



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Uso de Imagens Sentinel-2 para a Análises de Retração de Geleiras: Comparativo Entre Ambientes nas Latitudes 44°S e 62°S.

Filipe Daros Idalino¹; Cleiva Perondi²; Kátia Kellem da Rosa³; Jefferson Cardia Simões⁴.

¹ Geógrafo e Aluno de Mestrado em Geografia no Pós-GEA, Centro Polar e Climático (CPC) - UFRGS, Geomorfologia Glacial e Sensoriamento Remoto em Geleiras de Regiões Temperadas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP: 91501-970, Agronomia, Porto Alegre. Prédio 43136, sala 208. (51) 3308-6341. filipe.idalino@ufrgs.br (autor correspondente). ² Geógrafa e Aluna de Mestrado em Geografia no Pós-GEA. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia. Porto Alegre. CEP: 91501-970. cleivaperondi@gmail.com. ³ Professora Dr. Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP: 91501-970. Agronomia, Porto Alegre. Prédio 43136, sala 204B. (51) 3308-7522. katiakellem@gmail.com. ⁴ PhD pelo Scott Polar Research Institute, University of Cambridge, Inglaterra. Pós-doutor pelo Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE) du CNRS/França e pelo Climate Change Institute (CCI), University of Maine, EUA. Professor Titular, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Polar e Climático, UFRGS. Instituto de Geociências, Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia. Porto Alegre. CEP: 91501-970. (51) 3308-7327. jefferson.simoes@ufrgs.br.

Artigo recebido em 08/12/2017 e aceito em 27/09/2018

RESUMO

Este artigo analisou as alterações de área da Geleira de número 6 do Monte Melimoyu, Chile, 44° 5'S – 72° 51'W e as geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski e Tower, na Ilha Rei George, Península Antártica, 62° 12' S - 58° 28'W. Para o mapeamento da variação de área das geleiras entre 2000 e 2017 utilizou-se duas imagens do programa Sentinel-2, aplicando o método de delineamento manual com classificação visual dos alvos. Os resultados foram comparados com dados do GLIMS e do Centro Polar e Climático para a análise da evolução de área no Monte Melimoyu e na Ilha Rei George, respectivamente. As geleiras de ambas as regiões apresentaram contínua retração frontal nos períodos analisados e são comparáveis em dinâmica de retração frontal. A perda de área na geleira do Monte Melimoyu foi de 4,94 km² da área total em 1970 (de 13,23 km²). A perda de área nas geleiras da Ilha Rei George foi de 3,83 km² da área total em 1956 (de 13,94 km²). Os resultados indicaram uma tendência geral das geleiras à retração. As imagens Sentinel-2, com 10 m de resolução espacial, possuem potencial para continuidade do monitoramento das mudanças ambientais da Criosfera. Palavras-chave: Glaciologia; Geomorfologia; Retração; Sentinel-2; Patagônia Norte; Península Antártica.

Use of Sentinel-2 images for the retraction analysis of glaciers: comparative between environments in latitudes 44°S and 62°S.

ABSTRACT

This work analyzed changes area of glacier Number 6 of the Melimoyu Mont, Chile, 44° 5'S – 72° 51'W and the glaciers Ecology, Sphinx, Baranowski and Tower, in King George Island, Antarctic Peninsula, 62° 12' – 58° 28'W. The area variations mapping of the glaciers for 2000 – 2017 period was performed using two images of the Sentinel-2 program and the glacier outline manual delineation method applying. The results were compared with GLIMS and Centro Polar e Climático data for glaciers area evolution analyses. The glaciers of both regions showed continuous frontal retreat in the periods analyzed and are compared in frontal retreat dynamic. The loss of area in glacier of Melimoyu Mont was 4.94 km² of the total area in 1970 (13.23 km²). The loss of area in glaciers of King George Island was 3.83 km² of the total area in 1956, of 13.94 km². The results indicate a general retreat process tendency of the glaciers for period. The images of Sentinel-2 have potential for continuity environment changes monitoring in the Cryosphere.

Keywords: Glaciology; Geomorphology; Retreat; Sentinel – 2; North Patagonia; Antarctic Peninsula.

Introdução

As geleiras respondem às mudanças climáticas inerente às questões de balanço de energia. A diferenciação entre esses fatores é fundamental para a correta interpretação das alterações glaciais do passado e para a atribuição correta de mudanças atuais (Roe, 2011). Pesquisas glaciológicas indicam que geleiras na maior parte

das áreas do mundo estão retraindo (Barry 2006; Gardner et al., 2013; Veetil et al., 2017). Porém, muito pouco se sabe sobre como essas mudanças em massas de gelo estão ligados às mudanças no clima (Schaefer et al., 2013). Masiokas et al. (2008) atribuíram a recessão a uma tendência para

condições mais secas e mais quentes detectadas durante o período de 1912–2002.

Estas áreas de estudos conhecidas como pertencentes à região 3 da Cordilheira dos Andes e região insular sub-antártica são comparáveis em termos de perda de área (Mernild et al., 2015) e ambas regiões também possuem influência marítima no seu regime de precipitação, mas há diferenças de orientação, área e elevação média que são relevantes, entre outros aspectos.

Na região Norte da Patagônia Chilena tem sido evidenciado mudanças nas geleiras, como balanço negativo de massa, com a retração glacial e diminuição de volume (Cassassa et al., 2007; Rabatel et al., 2013; Pellicciotti et al., 2014; Mernild et al., 2015; IPCC 2016). As geleiras na Patagônia estão retraindo acentuadamente e em constante desgaste (Rignot et al., 2003; Rivera et al., 2007; Masiokas et al., 2008; Willis et al., 2012), mas muito pouco se sabe sobre os motivos e como essas alterações são ligadas a mudanças no clima. Masiokas et al. (2008) atribuíram a recessão a uma tendência para condições mais secas e mais quentes detectadas durante o período de 1912–2002.

Tanto a topografia quanto o clima da região da Península Antártica são diferentes daqueles observados na área central do Continente Antártico, apresentando uma topografia montanhosa e temperaturas médias do ar no verão superiores a 0°C, ao nível do mar (Vaughan et al., 2003). A região da Península Antártica, é uma das mais sensíveis às variações climáticas na escala global e tem apresentado significativa tendência de aquecimento da temperatura superficial (Turner et al., 2009).

O uso de imagens de satélites para o monitoramento da Criosfera é relevante, mas a resolução espacial limita e traz incertezas na quantificação de mudanças ambientais, o que dificulta o entendimento do comportamento destes ambientes em resposta às mudanças climáticas regionais. As imagens do Sentinel-2 são obtidas gratuitamente pelo U.S Geological Survey (USGS) e são disponibilizadas com um processamento de nível 1C com resolução espacial de 10 m, oferecem

uma melhor condição para os mapeamentos do que as imagens do programa Landsat 8, com a banda pancromática, com 15 m de resolução espacial, e possibilita a atualização dos dados já disponíveis de diversas regiões da Criosfera. No entanto, estas imagens têm sido pouco aplicadas no estudo destes ambientes. A aplicação das técnicas de SIG como a manipulação e cruzamento integrado de dados gerados por estudos da Criosfera, análise de dados espaciais e manipulação de modelos digitais de elevação gratuitos podem possibilitar o contínuo monitoramento destes ambientes e disponibilização de informações em redes e WebSites.

O objetivo deste trabalho é comparar a variação de área nas últimas cinco décadas de geleiras do Monte Melimoyu localizadas na região norte da Patagônia Chilena, a 44° 5'S – 72° 51'W, e geleiras do campo de gelo Warszawa, Ilha Rei George, Península Antártica, a 62° 12'S – 58° 28'W para a avaliação do potencial das imagens Sentinel-2 para o estudo de mudanças ambientais nestes ambientes.

Área de Estudo

As áreas determinadas como alvos deste estudo, geleiras do Monte Melimoyu localizadas na região norte da Patagônia Chilena (Figura 1), a 44° 5'S – 72° 51'W, e geleiras do campo de gelo Warszawa, Ilha Rei George (Figura 2), Península Antártica, a 62° 12'S – 58° 28'W.

Da Região Norte da Patagônia

A área em torno do Monte Melimoyu (Figura 1), no Norte da Patagônia Chilena, é frequentemente influenciada por ciclones, e o elevado volume de precipitação deve-se à elevação de ar úmido proveniente do sudeste do Pacífico (Garreaud et al., 2013). Em níveis baixos no cinturão ocidental (aproximadamente latitudes 40° a 70°), observa-se um padrão complexo de sistemas móveis de alta e baixa pressão, enquanto que, entre 6.000 m e 20.000 m, existe um fluxo de ar constante do Oeste (Barry e Chorley, 2013).

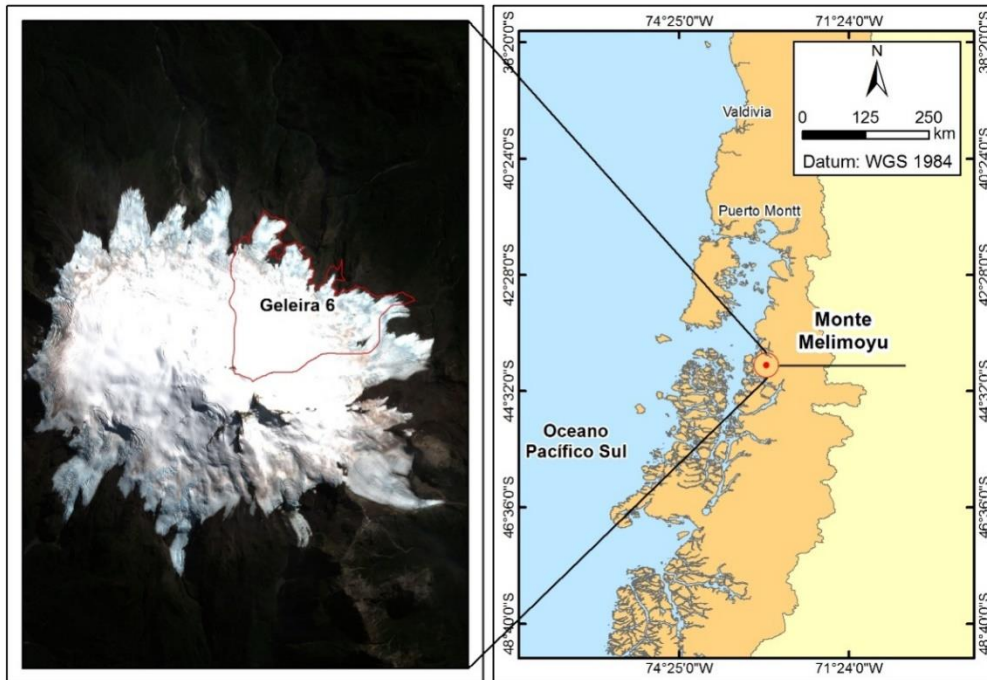


Figura 1. Localização da geleira do Monte Melimoyu. Sentinel – 2, composição RGB 432 – cor verdadeira.

A Cordilheira Patagônica, cadeia de montanhas que resulta da subducção da placa de Nazca sob o continente sul-americano, é pontuada por vários vulcões, além de muitas geleiras (Vandekerkhove, 2014). Segundo Köppen (1936) o clima da região de Aysén é classificado como Cfc, de regiões oceânicas e marítimas da região e das regiões costeiras ocidentais do continente, onde o clima é temperado húmido sem estação seca com verão curto e fresco.

A Patagônia Norte apresenta um ciclo anual de precipitação com máximos no inverno e mínimos no verão, apresentando maior homogeneidade ao longo do ano na parte mais austral (Reboita et al., 2010). A ocorrência de precipitação nesta região é condicionada pela posição do Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul, conhecido como ASPS (Aceituno, 1980). Este sistema é um centro de alta pressão semipermanente que deve sua existência ao movimento subsidente da célula de Hadley. No inverno, como o ASPS localiza-se mais ao norte (25° S – 90° W) do que no verão (33° S – 90° W), os ventos de oeste ao sul do ASPS atingem a Cordilheira dos Andes nas latitudes, sendo forçados a ascender. Neste processo, o escoamento é resfriado adiabaticamente e favorece a

precipitação (Figura 4) na região (Reboita et al. 2010).

Na área de estudo não é evidenciada atividade vulcânica recente capaz de influenciar significativamente no comportamento do gelo. Ainda que muito pouco ainda se conheça sobre as respostas às mudanças climáticas nestas áreas (Masiokas et al., 2008; Schaefer et al., 2013) as pesquisas indicam que as geleiras estão interagindo com estes condicionantes. Rivera et al., 2006 avaliaram que as geleiras nos vulcões se encolheram principalmente em resposta a fatores de condução climáticos e, em particular, uma tendência decrescente de precipitação entre 1930 e 2000.

Ilha Rei George

Da região subpolar, na ilha Rei George foram escolhidas para a análise as geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski e Tower (Figura 2), por estarem numa Área Especialmente Protegida da Antártica. São geleiras com atual frente em terra e possuem uma dinâmica de deglaciação com diferenciadas respostas ao longo das últimas décadas.

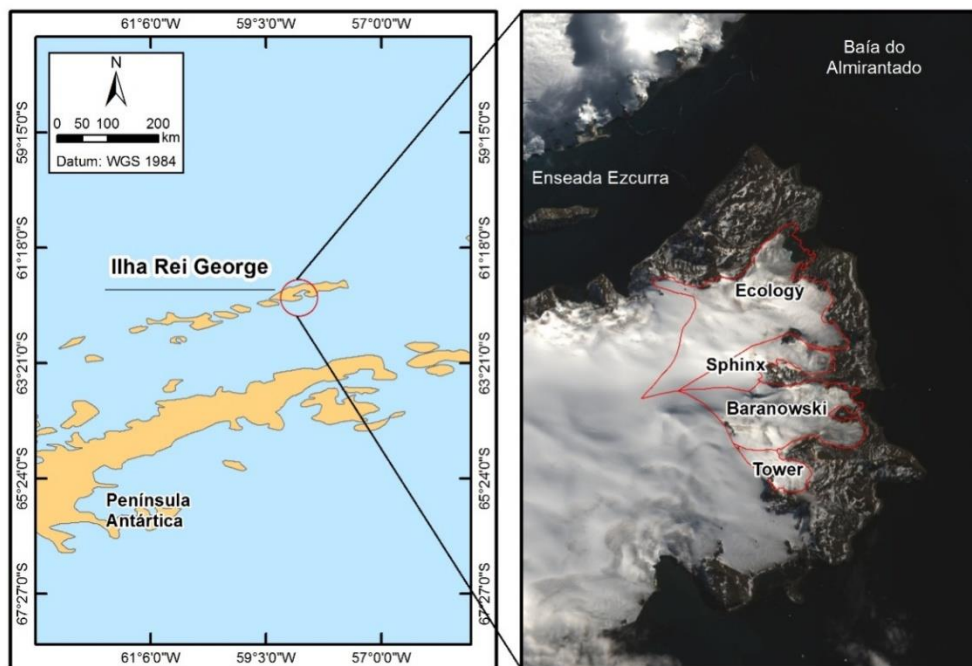


Figura 2. Localização das geleiras na ilha Rei George. Sentinel-2, composição RGB 432 – cor verdadeira.

Devido à sua localização, as Shetlands do Sul possuem clima tipicamente subpolar marítimo (Setzer e Hungria, 1994). A temperatura média do verão atinge 2,0°C, resultando em uma produção de água de degelo durante essa estação (Braun et al., 2001). As massas de gelo das ilhas Shetland do Sul são particularmente sensíveis às variações climáticas, em função de sua posição geográfica (Lat. 61°04'S - 63°20'S e Long. 54°00'W - 62°25'W), da pequena espessura de gelo e por estarem muito próximas do ponto de fusão sob pressão (Knap et al., 1996).

Ao longo dos últimos 30 anos, os dias do ano com precipitação líquida no verão aumentaram, juntamente com o número de dias em que a temperatura média ultrapassou os 0°C, esse processo acelera a fusão de neve e gelo e aumenta o balanço de massa negativo das geleiras da ilha (Pilchmaier et al., 2004; Ferrando et al., 2009).

Material e Métodos

Para este trabalho foram utilizados dados vetoriais de variação frontal glacial

disponibilizados pelo GLIMS das geleiras do Monte Melimoyu mapeados com imagens LANDSAT 5 e 7 para os anos de 1970, 1986 e 2000 (Tabela 1).

Foi escolhida a geleira 6 para análise comparativa. Na latitude 62° S (Geleiras na Baía do Almirantado), foram utilizados dados vetoriais em SIG de variação de área por Arigony (2001) para os anos de 1979, 1988, 1995, e 2000 obtidas utilizando imagens SPOT (Tabela 1).

Para a atualização da variação de área das geleiras no período de 2000 a 2017 utilizou-se duas cenas do Sentinel-2, nível 1C, foram adquiridas gratuitamente no site oficial da USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov>), já corrigidos radiometricamente e geometricamente. Neste trabalho, será utilizado o sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) e o sistema de referência World Geodetic System 84 (WGS84) – zona 18S, para o Monte Melimoyu e zona 21S, para a Ilha Rei George.

Tabela 1. Dados utilizados no trabalho.

| Dado | Resolução | Data | Fonte |
|---|------------|---|---|
| Sentinel – 2, L1C T18GXS_A00959 | 10 m/pixel | Imagem: 17/03/2017 Aquisição: 03/07/2017 | USGS https://earthexplorer.usgs.gov/ |
| Sentinel – 2, L1C T21EVM_A008958 | 10 m/pixel | Imagem: 10/03/2017 Aquisição: 03/07/2017 | USGS https://earthexplorer.usgs.gov/ |
| Base vetorial de dados com shapes das Bacias de Drenagem do Monte Melimoyu | 30 m | 1970 1986 2000 | GLIMS |
| Base vetorial de dados com shapes das Geleiras na Baía do Almirantado – Ilha Rei George | 20 m | 1979 1988 1995 2000 | Arigony (2001) |

Os dados do satélite Sentinel-2 são gerados pela European Space Agency (ESA). O sistema Sentinel-2 baseia-se nas operações simultâneas de dois satélites idênticos que voam em um único plano de órbita, mas em fase de 180°. Cada um destes é equipado com um sensor multi-espectral (MSI) abrangendo o alcance espectral infravermelho visível para a onda curta, fornecendo imagens de alta resolução espacial em escala global e com alta frequência de revisão. O MSI tem como objetivo medir a radiação refletida pela atmosfera da terra através de 13 bandas espectrais no Infra-Vermelho, Infra-Vermelho Próximo e também no Visível (Tabela 2).

A resolução espacial depende da banda espectral particular, onde existem: 4 bandas a 10 metros – azul (490 nm) verde (560 nm), vermelho (665 nm) e infravermelho próximo (842 nm); 6 bandas a 20 metros – 4 bandas estreitas para caracterização da vegetação (705 nm, 740 nm, 783 nm e 865 nm) e 2 bandas SWIR maiores (1.610 nm e 2.190 nm) para aplicações como detecção de neve / gelo / nuvem ou vegetação avaliação do estresse hídrico; 3 bandas a 60 metros – para rastreamento de nuvens e correções atmosféricas (443 nm para aerossóis, 945 nm para vapor de água e 1375 nm para detecção de cirrus).

A parceria entre a ESA e o USGS permite a distribuição de dados de reflectância de nível 1 de nível 1 (TOA). O processamento de nível 1C inclui

correções radiométricas e geométricas juntamente com a ortorregração para gerar produtos geolocados de alta precisão (LTA, CR – USGS).

Os dados foram processados e corrigidos no software ArcGis®, da ESRI®. Utilizou-se das ferramentas da extensão *Arc Toolbox* para a transformação e unificação dos dados existentes em um único sistema de projeção padronizado, de Datum WGS 1984 – UTM 21S para os dados de retração das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski e Tower, e UTM 18S para a geleira de número 6 do Monte Melimoyu. Também foi usada a extensão *Arc Catalog* para criação de novos arquivos, em formato *shapesfile*, para o mapeamento e interpretação variação de área das geleiras no período de 2000 a 2017 e comparação entre os períodos.

Para os mapeamentos das linhas de frente das geleiras, em ambas as regiões, foi escolhida a composição de bandas RGB42 em falsa cor, destacando as bandas do infravermelho próximo, distinguindo com maior precisão as áreas de gelo das demais classes de alvos existentes nas imagens. Para a apresentação e geração dos mapas de retração das áreas de geleiras foi escolhida a composição de bandas RGB432 em cor verdadeira, para demonstrar os alvos o mais próximo possível da realidade.

Tabela 2. Resoluções radiométrica e espacial das bandas do Sentinel-2, MSI (LTA, CR – USGS).

| SENTINEL-2 Resoluções Radiométricas e Espaciais | | | |
|---|----------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Número da banda | Comprimento de onda central (nm) | Largura de banda (nm) | Resolução espacial (m) |
| 1 | 443 | 20 | 60 |
| 2 | 490 | 65 | 10 |
| 3 | 560 | 35 | 10 |
| 4 | 665 | 30 | 10 |
| 5 | 705 | 15 | 20 |
| 6 | 740 | 15 | 20 |
| 7 | 783 | 20 | 20 |
| 8 | 842 | 115 | 10 |
| 8a | 865 | 20 | 20 |
| 9 | 945 | 20 | 60 |
| 10 | 1375 | 30 | 60 |
| 11 | 1610 | 90 | 20 |
| 12 | 2190 | 180 | 20 |
| TCI | RGB | Composto | 10 |

Para os mapeamentos das linhas de frente das geleiras, em ambas as regiões, foi escolhida a composição de bandas RGB842 em falsa cor, destacando as bandas do infravermelho próximo, distinguindo com maior precisão as áreas de gelo das demais classes de alvos existentes nas imagens. Para a apresentação e geração dos mapas de retração das áreas de geleiras foi escolhida a composição de bandas RGB432 em cor verdadeira, para demonstrar os alvos o mais próximo possível da realidade.

Resultados

As geleiras de estudo apresentaram uma contínua retração nos períodos analisados entre 1956 a 2017 (geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski e Tower) e 1970 a 2017 (geleira 6 do Monte Melimoyu). As geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski e Tower apresentaram contínua retração frontal com a perda de área total em 61 anos foi de 27,43% (Figura 2) correspondente a uma perda de 3,83 km² (Figura 3) de área. As geleiras apresentavam em 1956 uma área total de 13,94 km².

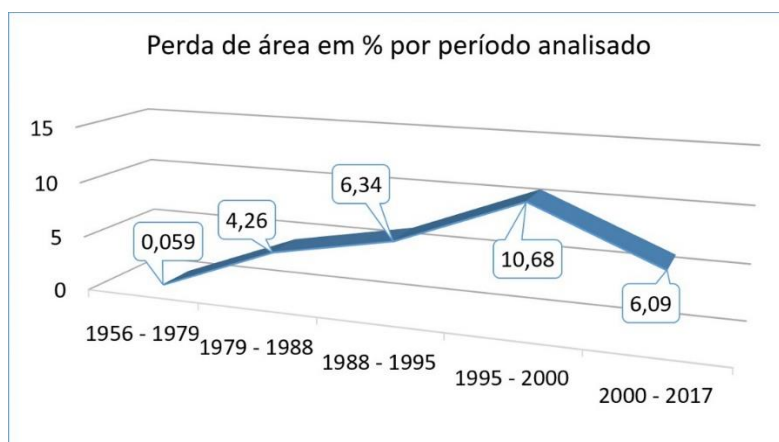


Figura 3. Gráfico de perda de área em % nas geleiras da Ilha Rei George por período analisado em comparação com o total de área inicial.

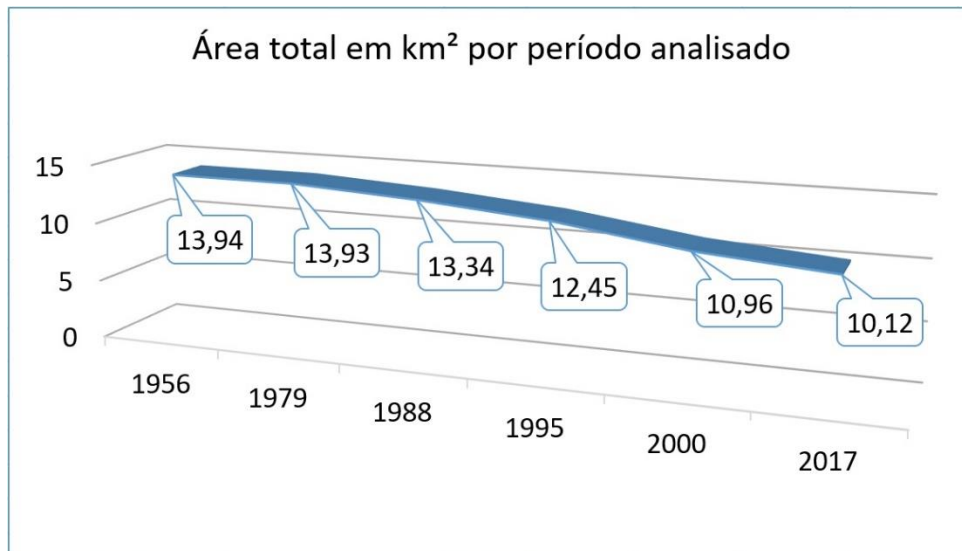


Figura 4. Gráfico de área total em km² nas geleiras da Ilha Rei George por período analisado.

No período de 2000 a 2017 a perda de área registrada foi de 0,85 km² (Figura 4). O processo de retração das geleiras, evidenciado no setor analisado na ilha Rei George, vai ao encontro com os resultados de outros estudos que têm registrado retração em outras geleiras na IRG desde 1950 (Kejna et al., 2013; Rosa et al., 2014).

Em um ritmo contínuo de retração, levando em conta apenas os dados de perda de área no período analisado, as geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski e Tower perderam cerca de 0,063 km² de área por ano, ou ainda 0,45% de sua área total por ano. Nestes padrões de retração, estas geleiras podem desaparecer em 222,38 anos.

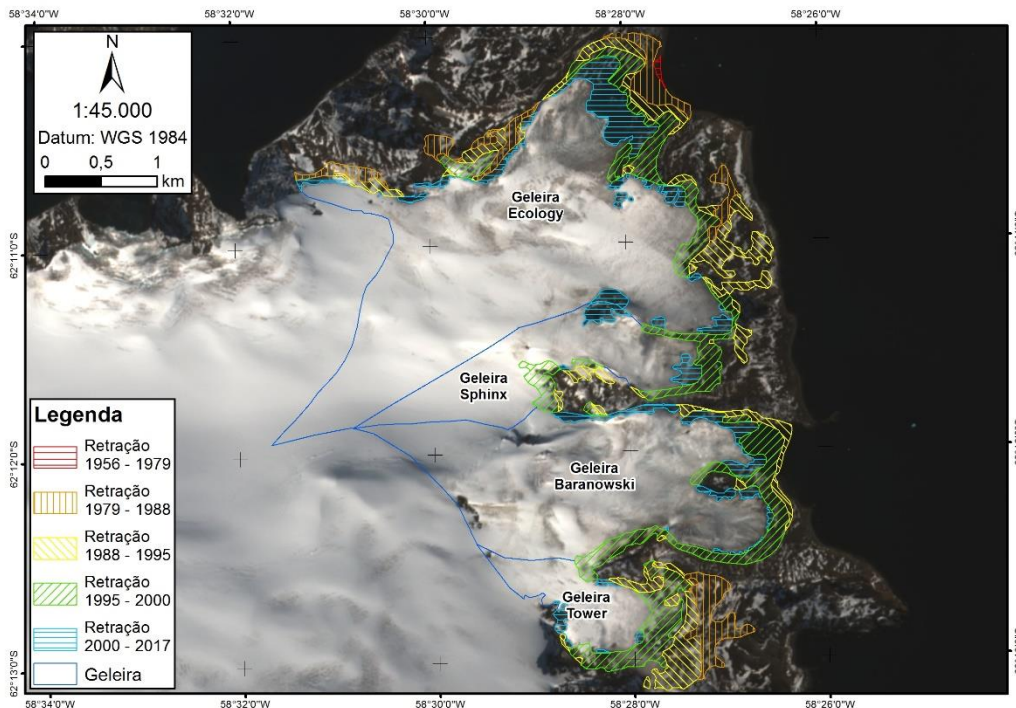


Figura 5. Mapa da variação de área das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski e Tower, de 1979, 1988, 1995, 2000 e 2017. RGB 432, cor verdadeira.

Na geleira 6 do Monte Melimoyu a retração nos últimos 47 anos foi de 37,32% (Figura 5)

totalizando uma perda de 4,94 km² (Figura 6) de área do total apresentado em 1970 de 13,23 km².

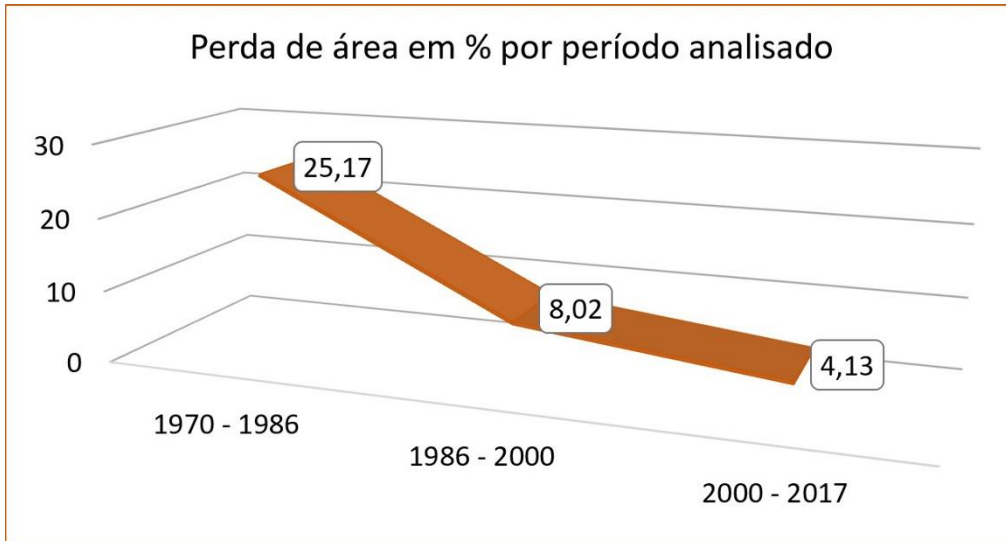


Figura 6. Gráfico de perda de área em % na geleira do Monte Melimoyu por período analisado em comparação com o total de área inicial.

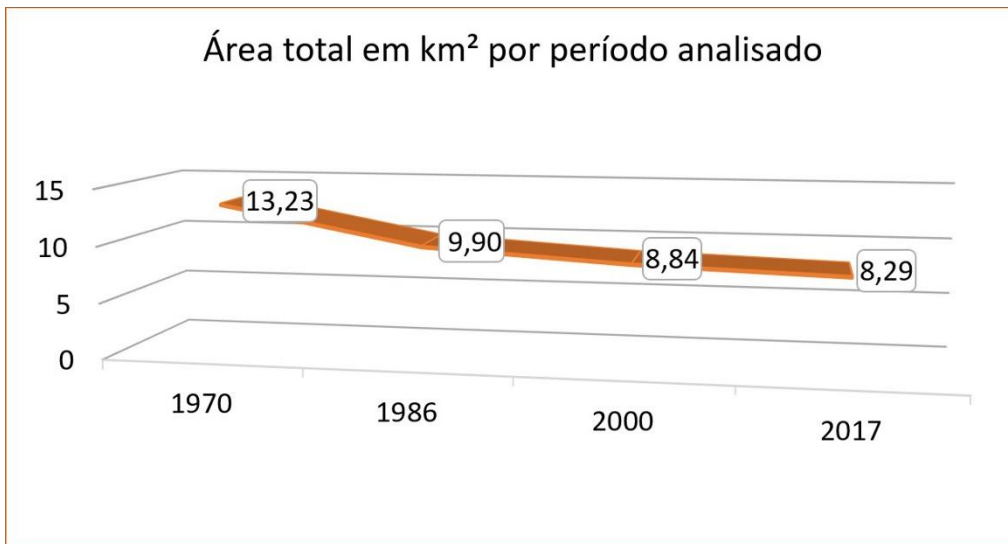


Figura 7. Gráfico de área total em km² na geleira do Monte Melimoyu por período analisado.

No período de 2000 a 2017 a perda de área registrada foi de 0,55 km² (Figura 7), assim como evidenciadas mudanças nas geleiras neste setor da Patagônia nos estudos de Rignot et al. (2003),

Rivera et al. (2007), Cassassa et al. (2007), Rabatel et al. (2013), e Pellicciotti et al. (2014).

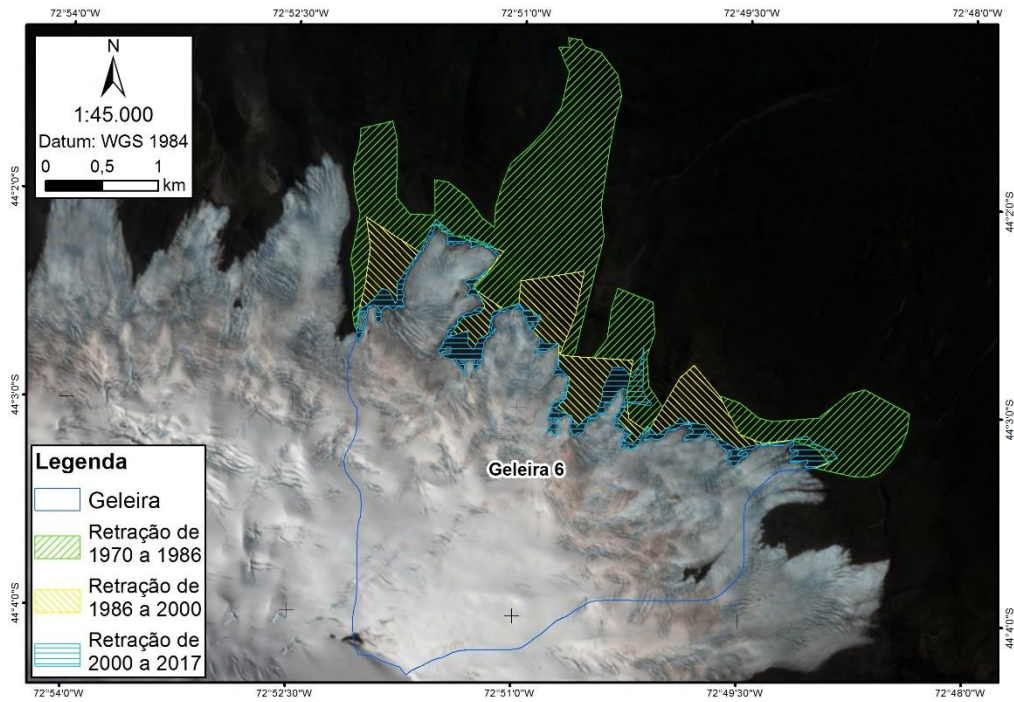


Figura 8. Mapa da variação de área da geleira 6 do Monte Melimoyu, de 1970, 1986, 2000 e 2017. RBG 432, cor verdadeira.

Em um ritmo contínuo de retração, levando em conta apenas os dados de perda de área no período analisado, a geleira de número 6 do monte Melimoyu perdeu cerca de 0,105 km² de área por ano, ou ainda 0,79 % de sua área total por ano. Nestes padrões de retração, estas geleiras podem desaparecer em 125,94 anos.

Discussão

No período 2000 a 2017 se obteve uma melhor precisão dos mapeamentos devido a também melhor resolução espacial das imagens Sentinel-2, de 10 m o pixel, que possibilitou realizar os mapeamentos na escala de 1:10.000, e alcançar um grande nível de detalhamento. Os dados atualizados de linha de frente das geleiras cartográficas e em SIG serão disponibilizados no site do Centro Polar e Climático para futuros estudos.

Mesmo que o período de análise ser diferente para as duas áreas pode ser verificado a tendência de retração glacial e a formação de ambientes proglaciais com transformações multianuais, estas podem ser melhor monitoradas com dados de Sensores Remotos de melhor resolução espacial.

Os dados do Sentinel-2 possuem potencial para a continuidade do monitoramento das mudanças ambientais na região e possibilitam o entendimento da dinâmica e análise glaciológica e

comparação entre diversos ambientes. A utilização das imagens Sentinel-2 para o mapeamento de retração frontal das geleiras se mostrou satisfatória em relação à sua resolução espacial de 10 m e, também, sua disponibilidade para as regiões utilizadas como teste nesta análise e de forma gratuita.

Os resultados indicaram uma tendência geral das geleiras à retração, processo que se mostrou constante nos períodos analisados com diferentes valores para cada período, o que corrobora com diversos estudos anteriores como de Arigony-Neto (2001) e Idalino (2017). O monitoramento da diminuição de área das geleiras é importante para estudos sobre as mudanças climáticas e a geração de cenários diante a projeção de tendência de aumento da temperatura média superficial do ar para as próximas décadas.

Porém, as estimativas em porcentagem de perda, não levando em conta possíveis diferenças ambientais entre as áreas ou futuras intervenções climáticas, apontam que a geleira do Monte Melimoyu desapareceria mais rápido que as geleiras da Baía do Almirantado, em cerca de 56,63% do tempo.

Agradecimentos

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela Bolsa Auxílio, ao Centro Polar e Climático – CPC pelo

suporte técnico e de materiais para o desenvolvimento do trabalho e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul FAPERGS pelos amparos financeiros aos projetos desenvolvidos.

Referências

- Aceituno, P. 1980. Relacion entre la posicion del anticiclone subtropical y la precipitación en Chile. Relatório do Projeto nº E.551.791 do Departamento de Geofísica da Universidade do Chile. 14 p.
- Arigony-Neto, J. 2001. Determinação e interpretação de características glaciológicas e geográficas com sistema de informações geográficas na Área Antártica Especialmente Gerenciada baía do Almirantado, ilha Rei George, Antártica. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Barry, R. 2006. The status of research on glaciers and global glacier recession: A review. *Progress in physical geography* 30(3), 285-306. doi.org/10.1191/0309133306pp478ra.
- Barry, R. G., e R. J. Chorley. 2013. *Atmosfera, tempo e clima*, 9 ed. Bookman. Porto Alegre.
- Braun, M. et al. 2001. The influence of larges-scale atmospheric circulation on surface energy balance and ablation on King George Island, Antarctica. *International Journal of Climatology* 21, 21-36. doi: 10.1002/joc.563.
- Casassa, G., Rivera, A., Ribsten, P., Schneider, C. 2007. Current status of andean glaciers. *Science Direct. Global and Planetary Change* 59, 1-9, doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.11.013
- Ferrando, F. A.; V., R.; Rosa, K. K. 2009. Sobre el calentamiento global en la Isla Rey Jorge: procesos y evidencias en el glaciar Wanda y su entorno. *Revista Informaciones Geográficas* 41, 25-40.
- Gardner, A., Moholdt, G., Cogley, J., Wouters, B., Arendt, A., Wahr, J., Berthier, E., Hock, R., Pfeffer, W., Kaser, G. 2013. A reconciled estimate of glacier contributions to sea-level rise: 2003 to 2009. *Science* 340, 852-857, doi: 10.1126/science.1234532.
- Garreaud, R., P. Lopez., M. Minvielle., M. Rojas. 2013. Large-scale control on the Patagonian climate. *Journal of Climate* 26, 215-230, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00001.1.
- Idalino, F. D. 2016. Aplicação do ASTER-GDEM v2 e SIG na análise das alterações nas bacias de drenagens no monte Melimoyu (44° 5'S - 72° 51'W) – Chile. Trabalho de Conclusão de Curso. Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Idalino, F. D., Rosa, K. B., Acunã, F. F., Veettil, B. K., Simões, J. C., e Souza Junior. E. 2017. Recent glacier changes in Mount Melimoyu (44° 50' S - 72° 51' W) in Chile using Sentinel-2 data. *International Journal of Remote Sensing* (submetido).
- IPCC. 2013. The physical Science basis – Summary for policymakers. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGIAR5_SPM_brochure_en.pdf. Acesso em 08/07/2017.
- Kejna, M; Arazny, A. E Sobota, I. 2013. Climatic change on King George Island in the years 1948 – 2011. *Polish Polar Research* 34(2), 213-235, doi: 10.2478/popore-2013-0004.
- Köppen, W., and R. Geiger. 1936. Classificação climática de Köppen. Disponível em: https://portais.ufg.br/up/68/o/Classifica___o_Clim_tica_Koppen.pdf.
- Masiokas, M., R. Villalba., B. Luckman., M. Lascano., S. Delgado., P. Stepanek. 2008. 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia. *Global and Planetary Change* 60, 85-100, doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.031.
- Mernild, SH., Beckerman, AP., Y, de JC., Hanna, E., Malmros, JK., Wilson, R., Zemp, M. 2015. Mass loss and imbalance of glaciers along the Andes Cordillera to the Sub-Antarctic islands. *Global and Planetary Change* 133, 109-119, doi: doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.08.009.
- Pellicciotti, F., Ragetti, S., Carenzo, M., Mcphee, J. 2014. Changes of glaciers in the andes of Chile and priorities for future work. *Science of the Total Environment* 493, 1197-1210. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.10.055.
- Rabatel, A., B. Francou., A. Soruco., J. Gomez., B. C'Aceres., J. Ceballos., R. Basantes., et al. 2013. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere* 7, 81-102, doi: 10.5194/tc-7-81-2013.
- Reboita, M. S., M. A. Gan., R. P. Da Rocha., Ambrizzi, T. 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia* 25, 185-204, doi: 10.1590/S0102-77862010000200004.
- Rignot, E., Rivera, A., Casassa G. 2003. Contribution of the patagonia icefields of south america to sea level rise. *Science* 302, 434-436, doi: 10.1126/science.1087393.
- Rivera, A., Benham, A., Casassa, G., Bamber, J., Dowdeswell, J. 2007. Ice Elevation and Areal changes of Glaciers from the Northern Patagonia Icefield, Chile. *Global Planet Change*

- 59, 126-37, doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.11.037.
- Roe, G. 2011. What do glacier tell use bout climate variability and climate change? *Journal of Glaciology* 57, 203, doi: 10.3189/002214311796905640.
- Rosa, K. K., Freiberger, V. L., Vieira, R., Rosa, C. A., Simões, J. C. 2014. Glacial recent changes and climate variability in King George Island, Antarctica. *Quaternary and Environmental Geosciences* 5(2), 176-83, doi: 10.5380/abequa.v5i2.36642.
- Vaughan, D. G., et al. 2003. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. *Climate Change* 60(3), 243-274, doi: 10.1023/A:1026021217991.
- Schaefer, M., Machguth, H., Falvey, M., Casassa, G. 2013. Modeling past and future surface mass balance of the Northern Patagonia Icefield. *Journal Of Geophysical Research: Earth Surface* 118, 571 – 588, doi: 10.1002/jgrf.20038.
- Sentinel - ESA^a: 2017. Informações sobre os níveis de processamento Sentinel-2. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-1>. Acesso em: 03/07/2017.
- Setzer, A. W., C. S. Hungria. 1995. *Meteorologia na Península Antártica – Alguns aspectos práticos*. São José dos Campos. Inst.Nac.de Pesq.Espac., INPE, S.J.Campos, SP, (INPE-5612-RPQ/668), 101 p.
- Turner, J. et al. 2009. *Antarctic Climate Change and the Environment*. Cambridge, UK, Scientific Committee for Antarctic Research, 544 p. doi.org/10.1017/S0954102009990642.
- Vandekerckhove, E. 2014. The volcanic ash soils of Northern Chilean Patagonia (44°–48°S): Distribution, weathering and influence on river chemistry. Universiteit Gent, Faculteit Wetenschappen: Gent.
- Veettil, B; Wang, S., De Souza, S., Bremer, U., Simões, J. C. 2017. Glacier monitoring and glacier-climate interactions in the tropical Andes: a review. *Journal of South American Earth Sciences* 76, 1-40. doi.org/10.1016/j.jsames.2017.04.009.
- Willis, M. J., K. Melkonian., M. Pritchard., J. Ramage. 2012. Ice loss rates at the Northern Patagonian Icefield derived using a decade of satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 117, 184-98. doi:10.1016/j.rse.2011.09.017.