

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO
DE GEOCIÊNCIAS**

**MONITORAMENTO REMOTO DO PAROXISMO VULCÂNICO DO MT. EREBUS, ILHA DE
ROSS, ANTÁRTIDA**

TRABALHO DE FORMATURA 2022/2 (TF-22/10)

**EDUARDO AUGUSTO FERRARI
ORIENTADOR: VINICIUS LOURO**

**SÃO PAULO
2022**

“The only real life
is the collective life of the race;
individual life has no existence
except as an abstraction.”

Auguste Comte
A General View of Positivism (ed. 1865)

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas foram responsáveis para que este trabalho fosse concluído com sucesso, apesar da ajuda delas não ser de forma direta. Não é possível, infelizmente, citar todos.

Agradeço ao meu orientador Vinícius Louro, em especial, por ter sempre me atendido com carinho, atenção e com amor pela ciência, interessado sempre no desenvolvimento de um trabalho sincero e no nosso próprio, como pesquisadores curiosos.

Sou profundamente grato pelo apoio que minha família, Evandro, mãe e Du, me deram sem hesitação nos momentos de felicidade e de dificuldade.

Pesa-me muito o quanto não pude e não poderei nunca retribuir em mesmo nível o apoio e amizade que tive de grandes figuras que cruzaram minha vida, como João Nicolau, Vinícius Perroud, Ricardo Sutti, Rodrigo Ramponi, Leonardo Dias, Matheus Landim, Gabriel Mitsuki, Gabriel Gouveia e Gabriela Vidigal.

Pesa-me mais ainda o quanto me faltaram ferramentas e coragem para demonstrar o quão grato e mais maduro sou por ter cruzado meu caminho com a grande amiga Ariane de Sá Landim, de bondade inabalável.

Sigo meu caminho tortuoso e dotado de obstáculos, insistentemente inseridos por minha pessoa, em busca de uma pessoa cada vez melhor que habita dentro de mim mesmo.

Entretanto, apesar dos pesares, sinto-me humilde e profundamente agradecido pelas companhias e amor que fora dado a mim, amor este fornecido sem segundas intenções, mas sim porque há mais gente boa no mundo do que parece.

Que este trabalho seja somente um lembrete do combate necessário à nossa irracionalidade intrínseca, que pode nos revelar animais egoístas, e também uma homenagem à nossa capacidade de sermos racionais em função do bem do que nos é alheio.

SUMÁRIO

1. RESUMO.....	2
2. ABSTRACT	3
3. INTRODUÇÃO	4
4. METAS E OBJETIVOS.....	5
5. TRABALHOS PRÉVIOS	6
6. METODOLOGIA.....	10
7. RESULTADOS OBTIDOS	18
8. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	22
9. CONCLUSÕES	25
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26

1. RESUMO

O Monte Erebus, localizado na Ilha de Ross – Antártida, trata-se do vulcão ativo mais meridional da Terra. É um dos únicos exemplares a hospedar um lago de lava persistentemente, possivelmente há dezenas de milhares de anos, além de apresentar raras lavas fonolítico-anortoclásicas. O vulcão possui um caráter persistente de erupções identificado desde 1972, mas que provavelmente ocorre desde muito antes.

O trabalho em questão teve como objetivos principais utilizar ferramentas de sensoriamento remoto para monitorar o vulcão à distância dadas as condições extremas de temperatura (região ártica) e localização em que se encontra, e também auxiliar no entendimento da eficiência do uso de tais eficiências para esta finalidade.

Neste projeto, um conjunto de imagens complexas coletadas em um período de cinco meses permitiu a composição de interferogramas de deslocamento superficial (InSAR), bem como de sensoriamento passivo (VIIRS). As imagens sugerem deslocamentos de relevo para W, NW e SW com relação às crateras principais do Monte, interpretados como ação magmática ou acúmulo e derretimento de gelo. Além disso, é observada uma mudança gradual na emissividade de calor ao redor das mesmas. Estas informações foram utilizadas em comparação à frequência de erupções do vulcão para compreender suas possíveis consequências térmicas e de relevo. Foi observada uma possível relação entre períodos de instabilidade vulcânica e aumento da emissividade de calor nas regiões das crateras, bem como um soerguimento generalizado da Ilha de Ross e da área do cume do Mt. Erebus. Isto demonstra que a utilização e combinação de ferramentas de sensoriamento remoto podem ser úteis na avaliação do paroxismo vulcânico e podem ser explorados de forma mais aprofundada em trabalhos futuros.

Palavras-Chave: Monitoramento Vulcânico; InSAR; VIIRS; Antártida.

2. ABSTRACT

Mount Erebus, located in Ross Island – Antarctica, is the most meridional active volcano on Earth. It is one of the only exemplaries to host an active persistent lava lake, possibly for dozens of thousands of years, and contains rare phonolitic-anorthoclastic lavas. The volcano has a persistent character of eruptions identified since 1972, but probably happens since long before.

The work in question had as main objectives to use remote sensing tools to monitor the volcano from a distance given the extreme temperature conditions (arctic region) and location in which it is located, and also to help in understanding the efficiency of using such efficiencies for this goal.

In this project, a set of complex images collected within a timespan of five months has permitted the interferogram composition and interferometric processing (InSAR), as well as the passive remote sensing (VIIRS). The imagery suggests terrain displacements to W, NW and SW in relation to Mount Erebus' craters, interpreted as magmatic action. Also, it is observed a gradual change on the craters' heat emissivity. This information has been used in comparison to the volcano eruption frequency to better understand it's possible thermic and elevation consequences, as well as to utilize other examples to establish relations. It has been observed that there is a possible relation between periods of volcanic instability and emissivity increase at the craters' area, as well as a general uplifting of the Ross Island and Mt. Erebus' summit. This demonstrates that the use and combination of remote sensing tools can be useful in the evaluation of volcanic paroxysms and can be explored in more depth in future work.

Keywords: Volcano Monitoring; InSAR, VIIRS, Antarctica.

3. INTRODUÇÃO

As condições de temperatura e comportamentos eruptivos tornam o sensoriamento remoto uma das melhores ferramentas para estudar atividade vulcânica. Seus resultados permitem avaliar ciclicidades de atividades, servindo como referência para vulcões análogos ao redor da Terra. O Monte Erebus (Fig. 1) trata-se do estratovulcão e ativo mais a sul da Terra, com um lago de lava persistente desde sua primeira observação em 1972 (Giggenbach et al., 1973). O último trabalho realizado de monitoramento físico do vulcão foi de Wright e Pilger (2008) e, desde então, tal atividade não foi desenvolvida novamente. O vulcão se encontra em uma região remota do globo, na costa oeste da Antártica, significando temperaturas chegando a -30 graus Celsius. Além disso, a chegada à ilha prova-se dificultosa, sendo que se encontra a pelo menos 2700 km do país mais próximo, a Nova Zelândia.

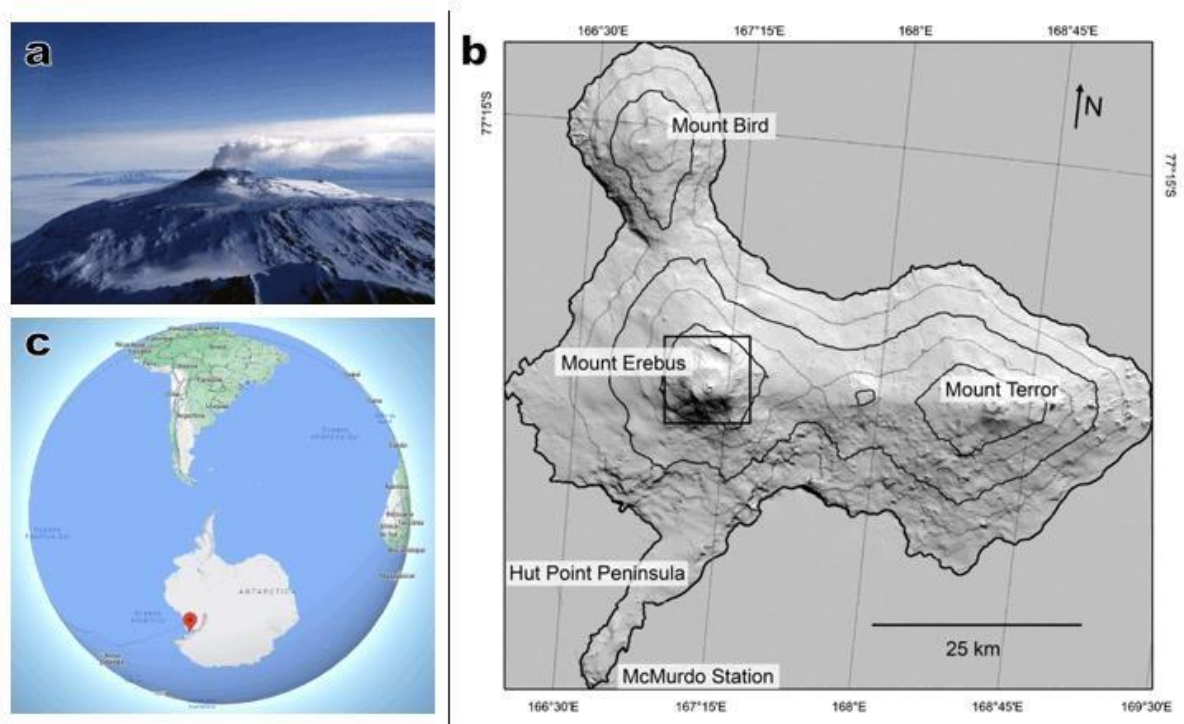


Fig. 1 – (a) Imagem do Monte Erebus (créditos Bill Rose, 1983, Michigan Technological University); (b) Localização do vulcão em termos globais; e (c) Localização do Monte Erebus na Ilha de Ross, Antártida (extraído de Csatho et al., 2008).

A avaliação de séries temporais pode levar ao desenvolvimento de modelos de eventos cíclicos vulcânicos, bem como a compreensão das consequências dos paroxismos vulcânicos e a relação destas com os resultados observados pelos sensores. Em especial, quando se leva em consideração o comportamento de estratovulcões alcalinos com lagos de lava persistentes há aproximadamente 100 mil anos (Harpel et al., 2004). É o caso do Monte

Erebus, de composição magmática alcalina rara que possui um lago de lava persistentemente ativo há pelo menos milhares de anos.

De acordo com Harris et al. (1997) e Harris e Stevenson (1999), é possível associar a quantidade de radiação emitida pela lava de um vulcão com a massa de material extrudido. O sensoriamento remoto orbital é imprescindível para realizar estimativas com relação às intensidades de erupções vulcânicas ao redor do planeta, uma vez que realizar tal procedimento presencialmente apresenta grandes dificuldades graças às condições extremas. O objetivo deste trabalho, dessa forma, é retomar os esforços científicos na compreensão e monitoramento do Mt. Erebus, Utilizando, desta vez, uma combinação de sensores de monitoramento remoto. O vulcão também é de interesse geológico, uma vez que possui lava de composição fonolítico-anortoclásica rara.

Por meio de imagens VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), bandas do espectro eletromagnético visível e do termal têm permitido a observação de variações de calor. O processamento InSAR de imagens complexas obtida pelo satélite Sentinel-1 permitem estimar soerguimentos ou subsidências vinculadas a processos de expansões e contrações, respectivamente, da câmara magmática do vulcão. Esta informação foi avaliada conforme variações de sazonalidade, quantidade de gelo sobreposta ao vulcão e temperatura.

4. OBJETIVOS

O presente trabalho consiste busca de padrões em séries temporais de emissão de calor e de variações morfológicas do corpo vulcânico do Monte Erebus, Antártida. O vulcão ativo situa-se em condições extremas de temperatura, bem como em uma área de baixa acessibilidade. Grande parte dos esforços de monitoramentos presenciais, de acordo com professor Philip Kyle, cessou graças à pandemia de COVID-19, com surtos em meados do final de 2019. Desta forma, o trabalho em questão se volta à utilização de sensoriamento remoto passivo e ativo em busca de conseguir estudar formas mais seguras e eficientes de se realizar um monitoramento de um corpo vulcânico, além de analisar a eficiência da utilização e combinação das ferramentas empregadas para o estabelecimento de possíveis modelos vulcânicos e análise de seus paroxismos. O vulcão também é de interesse geológico, uma vez que possui lava de composição fonolítico-anortoclásica rara.

5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As propriedades físicas, a composição dos magmas e os processos nas câmaras magmáticas de vulcões são os principais fatores que determinam os seus volumes, alturas e formas. As dinâmicas destes processos são governadas pelo ambiente tectônico em que se inserem. Dessa forma, um corpo vulcânico não contém somente informações a respeito de sua origem local, como pode também revelar dinâmicas crustais (Schmincke, 2004).

A maior parte dos vulcões na Terra forma-se ao longo de margens de placas convergentes ou divergentes, ou no interior de placas oceânicas em forma de pontos quentes (*hotspots*). Estas regiões podem ser caracterizadas por parâmetros como espessura crustal e de placa, fluxo de calor, campo de esforço, eventos sísmicos, entre outros (Schmincke, 2004).

O Grupo Vulcânico McMurdo (GVM; Fig. 2; Kyle e Cole, 1974) é representado por vulcões alcalinos formados no rifteamento da crosta continental na margem oeste da Baía de Ross, Antártida, durante o Cenozoico Superior. As rochas do GVM, na área McMurdo Sound, compreendem a Província Vulcânica Erebus, composta por basanitos, fonolitos e traquitos (Kyle, 1990). A Ilha de Ross abriga o Monte Erebus, um estratovulcão alcalino intraplaca (Behrendt, 1999) com lagos de lava ativos e persistentes em uma cratera de cerca 250 m de largura por 100 m de profundidade (cume), alcançando a altitude de 3794 m. Trata-se do vulcão historicamente ativo mais a sul do planeta, e era até 2020 monitorado pela estação de pesquisa McMurdo.

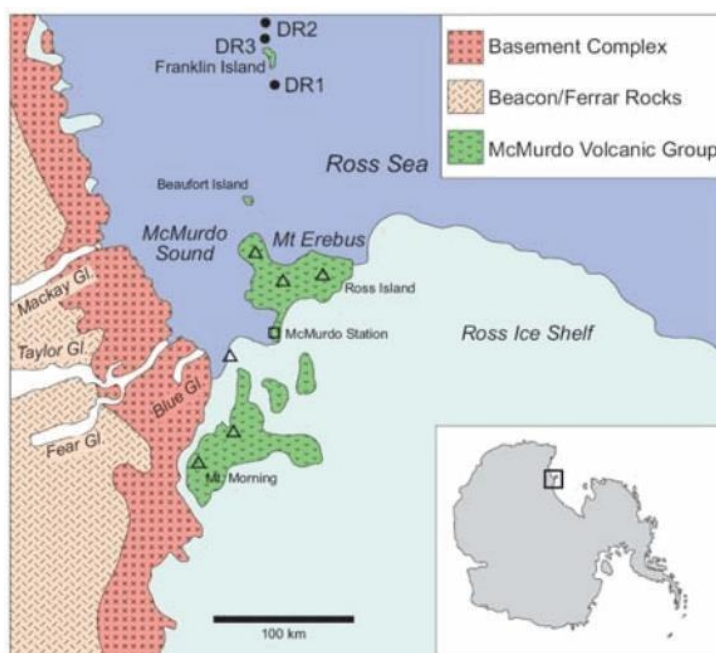


Fig. 2 – Região do MVG, com DR1, DR2 e DR3 referentes às áreas de dragagem para a análise ^{40}Ar - ^{39}Ar das amostras e estimativa geocronológica do vulcanismo e tectônica locais (extraído de Rilling et al., 2007).

Comumente, estratovulcões possuem vidas entre 10^5 e 10^7 anos e abrigam volumes de cerca de 800 km³ de magma (Schmincke, 2004). Estas propriedades tornam suas composições extremamente variáveis e, conseqüentemente, de difícil definição. Suas ocorrências são geralmente observadas em vulcões andesíticos a dacíticos, acima de zonas de subducção. São também relacionados a composições alcalinas, caso do Monte Erebus, mas principalmente em ilhas oceânicas no Atlântico.

O núcleo da estrutura de um estratovulcão é geralmente dominado por rochas intrusivas que ascendem vagarosamente à superfície em forma de domos ou agulhas. A composição de suas bordas é representada por diferentes gerações de fluxos de lava, com comum presença de brechas. As rochas resultantes são geralmente piroclásticas ou epiclásticas retrabalhadas (Schmincke, 2004).

A razão entre largura e altura de vulcões deste tipo depende diretamente da viscosidade do magma relacionado e da quantidade de água presente. Altas viscosidades, usualmente relacionadas a altos volumes de água (wt%) no magma, não permitem a exsolução de voláteis e culminam no aumento exponencial da pressão dentro do sistema vulcânico. Este fenômeno produz um caráter altamente explosivo e fragmentável nestes corpos (Cassidy et al., 2018). Como materiais vulcanoclásticos compõem cerca de 90% destas rochas, a presença de água é significativa dado o seu comportamento de alta absorção. Vulcões cobertos por geleiras possuem mais uma fonte de água possível e constante, contribuindo ainda mais para a explosividade de seu magma (Schmincke, 2004).

A cronologia glacial hoje aceita para a região de McMurdo foi compreendida segundo a ocorrência conjunta dos sedimentos, relevos glaciais e pequenos cones vulcânicos do Dry Valley (Armstrong, 1978), uma fileira de oásis antárticos localizados em Victorialand e a oeste do estreito de McMurdo. Múltiplas glaciações foram reconhecidas e descritas por Pewe (1960). Hamilton e Hayes (1960), McCraw (1962), e Angino et al. (1962) descrevem as relações entre cones de escória e história glacial no Vale de Taylor. As idades mais antigas dos relevos vulcânicos na região de Taylor e Wright Valleys (3,4 a 4,6 Ma; Fleck et al., 1972), a oeste do Mt. Erebus (Fig. 2), indicam que a escavação dos vales por fluxo hipodérmico de geleiras ocorreu antes de 4,0 Ma. Isto sugere uma sucessão de intercalações entre períodos de glaciação e erupções.

Embora de origem subaquática, não é possível concluir que os Taylor e Wright Valleys se formaram pelo contato com um manto de gelo extenso. Esta condição decorre de sua disposição atual acima do nível do mar. Outra hipótese é de que tenham sido formados em um ambiente submarino e posteriormente soerguidos tectonicamente (Armstrong, 1978).

De acordo com Hayes et al. (1973) e Kennett et al. (1973), os registros marinhos indicam que o resfriamento pronunciado da região teve início durante o Mioceno Superior, com clímax da atividade glacial na região do Mar de Ross entre 4000 a 5000 anos. Após este evento, teria ocorrido um recuo do gelo para uma posição semelhante à de hoje.

A crosta abaixo da Ilha de Ross possui de 17 a 25 km de espessura, caracterizada por rochas típicas de um cenário de crosta continental rifteada (Bannister et al., 2000). A ilha foi formada a partir de quatro centros vulcânicos, em ordem cronológica, o Monte Bird, o Monte Terror, a Península Hut Point e o Monte Erebus (Kyle, 1990). De acordo com Kyle e Cole (1974), o rift de Terror (Behrendt, 1999), associado ao sistema de rifteamento antártico oeste, provocou a ascensão de magma do manto até a crosta, causando uma deformação ascendente da crosta em forma de domo. Este processo resultou em um fraturamento radial seccionado a 120° em cada um dos outros três focos vulcânicos, como sugerido pela simetria radial do Monte Erebus. Segundo Gupta et al. (2009), a anomalia termal observada na Ilha de Ross pode representar uma possível pluma mantélica responsável pelo vulcanismo na Ilha de Ross.

O Monte Erebus possui três principais crateras, Principal, Lateral e Oeste, contendo fumarolas em todas e em outros locais da unidade (Fig. 3; Panter e Winter, 2008). Estas crateras apresentam quatro unidades geológicas distintas, denominadas SC1 a SC4 (Side Crater).

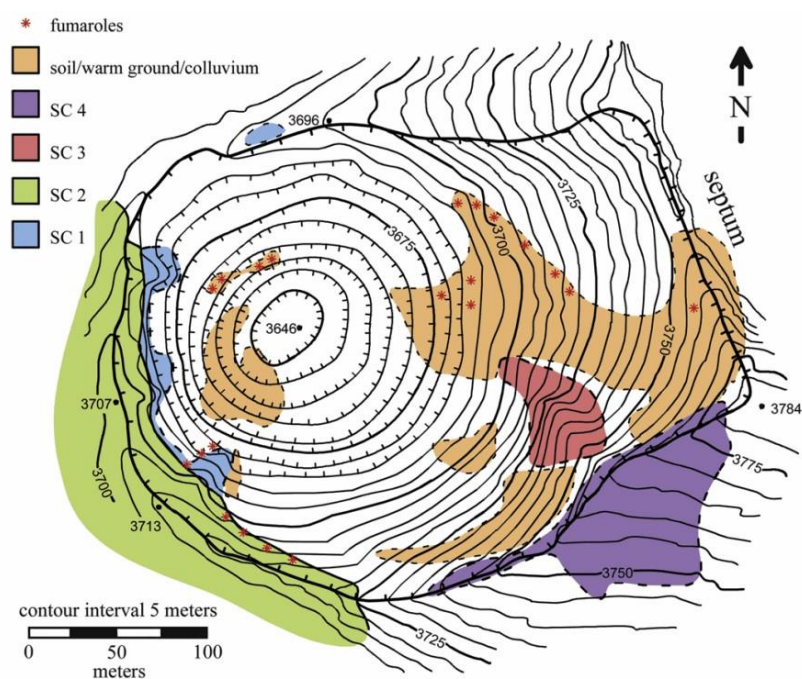


Fig. 3 – Geologia da cratera lateral do Monte Erebus: SC1 – derrames de lava porfiríticos e anortoclásicos compostos de granulação grossa; SC2 - lavas vítreas cinzas a pretas e brechas vermelhas; SC3 - fluxos de lava e brechas que são expostos na base da seção sudeste da parede da cratera lateral e SC4 - brechas-tufos piroclásticos, com bombas vulcânicas sustentadas por uma matriz de bagacinas-tufos (extraído de Panter e Winter, 2008).

SC1 trata-se de um composto de fluxos de lava com estruturas vesiculares e porfiríticas com grandes fenocristais de feldspato anortoclásico de até 4 cm de comprimento e menores quantidades de plagioclásio, clinopiroxênio, olivina, apatita e óxidos opacos dentro de uma

massa hipocristalina. SC2, por sua vez, consiste de lavas vítreas cinzas a pretas e brechas vermelhas que formam a parte superior da seção externa oeste da cratera lateral. As lavas desta unidade se intercalam de forma descontínua entre fluxos tabulares e lentes. A unidade SC3 trata-se de um pacote de fluxos de lava e brechas que são expostos na base da seção sudeste da parede da cratera lateral. A sua assembleia mineral é consistente com a de outras lavas fonolíticas da cratera lateral, dominada por fenocristais de feldspato anortoclásico. Acima da SC3, a “Side Crater 4” (SC4) é compreendida por brechas-tufos piroclásticos, com bombas vulcânicas sustentadas por uma matriz de bagacinas-tufos (Fig. 4; Panter e Winter, 2008).

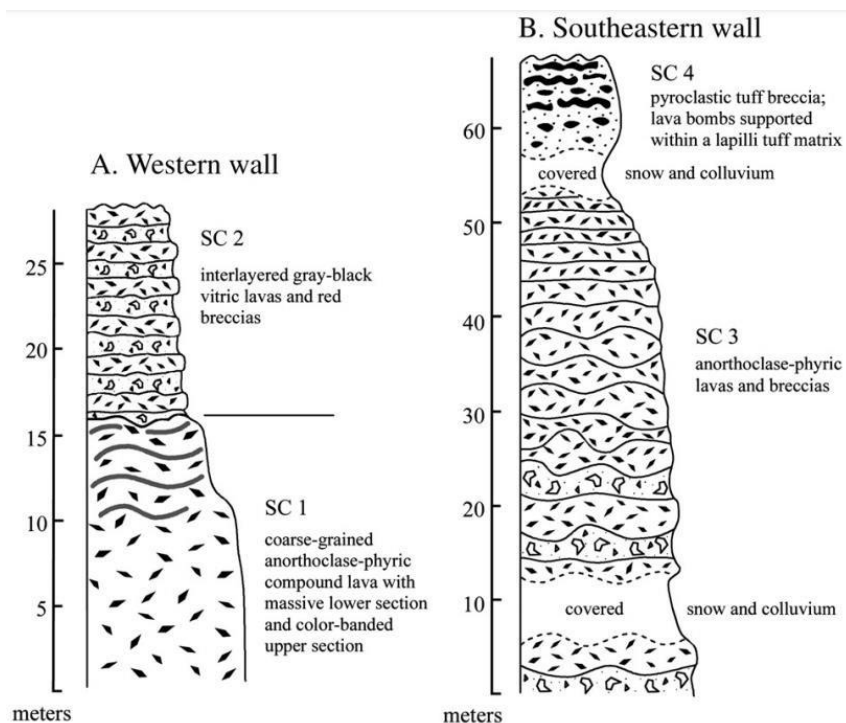


Fig. 4 – Colunas estratigráficas das seções oeste e sudoeste da cratera lateral do Monte Erebus (extraído de Panter e Winter, 2008).

O formato cônico moderno do Monte Erebus é ocasionado pela caldeira vulcânica mais jovem, remontando ao Pleistoceno. A ocorrência de lagos de lava na região é comum. Entretanto, o lago persistente em estudo está presente em uma cratera de formato elíptico, de 500 x 600 m, com 110 m de profundidade e truncamentos no cume do corpo vulcânico. Esta massa está em atividade constante e é monitorada desde 1972. Sua história compreende pequenas explosões e ocasionais explosões estrombolianas de maior porte que ejetam conteúdo para as bordas da cratera. Venzke (2013) sugere que este comportamento é típico da evolução mais recente do vulcão.

A geologia do sistema vulcânico do Monte Erebus apresenta derrames de lava, diques e depósitos piroclásticos de composição intermediária, basanitos expostos em forma de cones erodidos e pequenas ilhas afastadas da costa ao lado sudoeste do corpo principal. Afloramentos de fluxos fonolíticos anortoclásicos estão presentes nas encostas menos

inclinadas mais baixas. Mais acima, as porções mais inclinadas do vulcão estão representadas principalmente por fluxos curtos e grossos de vidros fonolíticos anortoclásicos. A região do cume trata-se de um declive suave preenchendo a caldeira vulcânica, cuja borda atinge aproximadamente 3200 m de altitude. O vulcão possui um lago de lava fonolítico anortoclásico persistente que ocupa a sua cratera de subsidência, preenchendo o cone na parte sul deste platô (Kyle et al., 1982).

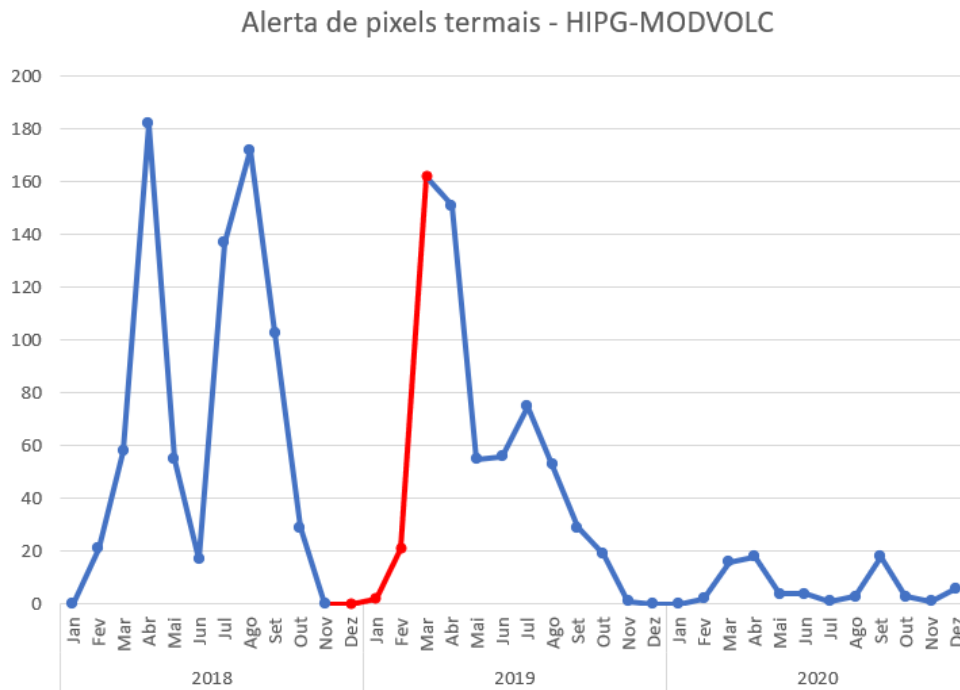
Os trabalhos citados demonstram a relevância científica de estudar-se tal vulcão, bem como contextualizam sua situação geológica e geográfica.

6. METODOLOGIA

O trabalho utiliza tanto o sensoriamento remoto passivo quanto o ativo. Enquanto o passivo mede somente energias que estão sendo emitidas naturalmente (infravermelho termal, por exemplo) e sua reflexão (Visível e Infravermelho Próximo a Ondas Curtas), sensores ativos possuem sua própria fonte de radiação eletromagnética, enviando pulsos e medindo seu retroespalhamento. Ao adquirir imagens de tais sensores, a comparação com imagens do espectro eletromagnético visível se torna fundamental para as conclusões, uma vez que diferentes fases de radiação emitem diferentes imagens e, portanto, diferentes informações. Estas imagens serão utilizadas para avaliar as assinaturas térmicas e estimar as variações geométricas do cone vulcânico temporalmente.

Foram utilizadas como referências as crateras principal e lateral do vulcão Erebus e um período de um número alto de registros captados pelo sistema de alertas termais HIPG – MODVOLC (School of Ocean and Earth Science and Technology da Universidade do Havaí-SOEST), precedido de um período com relativamente poucos alertas termais (Tabela 1).

Gráfico 1: Número de pixels de alerta termais mensais registrados pelo MODIS-MODVOLC no vulcão Erebus entre 2017-2021, com dados compilados utilizando o sistema de alertas termais HIPG – MODVOLC. Destacado, encontra-se período utilizado para realizar a análise físico-temporal, abrangendo os meses de novembro e dezembro de 2018, janeiro, fevereiro e março do ano de 2019.



Utilizando os meses de novembro de 2018 a março de 2019, pôde-se identificar um brusco aumento nos alertas termais, a comparação do imageamento do período captado de atividade vulcânica intensa com o de momentos de pouca atividade, segundo o sistema de alertas, se tornou a premissa metodológica deste trabalho.

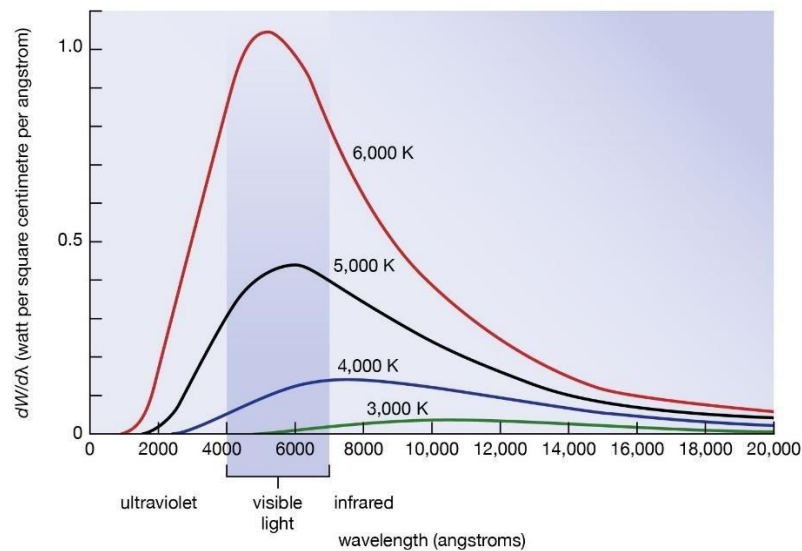
Após adquirir as imagens, foram realizados o processamento e correlação no domínio do espaço e em função do tempo.

6.1 - Lei de Deslocamento de Wien

Para interpretação dos dados intrínsecos às imagens VIIRS, foi necessária a compreensão do conceito da emissão de radiação eletromagnética por parte de diversos materiais. De modo simplificado, cada objeto termodinamicamente em equilíbrio com seu ambiente possui um comprimento de onda específico em que se situa a máxima emissão de radiação eletromagnética relacionada à sua temperatura. O valor da emissividade varia de 0 a 1, a depender da superfície do objeto em questão. A emissividade é igual à fração remanescente da radiação que retorna após uma superfície específica absorvê-la (Walker, 2008). A temperatura (grau agitação das moléculas de um corpo) se relaciona diretamente com a emissão e irradiação de calor de um dado, e terá seu ponto máximo de emissão de radiação eletromagnética num comprimento de onda específico. Para corpos negros, esta relação é regida pela Lei de Deslocamento de Wien (eq. 1; Fig. 5).

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} = \frac{0,0028976}{T} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que λ_{max} é o comprimento de onda (em metros) de máxima intensidade de emissão da radiação eletromagnética, T é a temperatura do corpo em Kelvins, e b é a constante de dispersão de Wien, dada em metro*Kelvin.



© Encyclopædia Britannica, Inc.

Fig. 5 – Energia eletromagnética (dW) emitida por unidade de área por segundo por intervalos de comprimento de onda, $d\lambda = 1$ angstrom, por um corpo negro em diversas temperaturas entre 3000 e 6000 K em função do λ . O intervalo de luz visível se encontra destacado em azul escuro. O comprimento de onda do pico muda com a temperatura de acordo com a Lei de Wien (Encyclopædia Britannica, Inc., acessado em 14 de novembro de 2022).

Os valores das imagens VIIRS foram corrigidos utilizando um método de conversão provido pelo próprio fornecedor do produto, em que basta multiplica-los por 0,002 e soma-los 0,49 para que os valores variem entre 0,49 e 1, representando a porcentagem de emissividade dos objetos em questão.

6.2 – Sensoriamento Remoto Passivo: VIIRS

Os dias específicos de em que houveram alertas termais foram levados em consideração no download das imagens *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) para melhor representação de possíveis eventos eruptivos.

Para análise de sensoriamento passivo, o trabalho se usou imagens capturadas pelo instrumento VIIRS a bordo do satélite meteorológico Suomi NPP. Tal ferramenta coleta

imagens nos comprimentos de onda do visível e do infravermelho incluindo dados de superfície, atmosfera, gelo e oceano. Este satélite imageia diariamente 22 bandas espectrais diferentes com resoluções espaciais de 375 m e 750 m (LP DAAC, <https://search.earthdata.nasa.gov/search>; acessado em 2022). O VIIRS é parte de missões de monitoramento orbital operadas pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e pela National Aeronautics and Space Administration (NASA).

A ferramenta em questão é um radiômetro de imageamento multiespectral com resoluções temporais, espaciais e espectrais semelhantes às do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo dos satélites Terra (1999) e Aqua (2002). Isto faz com que se torne um dos principais candidatos para a continuação do monitoramento do fluxo termal de vulcões ao redor do planeta (Ramsey et al., 2022). Alguns autores (Trifonov et al., 2017; Gordeev et al., 2016; Genzano et al., 2020) já realizaram trabalhos pontuais para desenvolver algoritmos e sistemas dedicados à aplicação do monitoramento termal de atividade vulcânica utilizando dados providos de VIIRS, apesar de não serem abordagens em escala mundial.

De acordo com Campus et al. (2022), resultados promissores demonstraram a capacidade do sensor VIIRS de complementar, substituir e melhorar as capacidades do MODIS para monitoramento termal de atividade vulcânica, dado o fim previsto para as operações das missões orbitais de Terra e Aqua operados pela NASA (Fig. 6).

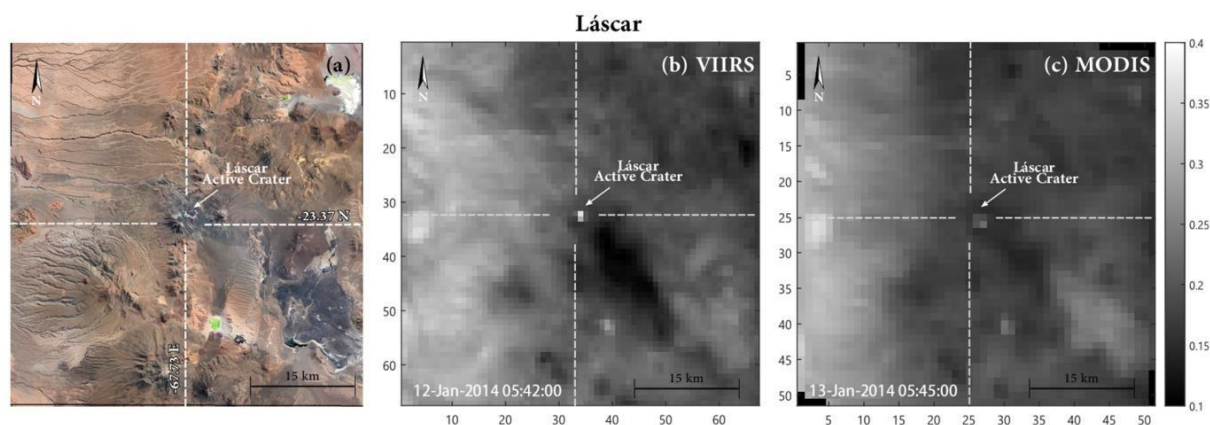


Fig. 6 – (a) Localização do vulcão Lascar (Chile; créditos: Google Earth); (b, c) exemplos de imagens VIIRS (b) e MODIS (c) adquiridas para a mesma região. As imagens representam dados de radiação MIR (Middle Infrared) (banda M13 e bandas 21/22, para VIIRS e MODIS, respectivamente), processados e centralizados no cume do vulcão a uma resolução original de 750 m (para VIIRS) e 1000 m (para MODIS). As resoluções são distintamente diferentes, permitindo uma melhor definição das anomalias termais. Os pixels brilhantes identificam a anomalia termal detectada pelos dois sensores e relacionadas às manifestações quentes do vulcão presentes no momento de captura das imagens (retirado de Campus et al., 2022).

O sensor MODIS, costumeiramente utilizado para imageamento passivo termal, apesar de possuir resolução temporal satisfatória comparada ao dos sensores ativos, como da plataforma Sentinel-1, apresenta resolução espacial de 1 km para as bandas do

infravermelho termal. Isto pode fazer com que os dados acerca das modificações físicas do vulcão sejam simplificados e comprometam um estudo mais detalhado. Mesmo assim, trabalhos têm representado com sucesso o lago de lava do vulcão (e.g. Volcanism Program, 2021; Fig. 7).

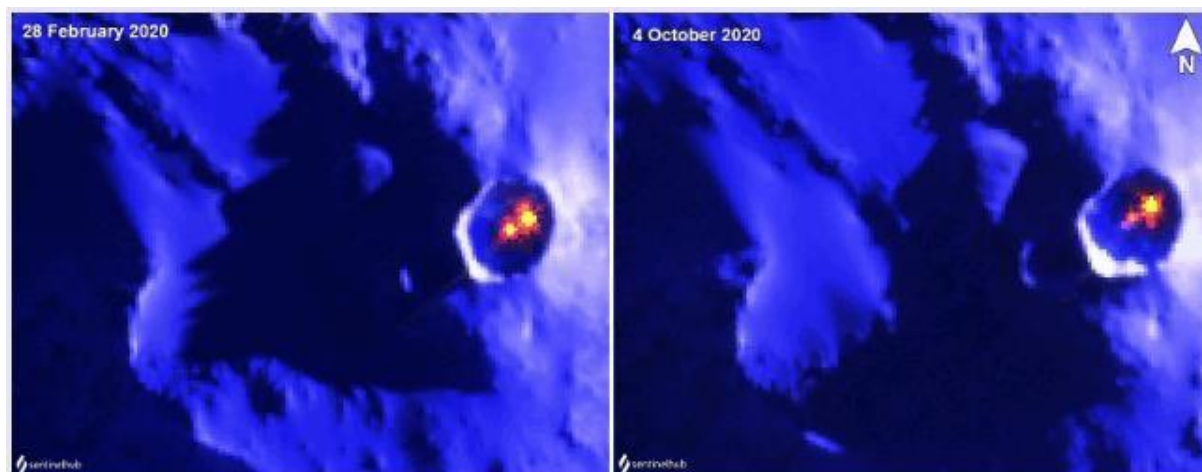


Fig. 7 – Imagens termais da cratera do Monte Erebus em fevereiro e outubro de 2020 (extraído de Global Volcanism Program, 2021, <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=390020>, em novembro de 2022).

Neste trabalho optou-se por utilizar o sensor VIIRS ao invés do MODIS, uma vez que suas vantagens de resolução espacial para monitoramento termal de atividade vulcânica (Campus *et al.*, 2022). Dessa forma, utilizou-se o levantamento Suomi-NPP VIIRS Level 1B que incluiu imagens VNPMOD02-Moderate Resolution 6-Min L1B Swath 750m. Estes produtos são distribuídos pelo NASA's Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System-Distributed Active Archive Center (LAADS-DAAC). A banda analisada para conferir assinaturas termais foi a M14, 8.4 - 8.7 μm .

Os arquivos foram todos processados utilizando a ferramenta de conversão de formatos HDF5 para GeoTIFF denominada HDF-EOS to GeoTIFF Conversion Tool (HEG, Fig. 8), disponibilizada pelos domínios oficiais da NASA. Em seguida, foram dispostos e colorizados no aplicativo de código aberto e grátis QGIS em sua última versão estável disponível.

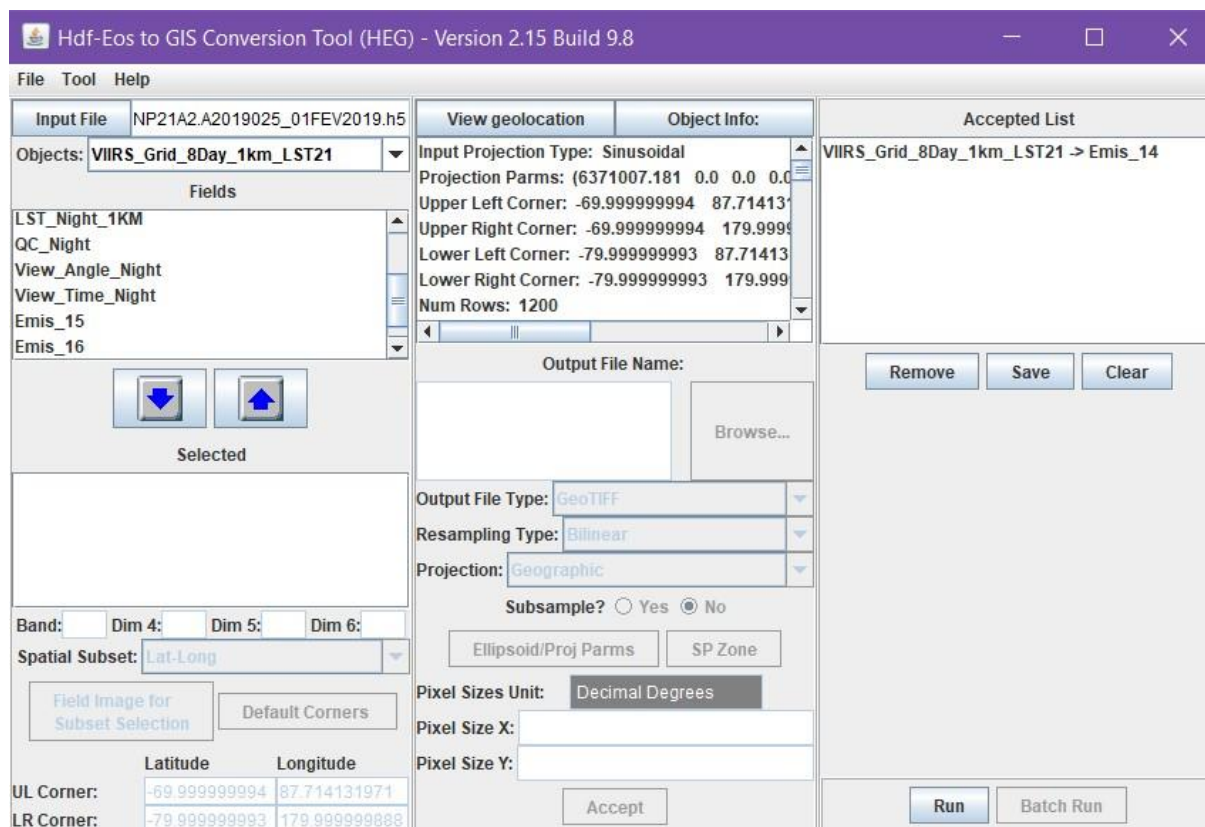


Fig. 8 – Etapa de conversão de extensões HDF5 para GeoTIFF, realizada pelo programa HEG disponibilizado pelos domínios da NASA. Na figura, somente a banda M14 da figura VIIRS foi convertida a GeoTIFF para visualização em QGIS.

As imagens esperadas a partir deste processamento trouxeram informações a respeito do comportamento de emissividade dos diferentes materiais pertencentes a estrutura principal do vulcão Erebus que variam conforme as datas de análise.

6.3 – Sensoriamento Remoto Passivo: Landsat-08

O imageamento a partir do satélite Landsat-08 contou com o sensor Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor (OLI/TIRS), e com os produtos científicos de coleção 2 e nível 2 (L2SP) através do domínio EarthExplorer (earthexplorer.usgs.gov, acessado em 13/11/2022). Os dados L2SP incluem informações de reflectância e temperatura da superfície. Estas imagens são geradas com uma resolução espacial de até 30 metros, com informações diárias. De acordo com o domínio oficial da descrição do produto utilizado, a reflectância da superfície se trata de um dado estimado da reflectância espectral superficial da Terra como se fosse medida do próprio chão, sem a interferência do espalhamento ou absorção atmosférica.

Com a disposição de três principais imagens na extensão GeoTIFF, foram realizadas composições RGB com evidências das bandas 3 (verde, $0,533 \mu\text{m} < \lambda < 0,590 \mu\text{m}$), 4 (vermelha, $0,636 \mu\text{m} < \lambda < 0,673 \mu\text{m}$) e 7 (infravermelho de onda curta ou *Small Wavelength*

Infrared 2 - SWIR2), compreendendo esta última um alcance de 2,11 a 2,29 μm . Esta composição, realizada no aplicativo QGIS, evidenciou o comportamento constante do vulcão. Estas imagens serviram de referência para análise do comportamento constante do lago de lava persistente sobre o Mt. Erebus, complementando e vinculando a coerência dos dados de deslocamento de superfície obtidos via Sensoriamento Remoto Ativo.

6.4 – Sensoriamento Remoto Ativo: InSAR

Imagens de radar registradas simultaneamente em posições levemente distintas podem gerar modelos de elevação digital com acurácia centimétrica. Esta técnica pode auxiliar na análise e interpretação de ambientes tectônicos e vulcânicos (Bürgmann, 2000). Este método consiste na iluminação do alvo por ondas eletromagnéticas de frequência de micro-ondas e o sinal refletido é utilizado para deduzir informação a respeito do determinado objeto de estudo. Duas imagens SAR (Radar de Abertura Sintética) podem ser combinadas para produzir um interferograma, produto da Interferometria SAR (InSAR), que pode revelar informações de elevação da área com resolução temporal de até minutos de precisão.

O InSAR é uma técnica de radar utilizada em geodésia e sensoriamento remoto. Essa técnica de cálculo geodésico leva em consideração o padrão de interferência causado pela diferença de fases entre duas imagens SAR adquiridas em dois momentos distintos. Tal metodologia pode registrar perturbações na atmosfera, movimentos na crosta terrestre, modificações dielétricas no solo e deslocamentos na topografia (Massonnet, 1998). Esta técnica utiliza os dados de fase (*Single-Look Complex; SLC*) de duas imagens SAR para determinar a diferença de fase entre cada par de pontos correspondentes na imagem. As primeiras aplicações de InSAR foram estudos baseados na Terra da topografia da Lua e de Vênus (Bürgmann, 2000).

Para a criação de imagens comparativas entre diferentes estações do ano, foi utilizado o programa de processamento de imagens do satélite Sentinel, o SNAP (Sentinel Application Platform) da Agência Espacial Européia (ESA). Com o objetivo de criar interferogramas que demonstrem a diferença topográfica entre períodos escolhidos foram utilizados pares de imagens (*Master* e *Slave*) acima da mesma área (Ilha de Ross). A deformação da superfície registrada mostrou-se evidente no cálculo de fases do interferograma, refinado utilizando a imagem de coerência. As fases consistem em franjas, com um ciclo de cores de -2π a 2π , ou -3,14 a 3,14. A imagem de coerência foi produzida ao realizar uma correlação cruzada entre as imagens SAR *Master* e *Slave*, com 0 significando baixa coerência e 1 significando alta. Para a elaboração destes dois produtos, foi necessária uma cadeia de processamento descrita a partir do exemplo a seguir.

Utilizando um par de imagens de períodos distintos do mesmo local, o processamento se deu da forma:

1. Definição de quais pulsos serão utilizados para corresponder exatamente à área de estudo;
2. Atribuição de informações precisas de posicionamento e velocidade do satélite no momento da captura às imagens;
3. Empilhamento das duas imagens;
 - a. Associação da imagem *master* com a *slave* utilizando dados de órbita e MDE, e corrigindo o azimuth dos dados das mesmas áreas (nas duas imagens) imageadas por pulsos adjacentes;
4. Aplicação de filtro de realce espectral (*Enhanced Spectral Diversity*);
5. Criação do interferograma é criado;
 - a. Remoção das lacunas sem dados presentes entre a imagem de cada pulso;
6. Aplicação do filtro TOPSAR Deburst (Terrain Observation with Progressive Scans SAR - TOPSAR) para minimização de ruídos por efeito Doppler devido a movimentação das antenas;
7. Exportação dos dados para análise de fase utilizando o plugin “SNAPHU Export”;
8. Desempacotamento de fases (*Phase Unwrap*) para a confecção da imagem final e recompilação por meio do plugin SNAPHU;
9. Extração da topografia pelos ciclos de fase;
10. Aplicação de filtro “Multilooking” para redução ruídos *speckle* inerentes a imagens SAR para melhorar a interpretação da imagem final;
11. Aplicação de Filtro de Fase (*Goldstein Phase Filtering*) para a redução de ruídos de fase possíveis;
12. Gravação/Exportação do interferograma, mapa de coerência e mapa de deslocamento (Fig. 9).

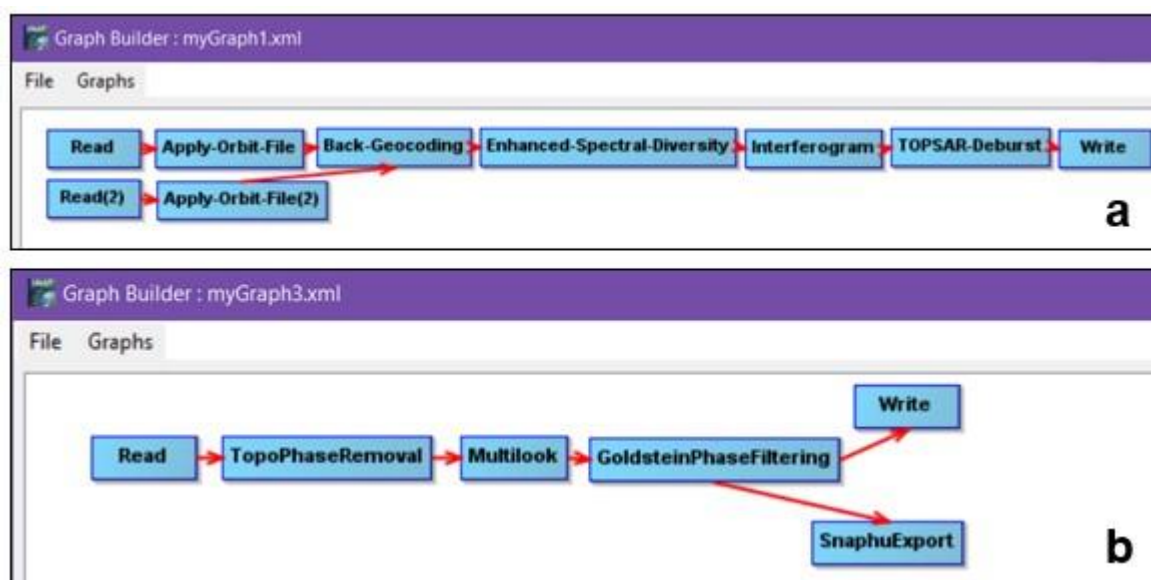


Fig. 9 – (a) Primeira parte do processamento do interferograma; (b) Segunda parte do processamento do interferograma.

Após o processamento das imagens, foram aplicadas máscaras de imagem para que dados de coerência baixa fossem descartados. Com este corte, buscou-se obter uma imagem mais confiável, restrita a pontos coerentes e de ruído minimizado. Os resultados aguardados trouxeram dados a respeito de deslocamento físico que variavam conforme o período estudado.

7. RESULTADOS

As séries temporais de dados orbitais buscaram estabelecer um modelo integrado de variação de temperatura superficial e volume do corpo vulcânico levando em consideração o brusco aumento de alertas termais entre os meses de novembro de 2018 e março de 2019.

7.1 – Imagens Landsat 8 – OLI

Para possível comparação entre os imageamentos já realizados e também para observação do comportamento do aspecto físico do vulcão Erebus, da Ilha de Ross e de distribuição das geleiras locais, apesar deste objetivo não ter sido atingido graças a ausência de anomalias significativas nas imagens que pudessem auxiliar neste sentido. Estas últimas são usualmente responsáveis pela redução da coerência em análises InSAR devido a sua maior mobilidade em relação a movimentos geológicos. Com isso, fez-se uma comparação temporal dos meses de dezembro/2018, janeiro/2019 e fevereiro/2019 a partir de uma

composição RGB das bandas 3, 4 e 7 captadas pelo sensor OLI/TIRS do satélite Landsat 8 - OLI (Fig. 10).

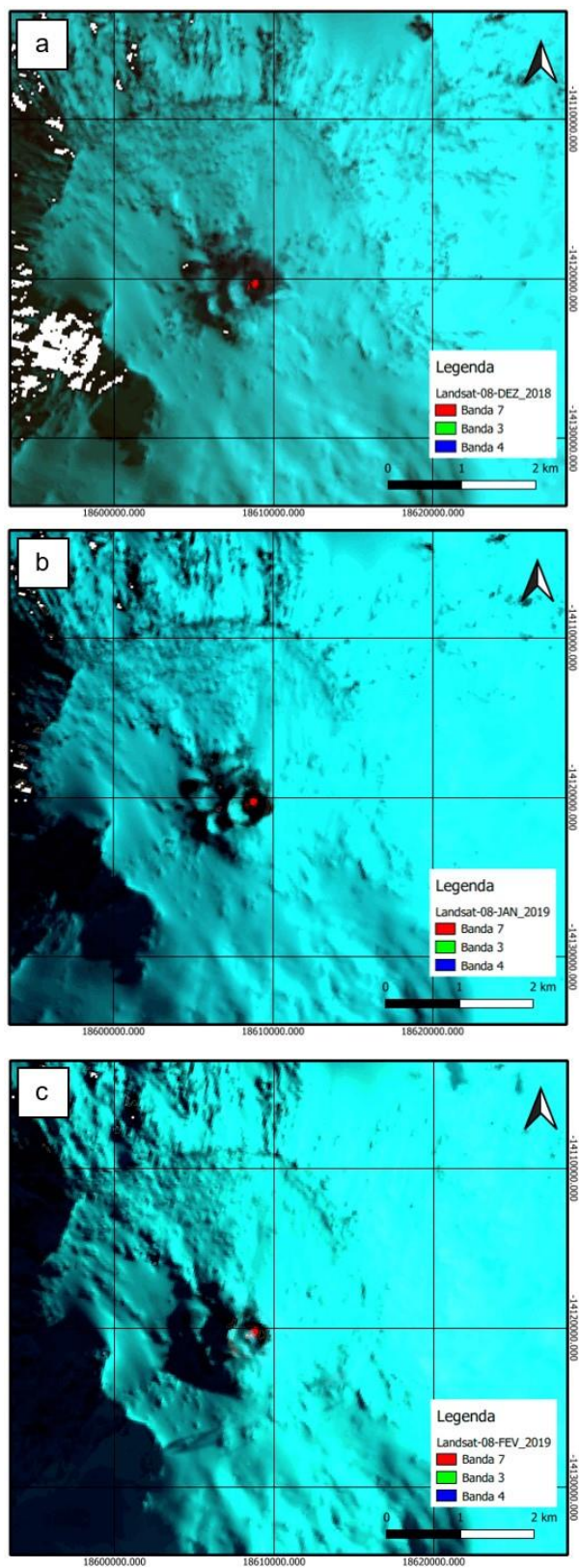


Fig. 10 – Composições Landsat 8 – OLI (3,4,7) de dezembro de 2018 a fevereiro de 2019 das crateras Principal e

Lateral do Mt. Erebus. Esta composição evidencia, em vermelho, assinatura significativa encontrada constantemente na banda 7, de ondas de infravermelho de ondas curtas 2 (SWIR2).

7.2 – Imagens VIIRS

Foram coletadas e tratadas imagens do sensor VIIRS, a partir das quais foi possível observar valores variáveis de emissividade de calor nas regiões que compreendem as duas crateras do vulcão Erebus, no período de 01/02/2019, 05/03/2019 e 13/05/2019, demonstrados pela Fig. 11.

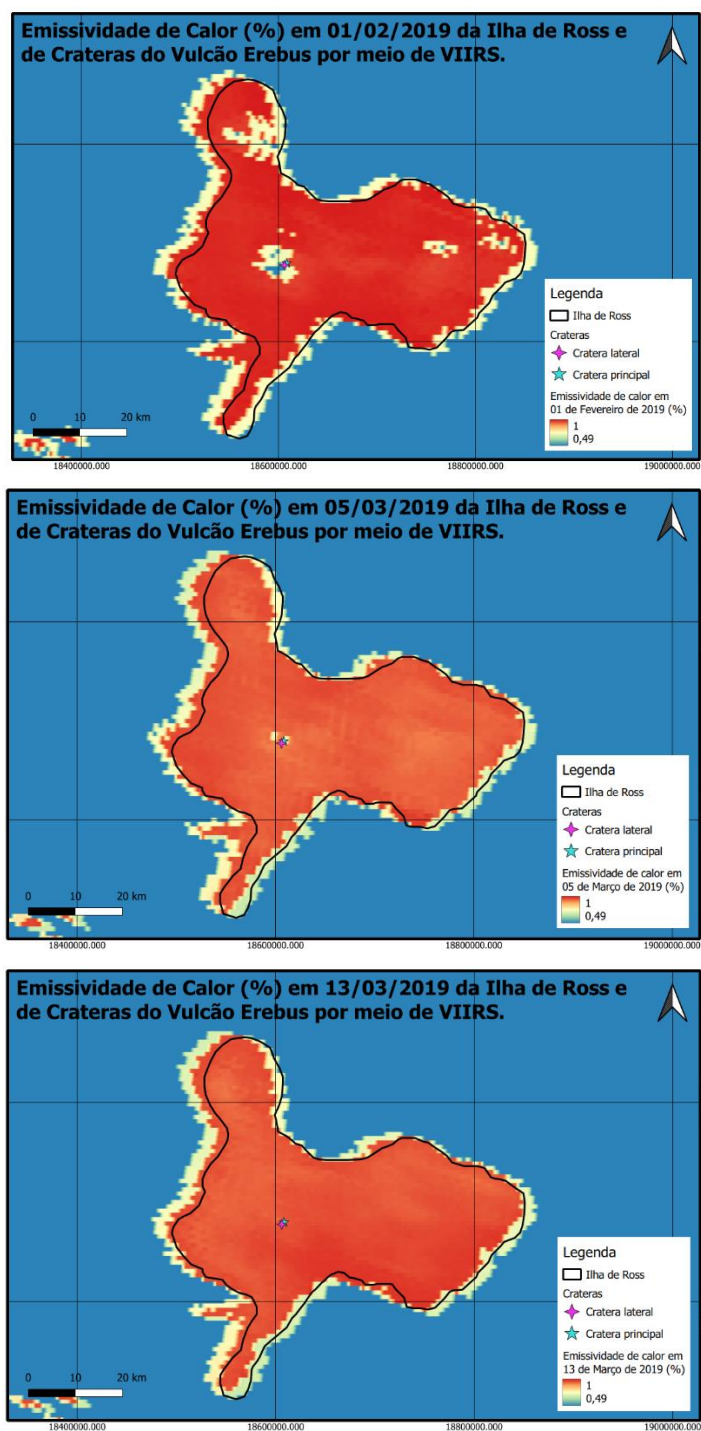


Fig. 11 – Imagens VIIRS no Infravermelho Termal para as datas (a) 01/02/2019, (b) 05/03/2019 e (c) 13/03/2019.

Em 01/02/2019, manchas de baixa emissividade de calor apareceram principalmente na região compreendida pelas duas crateras (Fig. 11a). Dentro de uma janela temporal de um mês, em 05/03/2019 observou-se a variação de emissividade, agora já com valores quase em sua totalidade próximos a 100% de emissividade (Fig. 11b). Após poucos dias, em 13/03/2019 (Fig. 11c), já é impossível distinguir uma anomalia de emissividade no interior da Ilha de Ross, sugerindo um episódio de paroxismo vulcânico. Este comportamento pode ser relacionado à diferença de emissividade de cada material encontrado na superfície do vulcão, demonstrando, assim, uma mudança nestes.

7.3 – Resultados InSAR

Foram geradas duas principais imagens comparando períodos distintos a partir do sensoriamento ativo InSAR. Estas revelaram um deslocamento da superfície predominante entre os dois momentos. O primeiro resultado leva em consideração a alteração do relevo entre as datas de 06/11/2018 e 29/01/2019. Neste íterim, houve uma alta subsidência para um curto período (sem colapso de caldeira), com variações de até 0,68 m (Fig. 12) em regiões distais e litorâneas, e uma proximal a norte das crateras Principal e Lateral.

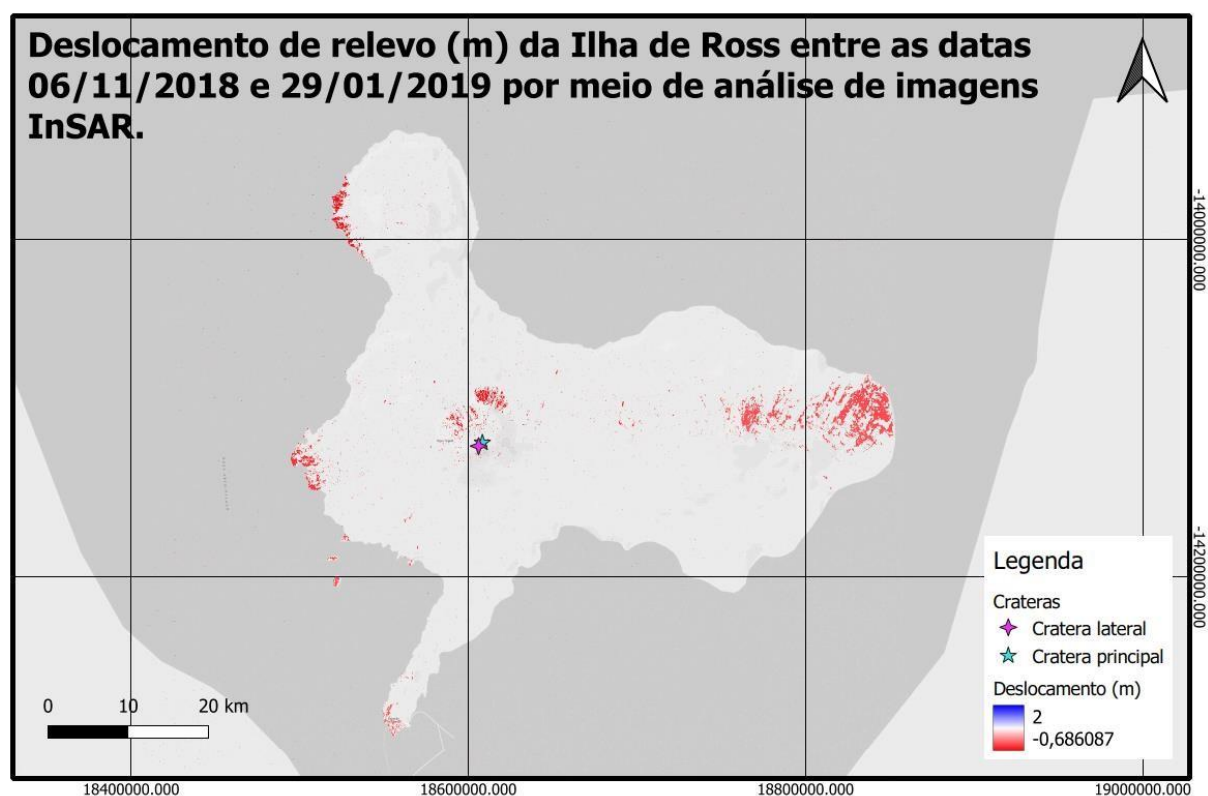


Fig. 12 – Mapa de deslocamento superficial da Ilha de Ross, compreendendo uma subsidência de até 68 cm aproximadamente.

No período seguinte, entre 29/01/2019 e 06/03/2019, houve um comportamento extremamente distinto dos meses anteriores, com soerguimento da superfície concentrada nas extremidades da ilha e no entorno das crateras (Fig. 13), com acúmulo principalmente a NW das últimas.

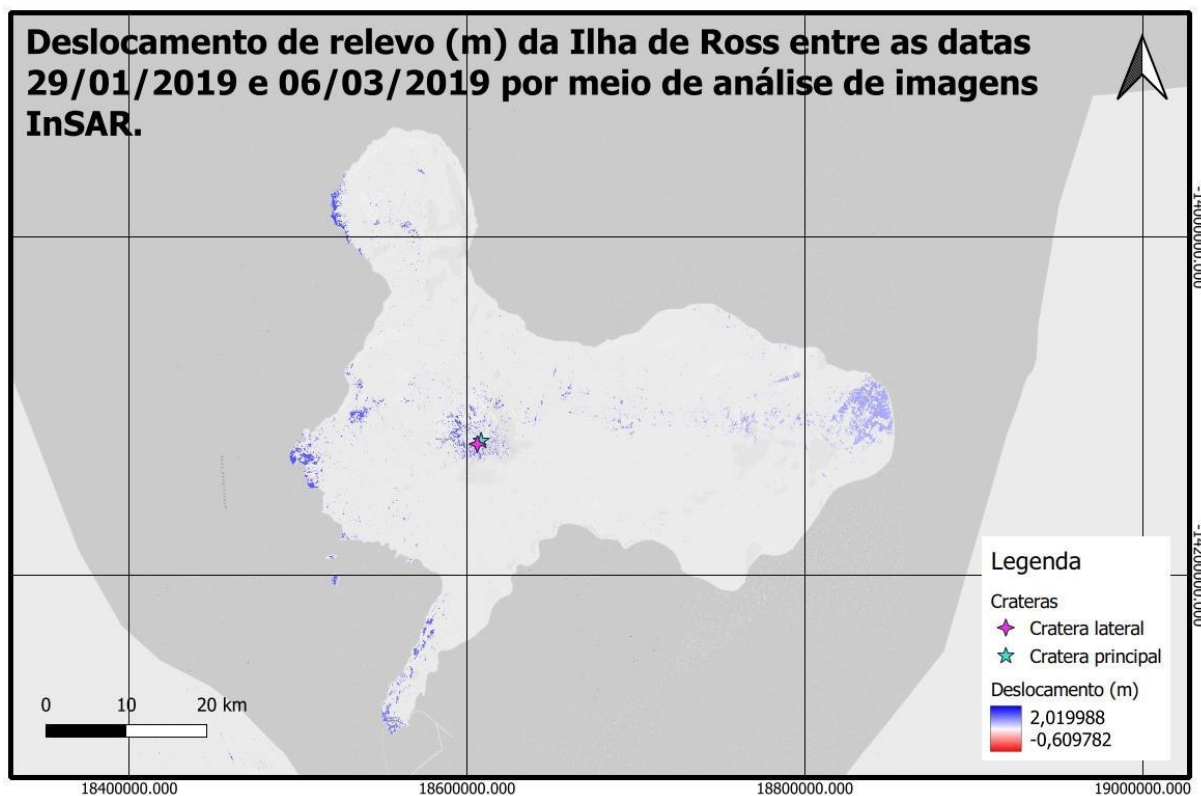


Fig. 13 – Mapa de deslocamento superficial da Ilha de Ross. O deslocamento positivo chega a alcançar valores de até 2 m nas em áreas próximas às subsidências indicadas na Fig. 12.

8. DISCUSSÕES

O Mt. Erebus se encontra em atividade constante por no mínimo dezenas de milhares de anos. Apesar de expressar-se em momentos pontuais, a sua assinatura térmica é visível de modo constante, até em períodos de poucos eventos eruptivos. Este comportamento foi observado em radiações de infravermelho de onda curta e até do espectro visível (Figs. 10 e 11).

Integrando imagens de sensoriamento remoto passivo e ativo, junto aos dados de monitoramento termal HIGP – MODVOLC, foi possível identificar um aumento de eventos

eruptivos identificado entre os meses de novembro de 2018 e março de 2019. Entre novembro de 2018 e janeiro de 2019, houve uma subsidência geral na (Fig. 12). Estas mudanças de relevo são principalmente focadas nas bordas da Ilha de Ross e circundando as crateras principal e lateral do Mt. Erebus. Nos meses subsequentes, de fevereiro a março de 2019, foi observada uma manifestação contrária, tendo estas mesmas partes passado por um processo de elevação (Fig. 13). As manifestações distais podem estar associadas a movimentos de geleiras que cobrem a região. Numa análise visual no comportamento das geleiras para o mês de dezembro de 2017 (Fig. 14a), 2018 (Fig. 14b) e 2019 (Fig. 14c), nota-se um retrocesso destas entre 2017 e 2018, e um novo avanço de 2018 a 2019. Este processo pode estar relacionado a alterações climáticas e, sobretudo, a maiores emissões de calor devido ao paroxismo observado nos dados termais e interferométricos.

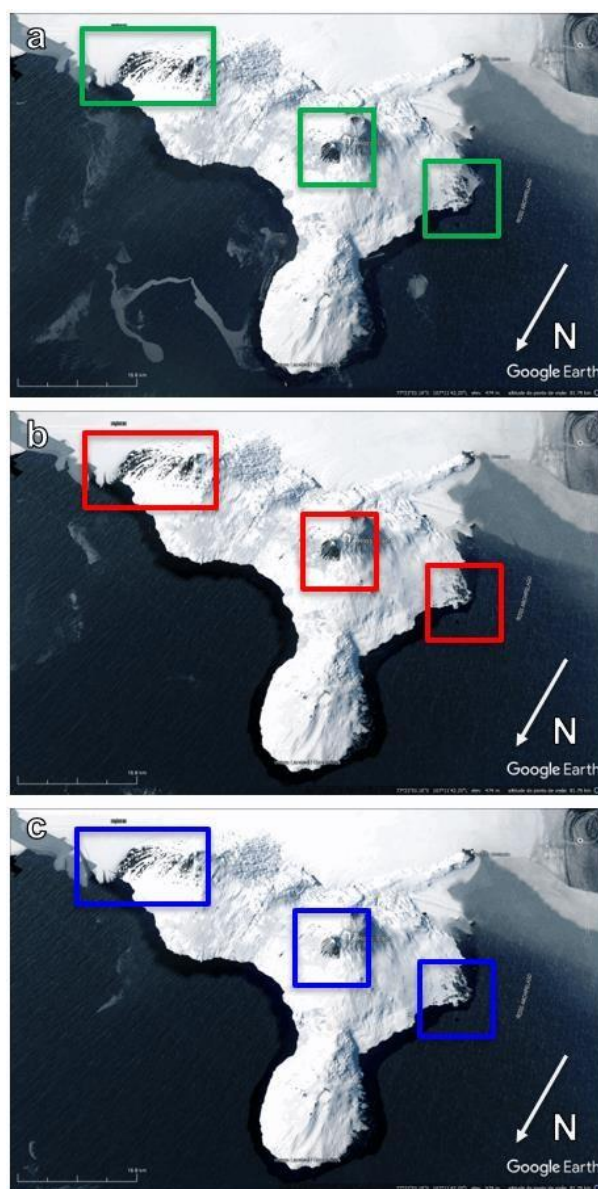


Fig. 14 – Imagens no visível (GoogleEarth) da Ilha de Ross para (a) Dez/2017, (b) Dez/2018 e (c) Dez/2019. As áreas destacadas indicam regiões de maiores alterações dos produtos Landsat 8-OLI, VIIRS e InSAR.

A partir do tratamento de imagens VIIRS, foi observada uma gradação na emissividade de calor exatamente na região das crateras do vulcão conforme os meses de janeiro, fevereiro e março (Fig. 11). Estes fenômenos observados via imageamento remoto foram sincrônicos aos alertas termais constatados no início da metodologia deste trabalho. Junto a um número próximo a zero de registros pelo sistema MODVOLC, observa-se uma subsidência generalizada da Ilha de Ross, acompanhada por um foco principal de baixa emissividade de calor na região principal do vulcão do Mt. Erebus. Em seguida, acompanhados de um brusco crescimento no número de alertas termais, estão a elevação generalizada da Ilha de Ross e da região das crateras, bem como um gradual aumento na emissividade da área das mesmas.

É possível que os eventos descritos estejam associados entre si e com um momento de aumento na atividade do Mt. Erebus, ainda que não tenha sido constatado paroxismo. Um aumento na quantidade de calor devolvida ao sensor ativo InSAR pode ser justificado pelo aumento da temperatura e consequente desaparecimento de obstáculos à radiação emitida como neve acumulada na região da cratera. Além disto, o processo de elevação do relevo pode associar-se a um possível fluxo magmático interno ou externo, e/ou à inflação da câmara magmática abaixo da região do vulcão. Além disso, estes resultados demonstram a eficiência e a correlação entre os alertas termais utilizados como premissa inicial do trabalho e os desenvolvimentos físicos do corpo em estudo, concluindo a eficiência desta metodologia para monitoramento remoto do vulcão Erebus, bem como para outros corpos vulcânicos em situação similar de persistência de lagos de lava, paroxismos, composição magmática e formato.

Com resultados de imageamento ativo (InSAR) e passivo (VIIRS), observam-se comportamentos físicos que podem estar relacionados entre si na área de estudo. Seguindo as datas das imagens e a premissa inicial (baseada nos alertas termais do sistema HIGP – MODVOLC), distinguem-se dois momentos principais no período analisado sendo eles (1) os meses de novembro de 2018 a janeiro de 2019, e (2) do final de janeiro de 2019 a março do mesmo ano. Destes períodos constatou-se:

- 1) No primeiro, que se estende até meados de janeiro de 2019, imagens InSAR acusam um deslocamento negativo de relevo, indicando uma subsidência generalizada na Ilha de Ross, bem como na área do Mt. Erebus. Sincrônicas a esta manifestação, é também possível identificar uma distinta e baixa porcentagem de emissividade na área das crateras principal e lateral do vulcão, o que pode significar que, nesta região, um material de distinta temperatura se encontrava depositado, como um acúmulo de neve, que se comporta diferentemente dos declives rochosos da ilha com relação à emissão de

radiação. Acompanhando o comportamento do vulcão Erebus desde o mês de novembro de 2018, quando se encontrava em relativo período de estabilidade, é possível de inferir que tratava-se de um ambiente de relativa calma, apesar da persistência do lago de lava em todo o período analisado, como observado em imagens Landsat 8 – OLI. Em possível consequência ao número baixo de acusações termais, a baixa emissividade encontrada na área das crateras do vulcão por meio de VIIRS pode ser explicada pela ausência de grandes explosões ou derrames de lava suficientes para desobstruir a área de um material de distinto pico de absorção de radiação das rochas circundantes, segundo a Lei de Deslocamento de Wien. A subsidência generalizada da Ilha observada no período em questão pode, também, se atribuir ao relativo momento de calma, sugerindo um derretimento constante e rebaixamento de relevo de até 70 cm de neve em locais de natural acúmulo da mesma.

- 2) No segundo momento, inaugurado neste trabalho pela imagem InSAR do dia 29 de janeiro de 2019 e se estendendo até 6 de março de 2019, registros de sensoriamento ativo demonstram um deslocamento positivo de relevo, evidenciando soerguimento generalizado na Ilha de Ross e na área das crateras do Mt. Erebus. Ao mesmo tempo, a anomalia de emissividade identificada no primeiro período estudado foi, em graduação, diminuindo até não ser mais percebida no imageamento VIIRS do dia 13 de março de 2019. Ambos estes acontecimentos podem ser atribuídos ao período mais conturbado de alertas termais registrados justamente nesta época e possíveis erupções e derrames de lava. Estes fenômenos podem significar uma desobstrução da área das crateras, aumentando sua emissividade e se juntando à assinatura termal do remanescente da ilha. Além disto, um soerguimento sincrônico observado de até 2 m, principalmente no pico do Mt. Erebus, pode ser explicado pela ejeção de lava e seu consequente acúmulo nas bordas da ilha. Pode, também, significar a inflação da câmara magmática abaixo da área do vulcão em questão.

9. CONCLUSÕES

Utilizando os dados observados durante este trabalho, é possível estabelecer relações entre os eventos eruptivos registrados e as manifestações físicas vistas através do sensoriamento remoto.

Repetições destes comportamentos observados por imageamento remoto podem deixar momentos eruptivos em evidência, o que pode se mostrar de significativa utilidade para melhor registrar momentos de instabilidade de vulcões de caráter parecido ao redor da Terra, principalmente em locais próximos a populações, visando a segurança dos habitantes das

redondezas, por exemplo. Além disso, se prosseguido, este monitoramento pode continuar a série de esforços científicos freada pelo infortúnio da pandemia de COVID-19.

Neste trabalho, o sensoriamento remoto prova-se importante ferramenta para monitoramento de corpos vulcânicos em condições extremas, prezando pela segurança dos pesquisadores envolvidos e fornecendo uma impressionante resolução e confiabilidade de dados. Esta eficiência é encontrada tanto em informações de variação de relevo quanto de temperatura que, se realizadas em períodos de maior abrangência e compreendendo um maior banco de dados, pode gerar modelos cíclicos de paroxismos confiáveis.

Mais investigações a respeito do tema, bem como a comparação com outros vulcões de comportamento semelhante, são necessárias para melhor compreender as variações físico-temporais relacionadas à atividade eruptiva de corpos vulcânicos.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angino, E., Turner, M., Zeller, E., 1962. Reconnaissance geology of lower Taylor Valley, Victoria Land, Antarctica. Geological Society of America Bulletin, 73, 1553-62.
- Armstrong, R. L., 1978. K-Ar dating: Late Cenozoic McMurdo Volcanic Group and dry valley glacial history, Victoria Land, Antarctica. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 21(6), 685–698, doi:10.1080/00288306.1978.10425199.
- Bannister, S., Snieder, K., Passier, M., 2000. Shear-wave velocities under the Transantarctic Mountains and Terror Rift from surface wave inversion. Geophysical Research Letters, 27(2), 281-284.
- Behrendt, J., 1999. Crustal and lithospheric structure of the West Antarctic Rift System from geophysical investigations - a review. Global and Planetary Change, 23, 25-44.
- Bürgmann, R., Rosen, P., Fielding, E., 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28(1), 169–209. doi:10.1146/annurev.earth.28.1.16.
- Campus, A., Laiolo, M., Massimetti, F., Coppola, D., 2022. The Transition from MODIS to VIIRS for Global Volcano Thermal Monitoring. Sensors (Basel), 22(5), 1713. doi: 10.3390/s22051713.

- Cassidy, M., Manga, M., Cashman, K., Bachmann, O., 2018. Controls on explosive-effusive volcanic eruption styles. *Nature Communications*, 9, 2839, doi:10.1038/s41467-01805293-3.
- Csatho, B., Schenk, T., Kyle, P., Wilson, T., Krabill, W. B., 2008. Airborne laser swath mapping of the summit of Erebus volcano, Antarctica: applications to geological mapping of a volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 177, 531-548, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.08.016.
- Fleck, R., Jones, M., Behling, R., 1972. K-Ar dates of the McMurdo volcanics and their relation to the glacial history of Wright Valley. *Antarctic Journal of the U.S.*, 7(6), 245-246.
- Genzano, N., Pergola, N., Marcese, F., 2020. A Google Earth Engine Tool to Investigate, Map and Monitor Volcanic Thermal Anomalies at Global Scale by Means of Mid-High Spatial Resolution Satellite Data. *Remote Sens.*, 12(19), 3232, 1-22.
- Giggenbach, F., Kyle, P.R., Lyon, G., 1973. Present Volcanic Activity on Mount Erebus, Ross Island, Antarctica. *Geology*, 1(3), 135–136. doi: 10.1130/00917613(1973)1<135:PVAOME>2.0.CO;2
- Global Volcanism Program, 2021. Report on Erebus (Antarctica). *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 46(1). Smithsonian Institution, doi: 10.5479/si.GVP.BGVN202101390020.
- Gordeev, E., Girina, O., Lupyan, E., Sorokin, A., Kramareva, L., Efremov, V., Kashnitskii, A., Uvarov, I., Burtsev, M., Romanova, I., Mel'nikov, D.V., Manevich, A.G., Korolev, S.P., Verkhoturov, A.L., 2016. The VolSatView information system for monitoring the volcanic activity in Kamchatka and on the Kuril Islands. *J. Volcanol. Seismol.*, 10, 382– 394, doi: 10.1134/S074204631606004X.
- Gupta, S., Zhao, D., Rai, S., 2009. Seismic imaging of the upper mantle under the Erebus hotspot in Antarctica. *Gondwana Research*, 16, 109-118.
- Hamilton, W., Hayes, P., 1960, Geogoly of the Taylor Glacier-Taylor Dry Valley region, south Victoria Land, Antarctica. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 400-B, p. 376378.

- Harpel, C., Kyle, P.R., McIntosh, W., 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the eruptive history of Mount Erebus, Antarctica: summit flows, tephra, and caldera collapse. *Bulletin of Volcanology*, 62, 61-76.
- Harris, A., Flynn, L., Rothery, D., Oppenheimer, C. e Sherman S. B., 1999, Mass flux measurements at active lava lakes: Implications for magma recycling, *J. Geophys. Res.*, 104, p. 7117–7136, doi:10.1029/98JB02731.
- Harris, A., Stevenson, D.S., 1997. Magma budgets and steady-state activity of Vulcano and Stromboli. *Geophysical Research Letters*, 24, 1043-1046.
- Hayes, D.E., Frakes, L.A., Barrett, P., Burns, D.A., Chen, P.H., Ford, A.B., Kaneps, A.G., Kemp, E.M., McCollum, D.W., Piper, D.J.W. and Wall, R.E., 1973. Leg 28 deep-sea drilling in the southern ocean. *Geotimes*, 18(6), 19-24.
- Kennett, J.P., Houtz, R.E., Andrews, P.B., Edwards, A.R., Gostin, V.A., Hajos, M., Hampton, M., Jenkins, D.G., Margolis, S.V., Ovenshine, A.T., Perch-Nielsen, K., 1973. Deep- sea drilling in the roaring 40's (Leg 29). *Geotimes*, 18(7), 14-17.
- Kyle, P.R., Cole, J. W., 1974. Structural control of volcanism in the McMurdo Volcanic Group, Antarctica. *Bulletin Volcanologique*, 38(1), 16–25, doi:10.1007/bf02597798.
- Kyle, P.R., Dibble, R., Giggenbach, W., Keys, W.H, 1982. Volcanic activity associated with the anorthoclase phonolite lava lake, Mount Erebus, Antarctica. *Antarc. Geosci.* 11, 270–271.
- Kyle, P.R., 1990. Erebus volcanic Province: Summary. *In*: LeMasurier, W., Thompson, J. (eds), *Volcanoes of the Antarctic Plate and Southern Oceans*. Antarctic Research Series, 48, American Geophysical Union, 81-88.
- Massonnet, D., Feigl, K., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Rev. Geophys.*, 36, 4, 441–500, doi: 10.1029/97RG03139.
- McCraw, J., 1962. Volcanic detritus in Taylor Valley, Victoria Land, Antarctica. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 5, 740-745.
- Pewe, T., 1960. Multiple glaciations in the McMurdo Sound region, Antarctica – a progress report. *Journal of Geology*, 68, 498-514.

- Panter, K., Winter, B., 2008. Geology of the Side Crater of the Erebus volcano, Antarctica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177, 578–588, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.04.019.
- Ramsey, M.S., Harris, A.J.L., Watson, I.M., 2022. Volcanology 2030: will an orbital volcano observatory finally become a reality? *Bull. Volcanol.*, 84, 6, doi: 10.1007/s00445-02101501-z.
- Rilling, S., Mukasa, S., Wilson, T., Lawver, L., 2007. ^{40}Ar - ^{39}Ar Age constraints on volcanism and tectonism in the Terror Rift of the Ross Sea, Antarctica. 10th International Symposium on Antarctic Earth Sciences, U.S. Geological Survey and The National Academies; USGS OF-2007-1047, Short Research Paper 092, doi:10.3133/of20071047.srp092.
- Schmincke, H.-U., 2004. *Volcanism*, Springer-Verlag, Heidelberg, 324 p.
- Trifonov, M., Zhizhin, N., Melnikov, V., Poyda, A., 2017. VIIRS Nightfire remote sensing volcanoes. *Procedia Computer Science*, 119, 307-314, doi: 10.1016/j.procs.2017.11.189 .
- Venzke, E., 2013. Global Volcanism Program. *Volcanoes of the World*. v. 4.10.6 (ed.). Smithsonian Institution. Disponível em <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=390020> (acessado em 18 de novembro de 2022).
- Walker, J., 2008. *Fundamentals of Physics*. 8th ed., John Wiley and Sons, 891 p. ISBN 9780471758013.
- Wright, R., Pilger, E., 2008. Satellite observations reveal little inter-annual variability in the radiant flux from the Mount Erebus lava lake. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(3), 687–694, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.03.005.