

VARIAÇÃO DA COBERTURA DE GELO E NEVE SUPERFICIAL DOS LAGOS LOCALIZADOS NA ILHA REI GEORGE, ANTÁRTICA MARÍTIMA, USANDO IMAGENS SENTINEL - A1: UM ESTUDO DE CASO NA PENÍNSULA KELLER

Jorge Antônio Viel

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves, RS, Brasil
ja-viel89@hotmail.com

Kátia Kellem da Rosa

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Geografia, Porto Alegre, RS, Brasil
katiakellem@gmail.com

Carina Petsch

Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Geografia, Porto Alegre, RS, Brasil
carinapetsch@gmail.com

Danielle Dall Amaria Soffiatti

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Geografia, Porto Alegre, RS, Brasil
danielled.soffiatti@gmail.com

Luiz Felipe Velho

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil
lfvelho@gmail.com

Sandra Bromberg

Universidade de São Paulo, Departamento de Oceanografia Biológica, São Paulo, SP, Brasil
bromberg@usp.br

Jefferson Cardia Simões

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Geografia, Porto Alegre, RS, Brasil
jefferson.simoess@ufrgs.br

Rosemary Vieira

Universidade Federal Fluminense, Departamento de Geografia, Niterói, RJ, Brasil
rosemaryvieira@id.uff.br

RESUMO

O objetivo deste estudo foi investigar os valores de retroespalhamento em imagens do Sentinel-1A para identificar as classes de cobertura superficial dos lagos localizados na Península Keller: gelo e neve versus áreas livres de gelo. Foram analisadas cinco imagens do Sentinel-1A no modo IW. O processamento dessas imagens envolveu calibração, remoção de ruído térmico, co-registro, correção de terreno e filtragem. Foram realizadas atividades de campo e aplicaram-se limiares do coeficiente de retroespalhamento para identificar a área dos lagos e classificar cada classe de cobertura. Os resultados da análise, a partir dos valores do pixel central dos lagos, mostram que os valores da classe livre de gelo variaram de -19,34 a -16,87 dB. Essa variação está relacionada ao aumento da temperatura média do ar, que promove maior derretimento e, conseqüentemente, aumento da umidade do solo. O vento também influencia os valores de retroespalhamento. A aplicação de um limiar fixo de -15 dB não foi satisfatória. Recomenda-se monitorar os valores de retroespalhamento com base na coleta de dados no ponto central dos lagos e realizar testes com limiares adaptativos para a classificação automática de alvos.

Palavras-chave: Comportamento sazonal. Fenologia dos lagos. Mudanças climáticas. Coeficiente de retroespalhamento. Processamento digital de imagens.

GLACIAL LAKE ICE COVERAGE VARIABILITY IN ANTARCTICA BASED ON SENTINEL-1 IMAGES: A CASE OF THE KELLER PENINSULA

ABSTRACT

This study aimed to investigate backscatter values in Sentinel-1A images to identify the surface cover classes of lakes on the Keller Peninsula (ice and snow vs. ice-free). We analyzed five Sentinel-1A images (IW mode). Image processing involved calibration, thermal noise removal, co-registration, terrain correction, and filtering. Field data were collected, and backscatter coefficient thresholds were applied to identify the lake areas and classify each coverage class. The analysis of values at the central pixel of the lakes showed that the ice-free surface cover class values ranged from -19.34 to -16.87 dB. This variation is attributed to the increase in average air temperature, which causes greater melting and, consequently, increased soil moisture. Wind also influences the backscatter values. The application of a fixed backscatter threshold of -15 dB was not satisfactory. We recommend monitoring backscatter values from data collected at the central point of the lakes and performing tests using adaptive threshold values for automatic target classification.

Keywords: Seasonal behavior. Lake ice-phenology. Climate change. Backscatter coefficient. Digital image processing.

INTRODUÇÃO

O arquipélago das Shetland do Sul está localizado na região Antártica Marítima. Essa região possui relevância para o monitoramento ambiental, pois geleiras antárticas e subantárticas em latitudes próximas a 60°S, de menor continentalidade, têm maior sensibilidade no balanço de massa do que aquelas situadas em latitudes mais altas (Marshall, 2021). Além disso, geleiras e paisagens subpolares são propensas a experimentar transformações em escala de décadas em resposta ao aquecimento global (Marshall, 2021).

O aumento da temperatura média global para as primeiras duas décadas do século XXI (2001–2020) foi de 0,99 °C (0,84 a 1,10), sendo maior do que o observado no período 1850–1900 (IPCC, 2021). O sexto relatório do IPCC aponta que eventos climáticos extremos serão cada vez mais frequentes nas próximas décadas (IPCC, 2021). Nesse contexto, a influência humana no sistema climático, decorrente de emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, é reconhecida por diversos autores (IPCC, 2021).

As recentes mudanças climáticas têm provocado impactos no sistema natural, incluindo alterações na distribuição espacial do sistema glacial (Carrivick; Heckmann, 2017). Esses autores mostram a perda global de massa de gelo nas últimas décadas como impacto das mudanças climáticas. Dessa forma, áreas cobertas por geleiras são substituídas por áreas livres de gelo, e observa-se um rápido crescimento global de lagos nessas regiões (Shugar *et al.*, 2020). O derretimento superficial nas camadas de gelo e em plataformas da Antártica torna-se cada vez mais relevante, dada a continuidade do aumento das temperaturas (Husman *et al.*, 2024). A compreensão desse processo é essencial para avaliar como essas áreas respondem às mudanças climáticas. Várias regiões da Antártica registraram, no início de 2020, recordes históricos de temperatura, com médias cerca de 30 °C acima das observadas nas últimas quatro décadas (González *et al.*, 2022).

Nesse contexto, a região da Península Antártica (PA) tem registrado um dos aquecimentos atmosféricos mais rápidos do planeta desde a década de 1950 (Vaughan *et al.*, 2003; Turner *et al.*, 2004; Jones *et al.*, 2016; González; Fortuny, 2018; Turner *et al.*, 2021). Nas últimas décadas, observa-se um aumento significativo das áreas livres de gelo (Shugar *et al.*, 2020), o surgimento de novos lagos e aumento de suas áreas, conforme demonstrado por Petsch *et al.* (2022). A relevância do monitoramento do comportamento do derretimento superficial dos lagos insere-se nesse contexto, reforçando a necessidade de maior entendimento dos impactos das mudanças climáticas nessa região do planeta.

Os lagos glaciais e seus componentes são importantes indicadores do comportamento da criosfera (Carrivick; Tweed, 2013). A formação periódica de lagos e a diminuição da cobertura de gelo ao longo do tempo, resultantes de variações sazonais e interanuais no clima, são chamadas de fenologia do gelo de lagos (Kropáček *et al.*, 2013; Šmejkalová; Edwards; Dash, 2016).

O comportamento de congelamento e derretimento do gelo de lagos glaciais pode servir como um indicador das variações na temperatura do ar em diferentes escalas de tempo (Zhang; Pavelsky, 2019). A cobertura de gelo dos lagos é essencial para limitar as taxas de evaporação no inverno; sem ela, os níveis dos lagos, a extensão das águas superficiais e, em última instância, a quantidade de água doce disponível seriam drasticamente reduzidos (Woolway *et al.*, 2020).

No Hemisfério Norte, ao contrário da Antártica, existe um monitoramento mais efetivo e constante dos lagos, como exemplificado no trabalho de Pastick *et al.*, (2018). Contudo, a compreensão dos padrões espaciais da fenologia e de como esses padrões são influenciados por vários fatores climáticos e geomórficos ainda é limitada (O'reilly *et al.*, 2015), sobretudo na Antártica e em sua região marítima subpolar.

Os lagos da Antártica Marítima não são perenemente congelados e diferem dos lagos em latitudes semelhantes no Hemisfério Norte por possuírem características únicas (Bañón *et al.*, 2013; López Martínez *et al.*, 2012). Esses lagos abrigam ecossistemas aquáticos diversos, cujas propriedades dependem fortemente da presença e da duração do gelo (Laybourn-Parry; Vincent, 2008). Diante do aquecimento global e da possibilidade de longos períodos em que os lagos permanecem livres de gelo, compreender a variabilidade da fenologia dos lagos das Shetland do Sul torna-se cada vez mais importante (Woolway *et al.*, 2020; Thalasso *et al.*, 2022).

Quanto a mudanças nos processos relacionados aos lagos, algumas pesquisas indicam que o derretimento e a quebra do gelo em lagos da região subpolar do Ártico têm ocorrido cada vez mais cedo (Peterson *et al.*, 2002; Park *et al.*, 2020). Para a Antártica, são necessárias investigações sobre a variabilidade sazonal, intra-anual e de longa duração da fenologia do gelo dos lagos. Nesse viés, o Sensoriamento Remoto por satélite fornece uma alternativa viável para detectar e monitorar mudanças na cobertura de gelo em lagos de altas latitudes (Latifovic; Pouliot, 2007; Murfitt; Brown; Howell, 2018; Zhang; Pavelsky, 2019).

Recomenda-se a utilização de imagens de radar e ópticas, associadas a índices como o *Normalized Difference Water Index* (NDWI), para obter informações importantes sobre os lagos, com vantagem no monitoramento temporal. Quanto à fenologia dos lagos, as imagens *Synthetic Aperture Radar* (SAR) vêm sendo utilizadas. Por exemplo, Antonova *et al.* (2016) usaram imagens TerraSAR-X (TSX) no delta do Reno; Petsch *et al.* (2020), TSX na Península Fildes; e Dirscherl *et al.* (2021), imagens Sentinel-1 (S1) para lagos supraglaciais do continente antártico.

Dirscherl *et al.* (2021) elaboraram o primeiro método automatizado para o mapeamento da extensão de lagos supraglaciais com base em imagens Sentinel-1A (S1) para monitorar cinco regiões diferentes do manto de gelo antártico no período 2015–2021. O derretimento e o congelamento da superfície de lagos na Península Fildes (Antártica Marítima) foram analisados por Hillebrand *et al.* (2019) entre julho de 2016 e dezembro de 2018, demonstrando a potencialidade do S1. A determinação dos limiares de retroespalhamento para cada tipo de cobertura lacustre em imagens TSX e S1 auxilia na aplicação e avaliação de métodos automáticos de classificação digital. Avaliar o potencial e as limitações do uso de imagens SAR (como TSX e S1) é relevante para estabelecer uma rede de monitoramento da variabilidade da cobertura de gelo dos lagos localizados nas áreas livres de gelo da região biogeográfica do norte da PA.

Da mesma forma, estudos evidenciam o potencial de utilização de imagens Sentinel-1A para análise da fenologia do gelo de lagos rasos no norte do Alasca (Wakabayashi; Motohashi, 2018). Nesse estudo, os autores investigaram os efeitos das alterações climáticas sobre esses lagos, analisando imagens Sentinel-1A (banda C) de 2015 a 2018. Eles observaram tendência de derretimento precoce e congelamento tardio das superfícies lacustres. Murfitt e Duguay (2020), usando imagens Sentinel-1A, reportaram valores de -21,72 dB para a superfície congelada dos lagos. Para as superfícies livres de gelo, Hillebrand *et al.* (2019) encontraram valores inferiores a -17 dB ao analisar imagens S1 (polarização HH, modo IW) na Península Fildes, obtendo ainda valores entre -14 e -17 dB para superfícies com até 60% de sua área congelada.

Diante desse contexto, o objetivo deste estudo foi investigar os valores de retroespalhamento em imagens Sentinel-1A, a fim de identificar as classes de cobertura superficial (gelo e neve versus áreas

livres de gelo) dos lagos localizados na Península Keller, Ilha Rei George, Antártica. Para alcançar esse objetivo, analisaram-se cinco imagens Sentinel-1A no modo IW.

METODOLOGIA

Este trabalho avaliou a fenologia dos lagos localizados na Península Keller, nas Ilhas Shetland do Sul (Antártica Marítima). A Península Keller situa-se na Ilha Rei George (IRG), a maior ilha das Shetland do Sul (aproximadamente 1.250 km²), delimitada ao norte pelo Estreito de Drake e ao sul pelo Estreito de Bransfield (Figura 1). A península possui uma extensa área livre de gelo.

Na Península Keller localiza-se a Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF), na Baía do Almirantado, com elevação máxima de 332,8 m (Monte Birkenmajer). O relevo é predominantemente fortemente ondulado e montanhoso (Mendes Junior *et al.*, 2010), ocupando quase 50% da área da península. A leste localiza-se a geleira Stenhouse e, a oeste, a geleira Domeyko. O relevo é caracterizado por acumulações detríticas e por diversas feições, como níveis de terraços, morainas, depósitos de tálus e cristas rochosas (Francelino *et al.*, 2004). As áreas a oeste da Península Keller não são cobertas por geleiras e não apresentam lagos, enquanto nas porções leste e sudeste ocorrem quatro pequenas geleiras de circo (Ferguson, Flagstaff, Noble e Babylon) que se conectam a lagos (Simões *et al.*, 2004).

A Península Keller possui litologia associada a rochas do Pré-cambriano ao Cenozóico, formadas por rochas metassedimentares e vulcânicas extrusivas. Sua litoestratigrafia inclui sedimentos do Paleozóico Superior, possivelmente metamorfizados devido ao vulcanismo ocorrido entre o Jurássico, Paleógeno e Neógeno (Birkenmajer, 1991).

Para compor o banco de dados da pesquisa, foram utilizadas imagens Sentinel-1A e imagens ópticas Sentinel-2A para determinação final das áreas dos lagos no modo IW. Ressalta-se que o SIG ArcGIS e o processador de imagens SNAP foram utilizados para processar os dados.

As imagens Sentinel-1A (S1) no modo IW são disponibilizadas a cada 12 dias e foram obtidas nas datas de 28/01/2023, 09/02/2023, 21/02/2023, 05/03/2023 e 22/04/2023. Esse período foi selecionado por coincidir com os dias de trabalhos de campo realizados na Península Keller. As imagens correspondem ao nível de processamento 1 GRD (*Ground Range Detected*) e utilizam a banda C para levantamento de dados (ESA, 2022). O ângulo de incidência variou entre 29,1° e 46° e as imagens foram obtidas gratuitamente no site da Agência Espacial Europeia.

Optou-se pelo uso de imagens S1 no modo IW, com resolução espacial de 10 m, por se tratar de um produto obtido gratuitamente e relativamente novo (o projeto Sentinel teve início em 2014) no estudo da superfície congelada de lagos. Ainda que os lagos analisados apresentem pequena área superficial, e, portanto, possam ter difícil identificação de imagens a 10 m de resolução, a escolha foi viável porque se possuía a localização dos lagos e de dados de campo sobre o ciclo de congelamento e descongelamento de sua área superficial.

Para a correção do terreno durante o processamento, foi utilizado o Modelo de Referência de Elevação da Antártica (REMA), com resolução espacial de 8 m. Esse modelo foi construído a partir de centenas de milhares de modelos digitais de elevação estereoscópicos submétricos (0,32 a 0,5 m), incluindo dados do *WorldView-1*, *WorldView-2* e *WorldView-3*, e um pequeno número do *GeoEye-1*, adquiridos entre 2009 e 2017 (majoritariamente nos anos de 2015 e 2016, durante as estações de verão austral) (Howat *et al.*, 2019).

As saídas de campo foram realizadas no verão de 2023, com o objetivo de registrar a condição da superfície dos lagos. Utilizou-se também equipamento de GPS para capturar as coordenadas dos alvos. As fotografias foram feitas sob diferentes ângulos e distâncias, contemplando também o entorno. O trabalho de campo ocorreu entre 27 de janeiro e 28 de abril de 2023, período em que foram obtidas fotografias diárias do lago próximo à EACF.

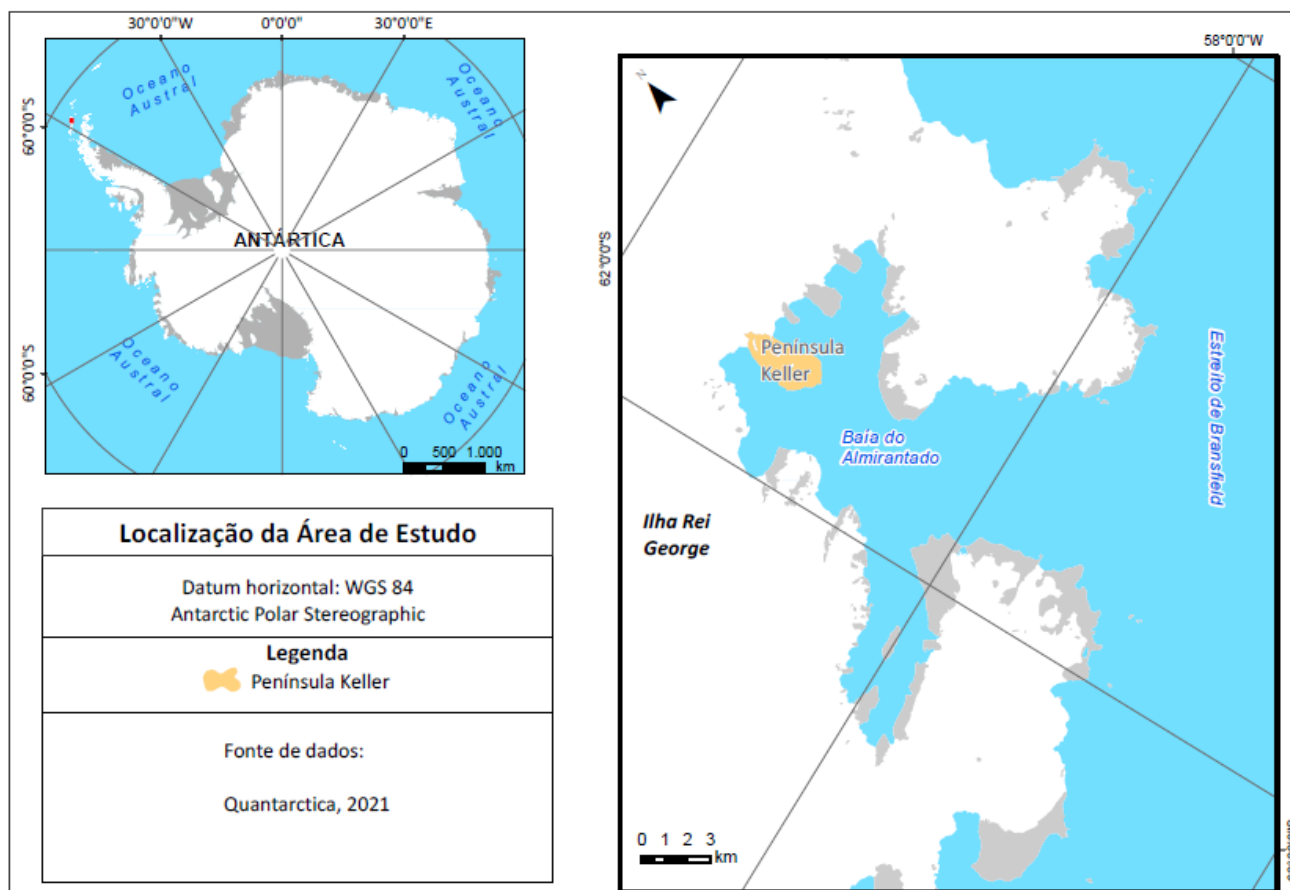
Os coeficientes de retroespalhamento foram obtidos por meio do processamento das imagens de radar. O processamento foi executado no *software* SNAP, disponibilizado gratuitamente pela Agência

Variação da cobertura de gelo e neve superficial dos lagos localizados na Ilha Rei George, Antártica Marítima, usando imagens Sentinel - A1: Um estudo de caso na Península Keller

Jorge Antônio Viel
Kátia Kellem da Rosa
Carina Petsch
Danielle Dall Amaria Soffiatti
Luiz Felipe Velho
Sandra Bromberg
Jefferson Cardia Simões
Rosemary Vieira

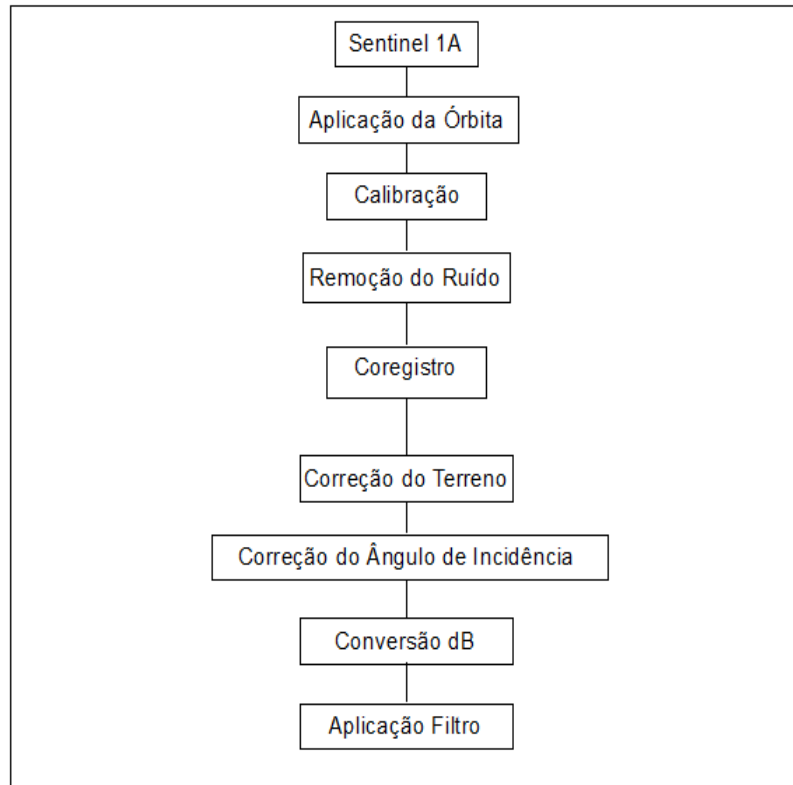
Espacial Europeia e desenvolvido especificamente para dados Sentinel. O fluxo de processamento das imagens de radar no SNAP está representado na Figura 2.

Figura 1 - Localização da área de estudo



Fonte: Autores, 2024.

Figura 2 - Fluxo de processamento das imagens de radar S1 utilizadas para a definição dos coeficientes de retroespalhamento da superfície dos lagos



Fonte: Autores (2024).

Para a análise temporal, aplicou-se a etapa de normalização do ângulo de incidência, conforme Equação 1 (Topouzelis; Singha; Kitsiou, 2016; Zhou; Zheng, 2017; Hillebrand *et al.*, 2019):

$$\sigma_{ref}^o = \frac{\sigma_{\theta}^0 \cos^2(\theta_{ref})}{\cos^2(\theta)} \quad (1)$$

Onde:

σ_{ref}^o : Coeficiente de retroespalhamento normalizado;

θ : Ângulo incidente local;

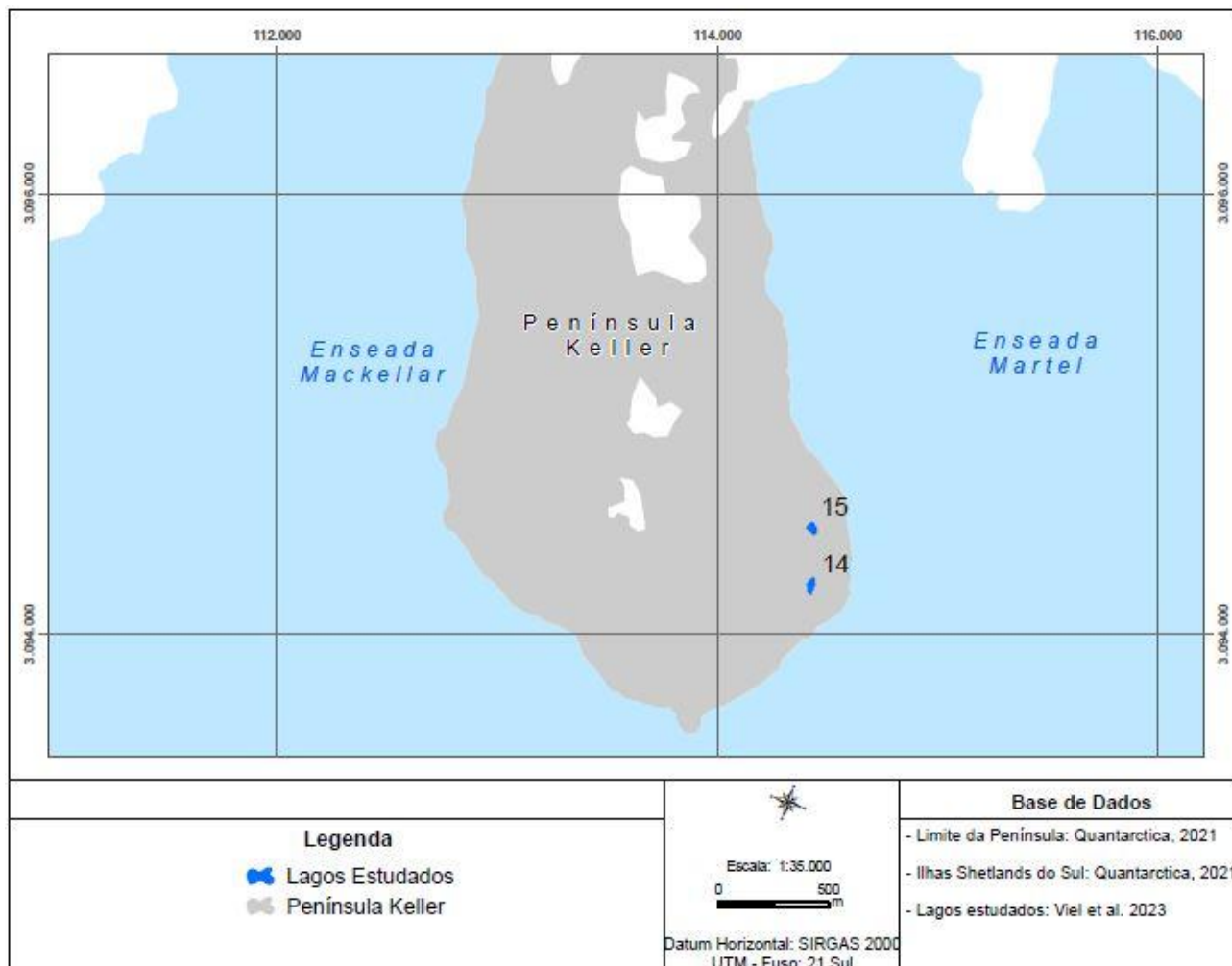
σ_{θ}^0 : Coeficiente de retroespalhamento mensurado;

θ_{ref} : Ângulo de referência.

Foram estudados dois lagos localizados na Península Keller (Figura 3). Primeiro, avaliou-se a aplicação do limiar inferior de -15 dB para identificar áreas livres de gelo, relacionando com resultados de trabalhos anteriores. A mensuração da área dos lagos nas imagens Sentinel-1A foi realizada em cada data entre 28/01/2023 e 22/04/2023, correspondendo aos mesmos dias das observações de campo.

Na segunda etapa, os valores de retroespalhamento foram extraídos por meio de um ponto central automaticamente gerado. Esses valores foram comparados com dados de temperatura média do ar e velocidade do vento nos cinco dias anteriores à obtenção da imagem.

Figura 3 - Localização dos lagos da península Keller



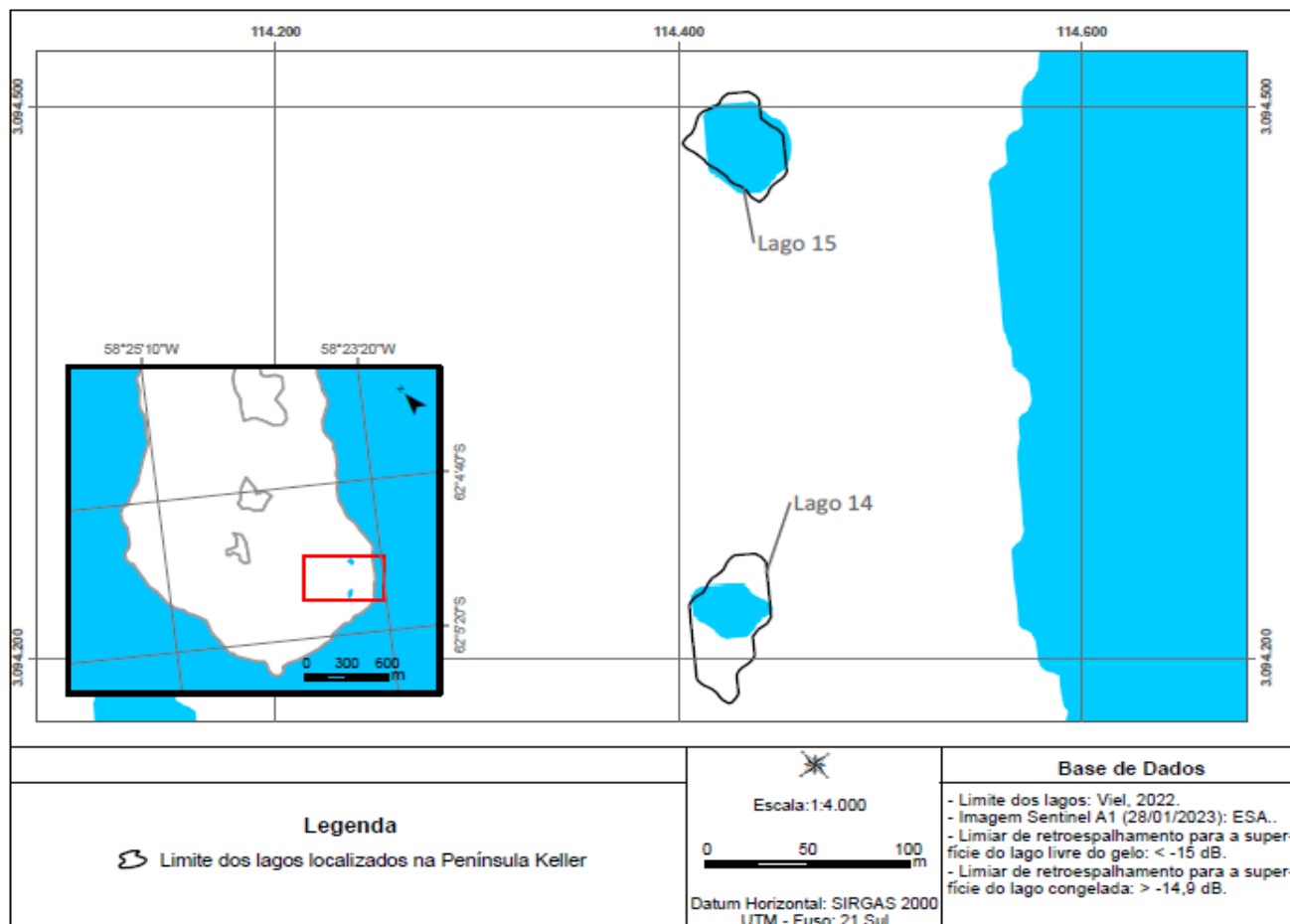
Fonte: Autores (2024).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Detecção da superfície do lago

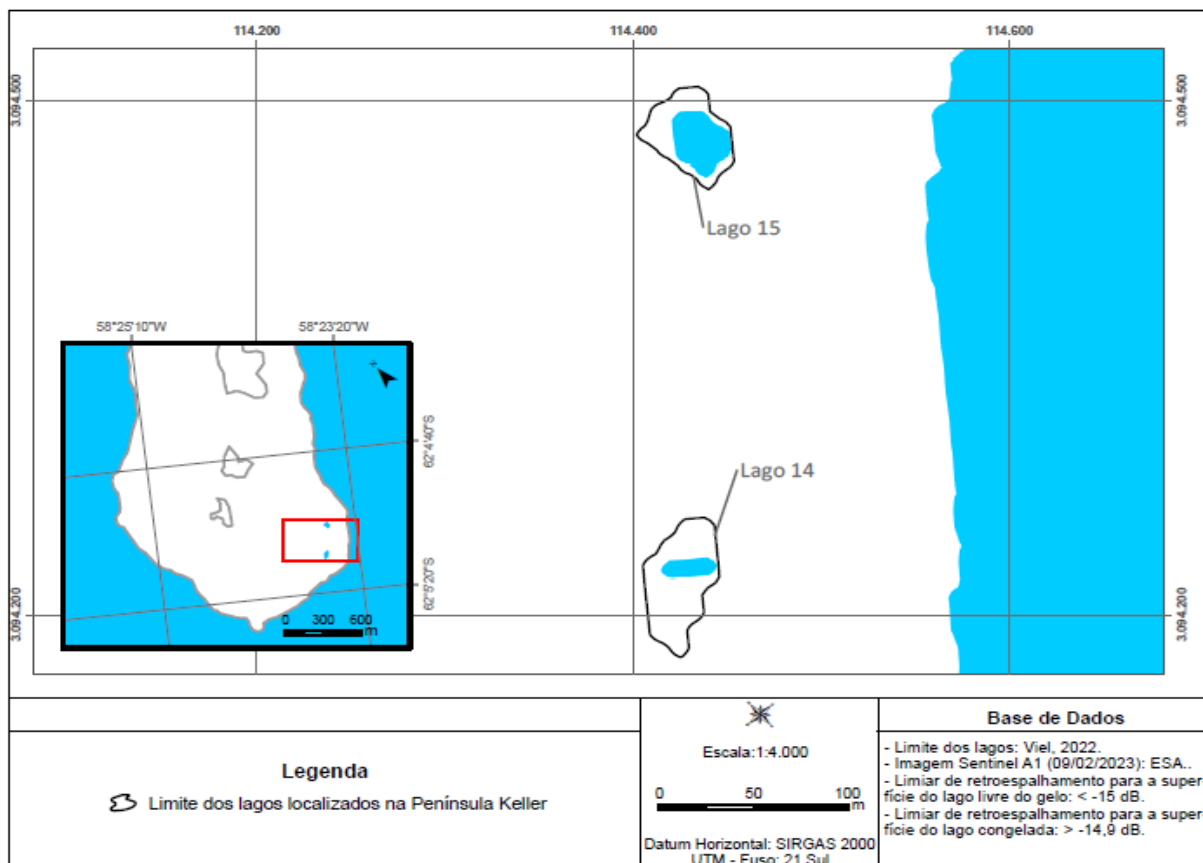
Observou-se variação espacial nas áreas dos lagos, que foram classificadas na mesma faixa de valores de retroespalhamento (< -15 dB para superfícies livres de gelo e $> -14,9$ dB para superfícies congeladas). Além disso, verificou-se que a área superficial do lago apresenta formato diferente daquele representado pelo polígono vetorizado elaborado com base nas imagens ópticas (Figuras 4, 5, 6 e 7).

Figura 4 - Comparação da área superficial congelada e livre de gelo dos lagos localizados na Península Keller na data de 28/01/2023, utilizando os limiares fixos inferiores a -15 dB para a água livre de gelo e superiores a -14,9 dB para a água congelada. A área superficial do lago apresenta forma diferente do vetor do lago elaborado com base na imagem óptica



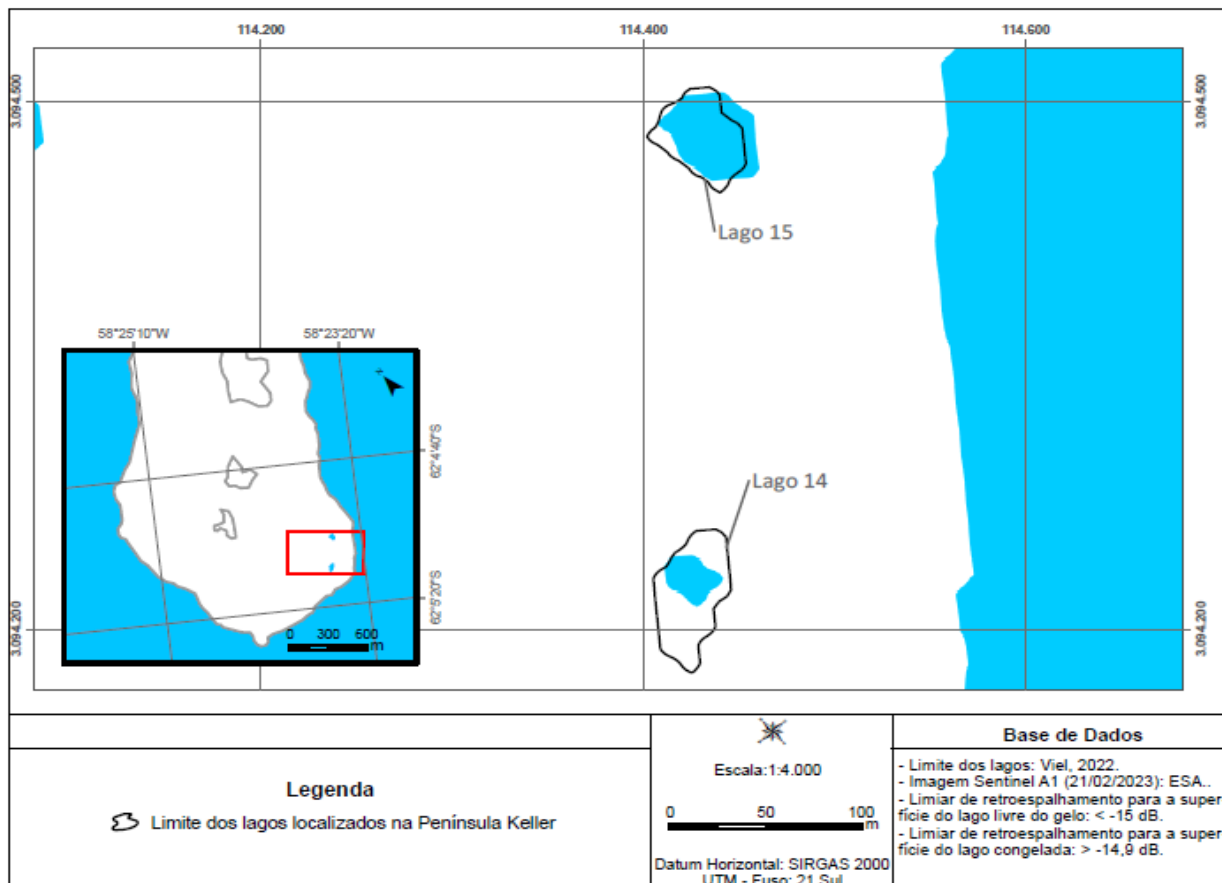
Fonte: Autores (2024).

Figura 5 - Comparação da área superficial congelada e livre de gelo dos lagos localizados na Península Keller na data de 09/02/2023, utilizando os limiares fixos inferiores a -15 dB para a água livre de gelo e superiores a -14,9 dB para a água congelada. A área superficial do lago apresenta forma diferente do vetor do lago elaborado com base na imagem óptica



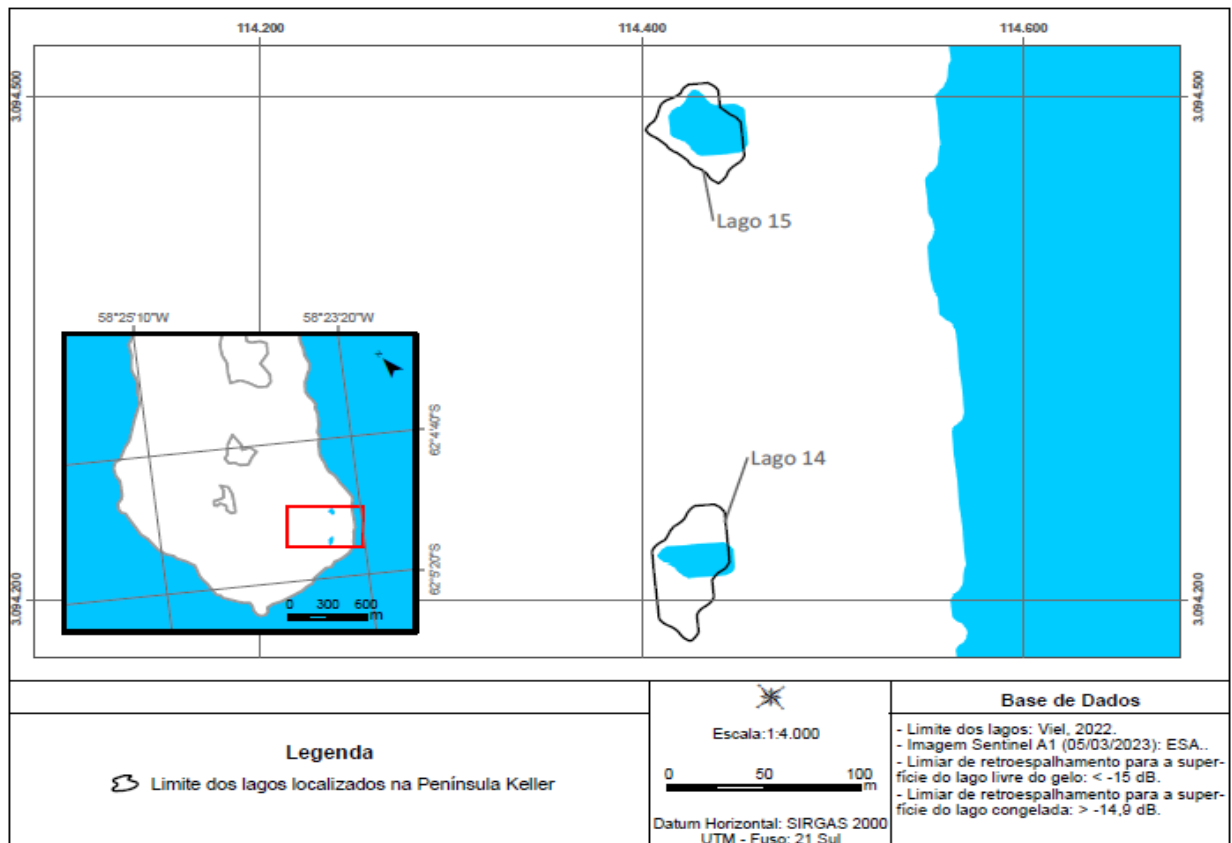
Fonte: Autores (2024).

Figura 6 - Comparação da área superficial congelada e livre de gelo dos lagos localizados na Península Keller na data de 21/02/2023, utilizando os limiares fixos inferiores a - 15 dB para a água livre de gelo e superiores a -14,9 dB para a água congelada. A área superficial do lago apresenta forma diferente do vetor do lago elaborado com base na imagem óptica



Fonte: Autores (2024).

Figura 7 - Comparação da área superficial congelada e livre de gelo dos lagos localizados na Península Keller na data de 05/03/2023, utilizando os limiares fixos inferiores a -15 dB para a água livre de gelo e superiores a -14,9 dB para a água congelada. A área superficial do lago apresenta forma diferente do vetor do lago elaborado com base na imagem óptica



Fonte: Autores (2024).

A utilização de um limiar fixo de retroespalhamento não permite mensurar corretamente a área superficial dos lagos. Esse achado é coerente com os resultados apresentados por Dirschler *et al.* (2021), que demonstraram que a variabilidade nos valores de retroespalhamento dificulta a aplicação de limiares fixos para detecção automática de alvos em lagos supraglaciais antárticos.

No Quadro 1, apresenta-se a comparação entre as áreas superficiais livres de gelo e congeladas dos lagos localizados na Península Keller, com base em imagens de radar Sentinel-1A obtidas nas mesmas datas do trabalho de campo. Foram considerados limiares superiores a -15 dB como indicativos de superfície congelada. A variação temporal observada nos valores de retroespalhamento reflete as mudanças sazonais na cobertura de gelo dos lagos.

Estudos demonstraram que o retroespalhamento apresenta padrões sazonais distintos, com aumentos durante o inverno e quedas abruptas na primavera, indicando o início do derretimento do gelo (Tuttle *et al.*, 2022).


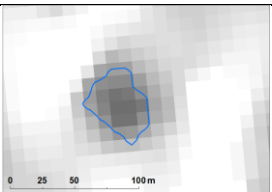
Quadro 1 - Comparação entre as áreas superficiais livre de gelo e congelada dos lagos localizados na Península Keller, com base em imagens de radar Sentinel-1A obtidas nas mesmas datas do trabalho de campo. Consideraram-se limiares superiores a -15 dB como indicativo de superfície congelada dos lagos


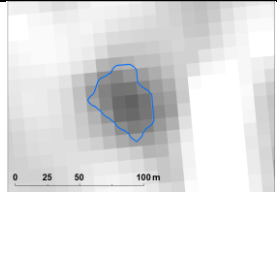

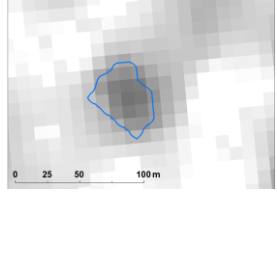

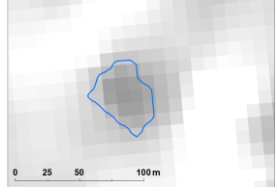

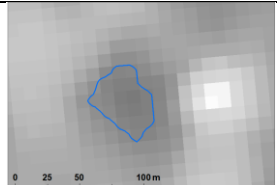
Data da imagem	Código do Lago	Área do lago vetorizada (m ²)	Área da superfície dos lagos livres de gelo (m ²)	Área da superfície dos lagos congelada (m ²)
28/01/2023	14	2152,10	850,55	1301,55
	15	1805,24	1.507,66	297,58
09/02/2023	14	2152,10	300,00	1852,10
	15	1805,24	899,80	905,44
21/02/2023	14	2152,10	584,38	1567,72
	15	1805,24	1465,72	339,52
05/03/2023	14	2152,10	617,61	1534,49
	15	1805,24	1063,12	742,12
22/04/2023	14	2152,10	1.210,27	941,83
	15	1805,24	481,58	1.323,66

Fonte: Autores (2024).

No Quadro 2 estão as fotografias de campo dos lagos da Península Keller nas mesmas datas das imagens Sentinel-1A, com os respectivos valores de retroespalhamento no ponto central do lago indicado. Verifica-se que os lagos estão completamente livres de gelo, mas, nas imagens de radar com limiar fixo (< -15 dB = livre de gelo), obtêm-se diferentes extensões para as áreas dos lagos.

Quadro 2 - Fotografias obtidas em trabalho de campo nas mesmas datas da obtenção das imagens de radar

Data da Imagem	Fotografia	Imagem Sentinel -1A com o lago localizado no centro do polígono	Valor de Retroespalhamento
28/01/2023 Superfície do lago completamente livre de gelo			Valor do ponto central: -18,75 dB

09/02/2023			Valor do ponto central: - 16,87 dB
21/02/2023			Valor do ponto central: - 15,13 dB
05/03/2023			Valor do ponto central: -17,41 dB
28/04/2023			Valor do ponto central: -14,74 dB

Fonte: Autores, 2024.

O limiar de retroespalhamento para as classes “superfície livre de gelo” e “superfície com gelo” foi variável, dependendo das condições ambientais no dia da aquisição da imagem. O valor característico de retroespalhamento para a classe “superfície livre de gelo” variou entre -19,34 e -16,87 dB (média de -18,10 dB, desvio padrão de 1,14 dB), enquanto o valor registrado para a classe “superfície com gelo” (28/04/2023) foi de -14,74 dB no ponto central.

Esses resultados são compatíveis com os obtidos por Murfitt e Duguay (2020), que relataram valores de retroespalhamento inferiores a -17 dB para superfícies livres de gelo em lagos do Ártico, utilizando imagens Sentinel-1A. De forma semelhante, Hillebrand *et al.* (2019) obtiveram valores entre -14 e -17 dB para lagos parcialmente congelados na Península Fildes.

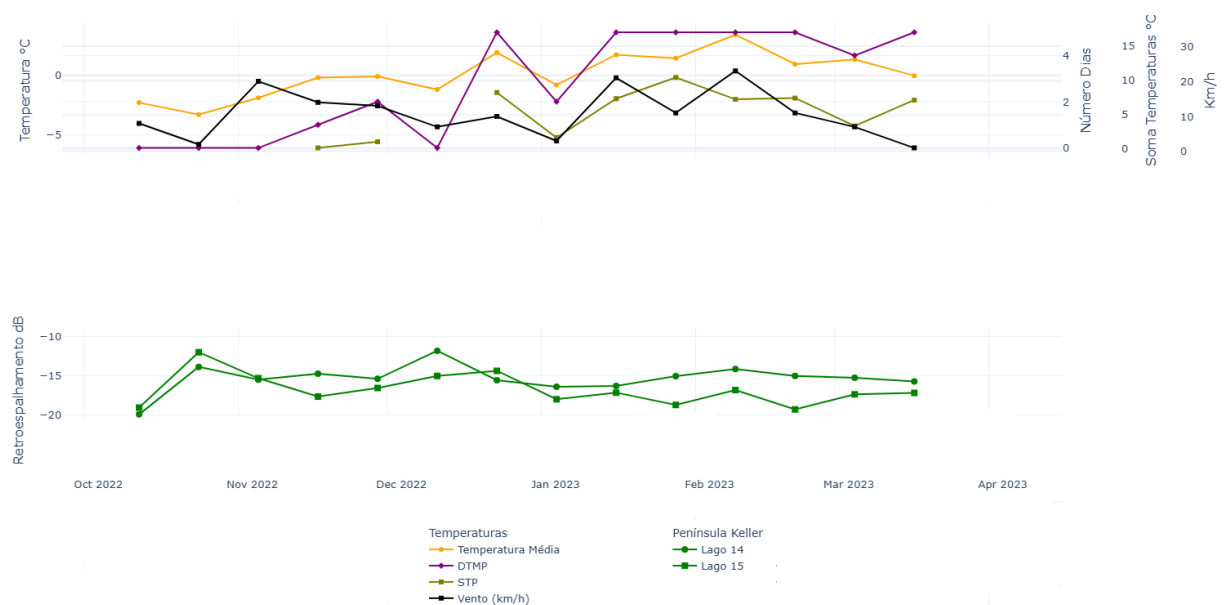
Os valores de retroespalhamento obtidos para as classes de cobertura dos lagos estão alinhados com estudos anteriores que utilizaram dados do Sentinel-1 para monitorar a cobertura de gelo em regiões polares. Por exemplo, valores de retroespalhamento entre -23,7 a -26,8 dB foram associados a águas abertas na região oeste da Península Antártica durante o inverno austral (Hillebrand *et al.*, 2019; Wangchuk; Bolch, 2020).

Sendo assim, a classificação da cobertura dos lagos baseada em dados de retroespalhamento é corroborada por abordagens que utilizam aprendizado de máquina para mapear lagos supraglaciais na Antártica, demonstrando a eficácia das imagens Sentinel-1A na identificação de diferentes tipos de cobertura (Dirscherl *et al.*, 2021).

Variação no retroespalhamento e relação com os dados de temperatura média do ar e velocidade do vento

Desde outubro de 2022, os valores de retroespalhamento do pixel central diminuíram permanecendo baixos até o fim do verão de 2023. Nas fotografias de campo, observa-se que os lagos permanecem completamente livres de gelo (Figura 8).

Figura 8 - Relação entre os valores de retroespalhamento, temperatura média do ar, número de dias com temperatura positiva, somatório da temperatura positiva e velocidade do vento diária dos lagos localizados na Península Keller, para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2023



Fonte: Autores (2024).

Em meados de dezembro de 2022, verificou-se aumento da temperatura média do ar, bem como o crescimento significativo do número de dias com temperatura positiva (considerando os 5 dias anteriores à obtenção da imagem). Em paralelo, observou-se diminuição dos valores de retroespalhamento do pixel central, representando a superfície dos lagos. Considerando as condições locais dos lagos estudados, a temperatura parece ser a principal variável impulsionadora das variações no gelo de superfície dos lagos (Šmejkalová; Edwards; Dash, 2016).

Além disso, o papel do vento não pode ser desconsiderado. Estudos como o de Wakabayashi e Motohashi (2018) mostram que ventos mais intensos podem contribuir para a quebra do gelo superficial em lagos do norte do Alasca, o que também pode explicar variações no comportamento do retroespalhamento observadas nos resultados.

A análise dos valores de retroespalhamento evidencia padrões semelhantes aos obtidos em estudos que monitoraram lagos glaciais utilizando dados do Sentinel-1A, em que alterações nos valores de retroespalhamento foram atribuídas ao derretimento de gelo e neve (Miles *et al.*, 2017). Sendo assim, as análises deste estudo corroboram com os dados apresentados por Ferreira *et al.*, (2017), que discutem as interferências antrópicas na dinâmica climática global, destacando o papel das atividades humanas no aumento da concentração de gases de efeito estufa e suas consequências sobre o clima.

A influência dessas variáveis ambientais reforça os argumentos de Jiang (2014), que defende a necessidade de abordagens analíticas que considerem a heterogeneidade espacial nas análises geoespaciais. O autor alerta que a aplicação de modelos homogêneos em ambientes dinâmicos pode mascarar padrões relevantes.

Este estudo representa um esforço inicial para contribuir com o monitoramento da fenologia do gelo dos lagos antárticos, diante do pequeno número de trabalhos publicados sobre o tema. Destaca-se que a adoção de limiares fixos, isoladamente, provavelmente não fornecerá resultados adequados para a diferenciação entre superfícies cobertas de gelo/neve e áreas livres de gelo. Assim, a análise geoespacial requer uma forma diferente de pensar, destacando a importância de modelos que considerem a distribuição desigual dos fenômenos no espaço (Jiang, 2014).

A análise dos dados revelou heterogeneidade espacial significativa nos padrões observados. Dessa forma, recomenda-se realizar testes com valores de retroespalhamento e limiares flexíveis para classificação automática de alvos, buscando validação em produtos de imagens ópticas ou fotografias de campo para auxiliar na interpretação do ambiente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta pesquisa demonstram que os valores de retroespalhamento obtidos nas imagens Sentinel-1A refletem, com sensibilidade, as mudanças sazonais e ambientais que ocorrem na superfície dos lagos da Península Keller. Verificou-se que esses valores variam conforme a presença de gelo, neve ou água livre de gelo, sendo fortemente influenciados por fatores climáticos, como temperatura média do ar e velocidade do vento.

A análise evidenciou que o uso de limiares fixos de retroespalhamento para diferenciar entre as classes de cobertura dos lagos pode ser inadequado, uma vez que não considera a variabilidade espacial e temporal dos alvos analisados. Essa constatação reforça a importância da adoção de métodos mais flexíveis e adaptativos de classificação, que levem em conta o contexto ambiental e as particularidades de cada imagem analisada.

Verificou-se ainda que os lagos permaneceram livres de gelo durante períodos significativos do verão austral, o que evidencia alterações em sua fenologia e pode indicar mudanças nas condições climáticas da região. Essa variação no comportamento sazonal dos lagos mostra o potencial desses ambientes como indicadores sensíveis de transformações ambientais em curso.

O estudo reforça a importância do monitoramento contínuo da cobertura superficial dos lagos, utilizando dados de sensoriamento remoto combinados com observações de campo. A aplicação integrada dessas metodologias contribui para o aprimoramento da análise da dinâmica da criosfera, especialmente em áreas de difícil acesso e alta relevância ambiental, como a Antártica Marítima.

Conclui-se que os métodos empregados neste trabalho são promissores para o avanço do conhecimento sobre a fenologia dos lagos antárticos e podem subsidiar estratégias futuras de monitoramento ambiental em regiões polares.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, bem como ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul.

REFERÊNCIAS

- ANTONOV, S.; KAAB, A.; HEIM, B.; LANGER, M.; BOIKE, J. Spatio-temporal variability of X-band radar backscatter and coherence over the Lena River Delta, Siberia. **Remote Sensing of Environment**, v. 182, p. 169–191, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rse.201605003>.
- BAÑÓN, M.; JUSTEL, A.; VELÁZQUEZ, D.; QUESADA, A. Regional weather survey on Byers Peninsula, Livingston Island, South Shetland Islands, Antarctica. **Antarctic Science**, v. 25, p. 146–156, 2013. <https://doi.org/10.1017/S0954102012001046>.
- BIRKENMAJER, K. Report on the Polish geological investigations in West Antarctica. **Polish Polar Res**, v. 12, p. 369 – 390., 1991.

- CARRIVICK, J.; HECKMANN, T. Short-term geomorphological evolution of proglacial systems. **Geomorphology**, v. 287, p. 1–13, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.037>
- CARRIVICK, J.; TWEED, F. S. Proglacial lakes: character, behaviour and geological importance. **Quaternary Science Reviews**, v. 78, p. 34–52, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.07.028>
- DIRSCHERL, M.; DIETZ, A. J.; KNEISEL, C.; KUENZER, C. A. Novel method for automated supraglacial lake mapping in Antarctica using Sentinel-1 SAR imagery and deep learning. **Remote Sensing**, v. 13, n. 197, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13020197>.
- ESA - European Space Agency. **TerraSAR-X ESA archive**. 22 abr. 2022. Disponível em: <https://earth.esa.int/eogateway/catalog/terrasar-x-esa-archive>. Acesso em: 24 set. 2022.
- FERREIRA, P. S.; GALVÍNCIO, J. D.; GOMES, P. V.; SOUZA, W. M. de. As perspectivas e divergências acerca do aquecimento global antropogênico. **Caderno de Geografia**, v. 27, n. 51, p. 728 – 747, 2017. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2017v27n51p728>.
- FRANCELINO, M.R.; SCHAEFER, C.E.G.R.; SIMAS, F.N.; FERNANDES, F.E.L.; SOUZA, J.J.L.; COSTA, L.M. Geoformas da Península Keller, Antártica Marítima: subsídios ao monitoramento ambiental. In: SCHAEFER, C.E.G.R. (Ed.); FRANCELINO, M.R.; SIMAS, F.N.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R. **Ecossistemas costeiros e monitoramento ambiental da Antártica Marítima**. Viçosa: NEPUT, 2004. p. 15–25.
- GONZÁLEZ, S.; FORTUNY, D. How robust are the temperature trends on the Antarctic Peninsula? **Antarctic Science**, v. 30, p. 322–328, 2018. <https://doi.org/10.1017/S0954102018000251>.
- GONZÁLEZ, S.; BARRIOPEDRO, D.; TRIGO, R. M.; BUSTINS, J. A. L.; OLIVA, M. Climate warming amplified the 2020 record-breaking heatwave in the Antarctic Peninsula. **Communications Earth & Environment**, v. 3, n. 122, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00450-5>
- HILLEBRAND, L. F.; DA ROSA, C. N.; COSTI, J.; BREMER, U. F. Mapeamento do gelo marinho na Península Antártica com imagens Sentinel-1A. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, p. 59–71, 2019. <https://doi.org/10.11137201925971>.
- HOWAT, I. M.; PORTER, C.; SMITH, B. E.; NOH, M.; MORIN, P. The reference elevation model of Antarctica. **The Cryosphere**, v. 13, p. 665–674, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-13-665-2019>
- HUSMAN, S. de R.; LHERMITTE, S.; BOLIBAR, J.; IZÉBOUD, M.; HU, Z.; SHUKLA, S.; MEER, M.; LONG, D.; WOUTERS, B. A high-resolution record of surface melt on Antarctic ice shelves using multi-source remote sensing data and deep learning. **Remote Sensing of Environment**, v. 301, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113950>.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. V. MASSON-DELMOTTE et al. (Eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- JIANG, B. Geospatial Analysis Requires a Different Way of Thinking: The Problem of Spatial Heterogeneity. **GeoJournal**, v. 80, p. 1 – 13, 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1401.5889>.
- JONES, J. M.; GILLE, T. S.; ABRAM, N. J.; CANZIANI, P. O.; CHARMAN, D. J.; CLEM, K. R.; CROSTA, X.; LAVERGNE, C. de; EISNMANN, I.; ENGLAND, M. H.; FOGT, R. L.; FRANKCOMBE, L. M.; MARSHALL, G. J.; DEMOTTE, V. M.; MORRION, A. K.; ORSI, A. J.; RAPHAEL, M. N.; RENWICK, J. A.; CHNEIDER, D. P.; SIMPKINS, G. R.; STEIG, E. J.; STENNI, B.; SWINGEDOUW, D.; VANCE, T. R. Assessing recent trends in high-latitude southern hemisphere surface climate. **Nature Climate Change**, v. 6, p. 917–926, 2016. <https://doi.org/10.1038/nclimate3103>.
- KROPÁČEK, J.; MAUSSION, F.; HOERZ, S.; HOCHSCHILD, V. Analysis of ice phenology of lakes on the Tibetan Plateau from MODIS data. **The Cryosphere**, v. 7, p. 287–301, 2013. <https://doi.org/10.5194/tc72872013>.
- LATIFOVIC, R.; POULIOT, D. Analysis of climate change impacts on lake ice phenology in Canada using the historical satellite data record. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, p. 492–507, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.015>.

LAYBOURN-PARRY, J.; VINCENT, W. F. Future directions in polar limnology. In: VINCENT, W. F.; LAYBOURN-PARRY, J. (Orgs.). **Polar Lakes and Rivers**. Oxford: Oxford University Press, 2008. p. 273–289.

LÓPEZ-MARTÍNEZ, J.; SERRANO, E.; SCHMID, T.; MINK, S. LINES; C. Periglacial processes and landforms in the South Shetland Islands (northern Antarctic Peninsula region). **Geomorphology**, v. 155–156, p. 62–79, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.018>.

MARSHALL, S. J. Regime shifts in glacier and ice sheet response to climate change: examples from the Northern Hemisphere. **Frontiers in Climate**, v. 3, 2021. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.702585>.

MENDES JUNIOR, C. W.; DANI, N.; SIMÕES, J. C.; BREMER, U. F.; JUNIOR, E. S. F.; ERWES, H. J. B. Análise morfométrica da Península Keller, Antártica, através do SIG. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 62, p. 1–12, 2010. <https://doi.org/10.14393/rbcv62n4-43692>.

MILES, K. E.; WILLIS I. C.; BENEDEK, C. L.; WILLIAMSON, A. G.; TEDESCO, M. Toward Monitoring Surface and Subsurface Lakes on the Greenland Ice Sheet Using Sentinel-1 SAR and Landsat-8 OLI Imagery. **Frontiers in Earth Science**, v. 5, p. 1 – 17, 2017. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00058>.

MURFITT, J.; BROWN, L. C.; HOWELL, S. E. L. Evaluating RADARSAT-2 for the monitoring of lake ice phenology events in mid-latitudes. **Remote Sensing**, v. 10, p. 1–26, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10101641>.

MURFITT, J.; DUGUAY, C. R. Assessing the performance of methods for monitoring ice phenology of the world's largest high Arctic lake using high-density time series analysis of Sentinel-1 data. **Remote Sensing**, v. 12, p. 1–25, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12030382>.

O'REILLY, C. M.; SHARMA, S.; GRAY, D. K.; HAMPTON, S. E.; READ, J. S.; ROWLEY, R. J.; SCHNEIDER, P.; LENTERS, J. D.; MCLINTYRE, P. KRAEMER, B. M.; WEYHENMEYER, G. A.; STRAIL, D.; DONG, B.; ADRIAN, R.; ALLAN, M. G.; ANNEVILLE, O.; ARVOLA, L. AUSTIN, J.; BAILEY, J. L.; BARON, J. S.; BROOKES, J. D.; EYTO, E.; DOKULIL, M. T.; HAMILTON, D. P.; HAVENS, K.; HETHERINGTON, A. L.; HIGGINS, S. N.; HOOK, S.; IZMESTEVA, L. R.; JOEHNK, K. D.; KANGUR, K.; KASPRZAK, P.; KUMAGAI, M.; KUUSISTO, E.; LESHKEVICH, G.; LIVINGSTONE, D. M.; MACLINTYRE, S.; MAY, L.; MELACK, J. M.; NAVARRA, D. C.; NAUMENKO, M.; NOGES, P.; NOGES, T.; NORTH, R. P.; PLISNIER, P.; RIGOSI, A.; RIMMER, A.; ROGORA, M.; RUDSTAM, L. G.; RUSAK, J. A.; SALMASO, N.; SAMAL, N. R.; SCHINDLER, D. E.; SCHLADOW, G.; SCHMID, M.; SCHMIDT, S. R.; SILOW, E.; SOYLU, M. E.; TEUBNER, K.; VERBURG, P.; VOUTILAINEN, A.; WATKINSON, A.; WILLIAMSON, C. E.; ZHANG, G. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. **Geophysical Research Letters**, v. 42, p. 1–9, 2015. <https://doi.org/10.1002/2015GL066235>.

PARK, H.; WATANABE, E.; KIM, Y.; POLYAKOV, I.; OSHIMA, K.; ZHANG, X.; KIMBALL, J. S.; YANG, D. Increasing riverine heat influx triggers Arctic sea ice decline and oceanic and atmospheric warming. **Science Advances**, v. 6, n. 45, eabc4699, 2020. <https://doi.org/10.1126/sciadvabc4699>.

PASTICK, N. J.; JORGENSEN, M. T.; GOETZ, S.; JONES, M. B.; WYLIE, B. K.; MINSLEY, B. J.; GENET, H. KNIGHT, J. F.; SWANSON, D. JORGENSEN, J. Spatiotemporal remote sensing of ecosystem change and causation across Alaska. **Global Change Biology**, p. 1–19, 2018. <https://doi.org/10.1111/gcb.14279>.

PETERSON, B. J.; HOMES, R. M.; MCCLELLAND, J. W.; VOROSMARTY, C. J.; LAMMERS, R. B.; SHIKLOMANOV, A. I.; SHIKLOMANOV, I. A.; RAHMSTORF, S. Increasing river discharge to the Arctic Ocean. **Science**, v. 298, n. 5601, p. 2171–2173, 2002. <https://doi.org/10.1126/science.1077445>.

PETSCH, C.; COSTA, R. M.; ROSA, K. K. da; VIEIRA, R.; BRAUN, M. H.; SIMÕES, J. C. Desenvolvimento hidrológico e fenologia de lagos da Península Fildes – Antártica. **Geociências**, v. 39, n. 2, p. 145–162, 2020. <https://doi.org/10.5016/gv39i2.14453>.

PETSCH, C.; ROSA, K. K. da; OLIVEIRA, M. A. G. O. de; VELHO, L. F.; SILVA, S. L. C.; SOTILLE, M. E.; VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C. An inventory of glacial lakes in the South Shetland Islands (Antarctica): temporal variation and environmental patterns. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 2022. <https://doi.org/10.1590/0001-376520221020>.

- SHUGAR, D. H.; BURR, A.; HARITASHYA, U. K.; KARGEL, J. S.; WATSON, S. C.; KENNEDY, K. S.; BEVINGTON, A. R.; BETTS, R. A.; HARRISON, S.; STRATTMAN, K. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. **Nature Climate Change**, v. 10, p. 939–945, 2020. <https://doi.org/10.1038/s415580208554>.
- SIMÕES, J. C. DANI, N.; BREMER, U. F.; AQUINO, F. E.; ARIGONY-NETO, J. Small cirque glaciers retreat on Keller Peninsula, Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. **Pesquisa Antártica Brasileira**, v. 4, p. 49–56, 2004. <https://doi.org/10.31789/pabv4n1.005>.
- ŠMEJKALOVÁ, T.; EDWARDS, M. E.; DASH, J. Arctic lakes show strong decadal trend in earlier spring ice-out. **Scientific Reports**, v. 6, p. 1–8, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep38449>.
- THALASSO, F.; SEPULVEDA-JAUREGUI, A.; CABROL, L.; LAVERGNE, C.; OLGUN, N.; MARTINEZ-CRUZ, K.; AGUILAR-MUÑOZ, P.; CALLE, N.; MANSILLA, A.; ASTORGA-ESPAÑA, M. S. Methane and carbon dioxide cycles in lakes of King George Island, Maritime Antarctica. **Science of The Total Environment**, v. 848, p. 157485, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157485>.
- TOPOUZELIS, K.; SINGHA, S.; KITSIOU, D. Incidence angle normalization of wide swath SAR data for oceanographic applications. **Open Geosciences**, v. 8, p. 450–464, 2016. <https://doi.org/10.1515/geo-2016-0029>.
- TURNER, J.; COLWELL, S. R.; MARSHALL, G. J.; LACHLAN-COPE, T. A.; CARLETON, A. M.; JONS, P. D.; LAGUN, V.; REID, P. A.; LAGOVKINA, S. The SCAR READER project: toward a high-quality database of mean Antarctic meteorological observations. **Journal of Climate**, v. 17, p. 2890–2898, 2004. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2890:TSRPTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2890:TSRPTA>2.0.CO;2).
- TURNER, J.; LU, H.; KING, J.; MARSHALL, G. J.; PHILLIPS, T.; BANNISTER, D.; COLWELL, S. Extreme temperatures in the Antarctic. **Journal of Climate**, v. 34, p. 2653–2668, 2021. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0538.1>.
- TUTTLE, S. E.; ROOF, S. R.; RETELLE, M. J.; WERNER, G. E. G.; BUNTING, E. L.; Evaluation of Satellite-Derived Estimates of Lake Ice Cover Timing on Linnévatnet, Kapp Linné, Svalbard Using In-Situ Data. **Remote Sensing**, v. 14, p. 1 – 20, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14061311>.
- VAUGHAN, D. G.; MASHALL, G. J.; CONNOLLEY, W. M.; PARKINSON, C.; MULVANEY, R.; HODGSON, D. A.; KING, J. C.; PUDSEY, C. J.; TURNER, J. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. **Climate Change**, v. 60, p. 243–274, 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1026021217991>.
- WAKABAYASHI, H.; MOTOHASHI, K. Monitoring freezing and thawing of shallow lakes in northern Alaska using Sentinel-1 data. **Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, Valência, Espanha, 2018. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519086>.
- WANGCHUK, S.; BOLCH, T. Mapping of glacial lakes using Sentinel-1 and Sentinel-2 data and a random forest classifier: Strengths and challenges. **Science of Remote Sensing**, v. 2, p. 1 -13, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100008>.
- WOOLWAY, R. I.; KRAEMER, B. M.; LENTERS, J. D.; MERCHANT, C. J.; O'REILLY, C. M.; SHARMA, S. Global lake responses to climate change. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, p. 388–403, 2020. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0067-5>.
- ZHANG, S.; PAVELSKY, T. M. Remote sensing of lake ice phenology across a range of lake sizes. **Remote Sensing**, v. 11, n. 1718, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11141718>.
- ZHOU, C.; ZHENG, L. Mapping radar glacier zones and dry snow line in the Antarctic Peninsula using Sentinel-1 images. **Remote Sensing**, v. 9, n. 1171, 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9111171>.