

VARIAÇÃO DE ÁREA DAS GELEIRAS DO CAMPO DE GELO KRAKÓW, ILHA REI GEORGE, ANTÁRTICA, NO PERÍODO ENTRE 1956-2017

Manoela Araujo Gonçalves de Oliveira

Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Av. Bento Gonçalves 9500, prédio 43136, CEP 91501-970 - Porto Alegre, RS, Brasil. Porto Alegre, RS
manuella.araujo@hotmail.com

Kátia Kellem da Rosa

Departamento de Geografia, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Av. Bento Gonçalves 9500, prédio 43136, CEP 91501-970 - Porto Alegre, RS, Brasil. Porto Alegre, RS
katiakellem@gmail.com

Rosemary Vieira

Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense
Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/n, Niterói, Rio de Janeiro, CEP 24210-346, Brasil
rosemaryvieira@id.uff.br

Jefferson Cardia Simões

Departamento de Geografia, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Av. Bento Gonçalves 9500, prédio 43136, CEP 91501-970 - Porto Alegre, RS, Brasil. Porto Alegre, RS
jefferson.simoese@ufrgs.br

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo investigar e comparar as variações de área das geleiras do campo de gelo Kraków, Ilha Rei George, no período de 1956/88 a 2017. Foram usadas imagens SPOT (1988 e 2000), LANDSAT 8 OLI (2014), e SENTINEL-2 (2017) para determinar a variação de área dessas geleiras e mapear a linha de frente atual. A morfologia e morfometria das geleiras foram determinadas com dados do Modelo Digital de Elevação e interpretação de imagens de satélite através da análise em SIG. Os resultados indicaram a tendência contínua do processo de retração das geleiras no período de 1956/88 a 2017, mesmo que, no período de 2000 a 2017 tenha diminuído a taxa de retração para a maioria das geleiras. Foi possível identificar diferenças no padrão de retração entre as geleiras. As geleiras foram agrupadas em: com maiores (22,36% - 62,37%), intermediárias (11,24% - 17,94%) e menores (4,27% - 9,46%) retrações. Os resultados indicam que a causa das diferenças de retração das frentes das geleiras do campo de gelo Kraków não está associada a um único fator e sim da combinação de vários fatores, como a declividade das frentes, elevação no setor frontal, área, orientação do fluxo de gelo e principalmente a configuração de término de cada uma delas. Estes parâmetros analisados mostraram as diferenças de sensibilidade de algumas geleiras da área de estudo às mudanças climáticas regionais no período. Com o processo de retração houve a perda de 16,59 km², equivalente a 16,86% da área total (98,56 km² em 1988). As geleiras que apresentaram maiores retrações foram Szymanowski (22,36%), White Eagle (29,1%), Wanda (33,33%), Wyspianski (38,96%), Dobrowolski Sul (39,74%), Penderecki (42,94%), e Dragon (62,37%). Destas, as que apresentam frente de maré são Wyspianski e Dobrowolski Sul, as demais são terrestres. As geleiras Wanda, Dragon e White Eagle, que são as de menor área, apresentaram a sua maior perda percentual até 2000, estas podem ter mudado de frente de maré para frente em terra no período analisado. A integração dos dados em SIG possibilitou gerar um banco de dados que apoiará o monitoramento contínuo das geleiras, além do estudo comparativo com outras massas de gelo para melhor entender as diferenças de sensibilidade às mudanças ambientais regionais.

Palavras-chave: Glaciologia; Campo de gelo Kraków; Sistemas de Informação Geográficas; Ilha Rei George.

GLACIER AREA FLUCTUATIONS OF THE CAMPO DE GELO KRAKÓW, ILHA REI GEORGE, ANTÁRTICA, IN 1956-2017

ABSTRACT

This work aims to investigate the glacier area fluctuations of the Krakow icefield, King George Island, from 1956/88 to 2017. The study using SPOT (1988 and 2000), LANDSAT 8 OLI (2014), and SENTINEL-2 (2017) data to determine of the area variation and glacier outlines mapping. The morphology and geomorphometry were obtained with Digital Elevation Model and satellite images through GIS analysis. The results indicated the continuous trend of the glacier retreat process from 1956/88 to 2017, even though in the period from 2000 to 2017 the retreat rates for most glaciers decreased. It was possible to identify differences in the retreat pattern between the glaciers. The glaciers shows: higher (22.36% - 62.37%), intermediate (11.24% - 17.94%) and smaller (4.27% - 9.46%) retreat groups. The results indicate that the cause of the differences in retreat process of the Kraków icefield glaciers is not associated with a single glaciologic attribute, but a combination of the several variables, such as slope of fronts, elevation in the frontal sector and accumulation area, total area, orientation of the flow ice and glacier terminus configuration. These analyzed parameters have been shown to explain the contrasting response between glaciers in the study area to regional climate changes in the period. With the retraction process there was a loss of 16.59 km², equivalent to 16.86% of the total area (98.56 km² in 1988). The glaciers with more lost area were: Szymanowski (22.36%), White Eagle (29.1%), Wanda (33.33%), Wyspianski (38.96%), Dobrowolski Sul (39.74%), Penderecki (42.94%), and Dragon (62.37%) (Wyspianski and Dobrowolski South glaciers have marine terminating and the others are land-terminating glaciers). The Wanda, Dragon and White Eagle glaciers, which are the smallest area, showed more area lost until 2000, which may have changed from marine to land-terminating in the analyzed period. The integration of the data into GIS will allow the continuous monitoring of the glaciers, as well as the comparative study with other ice masses, and provide conditions for better understand the differences in glacier sensitivities to regional environmental changes.

Keywords: Glaciology; Kraków Ice Field; Geographic Information Systems; King George Island.

INTRODUÇÃO

Os ambientes glaciais são sensíveis às mudanças climáticas regionais. Por ser considerado um laboratório natural único, as regiões polares têm recebido atenção da comunidade científica, visto que o conhecimento sobre as características e os fenômenos que ocorrem neste ambiente permite o esclarecimento de questões científicas importantes (SIMÕES, 2011; ANDRADE, 2013). Segundo Oerlemans (1988), geleiras de diferentes características morfométricas (declividade, altimetria, orientação e exposição solar), área e configuração de término podem reagir de diferentes formas às mudanças climáticas regionais.

Uma das preocupações tem sido o processo contínuo de retração das frentes de geleiras que vem ocorrendo na Ilha Rei George. Na área das Shetlands do Sul, Knap *et al.* (1996) aponta que as massas de gelo são particularmente sensíveis às variações climáticas em função de sua posição geográfica e da pequena espessura de gelo e por estarem muito próximas do ponto de fusão sob pressão (regime termal basal úmido).

Vários autores têm evidenciado o processo de retração das frentes de geleiras na Ilha Rei George (IRG) no período de 1950 a 2000, inclusive geleiras de maré do Campo de Gelo Kraków, como a Viéville, Dobrowolski e Krak, e também geleiras com suas terminações em terra, como a Wanda, Professor e Dragon (ARIGONY-NETO, 2001; BIRKENMAJER, 2002;

PARK *et al.*, 1998; SIMÕES *et al.*, 1999; BRAUN E GOSSMANN, 2002). O processo de retração é consequência do aquecimento atmosférico evidenciado nas últimas décadas (1950-2003) (VAUGHAN *et al.*, 2003). Essas mudanças climáticas foram acompanhadas também de desprendimentos frequentes de icebergs, mudanças no padrão de precipitação e redução do gelo marinho sazonal em diversos setores da Península Antártica (ARIGONY-NETO *et al.*, 2006).

O presente trabalho pretende realizar a quantificação, comparação e análise da variação de área de geleiras pertencentes ao campo de gelo Kraków nas últimas décadas, no período de 1956/88 a 2017. Pretende-se, com este trabalho, realizar o monitoramento do comportamento destas massas de gelo, estendendo o registro ambiental para 2017, atualizar os dados de variação de área existentes para as geleiras que fluem para a baía do Almirantado até 2000 e ainda realizar o primeiro estudo sobre a dinâmica das geleiras que fluem para a baía Rei George e o Estreito de Bellinghausen. Para Furbish e Andrew *et al* (1984), geleiras com geometrias diferentes reagem de diferentes maneiras às mudanças climáticas.

ÁREA DE ESTUDO

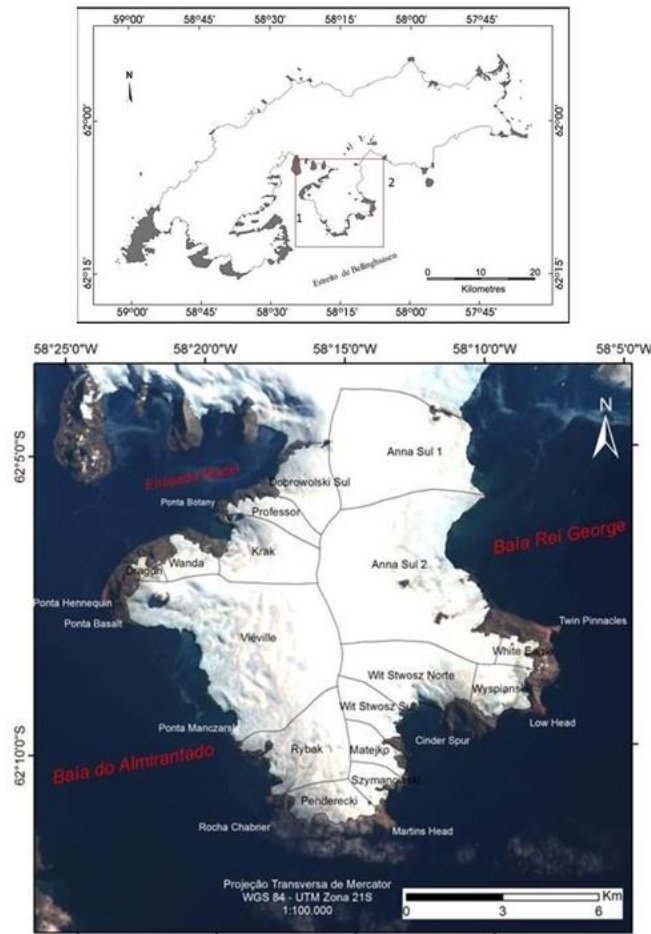
O campo de gelo Kraków se localiza na Ilha Rei George (Figura 1). Essa ilha faz parte do Arquipélago das Shetlands do Sul, situado 130 km a noroeste da Península Antártica (PA)(ARIGONY-NETO, 2001). A Ilha Rei George é a maior das Shetlands do Sul em área, com 1250 km² (BREMER, 1998) e situam-se entre as coordenadas 61°50` e 62°15` S e 57°30` e 59°00` W. Possui comprimento de 80 km em seu eixo maior de orientação sudoeste-nordeste e 15 km de largura média.

A precipitação média anual na ilha varia entre 350 e 500 mm, sendo que a maior parte dessa precipitação ocorre em forma de neve. As chuvas líquidas concentram-se durante o verão (SIMÕES *et al.*, 1999, ØVSTEDAL e SMITH, 2001). As temperaturas médias mensais sempre são negativas, ocorre temperatura média positiva inferior a 10°C por pelo menos um mês no ano. A média de temperatura anual na Ilha Rei George é de -2,8°C, sendo que no verão, varia entre -1,3° a 2,7°C e no inverno varia entre -15,5° a -1,0°C (FERREIRA, 1991; FERRON *et al.*, 2004). Estudos de Ferrando *et al.* (2009) relacionam a ocorrência de precipitações sobre a neve na ilha Rei George com o processo de diminuição de área e espessura das geleiras na área de estudo nas últimas décadas. A água provoca fusão da superfície de neve sobre as geleiras, o fluxo de água de degelo penetra nas fendas e se conecta com fluxos englaciais e subglaciais nas geleiras temperadas, o que acelera a velocidade do processo de fusão da geleira no verão e mudanças no balanço de massa das geleiras na ilha Rei George.

Segundo Braun *et al.* (2004) há uma forte variabilidade interanual nas condições atmosféricas. Pequenas variações na temperatura ao longo do ano, alta umidade relativa do ar (em torno de 82%) e a constante cobertura de nuvens caracterizam o clima da região (RAKUSA-SUSZCZEWSKI *et al.*, 1993; BINJANTA, 1995).

A área de estudo possui um clima tipicamente subpolar marítimo, pois sua localização geográfica está associada à região de baixa pressão circumpolar antártica. Sendo assim, seu clima é fortemente influenciado pelas sucessivas passagens de sistemas ciclônicos que, geralmente, se originam no sudeste do oceano Pacífico. Os fortes ventos que transportam o ar relativamente quente e úmido são decorrentes destes sistemas. Durante o período do verão, resultam em precipitações líquidas e temperaturas positivas do ar (DOMACK e ISHMAN, 1993; SETZER e HUNGRIA, 1994; BREMER, 1998; BRAUN, 2001).

Figura 1 – Localização do Campo de gelo Kraków na Ilha Rei George, Baía do Almirantado (1) e Baía Rei George (2), Antártica. Imagem de satélite SPOT, 2000, RGB 432



Fonte – OLIVEIRA (2018)

O campo de gelo Kraków possui diversas geleiras de maré e de término em terra que fluem para a Baía do Almirantado, para a Baía Rei George e para o mar aberto (Estreito de Bellinhsausen) (Figura 1). Observações na imagem Google Earth e o mapa da área de estudo, mostram que a Baía do Almirantado, diferentemente da Baía Rei George com condições de mar aberto, possui condições morfológicas mais abrigadas das ondas de tempestade (Figura 1) e batimetria mais rasa. O campo de gelo Kraków possui conexão com o campo de gelo Rei George, de maior elevação (700 m). Segundo Simões (2004), um campo de gelo é caracterizado por uma geleira ou um conjunto destas que cobrem uma área extensa, com superfície plana ou ondulada, e, ao contrário de uma calota de gelo, não chega a ter domos de gelo.

METODOLOGIA

DADOS

Os dados utilizados no trabalho (quadro 1) foram: Modelo Digital de Elevação (MDE) da Ilha Rei George (IRG), disponibilizados no formato digital *shapefile*, as linhas de costa e linhas de frente das geleiras dos anos de 1956, 1988 e 2000 de Arigony-Neto (2001) e imagens de satélite. Foram utilizadas imagens SPOT sensor HRV na composição 432 para os anos de 1988 e 2000. Também foram utilizados, imagens LANDSAT-8 sensor OLI RGB 432 de 2014 e SENTINEL-2 nível 1C RGB 843 de 2017, similar a LANDSAT falsa cor. Os dados foram co-registrados e integrados em um Sistema de Informações Geográficas.

Quadro 1 – Dados utilizados neste estudo.

Dados	Data	Formato do dado	Escala/Resolução	Fonte
Divisores de Drenagem Glacial da IRG	1998	Vetorial shapefile	-	Bremer (1998)
Modelo Digital de Elevação da IRG	2000	Raster tif	100m	Braun <i>et al</i> (2001)
Imagem Spot- 1XS Composição 432	19/02/1988	Raster tif	20m	CPC
Imagem Spot Composição 432	2000	Raster tif	20m	CPC
e linhas de frente das geleiras	1956; 1988; 2000	Vetorial shapefile	-	Arigony-Neto (2001)
8, sensor, OLI, RGB 432	2014	Raster tif	30m	USGS http://earthexplorer.usgs.gov
Imagem Sentinel-2 RGB 843 ID sentinel2017MSIL1C_20170310T1319 31	2017	Raster tif	10m	USGS http://earthexplorer.usgs.gov

Fonte – OLIVEIRA (2018)

As imagens de satélite LANDSAT 8 de 2014 e SENTINEL-2 de 2017 foram adquiridas através do *United States Geological Survey* (USGS) e disponibilizadas online no site <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Os dados encontram no padrão de Nível 1 (ortorretificadas) com sistema de referência WGS 1984, coordenadas GCS WGS 1984 (Sistema geodésico Mundial 1984) e resolução radiométrica de 16 Bits. Também foi utilizado o *layer* dos Divisores de Drenagem Glacial da Ilha Rei George de Bremer (1998).

CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DO CAMPO DE GELO E DAS GELEIRAS

Para a análise morfométrica, foram gerados mapas hipsométrico, declividade, orientação e modelo de sombreamento das geleiras do campo de gelo Kraków, com escala de 1:100.000, utilizando o *3D Analyst* do ArcGIS com base no MDE de Braun *et al.* (2001).

O início das etapas de processamento no software ArcGIS ocorreram com a definição do Sistema de Coordenadas para o sistema UTM zona 21S e para o Datum WGS 1984, e adicionando-se o arquivo *raster* MDE na área de controle do *software*. Após o processamento inicial, o MDE foi convertido para UTM, Fuso 21S, utilizando a ferramenta *Projections and Transformations* da caixa de ferramentas *Data Management Tools*, da extensão *ArcToolbox* e co-registrado com a imagem SPOT de 2000. Para a edição do Modelo Digital de Elevação, criou-se uma máscara para recorte espacial que englobou somente o campo de gelo, incluindo áreas expostas, como superfícies rochosas através da ferramenta *Extract By Mask*. Os dados morfométricos foram gerados a partir dos resultados do processamento dos dados aplicando-se as ferramentas do *3D Analyst* ao recorte do MDE

O mapa hipsométrico foi elaborado a partir do fatiamento do MDE em 5 classes, buscando fornecer a visualização do terreno por meio de cores representando as cotas altimétricas de intervalos definidos de 100 m, entre 0m e 500 m. Para o mapa de Declividade foi aplicada a ferramenta do *Slope* ao recorte do MDE, obtendo-se a representação em porcentagem nas classes de 0 a 3%, 3 a 8%, 8 a 20%, 20 a 45%, 45 a 70% e maior que 70% de acordo com as classes propostas pela EMBRAPA.

Para o mapa de Orientação de vertentes foi aplicada a ferramenta *Aspect* ao recorte do MDE, gerando-se um arquivo raster com as orientações da área de estudo que tem como finalidade demonstrar a orientação das vertentes. O mapa de sombreamento foi elaborado com ângulo solar azimutal 315, e foi sobreposto à imagem SPOT do ano de 2000. As estatísticas dos dados hipsométricos, de declividade e orientação das 25 vertentes (drenagens) foram obtidas no programa ArcGIS. Os mapas hipsométrico, de declividade e de orientação foram usados para analisar as classes de elevação mínima (frente) e máxima (setor de acumulação), classes percentuais de declividade no setor frontal das geleiras e orientação predominante do fluxo de gelo. A topografia foi analisada através de imagens do Google Earth e Modelo de Sombreamento da área de estudo.

DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DE ÁREA DAS GELEIRAS

A caracterização da dinâmica de retração das geleiras foi realizada pela integração dos dados vetoriais e raster obtidos pela análise temporal das imagens de satélite em SIG. Com as cenas do SENTINEL-2 foram determinadas as áreas totais atuais e condições de término atuais de cada geleira, além da linha de costa atual. Para obter dados de 2017 foi usada a cena do SENTINEL-2, sobreposta a esta foi usada cena do LANDSAT 8, sensor OLI (*Operational Land Imager*) TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) de 2014 para comparativo nos setores com nuvens. Os dados do programa Landsat foram adquiridos no site oficial da USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov>), já corrigidos radiometricamente em nível G1 – ainda assim, sendo necessário processar a correção do sistema de coordenadas e sistema de referência. Utilizou-se o shape Divisores de Drenagem de 2000, fornecido por Bremer (2001), para a análise temporal.

Foi realizado o mapeamento de áreas totais e da variação frontal por período, utilizando o método de delineamento manual, com interpretação visual de imagens. Foi quantificada a perda de área e as taxas de retração de cada uma das geleiras para o período de 1956/1988 a 2017 e 1988 a 2017. As novas áreas livres de gelo tem papel importante, pois apresentam diferença de reflectância e por isso interferem no albedo terrestre.

As geleiras que fluem para a baía do Almirantado tiveram o mapeamento para o período de 1956 a 2017, enquanto que, as geleiras que fluem para a Baía Rei George e Estreito de Bellingshausen (mar aberto), tiveram o mapeamento para o período de 1988 a 2017.

Foi criada a linha atualizada de frentes de geleira e costa de todo campo de gelo Kraków. Com o mapeamento das frentes em 2017 e análise da imagem SPOT de 2000, além de dados vetoriais das frentes de 1956 e 1988 foi possível criar polígonos de retração para cada período. O mapeamento da diferença das linhas de frente com a imagem Sentinel-2 representou a retração das geleiras entre 2000 e 2017. Em seguida foi dado início a edição do polígono com a ferramenta *Create Features*, utilizando o *Auto Complete Polygon*, permitindo mapear a diferença de área entre 1988 a 2000 ou 1956 e 1988 a 2000 conforme a geleira, com os vértices do polígono anterior. Também foi mapeado setores que apresentaram retração e deram origem a novas áreas rochosas expostas e de coberturas sedimentares no período de 1988 a 2017, obtendo-se, assim, o mapeamento das áreas recentemente livres de gelo da área de estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise do mapa hipsométrico (Figura 2) mostra que o campo de gelo apresenta elevação mínima de 0 m (nível do mar) e elevação máxima de 403 m, a elevação média da área de estudo é 223 m.

Quadro 2 – Elevação máxima, declividade, orientação e configuração de término das geleiras do campo de gelo Kraków.

Geleira	Elev. máxima	Declividade setor frontal (%)	Orientação predominante	Configuração de término
Dobrowolski Sul	400-500	45-75	Oeste/ Baía do Almirantado	Maré
Professor	300-400	20-45	Noroeste/ Baía do Almirantado	Terrestre
Krak	400-500	>75	Noroeste/ Baía do Alirantado	Maré
Wanda	300-400	20-45	Norte/ Baía do Almirantado	Terrestre
Dragon	200-300	20-45	Noroeste/ Baía do Almirantado	Terrestre
Viéville	400-500	8-20	Sudoeste/ Baía do Almirantado	Maré
Rybak	300-400	20-75	Sudoeste/ Baía do Almirantado	Terrestre
Penderecki	300-400	20-45	Sudoeste/ Baía do Almirantado e Baía Rei George	Terrestre
Szymanowski	300-400	20-45	Sudeste/ Baía Rei George	Terrestre
Matejko	300-400	20-45	Leste/ Baía Rei George	Terrestre
Wit Stwosz Norte	300-400	20-45	Sul-Sudeste/ Baía Rei George	Maré
Wit Stwosz Sul	300-400	>75	Leste/ Baía Rei George	Terrestre
Wyspianski	300-400	>45	Sudeste-Sul/ Baía Rei George	Maré
White Eagle	300-400	20-45	Nordeste/Baía Rei George	Terrestre
Anna Sul 2	400-500	.	Leste- Nordeste/ Baía Rei George	Maré

		8-20		
Anna Sul 1	400-500	3-8	Leste/ Baía Rei George	Maré

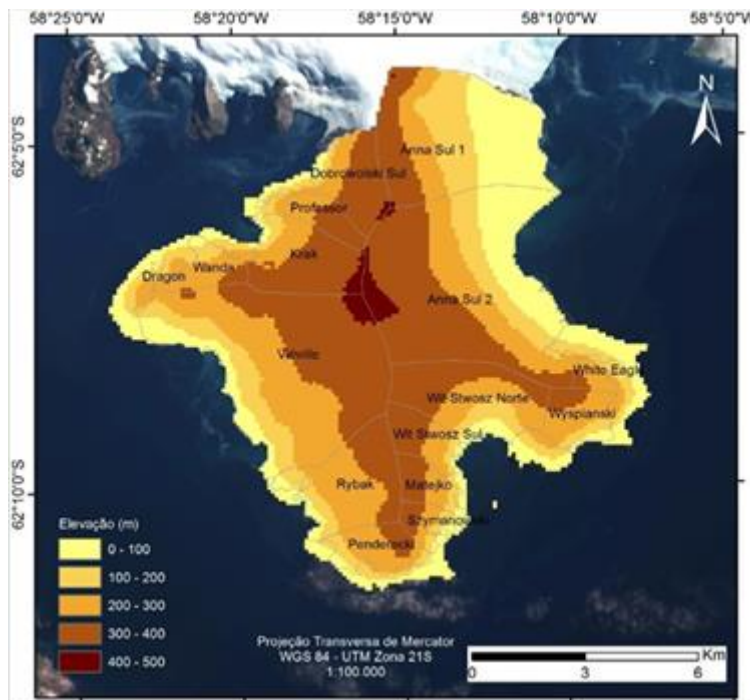
FONTE: OLIVEIRA (2018)

Foi possível observar que as geleiras que possuem suas frentes com menor elevação de 0-100 m são: Krak, Szymanowski, Wit Stwosz Norte, Wyspianski, Anna Sul 2, Anna Sul 1 e as que possuem maior elevação nas frentes são Dobrowolski Sul, Professor, Wanda, Dragon, Viéville, Rybak, Penderecki, Matejko, Wit Stwosz Sul, White Eagle. Destas, as que são alimentadas pelas áreas mais altas do campo de gelo são Dobrowolski Sul, Krak, Viéville, Anna Sul 2, Anna Sul 1. A geleira Anna Sul 1 também recebe alimentação de seu fluxo de gelo do campo de gelo Rei George.

As declividades superiores a 45% nos setores frontais encontram-se relacionadas às geleiras Dobrowolski Sul, Krak, (voltadas para a Baía do Almirantado), Wit Stwosz Sul e Wyspianski (voltadas para Baía Rei George). As geleiras que apresentaram até 20% de declividade em suas frentes são Viéville, Anna Sul 1 e Anna Sul 2. Já as declividades entre 20- 45% estão relacionadas às geleiras Professor, Wanda, Dragon, Rybak, Penderecki, Szymanowski, Matejko, Wit Stwosz Norte e White Eagle (quadro 2).

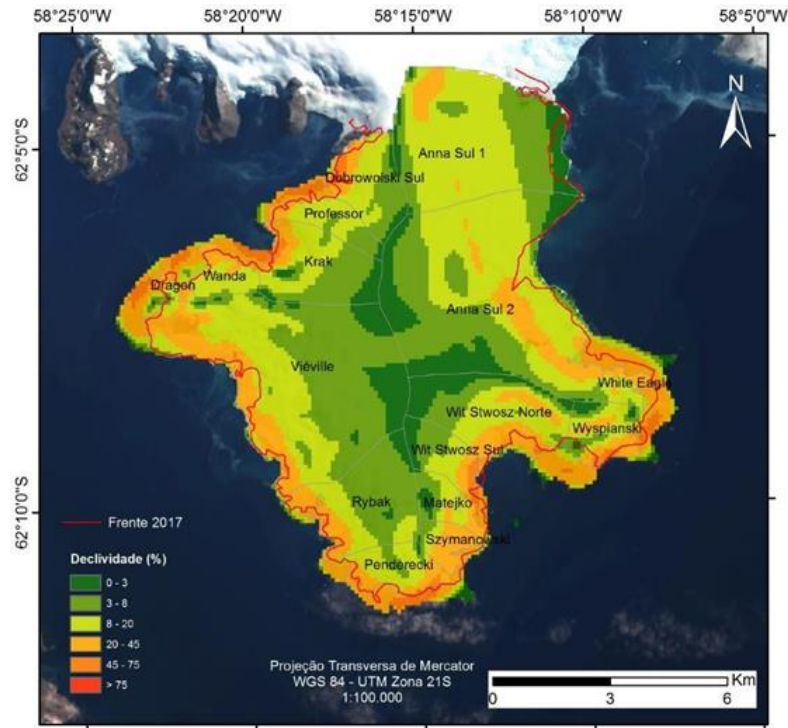
Quanto à orientação (Figura 4), as geleiras do Campo de gelo Kraków se apresentam com diferentes orientações, que podem indicar direção predominante de fluxo do gelo.

Figura 2 – Mapa Hipsométrico do Campo de Gelo Kraków.



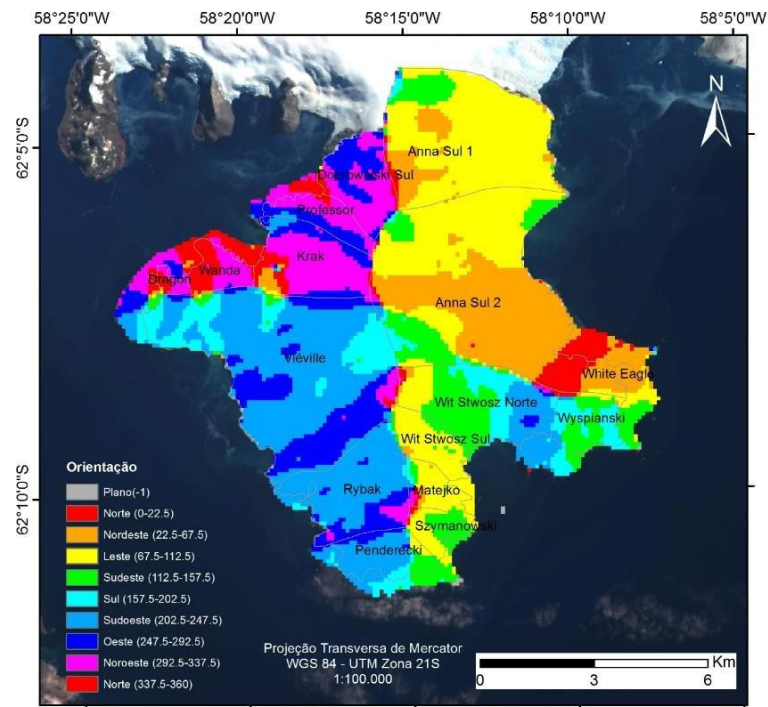
FONTE: OLIVEIRA (2018)

Figura 3. Mapa de Declividade do Campo de Gelo Kraków.



Fonte – OLIVEIRA (2018)

Figura 4 – Mapa de Orientação do Campo de Gelo Kraków.



FONTE – OLIVEIRA (2018)

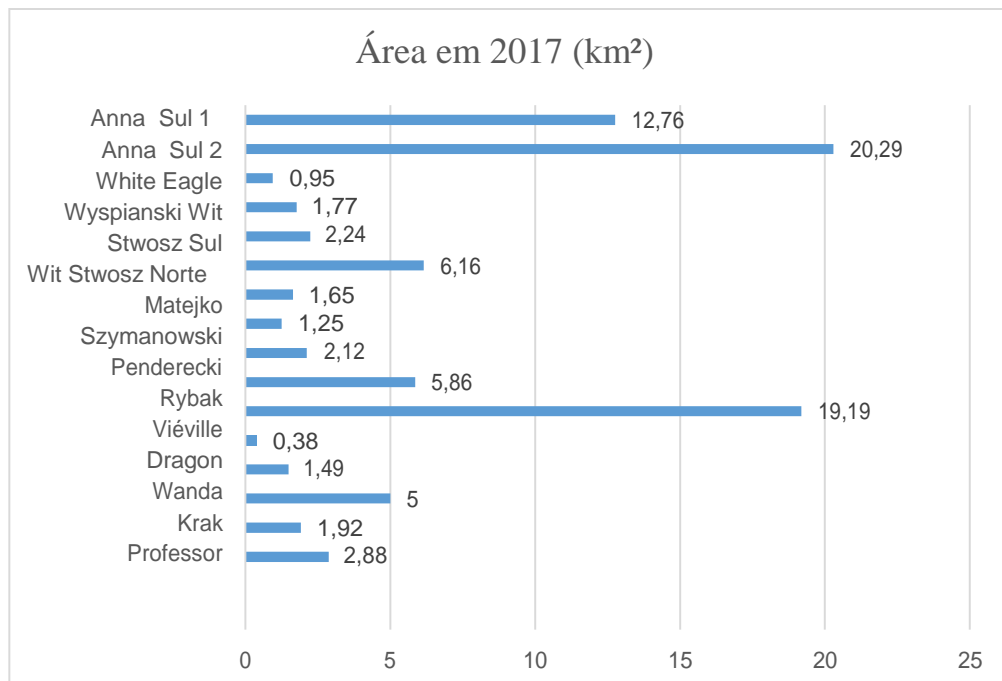
RETRAÇÃO DAS GELEIRAS DO CAMPO DE GELO KRAKÓW

O mapeamento das geleiras evidenciou que as geleiras de maior área são: Anna Sul 1 (12,76 km²), Viéville (19,19 km²), e Anna Sul 2 (20,29 km²), seguido de áreas intermediárias representadas pelas geleiras Wit Stwosz Norte (6,16 km²), Rybak (5,86 km²) e Krak (5 km²) e as de menor áreas são Dragon (0,38 km²), White Eagle (0,95 km²), Szymanowski (1,25 km²), Wanda (1,49 km²), Matejko (1,65 km²), Wyspianski (1,77 km²), Professor (1,92 km²), Penderecki (2,12 km²), Wit Stwosz Sul (2,24 km²), Dobrowolski Sul (2,88 km²) (Figura 5). A partir das análises verificou-se que o processo de retração é contínuo no período entre 1988 a 2017.

O total de área perdida no campo de gelo no período entre 1988 a 2017 foi de 16,59 km², equivalente a 16,86% da área total (98,56 km² em 1988), sendo que a maior perda de área foi no período entre 1988-2000, com 6,62 km² representando 6,71 % da área inicial (98,56 km² em 1988) e a menor perda foi no período entre 2000-2017, com 6,03 km² representando 6,58% da área em 2000 (91,94 km²). As geleiras voltadas para a Baía do Almirantado apresentam variação de área e retração desde 1956. Estas apresentaram 3,94 km² de área perdida no período de 1956-1988, representando 7,9 % da área total (da área de 1956), em 1988 a 2000 o total foi de 3,14 km² e de 2000 a 2017 foi de 3,51 km².As geleiras voltadas para a Baía Rei George (mar aberto) também apresentaram variação de área. Estas apresentaram 3,48 km² de área perdida no período de 1988-2000, e em 2000 a 2017 o total foi de 2,52 km².

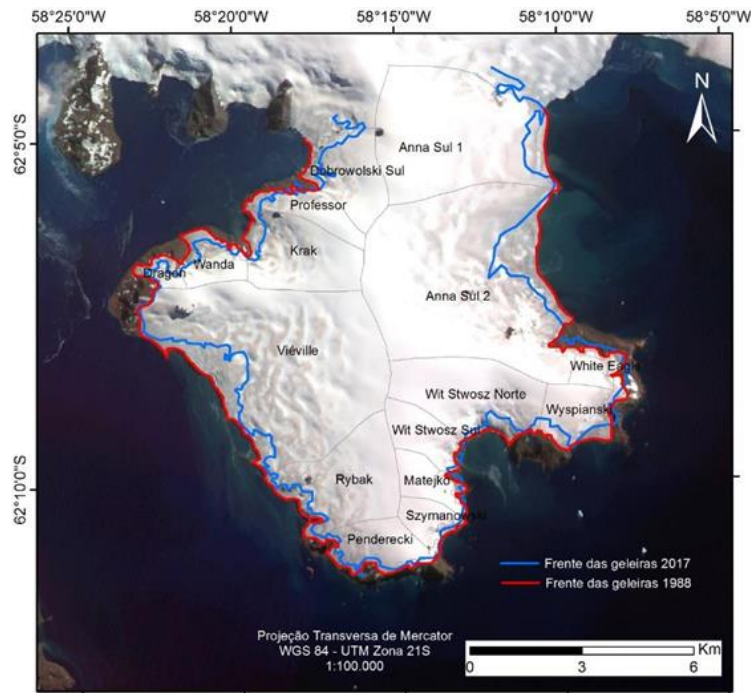
As geleiras que tiveram maior perda de área no campo de gelo no período entre 1988- 2017 foram a Viéville e a Anna Sul 2. A geleira Viéville apresentou a perda total de 4 km², equivalente a 17,24% (da área total de 23,19 km² em 1956). Já a Anna Sul 2 apresentou perda de 2,12 km², representando 9,46% (da área total de 22,41 km² em 1988), sendo que a maior perda de área foi no período de 1988-2000, com uma perda de 1,49 km², representando 6,64% da área de 1988.

Figura 5 – Gráfico de área em 2017 do campo de gelo Kraków.



Fonte – OLIVEIRA (2018)

Figura 6 – Mapa das linhas de frente 1988 e 2017 do campo de gelo Kraków.



Fonte – OLIVEIRA (2018)

A terceira geleira com maior perda de área foi a Dobrowolski Sul, com perda de 1,9 km² representando 39,74 % (da área total de 4,78 km² em 1956), mas esta apresentou sua maior taxa de retração no período de 1956 a 1988, com a perda de 0,96 km².

As geleiras que apresentaram perda de área contínua, nos períodos de 1988 a 2000 e também de 2000 a 2017, foram Dobrowolski Sul, Rybak, Penderecki, Wit Stwosz Norte, Wyspianski, com 39,74% (1,9 km²), 12,66% (0,85 km²), 42,94% (1,4 km²), 11,74% (0,82 km²),

38,96% (1,13 km²) da área total em 1988, respectivamente. Já as demais geleiras, com exceção de White Eagle que se manteve estável no período de 2000 a 2017, pois, não apresentou perda de área, todas as demais apresentaram perda de área inferior na última década referente ao período de 1998 a 2000.

No período de 2000 a 2017, as geleiras que apresentaram maior perda de área foram Viéville com 1,4 km², Dobrowolski Sul com 0,81 km², ambas voltadas para Baía do Almirantado, Wyspianski com 0,71 km² e a Anna Sul 2 com 0,63 km², estas voltadas para Baía Rei George (quadro 2).

Quadro 3 – Relação de área total, área perdida por período, percentual total de área perdida e taxa de retração anual do campo de gelo Kraków.

Geleira	Área em 1956 (km ²)	Área em 1988 (km ²)	Área perdida 1956-1988	Área em 2000 (km ²)	Área perdida a 1988-2000	Área em 2017 (km ²)	Área perdida a 2000-2017	Perda de área total (km ²)	Perda de área total (%)	Taxa de retração anual (km ²)
Anna Sul 1										
Dobrowolski Sul										
Professor										
Krak										
Anna Sul 2										
Viéville										
White Eagle										
Wit Stwosz Norte										
Wit Stwosz Sul										
Wyspianski										
Rybak										
Matejko										
Szymanowski										
Penderecki										

Dobrowolski Sul	4,78	3,82	0,96	3,69	0,13	2,88	0,81	1,9	39,74	0,031
Professor	2,34	2,11	0,23	1,97	0,14	1,92	0,05	0,42	17,94	0,006
Krak	5,9	5,49	0,41	5,12	0,37	5	0,12	0,9	15,25	0,014
Wanda	2,25	2	0,24	1,63	0,37	1,49	0,14	0,75	33,33	0,012
Dragon	1,01	0,74	0,27	0,49	0,25	0,38	0,11	0,63	62,37	0,01
Viéville	23,19	21,75	1,44	20,59	1,16	19,19	1,4	4	17,24	0,065
Rybak	6,71	6,49	0,22	6,24	0,25	5,86	0,38	0,85	12,66	0,126
Penderecki	3,26	3,09	0,17	2,62	0,47	2,12	0,5	1,4	42,94	0,022
Szymanowski	-	1,61	-	1,39	0,22	1,25	0,14	0,36	22,36	0,012
Matejko	-	1,86	-	1,68	0,18	1,65	0,03	0,21	11,29	0,007
Wit Stwosz Norte	-	6,98	-	6,7	0,28	6,16	0,54	0,82	11,74	0,028
Wit Stwosz Sul	-	2,34	-	2,27	0,07	2,24	0,03	0,1	4,27	0,003
Wypianski	-	2,9	-	2,48	0,42	1,77	0,71	1,13	38,96	0,038
White Eagle	-	1,34	-	0,95	0,39	0,95	0	0,39	29,10	0,013
Anna Sul 2	-	22,41	-	20,92	1,49	20,29	0,63	2,12	9,46	0,073
Anna Sul 1	-	13,63	-	13,2	0,43	12,76	0,44	0,87	6,38	0,03

Fonte – OLIVEIRA (2018)

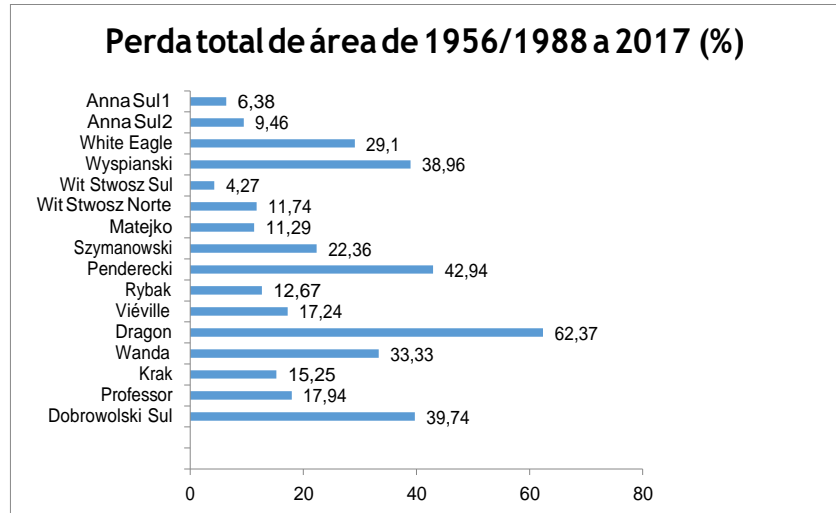
COMPARAÇÃO ENTRE AS GELEIRAS DO CAMPO DE GELO

As geleiras com maior percentual de área perdida (Dobrowolski Sul 39,74%, Wanda 33,33%, Dragon 62,37%, Penderecki 42,94%, Wypianski 38,96%, White Eagle 29,1%), demonstraram-se, na área de estudo, serem as mais sensíveis à variabilidade climática regional. As geleiras de término em terra Wanda, Dragon e White Eagle, que são geleiras pequenas e com término em terra, apresentaram a sua maior perda percentual até 2000, quando passaram a diminuir a perda percentual. Este comportamento pode estar relacionado à tendência de resfriamento de temperatura média superficial do ar regional no período, evidenciado por Turner *et al.* (2016).

Assim como, estas poderiam ter passado de configuração de término de maré para término em terra, como é o caso da geleira Wanda e Ecology, evidenciado por Rosa *et al.* (2008). A Geleira Penderecki, que apresentou percentual de 42,94% de retração, está ancorada no substrato rochoso em um setor com declividade superior a 45%, certamente esta perdeu parte

de sua área para o mar em forma de *icebergs*. As geleiras que tiveram perda percentual intermediária de área são: Professor (17,94%), Krak (15,25%), Viéville (17,24%), Rybak (12,67%), Szymanowski (22,36%), Matejko (11,29%), e Wit Stwosz Norte (11,24%) (Figuras 12). Destas as que são de maré são a Krak e a Viéville e considera-se que a Rybak e a Szymanowski eram de maré até o ano de 2000 e desta forma, foram influenciadas pelo mar na dinâmica de *icebergs*. Estas geleiras não apresentaram padrão quanto as áreas semelhantes.

Figura 7 – Gráfico de perda percentual total de área no período 1956/1988 a 2017.



Fonte – OLIVEIRA (2018)

A geleira Viéville possui área de 19,19 km², sendo a maior das geleiras voltadas para a Baía do Almirantado, esta têm sido acompanhada desde 1956 quando apresentava área de 23,49 km² passando para 19,01 km² em 2011 (SARTORI, 2013). Já as geleiras Szymanowski e Matejko, ambas voltadas para Baía Rei George, apresentam áreas bem menores, com 1,25 km² e 1,65 km², respectivamente.

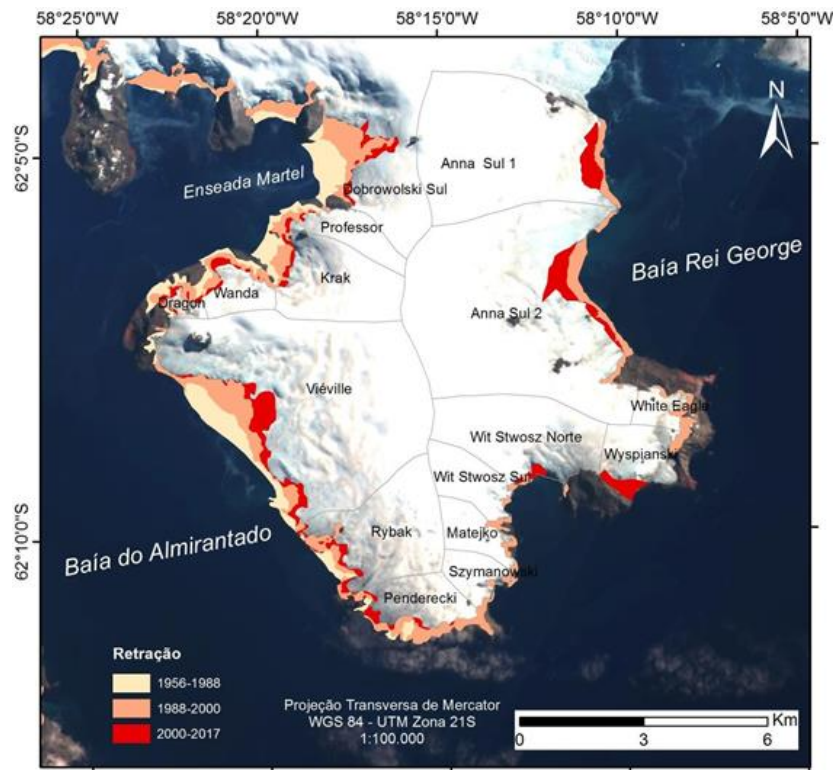
Estudos de Rosa *et al.* (2015) evidenciaram que a geleira pode ser influenciada também pela espessura, assim como variações na tendência de aumento de precipitação líquida nas últimas décadas na região. As geleiras que apresentaram perda percentual intermediária apresentaram padrão quanto à elevação máxima, todas elas possuem seu ponto mais alto entre 300-400 m, com exceção de Krak e Viéville, que são alimentadas pelo ponto mais alto do campo de gelo Kraków (403 m). As geleiras de maré, que apresentam declividade no setor frontal acima de 45%, correspondem a Dobrowolski Sul e Wyspianski, estas possuem perda de valor de área percentual de 39,74% e 38,86%, respectivamente. Estas perdas semelhantes evidenciam que as maiores declividades no setor frontal podem influenciar no grau de desprendimento de *icebergs* e posteriormente levá-las a estabilizarem suas frentes no embasamento rochoso quando diminuem de espessura.

As geleiras de menor perda percentual de área no período foram Wit Stwosz Sul, Anna Sul 1 e Anna Sul 2. Estas estão dentre as que possuem maior área do campo de gelo com exceção de Wit Stwosz Sul, a qual apresenta área de 2,24 km² e máximas elevações de 400-500 m, para as duas maiores, e de 300-400 m, para a menor delas. Também apresentam elevações mínimas no setor frontal, com exceção de Wit Stwosz Sul que, por ter término em terra, apresenta elevação na frente de 100-200 m.

As geleiras de maior perda de área total no período 1988-2017 foram: Dobrowolski Sul (1,9

km²), Viéville (4 km²), Penderecki (1,4 km²), Wyspianski (1,13 km²), Anna Sul 2 (2,12 km²), destas, a única que apresenta frente terrestre é a Penderecki, as demais todas são geleiras de maré e provavelmente apresentam batimetria menos rasa da área de estudo, e assim, a perda frontal ocorre também por influência do mar (temperatura do oceano e ondas influenciando o desprendimento de icebergs) e há ausência de ancoragem no setor frontal (pode haver maior velocidade de fluxo e perda de massa), com exceção de Penderecki.

Figura 8 – Mapa de retração das geleiras por período analisado.



Fonte – OLIVEIRA (2018)

Analisando-se todo o período, os resultados encontrados de contínua retração, na área de estudo, vão ao encontro de diversos estudos que têm evidenciado perda de áreas de geleiras e retração de frentes na ilha Rei George (SARTORI 2013; SIMÕES *et al.*, 2015). Caña (2016), evidenciou a redução de área da geleira Polar Club entre 1981-2015, em 2,95 km², representando perda de área total de 9,44%. Rosa *et al* (2014) evidenciou retração das geleiras Krak, Dobrowolski e Wanda no período de 1979 a 2000 e ainda uma continuidade nas décadas posteriores relacionada à tendência de aumento da temperatura média superficial do ar, e também ao aumento de precipitação líquida na região da PA.

Este processo de perda de área das geleiras do campo de gelo Kraków está diretamente relacionado com a tendência de aumento das temperaturas médias do ar (da década de 50 ao início da década de 2000) (MORRIS e VAUGHAN, 2003; CARRASCO, 2013; IPCC, 2013), aumento de dias com precipitação líquida no verão e o aumento de número de dias em que a temperatura média ultrapassou os 0°C nas últimas décadas (SIMÕES, 2015). Verificou-se que algumas geleiras (Professor, Krak, Wanda, Dragon, Szymanowski, Matejko, Wit Stwosz Sul, White Eagle, Anna Sul 2) diminuíram a taxa de retração no período 2000-2017, evidenciando que algumas geleiras podem refletir, entre outros fatores (mudança de configuração de

término e ancoragem rochosa submarina frontal), em poucos anos a tendência de resfriamento atmosférico registrado nas últimas duas décadas no estudo de Turner *et al.* (2016). Com a retração, houve o aumento de 3,63 km² (Figura 16) de novas áreas livres de gelo, para Convey (2006) essa mudança ambiental traz consequências para a biota na região. Se observarmos as perdas percentuais de suas áreas, considera-se que as geleiras do campo de gelo Kraków apresentaram perdas significativas de área. Todas as geleiras apresentaram valores de retração para os períodos em análise. Com exceção de White Eagle, que de 2000 a 2017, não apresentou taxa de retração, sua maior perda foi no período anterior, de 1988 a 2000, correspondendo a 29% de perda de área (do total de 1,34 km² em 1988).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados indicam que a causa das diferenças de retração das frentes das geleiras do campo de gelo Kraków não está associada um único fator e sim da combinação de vários fatores, como a declividade das frentes, elevação no setor frontal, área, orientação do fluxo de gelo e principalmente a configuração de término de cada uma delas. Estes parâmetros analisados mostraram as diferenças de sensibilidade de algumas geleiras da área de estudo às mudanças climáticas regionais no período. Com o processo de retração houve a perda de 16,59 km², equivalente a 16,86% da área total (98,56 km² em 1988). As geleiras que apresentaram maiores retrações foram Szymanowski (22,36%), White Eagle (29,1%), Wanda (33,33%), Wyspianski (38,96%), Dobrowolski Sul (39,74%), Penderecki (42,94%), e Dragon (62,37%). Destas, as que apresentam frente de maré são Wyspianski e Dobrowolski Sul, as demais são terrestres. As geleiras Wanda, Dragon e White Eagle, que são as de menor área, apresentaram a sua maior perda percentual até 2000, estas podem ter mudado de frente de maré para frente em terra no período analisado. A integração dos dados em SIG possibilitou gerar um banco de dados que apoiará o monitoramento contínuo das geleiras, além do estudo comparativo com outras massas de gelo para melhor entender as diferenças de sensibilidade às mudanças ambientais regionais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPERGS, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento desse estudo.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, A.M. Delimitação de geoambientes na península Potter, ilha Rei George (Antártica Marítima), utilizando dados COSMO-SkyMed e Quickbird. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Sensoriamento Remoto, p. 150, 2013
- ARIGONY-NETO, J. 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, p. 84, 2001.
- ARIGONY NETO, J. Monitoring glacier parameters on the Antarctica Peninsula. Tese de Doutorado, Universidade de Freiburg, Faculty of Florest and Enviromental Science, 136 p., 2006.
- BINJANTA, R. The local surface energy balance of the Ecology glacier, King George Island, Antártica: measurement sand modeling. *Antarctic Science*, v. 7, n. 3, p. 315-325, 1995.
<https://doi.org/10.1017/S0954102095000435>

- BIRKENMAJER, K. Retreat of Ecology Glacier, Admiralty Bay, King George Island (South Shetland Islands, West Antarctica, 1956-2001). *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Earth Sciences*, v.50, p.15-29, 2002.
- BRAUN, M.; SIMÕES, J. C.; VOGT, S.; BREMER, U. F.; SAURER, H.; AQUINO, F. E. A new satellite image map of King George Island (South Shetland Islands, Antarctica). *Polar Forschung*, v. 71, p. 47-48, 2001.
<https://doi.org/10.1007/BF02826977>
- BRAUN, M.; GOSSMANN, H. Glacial changes in the areas of Admiralty Bay and Potter Cove, King George Island, maritime Antarctica. In: BEYER, L.; BÖLTER, M.(Org.). *Geocology of Antarctic ice-free coastal landscapes*. Berlin: Springer-Verlag. p. 75- 89, 2002.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-56318-8_6
- BRAUN, M.; SAURER, H. e GOBMAN, H. Climate, energy fluxes and ablation rates on the ice cap of King George Island. *Pesquisa Antártica Brasileira*, v.4, p. 87-104, 2004.
- BREMER, U. F. Morfologia e Bacias de Drenagem da Cobertura de Gelo da ilha Rei George, Antártica. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de mestrado. p.117, 1998.
- CAÑA, B. B. Caracterização geomorfológica das áreas livres de gelo e flutuações na geleira Polar Club, Península Potter, Ilha Rei George / Betânia Bonada Caña. 90 f, Dissertação (Mestrado) -Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, BRRS,2016.
- CARRASCO, J.F. Decadal Changes in the near-surface air temperature in the western side of the Antarctic Peninsula. *Atmospheric and Climate Sciences*, 3, p. 275-281, 2013.
<https://doi.org/10.4236/acs.2013.33029>
- CONVEY, P. Antarctic Terrestrial Ecosystems: Responses to Environmental Change. *Polar Forschung*, 75 (2-3), p. 101-111, 2006.
- DOMACK, E. W. e ISHMAN, S. E. Oceanographic and physiographic controls on modern sedimentation within Antarctic fjords: *Geological Society of America Bulletin*, v. 105, p. 1175-1189, 1993.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1993\)105<1175:OAPCOM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1993)105<1175:OAPCOM>2.3.CO;2)
- FERRANDO, F. A.; ROSA, K. K. Sobre el calentamiento global en la Isla Rey Jorge: procesos y evidencias en el glaciar Wanda y su entorno. *Revista Informaciones Geográficas*, v. 41, p. 25-40, 2009.
<https://doi.org/10.5354/0719-5370.2009.21889>
- FERREIRA, A. B. Os ambientes periglaciários e o significado das manifestações periglaciárias herdadas. *Finisterra Revista Portuguesa de Geografia*, v. 26, n. 51, p. 84- 105, 1991.
<https://doi.org/10.18055/Finis1910>
- FERRON, F. A.; SIMÕES, J. C.; AQUINO, F. E. e SETZER, A. W. Air temperature time series for King George Island, Antarctica. *Pesquisa Antártica Brasileira*, v. 4, p. 155-169, 2004.
- FURBISH e ANDREW et al. The Use of Hypsometry to Indicate Long-Term Stability and Response of Valley Glaciers to Changes in Mass Transfer.1984
<https://doi.org/10.3189/S0022143000005931>
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. *Climate change 2013: The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- KNAP, W. H.; OERLEMANS, J. e CADEE, M. Climate sensitivity of the ice cap of King George Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Annals of Glaciology*, v. 23, p. 154- 159, 1996.
<https://doi.org/10.1017/S0260305500013380>
- MORRIS, E. M. e VAUGHAN, D. G. Spatial and temporal variation of surface temperature on the Antarctic Peninsula and the limit of variability of ice shelves, 2003.
- OVSTEDAL, D. O. e SMITH, R. I. L. *Lichens of Antarctica and South Georgia: A guide to their*

- Identification and Ecology. Cambridge: Cambridge University Press, p. 453, 2001.
- OERLEMANS, J., ANDERSON, B., HUBBARD, A., HUYBRECHTS, P., JÓHANNESSON, T., K NAP, W., SCHMEITS, M., STROEVEN, A., DE WAL, R. V., WALLINGA, J. & ZUO, Z. Modelling the response of glaciers to climate warming. *Clim. Dynam.* 14: 267-274, 1998.
<https://doi.org/10.1007/s003820050222>
- PARK, B. K.; CHANG, S. K.; YOON, H. I. e CHUNG, H. Recent retreat of ice cliffs, King George Island, South Shetland Islands, Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology*, v. 27, p. 633-635, 1998.
<https://doi.org/10.3189/1998AoG27-1-633-635>
- RAKUSA-SUSZCZEWSKI, S (Ed.). The maritime Antarctic coastal Ecosystem of Admiralty Bay. Warsaw, Polish Academy of Sciences, p. 27-30, 1993.
- ROSA, K.K.; SARTORI, R. Z. Análise das mudanças ambientais da Geleira Viéville, Baía do Almirantado, Ilha Rei George, Antártica. *Pesquisas em Geociências*, 42 (1): 61-71, jan./abr. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2015.
<https://doi.org/10.22456/1807-9806.78109>
- SETZER, A.; ROMÃO, M.; AQUINO, F. E. Antártica: Relação Climática com a América do Sul. Contribuição mensal em Item 7, *Climanálise Boletim de Monitoramento e Análise Climática*, CPTEC, Vol.23, nos. 1 a 12, 2008.
- SIMÕES, J. C.; BREMER, U. F.; AQUINO, F. E. e FERRON, F. A. Morphology and variations of glacial drainage basins in King George Island icefield, Antarctica. *Annals of Glaciology*, v. 29, p. 220-224, 1999.
<https://doi.org/10.3189/172756499781821085>
- SIMÕES, J. C. Antártica e as mudanças globais: um desafio para a humanidade. José Goldemberg (Coord.). *Série Sustentabilidade*. São Paulo: Blucher. p. 168, 2011.
- TURNER, J.; BINDSCHADLER, R. A.; CONVEY, P.; Di PRISCO, G.; FAHRBACH, E.; GUTT, J.; HODGSON, D. A.; MAYEWSKI, P. A. e SUMMERHAYES, C. P.(eds.). *Antarctic Climate Change and the Environment*. Cambridge, Scientific Committee on Antarctic Research, p. 1-32, 2009.
- USGS. United States Geological Survey. 2015. Earth Explorer. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov>>. Acesso em: 19/10/2017
- VAUGHAN, D.G.; MARSHALL, G.J.; CONNOLLEY, W.M.; PARKINSON, C.; MULVANEY, R.; HODGSON, D.A.; KING, J.C.; PUDSEY, C.J. e TURNER, J. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. *Climatic Change*, 60, p. 243- 274, 2003.
<https://doi.org/10.1023/A:1026021217991>

Recebido em: 02/05/2018
Aceito para publicação em: 13/11/2018