altitude média de 70 metros. A declividade varia desde terrenos planos a montanhoso e escarpado nas cotas mais elevadas. As faces de exposição predominantes são sudoeste e oeste.



Figura 7 - Observa-se na imagem A as cristas rochosas pertencentes à formação Ancoradouro Visca e materiais sob influência de sulfetos da formação Península Keller. À esquerda observa-se em (B) parte do campo de Protálus presente na área.

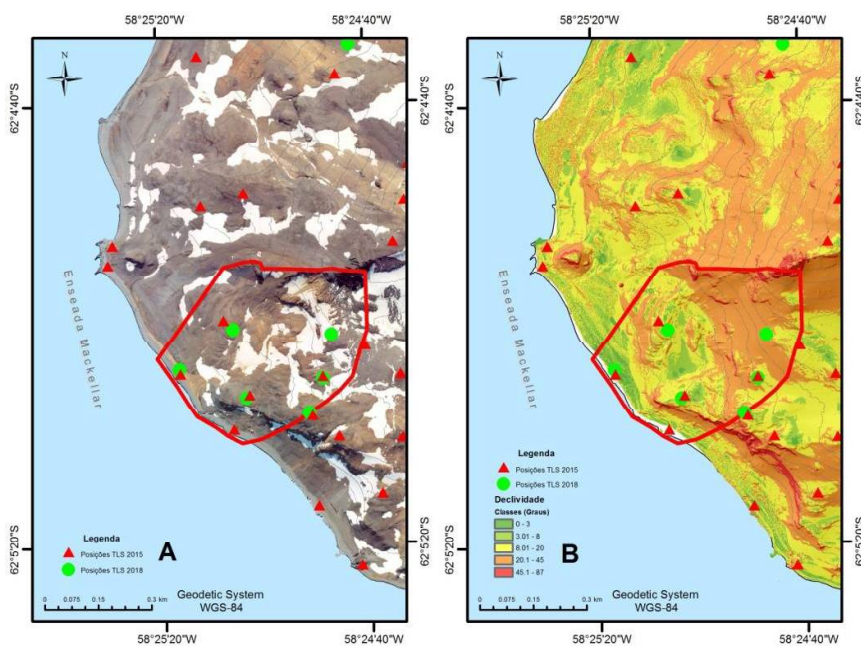


Figura 08 - Imagem 06 - Limite da área analisada com as referentes posições LST dos anos de 2015 e 2018. Em B observa-se o mapa com as classes de declividade.

2.2.4 Sítio de estudo nº 4 - Área próxima ao Refúgio 2

Localizada na face leste da Península, abrange uma área de 52,71 ha, com topografia mais suave que as demais analisadas (Figura 9). Limita-se a sudoeste na Enseada Mackellar e a nordeste por cristas e afloramentos rochosos. Possui a geoforma predominante de *screeslope*, com afloramentos rochosos em locais de maior declividade (Figura 10). Próximo ao litoral existem planície flúvio-glacial e terraços marinhos soerguidos (FRANCELENO et al., 2011).

É dominada em grande parte por rochas do Grupo Enseada Martel, formação Ancoradouro Visca e rochas do Grupo Pico Wegger. Ocorrem depósitos glaciais Quaternários indiferenciados e terraços marinhos nas áreas de menor altitude e declividade.

Possui altitude máxima de 254 metros e mínima ao nível do mar, com altitude média de 70 metros. A declividade varia desde terrenos planos localizados em terraços marinhos e em locais de depósito de neve, à montanhoso nas áreas que apresentam afloramentos rochosos. As faces de exposição predominantes são sudoeste e oeste.



Figura 09 - Vista geral da área estudada. Observa-se nas cotas mais elevadas a presença de afloramentos rochosos e depósitos de tálus. No centro existem afloramentos circundados por *scree slope* e no primeiro plano áreas mais suaves de depósitos glaciais e terraços marinhos.

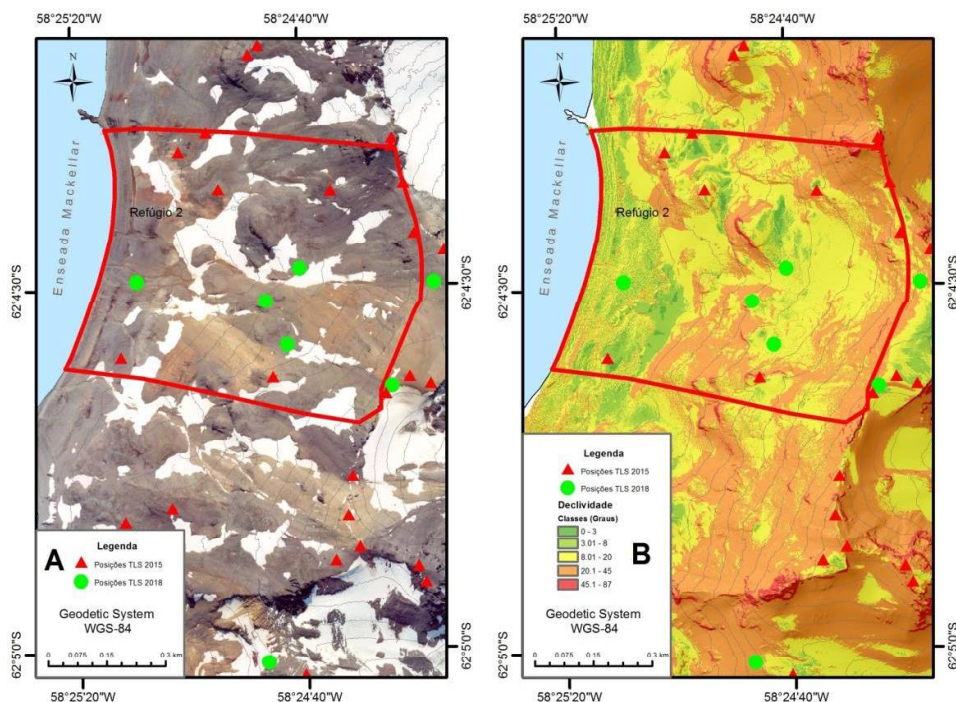


Figura 10 - Limite da área analisada com as referentes posições TLS dos anos de 2015 e 2018. Em B observa-se o mapa com as classes de declividade.

2.3 Metodologia empregada:

Este trabalho utilizou duas técnicas de reconstrução da topografia, sendo Laser Scanner Terrestre (LST) e Fotogrametria baseada em Estrutura do Movimento (SfM). Para as áreas analisadas com LST foram realizadas duas campanhas de coleta de dados, sendo no verões austrais de 2014/2015 e 2017/2018, durante as Operações Antárticas XXXIII e XXXVI, compreendendo um intervalo de três anos de avaliação. Na análise utilizando dados de fotogrametria utilizou-se imagens capturadas nos janeiros de 2018 e 2019.

Posteriormente, na análise de qualidade dos produtos gerados, realizou-se a análise dos deslocamentos de massa comparando as nuvens de pontos, sendo empregando para isso um software de uso livre.

2.3.1 Levantamento Laser Scanner Terrestre (LST)

A base de dados alvo de comparação foi obtida em 2015 por Schünemann et al., (2018) e levantamento realizado em 2018, sendo utilizado em ambos os levantamentos Laser Scanner Terrestre da fabricante Riegl modelo VZ-1000 (Figura 11). Esse equipamento apresenta precisão nominal de 5 mm e acurácia de 8 mm.

Devido a indisponibilidade dos dados da Base existente na Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) utilizada na correção diferencial no trabalho anterior, foi

utilizado o marco geodésico localizado nas proximidades da EACF. Com coordenadas UTM (*Universal Transversa de Mercator*) 21 S 427338.686 (E) e 3115751.399(N), e altitude elipsoidal de 28,479 m, referenciado ao *Datum* WGS84. Para o georreferenciamento das estações foi utilizado o receptor GNSS da Leica modelo GS08 Plus, sendo o rastreo realizado no mínimo 10 minutos em cada ponto.

Com o objetivo de cobrir todas as áreas de interesse e evitar espaços vazios na nuvem buscou-se a instalação das estações LST de 2018 nos mesmos locais de 2015. Em 2018 foram realizadas 34 ocupações, sendo analisadas 28 dessas.

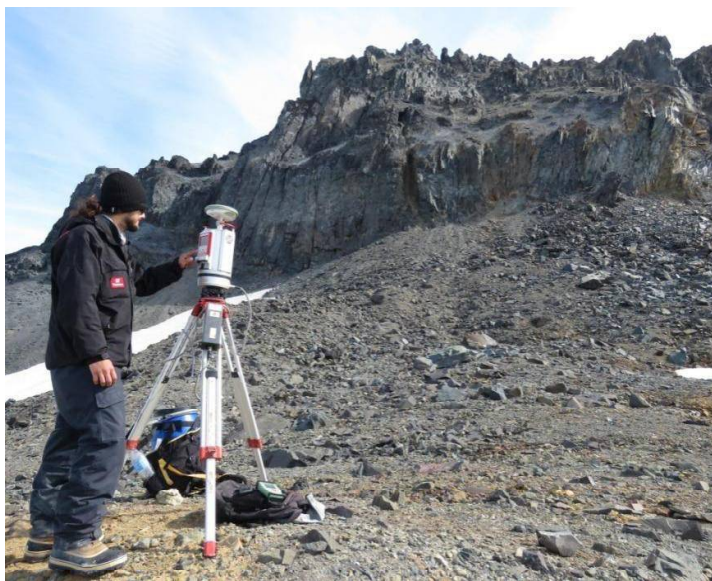


Figura 11 - Equipamento utilizado em campo. O receptor GNSS é instalado no topo do equipamento permitindo o georreferenciamento das estações.

2.3.2 Levantamento Aéreo

Para compor a base de dados de imagens aéreas, foram utilizados dados de dois levantamentos realizados nos anos de 2018 e 2019. Foi utilizado Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) modelo Phantom 4 Pro, marca DJI para a coleta das imagens. Esse equipamento é equipado com câmera própria do fabricante, modelo FC6310 RGB, com distância focal de 24 mm. Foi realizado um voo autônomo utilizando o aplicativo DroneDeploy, sendo estabelecida a sobreposição entre imagens de 65% na lateral e 75% longitudinal. A altura de voo escolhida foi de 150 metros, com escala de voo de 1:17045, permitindo obter um GSD de 0,04 m.

2.4 Pós Processamento dos dados

2.4.1 Dados do Laser Scanner Terrestre

Para o processamento dos dados GNSS foi utilizado o programa computacional LeicaGeoffice v.7.0, utilizando como referência o GNSS base instalado nas proximidades da EACF. Todos os dados foram referenciados ao *Datum* WGS84 com suas altitudes referenciadas a altitude elipsoidal.

Obtidas as coordenadas de todos os pontos rastreados, foi realizado o processamento de todas as 34 varreduras realizadas com o LST. Para isso utilizou-se o *software* RiscanPro v.2.0. Foi realizado ajustes entre posições sucessivas e sobrepostas utilizando a ferramenta "Ajuste de Multi Estação". Quando o padrão divergência de erro no processo de ajuste era mais baixo ou igual a 0,040 m, o processo de ajuste foi concluído. Foi realizada a limpeza da nuvem de pontos para retirada de *outliers*, como os pontos correspondentes aos aerossóis (spray marinho) presentes, capturados devido a configuração do equipamento estar habilitada para a opção de alta sensibilidade para captura de pontos em neveiros. Para a exclusão desses pontos foi utilizado o filtro de intensidade do retorno laser. Posteriormente as nuvens de pontos foram unidas em uma única malha de pontos, e através do filtro *Octree* reduziu-se a densidade de pontos para uma malha de 0,20 m com o intuito de minimizar a exigência do processador.

2.4.2.Dados dos aerolevamentos

A técnica SfM (Estrutura do Movimento) baseia-se nos mesmos princípios da estereoscopia, ou seja, uma estrutura tridimensional pode ser resolvida a partir de uma série de sobreposições de imagens (WESTOBY et al., 2015). A diferença básica da técnica SfM em relação à fotogrametria tradicional, é que a geometria dos objetos, posições da câmera fotográfica e orientação, são resolvidas automaticamente em um sistema de coordenadas relativo (SOUSA, 2015), sendo os parâmetros determinados a partir de características automaticamente da sobreposição de imagens (WESTOBY et al., 2015) Posteriormente uma rede de pontos de controle permitem a transformação do sistema relativo em um sistema de coordenadas conhecido.

Nesse trabalho utilizou-se o software Agisoft Photoscan, sendo a restituição fotogramétrica realizada em um conjunto de 3.783 imagens obtidas por VANT no ano de 2.018 e 2.340 imagens obtidas em 2019.

Foram obtidos pontos de controle em campo com receptor GNSS da Leica Modelo GS08 Plus, sendo o rastreamento realizado no mínimo 10 minutos em cada estação. Não foi

possível a utilização da metodologia de pré-sinalização dos alvos em campo devido ao tempo restrito para realização do trabalho e mão de obra disponível, sendo utilizados alvos no campo identificados facilmente nas imagens.

2.4.3. Comparação tridimensional das nuvens de pontos

Devido as áreas estudadas apresentarem características de topografia complexa, com amplitude de declividade muito alta, com cristas e escarpas, além de blocos de escombros, optou-se por utilizar um algoritmo que fosse capaz de descobrir mudanças topográficas tridimensionais por completo, sendo realizada uma busca por algoritmos que realizasse a avaliação diretamente na nuvem de pontos. Para este fim, foi empregado o *Multiscale Model to Model Cloud Comparison* (M3C2) algoritmo desenvolvido por Lague et al. (2013) e implementado no software livre CloudCompare (v. 2.10).

Para que seja realizado o cálculo do M3C2 é necessário que as normais dos pontos sejam conhecidas. A normal de um ponto pode ser entendida como um vetor perpendicular ao plano tangente à superfície do ponto. Sendo assim realizou-se o cálculo das normais no *software* CloudCompare selecionando-se as duas nuvens a serem comparadas. Procedeu-se o cálculo partir da barra de ferramentas *Edit ->Normals -> Compute*.

De acordo com Lague et al., (2013) o algoritmo M3C2 implementa dois processos principais para calcular mudanças 3-D entre duas nuvens de ponto: (1) estimação de escala de superfície (D) para orientação da normal dos pontos, sendo consistente com rugosidade da superfície local, e (2) quantificação da distância nuvem-a-nuvem ao longo da direção normal (ou vetor ortogonal), a cada ponto com a distância entre todos os pontos vizinhos do tamanho $d/2$ (d é a escala de projeção). Um parâmetro adicional define o comprimento do cilindro de projeção e assim a máxima distância entre pontos considerada na computação. No final do processo o algoritmo fornece as distâncias entre pontos e calcula um intervalo de confiança local, o qual considera se essa distância é significativa ou não.

Para a construção de intervalos de confiança em trabalhos de comparação de nuvens de pontos é essencial a identificação das fontes de erro dos produtos analisados, sendo identificadas três principais de acordo com Lague et al., (2013). Podem ser originados por erro de leitura do instrumento, distância e ângulo de incidência do objeto; (2) incerteza de registro entre duas nuvens de ponto, sendo essa gerada pela instalação do instrumento em posições diferentes e número de estações utilizadas e; (3) rugosidade da superfície, originados também pela impossibilidade de instalação do equipamento no mesmo ponto, gerando espaços diferentes nos locais de maior rugosidade. Características do ambiente e climáticas

(aerossóis) também podem gerar pontos espúrios denominados *outliers*, o que pode ser evitado realizando-se a limpeza da nuvem de pontos (BRODU; LAGUE, 2012)

Os erros relacionados a rugosidade da nuvem podem ser reduzidos com a utilização do valor de **D** 20-25 vezes ao desvio padrão da rugosidade do terreno podendo variar 0,5 a 15 metros, dependendo do nível de rugosidade da superfície e geometria. Para 97% deles, a escala ótima verificada é de >25 (LAGUE et al., 2013).

O intervalo de confiança espacialmente variável proposto por esses autores busca explicar como a densidade de ponto local e a rugosidade de um ponto, afeta a precisão das distâncias calculadas pelo algoritmo. Em geral, para superfícies naturais, não há nenhuma referência externa que documenta precisamente por qual quantia a superfície mudou. Sendo assim foi inserida no M3C2 uma máscara para excluir pontos para onde mudança é mais baixa que o nível de limiar de alteração ao nível de confiança de 95%. Esse limite de confiança pode ser obtido a partir do produto do erro propagado e uma medida local de rugosidade na nuvem de ponto, sendo definido como $LoD_{95\%}(d)$ e representado na equação abaixo:

$$LoD_{95\%}(d) = \pm 1.96 \left(\frac{\sigma_1(d)^2}{n_1} + \frac{\sigma_2(d)^2}{n_2} + reg \right) \quad (1)$$

onde:

“*d*” é o raio do cilindro de projeção,

“*reg*” é o erro de inscrição especificada pelo usuário, podendo ser substituído pelo RMSE (*Root mean square error*) das nuvens n_1 e n_2 , assumindo que o erro tem o mesmo padrão de dispersão.

Foi utilizada ferramenta de SIG, onde os pontos foram relacionados com as variáveis morfométricas do terreno e classes de mapeamento geomorfológico encontrados por Francelino et al. (2011).

3. Resultados e discussão

3.1. Laser scanner

No ano de 2018 foram realizadas 34 varreduras, sendo apresentada na tabela 1 as densidades de pontos utilizadas para o processamento dos pontos. Apesar do curto intervalo de avaliação, foram observadas diferenças entre as nuvens de pontos. A detecção da diferença

de elevação indica a presença de algum fenômeno atuando nos locais pesquisados. Essas diferenças serão apresentadas por cada sítio, e os resultados plotados na nuvem de referência, do ano de 2015. Em locais onde houve redução da cota altimétrica, entende-se que houve perda de material, e em locais onde houve acúmulo de material, significa que em 2015 a altitude estava abaixo do encontrado no levantamento mais recente, portanto acúmulo de material. Optou-se por não utilizar a variável volume m^3m^{-2} para a discussão desse trabalho, por falta de informações a respeito da densidade do material encontrado, sendo esse variável na área estudada.

O limiar de descoberta de mudança significativa foi de 0,20 m, seguindo a metodologia de Lague et al. (2013). Sendo assim, aqueles pontos que apresentaram valores superiores a esse valor foram exportados, obtendo-se o conjunto de pontos onde foi constatada alterações significativas.

Para a avaliação da sobreposição entre as malhas de pontos geradas, procedeu-se a análise do RMSE de um conjunto de 23 pontos coletados nas nuvens de pontos geradas. Foram coletados pontos de validação em locais semelhantes entre as nuvens em áreas consideradas estáveis, tais como quinas de construções e afloramentos rochosos. A maior discrepância encontrada foi de 0,26 m e a menor 0,01 m, com RMSE final de 0,1187 m.

3.1.1 Sítio 1

Nessa área foram identificadas predominantemente alterações relacionadas a dinâmica de neveiros (Figura 12). A atividade de neveiros se dá em relevos moderados, com declividade média de 19° , com elevação média de 78 m. Foram identificadas reduções de até 2,29 m, e acúmulo de 4,56 m. Em geral houve redução média de 1,17 m, sendo essa feição geomorfológica a segunda com maior frequência nos dados. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 13.

Foram identificadas quedas de blocos e sedimentos em áreas de afloramentos rochosos, influenciados pela gravidade e presença de falhas geológicas existentes, contribuindo para a elevação da altitude em rampa de tálus (Figura 14). Nesse sítio, os processos de vertente podem estar sendo potencializados pelas falhas geológicas existentes.

A ocorrência de permafrost nessa área pode ser identificada em campo a partir de escorregamentos lentos de materiais saturados de água, condicionando o deslocamento de grandes blocos em direção ao declive (Figuras 14 e 15). Estão presentes em áreas próximas aos circos glaciais, e são desencadeadas pelo derretimento da neve e exposição do substrato aos efeitos da superfície. Nestes locais foram encontradas grandes deslocamentos de material

em superfície, constatando-se um deslocamento médio de 2,04 m de grandes blocos, a uma taxa de 0,68 m por ano (Figura 13). Investigando essa área a partir de imagens aéreas Sousa (2015) identificou um deslocamento médio de 0,27 m por ano para um período de 1956 a 2003. Tais evidências de deslocamentos superficiais levam a acreditar da atividade do permafrost nessa área, bem como sua atividade, corroborando com as classificações de López-Martinez et al., (2012) de que ocorrem geleira de rochas nessa área.

Nas áreas de circos glaciais, ocorreu maior acúmulo de material nas áreas elevadas de parte dos glaciares Flagstaff e Noble, com diferença máxima chegando a 4,56 metros. Nas áreas côncavas no sopé desses glaciares, foram identificadas as maiores reduções altimétricas, condição esta que pode estar relacionada a atividade da água no verão, impulsionada por elevações de temperaturas do ar e derretimento de neve nesses pontos. Girão (2015) estudou a atividade da neve em algumas áreas das Ilhas Shetlands do Sul, constatando que a atividade e a presença da neve tem maior influência em locais de maior elevação, e concavidades, além de vertentes expostas a quadrantes de sul, de fraco declive e exposição ao vento.

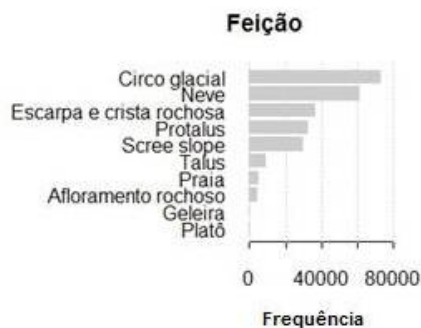


Figura 12 - Frequência de ocorrência de alterações por feição geomorfológica

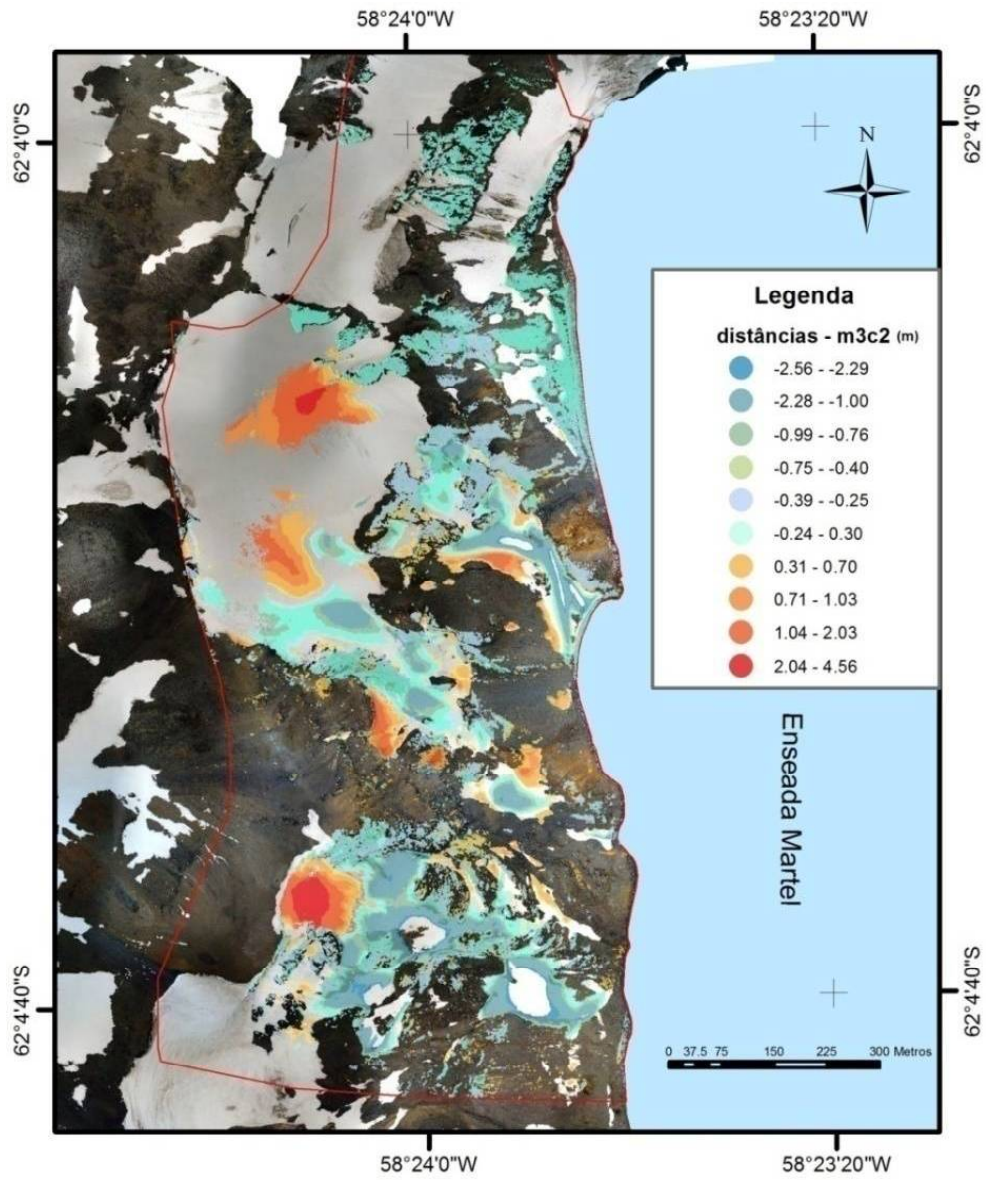


Figura 13 - Distâncias entre nuvens de pontos obtidas pelo algoritmo m3c2 para o Sítio 1.

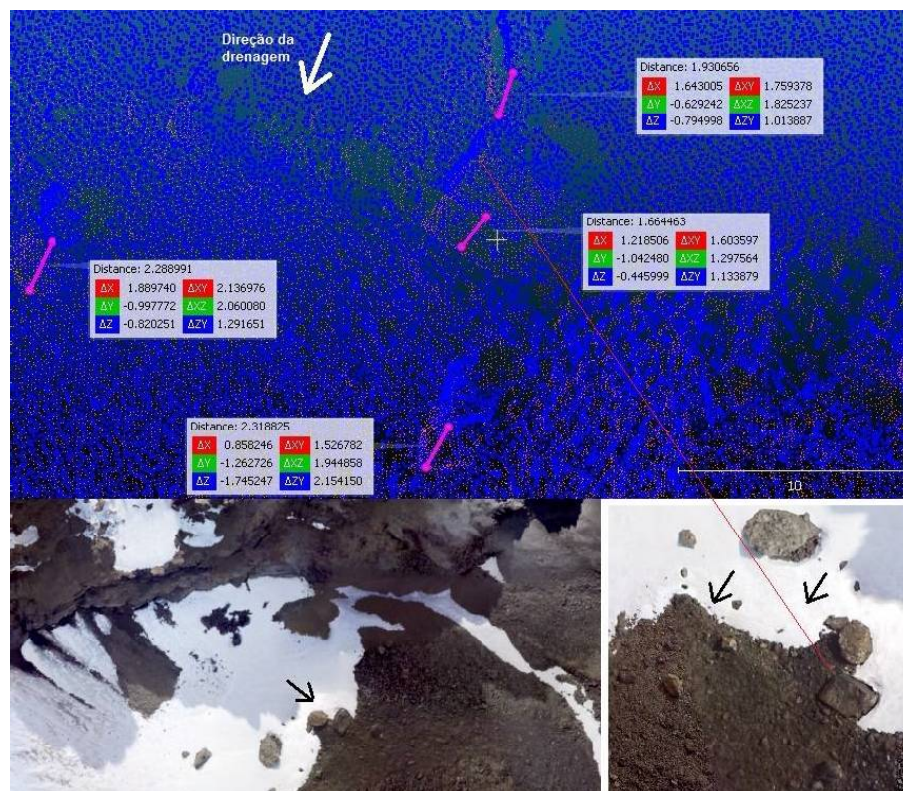


Figura 14 - Deslocamento de grandes blocos em superfície influenciados pelo derretimento do permafrost e posição topográfica. As setas indicam o sentido do deslocamento (Oeste para Leste).



Figura 15 - À esquerda observa-se quedas de blocos influenciados pela presença de falhas e alta declividade e à direita atividade relacionada à presença de permafrost sob depósito de materiais finos. Em vermelho estão representadas áreas onde houve acúmulo de material e azul perda.

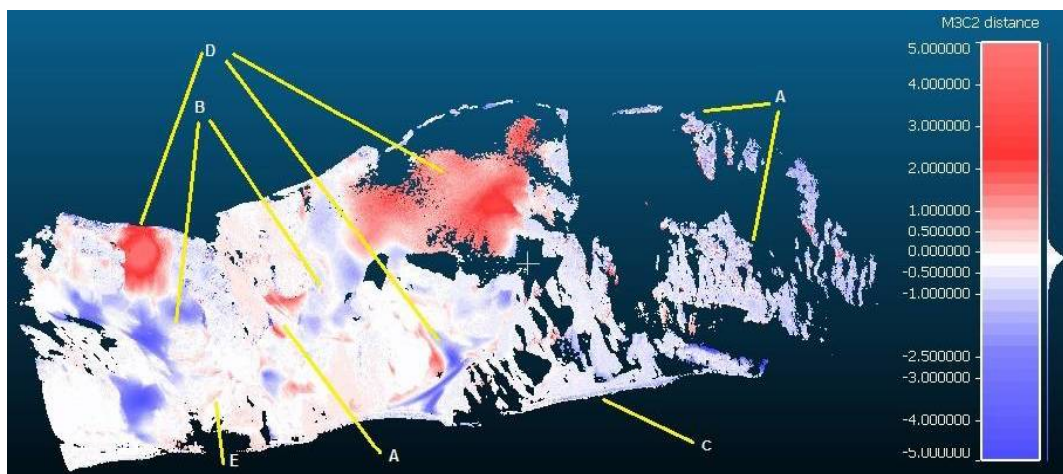


Figura 16 - Processos identificados. (A) quedas e depósito de rocha; (B) degradação do permafrost e processo de solifluxão; (C) erosão de linha de praia (D) deposição e redução de cobertura de neve/gelo; (E) área estável com ocorrência de vegetação. Unidades da escala em metros.

Observa-se que as atividades ocorreram em uma altitude média de 114,82 m (Figura 17). A declividade média foi de 26,36°. Tal informação leva a constatar que nessa área predominam processos de vertente.

Em relação as distâncias encontradas observa-se que a média foi de redução de 0,39 m, indicando o predomínio de redução de cotas altimétricas, constatando perda de material. As feições geomorfológicas que apresentaram maior ocorrência de alterações estão relacionadas a presença de neve, seja em nichos de nivação ou circos glaciais, seguida da feição escarpa e crista rochosa.

Outro aspecto identificado foi a pouca presença/inexistência de vegetação nesse sítio. No único ponto de ocorrência de comunidades vegetais não foram identificadas alterações altimétricas, sendo possível que o fator declividade esteja condicionando o estabelecimento de comunidades vegetais nesses local.

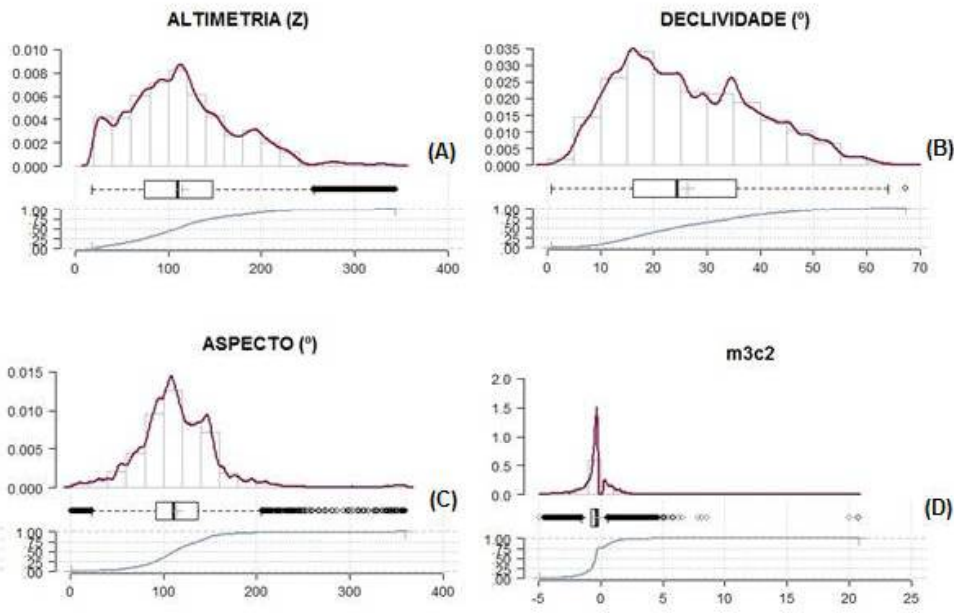


Figura 17 - Relação de variáveis morfométricas do terreno e conjunto de pontos onde ocorreram alterações significativas

3.1.2 Sítio 2

Nessa área foram identificadas alterações relacionadas principalmente a processos de vertente, influenciados pela declividade local. A face leste do morro Flagstaff foi aquela que apresentou a maior frequência de deslocamentos, culminando em maior perda de material na rampa de tálus adjacente (Figura 14). Canais de drenagem aprofundaram-se, concentrando material na área basal da rampa, sendo possível esta constatação a partir de análise em escala mais detalhada. Pela falta de dados não foi possível uma representação mais detalhada sendo possível que material foi acondicionado sob o neveiro presente na base do tálus. Na face norte, as diferenças encontradas estão relacionadas aos canais de drenagem, deslocamento de pequenos blocos de rocha, além da redução de área coberta pelo circo glacial.

Como observado na figura 18, os processos ocorreram em maior intensidade na posição média da encosta, com altitude média de 167,97 m. A declividade média foi de 36°, com face de exposição predominante leste.

As feições geomorfológicas de maior ocorrência foram escarpa e crista rochosa e rampa de tálus, com média de diferença de -0,58 m, indicando a maior ocorrência de perda de material.

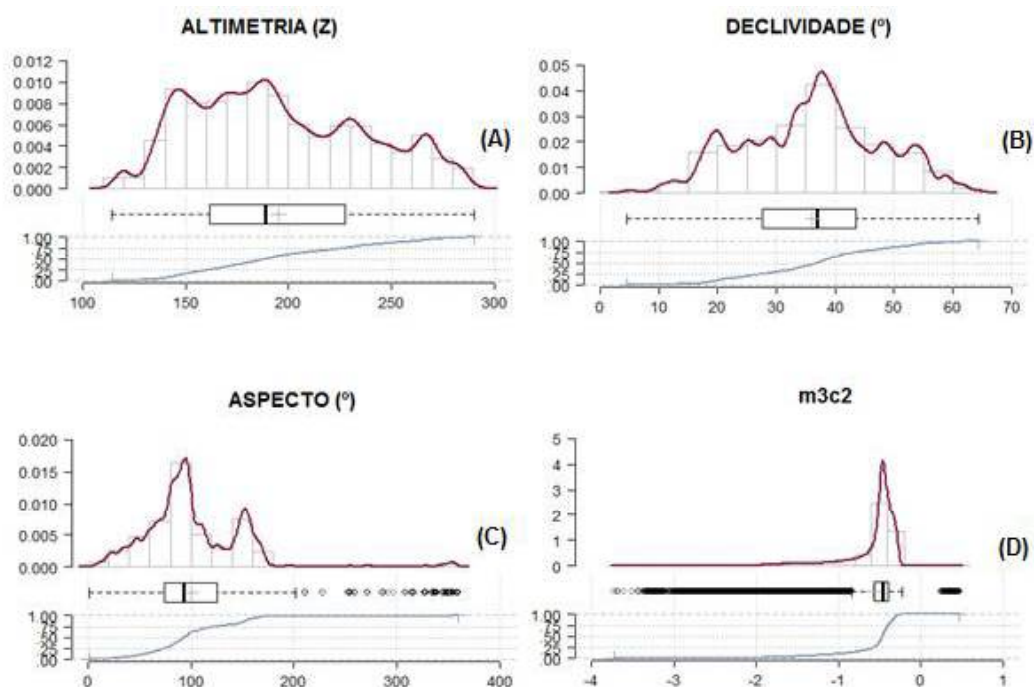


Figura 18 - Relação de variáveis morfométricas do terreno e conjunto de pontos onde ocorreram alterações significativas

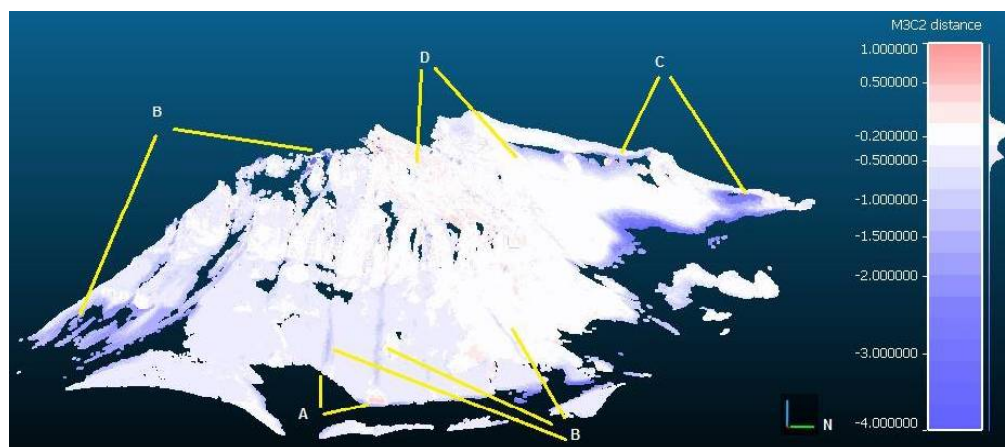


Figura 19 - Processos identificados no sítio 2. (A) depósito de material na base de tálus; (B) erosão por canais fluviais; (C) redução de área coberta por neve/gelo; (D) queda de fragmentos de rocha.

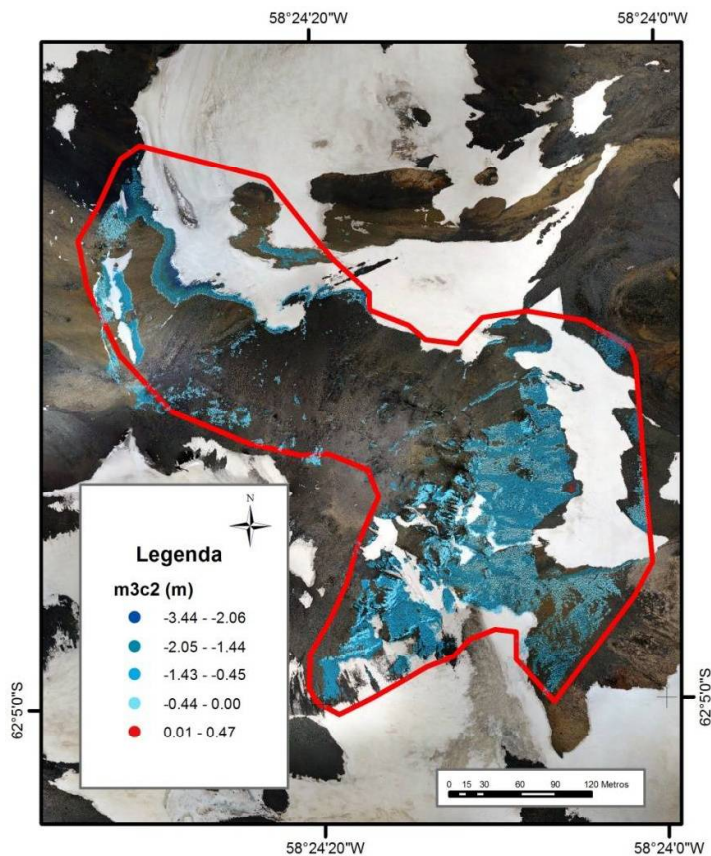


Figura 20 - Resultados obtidos para o Sítio 2.

3.1.3 Sítio 3

Como demonstrado na Figura 21 os principais processos geomórficos atuantes nessa área são quedas de rochas, deslizamento de rochas, deposição de material em planície flúvio-glacial, e processos ligados a dinâmica de deposição de neve. Os processos abrangem quase todo o declive acima do campo de proталus, ocorrendo deslocamentos de material em áreas de maior declividade, estimuladas pela redução da cobertura de neve presente em época anterior, sendo observada na imagem aérea algumas cicatrizes de queda de rochas.

De acordo com o mapa de geologia da Península Keller, duas classes geológicas ocorrem nesse local. O material originado a partir do intemperismo de rochas da formação Península Keller, condiciona sedimentos de textura mais fina. Na inexistência de cobertura de neve e gelo em terrenos côncavos, a água promove o transporte de material das cotas mais elevadas, sendo este acumulado nas áreas de planície de cotas mais baixas. Constatou-se nesse intervalo de tempo a redução da deposição de neve/gelo nessas áreas, o que levou a formação de canais de drenagem nessa área.

Nas rochas do grupo Enseada Martel, localizadas nas cotas mais elevadas, constatou-se atividade de deslizamento de rochas, influenciadas pela posição topográfica, ocorrendo em declividades mais acentuadas.

Segundo Lopez-Martinez (2012) a análise altitudinal das formas de relevo periglaciais, apresenta importância na distribuição de processos crionivais. Segundo Arão (2015) a distribuição de neveiros em áreas da Península Fildes e outras áreas da Shetlands do Sul, é favorecida em altitudes mais elevadas e em áreas com declividades moderadas. Observa-se na Figura 21 a presença de neve na área estudada, ocorrendo nichos de nivação em relevos côncavos. Porém em áreas mais elevadas, a declividade parece exercer maior importância na redução de cobertura de neve.

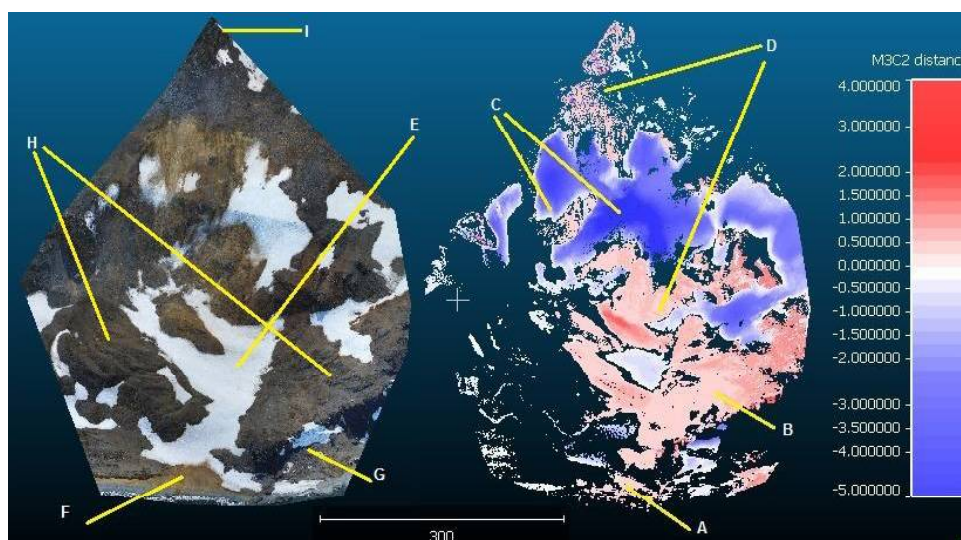


Figura 21 - Processos identificados no sítio 3. (A) depósito de material fino em planícioflúvio-glacial; (B) solifluxão; (C) redução de área coberta por neve/gelo; (D) tálus de detritos; (E) nicho de nivação; (H) rampa de prótalus; (I) cristas e afloramentos rochosos.

3.1.4 Sítio 4

Com predomínio de rampas de scree e depósitos flúvio-glaciais, esta área apresentou a característica de maior de estabilidade dentre as estudadas, sendo identificada a maior ocorrência de comunidades vegetais, presentes sobretudo em áreas de platô, em declividade menos acentuada.

Como observado na Figura 22 as alterações encontradas estão concentradas principalmente em rampas de *scree slope* com altitude média de 167 metros, ocorrendo acúmulo de material de aproximadamente 0,5 m. Os processos concentraram-se em áreas mais elevadas, não sendo encontradas diferenças significativas em terrenos abaixo de 100 m,

com exceção de uma pequena área de acúmulo de neve na planície-fluvial. Alterações relacionadas a deposição de neve foram encontradas em área de nicho de nivação.

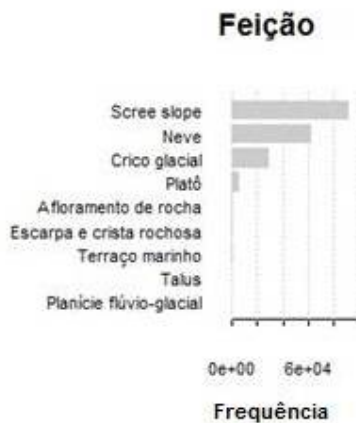


Figura 22 - Frequência de ocorrência de alterações por feição geomorfológica.

De acordo com López e Martinez, (2012) apesar do sistema geomórfico crionival gerar menores acidentes geográficos, eles são muito representativos dos processos de superfície na Antártica Marítima, pois a cobertura de neve acumulada em nove meses, derrete rapidamente no verão, aumenta a umidade dos solos e camada ativa correspondente. Essa água líquida participa de todos os processos em plataformas e declives onde os sedimentos se movem rapidamente em meio de fluxo de detritos dependendo da cobertura sedimentar.

Em verificação de campo, constatou-se que o local onde ocorreram alterações significativas tem forte influência de substrato saturado, composto de material de textura fina. De acordo com Francelino (2004), processos de solifluxão estão presentes em áreas de *scree slope*, onde foi possível identificar que os processos estão ocorrendo em declividade média de 19° (Figura 23).

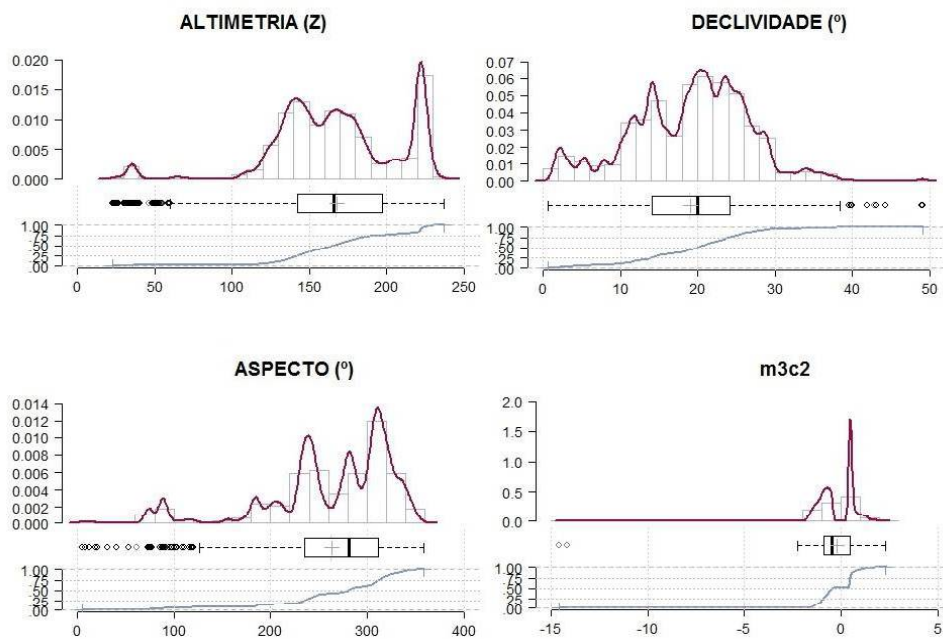


Figura 23 - Relação de variáveis morfométricas do terreno e conjunto de pontos onde ocorreram alterações significativas.

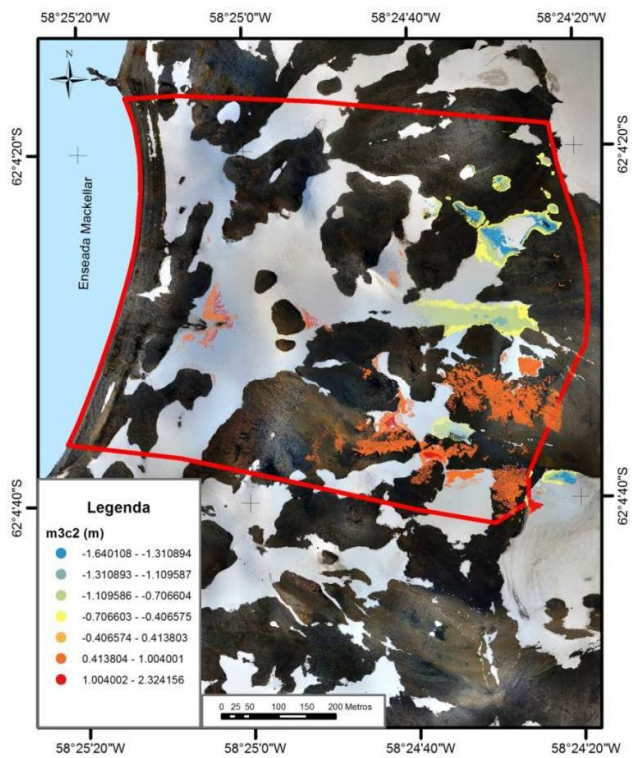


Figura 24 - Resultados obtidos para o Sítio 4. Observa-se processos de alterações ocorrendo em maior frequência em áreas de altitude elevada e de maior declividade.

3.1.5 Área do entorno da EACF

Para analisar as nuvens de pontos dos Aerolevantamentos foi separado uma área próxima a EACF. A escolha dessa área foi motivada, devido ao fato do produto do RPA de 2018 ter apresentado um bom ajuste do bloco fotogramétrico, sendo utilizados pontos de controle no processamento. Na Figura 25 pode-se identificar alterações marcantes na área, motivadas principalmente pelas obras da construção da nova EACF, encontrando-se valores de até 11 metros, correspondendo a altura do prédio principal da EACF.

Pode-se identificar também a presença dos novos módulos avançados da Meteorologia e VLF. Identifica-se nessas imagens a redução de neveiros próximos a EACF, além de cortes de taludes.

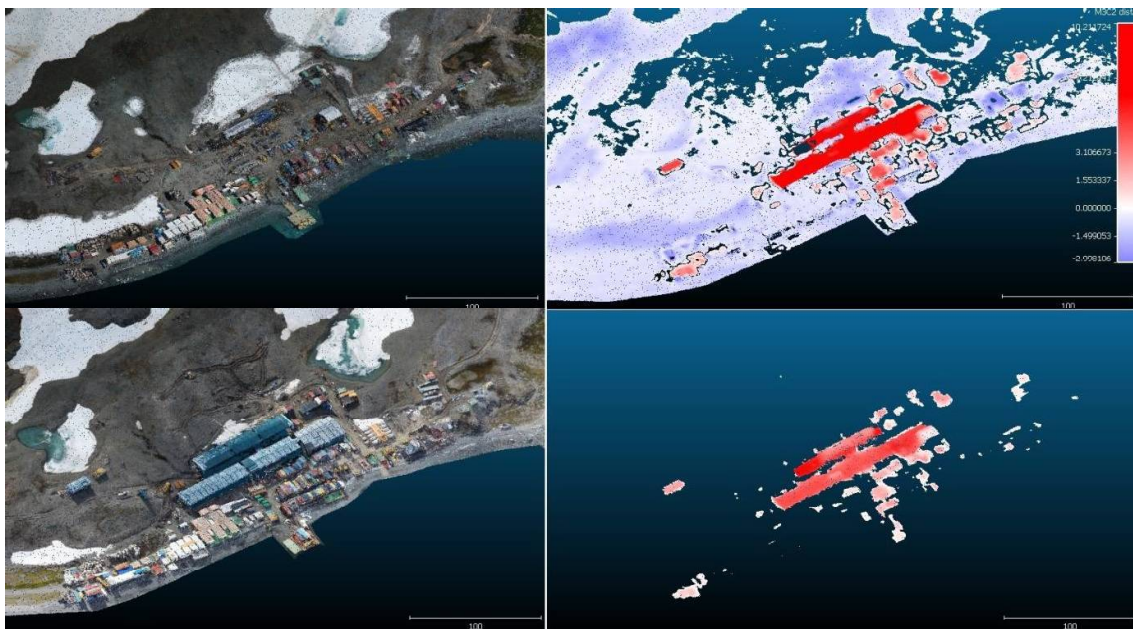


Figura 25 - Nuvens de pontos originadas de imagens aéreas. Observa-se a esquerda as duas nuvens de pontos dos anos 2018 e 2019 (abaixo). À direita o resultado da comparação entre as nuvens, sendo demonstrado a filtragem realizada para identificação das benfeitorias.

4. Conclusão

Pode-se constatar a partir de dados LIDAR, a ocorrência de quatro sistemas geomórficos atuantes na Península Keller, sendo eles ligados a presença de permafrost, congelamento sazonal de terreno, gravitacional e crionival.

Os sítio nº 1, localizado na face leste da península apresentou maior influência de processos de vertente, ocorrendo processos de gelifluxão em áreas de influência direta de circos glaciais. Com a redução do nível de neve nesses locais e exposição do substrato, constatou-se a ocorrência de deslocamento em superfície de grandes blocos, o que pode levar a crer da presença permafrost nessa área e seu possível descongelamento nesse período.

Localizado em área de ocorrência de falhas, o Sítio 1 apresentou um evento de maior magnitude de transporte de material, identificado-se quedas de blocos e deposição de material grosseiro em rampa de tálus. Processos erosivos estão relacionados ao aprofundamento dos presentes canais de drenagem.

O sítio nº 2 localizado em altitudes mais elevadas, apresentou maior influência de processos gravitacionais, ocorrendo em sua maioria nas rampas voltadas para leste, rampas estas com maior declividade.

Na análise do Sítio nº 3 constatou-se grandes alterações relacionadas a processos nivais. Ocorreu grande redução do nível de neve depositada em rampas e encostas, o que potencializou a atividade de canais fluviais em rampas côncavas, favorecendo o transporte e a deposição de material nas planícies fluviais. Na área do campo de Protalus estudado por Schünemann (2015) não foram encontradas diferenças significativas de transporte de material. Porém pela falta de dados do ano de 2018 de parte dessa área, não foi possível fazer análises mais aprofundadas, sendo recomendada a utilização de mais varreduras a laser nessa área. Contudo, foram identificadas em imagens aéreas a presença de comunidades vegetação nessa área, levando a crer que tal ambiente apresenta atividade reduzida.

O Sítio nº 4 foi o que apresentou as condições de maior estabilidade, não sendo identificadas alterações marcantes em altitudes abaixo de 100 metros. Quando ocorreram alterações, essas concentraram-se em terrenos com substrato saturado com declividade aproximada de 19°, ocorrendo processos de baixa magnitude, corroborando com Francelino (2004) ao constatar a presença de processos de solifluxão nessa área.

Esse trabalho teve como objetivo avaliar a utilização de dados LIDAR na identificação de processos geomórficos responsáveis por transformações ambientais na Península Keller. Sendo assim a aplicação da técnica mostrou grande potencial de aplicação em ambientes da Antártica Marítima, possibilitando a investigação de grandes áreas e exploração de ambientes muitas vezes inacessíveis para outras técnicas. Pode-se constatar os processos atuantes, ocorrendo em velocidades e magnitudes diferenciados, influenciados sobretudo pela altimetria, declividade além do substrato presente.

O baixo intervalo temporal de análise permitiu avaliar a aplicação do LIDAR em pequenas alterações ambientais, sendo este satisfatório para captar pequenas alterações na

superfície de terrenos. Para a identificação de mudanças mais notáveis recomenda-se a um intervalo mais amplo de observações.

Aliada à tecnologia LIDAR, as nuvens de pontos geradas por RPA apresentaram resultados satisfatório na avaliação de alterações ambientais. Sendo assim recomenda-se estudos mais detalhados para o uso desses dados no monitoramento ambiental de áreas na Antártica visto que, os dados apresentam alta precisão e detalhamento.

5. Referências Bibliográficas

ARIGONY NETO, J.; FRANZ BREMER, U.; CARDIA SIMÕES, J. Variações nas frentes de gelo da Enseada Martel, Ilha Rei George, Antártica, entre 1956 e 2000. **Anais X SBRS**, p. 709–711, 2001.

BALLANTYNE, C.K., HARRIS, C.. The Periglaciation of Great Britain. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1994.

BALLANTYNE, C. K. Paraglacial geomorphology. **Quaternary Science reviews**, v. 21, p. 1935-2017, 2002.

BINKENMAJER, K. Mesozoic and Cenozoic Stratigraphic units in parts of the South Shetlands and northern Antarctica peninsula. **Studia Geol. Pol.** 118 5-188p, 2001.

BREMER, U. F.; ARIGONY-NETO, J.; SIMÕES, J. C. Teledeteção de mudanças nas bacias de drenagem do gelo da ilha Rei George, Shetlands do Sul, Antártica, entre 1956 e 2000. **Pesquisa Antártica Brasileira**, v. 4, p. 37–48, 2004.

BRODU, N.; LAGUE, D. 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 68, n. 1, p. 121–134, 2012.

CUI, Jian-Jun et al. Building Extraction from LiDAR Data Based on Edge Detection. **Journal of Geomatics Science and Technology**, v. 2, 2008.

CRUDEN, D. M.; HU, X. Q. Exhaustion and steady state models for predicting landslide hazards in the Canadian Rocky Mountains. **Geomorphology**, v. 8, n. 4, p. 279–285, 1993.

DUNNING, S. A.; MASSEY, C. I.; ROSSER, N. J. Geomorphology Structural and geomorphological features of landslides in the Bhutan Himalaya derived from Terrestrial Laser Scanning. **Geomorphology**, v. 103, n. 1, p. 17–29, 2009.

EMBLENTON-HAMANN, C. Proglacial landforms. In: GOUDIE, A. S. (Ed.) Encyclopedia of geomorphology. **London: Routledge**, v. 2, p. 810-813, 2001.

FERRON, F. et al. Air temperature time series for King George Island, Antarctica. **Pesquisa Antártica Brasileira**, v. 4, p. 155–169, 2004.

- FOUNTAIN, A. G. et al. High-resolution elevation mapping of the McMurdo Dry Valleys, Antarctica, and surrounding regions. **Earth System Science Data**, v. 9, n. 2, p. 435–443, 2017.
- FRANCELINO, M. R. Geoprocessamento aplicado ao monitoramento ambiental da antártica marítima: solos, geomorfologia e cobertura vegetal. **Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas**, p. 113, 2004.
- FRANCELINO, M. R. et al. Geomorphology and soils distribution under paraglacial conditions in an ice-free area of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. **Catena**, v. 85, n. 3, p. 194–204, 2011.
- FRENCH, H. M. The periglacial environment. **John Wiley & Sons**, 3 ed., 458 p, 2007.
- FRENCH, H.M. The Periglacial Environment, **2nd ed. Longman**, Essex, 1996.
- GIRÃO, I. DE B. V. Z. C. E. Padrões espaciais da neve durante o verão nas áreas livres de gelo das Ilhas Shetlands do Sul (Antártida). **Dissertação de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial aplicados ao Ordenamento**, p. 142, 2015.
- HAWKES, D. D. **The geology of the South Shetland Islands - I - the petrology of King George Island**, HMSO, 1961.
- LAGUE, D.; BRODU, N.; LEROUX, J. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 82, p. 10–26, 2013.
- LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. et al. Periglacial processes and landforms in the South Shetland Islands (northern Antarctic Peninsula region). **Geomorphology**, v. 155–156, p. 62–79, 2012.
- MATSUOKA, N. Solifluction rates, processes and landforms: a global review. **Earth-Science Reviews**, v.55, p. 107-134, 2001.
- MCKEAN, J.; ROERING, J. Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. **Geomorphology**, v. 57, n. 3–4, p. 331–351, 2004.
- POELKING, E. L. et al. Variações da frente da geleira polar club, península potter (Ilha rei george, Antártica marítima) entre 1986 e 2011. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 3, p. 379–388, 2014.
- SCHÄFER A.; LOCH R. Aplicação dos dados do sensor Laser scanner para modelagem do terreno visando projetos rodoviários. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR**, Goiânia, INPE, p. 749-756, 2005.
- SCHÜNEMANN, A. L. et al. High-resolution topography for digital terrain model (Dtm) in keller peninsula, maritime antarctica. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 2001–2010, 2018.

- SCHÜNEMANN, A. L.; et al. Monitoramento dos processos de solifluxão na Península Keller, Antártica Marítima. **Anais do Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, n. 1, p. 1–4, 2015.
- SIMÕES, J. C. et al. Small cirque glaciers retreat on Keller Peninsula, Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. **Pesquisa Antártica Brasileira**, v. 4, p. 49–56, 2004.
- SLAYMAKER, O. Criteria to distinguish between periglacial, proglacial and paraglacial environments. **Quaestiones geographicae**, v. 30, n. 1, p. 85-94, 2011.
- SOUSA, C.A.V.C.M DE. Caracterização 3d de movimentos de massa em terrenos com permafrost nas Ilhas Shetland Do Sul (1956-2010) através de detecção remota, na banda do visível. **Dissertação de Mestrado em Geomática Trabalho**, p. 99, 2015.
- TURNER, J. et al. Antarctic climate change during the last 50 years. **International Journal of Climatology**, v. 25, n. 3, p. 279–294, 2005.
- VARNES, D. J. Slope Movement Types and Processes, Special Report 1976, **Landslides : Analysis and Control**. n. 176, p. 11–33, 1978.
- VEHLING, L. et al. Geomorphology Quantification of sediment transport by rockfall and rockslide processes on a proglacial rock slope (Kaunertal , Austria). **Geomorphology**, 2016.
- WESTOBY, M.; DUNNING, S.; HEIN, A. Inter-annual surface evolution of an Antarctic blue-ice moraine using multi-temporal DEMs. **Earth Surface Dynamics Discussions**. n 3,p. 1317-1344, 2015.
- WILLMOTT C.J., MATSUURA K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, v. 30, n. 1, p. 79–82. 2005.

Conclusões Gerais

O presente trabalho demonstra o emprego de veículos aéreos não tripulados para o mapeamento de áreas remotas na Antártica Marítima. Sua utilização apresentou uma redução de custos na execução dos levantamentos, além de ganho substancial em relação a qualidade dos produtos gerados.

A técnica utilizada para processamento de imagens coletadas com o VANT demonstrou ser adequada na utilização de imagens históricas, possibilitando assim subsidiar os trabalhos de monitoramento ambiental realizados na área da Península Keller.

A utilização de dados LIDAR permitiu a identificação de processos geomórficos responsáveis por transformações ambientais na Península Keller. A aplicação dessa técnica demonstra grande potencial de aplicação em outros ambientes da Antártica Marítima, visto a existência de grandes áreas a serem mapeadas que apresentam topografia complexa e pontos inacessíveis.

O baixo intervalo temporal de análise permitiu avaliar a aplicação do LIDAR em pequenas alterações ambientais, sendo este satisfatório para captar pequenas alterações na superfície de terrenos. Para a identificação de mudanças mais notáveis recomenda-se a um intervalo mais amplo de observações.