

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**EVOLUÇÃO DE LAGOS MARGINAIS AO GELO EM RESPOSTA À
RETRAÇÃO DE GELEIRAS NAS ILHAS NELSON E REI GEORGE,
ANTÁRTICA MARÍTIMA**

Manoela Araujo Gonçalves de Oliveira

ORIENTADORA: PROF. DRA. KÁTIA KELLEM DA ROSA

PORTO ALEGRE, ABRIL, 2020.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**EVOLUÇÃO DE LAGOS MARGINAIS AO GELO EM RESPOSTA À
RETRAÇÃO DE GELEIRAS NAS ILHAS NELSON E REI GEORGE,
ANTÁRTICA MARÍTIMA**

Manoela Araujo Gonçalves de Oliveira

Orientadora: Prof. Dra. Kátia Kellem da Rosa

Banca Examinadora:

**Prof. Dra. Rosemary Vieira
Prof. Dra. Carina Petsch
Prof. Dr. Luiz Felipe Velho**

**Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação
em Geografia como requisito
para a obtenção do título de
Mestre em Geografia.**

PORTO ALEGRE, ABRIL, 2020.

CIP - Catalogação na Publicação

Oliveira, Manoela Araujo Gonçalves de
Evolução de lagos marginais ao gelo em resposta à
retração de geleiras nas ilhas Nelson e Rei George,
Antártica Marítima / Manoela Araujo Gonçalves de
Oliveira. -- 2020.
105 f.
Orientadora: Kátia Kellem da Rosa.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, BR-RS,
2020.

1. Retração glacial. 2. Lagos proglaciais. 3.
Para-glacial. 4. Sistema de informações geográficas. 5.
Sensoriamento remoto. I. Rosa, Kátia Kellem da,
orient. II. Título.

**Dedico esta dissertação
à minha família.**

**“O que sabemos é uma
gota; o que ignoramos é
um oceano.” Isaac
Newton**

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Geografia, e ao Centro Polar e Climático pela infraestrutura disponibilizada nestes dois anos de mestrado. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

À Prof. Dra. Kátia Kellem da Rosa pela maravilhosa orientação, paciência, e disponibilidade, mesmo em finais de semana. Levarei comigo seus ensinamentos, que vão muito além da geografia, costumo dizer que quando eu “crescer” quero ser como você, não só como profissional mas também como pessoa. Agradeço também à Prof. Dra Carina Petsch, pelas contribuições, dicas e correções que contribuíram significativamente para o desenvolvimento deste trabalho. À Prof. Dra Rosemary Vieira pelas contribuições no processo de qualificação.

Aos colegas Filipe Idalino, Júlia Lorenz, Rafaela Mattos pelos momentos de ajuda no SIG. Às colegas Cleiva Perondi e Anne Krummenauer pela companhia nas “andanças geográficas” em Fortaleza. Aos demais amigos pela compreensão da ausência em tantos momentos especiais.

Ao meu esposo Guilherme por estar sempre ao meu lado me apoiando e incentivando a seguir na carreira acadêmica. Aos meus pais Rogério e Sandra por terem me ensinado a não temer as adversidades e nunca desistir dos meus sonhos. Aos meus irmãos pelo apoio e carinho.

E, principalmente a Deus por ter me permitido chegar até aqui e me fazer ver os melhor da vida todas as manhãs.

RESUMO

Esta dissertação objetiva caracterizar os lagos marginais ao gelo e investigar a sua variação em resposta à retração de geleiras nas ilhas Rei George (IRG) e Nelson (IN), Antártica Marítima, desde 1988. Os dados de sensores orbitais possibilitaram a realização de um inventário dos lagos glaciais nas áreas livres de gelo da IRG e IN e a geração de um Sistema de Informações Geográficas. A variação de área e número dos lagos e da perda de área das geleiras associadas foi estimada com dados de imagem de satélite Landsat, Digital Globe, Planet Scope, Spot, WorldView-2, e Sentinel-2. Para a análise geomorfométrica foram utilizados MDE Tandem-X e REMA. Foram analisados também dados observacionais e por Reanálise da temperatura média superficial do ar anual dos meses de inverno. Os lagos foram classificados por técnicas de agrupamento e estatística multivariada. Há 200 lagos, cobrindo um total de 2,34 km² de área, nas áreas livres de gelo das IN e IRG e se distribuem principalmente nos setores costeiros com baixas declividades (0-20%) e elevações (0-40m). Um banco de dados em um Sistema de Informações Geográficas do inventário dos lagos, para 1988/1989, 2000/2003 e 2018, é apresentado. Ocorreu um aumento de 455% na área total de lagos (de 0,18 km² para 1,02 km²) desde 1988/1989. O maior percentual de aumento na área total dos lagos, 190% na IN e 308% na IRG, ocorreu no período 1988-2000/2003. No período seguinte (2000-2018), houve uma desaceleração no aumento dos lagos (56% na IN e 46% na IRG) e na perda de área das geleiras. Um contínuo processo de perda de área ocorreu nas geleiras que alimentam os lagos desde 1988. Nas recentes décadas, algumas geleiras passaram de término marinho para em terra (e.g. Wanda, Znosco e Windy) e formaram lagos. Os lagos que apresentaram maiores variações percentuais de área foram os marginais ao gelo, ou seja, os alimentados por aporte de água de degelo glacial, destacando-se as áreas livres de gelo associadas à retração das geleiras Wanda, Viéville, Znosco e Anna Sul (636%, 214%, 173% e 110%, respectivamente). As menores variações percentuais (83%, 71%, 68%, 43% e 20%) ocorrem em lagos nas áreas livres de gelo associadas à retração das geleiras Baranowski, Polar Club (Península Potter), da calota de gelo da ilha Nelson, da geleira Fourcade (Península Barton) e das áreas livres de gelo na península Fildes, respectivamente. O aquecimento atmosférico, retenção da água de degelo glacial e a coalescência de lagos pequenos e costeiros influenciam a evolução dos lagos marginais ao gelo em escala decadal. As áreas com maiores mudanças devem ser monitoradas para verificar os impactos destas alterações na paisagem e na biota local, além de entender como o ambiente está respondendo às mudanças climáticas recentes na região.

Palavras-chave: Retração glacial. Lagos proglaciais. Paraglacial. Sistema de Informações Geográficas. Sensoriamento remoto.

ABSTRACT

This dissertation aims to characterize the ice-marginal lakes and investigate their variation in response to glacier shrinkage in King George (KGI) and Nelson Islands (NI), Maritime Antarctic, since 1988. Spaceborne remote sensing data were applied in a glacial lake inventory and a GIS elaboration. Lake and glacial fluctuations are estimated using Landsat, Digital Globe, Planet Scope, Spot, WorldView-2, e Sentinel-2. DEM Tandem-X and REMA were used for geomorphometrical analysis. In addition, annual mean surface air temperature data by station observations and the ERA-Interim reanalysis data were analyzed. Lake were grouped by multivariate statistics techniques. There are 200 glacial lakes covering an area of 2.34 km² in NI and KGI, there lakes are primarily located in lower (0-40 m) elevation and slopes (0-20%) sectors of the forelands. A glacial lake inventory is presented in this study for 1988/1989, 2000/2003 and 2018. The area of glacial lakes has expanded 455%. The increase in lake areas were 190% in IN and 308% in IRG for 1988-2000/2003 period. There is a deceleration in lake expansion and glacier shrinkage in both islands (56% for NI and 46% for KGI) in the following period. A continuous glacier area loss was reported since 1988. The Wanda, Znosco and Windy glaciers showed the marine to land-terminating changes in last decades. Wanda, Viéville, Znosco and Anna Sul ice-marginal lakes have higher expansion (636%, 214%, 173% and 110%, respectively) if compared with lakes of the ice-free land areas exposed by Baranowski Glacier, Polar Club Glacier (Potter Peninsula), NI Ice Cap, Fourcade Glacier (Barton Peninsula) shrinkages, and in Fildes Peninsula ice-free areas (83%, 71%, 68%, 43% and 20% respectively). The atmospheric warming, the increase of the meltwater glacier discharge, and the coalescence of small and shallow lakes to play important roles in ice-marginal lakes evolution at decadal-scale variations. The areas with the higher changes should be monitored to verify the impacts of these changes on the landscape and on the local biota and to understanding how the environment is responding to recent climate changes.

Key-Words: Glacial retraction. Proglacial lakes. Paraglacial. Geographic information systems. Remote sensing.

APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta Dissertação de mestrado, intitulada “**EVOLUÇÃO DE LAGOS MARGINAIS AO GELO EM RESPOSTA À RETRAÇÃO DE GELEIRAS NAS ILHAS NELSON E REI GEORGE, ANTÁRTICA MARÍTIMA**”, foi desenvolvida entre março de 2018 e abril de 2020 no Programa de Pós-Graduação em Geografia (POSGEA) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em colaboração com o Centro Polar e Climático (CPC) da UFRGS.

A Dissertação é composta das seguintes partes:

Capítulo I: Aspectos introdutórios

Trata sobre os aspectos introdutórios, objetivos, justificativa e área de estudo.

Capítulo II: Referencial teórico

Aborda as referências utilizadas para o desenvolvimento desta dissertação.

Capítulo III: Resultados e discussões na forma de artigos científicos:

Artigo submetido à Revista do Departamento de Geografia - USP, intitulado “Um inventário de lagos glaciais nas ilhas Nelson e Rei George, Antártica”.

Artigo submetido à Revista Brasileira de Cartografia, intitulado “Variações em lagos proglaciais nas últimas décadas na ilha Rei George e Nelson, Shetlands do Sul”.

Artigo submetido à Revista Brasileira de Geomorfologia, intitulado “Evolução dos lagos de áreas livres de gelo das ilhas Nelson e Rei George, Antártica Marítima desde 1988: um estudo comparativo por setor ambiental”.

Capítulo IV: Considerações finais

LISTA DE ABREVIATURAS

CAPES: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CPC: Centro Polar e Climático
CNPq: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
Embrapa: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAPERGS: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul
IRG: Ilha Rei George
IN: Ilha Nelson
MDE: Modelo digital de elevação MSI: *Multispectral Instrument*
NDWI: Normalized Difference Water Index
OLI: Imageador Operacional da Terra
PA: Península Antártica
REMA: The Reference Elevation Model of Antarctica
SIG: Sistema de Informação Geográfica
SPOT: *Système Probatoire pour l' Observation de la Terre*
UTM: Universal Transversa de Mercator
USGS: Serviço Geológico dos Estados Unidos
WGS: Sistema Geodésico Mundial

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS.....	9
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	11
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo Geral.....	12
1.2.2 Objetivos específicos	13
1.3 Justificativa.....	13
1.4 Área de Estudo.....	14
CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Dinâmica glacial e caracterização do ambiente livre de gelo.....	18
2.2 Lagos proglaciais.....	19
2.2.1 Sensoriamento remoto e os lagos proglaciais	21
2.3 Transitoriedade Paraglacial.....	24
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
3.1 ARTIGO 1 : UM INVENTÁRIO DE LAGOS GLACIAIS NAS ILHAS NELSON E REI GEORGE, ANTÁRTICA MARÍTIMA	30
3.2 ARTIGO 2 : VARIAÇÕES EM LAGOS PROGLACIAIS NAS ÚLTIMAS DÉCADAS NAS ILHAS REI GEORGE E NELSON, SHETLANDS DO SUL.....	47
3.3 ARTIGO 3 : EVOLUÇÃO DOS LAGOS DE ÁREAS LIVRES DE GELO DAS ILHAS NELSON E REI GEORGE, ANTÁRTICA MARÍTIMA DESDE 1988: UM ESTUDO COMPARATIVO POR SETOR AMBIENTAL	61
CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
ANEXOS.....	104

1.1 Introdução

Para a Península Antártica (PA) e suas ilhas, estima-se que a temperatura atmosférica superficial da região tenha aumentado desde 1950, sendo indicada, em escala global, como uma das áreas mais sensíveis às mudanças do clima (TURNER *et al.*, 2009). Um estudo recente de Comin e Justino (2017), na ilha Rei George, também mostrou um aumento de temperatura entre 0,8 °C e 1 °C para o período de 1955-2010, e as geleiras responderam substancialmente a essas mudanças (SIMÕES *et al.*, 2004; 2015, ARIGONY-NETO; BREMER; SIMÕES, 2001; KEJNA; ARAZNY; SOBOTA, 2013; SOBOTA; KEJNA; ARAZNY, 2015; PETLICKI *et al.*, 2017; SZIŁO e BIALIK, 2018; PUDEŁKO *et al.*, 2018).

Com a tendência de aumento da temperatura nas últimas décadas para diversas áreas da Criosfera, as geleiras passam a retrair e expõem novas áreas livres de gelo. Para Slaymaker e Kelly (2007), o aumento dessas áreas decorre de alteração do clima e ocasiona uma série de transformações locais, e a diminuição do albedo das superfícies faz com que os solos absorvam maior energia solar, o que pode afetar o microclima do solo. As recentes áreas livres de gelo ficam disponíveis para serem colonizadas por plantas e provêm novos habitats para fauna (SIMÕES *et al.*, 2004; BREMER; ARIGONY NETO; SIMÕES, 2004; BRAUN e GOSSMANN, 2002; CONVEY, 2006; ANDRADE *et al.*, 2014).

Os ambientes marginais ao gelo compõem o sistema paraglacial e periglacial e refletem todas as alterações climáticas que estão ocorrendo nas últimas décadas, revelando a variabilidade climática regional. Todos os componentes no sistema paraglacial se relacionam, e são sensíveis às mudanças climáticas em andamento. O sistema é a interação dos componentes. Com o derretimento de neve e a retração há a formação de lagos nos setores marginais às geleiras. A formação, evolução e persistência de um lago marginal ao gelo está diretamente ligada à dinâmica glacial e à natureza do ambiente de entorno (CARRIVICK e TWEED, 2013).

A retração de geleiras é responsável pelo aumento de área e número de lagos proglaciais (CARRIVICK e TWEED, 2013; KUNZLER *et al.*, 2010). A expansão no número e área dos lagos é efeito hidrológico das mudanças climáticas na Criosfera e

podem ser observadas, por exemplo, no Ártico (SMITH *et al.*, 2005; RIORDAN; VERBYLA; MCGUIRE, 2006; CARROL *et al.*, 2011; JONES *et al.*, 2011; CHEN *et al.*, 2014; KARLSSON; JARAMILLO; DESTOUNI, 2015). Sanches (2013), verificou que a elevação da temperatura atmosférica, provavelmente contribuiu para a perda de superfície das geleiras e na formação de novos lagos proglaciais das geleiras do Nevado Cololo, Cordilheira dos Andes, na Bolívia. No Himalaia, o lago Imja Glacier Lake aumentou de área em função da retração da geleira e causou rompimentos (WATANABE; IVES; HAMMOND, 1994).

Estes trabalhos são relacionados principalmente a ambientes glaciais de montanha e discutem os impactos da tendência de aquecimento global nas últimas décadas. Na Antártica Marítima, Cana, Rosa e Andrade (2018) trabalharam com a evolução de lagos na Península Potter, em escala interanual, na década de 2010, já Petsch (2018) analisou qual seria a evolução futura de lagos na Península Fildes com o cenário de retração da geleira Collins.

O conhecimento da distribuição espacial dos lagos em um Sistema de Informações Geográficas é relevante para o monitoramento destes sistemas lacustres e para a compreensão dos impactos das mudanças climáticas nas áreas livres de gelo nesta região marítima Antártica. Quanto ao estudo dos lagos, salienta-se que o alto custo e logística restringem as viagens de pesquisa para as regiões polares. Nesse sentido, o uso do Sensoriamento Remoto permite o monitoramento da cobertura de gelo de um grande número de lagos em uma grande área (PIERSON *et al.*, 2011).

A presente dissertação tem como questionamentos: (a) qual é a quantidade de lagos localizados nas ilhas Rei George e Nelson? (b) qual a relação entre a formação e variação de lagos marginais ao gelo e o processo de retração das geleiras? (c) O contexto geomorfométrico e a distância da frente da geleira e do mar influenciam na variação dos lagos ao longo das últimas décadas?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação é caracterizar os lagos marginais ao gelo e investigar a sua variação em resposta à retração de geleiras nas ilhas Rei George e

Nelson, Antártica Marítima, desde 1988.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Realizar um levantamento de lagos glaciais nas ilhas Nelson e Rei George, buscando estabelecer padrões espaciais;
- b) Analisar a relação da evolução dos lagos marginais ao gelo em resposta à perda de área das geleiras e a variabilidade na temperatura média superficial do ar nas últimas décadas;
- c) Agrupar os lagos por suas características geomorfológicas e relacionar às variações de área dos lagos no período 1988/89-2018;
- d) Gerar um banco de dados geoespacial do mapeamento atualizado dos lagos glaciais.

1.3 Justificativa

Entende-se que os principais trabalhos relacionados à processos paraglaciais em áreas lacustres localizam-se em ambientes de montanha, conforme destacam Knight e Harrison (2014), e não há estudos de monitoramento da dinâmica de formação e variação (área e número) de lagos que relacionem à retração de geleiras na ilha Rei George e Nelson, na Antártica Marítima, em escala interdecadal.

Considerando a importância dos lagos como indicadores de mudanças climáticas, se faz necessário realizar o monitoramento das áreas livres de gelo e o inventário dos lagos na Antártica Marítima, como as IN e IRG, onde são pobremente documentados em número, extensão, volume e contexto ambiental.

O sistema hidrológico das áreas livres de gelo responde às mudanças de temperatura do ar, que irão, juntamente com outros parâmetros ambientais, controlar sua evolução ao longo dos anos. Considera-se que as mudanças climáticas na Antártica estão impactando e irão alterar o regime de lagos marginais ao gelo na área de estudo. A retração de geleiras produz um aumento direto na temperatura da água, e gera o aquecimento das rochas e solos da bacia glacial, e, por consequência, aumenta o derretimento (QUESADA; KAUP, 2006). Como resultado, esse processo pode ocasionar o aumento em área e em quantidade de lagos glaciais (WANG; YAO; YANG, 2011).

O primeiro inventário e a caracterização dos lagos localizados nas áreas livres de gelo na IN e IRG a ser disponibilizado é relevante, pois os lagos são considerados importantes arquivos paleoclimáticos e paleoambientais (COHEN 2003; BERTRAND; BOËS; CASTIAUX ; CHARLE, 2005): eles modificam regimes de fluxo hidrológico, preservam arquivos sedimentares com informações sobre o comportamento das geleiras (CARRIVICK e TWEED, 2013). Também são considerados importantes áreas de evaporação e desenvolvimento da biota, além de serem importantes para o albedo terrestre, e ainda fontes de produção de carbono e metano (MAROTTA, 2009).

O entendimento da evolução interdecadal dos lagos marginais ao gelo pode auxiliar no entendimento dos impactos das mudanças climáticas nas áreas livres de gelo na Antártica Marítima. Também é relevante compreender melhor a resposta dos lagos marginais ao gelo à retração das geleiras nesta área da Antártica, conhecida como uma das mais sensíveis às mudanças do clima (TURNER *et al.*, 2009; SIMÕES *et al.*, 2011).

A geração de um banco de dados em um Sistema de Informações Geográficas pode promover a continuidade do monitoramento da variação dos lagos marginais ao gelo e o maior entendimento das causas do aumento em área e em quantidade de lagos glaciais.

As informações das áreas de maior e menor alterações com o tempo, assim como a caracterização do contexto ambiental de cada setor em que os lagos se localizam, revela os setores que devem ser priorizados em um sistema de monitoramento e entendimento das repercussões ambientais das mudanças constatadas.

1.4 Área de Estudo

As ilhas Rei George e Nelson fazem parte das 29 ilhas que compõem as Shetlands do Sul, este arquipélago situa-se a noroeste da PA. A ilha Rei George (Figura 1) é a maior delas, possui uma área de 1.250 km² e 80 km de comprimento (maior eixo), está orientada no sentido sudeste-nordeste e, com 15 km de largura (menor eixo) no sentido oposto. Situa-se entre as coordenadas 61° 50' e 62° 15' S e 57° 30' e 59° W. As áreas livres de gelo na ilha correspondem a menos de 10% (BREMER, 1998; ARIGONY-NETO, 2001; ROSA, 2012). Já a ilha Nelson possui

uma área de 200 km², o ponto mais elevado na ilha está a 313 metros acima do nível do mar.

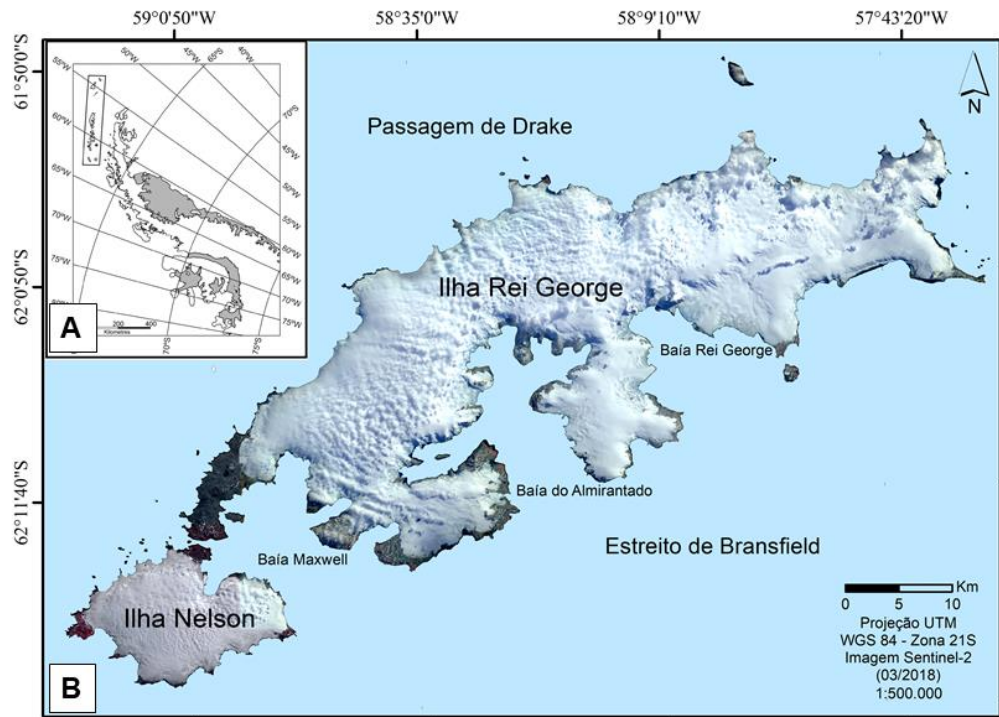


Figura 1 - Localização das ilhas Nelson e Ilha Rei George (B) na Península Antártica (A).

O embasamento do arquipélago é formado por rochas sedimentares, metassedimentares, vulcânicas e de suítes intrusivas formadas desde o período Pré-Cambriano até o Paleogeno e Neogeno. A estratigrafia litológica constitui-se de sedimentos do Paleozoico Superior, eventualmente metamorfizados em função dos processos vulcânicos e de intrusões plutônicas (CURL, 1980).

A origem das ilhas está associada à gênese do arco insular magmático de Scotia, que evoluiu durante os processos de fragmentação do Gondwana (MARTÍNEZ DE PISON; LOPEZ-MARTINEZ; ARCHE, 1992). Isto teve início há cerca de 180 milhões de ano quando se iniciaram os processos de que resultaram no rompimento daquele supercontinente. A partir daí tem início a deriva das antigas partes constituintes do Gondwana, ou seja, os atuais continentes da África, América do Sul, Austrália e Antártica, além de ilhas como Madagascar e Nova Guiné (BREMER, 1988). O arco de Scotia constitui atualmente uma feição tectônica que se prolonga entre o extremo nordeste da Península Antártica e a ponta meridional da América do Sul (SUGDEN e JOHN, 1976) e se apresenta como uma cordilheira submersa, as ilhas que dele emergem fornecem um registro fragmentário de

atividades tectônicas e sedimentação desde pelo menos o Cretáceo Superior, possivelmente desde o Pré-Cambriano. As Shetlands do Sul, juntamente com outras ilhas na região, compõem as partes emersas do Arco de Scotia.

A precipitação média anual nas ilhas varia entre 350 e 500 mm, sendo que a maior parte dessa precipitação ocorre em forma de neve. As precipitações líquidas concentram-se durante o verão (SIMÕES *et al.*, 1999; ØVSTEDAL e SMITH, 2001). Conforme a classificação climática de Köppen (1948), nas regiões polares há dois domínios climáticos: o Ef (Glacial Polar) e o Et (Glacial Tundra). No domínio Ef, as temperaturas médias mensais sempre são negativas, enquanto que no domínio Et 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).

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; BREMER, 1998; BRAUN, 2001). A região da PA está localizada próxima à Zona da Frente Polar Antártica, marcada pelo encontro de massas de ar frias subpolares com massas de ar quentes das latitudes médias, e no limite da extensão do gelo marinho na estação do inverno, cuja dinâmica sazonal provoca variações no balanço de energia do oceano (MENDES, 2011). Dentre outros fatores, essas condições locais provocam grande variabilidade climática interanual e intersazonal, tornando essa região antártica mais suscetível a mudanças ambientais (SKVARCA; DE ANGELIS, 2003).

A mais recente expansão das geleiras ocorreu durante a Pequena Idade do Gelo entre 1.200 e 1.800 D.C., sendo registrada por morainas de avanço lateral e frontal (CURL, 1980; BIRKENMAJER, 1981; CLAPPERTON e SUGDEN, 1988; BJÖRK *et al.*, 1996; SEONG *et al.*, 2006).

Estudos de geomorfologia na área de estudo têm evidenciado as consequências do aquecimento nas últimas décadas. Rosa *et al.*; (2009) realizou

estudo comparativo da evolução dos ambientes proglacial das geleiras Wanda e Ecology e constatou que ambas têm regime termal basal temperado e apresentam geoformas e depósitos no setor proglacial em decorrência do processo de retração das últimas décadas. Vieira *et al.*; (2015) realizou análises de sedimentos de áreas úmidas e lagos na península Fildes, e evidenciou variações climáticas ambientais, identificou que os sedimentos presentes em áreas úmidas apresentam taxas de produção de metano quarenta vezes maiores e mais sensíveis ao efeito do aquecimento global em comparação a de um lago. Cana (2018) analisou a evolução dos sistemas lacustres na península Potter e evidenciou que os lagos proglaciais sofreram alterações de área em resposta à dinâmica de retração da geleira Polar Club. Perondi (2018) investigou a dinâmica das geleiras da margem leste do campo de gelo Warszawa em resposta ao processo de retração glacial e evidenciou a exposição de formas de relevo nos ambientes livres de gelo com a formação da rede de drenagem glaciofluvial e glaciolacustre e a formação de ambientes proglaciais com exposição de morainas laterais, frontais, latero-frontais e eskers.

Petsch (2018) criou um cenário de variação espacial da frente da geleira Collins que revela a continuidade do processo de retração para as próximas décadas dando lugar a uma área com grande quantidade de sedimentos e com alta quantidade de canais caracterizando a instabilidade de um ambiente paraglacial.

A tendência de aumento de lagos em função da retração de geleiras é observada em diversas partes do mundo (DYURGEROV e MEIER, 1997; BOLCH *et al.*, 2012), porém para Antártica não há estudos.

2.1 Dinâmica Glacial e caracterização do ambiente livre de gelo

As geleiras da Shetlands do Sul são massas de neve e gelo formadas pelo processo de metamorfismo da neve, estas deslocam-se da parte mais alta para a mais baixa de forma contínua, e sua formação ocorre quando a neve permanece no mesmo local durante o ano, acumulando até transformar-se em gelo (SIMÕES *et al.*, 2004). Algumas geleiras não têm movimento, tornam-se um gelo estagnado, levando ao seu progressivo desaparecimento.

As geleiras podem se formar em qualquer zona climática onde o acúmulo de neve excede a taxa de derretimento (CUFFEY e PATERSON, 2010). Se a taxa de acumulação for alta e a perda devido a fusão for baixa uma geleira se formará rapidamente, uma vez estabelecida, sua sobrevivência dependerá do equilíbrio entre a acumulação e a ablação (BENNET e GLASSER, 1996). A acumulação refere-se ao setor em que a geleira recebe precipitação de neve, já ablação refere-se aos processos pelo qual a neve, o gelo, e a água são perdidos por uma geleira que inclui derretimento, evaporação, erosão eólica, perda de gelo por avalanches ou pelo desprendimento de icebergs (SIMÕES *et al.*, 2004).

As geleiras encontram-se normalmente em estado de equilíbrio dinâmico, com ganho de massa na sua área de acumulação e perda de massa na sua área de ablação. Estas duas áreas são separadas pela linha de equilíbrio (REES, 2006) (Figura 2). A linha de equilíbrio é uma linha na superfície de uma geleira na qual, durante o período de um ano, a ablação é igual à acumulação. A altitude da linha de equilíbrio está intimamente ligada com o clima local, particularmente com a variação de precipitação e temperatura do ar, esta linha aumenta em resposta à diminuição do volume de precipitação de neve e/ou aumento da temperatura positiva do ar e vice-versa (BENN e EVANS, 2006).

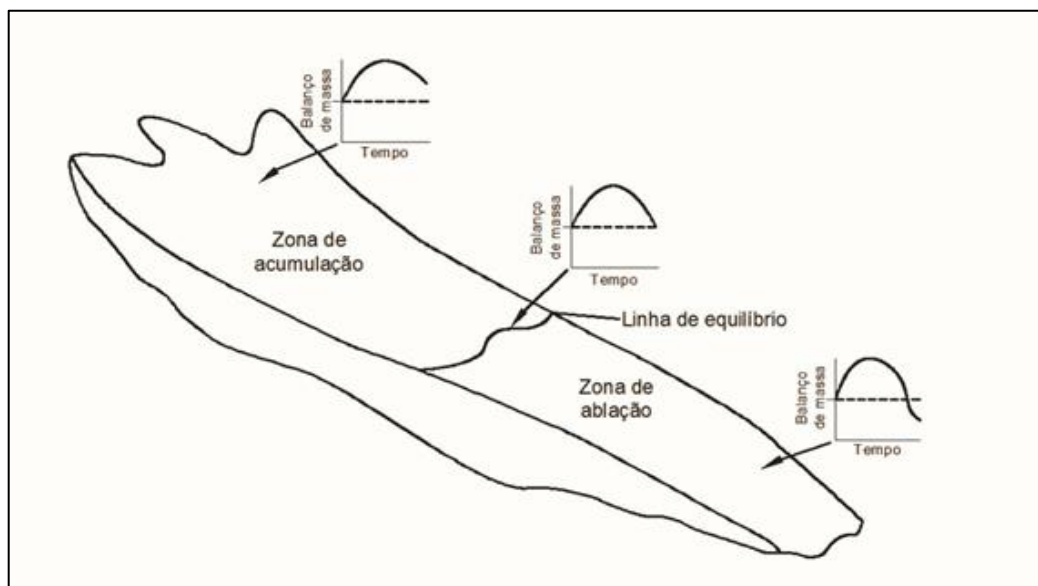


Figura 2 - Modelo idealizado da variação do balanço de massa nas principais zonas de uma geleira em relação às variações sazonais. Fonte: Cuffey e Paterson (2010).

As geleiras podem ser classificadas em 3 categorias baseado na temperatura do gelo ou abaixo o ponto de fusão sob pressão: frias, temperadas ou politermais (BENN e EVANS, 2010). As geleiras politermais são as mais comuns e refletem vários fatores, como a temperatura na superfície na zona de acumulação, variações na espessura do gelo, a velocidade do gelo e também o grau geotérmico (CUFFEY e PATERSON, 2010). A temperatura na base influencia na deformação do gelo e no deslizamento basal e, por sua vez, relaciona-se com os processos geomorfológicos glaciais.

Com a retração, muitas geleiras tornam-se de base terrestre e há a exposição de formas de relevo que caracterizam um ambiente marginal ao gelo ou proglacial subaéreo.

2.2 Lagos Proglaciais

Também reconhecido como geofoma glaciolacustre, os lagos proglaciais podem formar-se de duas maneiras: pelo contato direto com a frente de uma geleira ou pelo represamento através de uma moraina terminal de recessão. A alimentação de lagos na ilha Rei George é essencialmente por derretimento de neve ou gelo através de canais glaciofluviais, sendo que a dinâmica do derretimento controla o tamanho e a localização dos lagos nas escalas de tempo interanuais e sazonais (PETSCH, 2018). Estes canais glaciofluviais transportam sedimentos e fazem estes

chegar até os lagos formando uma pluma de sedimentos em suspensão e sedimentação laminada (SMITH e ASHLEY, 1985; LØNNE, 1995, ASSINE e VESELY, 2015).

Os canais glaciofluviais são formados pela água de degelo das geleiras (Figura 3), eles podem ter ou não contato direto com a margem da geleira, os canais que têm contato direto com a margem apresentam maior influência do processo de fusão glacial, pois recebem fluxos de água de degelo subglacial, formando canais e leques deposicionais e áreas alagadiças com múltiplos canais entrelaçados (TOMAZELLI, 2002; BENN e EVANS, 2010).

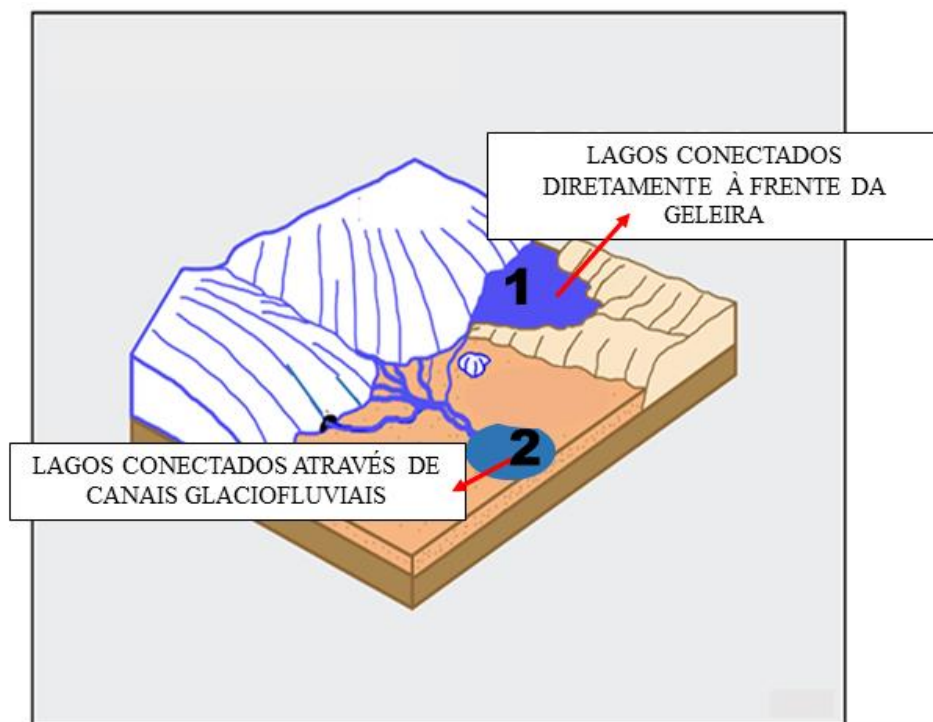


Figura 3 - Lagos marginais ao gelo e canais glaciofluviais.

Segundo Shridhar, Kamana, e Alvarinho (2015) os lagos proglaciais servem como indicativo de mudanças climáticas locais e se formam principalmente perto das margens das geleiras, ou em áreas planas de plataformas marinhas de abrasão soerguidas. Existe uma grande diversidade de lagos em tamanho, modo de formação e tempo (CARRIVICK e TWEED, 2013). Os lagos se desenvolvem quando as geleiras recuam, geralmente se formando em bacias glacialmente esculpidas ou atrás de barreiras de gelo ou sedimentos nas margens das geleiras. Seu estudo é importante, pois eles modificam os regimes de fluxo hidrológico, retêm sedimentos; preservam um arquivo sedimentar de informações sobre o comportamento das geleiras, fluxo de sedimentos, clima; e devido ao seu potencial para gerar

inundações devastadoras.

Petsch (2018) criou cenário de variação espacial da frente da geleira Collins que revela a continuidade do processo de retração para as próximas décadas dando lugar a uma área instável e com alta quantidade de canais conectados aos lagos. Picos diários de descarga acontecem nos canais de drenagem algumas horas depois da fusão máxima, o que ocorre em função da distância que a água tem que percorrer através e abaixo da geleira e a configuração da rede de drenagem interna (BENN e EVANS, 2010; MAIZELS, 1995). A rede de drenagem desenvolve-se por completo durante a estação do derretimento já que a entrada de água de degelo termina no fim da temporada de ablação, as descargas subglaciais diminuem e os canais do interior do corpo da geleira tendem a fechar em resposta à crescente pressão e mais rápida deformação gelo. Em algumas cavidades é possível que ocorra a retenção da água próximo ao substrato, proporcionando possíveis núcleos no sistema de drenagem para o ano seguinte (BENN e EVANS, 2010). Os canais de drenagem proglacial integram toda a água derretida numa bacia de drenagem glacial (COWTON *et al.*, 2013). A sensibilidade dos lagos polares a mudanças se baseia na proximidade térmica com o congelamento, que se aplica os limites críticos para respostas ambientais, incluindo a temperatura, a extensão do gelo, cobertura de neve, disponibilidade de luz e albedo (VINCENT, 1988).

As condições topográficas e declividades também são importantes na formação de lagos. Rosa *et al.*, (2015), por exemplo, realizaram estudo para ambiente proglacial da geleira Wanda e evidenciaram que o lago formado na frente da geleira é ancorado pelo sistema de barreira-lagoa desenvolvido na área inferior do vale, esculpido por ação glacial quando a frente da geleira era de maré, o que fez com que gerasse uma moraina de recessão. Na área proglacial da geleira Wanda as declividades são de 20 a 45% (OLIVEIRA, 2018), isso mostra que as morainas têm papel fundamental neste processo de ancoragem, pois sem elas, os canais glaciofluviais terminariam diretamente no mar e não formariam lagos proglaciais.

2.2.1 Sensoriamento Remoto e os lagos proglaciais

A identificação dos lagos proglaciais pode ser auxiliada pelo sensoriamento remoto, imagens de satélite de diferentes anos fornecem informações das mudanças de área e número dos lagos. Essas imagens contribuem para monitoramento das

mudanças dos lagos ao longo do tempo. Os sistemas ópticos de satélite têm sido aplicados com mais frequência à pesquisa de extração de lagos ou corpos d'água. As partes do espectro eletromagnético (EM) coberto por esses sensores incluem o visível e o infravermelho próximo (NIR) variando de 0,4 a 1,3 μm , o infravermelho de onda curta (SWIR) entre 1,3 e 3,0 μm , o infravermelho térmico (TIR) de 3,0 a 15,0 μm e o comprimento de onda longo infravermelho (LWIR) de (7 - 14 μm) (SHRIDHAR; KAMANA; ALVARINHO, 2015).

Cana (2018) realizou mapeamento das feições glaciolacustres das áreas livres de gelo na Península Potter, em escala numérica de 1:30.000, através da interpretação visual nas imagens Quickbird e COSMO-SkyMed, dados morfométricos, perfis topográficos, a análise visual de fotografias obtidas em atividades de campo também auxiliaram na interpretação e mapeamento. A imagem QuickBird de 2007, sensor multiespectral com resolução de 2,44m e 0,61m composição RGB 432, foi utilizada para a análise das feições geomorfológicas e rede de drenagem, uma vez que utiliza a banda do infravermelho próximo, importante na identificação de superfícies cobertas por vegetação nas áreas livres de gelo da península Potter. Para a interpretação foi considerado o comportamento espectral dos alvos analisados, e consideradas as feições na cena com imagens disponibilizadas pela Digital Globe e apresentadas no Google Earth. Também utilizou imagens COSMO-SkyMed com polarização HH e VV para discriminar feições geomorfológicas nas áreas livres de gelo da península, como lagos e alagadiços, interface entre os cordões lineares, interface entre gelo/rocha/sedimentos/água e interface entre pequenos lagos/sedimentos encharcados/cobertura vegetal (musgos e líquens). A interpretação das imagens SAR baseou-se no exame visual em relação aos tons distintos nas imagens, texturas, tamanho, padrões de forma, sombras de radar, posição topográfica, orientação e contexto geomorfológico regional. Realizou testes com filtros específicos do software ENVI 4.7 nos dados COSMO-SkyMed tais como: morfológicos (Erode, Dilate, Opening e Closing), adaptativos (Lee, Frost, Gamma, Kuan e Local Sigma) e os filtros convolutivos (Passa alta, Passa baixa, Laplacian, Direcionais e Gaussian), em diferentes configurações nas janelas de Kernel em tamanho de 3x3, com objetivo de melhorar a identificação visual de feições presentes nas imagens e mapeamento.

Petsch (2018) avaliou a evolução da formação dos lagos da península Fildes, sul da ilha Rei George, Antártica Marítima, utilizando imagens TerraSAR-X (TSX).

Além disso, foi feita uma correlação entre a variação da área de superfície líquida com os dados de temperatura, precipitação e vento. As imagens TSX proporcionam um mapeamento temporal inédito para a área de estudo possibilitando mapear os lagos em todo o verão de 2011. Neste estudo, Petsch (2018) comenta que a resolução espacial de 3 m permitiu a classificação de lagos com menores áreas, que não podem ser visualizadas em imagens ópticas da série Landsat. Usando a área obtida a partir da classificação das imagens TSX, a temperatura do ar atmosférica demonstra correlação significativa em 7 dos 15 lagos e para a precipitação a correlação ocorreu em 11 lagos.

Para estimar as mudanças em lagos na região subártica boreal do interior do Alasca, Riordan; Verbyla; Mcguire, (2006) usaram imagens de satélite entre os anos 1950 e 2002, analisaram também fotografias aéreas pancromáticas digitalizadas da década de 1950, fotografias aéreas infravermelhas coloridas de 1978 a 1982 e imagens digitais do Sensor Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) de 1999 a 2002. As imagens do Landsat Thematic Mapper TM de 1991 a 1995 forneceram um período de observação extra para algumas regiões do estudo. As fotografias aéreas pancromáticas da década de 1950 foram impressas em escala original de 1:40.000, obtida no US Geological Survey (USGS), Anchorage, Alaska. As fotografias aéreas de 1978-1982 eram de 1:60.000 em transparências infravermelhas em cores do Programa de Fotografia Aérea de Alta Altitude do Alasca (AHAP) e estão disponíveis no GeoData Center, Fairbanks da Universidade do Alasca. Todas as fotografias foram digitalizadas a 600 dpi para criar imagens digitais. As imagens digitais Landsat TM e ETM+ foram disponibilizadas pelo EROS Data Center, Sioux Falls, Dakota do Sul. Todas as imagens foram do período de meados de junho a meados de agosto. As imagens digitais foram reprojetadas para UTM, NAD27. Utilizaram mapas topográficos 1:63.360 como fonte de pontos de controle, cada imagem digital foi retificada usando um modelo polinomial de segunda ordem com base em pelo menos 25 pontos de controle. Cada modelo de retificação tinha um erro médio quadrático médio de raiz inferior a 1 pixel de imagem de satélite (30 m). Após concluir o processo de retificação, obtiveram uma série temporal de imagens espacialmente alinhadas para cada região de estudo. Realizaram delineamento manual dos lagos com área mínima de 0,2 ha. A linha costeira de cada lago foi traçada manualmente como uma área poligonal usando um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Realizaram um inventário de lagos de cada período e

assim foi possível realizar um monitoramento da mudança de área e número de lagos no período. Os lagos glaciais são principalmente mapeados e monitorados usando interpretação e mapeamento manual baseado em dados, fotos aéreas e dados ópticos de satélite (HAEBERLI *et al.*, 2001; HUGGEL *et al.*, 2002; KAAB *et al.*, 2005b; QUINCEY *et al.*, 2005; KAAB, 2008; BOLCH *et al.*, 2008, 2011; MERGILI *et al.*, 2011, 2012; TADONO *et al.*, 2011; UKITA *et al.*, 2011).

Estes inventários de lagos glaciais são importantes, pois fornecem uma base para monitoramento de desastres causados por lagos glaciais. Zhang *et al.*, (2015) fizeram o inventário de lagos glaciais, utilizando vetorização manual, para o platô tibetano, para os anos de 1990, 2000 e 2010 usando dados Landsat TM / ETM +. Com este importante banco de dados, Zhang *et al.*, (2015) fornecem uma base para avaliação a longo prazo de desastres causados por inundações causadas principalmente por lagos glaciais.

Wilson *et al.*, (2017) usaram as imagens e informações do satélite Landsat disponíveis no Google Earth e Bing Maps para compilar os primeiros inventários de lagos glaciais dos Andes Central e da Patagônia nos períodos de observação de 1986, 2000 e 2016. Wilson *et al.*, (2017) para garantir a precisão, o tipo de lago glacial foi classificado com o uso de imagens de satélite de alta resolução recentemente adquiridas (<5 m) disponíveis nos geonavegadores do Google Earth e Bing Maps. Os autores ressaltam que as datas reais de aquisição de imagens para cada período diferem em um máximo de ± 3 anos, de acordo com os problemas de disponibilidade e qualidade da imagem Landsat, como como cobertura de neve / gelo, nebulosidade e sombreamento de montanhas.

2.3 Transitoriedade Paraglacial

O sistema paraglacial inclui processos não glaciais acontecendo em ambiente glacial, podendo ocorrer no ambiente proglacial. Estes processos não se configuram pela localização e sim por sua modificação de ambiente glacial para não-glacial (BALLANTYNE, 2002 a, b), eles são processos que perturbam o ambiente, destroem as formas, alteram a carga sedimentar e mudam a paisagem (BALLANTYNE, 2002b). De acordo com Benn e Evans (1998) e Ballantyne (2002a), não há processos exclusivos para ambientes paraglaciais, para eles paraglacial deveria ser

considerado como um período de tempo.

Benn e Evans (1998) propuseram que o termo paraglacial possa ser definido como "o período de rápido ajuste após o recuo das geleiras", e Ballantyne (2002b) propôs a reformulação da definição de paraglacial para "a escala de tempo sobre a qual os sedimentos glaciais buscam alcançar estabilidade."

No ambiente proglacial, os processos paraglaciais são intensos e transitórios, isto ocorre porque no proglacial as formas são recentemente formadas e assim estão mais instáveis a ação do vento, chuva, aos canais formados pela água de degelo, movimentos de massa nas encostas, queda de blocos, rastejamento de solo, degelo sazonal da neve, depósitos de rocha, efeitos da maré, ondas, entre outros (CARRIVICK e HEKMAMN 2017). A evolução dos lagos está relacionada a esta transitoriedade (CARRIVICK e HEKMAMN 2017).

De acordo com Ballantyne (2002), processos paraglaciais são considerados um dos primeiros efeitos das mudanças ambientais. Os movimentos gravitacionais promovem a movimentação de partículas a jusante na encosta. A ação da gravidade e o degelo lubrifica e aumenta o peso dos fragmentos rochosos, acelerando o movimento. A presença de setores de maior declividade nas áreas rochosas recentemente expostas providencia condições para o desenvolvimento de processos de fluxo de detritos (ROSA *et al.*, 2012) (Figura 4).



Figura 4- Processo de fluxo de detritos das morainas na geleira Wanda, na ilha Rei George, Antártica. (Fonte: Rosa, 2012)

Primeiramente, com a erosão glacial paredões rochosos tornam-se mais íngremes e, secundariamente, o acúmulo de neve pode propiciar condições de falta de equilíbrio na pendente rochosa, provocando um movimento gravitacional (BENN e EVANS, 1998). No sopé destas áreas ocorre a formação de depósito de tálus (AUGUSTINUS, 1995). Na superfície dos depósitos morânicos ocorre a ação do intemperismo físico, resultando na fragmentação dos grãos.

A fim de deixar claro que os ambientes paraglaciais exigem contexto de sistemas, Slaymaker (2009) Carrivick e Hekmann (2017) propõem uma definição: “uma paisagem de transição que está em processo de recuperação da perturbação da glaciação”. Esta definição faz uso dos termos “transitório” e “perturbação” (HEWITT, 2006) que colocam o conceito firmemente no reino do pensamento sistêmico e isso torna possível ajustar sua aplicação a sistemas de diferentes escalas espaciais. Estas áreas estão passíveis de mudanças, erosão e retrabalhamento. É um sistema transitório, pois seu comportamento não é constante, as observações feitas podem não representar o equilíbrio dos lagos (KNIGHT e HARRISSON, 2018). Ainda segundo Knight e Harrison (2018), os estudos do sistema paraglacial são direcionados a acompanhar a evolução dos lagos e as áreas de risco a inundação (KNIGHT e HARRISSON, 2018).

As áreas proglaciais na ilha Rei George estão suscetíveis à atividade paraglacial, e alguns estudos já têm evidenciado este processo. Com a retração da geleira Wanda, nos últimos anos, surgiu um ambiente proglacial suscetível a uma progressiva modificação por processos paraglaciais (ROSA *et al.*, 2012). A atividade paraglacial evidenciada nesta área foi o retrabalhamento dos depósitos glaciais por atividades glaciofluvial e fluxo de detritos. Estes processos paraglaciais são evidenciados como consequência do processo de retração ocorrido na geleira.

Na península Potter (Figura 5), as áreas proglaciais são muito dinâmicas e apresentam processos paraglaciais ativos. As vertentes orientadas para Leste ou Oeste são mais suscetíveis à ação eólica intensa, enquanto as vertentes orientadas para Nordeste, Noroeste, Sudeste e Sudoeste são suscetíveis à ação eólica de média suscetibilidade, enquanto as vertentes orientadas para Norte e Sul são suscetíveis à ação eólica com menores intensidades (ANDRADE, 2011). Nos ambientes mais íngremes também há atividade paraglacial ativamente, pois com o aprofundamento, decorrente dos canais glaciofluviais e ravinamentos, as vertentes ficam mais instáveis e pode gerar movimentos de massa.

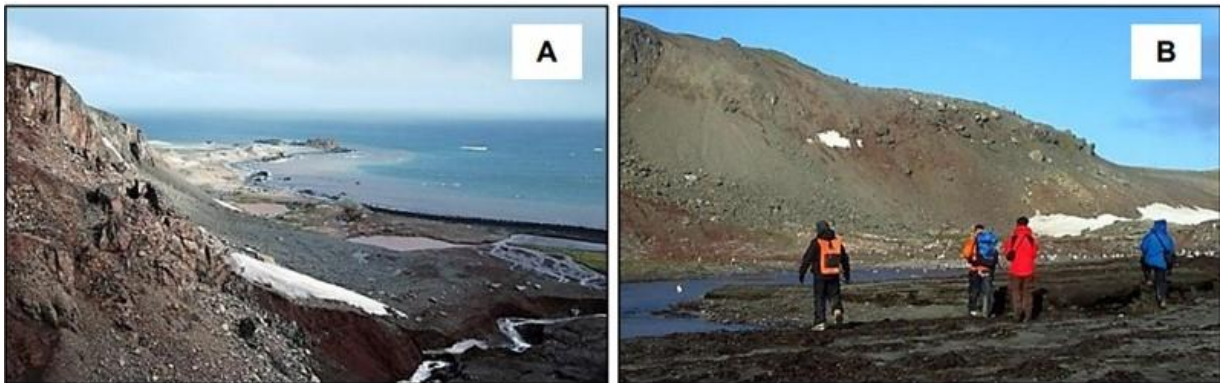


Figura 5 - Encostas íngremes na península Potter e canais glaciofluviais conectados a lagos, sendo que A é a visão da encosta em direção ao mar e B é a visão do nível do mar em direção a encosta. (Fonte: Andrade, 2012)

A geleira Ecology, na costa ocidental da baía do Almirantado, é uma das muitas geleiras de descarga do campo de gelo Warszawa, que faz parte da calota principal da ilha rei George (BINTANJA, 1992), sua margem frontal tem um significativo componente terrestre em um ambiente marinho, por isso, a maior parte de suas paredes de gelo está aterrada acima do nível do mar (VIEIRA *et al.*, 2005). A parte frontal da geleira tem 700 m de largura e termina em uma parede vertical de aproximadamente 20 m, que desprende sobre a laguna Ecology. Esta laguna sofre a influência direta das marés e por isso dificilmente há a acumulação de sedimentos finos nesse setor (VIEIRA *et al.*, 2005) (Figura 7).

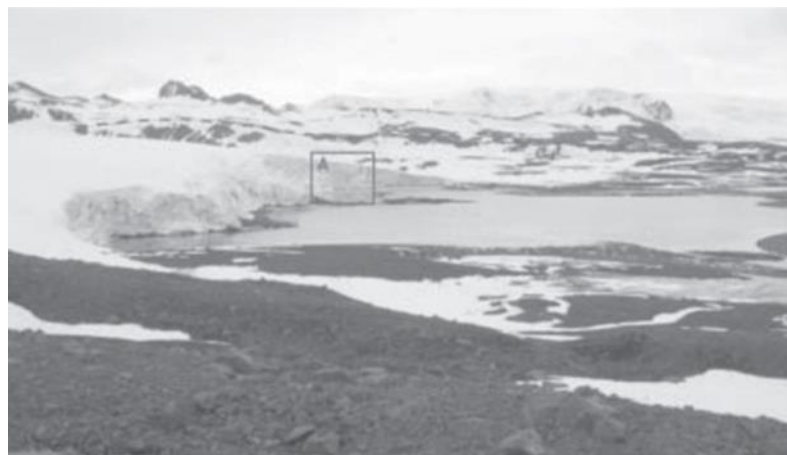


Figura 6 - Laguna proglacial da geleira Ecology, (A) sedimentos subglaciais na parede da geleira suscetíveis à atividade paraglacial. (Fonte Vieira, 2005)

Em regiões glaciais de alta montanha é registrado o aumento significativo na área de lagos, como na Groelândia (CARRIVICK; QUINCEY, 2014), Andes

(LLIBOUTRY, 1977 ; EMMER e VILÍMEK, 2013; COOK *et al.*, 2016), Alpes (HUGGEL *et al.*, 2002; EMMER *et al.*, 2015), região do Himalaia-Karakoram-Tibete (HKT) (KOMORI, 2008; BAJRACHARYA e MOOL, 2009; GARDELLE; ARNAUD; BERTHIER, 2011; WANG; YAO; YANG, 2011; SONG; HUANG; RICHARDS, 2014; AGGARWAL *et al.*, 2017; DEBNATH *et al.*, 2018), Ásia central (JANSKÝ; ŠOBR; ENGEL, 2010; MERGILI; MÜLLER; SCHNEIDER, 2013) e Cordilheira Ocidental da América do Norte (CLAGUE e EVANS, 2002; EMMER *et al.*, 2016). Os autores atribuem as mudanças à diversas causas, como a tendência de aquecimento atmosférico, à retração glacial e ao aumento da retenção do aporte de água de degelo glacial, coalescência além de variações nos fatores que levam o derretimento da neve sazonal. Por ser dinâmico, o sistema paraglacial nestes setores também pode contribuir para diminuição da área de lagos, e isso está relacionado à perda de alimentação pela geleira (afastamento progressivo da margem glacial) ao progressivo descongelamento do permafrost na base do sistema lacustre, ao comportamento dos canais glaciofluviais, variação na precipitação sazonal, extravasamento de lagos alimentados por geleiras e represados por sedimentos morainicos (IZAGUIRRE *et al.*, 2012; CARRIVICK e TWEED, 2013).

Mesmo que sistemas proglaciais, paraglaciais e periglaciais se diferenciem em essência já na premissa diagnóstica, os três podem ocorrer concomitante em uma mesma paisagem (MACHADO *et al.*, 2019). O primeiro tem como diagnóstico o critério locacional, o segundo temporal e o terceiro por processos e formas. Ao analisar a natureza dos processos atuantes em cada um, é plausível distinguir que os dois primeiros lidam essencialmente com transporte de sedimentos enquanto o último tem foco no intemperismo e processos de gênese, retrabalhamento e evolução do regolito (MACHADO *et al.*, 2019).

CAPITULO 3 – METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões bem como a metodologia utilizada em cada uma das etapas do trabalho.

Os resultados estão organizados em forma de três artigos submetidos, conforme normas do Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O primeiro artigo se trata de um inventário de lagos glaciais nas ilhas Nelson e Rei George, realizado através da análise de diferentes imagens Landsat, Digital Globe, Planet Scope e Sentinel 2. Para a análise geomorfométrica foram utilizados MDE Tandem-X e REMA (The Reference Elevation Model of Antarctica). Há 56 lagos na ilha Nelson e 144 lagos na ilha Rei George e eles se concentram principalmente nos setores costeiros com baixas declividades (0-20%) e elevações (0-40m). O artigo apresenta uma base de dados dos lagos glaciais e contribui com uma base para o monitoramento temporal multianual.

O segundo artigo trata das variações de área de lagos proglaciais nas últimas décadas nas ilhas Rei George (IRG) e Nelson (IN). A variação de área dos lagos e das geleiras, que os alimentam, foi identificada através de imagens dos satélites Landsat, Spot, Planet Scope, WordView-2 e Sentinel-2. Desde 1988, ocorreu um aumento de 455% na área total de lagos proglaciais. As geleiras tiveram uma contínua perda de área no período e por isso há contínuo aumento de lagos.

O terceiro artigo visa investigar as potenciais causas da expansão dos lagos no período 1988/89-2018 através da comparação entre diferentes setores de áreas livres de gelo nas ilhas Rei George (IRG) e Nelson (IN). Os lagos foram agrupados por técnicas de agrupamento e estatística multivariada. Aponta-se que os ambientes marginais ao gelo das geleiras Wanda, Viéville, Znosco, Anna Sul, e Baranowski na IRG e novas áreas livres de gelo na IN evidenciam as maiores mudanças nas recentes duas décadas e necessitam de um monitoramento futuro e maior atenção.

3.1 ARTIGO 1: UM INVENTÁRIO DE LAGOS GLACIAIS NAS ILHAS NELSON E REI GEORGE, ANTÁRTICA MARÍTIMA.

Resumo: O presente trabalho apresenta o primeiro inventário dos lagos glaciais nas áreas livres de gelo nas ilhas Rei George e Nelson, Antártica Marítima. Foram usadas imagens Landsat, Digital Globe, Planet Scope e Sentinel 2 para vetorização e mapeamento dos lagos através do Google Earth. Para a análise geomorfométrica foram utilizados MDE Tandem-X e REMA. Há 56 lagos na ilha Nelson e 144 lagos na ilha Rei George, cobrindo um total de 320.000 m² de área e 2.016.169 m² de área, respectivamente. Os lagos se distribuem principalmente nos setores costeiros com baixas declividades (0-20%) e elevações (0-40m) nas áreas expostas das ilhas. Os lagos são formados em setores recentemente em deglaciação (os lagos de contato com o gelo e marginais ao gelo, como por exemplo, nas áreas proglaciais na baía do Almirantado e Rei George) e deglaciados a mais tempo (e.g. Penínsulas Harmony, Stanbury, Fildes, Potter, Weaver e Barton). O artigo apresenta uma base de dados dos lagos glaciais e contribui com uma base para o monitoramento temporal multianual. A caracterização dos lagos pode auxiliar na explicação de possíveis diferenças de evolução temporal dos lagos, pois o surgimento de lagos nos setores frontais das geleiras mostra o quanto estas estão instáveis ao aquecimento na região, e dessa forma podemos inferir sobre a dinâmica de cada uma delas.

Palavras-chave: áreas livres de gelo; ambiente marginal ao gelo; paraglacial; SIG.

Abstract: This study presents the first glacial lake inventory for Nelson and King George Island forelands, Maritime Antarctica. Landsat, Digital Globe, Planet Scope and Sentinel 2 data and Google Earth mapping were applied in lake identification. The geomorphometric characteristics were obtained with TanDEM-X and REMA. There are 56 glacial lakes covering areas of 320.000 in Nelson Island, and 144 lakes covering areas of 2.016.169 in King George Island. There lakes are primarily located in coastal sectors (0-40m elevation) and lower slopes (0-20%) terrains in islands. There are lakes in forelands related to recent (i.g. ice-marginal and ice-contact lakes in proglacial areas presented in Admiralty and King George Bay) and old deglaciation (e.g. Harmony, Stanbury, Fildes, Potter, Weaver and Barton Peninsula). The lakes were not identified in Northern sectors of the islands. This paper presents a database of glacial lakes and provides a basins for long-term monitoring. The characterization of the lakes can assist in the explanation of possible differences of secular evolution of the lakes, therefore the sprouting of lakes in the sectors frontals of glaciers shows how much these are unstable to the heating in the region, and of this form we can infer on the dynamics of each one of them.

Key-Words: forelands; ice-marginal environment; paraglacial; GIS.

1- INTRODUÇÃO

Os lagos proglaciais, também podem ser reconhecidos como geoformas glaciolacustres, podem formar-se pelo contato direto com a margem de uma geleira ou por canais glaciofluviais e o represamento através de uma moraina terminal de recessão. As morainas de recessão são geoformas deposicionais formadas na margem glacial frontal e podem ser caracterizadas como cordões lineares (BENN e EVANS, 2010; HAMBREY, 1994). Canais glaciofluviais transportam sedimentos até os lagos através do fluxo da água de degelo, formando uma pluma de sedimentos em suspensão e sedimentação laminada (ASSINE E VESELY, 2015; LONNE, 1995; SMITH E ASHLEY, 1985). Os canais de fluxo da água de degelo das geleiras podem ter ou não contato direto com a margem da geleira, os canais que têm contato direto com a margem apresentam maior influência do processo de fusão glacial, pois recebem fluxos de água de degelo subglacial, formando canais e leques deposicionais e áreas alagadiças com múltiplos canais entrelaçados (BENN E EVANS, 2010).

Existe uma grande diversidade de lagos em tamanho, modo de formação e tempo (CARRIVICK E TWEED, 2013). Os lagos se desenvolvem quando as geleiras recuam, geralmente se formando em bacias glacialmente esculpidas ou atrás de barreiras de gelo ou sedimentos nas margens das geleiras. Seu estudo é importante pois eles modificam os regimes de fluxo hidrológico, retêm sedimentos; preservam um arquivo sedimentar de informações sobre o comportamento das geleiras, fluxo de sedimentos, clima (CARRIVICK E TWEED, 2013) e servem como indicativo de mudanças climáticas locais (SHRIDHAR; KAMANA; ALVARINHO, 2015). Muitos estudos do sistema paraglacial são direcionados a acompanhar a evolução dos lagos em áreas de risco a inundação em áreas andinas (KNIGHT E HARRISSON, 2018).

Para a Península Antártica (PA), estima-se que a temperatura atmosférica superficial da região tenha aumentado desde 1950, sendo indicada, em escala global, como uma das áreas mais sensíveis às mudanças do clima (TURNER *et al.*, 2009).

Considerando a importância dos lagos como indicadores de mudanças climáticas, se faz necessário realizar o monitoramento das áreas livres de gelo e o inventário dos lagos na Antártica Marítima, onde são pobremente documentados em

número, extensão, volume e contexto ambiental. A distribuição espacial dos lagos em um Sistema de Informações Geográficas é relevante para o monitoramento destes sistemas lacustres e para a compreensão dos impactos das mudanças climáticas nas áreas livres de gelo nesta região marítima Antártica.

O objetivo dessa pesquisa é realizar o levantamento e caracterização dos lagos das áreas livres de gelo das ilhas Rei George e Nelson, Antártica Marítima, buscando estabelecer padrões pela sua localização.

2- ÁREA DE ESTUDO

A Ilha Rei George e Ilha Nelson (Figura 01) fazem parte das 29 ilhas que compõem as Shetlands do Sul, este arquipélago situa-se a noroeste da PA. A Ilha Rei George é a maior delas, possui área de 1.250 km², o maior eixo com 80 km de comprimento, está orientado no sentido sudeste-nordeste e o menor, com 15 km de largura - no sentido oposto, as áreas livres de gelo na ilha correspondem a menos de 10% (BREMER, 1998). Já a Ilha Nelson possui uma área de 200 km², o ponto mais elevado na ilha está a 313 metros acima do nível do mar.

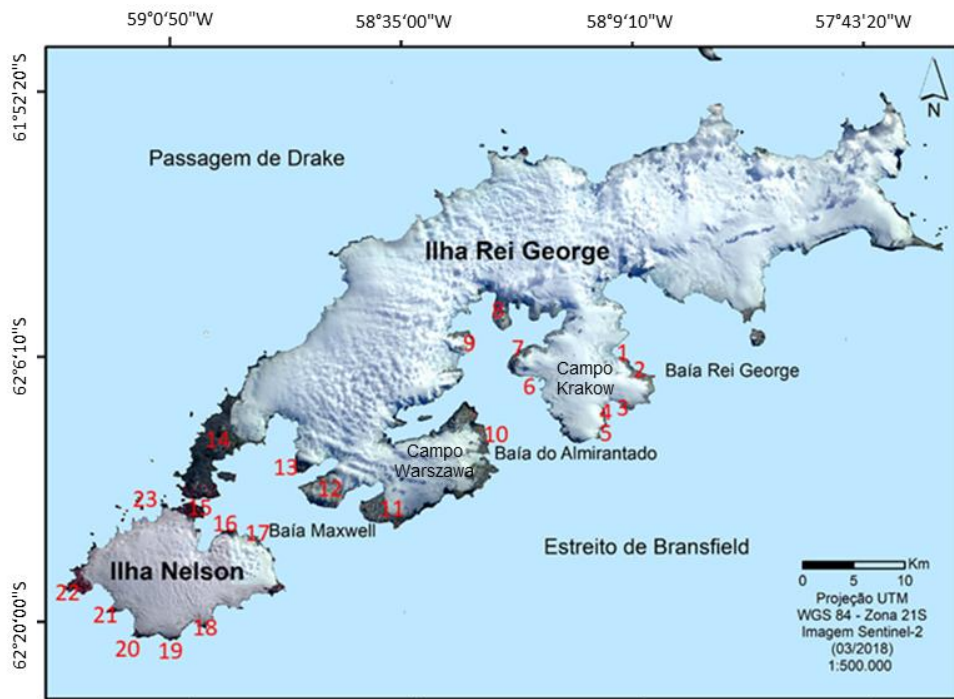


Figura 1- Localização das ilhas Nelson e Rei George. Os números de 1 a 23 localizam os setores com lagos mapeados. Das 23 áreas mapeadas, pelo menos 17 são recentemente expostas, somente com lagos marginais ao gelo.

Durante o inverno ocorre na área de estudo um clima marítimo relativamente ameno, resultando em baixa variabilidade anual das temperaturas mensais médias do ar (SMITH; STAMMERJOHN; BAKER, 1996) e frequente sucessão de centros de baixa pressão móveis para leste na zona circumpolar do vento oeste do Hemisfério Sul (BINTANJA E VAN DEN BROEKE, 1995).

3- MATERIAIS E MÉTODOS

A base de dados da pesquisa se constitui de imagens de satélites Landsat, Digital Globe, Planet Scope, Sentinel 2 e Worldview da ilha Rei George e Nelson obtidas a partir de 2006 até 2018 (fevereiro, março e em diferentes horários). O período do ano de escolha das imagens corresponde a fevereiro e março, pois se considera que, conforme Benn e Evans (2010), a rede de drenagem desenvolve-se por completo ao final da estação do derretimento, quando as descargas subglaciais diminuem e os canais do interior do corpo da geleira tendem a fechar em resposta à crescente pressão e mais rápida deformação gelo. Foram considerados e atualizados os mapeamentos realizados por Oliveira *et al.*, (2019). Complementarmente, foram utilizados dados vetoriais em formato shapefile dos divisores de drenagem do GLIMS e Bremer (1998) para a ilha Nelson e Rei George, respectivamente. Os modelos digitais de elevação utilizados foram o Tandem-X produzido por Braun, Betsch e Seehaus (2016), com resolução espacial de 12 m, para toda a ilha Rei George e o REMA (Modelo de Elevação de Referência da Antártica) de 8 metros de resolução espacial para a ilha Nelson. Também foram utilizados registros fotográficos de atividades de campo de 2007, 2010, 2011, 2013, 2014 e 2019. Todos os dados foram co-registrados e reprojitados para UTM 21sul e datum WGS 84.

A metodologia empregada para o reconhecimento de lagos consiste em um mapeamento das feições, baseado em vetorização manual, utilizando o Google Earth e Arc Gis. Os dados em formato kml foram convertidos para shapefile no programa Arc Gis, e em seguida foi feita a caracterização morfométrica. A partir do MDE foram obtidos os dados hipsométricos e de declividade da área de estudo. A declividade foi delimitada com as classes de porcentagem entre: 0-3 (plano), 3-8 (Suave ondulado), 8-20 (ondulado), 20-45 (forte ondulado), 45-75 (montanhoso). A

hipsometria foi aplicada entre 0-200 m com intervalos definidos de 20 m apenas para análise das áreas livres de gelo. Para as áreas mapeadas através de Google Earth pode haver uma superestimativa nos dados de área e número de lagos, já que há diferenças na resolução das imagens. Os setores mapeados no Google Earth, que podem apresentar dados superestimados, estão apresentados nas tabelas com asterisco (*).

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Lagos na ilha Rei George

Há 144 lagos na ilha Rei George, cobrindo um total de 2.016.169 m² de área. Os lagos são encontrados em áreas livres de gelo ao sul, leste, sudoeste, sudeste, oeste da ilha. Não são encontrados lagos ao norte da ilha. As áreas de Potter, Barton, Fildes e Weaver (Figura 1, setores 11,12,14,13 respectivamente) apresentam relevos rebaixados com os lagos localizados em áreas retrabalhadas há maior tempo pelos processos intempéricos promovidos pela exposição no verão. Estas áreas juntamente com outras duas da ilha Nelson (Ponta Harmonia e Stansbury) são as únicas que apresentam lagos não conectados à geleiras, com processos de erosão não glacial, e água líquida proveniente de fusão de neve e chuva, que alimentam os lagos. Durante o verão austral, em decorrência do aumento da temperatura do ar, ocorre um intenso processo de ablação da neve e gelo (FRANCELINO e SCHAEFER, 2004).

A península Fildes (Figura 01, setor 14 e Figura 02 A, B) apresenta o maior número de lagos (46) formados e também a maior área livre de gelo das ilhas. Há lagos que não recebem aporte hidrológico da geleira, como é o caso dos lagos em vales deglaciados da porção sul e central, e lagos conectados à geleira, na porção norte, nas margens da geleira Collins.

Muitos lagos da península Fildes se formaram desde que se iniciou o processo de deglaciação da península. Desde 10.000 AP, o campo de gelo da ilha Rei George retraiu, deixando o sistema glacial do domo Collins e o pequeno campo de gelo nas áreas planálticas no Norte e Sul (PETSCH *et al.*, 2019). O lago Langer, por exemplo, é um lago endorréico e possui uma área de 10³m² e revela, em seus arquivos sedimentares, informações paleoclimáticas do Holoceno (KHIM, 2004). Há

outros lagos endorréicos na Península.

O lago Glubokoe (Figura 02 A), se localiza no norte da península Fildes, numa área topograficamente baixa (20 m de altitude) e recebe fluxo de água de degelo de setores mais elevados, e também água de degelo de acumulação de neve junto a suas margens a extensão do lago é de aproximadamente 600 m de comprimento e está a aproximadamente a 1 km da geleira Collins (PETSCH *et al.*, 2019).

Os resultados da localização dos lagos na península Fildes vão ao encontro de Vieira *et al.*, (2015) e Shevnina e Kourzeneva (2017). De acordo com classificação de Vieira *et al.*, (2015), os lagos na Península Fildes podem ser classificados em proglacial, lago de fusão, lago temporário e lago misto. Os lagos pequenos são endorréicos e localizados em depressões formadas pela deglaciação e modificação por processos paraglaciais e periglaciais. Mas há lagos profundos e maiores, como os localizados em vales em circo deglaciados. Também há 3 lagos maiores orientados Norte-Oeste para Sul-Leste, que abastecem as bases de apoio Chilena e Russa, junto à baía Ardley, localizados em uma falha tectônica e são conectados por fluxo fluvial. Também é um lago profundo e extenso localizado em cratera vulcânica, endorréico e abastecido por degelo de neve sazonal, que abastece a estação antártica uruguaia.

Segundo Vogt e Braun (2004), novos lagos surgiram na península Fildes (ilha Rei George) com o recuo do gelo nas últimas décadas, nas áreas recentemente deglaciadas em frente à geleira Collins. A alimentação de lagos na Fildes é essencialmente por derretimento de neve ou gelo através de canais glaciofluviais, sendo que a dinâmica do derretimento controla o tamanho e a localização dos lagos nas escalas de tempo interanuais e sazonais (PETSCH *et al.*, 2019).

Na península Potter (Figura 02 C) a rede de drenagem observada apresenta as mesmas características gerais que a Fildes, onde há o predomínio de cursos glaciofluviais principais esculpindo os talwegues de vales. Há lagos aparentemente endorréicos na Península. Os lagos mais extensos abastecem a base de pesquisa Esperanza.

Na península Barton (Figura 01, setor 12) e Weaver (Figura 01, setor 13) há 12 lagos e se encontram em setores mais altos entre 20 e 140 metros. A maioria destes se encontram distantes da geleira e podem ser endorréicos. Estes lagos não são recentes, Oliva *et al.*, (2019) estudaram 5 lagos nesta Península para

investigar a deglaciação Holocência. Quanto à declividade, os lagos também se formam em áreas com menor declividade, entre 0-20% (Tabela 01).

Tabela 01 - Características dos lagos nas penínsulas da ilha Rei George

Setor	Altitude (m)	Declividade (%)	Área (m ²)	Número de lagos
Península Fildes	40-120	0-8	346.000	46
Península Weaver	20-160	0-20	24.167	8
Península Barton	40-140	0-20	82.000	12
Península Potter	0-100	0-8	310.000	19

Essas áreas são voltadas para a baía Maxwell e ocorre um padrão no recuo das geleiras e aumento das áreas livres de gelo nesse setor. Provavelmente, essa área sofre com eventos de aumento de temperatura da superfície do mar (TSM). Vaughan (2003) aponta que a TSM sobre o mar de Bellinghausen é de cerca de 7°C superior ao mar de Weddell. Além disso, essa área está exposta à ventos provenientes do Estreito de Drake, principalmente do sentido noroeste e oeste (SCHLOSS *et al.*, 2012). O vento e aumento da TSM podem provocar mudanças na precipitação e, portanto, no balanço de massa das geleiras.

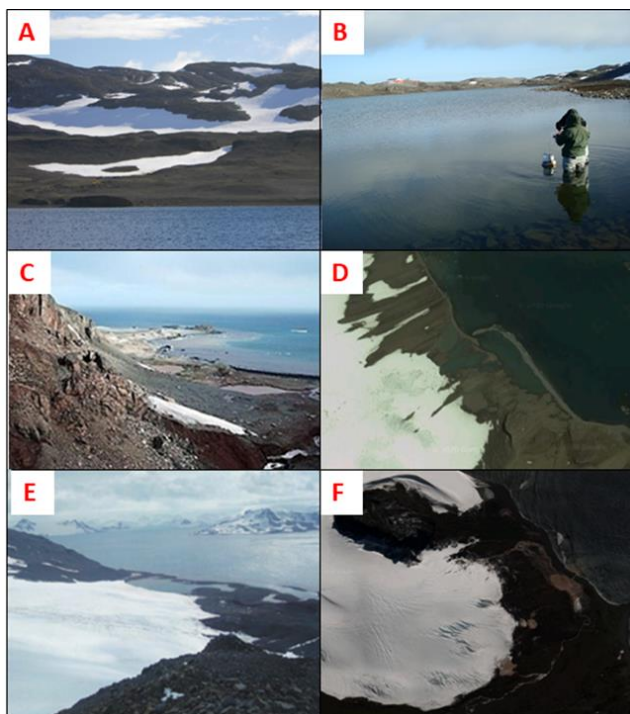


Figura 02 - Lagos na ilha Rei George, sendo “A” lago Glubokoe na península Fildes (Fonte: Petsch, 2019), “B” lago Kitish na mesma península (Fonte: Petsch, 2019), “C” lago da península Potter (Fonte: Andrade, 2013), “D” lagos recentes marginais à geleira Anna Sul 2 (imagem Google), “E” lago marginal à geleira Wanda (Fonte: Rosa, 2011), e “F” lagos

no setor proglacial da geleira Baranowski (imagem Google).

As áreas livres de gelo na baía do Almirantado e baía Rei George (Tabela 2) diferem-se em alguns aspectos dos setores voltados para baía Maxwell. Estas áreas são recentemente expostas e todos os lagos são conectados às geleiras. No setor frontal da geleira Znosco há um lago em contato com o gelo e que pode se conectar ao mar por um canal. Rosa *et al.*, (2015) e Oliveira (2018) apontam uma retração significativa das geleiras nestas áreas e algumas delas deixaram de possuir frente de maré e passaram a ter suas frentes em terra nas últimas décadas, como é o caso da geleira Wanda (Figura 01, setor 7 e Figura 02 E), Anna Sul 2 (Figura 01 setor 1 e Figura 02 D), White Eagle (Figura 01, setor 2), Wit Norte (Figura 01, setor 3), Matejko (Figura 01, setor 4), e Szymanowski (Figura 01, setor 5). Essas áreas passaram a apresentar canais de água de degelo das geleiras e formações morânicas que acabam represando a água dos canais e formando lagos proglaciais. O lago localizado no ambiente marginal ao gelo da geleira Wanda não possui contato com o gelo, mas pode ser influenciado pelo mar através de um canal.

Na península Warszawa (Figura 01, setor 10) também houve significativo aumento das áreas livres de gelo na costa da baía do Almirantado, 7 km² no período de 1956 a 2017 (Perondi, 2018), e acabou expondo canais de degelo, lagos e lagunas (Figura 02 F). Estes lagos e lagunas contam com uma área de 1.001.819 m², a área com maior número de lagos na ilha Rei George, a análise no campo de gelo Warszawa foi realizada com imagem Worldview-2 de 2014 (0,5 m de resolução). No ambiente marginal ao gelo da geleira Baranowski, Szilo e Bialik (2018), mapearam lagos formados desde 1989 e distinguiram lagos costeiros e formados em feições glaciais de kettle e represados por morainas (o lago mais próximo à geleira). Estes lagos são conectados por canais e o lago costeiro libera água e sedimentos para o mar através de um canal (pode ser intermitente). As geleiras Ecology e Baranowski possuem laguna em contato com o gelo. O lago marginal ao gelo da geleira Windy não se apresenta em contato com o gelo glacial, mas há contato direto com o mar, podendo ser caracterizado como uma laguna. Nesta península, há lagos endorréicos na área marginal ao gelo das geleiras Tower e Windy.

Os lagos proglaciais da geleira Anna Sul 2 (Figura 01, setor 1 e Figura 02 D) localizam-se no ambiente exposto pela geleira que teve alta perda de área no

período de 1988 a 2017, cerca de 2,12 km² (OLIVEIRA, 2019). A maior parte da frente desta geleira é de maré com exceção do setor sul, onde aparecem os lagos após o período de retração. Os lagos se apresentam entre as cotas de 0-160 metros, com declividade entre 0-45% (Tabela 02).

Tabela 02 - Características dos lagos em áreas voltados à baía do Amirantado e baía Rei George

Setor	Altitude (m)	Declividade (%)	Área (m ²)	Número de lagos
Anna Sul 2	0-40	20-45	78.884	3
White Eagle	60-100	0-8	2.339	3
Wit Norte	140-160	0-20	2.624	3
Matejko	100-120	0-8	529	2
Szymanowski	40-60	20-45	697	1
Viéville	20-40	8-20	22.321	1
Wanda	20-40	0-8	57.978	1
Península Keller	20-40	0-20	4.612	2
Znosco	20-40	20-45	82.199	1
Campo Warszawa	0-120	0-45	1.001.819	42

São terrenos mais jovens, menos retrabalhados e os canais glaciofluviais não entalharam o ambiente de forma tão pronunciada quanto nas áreas do item 3.1. Os canais se localizam principalmente entre as geleiras e os lagos proglaciais. Os canais podem apresentar conexão com os lagos e liberar água e sedimentos para o mar. Os canais se localizam principalmente entre as geleiras e os lagos proglaciais. Os canais podem apresentar conexão com os lagos e liberar água e sedimentos para o mar.

4.2 Lagos na ilha Nelson

Há 56 lagos na ilha Nelson, cobrindo um total de 320.000 m² de área. Os lagos são encontrados em áreas livres de gelo ao sul, leste, sudoeste, sudeste, nordeste, oeste e norte da ilha. Os lagos na ilha Nelson se concentram em áreas de baixa declividade, a maioria deles entre 0% e 8% que representa áreas planas e suave onduladas de acordo com classificação da EMBRAPA (1979). Estas áreas não ultrapassam os 40 metros, são setores baixos e a maioria deles recentemente expostos (Figura 03 B), apenas na Ponta Harmonia (Figura 01, setor 22) e Stansbury (Figura 01, setor 15) há setores com lagos não conectados à geleira. Na Ponta

Stansbury as declividades chegam a 20% (Tabela 03), isso acontece porque nesse setor os lagos se concentram numa área com pequenos vales.

A Ponta Ross (Figura 01, setor 20 e Figura 3 A) apresenta o maior número de lagos, totalizando uma área de 115.891m². Além dos lagos, há também morainas e diversos canais interligando um lago ao outro e a áreas de alagados próximas do mar. A retração das geleiras nesta área pode ser acompanhada pelas imagens de satélite, que comprovam perda de área significativa tanto em geleiras de maré como em geleiras de base terrestre. Todos os lagos costeiros parecem ter ligação entre si com canais, que podem ser intermitentes, e ao menos um destes canais pode ter ligação com o mar em marés mais altas.

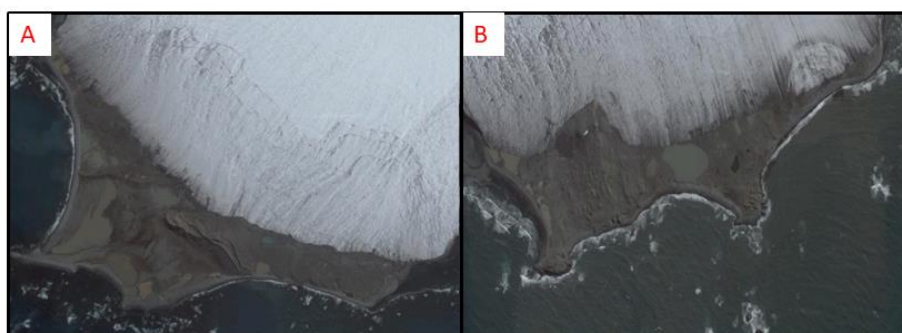


Figura 03 - Lagos nas novas áreas livres de gelo da ilha Nelson, sendo “A” a Ponta Ross e “B” setor ao leste da Ponta Ross.

Tabela 03 - Características dos lagos da ilha Nelson

Setor	Altitude (m)	Declividade (%)	Área (m ²)	Número de lagos
Novas áreas livres	0-40	0-8	181.000	32
Ponta Harmonia	20-40	0-8	79.000	7
Ponta Stansbury	20-40	0-20	60.000	17

Desta forma, os lagos das ilhas representam uma condição de estogagem continental de água e sedimentos, que, na sua maioria, não vão para o mar e não contribuem com o recente aumento médio dos níveis dos mares. A dinâmica sedimentar destes lagos traz informações paleoclimáticas importantes, como destacado por Oliva *et al.*, (2019). Estes lagos de água doce são habitats de diversas espécies e assembléia de fungos, como evidenciada por Rosa (2019).

Quando comparados os lagos das duas ilhas, verifica-se que na ilha Rei George, as geleiras Wanda, Znosco, Anna e Windy mostram lagos com uma possível conexão com o mar através de um canal. Em alguns setores da ilha Nelson

os lagos se encontram em áreas alagadiças e conectadas ao mar através de canais. Os lagos marginais ao gelo em ambas as ilhas são represados por feições morainas de recessão e são alimentados por aporte de água de degelo glacial. Os lagos na frente das geleiras Windy, Wanda, Znosco e o mais costeiro da Anna apresentam-se represados por um possível sistema de barreira (cordão morânico) e pode ser considerado, em alguns momentos como um sistema laguna-barreira e possuem influência do mar. Isto é observado na ilha Nelson na Ponta Ross (Figura 03 A). Também são observados lagos endorréicos nas penínsulas Fildes e Potter, mas podem haver outros nestas condições.

Todos os lagos (ambas as ilhas) são alimentados por água de degelo sazonal da neve, assim como afirma Shevnina e Kourzeneva (2017) e alguns por degelo glacial. Desta forma, os lagos nestas áreas livres de gelo estão sujeitos à atividade paraglacial e periglacial, de acordo com o contexto em que estão localizados. Alguns destes lagos podem se romper. No ambiente marginal ao gelo, os processos paraglaciais são bem intensos e transitórios, isto ocorre porque no ambiente proglacial as formas são recentemente formadas e assim estão mais instáveis à ação pela água de degelo sazonal da neve, movimentos de massa nas encostas, queda de blocos, rastejamento de solo, efeitos da maré, ondas, entre outros (CARRIVICK E HEKMAMN, 2017). Há lagos localizados em setores mais distantes das geleiras e podem ser considerados ambientes com predominância de processos periglaciais em relação aos paraglaciais: estes ambientes são aqueles onde não têm atividade glacial e sim alguns elementos do ambiente glacial como: neve e permafrost, ou seja, uma área em deglaciização gera ambiente periglacial. A evolução dos lagos está relacionada a esta transitoriedade (CARRIVICK E HEKMAMN, 2017).

As condições topográficas e declividades mostram-se ser importantes na formação de lagos. Carrivick e Hekmamn (2017) afirmam que o contexto ambiental influencia a intensidade dos processos paraglaciais. Rosa *et al.*, (2015) realizaram estudo para ambiente proglacial da geleira Wanda e evidenciaram que o lago formado na frente da geleira é ancorado pelo sistema de barreira-lagoa desenvolvido na área inferior do vale esculpido por ação glacial quando a frente da geleira era de maré, o que fez com que gerasse uma moraina de recessão. Na área proglacial da geleira Wanda as declividades são de 20 a 45% (OLIVEIRA, 2018), isso mostra que

as morainas têm papel fundamental neste processo de ancoragem, pois sem elas, os canais glaciofluviais terminariam diretamente no mar e não formariam lago proglacial.

Há processos paraglaciais, como os movimentos gravitacionais, que podem promover a destruição da descontinuidade da moraina recém depositada e interferir no efeito de barramento da água dos lagos marginais ao gelo. A relação dos lagos com os processos paraglaciais pode ser melhor investigada em futuros estudos, pois de acordo com Ballantyne (2002), processos paraglaciais são considerados um dos primeiros efeitos das mudanças ambientais.

Considera-se que as mensurações realizadas em imagens de satélites correspondem a uma determinada data e hora na estação de ablação e podem não representar o equilíbrio dos lagos no período atual. Assim, estudos de campo e comparativos de datas podem indicar uma estimativa média para a área destes lagos. Knight e Harrison (2018) afirmam que o paraglacial é um sistema transitório, pois seu comportamento não é constante. Considera-se que picos diários de descarga acontecem nos canais de drenagem algumas horas depois da fusão máxima, o que ocorre em função da distância que a água tem que percorrer através e abaixo da geleira e a configuração da rede de drenagem interna (BENN E EVANS, 2010; MAIZELS, 1995).

Por fim, a partir do banco de dados em Sistema de Informações Geográficas gerado, é possível estimar mudanças temporais nestes ambientes por sensoriamento remoto, e, conforme afirma Jawak (2011), dados de satélites e fotografias aéreas são fontes importantes de informação para monitorar mudanças de curto e de longo prazo que ocorrem em um local específico ou regiões ao longo do tempo.

5- CONCLUSÕES

Há 56 lagos na ilha Nelson e 144 lagos na ilha Rei George, cobrindo um total de 2.336.169 m² de área. Os resultados indicaram que há padrões espaciais que se diferenciam, quando se compara as duas ilhas. Não se verificam lagos no Norte das ilhas e há poucos lagos (apenas na península Fildes) em vales deglaciarizados orientados para o Estreito de Drake.

Com base nos modelos digitais de elevação foi possível analisar a

declividade e hipsometria nas áreas livres de gelo com presença de lagos. Os dados permitiram verificar que na ilha Nelson, os lagos se localizam em baixas declividades (0-20%) e baixas altitudes (0-40 m), sendo a maioria das áreas expostas recentemente, com exceção da Ponta Harmony e Stanbury que apresentam uma área mais tempo exposta.

Na ilha Rei George, é possível delimitar dois setores, o primeiro corresponde as penínsulas Fildes, Weaver, Barton e Potter onde o relevo é mais retrabalhado e os lagos se localizam entre as cotas 0-140 m e declividade entre 0-20% principalmente nas zonas distantes da geleira. Essas áreas expostas há mais tempo podem ter a retração das geleiras ligadas a mudanças na TSM e alterações no padrão de correntes marítimas e ventos provenientes do Estreito de Drake. O segundo setor é na baía Rei George e baía do Almirantado onde as áreas expostas são recentes, com rápida retração das geleiras com frente em maré, originando lagos marginais a gelo, conectados diretamente às frentes ou por canais glaciofluviais, entre as cotas de 0-160 m e declividade entre 0-40%. Este setor apresenta principalmente retração das geleiras com frente de maré, que possivelmente podem se desestabilizar com o aumento da TSM e desintegração do gelo marinho.

A caracterização dos lagos pode auxiliar na explicação de possíveis diferenças de evolução temporal dos lagos. Para isto, a continuidade do estudo, com o monitoramento das áreas livres de gelo é relevante, pois o surgimento de lagos nos setores frontais das geleiras mostra o quanto as geleiras estão instáveis ao aquecimento na região, e dessa forma podemos inferir sobre a dinâmica de cada uma delas. Assim, como é necessário o entendimento do ambiente marginal ao gelo e as feições deposicionais encontradas, a partir delas pode-se detectar mudanças ambientais regionais relacionando ao processo de retração das geleiras, bem como desenvolver cenários para as próximas décadas.

Um banco de dados em Sistema de Informações Geográficas foi gerado sobre a distribuição espacial dos lagos para as duas ilhas, contribuindo para o monitoramento destes sistemas lacustres.

Agradecimentos: Os autores agradecem à FAPERGS, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de

Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento desse estudo e ao Centro Polar e Climático (CPC) UFRGS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, A. M. **Delimitação de Geoambientes na península Potter, ilha Rei George (Antártica Marítima), utilizando dados COSMO-SkyMed e QuickBird.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, UFRGS, Porto Alegre, p.150, 2013.

AHLERT S. **Variações morfológicas do campo de gelo da ilha Brabant, Antártica.** Dissertação (Mestrado). Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, UFRGS, Porto Alegre, p. 102, 2005.

ASSINE, M. L.; VESELY, F. F. **Ambientes Glaciais.** Disponível em: www.geologia.ufpr.br/ambientesglaciais.pdf. Acesso em: 17 de maio, 2015.

BALLANTYNE, C. K. Paraglacial geomorphology. **Quaternary Science Reviews**, v. 21, n. 18 e 19, p. 1935–2017, 2002.

BENN, D. I.; EVANS, D. J. A. **Glaciers and Glaciation.** 2a ed. London: Hodder Education, p. 802, 2010.

BINTANJA, R.; VAN DEN BROEKE, M. R. The surface energy balance of Antarctic snow and blue ice. **Journal of Applied Meteorology**, v. 34, n. 4, p. 902–926, 1995.

BRAUN, M.; SAURER, H.; GOßMANN, H. Climate, energy fluxes and ablation rates on the ice cap of King George island. **Pesquisa Antártica Brasileira**, v. 4, p. 87-104, 2004.

BRAUN, M. H.; BETSCH, T.; SEEHAUS, T. King George Island TanDEM-X DEM, link to GeoTIFF. **Pangaea.** Disponível em: <doi.org/10.1594/PANGAEA.863567>. Acesso em 11 de maio 2017, 2016.

BREMER, U. F.. **Morfologia e bacias de drenagem da cobertura de gelo da Ilha Rei George, Antártica.** Dissertação (Mestrado) UFRGS, Porto Alegre, p. 117, 1998.

CARRIVICK, J. L.; TWEED, F. S. Proglacial lakes: character, behaviour and geological importance. **Quaternary Science Reviews**, v. 78, p. 34–52, 2013.

CARRIVICK, J.L.; HECKMANN, T. Short-term geomorphological evolution of proglacial systems. **Geomorphology**, v. 287, p. 3-28, 2017.

DORAN, P. T.; WHARTON JR., R. A.; LYONS, W. B. Paleolimnology of the Mc Murdo Dry Valleys. **Antarctica Journal Paleolimatic**, v. 10, p. 85–114, 1994.

DUGUAY, C. R.; PROWSE, T. D.; BONSAI, B. R.; BROWN, R. D.; LACROIX, M. P.; MENARD, P. Recent trends in Canadian lake ice cover, **Hydrology Processes**, v. 20, n. 4, p. 781–801, 2006.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/monitoramento-por-satelit>>. Acesso em: 12 de setembro de 2018, 1979.

FRANCELINO, M.R.; SCHAEFER, C.E.G.R. Glossário de Geomorfologia Glacial e Glaciologia, Aplicado à Antártica Marítima. In: SCHAEFER, C.E.G.R., FRANCELINO, M.R., SIMAS, F.N.B.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R. **Ecossistemas Terrestres e Solos da Antártica Marítima**, p. 192, 2004.

HAMBREY, M. **Glacial Environments**. London: UCL Press, p. 296, 1994.

HOFMANN, E. E.; QUETIN, L. B. (eds.). Foundations for ecological research west of the Antarctic Peninsula. American Geophysical Union, **Antarctic Research Book Series**, v. 70, p. 105–121, 1996.

HOWAT, I. M.; PORTER, C.; SMITH, B. E.; NOH, M. J.; MORIN, P. The Reference Elevation Model of Antarctica, **The Cryosphere**, v.13, p. 665-674, 2018.

JAWAK, S. D.; MATHEW, J. Semi-automatic extraction of water bodies and roads from high-resolution QuickBird satellite data. **Proceedings of Geospatial World Forum, Hyderabad**, v. 263, p. 247–257, 2011.

KHIM, B.; YOON, H.; KANG C.; ZHAO J. Holocene Variations of Organic Carbon Contents in Lake Langer of King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica. **Ocean and Polar Research**, v. 26, n. 3, p.507-514, 2004.

KNIGHT, J.; HARRISON, S. Transience in cascading paraglacial systems. **Land Degradation & Development**, [s.l.], v. 29, n. 6, p. 1991-2001, 2018.

LØNNE, I. Sedimentary facies and depositional architecture of ice-contact glaciomarine systems. **Sedimentary Geology**, v. 98, n. 1 e 4, p. 13-43, 1995.

MAIZELS, J. Sediments and landforms of modern proglacial terrestrial environments. In: MENZIES, J. (ed.). **Modern glacial environments: processes, dynamics and sediments**. Oxford: Butterworth-Heinemann, v. 2002, n. 621 p. 279-316, 1995.

OLIVA, M.; ANTONIADES, D.; SERRANO, E.; GIRALT, S.; LIU, E.; GRANADOS, I.; PLA-RABES, S. The deglaciation of Barton Peninsula (King George Island, South Shetland Islands, Antarctica) based on geomorphological evidence and lacustrine records. **Polar Record**, v. 55, n. 3, p. 177-188, 2019.

OLIVEIRA, M.A.G. **Processo de retração nas geleiras do campo de gelo Krakow, Ilha Rei George, Antártica**. (Monografia Trabalho de Conclusão de Curso)-UFRGS, Porto Alegre, p. 77, 2018.

OLIVEIRA, M. A. G.; PETSCH, C.; ROSA, K. K.; COSTA, R. M.; SIMOES, J. C. Levantamento e caracterização dos lagos de áreas livres de gelo das ilhas Nelson e Rei George, Antártica In: PINHEIRO, L.S.; GORAYEB, A. (ORG). **Geografia Física e as Mudanças Globais**. 1 ed. Fortaleza: UFC, v.1, p. 6-006, 2019.

PERONDI, C. **Análise da evolução do ambiente proglacial das geleiras Ecology**,

Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, Ilha Rei Georeg, Antártica. Dissertação (Mestrado) UFRGS, Porto Alegre, p.123, 2018.

PETSCH, C. **Evolução hidro geomorfológica da zona proglacial da geleira Collins, Ilha Rei George, Antártica.** Tese (Doutorado) UFRGS, Porto Alegre, p. 120, 2018.

PETSCH, C.; COSTA, R. M.; ROSA, K.K.; VIEIRA, R.; SIMÕES, J.C. Geomorfologia glacial e contexto paleoglaciológico da península Fildes, Ilha Rei George, Antártica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 4, p.795-809, 2019.

PIERSON, D. C.; WEYHENMEYER, G. A.; ARVOLA, L.; BENSON, B.; BLENCKNER, T.; KRATZ, T.; LIVINGSTONE, D. M.; MARKENSTEN, H.; MARZEC, G.; PETTERSSON, K.; WEATHERS, K. An automated method to monitor lake ice phenology. **Limnology Oceanographic: Methods**, v. 9, p. 74–83, 2011.

QUESADA, V.; KAUP, H. L. Landscape control of high latitude lakes in a changing climate. In: BERGSTROM, D. M. *et al.*, (eds.), **Trends in Antarctic Terrestrial and Limnetic**. Dordrecht: Springer, p. 221-252, 2006.

ROSA, K. K. **Dinâmica glacial, sedimentológica e variações ambientais em geleiras da enseada Martel, ilha Rei George, Shetlands do Sul.** Tese (Doutorado) UFRGS, Porto Alegre, p. 175, 2012.

ROSA, K.K.; VIEIRA, R.; FERNANDEZ, G.; MENDES JUNIOR, C. W.; VELHO, L. F.; SIMÕES, J. C. Recent changes in the Wanda Glacier, King George Island, Antarctica. **Pesquisas em Geociências**, v. 42, n. 2, p.187-196, 2015.

ROSA, L.E. (Ed.). Fungi of Antarctica Diversity, Ecology and Biotechnological Applications. **Springer Nature**, p. 345, 2019.

SCHLOSS, I.R.; ABELE, D.; MOREAU, S.; DEMERS, S.; BERS, A.V.; GONZÁLEZ, O.; FERREYRA, G.A. Response of phytoplankton dynamics to 19-year (1991-2009) climate trends in Potter Cove (Antarctica). **Journal of Marine Systems**, v. 92, n. 1, p. 53-66, 2012.

SHEVNINA E.; KOURZENEVA E. Thermal regime and components of water balance of lakes in Antarctica at the Fildes peninsula and the Larsemann Hills. **Tellus**, v. 69, n. 1, 2017.

SHRIDHAR, J. D.; KAMANA, K.; ALVARINHO, L. J. A review on extraction of lakes from remotely sensed optical satellite data with a special focus on cryospheric lakes. **Advances in Remote Sensing**, v. 4, n. 3, p. 196-213, 2015.

ŠMEJKALOVÁ, T.; EDWARDS, M. E.; DASH, J. Arctic lakes show strong decadal trend in earlier spring ice-out. **Nature: Scientific reports**, v. 6, p. 1 - 8, 2016.

SMITH, R. C.; STAMMERJOHN, S. E.; BAKER, K. Surface air temperature variations in the western Antarctic Peninsula Region. In: ROSS, R. M.; HOFMANN, E. E.; QUETIN, L. B. (eds.). Foundations for ecological research west of the Antarctic Peninsula. American Geophysical Union, **Antarctic Research Book Series**, v. 70, p.

105–121, 1996.

SMITH, N. D.; ASHLEY, G. M. Proglacial lacustrine environments. In: ASHLEY, G. M.; SHAW, J.; SMITH, N. D. (ed.) *Glacial Sedimentary Environments*. **Tulsa, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Short Course**, v. 16, p. 135-216, 1985.

SZIŁO, J.; BIALIK R. J. Recession and Ice Surface Elevation Changes of Baranowski Glacier and Its Impact on Proglacial Relief (King George Island, West Antarctica). **Geosciences**, v. 8, n. 10, p. 355, 2018.

TURNER, J.; BINDSCHADLER, R. A.; CONVEY, P.; Di PRISCO, G.; FAHRBACH, E.; GUTT, J.; HODGSON, D. A.; MAYEWSKI, P. A.; SUMMERHAYES, C. P.(eds.). *Antarctic Climate Change and the Environment*. **Cambridge, Scientific Committee on Antarctic Research**, p. 1-32, 2009.

TURNER, J.; LU, H.; WHITE, I.; KING, J. C. PHILLIPS, T.; HOSKING, J. S.; BRACEGIRDLE, T. J.; MARSHALL, G. J.; MULVANEY, R.; DEB, P. Absence of 21st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability, **Nature**, v. 535, p. 411–415, 2016.

VAUGHAN, D. G. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula, **Climate Change**, v. 60, n.3, p. 243-274, 2003.

VIEIRA, R.; MAROTTA, H.; ROSA, K. K.; JANA, R.; SIMOES, C.L.; SOUZA JUNIOR, E.; FERREIRA, F.; SANTOS, L.R.; SANTOS, J.V.; PERRONI, M.A.; GONCALVES, M.; SANTOS, J.P.F.; RODRIGUES, R.I.; GALVAO, J.C.M.; FELIZARDO, J.P.S. Análisis Sedimentológico y geomorfológico de áreas lacustres en la Península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica Marítima. **Investigaciones Geográficas**, v. 49, p. 3-30, 2015.

VINCENT, W. F. Microbial Ecosystems of Antarctica. **Antarctic Science**, v. 1 n. 2 p. 179-180,1988.

VOGT, S.; BRAUN, M. H.; JAÑA, R. The King George Island Geographic Information System project. **Pesquisa Antártica Brasileira**, v. 4, p. 183-185, 2004.

WANG, W.; YAO, T.; GAO, Y.; YANG, X.; KATTEL, D. B. A first order method to identify potentially dangerous glacial lakes in a region of the southeastern Tibetan Plateau. **Mountain Research and Development**, v. 31, p. 122–130, 2011.

3.2 ARTIGO 2: VARIAÇÕES EM LAGOS PROGLACIAIS NAS ÚLTIMAS DÉCADAS NAS ILHAS REI GEORGE E NELSON, SHETLANDS DO SUL

Resumo: O objetivo deste trabalho é quantificar as variações de área de lagos proglaciais nas últimas décadas nas ilhas Rei George (IRG) e Nelson (IN), Shetlands do Sul. A variação de área dos lagos e das geleiras, que os alimentam, foi identificada através de imagens dos satélites Landsat, Spot, Planet Scope, WordView-2 e Sentinel-2. Dados observacionais e por Reanálise (Reanalysis Interim Release) da temperatura média superficial do ar anual dos meses de inverno foram analisados. Desde 1988, ocorreu um aumento de 455% na área total de lagos proglaciais (de 0,18 para 1,02 km²). O percentual de aumento, 190% (0,10 km² em relação à área total de 0.05 km² em 1989) na IN e 308% (0,40 km² em relação à área total de 0,13 km² em 1988) na IRG, na área total dos lagos ocorreu no período 1988-2000/2003. Nas décadas seguintes, 2000 e 2010, o aumento foi menor 56% (0,09 km² em relação à área total de 0.16 km² em 2003) na IN e de 46% (0,25 km² em relação à área total de 0,53 km² em 2000) na IRG. As geleiras tiveram uma contínua perda de área no período. As variações acompanham as oscilações nas geleiras, a tendência de aumento da temperatura média anual do ar regional, a tendência de aumento da temperatura média nos meses de inverno (tendência a aquecimento na década de 1980 e início da década de 2000) e o aumento do número de dias com temperatura acima de 0 °C no período. A desaceleração no aumento de área dos lagos nas últimas 2 décadas está ligada à desaceleração da perda de área glacial e à tendência de resfriamento iniciado em 1998/1999 para a região.

Palavras chaves: Retração. Proglacial. Paraglacial. Clima.

Abstract: This study aims to quantify the area variation of the ice-marginal lakes in the ice-free areas of King George Island (KGI) and Nelson Island (NI) during the 1986-2018 period. Lake and glacial fluctuations are estimated using spaceborne remote sensing data (Planet Scope, SPOT, WordView-2, Landsat, and Sentinel-2). In addition annual mean surface air temperature data by station observations, the ERA-Interim reanalysis data were analyzed. The area of glacial lakes has expanded 455% (from 0.18 in the 1980s to 1.02 km² in 2018). The higher variation is shown for 1988-2000/2003 period. On the IN, the increase in lake areas is estimated in 190% (0.10 km² compared to 0.05 km² of total area in 1989) for 1988-2000/2003 period, and 56% (0.09 km² compared to 0.16 km² of the total area in 2003) for 2000/2003-2018 period. On the KGI, the increase is estimated in 308% (0.40 km² compared to 0.13 km² of the total area in 1988) for 1988-2000/2003 period, and 46% (0.25 km² compared to 0.53 km² of the total area in 2000) for 2000/2003-2018 period. The glaciers witnessed continuous area loss on period. The glacier shrinkage, and average annual atmospheric temperature for the winter (June–August) warming trend in 1980s, the regional warming trend, and positive melting degree increase trend triggers to lakes increasing. The deceleration in increase of the lake area in the last two decades compared to 1979–2000 period could be influenced by regional cooling trend in period.

Key-words: Retraction. Proglacial. Paraglacial. Climate.

1. INTRODUÇÃO

Os lagos marginais ao gelo fazem parte do sistema paraglacial e podem estar em contato direto com a frente de uma geleira e estar represado através de uma moraina de recessão (BENN e EVANS, 2010). Os canais glaciofluviais alimentam lagos marginais ao gelo (BENN e EVANS, 2010). Segundo Shridhar; Kamana; e Alvarinho, (2015) os lagos proglaciais servem como indicativo de mudanças climáticas locais. Segundo o autor, seu estudo é importante pois eles modificam os regimes de fluxo hidrológico, retêm sedimentos; preservam um arquivo sedimentar de informações sobre o comportamento das geleiras, fluxo de sedimentos, clima; e devido ao seu potencial para gerar inundações intensas.

Com a retração de geleiras, em muitas partes do mundo, registra-se o aumento do número e do tamanho dos lagos proglaciais (SMITH *et al.*, 2005; RIORDAN; VERBYLA; MCGUIRE, 2006; CARROL *et al.*, 2011; JONES *et al.*, 2011; CHEN *et al.*, 2014; KARLSSON; JARAMILLO; DESTOUNI, 2015). Nos sistemas paraglaciais da Ilha Rei George e Ilha Nelson poucos estudos foram desenvolvidos na perspectiva de análise temporal dos lagos. Cana, Rosa e Andrade (2018) analisaram a evolução dos sistemas lacustres na península Potter e evidenciaram alterações de área em vários lagos em resposta à dinâmica de retração glacial da geleira Polar Club registrada nos últimos 34 anos.

O objetivo deste trabalho é quantificar as variações de área de lagos proglaciais nas últimas décadas nas Ilha Rei George e Nelson, Shetlands do Sul. O comportamento de perda de área das geleiras que alimentam os lagos foi analisado por período (1988-2000 e 2000-2018 na ilha Rei George, e 1989-2003 e 2003-2018 na ilha Nelson).

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se na Ilha Rei George (IRG) e Nelson (IN), Antártica (Figura 01). Estas ilhas fazem parte do arquipélago das Shetlands do Sul localizadas na Antártica Marítima, situando-se ao Noroeste da Península Antártica (PA). Estes setores foram escolhidos por terem apresentado nas últimas décadas as maiores mudanças.

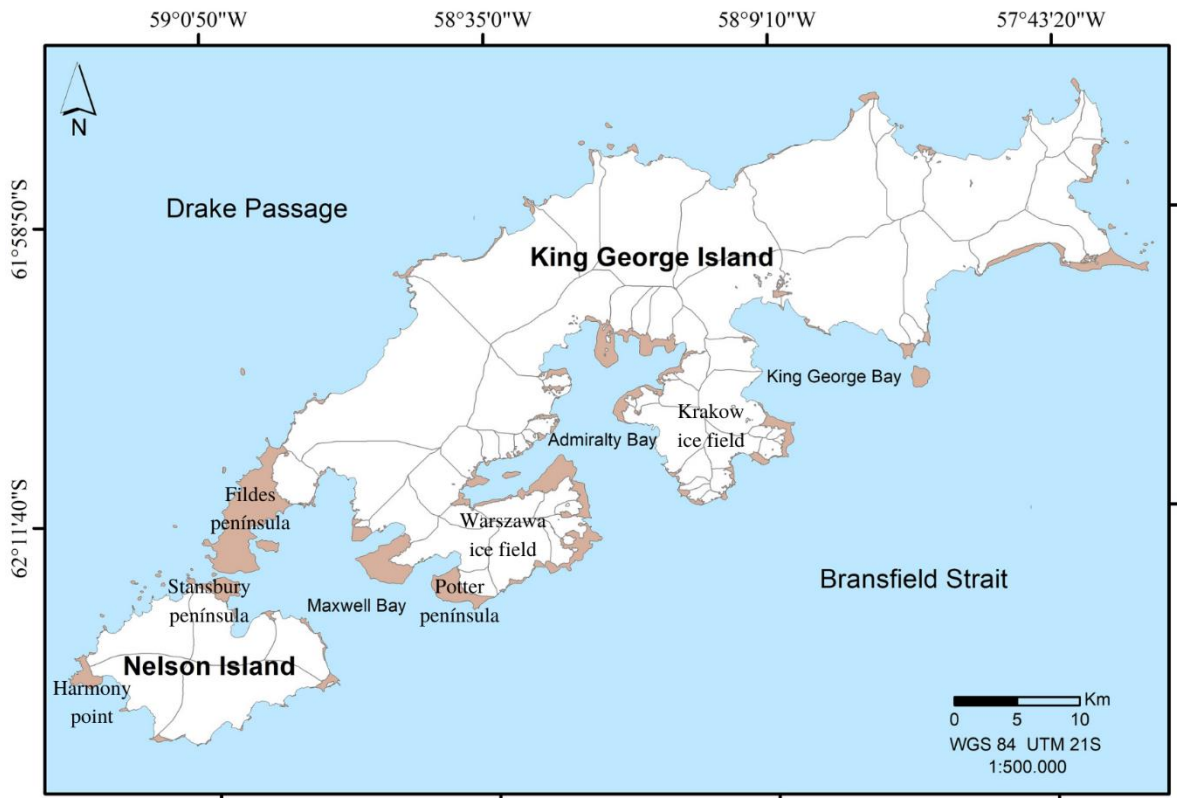


Figura 1- Localização das ilhas Rei George e Nelson

O clima da região é do tipo marítimo sub-antártico, com ventos fortes, constantes variações meteorológicas e temperaturas mais amenas, com a temperatura média anual do ar de -2°C e temperatura média do ar durante o verão podendo ser ligeiramente superior a 0°C (WEN *et al.*, 1994).

Quanto aos lagos, na IRG, Rosa (2011) mapeou a evolução do lago desenvolvido na frente da geleira Wanda quando esta tornou-se terrestre. Vieira (2015) realizou análises de sedimentos em lagos na península Fildes. Estudos de Andrade *et al.*, (2016), Poelking *et al.*, (2014) e Cana *et al.*, (2018) evidenciaram, no período 2006-2011, que os lagos proglaciais sofreram alterações de área e houve a continuidade da retração da geleira Polar Club. Petsch (2019) criou cenário de variação espacial da frente da geleira Collins que revela a continuidade do processo de retração para as próximas décadas dando lugar a uma área instável e com alta quantidade de canais conectados aos lagos. RAFAŁ *et al.*, (2018), Sziło e Bialik (2018) e Perondi (2018) mapearam a geomorfologia e a rede de drenagem glaciofluvial e glaciolacustre e as morainas de recessão na margem leste do campo de gelo Warszawa.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A variação de área dos lagos e das geleiras foi identificada através da análise das imagens dos satélites Landsat, Spot (Satellite Pour l'Observation de la Terre), Sentinel-2, nas diferentes áreas e para meses de fevereiro. A análise compreende as áreas proglaciais das geleiras Baranowski, Viéville, Wanda, Windy, Znosco, ambas voltadas para Baía do Almirantado, geleira Anna Sul voltada para Baía Rei George e setores proglaciais das penínsulas Fildes, Barton e Potter, ambas voltadas para baía Maxwell. Na IN, todos os setores proglaciais foram analisados, inclusive nas Ponta Harmony e Stansbury. Nas atividades de campo de 2007, 2010, 2011, 2013, 2014 e 2019 observa-se que os lagos (na Península Fildes e Potter e na Baía do Almirantado) são alimentados pelas geleiras, ou seja, estabelecem contato direto ou por meio de canais glaciofluviais. Os lagos analisados são considerados glaciolacustres de contato (atualmente ou em algum momento do período de análise) com o gelo.

Foram utilizadas cartas topográficas de 1988/89 para áreas voltadas para baía do Almirantado, baía Rei George e também para a análise de lagos na IN, pois há uma incerteza inerente a resolução espacial da imagem Landsat com 30 metros. A incerteza no mapeamento das áreas de cada data e ilha foi obtida de acordo com Frey (2012).

O mapeamento da área de lagos na IRG, no ano 2000, foi realizado através da interpretação visual das imagem Spot, optou-se pela utilização da composição RGB 321 (cor verdadeira) justamente por otimizar a visualização e interpretação dos alvos, neste caso os lagos, alagadiços e canais, já para IN, no ano de 2003, foi utilizada a imagem do Landsat 7 LIMA (*Landsat Image Mosaic of Antarctica*) optou-se pela composição RGB 543 (falsa cor) como a água absorve muito nesta composição, este alvo se diferenciou dos outros sendo possível uma visualização mais adequada. Da mesma forma foi realizada a análise em 2018, a interpretação visual foi realizada através da imagem Sentinel-2 do mês de fevereiro, na composição 843 (falsa cor) (United States Geological Survey - USGS) que possibilitou um exame visual em relação aos tons distintos nas imagens, tamanho, padrões de forma, posição topográfica, contexto geomorfológico regional e distância quanto a margem glacial. Para Novo (2010), a combinação de bandas e cores pode

ampliar a percepção das informações contidas na cena.

As linhas de frente das geleiras foram atualizadas com base nas imagens de satélite. Foi utilizado o dado de bacias de drenagem glacial do GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space). A partir desse arquivo vetorial, foram delimitadas as frentes para cada período com a interpretação visual das imagens no programa Arcgis. Foram considerados os mapeamentos das áreas de geleiras de 1988 e 2000, realizado por Ahlert (2005) e Arigony Neto (2001). Também contribuíram os registros fotográficos de atividades de campo de 2007, 2010, 2011, 2013, 2014 e 2019.

Para a verificação de tendência anual para os meses de inverno austral no período 1986-2013 foram utilizados dados médios mensais da temperatura superficial do ar, obtidos pela Estação Antártica Comandante Ferraz do Brasil (-62,08°S, -58,39°W; 5 m as.s.l.), instalada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os dados de 1968 a 1976 foram fornecidos pela estação russa de Bellingshausen (-62,19°S, -58,94°W; 1 m de altitude), e de 2014-2018 pela estação Frei Montalva (62.1997°S, 58.9642°W; 1m de altitude), localizada na Península Fildes, na parte oeste da IRG. Os dados entre 1977 e 1985 foram fornecidos pela Estação Polonesa Henryk Arctowski (-62,09 ° S, -58,28 ° W; 2 m a.s.l.), localizada na Baía do Almirantado, na IRG. Os dados meteorológicos de 1956 a 1968 foram fornecidos pela Estação Deception (-62,19°S, -58,94°W; 1 m a.s.l.), localizada na Ilha Deception (a 30 km da estação brasileira), Shetlands do Sul. Também foram utilizados dados de temperatura média mensal nos meses de inverno de *Reanalysis Interim Release* (ERA-Interim) para investigar a variabilidade climática na região.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As ilhas Rei George e Nelson apresentaram mudanças nas últimas décadas, ambas mostram aumento na área total de lagos proglaciais de 455% (de 0,18 para 1,02 km² ao total) desde 1988.

Quando se compara as variações nos lagos e nas geleiras (que alimentam os lagos) por ilha e por período (nos períodos: 1988-2000 e 2000-2018 na IRG e 1989-2003 e 2003-2018 na IN), observam-se contrastes. A IRG apresentou o aumento de lagos de 0,401 km² no período 1988-2000, que representa 308% da área existente (de 0,130 km²) em 1988 e no segundo período (2000-2018) foi de 0,246 km², que

representa 46% da área de 0,531 km² de 2000 (Tabela 1)(Figura 2). O maior aumento de área dos lagos acompanha o aumento de perda de área das geleiras, há maior aumento no primeiro período e desaceleração no segundo período. Houve uma perda de área glacial de 5,16 km² no período 1988-2000, representando 5,4% da área de 94,57 km² em 1988, e 3,23 km² no período 2000-2018, representando 3,6% da área de 89,42 km² em 2000.

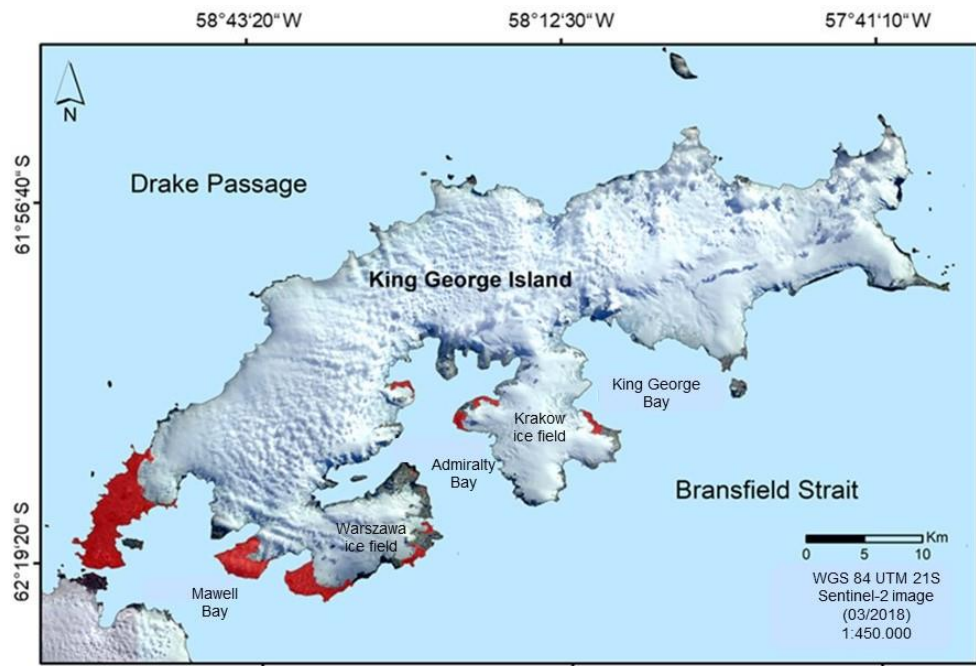


Figura 2 – Áreas livres de gelo analisadas na IRG.

A IN evidenciou uma perda glacial de 12 km², representando 7,7% da área de 142 km² de 1989 no período 1989-2018. Na ilha Nelson a maioria das geleiras são de frente marinhas e com isso há constante desprendimento de icebergs (Figura 3). Com a retração das geleiras com frente marinhas algumas delas nas últimas décadas passaram a expor novas áreas livres de gelo e com isso houve aumento na área de lagos. No período 1989-2003 houve aumento de área de lagos de 0,103 km² (190% da área de 0.054 km² de 1989), e no período 2003-2018 o aumento foi de 0,089 km² (56% da área de 0.157 km² de 2003) (Tabela 1).

Tabela 1 – Mudanças nos lagos proglaciais da ilha Rei George e Nelson

	Ilha Rei George	Ilha Nelson
Área em (km ²) 1988/89	0,130 ±0,096	0,054 ±0,1
Área em (km ²) 2000/03	0,531±0,1	0,157 ±0,098
Área em (km ²) 2018	0,777 ±0,09	0,246 ±0,1
Aumento de área (km ²) 1988/89-2000/03	0,401	0,103
Aumento de área (km ²) 2000/03-2018	0,246	0,089
Percentual de aumento (%)1988/89-2000/03	308%	190%
Percentual de aumento (%) 2000/03-2018	46%	56%

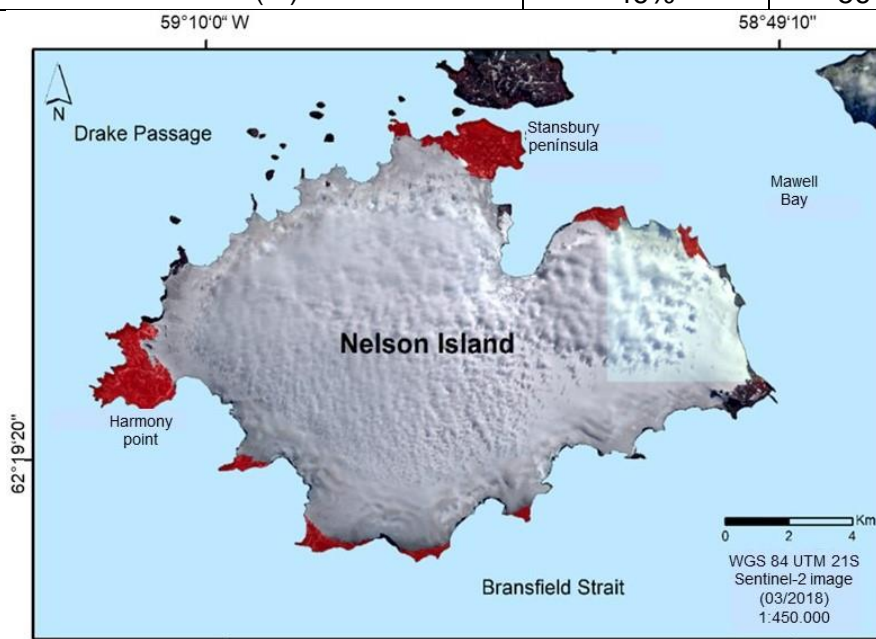


Figura 3 – Áreas livres de gelo analisadas na IN.

Os lagos marginais ao gelo mostram-se sensíveis às mudanças climáticas e a sua variação no período acompanha a perda de área apresentada pelas geleiras. As mudanças evidenciadas relevam a alta sensibilidade às alterações climáticas desta região polar, a região da Antártica Marítima, a qual encontra-se em posição climática próxima do limite térmico de ocorrência de permafrost na Antártica, com temperaturas médias anuais ligeiramente inferiores a 0 °C (BRAUN e GOSSMANN, 2002; VIEIRA *et al.*, 2010).

Estas mudanças podem estar relacionadas à tendência de aumento da temperatura média do ar regional (Figura 4) e à variabilidade da temperatura média do ar apresentada no inverno no período. Rafał *et al.*, (2018) também relacionam o comportamento de perda de área das geleiras nas últimas décadas ao número de dias com temperatura acima de 0 °C. Pequenos aumentos na temperatura podem

acarretar em alterações nos ambientes, com consequências ao ecossistema das áreas livres de gelo (ARIGONY NETO; BREMER; SIMÕES, 2001).

A IRG apresenta um aumento do número de dias por ano com precipitação líquida (quando analisado o período 1986-2011) (FERRANDO; VIEIRA; ROSA, 2009), o que influencia diretamente no aumento do derretimento de neve e gelo das geleiras, bem como aumenta a quantidade de água líquida no sistema, alimentando os lagos glaciais.

Os dados de reanálise mostram um padrão de oscilação na temperatura nos meses de inverno (junho-agosto) com uma tendência a resfriamento na década de 1970, uma tendência a aquecimento na década de 1980 e início da década de 2000 seguido pela tendência de resfriamento.

O comportamento de desaceleração no aumento nos lagos para o período 2000-2018 acompanha o que foi encontrado para a geleira Baranowski o qual é relacionado à tendência de resfriamento atmosférico no mesmo período na Península Antártica (SZIŁO e BIALIK, 2018). Rafał *et al.*, (2018), registraram uma maior perda de área para as geleiras no campo de gelo Warszawa no período 89-2001 e uma desaceleração na perda de área no período 2001-2007.

A tendência de resfriamento de $-0,47^{\circ}\text{C}$ durante 1999-2014, evidenciada por análises recentes da temperatura atmosférica regional de Turner *et al.*, (2016), contrasta com a tendência de aquecimento de $0,32^{\circ}\text{C}$ entre 1979-1997 na península antártica. Oliva *et al.*, (2017) demonstraram que esse resfriamento foi iniciado em 1998/1999 e tem sido mais significativo no norte e nordeste da PA e nas ilhas Shetland do Sul. Este comportamento de formação e aumento de lagos com a retração e tendência à aquecimento global vem sendo encontrado também em regiões de montanha e no Ártico. Estes processos são vistos no Karakoram Himalaia Platô Tibetano, estudos de Zhang *et al.*, (2015) mostram que os lagos alimentados por geleiras apresentaram expansão mais rápida que os lagos não alimentados por geleiras, a água de degelo é a principal causa da expansão da maioria dos lagos glaciais no período 1990-2010 na área. No norte do Butão, também no Himalaia, Bajracharya, Maharjan, e Shrestha (2014), relataram uma perda de 23% na área da geleira entre 1980 e 2010, esse recuo levou a um aumento de 20% no número de lagos na região (CHE; XIAO; LIOU, 2014). Com o recuo da frente da geleira a área de lago poderá diminuir ou se manter estável nos próximos anos, já que agora a

conexão é bem mais reduzida e alterará o fluxo de nutrientes para o lago. No Nepal Che, Xiao, e Liou (2014) evidenciaram que as geleiras na bacia Gelhaipuco perderam 19% da área total desde a década de 1970 e que a taxa de retração aumentou no período 2001-2013, fazendo com que o número de lagos aumentasse de 199 para 254 desde os anos 70.

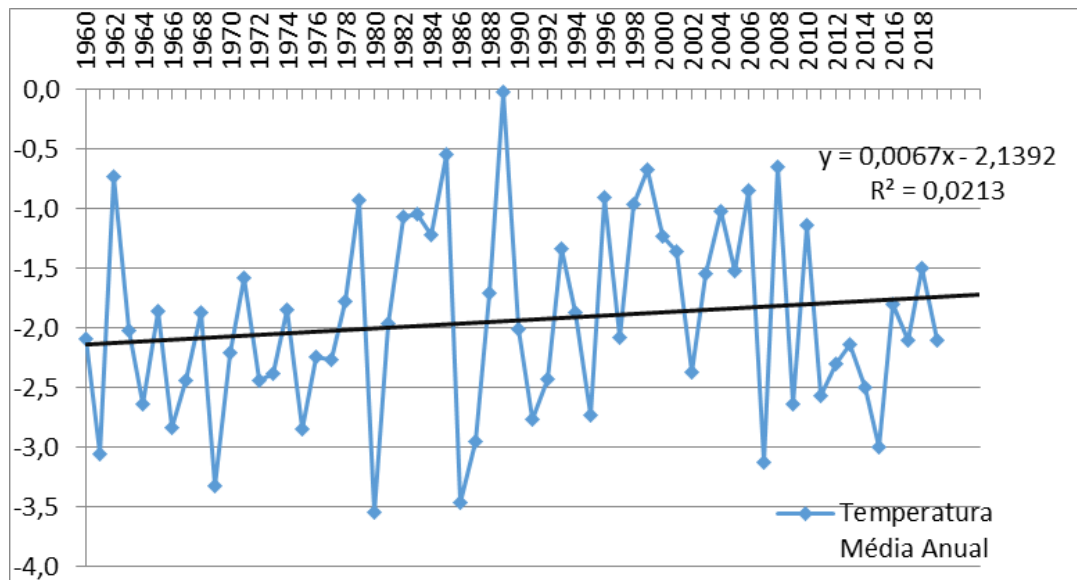


Figura 4 – Variabilidade e tendência na temperatura média do ar apresentada no inverno no período.

A mudança de término de frente marinha para terrestre, observada nas geleiras em ambas as ilhas influenciou a formação de corpos hídricos. No entanto, é importante também considerar que a formação de lagos pode estar associada a outros fatores, como por exemplo, a declividade, orientação, altitude, distância do mar e distância da geleira.

As alterações evidenciadas nas áreas livres de gelo nas Shetlands do Sul são indicadores das características do sistema glacial e paraglacial da região e mostram que os lagos marginais ao gelo são sensíveis às mudanças climáticas. Quesada e Kaup (2006) também afirmam que a dinâmica dos canais de drenagem glaciais e todo sistema hidrológico em altas latitudes são extremamente sensíveis às mudanças de temperatura do ar. Os lagos analisados compõem o sistema paraglacial e periglacial. O paraglacial é transitório devido ao seu comportamento não constante, como definido por Knight e Harrisson (2018). Assim, a observação de cada data de imagem representa um momento na estação de ablação e podem não

representar o equilíbrio dos lagos. Muitos estudos do sistema paraglacial são direcionados a acompanhar a evolução dos lagos e as áreas de risco à inundação por extravasamento da água do lago (KNIGHT E HARRISSON, 2018).

Os resultados podem contribuir para refletir sobre possíveis cenários para os lagos diante da projeção de tendência à aumento da temperatura média do ar de 1.5°C para as próximas décadas (e.g. SIEGERT *et al.*, 2019). Novos lagos poderão continuar aparecendo, pois Siegert *et al.*, (2019) citam que as águas profundas circumpolares (CDW) ficarão mais quentes e rasas, fornecendo calor à superfície do mar e às margens costeiras, e prevê a perda em volume e área das geleiras com retração das frentes marinhas para limites terrestres. Sendo assim, o processo de retração das geleiras e aumento da área de lagos, já evidenciado para os últimos 34 anos, poderá continuar caso cenários de aquecimento da temperatura do ar se concretizem.

5. CONCLUSÕES

Foi possível evidenciar o aumento da área de lagos em todo o período 1988-2018. Os resultados encontrados nas ilhas Rei George e Nelson vão ao encontro de resultados obtidos em outras áreas glaciais. A formação de novos ambientes proglaciais e lagos nas ilhas Rei George e Nelson são resultantes do processo recente de retração das geleiras.

As ilhas apresentaram um maior percentual de aumento de lagos no primeiro período 1988-2000 e desaceleração deste processo em 2000-2018 para as duas ilhas. O comportamento de maior aumento nos lagos para o período 1988-2000 acompanha a maior perda de área apresentada pelas geleiras no mesmo período e está relacionada à tendência de aumento da temperatura média anual do ar regional, à tendência de aumento da temperatura média nos meses de inverno (tendência a aquecimento na década de 1980 e início da década de 2000) e ao aumento do número de dias com temperatura acima de 0 °C no período. A desaceleração no aumento de área dos lagos está ligada à tendência de resfriamento iniciado em 1998/1999 para a região.

As alterações evidenciadas nas áreas livres de gelo na IRG e IN representam as mudanças nas Shetlands do Sul e são indicadoras das características do sistema

paraglacial da região e dos impactos das mudanças climáticas na região.

Os lagos marginais ao gelo mostram-se sensíveis às mudanças climáticas. As mudanças encontradas envolvem o sistema paraglacial e representam o grau de conexão dos lagos ao aporte de degelo da geleira. Desta forma, o monitoramento destes sistemas glaciolacustres é relevante para entendimento dos impactos da retração e para a interpretação dos processos em ambientes recentemente expostos. Os resultados podem contribuir para refletir sobre possíveis cenários para os lagos diante da projeção de tendência à aumento da temperatura média do ar para as próximas décadas.

Agradecimentos: À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS). Ao Centro Polar e Climático (CPC). Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (POSGEA) – UFRGS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA ESPACIAL EUROPEIA. **Sentinel Online**. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>. Acesso em 20/10/2018.

AHLERT S. **Variações morfológicas do campo de gelo da ilha Brabant, Antártica**. Dissertação (Mestrado), UFRGS, Porto Alegre, p. 102, 2005.

ANDRADE A. M.; ARIGONY J.; BREMER U. F.; MACHADO R. F.; ANDRADE A. C. F.; GONCALVES, C. E.; SCHAEFER R.; SIMÕES J. C. Cosmo-SkyMed X-band SAR data for classification of ice-free areas and glacier facies on Potter Peninsula, King George Island Antarctica. **Geocarto International**, v. 31, n. 7, p. 803-812, 2016.

ARIGONY NETO, J.; BREMER, U. F.; SIMÕES, J. C. Variações nas frentes de gelo da Enseada Martel, Ilha Rei George, Antártica, entre 1956 e 2000. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Foz do Iguaçu, p. 709-711, 2001.

BAJRACHARYA, S.; MAHARJAN S. B.; SHRESTHA, F. The status and decadal change of glaciers in Bhutan from the 1980 to 2010 based on satellite data. **Annals of Glaciology**, v. 55, n. 66, p.159-166, 2014.

BENN, D. I.; EVANS, D. J. A. **Glaciers and Glaciation**. 2ª ed. London: Hodder Education, p. 802, 2010.

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.). **Geoecology of Antarctic ice-free coastal landscapes**. Berlin: Springer-Verlag, v. 154 p. 75-89, 2002.

CAÑA, B. B.; ROSA, K.K.; ANDRADE, A. M. Caracterização geomorfológica das áreas livres de gelo e flutuações na geleira Polar Club, Península Potter, Ilha Rei George. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 1, p. 149-167, 2018.

CARRIVICK J.L.; TWEED F.S. Proglacial lakes: character, behaviour and geological importance. **Quaternary Science Reviews**, v. 78, p. 34–52, 2013.

CARROLL, M. L.; TOWNSHEND, J. R. G.; DIMICELI, C. M.; LOBODA, T.; A SOHLBERG, R. Shrinking lakes of the Arctic: spatial relationships and trajectory of change. Spatial relationships and trajectory of change. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 20, p. 1-5, 2011.

CHE, T.; XIAO, L.; LIOU Y. Changes in Glaciers and Glacial Lakes and the Identification of Dangerous Glacial Lakes in the Pumqu River Basin, Xizang (Tibet). **Advances in Meteorology**, v. 2014, p.1-8, 2014.

FERRANDO, F. A.; VIEIRA, R.; 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.

FREY, H.; PAUL, F.; STROZZI, T. Compilation of a glacier inventory for the western Himalayas from satellite data: methods, challenges, and results. **Remote Sensing Environmental**. v. 124, p. 832–843, 2012.

GLIMS. **Global Land Ice Measurements from Space**, disponível em <https://www.glims.org/> acesso em 20/03/2018.

JONES, B. M.; GROSSE, G.; ARP, C. D.; JONES, M. C.; ANTHONY, K. M. W.; ROMANOVSKY, V. E. Modern thermokarst lake dynamics in the continuous permafrost zone, northern Seward Peninsula, Alaska. **Journal Of Geophysical Research**, v. 116, p. 1-13, 2011.

KARLSSON, J. M.; JARAMILLO, F.; DESTOUNI, G. Hydro-climatic and lake change patterns in Arctic permafrost and non-permafrost areas. **Journal Of Hydrology**, v. 529, p. 134-145, 2015.

KNIGHT, J.; HARRISON, S. Transience in cascading paraglacial systems. **Land Degradation & Development**, v. 29, n. 6, p. 1991-2001, 2018.

OLIVA, M.; NAVARRO, F.; HRBÁČEK, F.; HERNÁNDEZ, A.; NÝVLT, D.; RUIZ-FERNANDEZ, J.; TRIGO, R. Recent regional climate cooling on the Antarctic Peninsula and associated impacts on the cryosphere. **Science of the Total Environment**, v. 580, p. 210–223, 2017.

NOVO, E. M. L. de M. Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações. São Paulo: Blucher, 4 ed. p. 387, 2010.

PERONDI, C. **Análise da evolução do ambiente proglacial das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, Ilha Rei George, Antártica.** Dissertação (Mestrado) UFRGS, Porto Alegre, p. 123, 2018.

PETSCH, C.; COSTA, R. M.; ROSA, K.K.; VIEIRA, R.; SIMOES, J.C. Identification and mesoscale mapping of the proglacial zone of the Collins glacier, King George Island, Antarctica. **Quaternary and environmental geosciences**, v. 10, p. 18-39, 2019.

POELKING, E.L.; ANDRADE, A.M.; VIEIRA, G.B.T.G.; SCHAEFER, E.C.G.R.; FERNANDES FILHO, E.I. Variações da frente da geleira Polar Club, Península Potter (Ilha Rei George, Antártica Marítima) entre 1986 e 2011. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 3, p. 319-388, 2014.

QUESADA, V.; KAUP, H. L. Landscape control of high latitude lakes in a changing climate. In: BERGSTROM, D. M. *et al.* (eds.), **Trends in Antarctic Terrestrial and Limnetic Ecosystems**, p. 221-252, 2006.

RAFAL, P.; ANGIEL, P.; POTOCKI, M.; EDREJEK, A.; KOZAK, M. Fluctuation of Glacial Retreat Rates in the Eastern Part of Warszawa Icefield, King George Island, Antarctica, 1979–2018. **Remote Sensing**, v.10, n.6, p. 892, 2018.

RIORDAN, D.; VERBYLA, D.; MCGUIRE, D. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images J. **Journal Of Geophysical Research**, v. 111, n. G04, p.1-11, 2006.

ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; FERNANDEZ, G.B.; SIMÕES, F.L.; SIMÕES, J. C. Glacial landforms and glaciological processes of the temperate. **Revista Investigaciones Geograficas**, v. 43, p. 03-16, 2011.

SIEGERT, M.; ATKINSON, A.; BANWELL, A.; BRANDON, M.; CONVEY, P.; DAVIES, B.; DOWNIE, R.; EDWARDS, T.; HUBBARD, B.; MARSHALL, G. The Antarctic Peninsula Under a 1.5°C Global Warming Scenario. **Frontiers In Environmental Science**, v. 7, p.1-7, 2019.

SHRIDHAR, J. D.; KAMANA, K.; ALVARINHO, L. J. A review on extraction of lakes from remotely sensed optical satellite data with a special focus on cryospheric lakes. **Advances in Remote Sensing**, v. 4, p. 196-213, 2015.

SMITH, Y.; SHENG, G.M.; MACDONALD, L.D. Disappearing arctic lakes. **Science**, v. 308, n. 5727, p. 1429, 2005.

SZIŁO, J.; BIALIK, R. Recession and Ice Surface Elevation Changes of Baranowski Glacier and Its Impact on Proglacial Relief (King George Island, West Antarctica). **Geosciences**. v. 8, n.10, p. 355, 2018.

TURNER, J.; LU, H.; WHITE, I.; KING, J.C.; PHILLIPS, T.; SCOTT HOSKING, J.; BRACEGIRDLE, T.J.; MARSHALL, G.J.; MULVANEY, R.; DEB, P. Absence of 21st Century Warming on Antarctic Peninsula Consistent With Natural Variability. **Nature**, v. 535, p. 411-415, 2016.

VIEIRA, G.; BOCKHEIM, J.; GUGLIELMIN, M.; BALKS, M.; ABRAMOV, A. A.; BOELHOUWERS, J.; CANNONE, N.; GANZERT, L.; GILICHINSKY, D. A.; GORYACHKIN, S.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, J.; MEIKLEJOHN, I.; RAFFI, R.; RAMOS, M.; SCHAEFER, C.; SERRANO, E.; SIMAS, F.; SLETTEN, R.; WAGNER, D. Thermal state of permafrost and active-layer monitoring in the Antarctic: Advances during the international polar year 2007–2009. **Permafrost and Periglacial Processes**, v. 21, n. 2, p. 182-197. 2010.

VIEIRA, R.; MAROTTA, H.; ROSA, K. K.; JANA, R.; SIMOES, C.L.; SOUZA JUNIOR, E.; FERREIRA, F.; SANTOS, L.R.; SANTOS, J.V.; PERRONI, M.A.; GONCALVES, M.; SANTOS, J.P.F.; RODRIGUES, R.I.; GALVAO, J.C.M.; FELIZARDO, J.P.S. Análisis Sedimentológico y geomorfológico de áreas lacustres en la Península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica Marítima. **Investigaciones Geográficas**, v. 49, p. 3-30, 2015.

WEN, J.; KANG, J.; XIE, Z.; HAVAUN, J.; ALBERT, L. Climate, mass balance and glacial changes on small dome of Collins Ice Cap, King George Island, Antarctica. **Antarctic Research**. v.5, n.1, p. 52-61, 1994.

ZHANG, G.; YAO, T.; XIE, H.; WANG, W.; YANG, W. An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming. **Global and Planetary Change**. v. 131, p.148-157, 2015.

3.3 ARTIGO 3 : EVOLUÇÃO DOS LAGOS DE ÁREAS LIVRES DE GELO DAS ILHAS NELSON E REI GEORGE, ANTÁRTICA MARÍTIMA DESDE 1988: UM ESTUDO COMPARATIVO POR SETOR AMBIENTAL

Resumo: O objetivo deste trabalho é investigar as potenciais causas da expansão dos lagos no período 1988/89-2018 através da comparação entre diferentes setores de áreas livres de gelo nas ilhas Rei George (IRG) e Nelson (IN). Os lagos foram agrupados por técnicas de agrupamento e estatística multivariada. A evolução de área dos lagos e geleiras são estimadas por segmentação e NDWI em imagens Landsat e Sentinel (foi obtido entre 68 e 77% de acurácia) e outros dados de sensores remotos orbitais. Os lagos que apresentaram maiores variações percentuais de área foram os alimentados por aporte de água de degelo glacial e costeiros (zona entre 0 e 30 m de elevação, baixa declividade e distância da linha de costa), destacando-se as áreas livres de gelo associadas à retração das geleiras Wanda, Viéville, Znosco e Anna Sul (636%, 214%, 173% e 110%, respectivamente). As menores variações percentuais (83%, 71%, 68%, 43% e 20%) ocorrem em lagos nas áreas livres de gelo associadas à retração das geleiras Baranowski, Polar Club (Península Potter), da calota de gelo da ilha Nelson, da geleira Fourcade (Península Barton) e das áreas livres de gelo na península Fildes, respectivamente. Foram formados 37 novos lagos no período 1988-2018. O aquecimento atmosférico, retenção da água de degelo glacial e a coalescência de lagos pequenos e costeiros influenciam a evolução dos lagos marginais ao gelo em escala decadal. Aponta-se que os ambientes marginais ao gelo das geleiras Wanda, Viéville, Znosco, Anna Sul, e Baranowski na IRG e novas áreas livres de gelo na IN evidenciam as maiores mudanças nas recentes duas décadas e necessitam de um monitoramento futuro e maior atenção.

Palavras-chave: retração glacial; lagos alimentados por geleiras; processo paraglacial

Abstract: This study aims to investigate the glacial lake expansion in 1988/89-2018 period in King George Island (KGI) and Nelson Island (NI) through ice-free land sector comparison. Lake sectors were grouped by multivariate statistics techniques. Areal lake and glacier evolution are estimated by Landsat and Sentinel images segmentation and NDWI (was obtained 68-77% of the accuracy) and using others spaceborne remote sensing data. Specifically, coastal (altitudinal zones between 0 and 30 m, lower slope and coastal line distance) and glacier-fed lakes has the higher variation. Wanda, Viéville, Znosco e Anna Sul ice-marginal lakes have increased by 636%, 214%, 173% and 110%, respectively. The lower variation (83%, 71%, 68%, 43% and 20%) were showed in lakes of the ice-free land areas exposed by shrinkage in Baranowski Glacier, Polar Club Glacier (Potter Peninsula), NI ice cap, Fourcade Glacier (Barton Peninsula), and in Fildes Peninsula, respectively. Were detected the formation of 37 new glacial lakes in the 1988-2018 period. The climate warming, meltwater retention due glacier discharge, and coalescence of small and shallow lakes too play important roles in ice-marginal lakes evolution at decadal-scale variations. Based on glacial lakes and glacier changes in this South Shetland region, the recent (e.g. Wanda, Viéville, Znosco, Anna Sul, e Baranowski and NI new ice-free land areas) land-terminating ice-marginal environments that need to be closely monitored in the future.

Keywords: glacial retreat; glacier-fed lakes; paraglacial processes.

1. INTRODUÇÃO

Em resposta à tendência de aumento das temperaturas superficiais do ar na região da Península Antártica desde 1950 (SIMÕES e BREMER, 1995; AQUINO, 1999; ROSA *et al.*, 2009; ANDRADE *et al.*, 2011; KEJNA; ARAZNY; SOBOTA, 2013; SIMÕES *et al.*, 2015) vários estudos evidenciam a retração de geleiras nas últimas décadas (RAU *et al.*, 2004; RIGNOT *et al.*, 2013; COOK *et al.*, 2014; 2016; PERONDI, 2018; PETSCH, 2018; ARIGONY-NETO, 2001; AHLERT 2002; CANA, 2016; OLIVEIRA, 2018). A retração das geleiras ocasionou um aumento nas áreas livres de gelo, expondo formas de relevo e depósitos, na área proglacial, gerando novos ambientes lacustres e terrestres (DOWDESWELL; COFAIGH; PUDSEY, 2004; ROSA; VIEIRA; SIMÕES, 2006, 2010, 2014, 2016). Estes lagos se desenvolvem à medida que as geleiras recuam, geralmente se formando em bacias esculpidas pela erosão glacial, depressões kettles, morfologias tectônicas que favorecem a retenção da água de degelo ou formados pelo represamento de morainas (NEDBALOVÁ *et al.*, 2013; HECKMANN; MCCOLL; MORCHE, 2015).

O processo de retração de geleiras é responsável pelo aumento de área e número de lagos proglaciais (CARRIVICK e TWEED, 2013; KUNZLER *et al.*, 2010) e dessa forma existem diversos tipos de lagos com tamanhos, origem e tempo de formação diferentes (CARRIVICK e TWEED, 2013). A formação, evolução e persistência de lagos proglaciais estão fortemente ligadas à dinâmica da geleira, à natureza do ambiente circundante, à dinâmica dos canais de água de degelo, à ligações ao comportamento da geleira e às mudanças climáticas (QUESADA *et al.*, 2006; CARRIVICK e TWEED, 2013).

É registrado o aumento significativo na dimensão e número de lagos associados à regiões glaciais de alta montanha em todo o mundo, como na Groelândia (CARRIVICK *et al.*, 2014), Andes (LLIBOUTRY, 1977 ; EMMER e VILÍMEK, 2013; COOK *et al.*, 2016), Alpes (HUGGEL *et al.*, 2002; EMMER *et al.*, 2015), região do Himalaia-Karakoram-Tibete (HKT) (KOMORI, 2008; BAJRACHARYA e MOOL, 2009; GARDELLE; ARNAUD; BERTHIER, 2011; WANG; YAO; YANG, 2011; SONG; HUANG; RICHARDS, 2014; AGGARWAL *et al.*, 2017; DEBNATH *et al.*, 2018), Ásia central (JANSKÝ; SOBR; ENGEL, 2010; MERGILI; MÜLLER; SCHNEIDER, 2013) e Cordilheira Ocidental da América do Norte

(CLAGUE e EVANS, 2002; EMMER *et al.*, 2016). Os autores atribuem as mudanças à diversas causas, como a tendência de aquecimento atmosférico, à retração glacial e ao aumento da retenção do aporte de água de degelo glacial, coalescência além de variações nos fatores que levam o derretimento da neve sazonal.

Na Antártica, estudos têm sido mais direcionado ao monitoramento biológico e químico da água e dos sedimentos lacustres, e exemplos de mapeamentos e caracterizações (origem e contexto geomorfológico) para as Shetlands do Sul podem ser relacionados à lagos na Península Byer (Ilha Livingstone), lagos na Península Barton e lago Langer, e outros na península Fildes (Ilha Rei George) por Convey e Peck (2019), Oliva *et al.*, (2019), Khim *et al.*, (2004) e Shevnina e Kourzeneva (2017). Variações nos lagos são reportadas no lago Boeckella (alimentado por geleira) (Hop Bay) por Izaguirre *et al.*, (2012), que verificaram a diminuição no lago a partir de 2001 devido ao progressivo descongelamento do permafrost na base do sistema lacustre; o surgimento e evolução de lagos marginais ao gelo com a retração da geleira Baranowski por Szilo e Bialik (2018); e, na Ilha Rei George o aumento de área dos lagos marginais ao gelo é reportada por Cana (2016) para 2006 à 2011 na Península Potter. Porém, a evolução do número, área e volume dos lagos, das áreas livres de gelo e as causas das variações são pouco documentadas.

O objetivo desta pesquisa é comparar a variação dos lagos das áreas livres de gelo da ilha Rei George e Nelson para investigar as potenciais causas da expansão no período 1988/89-2018.

2. ÁREA DE ESTUDO

Na ilha Rei George, Shetlands do Sul (Figura 01), foram analisadas as seguintes áreas livres de gelo: península Fildes, Barton e Potter, ambas voltadas para baía Maxwell; também as áreas livres de gelo nas margens das geleiras Windy, Baranowski, Znosco, Wanda e Viéville, estas voltadas para baía do Almirantado, e da Anna Sul voltada para baía Rei George no setor leste do campo de gelo Krakow. Na ilha Nelson a análise compreende as penínsulas Stansbury e Harmonia e ainda todas as novas áreas livres de gelo (Figura 01) geradas pela retração das bacias de drenagens que fluem da calota da ilha Nelson.

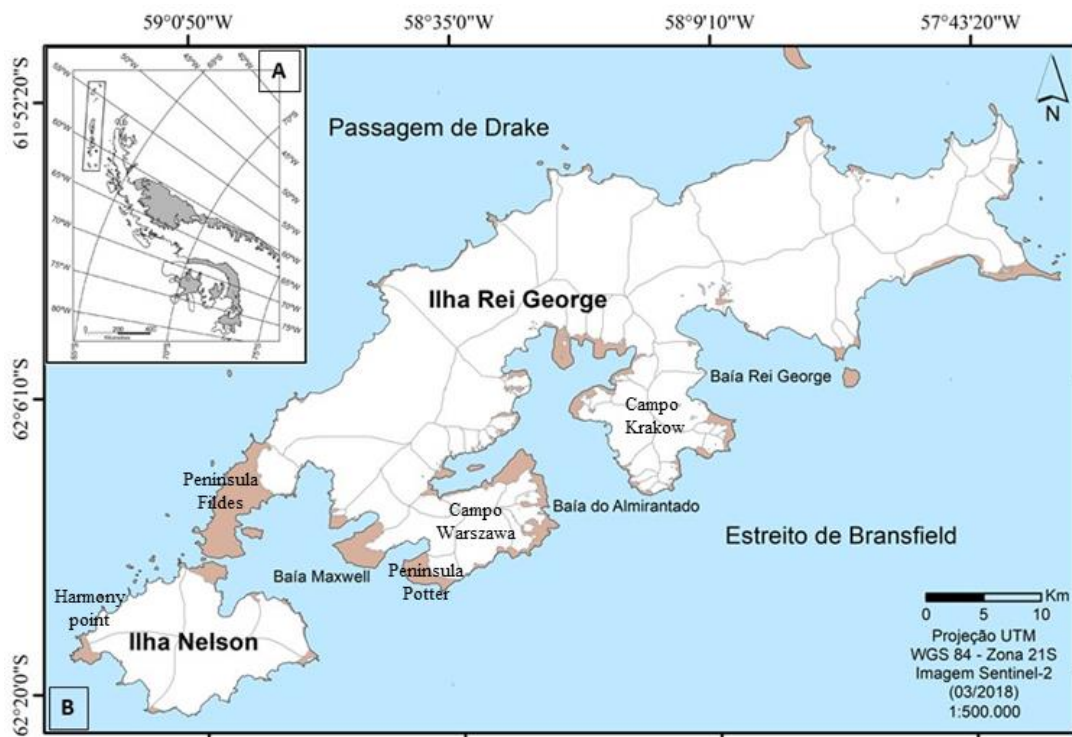


Figura 01: Localização das ilhas Rei George e Nelson (B) na Península Antártica (A). Base de dados GLIMS.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Banco de dados

Os dados utilizados para o mapeamento dos lagos e das geleiras são imagens de diferentes datas e satélites (Quadro 1). É importante ressaltar que somente imagens sem cobertura de nuvem, para as áreas de interesse, foram escolhidas para o mapeamento. Também foram utilizados dois Modelos Digital de Elevação (MDEs) (Quadro 1). Os dados de área de geleiras também foram obtidos de trabalhos de Oliveira (2018) (campo de gelo Kraków no período 1988-2018), Petsch (2018), Perondi (2018) (campo de gelo Warszawa no período 1988-2018), Arigony (2001) (na ASMA Baía do Almirantado no período de 1988-2000) e do GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space). Registros fotográficos de atividades de campo de 2007, 2010, 2011, 2013, 2014 e 2019 contribuíram para as análises.

Dado/ Satélite	Data	Sensor	Resolução espacial/acurácia vertical (m)	Fonte
Landsat 5	01/03/1986	TM	30	USGS
Landsat 4	27/02/1988	TM	30	USGS
Landsat 4	28/01/1989	TM	30	USGS
Landsat 7	09/01/2003	ETM+	30	USGS
Landsat 7	28/01/2003	ETM+	30	USGS
Landsat 8	13/02/2015	OLI	30	USGS
Landsat 8	19/03/2016	OLI	30	USGS
Sentinel 2 (RGB 843)	01/03/2018	MSI	10	USGS
Quickbird	2011	Multiespectral	2,8	CPC
SPOT (RGB 321)	23/02/2000	MSS	10	CPC
TANDEM X	-	-	12 (espacial) 2,9 (vertical)	Braun, Betsch e Seehaus (2016)
REMA 8	-	-	8 (espacial) 0,6 (vertical)	PGC

Quadro 1- Imagens utilizadas na análise de geleiras e lagos neste estudo.

3.2 Mapeamento dos lagos glaciais

As imagens foram submetidas a um pré-processamento, no plugin SCP do Sistema de Informação Geográfica QGIS 3.4, onde foi realizada a transformação dos valores de número digital para reflectância e aplicada à correção atmosférica DOS1. Para as imagens Landsat 8 foi realizada a reprojeção dos arquivos para o Hemisfério Sul. Posteriormente, as imagens foram recortadas e aplicado um processo de segmentação pelo método de crescimento de regiões, com número máximo de interações sendo 5, considerando uma área de 8 pixels vizinhos.

A partir das imagens pré-processadas também se foi aplicado o NDWI - índice de diferença normalizada da água (MCFEETERS, 1996), de acordo com as equações a seguir:

$$\text{NDWI (Landsat 5)} = (b2 - b4) / (b2 + b4) \text{ (Equação 1)}$$

$$\text{NDWI (Landsat 8)} = (b3 - b5) / (b3 + b5) \text{ (Equação 2)}$$

O método adotado para esta pesquisa foi baseado em Huggel *et al.*, (2002), Li, Sheng, Luo (2011), Song *et al.*, (2014) e Rai e Mishra (2017) que utilizaram uma abordagem integrada para delimitar os lagos de sua área de estudo, com delimitação visual somada a imagens segmentadas e dados de NDWI. Para as

imagens de resolução espacial inferior a 10m (SPOT e Quickbird), a delimitação foi feita somente a partir de vetorização manual (WANG; YAO; YANG, 2011). Os MDEs Tandem-X e REMA 8 foram utilizados para criar uma máscara nas áreas de maior declive onde ocorreu a formação de sombras, retirando essas porções da delimitação dos lagos.

Ressalta-se que foi necessário construir mosaicos de imagens, de diferentes datas devido a presença de nuvens em algumas áreas livres de gelo, conforme metodologia de Nie *et al.*, (2015). Sendo assim, as imagens representam um mapeamento que não se restringe a uma data específica, e sim a um período, entre 1986-1989, 2000-2003, 2015-2016 e 2018.

3.3 Medidas de área de lagos glaciais e geleiras

Para aumentar a acurácia do mapeamento seguiu-se a metodologia de Carrivick e Quincey (2014), de que os arquivos de vetores do primeiro ano mapeado foram sobrepostos na data seguinte, dessa maneira foi considerado que não houve o desaparecimento de lagos. Essa técnica foi necessária devido a presença de gelo e neve encobrendo a superfície de lagos, em algumas imagens.

Para o cálculo da área das geleiras, foi utilizada a base de bacias de drenagem glacial do GLIMS. A partir desse arquivo vetorial, foram delimitadas as frentes das geleiras em 1986-1989, 2000, 2003, 2011, 2015 e 2018, utilizando o método da interpretação visual. Atividades de campo de 2011, 2013 e 2019 possibilitaram evidenciar as características de alimentação do lago por água de degelo da geleira. Os lagos alimentados por geleiras, associados aos ambientes marginais ao gelo (lagos de contato direto ou conectado por canais à geleira), e os não alimentados por aporte de água de degelo glacial são relacionados ao sistema paraglacial nas áreas de estudo.

3.4 Validação dos dados

A validação dos dados foi realizada utilizando o plugin SCP do SIG QGIS 3.4. O índice de acurácia foi calculado tendo como verdade de campo os lagos

delimitados a partir das imagens SPOT e Quickbird (Figura 02).

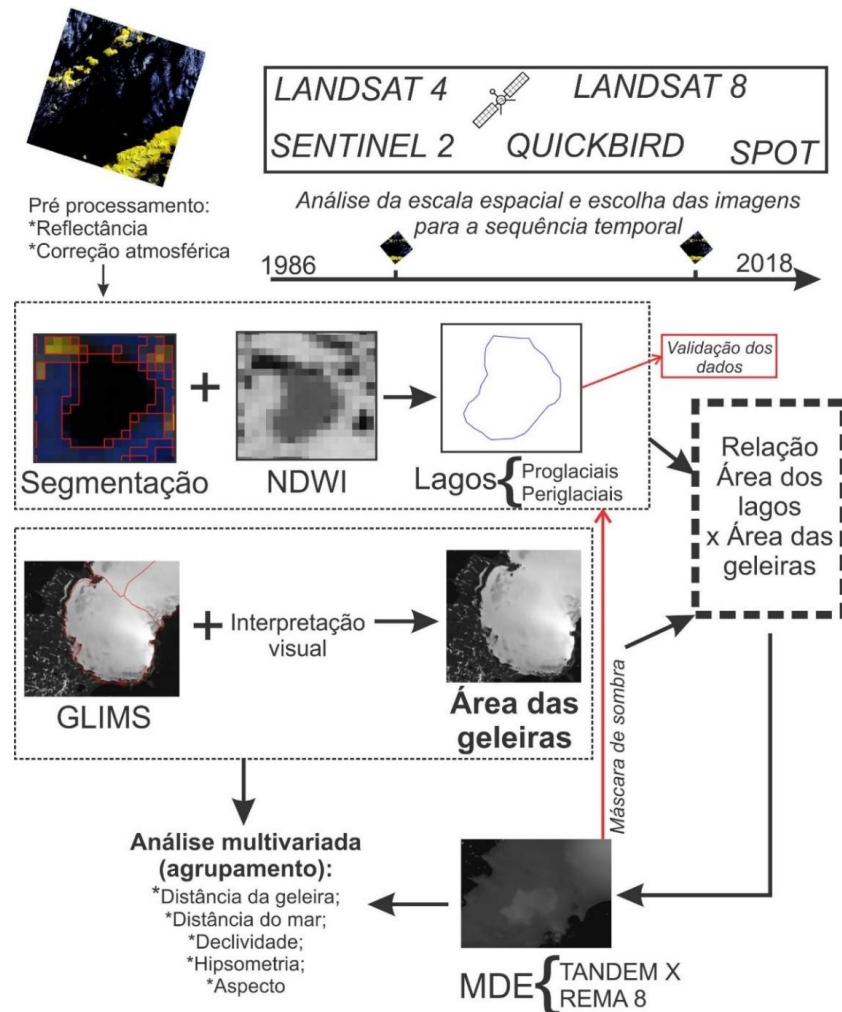


Figura 02 - Fluxograma do método adotado para mapeamento da área e número de lagos, área das geleiras e análises ambientais.

3.5 Interpretação da localização dos lagos

Foi realizada uma análise estatística multivariada, por agrupamento. O método utilizado foi hierárquico, com parâmetro de distância euclidiano e o número de agrupamentos estimado pelo software Action Stat. As informações utilizadas foram: tipo de lago (marginal ao gelo, ou seja, alimentado por aporte de água de degelo glacial x lago não alimentado por aporte de água de degelo de uma geleira), declividade, hipsometria, aspecto, distância da geleira e do mar. Os parâmetros morfométricos foram gerados a partir dos MDEs utilizando a ferramenta slope e aspect do QGIS 3.4.

4 RESULTADOS

4.1 Contexto ambiental por agrupamento dos dados para cada setor

Na península Stansbury, os lagos apresentaram-se em áreas caracterizadas por: a) estão na classe de elevação de 0-30 m, b) declividade de 0-30%, c) distância da margem da geleira de 1200-1600 m e do mar de 200-400m. Na península Harmony, os lagos se encontram em: a) elevações de 0-30 m, b) declividades de 0-3%, c) distância da geleira entre 0 e 100 m. Os lagos na península Stansbury caracterizam-se como lagos que não sofrem influência direta da geleira, enquanto os lagos na península Harmony, a maioria são alimentados pelo aporte de água de degelo da geleira (com a exceção de um lago onde há maior distância da geleira 500-600 m).

Na península Fildes, há 38 lagos com maiores semelhanças quanto aos dados ambientais e são: a) em elevação entre 30 e 150 m, b) declividade variada, c) distância mínima da geleira de 600 m e a máxima pode chegar a 7000 m, e por isto, são considerados não marginais ao gelo, ou seja, sem aporte de água de degelo de geleira. Nas novas áreas livres de gelo da ilha Nelson são encontradas elevações de 0-40 m e baixas declividades, os lagos são bem próximos da margem glacial e também do mar, já que são áreas pequenas.

Na península Barton, quatro, dos cinco lagos existentes, apresentam: a) elevações de 120-150 m, b) declividades de 30-40% e c) distância da margem glacial de 200-1700 m.

Na península Potter, os lagos foram separados em 3 grupos, sendo que o grupo um é o maior em área total (com 5 lagos), o grupo dois com 3 lagos e o grupo três com 2 lagos. De forma geral, os lagos possuem: a) 30-60 m de elevação, b) declividade de 20-30%, c) distância do mar de 100-200 m, d) orientação leste e sul.

No setor marginal ao gelo da geleira Anna Sul, os 3 lagos apresentam características quanto à localização muito semelhantes, eles se encontram em altitudes de 0-30 m, estão em baixas declividades 0-7%, e se encontram de 0-400 m de distância da geleira e todos com orientação sul.

Na baía do Almirantado, na área marginal ao gelo da geleira Baranowski, os

seis lagos foram agrupados em dois grupos. O primeiro grupo contém 3 lagos com as mesmas características: a) classe de elevação de 0-30 m, b) declividades inferiores a 3%, c) distância do mar entre 0 e 100, d) orientação leste. O segundo grupo de lagos apresentam: a) classe de elevação de 30-60, b) declividades inferiores a 3%, c) entre 0 e 100 m de distância da geleira d) orientação leste. Enquanto, nos ambientes marginais ao gelo das geleiras Wanda, Znosco, Windy e Viéville há: a) um lago por setor, b) ambiente marginal ao gelo e próximo ao mar, c) classe de elevação de 0-30 m e declividade baixa.

4.2 Variação dos lagos e geleiras no período 1988-2018 por setor

Os lagos das áreas livres de gelo na Península Fildes, Barton, Potter, Ponta Harmony e Stansbury e nos ambientes marginais ao gelo associados à retração das geleiras Windy, Znosco, Anna Sul, Baranowski, Viéville e Wanda aumentaram 0,07, 0,02, 0,13, 0,004, 0,023, 0,23, 0,08, 0,08, 0,02, 0,02, 0,06 km², respectivamente, desde 1988. Também houve um aumento no número de lagos. Estas variações são contrastadas com as flutuações das geleiras no mesmo período.

O lago da margem da geleira Windy (Figura 03, A e figura 05) apresentou o maior aumento de área de lagos 0,184 km² no período 1988-2000 e 0,046 km² no período 2000-2018. Em 1988 não havia lagos na área e por isso neste período (1988-2000) houve este aumento, já no segundo período o aumento de área representa 25% da área de 2000. A retração da geleira também foi evidenciada no período, quando ela perdeu 0,72 km² (21,3% de sua área total de 3,38 km² em 1988) de área de geleira no período 1988-2000 e 0,26 km² (9,7% de sua área de 2,66 km² de 2000) no período 2000-2018.

A área de lagos na margem da geleira Baranowski aumentou de 0,012 km² no período 1988-2000 e 0,010 km² no período 2000-2018, representando 83% no segundo período. Esta geleira (Figura 03, B e figura 05) apresentou uma perda de 0,55 km² (17,7% de sua área total de 3,09 km² em 1988) de área no período 1988-2000 e 0,20 km² (7,8% de sua área de 2,54 km² de 2000) no período 2000-2018. Em 1988, a geleira Baranowski era de maré, e por isso não havia lagos no setor frontal, em 2000, já é possível observar 1 lago com área de 0,012 km² e, em 2018, 6 lagos marginais ao gelo (totalizando uma área de 0,022 km²).

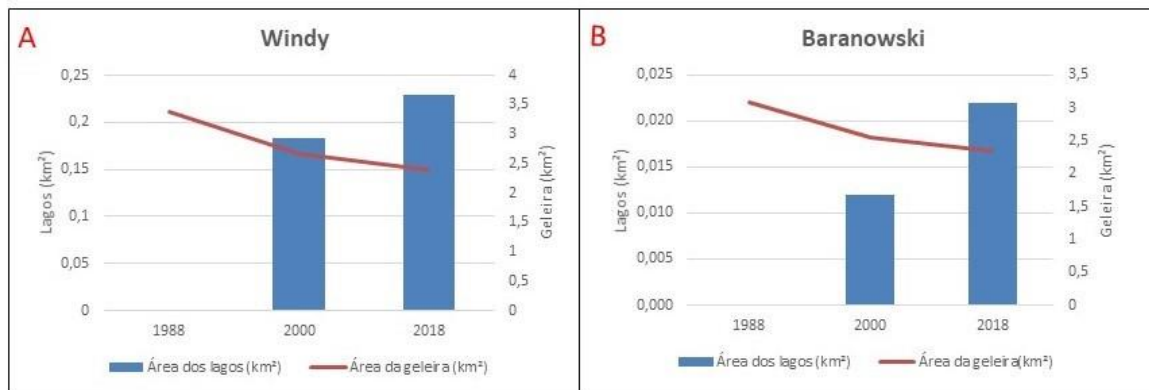


Figura 03 - Relação área da geleira e área dos lagos entre 1988 a 2018 nas margens das geleiras Windy (A) e Baranowski (B).

Na margem da geleira Anna Sul (Figura 04 A), que é a maior das geleiras analisadas, a área de lago aumentou 0,037 km² no período 1988-2000 e 0,041 km² no período 2000-2018, representando um aumento de 110% no segundo período. A geleira teve uma perda de 1,48 km² (6,6% de sua área total de 22,4 km² em 1988) de área no período 1988-2000 e 0,63 km² (3% de sua área de 20,92 km² de 2000) no período 2000-2018. Até 1988 a geleira apresentava toda sua frente no mar, no entanto, com a retração no setor marginal sul, é possível observar um lago conectado a geleira e bem próximo do mar (com área de 0,037 km² em 2000). Este lago teve sua área aumentada para 0,078 km² em 2018, dividindo-se em 3 lagos.

A geleira Viéville (Figura 04 B e figura 05), que é a segunda maior geleira desta análise, segue a tendência de retração e aumento da área de lagos no período. O aumento de lagos no primeiro período foi de 0,007 km² e 0,015 km² no período 2000-2018, representando um aumento de 214% no segundo período. A geleira apresentou uma perda de 1,11 km² (5,1% de sua área total de 21,70 km² em 1988) de área de geleira no período 1988-2000 e 1,4 km² (6,7% de sua área de 20,59 km² de 2000) no período 2000-2018. Como a geleira Anna Sul, a geleira Viéville apresentava frente no mar, e em 2000 foi possível observar dois pequenos lagos (com área de 0,007 km² no setor sul da área livre de gelo formada desde 1988). O aumento da área de lagos no período 2000-2018 é ainda maior que no período anterior. Em 2018, os dois pequenos lagos juntaram-se, formando área de 0,022 km².

O setor livre de gelo da geleira Wanda (Figura 04 C e figura 05) também

passou por mudanças nas últimas décadas. Apresentou uma perda de 0,37 km² (18,5% de sua área total de 2 km² em 1988) de área de geleira no período 1988-2000 e 0,14 km² (8,5% de sua área de 1,63 km² de 2000) no período 2000-2018. O aumento de lagos no primeiro período foi de 0,008 km² e 0,051 km² no período 2000-2018, representando um aumento de 636% no segundo período, maior percentual de aumento de lagos neste estudo. A maior perda de área glacial foi no período 1988-2000, mas o maior aumento de área no lago foi no segundo período (2000-2018), com um aumento de 0,051 km² (0,008 km² para 0,059 km²).

O aumento do lago associado a retração da geleira Znosco foi de 0,03 km² e 0,052 km² nos períodos 1988-2000 e 2000-2018, respectivamente, representando uma variação de 173% no último período. A geleira Znosco (Figura 04 D e Figura 05) apresentou uma perda de 0,11 km² (5,7% de sua área total de 1,91 km² em 1988) de área no período 1988-2000 e 0,17 km² (9,4% de sua área de 1,80 km² de 2000) no período 2000-2018. A geleira, diferente da geleira Wanda, apresentou maior perda de área glacial no período 2000-2018. Em 2000 eram dois lagos com área de 0,03 km² e em 2018 apresentaram-se juntos, formando uma área de 0,082 km² (aumento de 0,052 km² desde 2000).

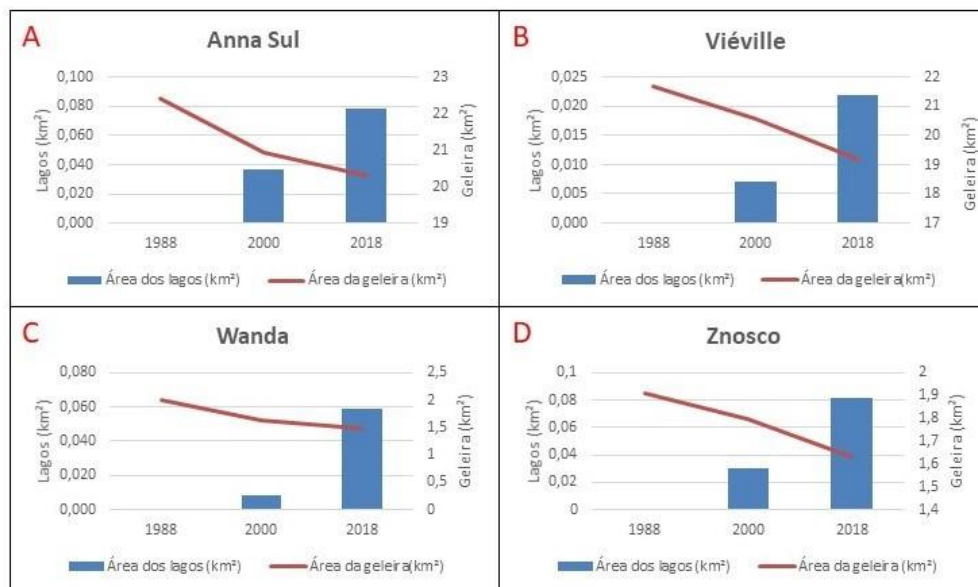


Figura 04 - Relação área da geleira e área dos lagos entre 1988 a 2018 na Anna Sul (A), Viéville (B), Wanda (C) e Znosco (D).

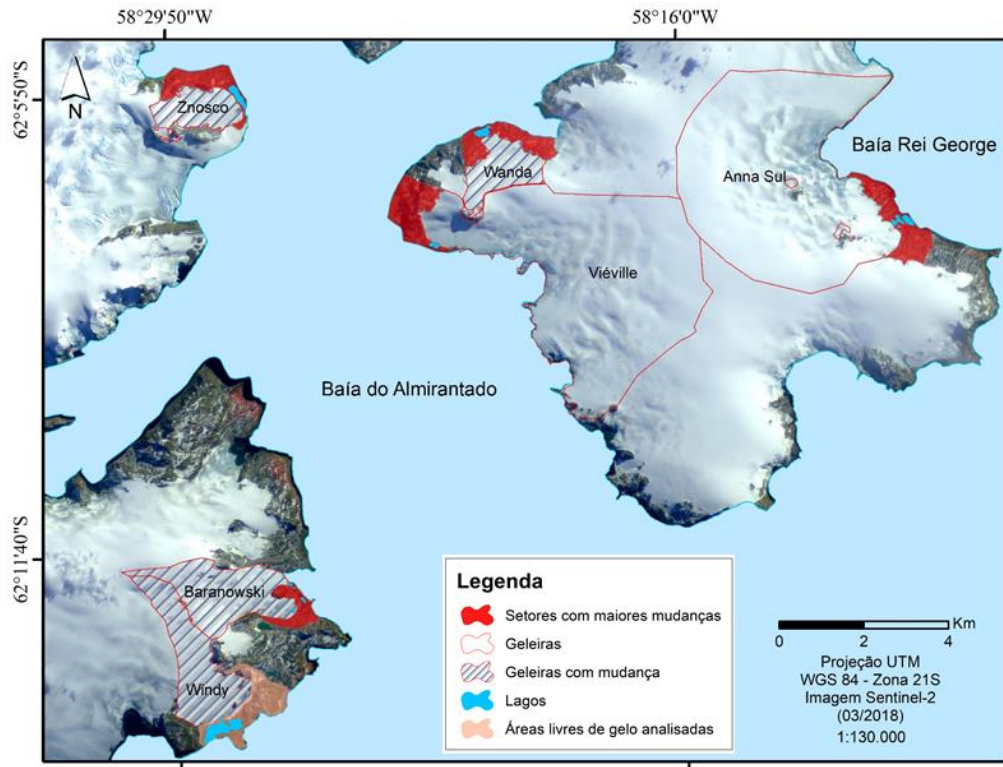


Figura 05: Mudanças nos lagos associados às geleiras voltadas para baía do Almirantado e Rei George.

A Península Potter (Figura 06 A e figura 08) perdeu 0,13 km² de área da geleira Polar Club no período 1989-2003 e 0,15 km² de 2003-2016 e houve um aumento dos lagos de 0,10 km² em 1989-2003 e de 0,04 km² no período 2003-2016. Da área total de lagos de 0,18 km², em 1989, apenas 0,08 km² são lagos alimentados por aporte de água de degelo da geleira, os 0,18 km² restantes são lagos sem alimentação por geleira. Os dois tipos aumentaram. Houve aumento de 9 lagos ao total no período 2003-2018, pois em 2003 eram 10 lagos e em 2018 eram 19 lagos. Os lagos não alimentados por geleira também apresentaram tendência de aumento em todo o período analisado.

A área de lagos na Península Barton (Figura 07) teve pouca variação no período 1989-2003 (0,057 km² em 1989 para 0,058 km em 2003), já no período 2003-2016 houve aumento de 0,024 km². Tanto os lagos não alimentados por aporte de água de degelo glacial, quanto os alimentados, tiveram pouca variação na área total. Quanto ao número de lagos este setor mostrou-se estável, em 1989 eram 11 lagos, já em 2003 e 2018 eram 12 lagos. A variação dos lagos por período acompanha a variação da geleira Fourcade (Figura 06 B), a qual apresentou

estabilização na retração (perdeu apenas 0,09 km² no período de 1989-2003 e a mesma área em 2003-2018).

Na Península Fildes os lagos marginais à geleira Collins (Figura 06 C e Figura 07), apresentam aumento de área de 0,073 km² apenas até 2003, no período posterior estes passaram a diminuir área (com perda de 0,075 km² no período 2003-2018). Esta evolução acompanha o comportamento de degelo da geleira Collins (Figura 04 C), a qual apresenta perda de 0,6 km² entre 1988 e 2003 e de 0,01 km² entre 2003 e 2018 (menor variação). Os lagos não alimentados por aporte de água de degelo glacial também apresentam pequeno aumento de área no primeiro período (0,31 km² em 1989 para 0,39 km² em 2003) e, após isso, passam a diminuir (área de 0,37 km² em 2018). O número de lagos mostrou-se praticamente estável nos dois períodos (42, 45 e 46 em 1989, 2003 e em 2018, respectivamente).

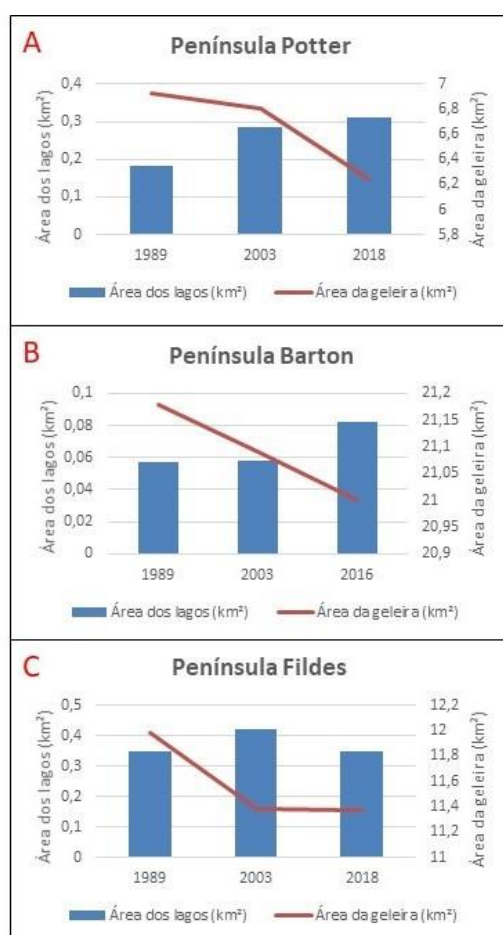


Figura 06 - Relação área da geleira e área dos lagos entre 1989 a 2016/18 nas penínsulas Potter (A), Barton (B) e Fildes (C).

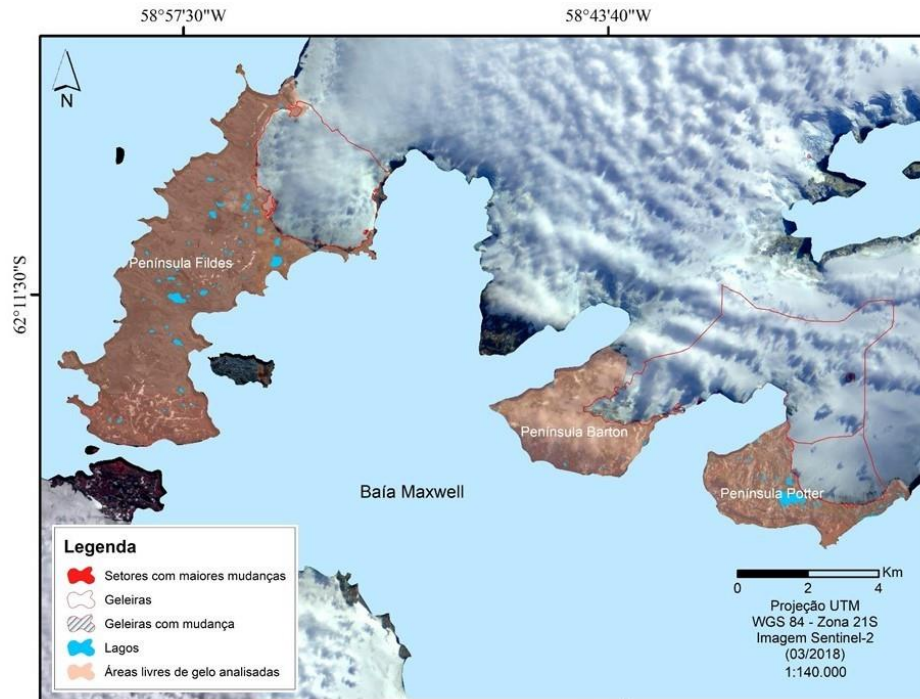


Figura 07 - Mudanças nos lagos nas penínsulas Fildes, Barton e Potter.

Na Ponta Harmonia (Figura 08 e Figura 9) observa-se que, entre 1989 e 2003, a geleira perdeu 0,12 km², enquanto, o aumento de lagos foi de 0,005 km². Dos lagos, apenas os marginais ao gelo tiveram alterações, os demais lagos (sem aporte de água de degelo glacial) se mantiveram estáveis no período. Já de 2003 a 2018, a geleira perdeu 1,45 km² e os lagos marginais ao gelo aumentaram de 0,036 km² para 0,039 km², já os não marginais ao gelo diminuíram de 0,044 em 2003 para 0,040 para 2018. Foi possível observar aumento de 3 lagos no período 1989-2018 (em 1989 eram 4 lagos e em 2018 eram 7 lagos).

A geleira na Ponta Stansbury (Figura 08 B e figura 9) mostrou com perda de 2,06 km² no período 1989-2003 e 0,05 km² no período 2003-2018. O aumento ocorreu nos lagos com aporte de água de degelo da geleira e sem aporte e totalizou 0,023 km² desde 1989. Também houve aumento de 7 lagos ao total desde 1989 (em 1989 eram 10 lagos e em 2018 já eram 17 lagos).

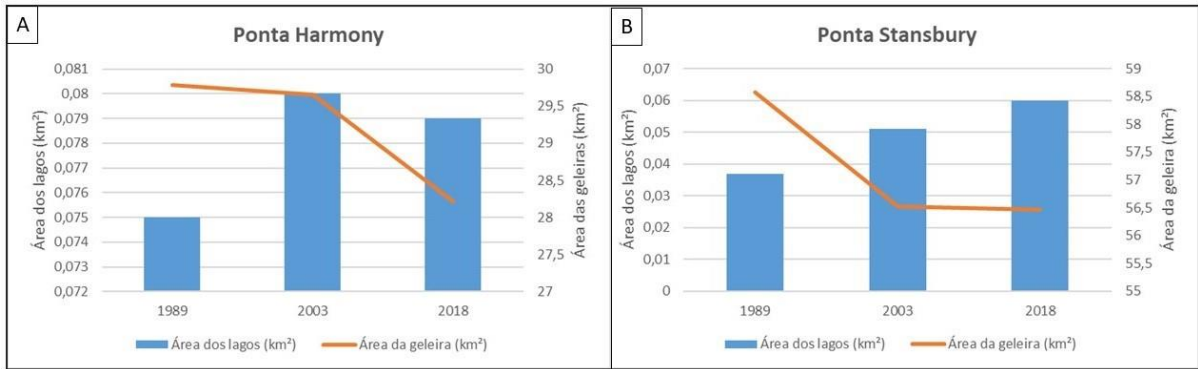


Figura 08 - Relação da área das geleiras e área dos lagos para a Ponta Harmony (A) e Stansbury (B), Ilha Nelson no período 1989-2018.

Nas novas áreas livres de gelo da ilha Nelson (Figura 9) também foi possível evidenciar um aumento de lagos. Bacias de drenagens glaciais na ilha Nelson apresentou uma retração de 12 km² no período 1989-2018, representando uma perda de 7% da área de 142 km² de 1989. Os lagos alimentados por geleiras tiveram um aumento de 0,103 km² (190% da área de 0,054 km² de 1989), no primeiro período (1989-2003), e de 0,089 km² (56% da área de 0,157 km² de 2003), no segundo (2003-2018).

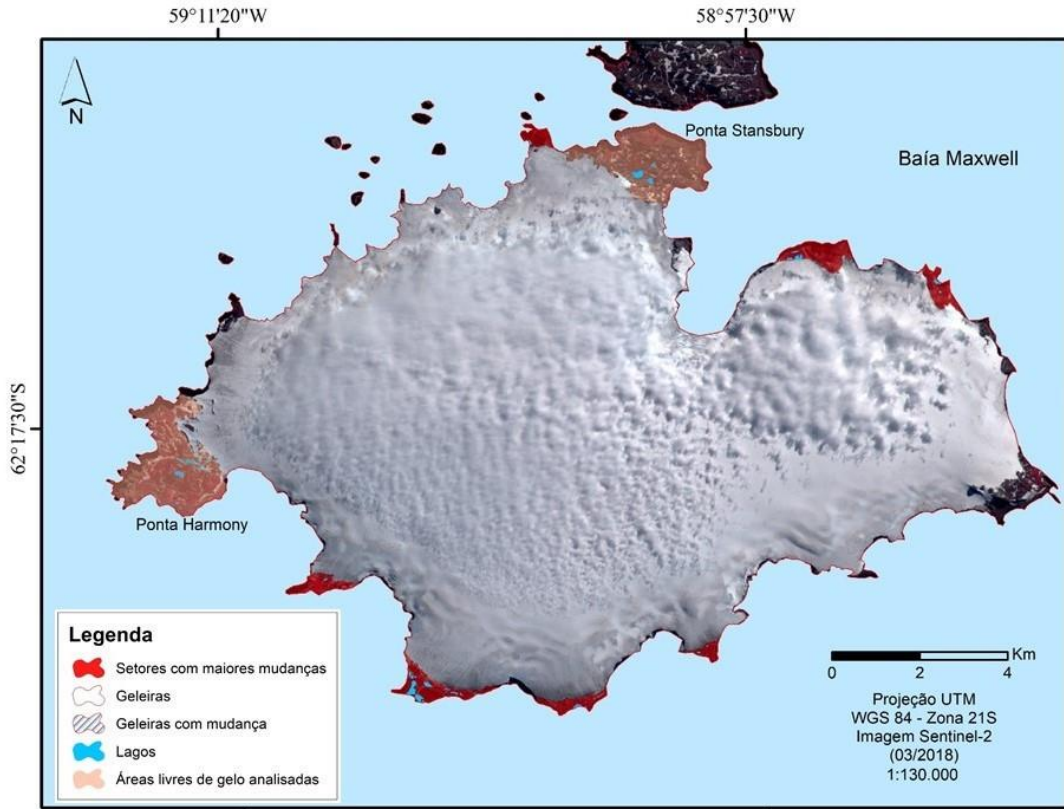


Figura 9 - Mudanças nos lagos na ilha Nelson.

4.3 Banco de dados e calibração do método adotado para o mapeamento dos lagos glaciais

O uso de diferentes produtos de satélite, implica em problemas ao comparar temporalmente dados obtidos com estas imagens (Figura 10). Alguns exemplos da limitação dos sensores serão apresentados a seguir. O lago Uruguai localizado na península Fildes, teve uma variação de 0,44, 0,41, 0,60 e 0,65 km², respectivamente para os sensores do Landsat 8, Sentinel 2, Quickbird e SPOT. Essa variação de 21 km², gera erros grosseiros e diminui a acurácia do mapeamento. Para a península Harmony, a imagem Landsat 8 de 2016 permite identificação de 0,244 km² de área de lagos, e para a Sentinel de 2018 a área é de 0,079 km²; na península Stansbury a área mapeada com a imagem Landsat é de 0,053 e para Sentinel é de 0,060 km²; para a península Potter os lagos totalizam 0,33 km² na Landsat e 0,30 km² na Sentinel 2. As variações podem ser insignificantes como de 0,007 km² até maiores como 0,165 km².

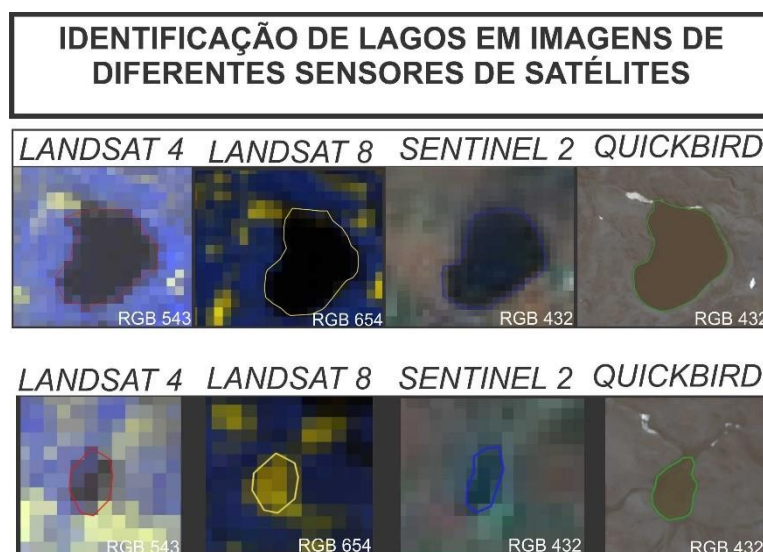


Figura 10 - Delimitação dos lagos em imagens de satélite de diferentes escalas espaciais. Saliencia-se que nas imagens da série Landsat se torna difícil a vetorização manual das bordas dos lagos.

A partir das dificuldades apresentadas para realizar a vetorização manual em imagens Landsat, foi adotada uma técnica integrada para classificação dos lagos (LI; SHENG; LUO, 2011; SONG *et al.*, 2014, HUGGEL *et al.*, 2002, RAI E MISHRA 2017) associada à segmentação das imagens e aplicação do índice NDWI (Figura 11). Para as imagens SPOT e Quickbird foi adotada somente a técnica de

vetorização manual.

De forma geral, considerando os resultados obtidos com a segmentação das imagens Landsat e Sentinel, os lagos com áreas inferiores à 0,022 km² não foram delimitados, o que provém principalmente da escala espacial adotada. Ainda adotando a técnica de NDWI, esses lagos são de difícil identificação, sendo necessário o uso de imagens SPOT e Quickbird para auxiliar na delimitação visual.

Contudo, lagos com áreas superiores a 0,022 km², como o lago Uruguai localizado na península Fildes (Figura 06 C), é delimitado através das duas técnicas, o que permite uma identificação da borda com melhor precisão; lago com área de 0,030 km² apresenta maior confusão na segmentação e NDWI decorrente da presença de outros alvos nas imediações como neve e áreas alagadas.

Considerando que os valores espectrais da superfície dos lagos possuem variação temporal alta, em função dos processos de congelamento e quebra do gelo, foi fundamental fazer a análise de cada imagem separadamente. Os valores abaixo de -0,15 foram considerados como prováveis de serem lagos para 1986 e 2016; valores menores de -0,55 foram adotados como prováveis áreas de lagos para a imagem de 2003, valores abaixo de -0,20 para as imagens de 1988 e 1989; valores inferiores à -0,21.

4.3 Validação dos dados

Os valores considerando a intersecção dos lagos mapeados somente com a segmentação em relação aqueles mapeados com as imagens SPOT e QuickBird tem em média de 30-40% de acurácia. Para os lagos vetorizados a partir da aplicação do método de NDWI, a acurácia foi entre 25-35%. Contudo, relacionando os vetores de lagos obtidos com as imagens de mais alta resolução espacial e aqueles resultantes do método integrante da segmentação e NDWI foi obtida uma acurácia entre 68 e 77%.

5 DISCUSSÕES

5.1 Explorando a causa da rápida expansão dos lagos glaciais

As maiores variações percentuais das áreas de lagos ocorreram nas áreas

livres de gelo associadas à retração das geleiras Wanda, Viéville, Znosco e Anna Sul (636%, 214%, 173% e 110%, respectivamente). As menores variações percentuais ocorrem em lagos das áreas livres de gelo associadas à retração da geleira Polar Club (Península Potter), das bacias drenagens glaciais na ilha Nelson (Ponta Harmony e Stansbury e demais setores), da geleira Fourcade (Península Barton), da geleira Windy e das áreas livre de gelo na península Fildes (71%, 68%, 43%, 25%, e 20%, respectivamente).

As diferenças entre os contextos ambientais, dos setores aos quais os lagos estão inseridos, podem explicar os contrastes entre as variações de área apresentados pelos lagos para cada setor. Os lagos que apresentaram as maiores variações de área estão em ambientes entre 0 e 30 m de elevação, com baixas declividades (0-7%), e os lagos são alimentados por geleiras através de canais glaciofluviais ou em contato direto com a margem do gelo. Já os setores, com predominância de lagos não alimentados por geleiras, apresentaram menores percentuais de aumento, exceto a geleira Windy. A geleira Windy possui um lago marginal ao gelo com influência do mar em alguns períodos, podendo ser chamado de laguna.

Os valores de elevação, baixa declividade e maior proximidade ao mar são semelhantes aos lagos que ocupam ambientes marginais ao gelo, expostos pela retração glacial mais recente. A característica de proximidade da margem da geleira revela a alimentação do lago pela geleira em contato direto ou por canais glaciofluviais. As pontas Harmonia e Stansbury apresentam lagos com maior distância da geleira e por isso já não recebem aporte de água de degelo. As demais áreas livres de gelo na ilha Nelson são recentes e possuem só lagos alimentados por canais glaciofluviais. Zhang *et al.*, (2015) também encontraram a maior expansão nos lagos alimentados por geleiras do que aqueles que não recebem mais aporte hidrológico.

Os lagos nas penínsulas Barton e Potter, que foram agrupados como da classe mais significativa, estão sob maior influência do aporte de água de degelo da geleira e se concentram em elevação entre 120-150 m (apesar da grande variação dos demais dados de agrupamento). Para o setor marginal ao gelo da geleira Anna Sul, os lagos são todos alimentados por geleiras e se localizam próximos do mar e da geleira. Para os lagos que recebem aporte de água da geleira Baranowski, a

única diferenciação no agrupamento provém da distância do mar, pois não há variações significativas dos aspectos geomorfométricos. Os lagos associados às geleiras Viéville, Wanda, Windy e Znosco são próximos à geleira e ao mar. Na Península Fildes não foram encontradas as mesmas relações estabelecidas para os demais setores, pois há uma série de pequenos agrupamentos logo que os lagos se separam da margem glacial, o que ocorre em virtude da grande área livre de gelo e de várias características ambientais atuando na formação dos lagos.

Considerando os dados de número de lagos para o período, houve aumento em todos os setores, contudo os valores não proporcionam discussão coerente sem considerar os valores de área. Para as áreas livres de gelo das penínsulas Stansbury, Fildes, Barton, Potter e Harmony os lagos marginais ao gelo praticamente dobraram em número, mas destes, somente este último setor teve aumento de área pronunciado. Para as geleiras Anna Sul, Baranowski, Vieville, Wanda, Windy e Znosco os lagos não existiam em 1988, e só em 2000, são observados. Os novos lagos no período inicial de formação são alimentados por geleira e com menores dimensões. As características topográficas (maior variação de elevação, maior declividade condicionada a depressões de estrutura geológica e à presença de paleovales glaciais) podem estar influenciando na maior variação de número de lagos de alguns setores, quando comparado aos demais. Estas condições podem diminuir a possibilidade de coalescência de lagos, diferente dos setores mais planos (obtiveram aumento de área dos lagos e menor aumento no número de lagos, e.g. Wanda, Znosco e Windy, exceto Baranowski) podem possibilitar mais processos de coalescência dos lagos, em momentos de maior volume.

O contexto geológico e topográfico de cada setor e lagos associados a depressões (de origem tectônica) e vales em circo, também podem influenciar em uma menor variação de área percentual nos lagos verificada. Pois, como a profundidade da coluna de água pode ser maior do que nas áreas mais planas, considera-se que possa estar ocorrendo aumento de volume concomitante ao de área. Nas áreas mais planas o aumento de área pode ser maior diante do aumento de volume de água, o que proporciona maiores condições para a coalescência de lagos.

As variações nos lagos no período analisado, mostram que estes respondem à flutuação das geleiras, as quais respondem as mudanças climáticas regionais entre

outros fatores. Nas ilhas Nelson e Rei George, algumas bacias de drenagens glaciais eram de término marinho em 1988, que, após a retração nos últimos anos, passaram a expor feições morainicas, que represam a água de degelo e formam lagos. Em algumas bacias de drenagens, este processo foi mais recente (e.g. geleiras Znosco, Ana, Windy, Wanda). Muitos destes lagos podem ter aumentado por coalescência e maior retenção do aporte de água de degelo, conforme afirma Carrivick e Quincey (2014) para áreas da Groenlândia. O autor discute que uma das consequências deste processo é o menor aporte de água e sedimentos para o oceano. Enquanto Zhang *et al.*, (2015) relatam os possíveis eventos de extravasamento associadas a aumento de lagos.

Todas as geleiras analisadas possuem atualmente término em terra, mas algumas deixaram de ser marinhas recentemente. Szilo e Bialik (2018) discutem que as geleiras com término em água possuem uma maior sensibilidade às mudanças climáticas do que as geleiras de término em terra. As áreas livres de gelo das penínsulas Fildes e Potter (IRG) e Harmony (IN) estão mais estabilizadas atualmente, provavelmente devido ao fato de terem sua frente do tipo terrestre.

A península Stansbury (IN) apresentou um dos maiores valores de perda de área de geleira nos últimos 29 anos. É provável que o comportamento da península Harmony, com aumento de número e área de lagos inferior à Stansbury, também siga esse padrão de formação e aumento de lagos, pois mostra cenário de retração da geleira em resposta à tendência de aumento da temperatura média do ar.

A geleira Baranowski é umas das que apresentou maior perda de área, e nas recentes áreas expostas, houve formação de 6 lagos marginais ao gelo no período 1988-2018. Em 1988, esta geleira (setor sul) apresentava sua frente no mar, em 2000 foi possível observar um lago próximo da costa e, em 2018, já havia cinco novos lagos, totalizando 6 lagos (todos são alimentados pela geleira, mas apenas um está em contato direto com a geleira). A variação percentual de área nos lagos não é tão elevada, quando comparado aos demais setores analisados das ilhas. A diminuição de área de um dos lagos, verificada nos últimos anos, pode estar relacionada a eventos de extravasamento da água do lago situado mais próximo ao mar. O comportamento de descongelamento da camada ativa do permafrost também pode estar relacionado à menor variação de área de alguns setores analisados.

Com a retração nas próximas décadas, novos lagos em contato com o gelo

poderão surgir, e outros poderão desaparecer. Ao observar a evolução do lago situado mais próximo ao mar, alimentado pela geleira Baranowski, por exemplo, é possível concluir que este lago teve a sua formação inicial como lago de contato com o gelo, mas com a retração ele passou a ser alimentado por canais glaciofluviais. Esta fase é característica da fase atual dos lagos associados às geleiras Wanda, Znosco, Windy, por exemplo. Com a retração, este lago passou a se tornar o mais distante da geleira Baranowski e passou a diminuir de área. Com a possível perda de alimentação pela geleira nas próximas décadas, a diminuição de área do lago pode ser progressiva e eles passam a depender do aporte de água pela precipitação líquida e derretimento de neve. Esta evolução pode ser comum a vários dos lagos alimentados por geleiras atualmente.

Ressalta-se que visando diminuir os erros de mapeamento e aumentar a acurácia da classificação, optou-se por comparar a área e número de lagos provenientes de imagens Landsat somente para a península Fildes, Barton, Potter, Harmony e Stanbury. A sequência de imagens Landsat permitiu uma avaliação temporal de 34 anos. Para as áreas das geleiras Anna sul, Vieville, Wanda, Znosco, Baranowski e Windy foram utilizadas as imagens SPOT e Sentinel 2, visto que são lagos não mapeados na escala espacial de 30 metros apresentada pela série Landsat. As cartas topográficas de alguns setores disponíveis para a IRG possibilitaram verificar que estes lagos não existiam na década de 1980.

5.2 Validação dos dados

A validação dos dados constituiu um importante passo na comprovação da eficiência do método adotado, pela soma da segmentação e NDWI. Gardelle, Arnaud e Berthier (2011), utilizando imagens Landsat, método integrado do NDWI e máscaras em áreas de sombra, chegaram a uma estimativa de erro de ± 1 pixel ao longo do perímetro de cada lago. Carrivick e Quincey (2014) estimaram uma incerteza de $\sim 7\%$ para lagos com $\sim 1 \text{ km}^2$ e erro de 1% para lagos com $\sim 5 \text{ km}^2$. Ressalta-se que o índice de acurácia desta pesquisa é significativo, considerando a capacidade do método em identificar os lagos com valores superiores a 70% . Contudo, devido a escala espacial das imagens Landsat (30 m), os lagos mapeados com estes sensores não permitiram identificar todos corpos hídricos visualizados ao

utilizar as imagens QuickBird e SPOT.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Houve aumento na área de lagos em todos os períodos. Os lagos que apresentaram maiores variações percentuais de área foram os alimentados pelas geleiras Wanda, Viéville, Znosco e Anna Sul (636%, 214%, 173% e 110% respectivamente), ambos voltados para baía do Almirantado, com exceção da geleira Anna Sul, que é voltada para baía Rei George. Assim, os lagos destes setores são lagos alimentados por geleiras. Este mesmo comportamento também ocorre nos lagos alimentados pela bacia de drenagem pertencente à calota de gelo Nelson, no setor da Ponta Harmony, os quais também estão entre os de maior aumento percentual de área de lagos. Estas variações nestes setores mostram estar relacionadas à coalescência dos lagos, devido às características locais de baixa declividade, proximidade do mar (lagos costeiros) e recebimento contínuo de aporte de água de degelo das geleiras com retração.

As menores variações percentuais são encontradas em lagos na Península Potter, áreas livres de gelo na ilha Nelson (destaque na península Stansbury e demais setores), Península Barton, margem das geleiras Windy e Collins na península Fildes. Estas menores variações podem estar associadas a seus contextos ambientais, os quais possuem efeito sobre seu comportamento: são áreas com maior distância do mar e uma menor influência do aporte de água marinha, com exceção do setor marginal ao gelo da geleira Windy. Também se apresentam em maiores declividades, do que os de maiores variações, e uma possível menor coalescência do que se estivessem em áreas mais planas. Outros aspectos, como a localização dos lagos em depressões, de origem tectônica e vale em circo, podem influenciar que haja maior profundidade, e pode ocorrer maior aumento no volume de água do que aumento na área no mesmo período de observação.

Os lagos da margem da geleira Baranowski também foram considerados com menor aumento, quando comparado a outros setores, isto pode ser explicado por eventos de extravasamento e ou diminuição na conectividade dos canais que alimentam o lago mais distal, entre outros processos, porém, neste setor houve considerável aumento no número de lagos e por isso é uma área considerada

importante para fins de monitoramento.

Nas penínsulas Potter, Fildes e Barton, os lagos não alimentados por geleira e se mantiveram mais estáveis. Estes lagos não têm alimentação glacial, mas do derretimento da neve, precipitação líquida e pelo derretimento da camada ativa de permafrost.

Foram formados 37 novos lagos no período 1988-2018. Foi evidenciada a retração glacial e geleiras passaram de marinha para não marinha nas ilhas. O aumento da área e número de lagos nas últimas décadas representa uma resposta ao cenário de retração das geleiras entre 1988/89 e 2018 e às mudanças climáticas regionais. O aquecimento atmosférico, retenção da água de degelo glacial (tendência à perda de área das geleiras) e a coalescência de lagos (pequenos, rasos e costeiros) influenciam a evolução dos lagos marginais ao gelo na escala decadal observada.

O comportamento dos lagos é considerado um indicativo ambiental das mudanças recentes nas áreas livres de gelo. Aponta-se que os ambientes marginais ao gelo das geleiras Wanda, Viéville, Znosco, Anna Sul, e Baranowski na IRG e novas áreas livres de gelo na IN evidenciam as maiores mudanças nas recentes duas décadas e necessitam de um monitoramento futuro e maior atenção.

Com a retração da frente das geleiras os lagos podem apresentar uma futura estabilização ou até mesmo diminuição de área, pois estão mais afastados e muitas vezes perdem a conexão com a geleira.

A evolução de área dos lagos e geleiras são estimadas por segmentação e NDWI em imagens Landsat e Sentinel (foi obtido entre 68 e 77% de acurácia) e outros dados de sensores remotos orbitais. Ainda que os resultados evidenciam a dificuldade encontrada na aquisição de imagens sem cobertura de nuvens e ainda com resoluções adequadas para o mapeamento de lagos em diferentes anos, com isso, foi apresentada a aplicação de metodologias para validar os dados.

O contexto geomorfométrico e de distância da frente da geleira e do mar são fatores importantes na distribuição de lagos e por isso é necessário este entendimento e ainda a aplicação de outras técnicas estatísticas capazes de dar melhores respostas.

O aumento de área de lagos em função de perda de área de geleiras tem sido documentado em diversas partes do mundo como foi mencionado neste trabalho,

porém para a Antártica este trabalho é um dos primeiros a documentar estas variações e a relacionar à flutuação das geleiras em um comparativo por setor, o que se torna relevante e de extrema importância para o contexto de mudanças climáticas no ambiente antártico.

Agradecimentos: À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao PROANTAR, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS). Ao Centro Polar e Climático (CPC). Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (POSGEA) – UFRGS.

REFERÊNCIAS

AGGARWAL, S.; RAI, S.C.; THAKUR, P.K.; EMMER, A. Inventory and recently increasing GLOF susceptibility of glacial lakes in Sikkim, Eastern Himalaya. **Geomorphology**, v. 295, p. 39–54, 2017.

AHLERT, S.; SIMÕES J.C.; ARIGONY E. J. Monitoramento da calota de gelo da Ilha Nelson, Shetlands do Sul. **X Seminário de Pesquisa Antártica**, São Paulo, p. 6, 2002.

ANDRADE, A. M.; POELKING, E. L.; SCHAEFER, C. E. R.; FILHO, E. I. F.; JUSTINO, F. B. Mudanças climáticas regionais e seus reflexos nas variações da frente da geleira Polar Club, península Potter, Ilha Rei George entre 1986 e 2009. In: **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011**, Curitiba. Anais do 15º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, PR. São José dos Campos, SP: MCT/INPE, p. 5624-5631, 2011.

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 (Mestrado) UFRGS, Porto Alegre, p. 98, 2001.

AQUINO, F.E. **Sedimentação Moderna Associada à Geleira de Maré Lange, ilha Rei George, Antártica**. Dissertação (Mestrado) UFRGS, Porto Alegre, p. 106, 1999.

BAJRACHARYA, S. R.; MOOL, P. Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. **Annals of Glaciology**, v. 50, p. 81–86, 2009.

CAÑA, B. B. **Caracterização geomorfológica das áreas livres de gelo e flutuações na geleira Polar Club, Península Potter, Ilha Rei George**. Dissertação (Mestrado) UFRGS, Porto Alegre, p. 90, 2016.

CARRIVICK, J.L.; TWEED, F.S. Proglacial lakes: character, behaviour and geological importance. **Quaternary Science Reviews**, v. 78, p. 34–52, 2013.

CARRIVICK, J. L.; QUINCEY, D. J. Progressive increase in number and volume of ice-marginal lakes on the western margin of the Greenland Ice Sheet. **Global and Planetary Change**, v. 116, p.156-163, 2014.

CLAGUE, J. J.; EVANS, S. G. A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia. **Quaternary Science Review**, v. 19, p. 1763–1783, 2002.

CONVEY, P.; PECK, L. S. Antarctic environmental change and biological responses. **Science Advances**, v. 5, n. 11, p.16, 2019.

COOK, A.; VAUGHAN, D.; LUCKMAN, A.; MURRAY, T. A New Antarctic Peninsula Glacier Basin Inventory and Observed Area Changes Since the 1940s. **Antarctic Science**, v. 26, p. 614–624, 2014.

COOK, A. J.; HOLLAND, P. R.; MEREDITH, M. P.; MURRAY, T.; LUCKMAN, A.; VAUGHAN, D. G. Ocean forcing of glacier retreat in the western Antarctic Peninsula. **Science**, v. 353, n. 6296, p. 283-286, 2016,

DEBNATH, M.; SYIEMLIH, H. J.; SHARMA, M. C.; KUMAR, R.; CHOWDHUR.; LAL, U. Glacial lake dynamics and lake surface temperature assessment along the Kangchengayo-Pahunri Massif, Sikkim Himalaya,1988–2014. **Remote Sensing Applied Society Environmental**, v. 9, p. 26–41, 2018.

DOWDESWELL, J.A.; COFAIGH, C.; PUDSEY, C.J. Thickness and extent of the subglacial till layer beneath an Antarctic paleo-ice stream. **Geology**, v. 32, p. 13-16, 2004.

EMMER, A.; VILÍMEK, V. Lake and breach hazard assessment for moraine-dammed lakes: an example from the Cordillera Blanca (Peru). **Nature Hazards Earth Systems Science**, v. 13, p. 1551, 2013.

EMMER, A.; LOARTE, E. C.; KLIMEŠ, J.; VILÍMEK, V. Recent evolution and degradation of the bent Jatunraju glacier (Cordillera Blanca, Peru). **Geomorphology**, v. 228, p. 345–355, 2015.

EMMER, A.; KLIMEŠ, J.; MERGILI, M.; VILÍMEK, V.; COCHACHIN, A. 882 lakes of the Cordillera Blanca: an inventory, classification, evolution and assessment of susceptibility to outburst floods. **Catena**, v. 147, p. 269–279, 2016.

GARDELLE, J.; ARNAUD, Y.; BERTHIER, E. Contrasted evolution of glacial lakes along the Hindu Kush Himalaya mountain range between 1990 and 2009. **Global and Planetary Change**, v. 75, n. 1-2, p.47-55, 2011.

GLIMS. **Global Land Ice Measurements from Space**. Disponível em <https://www.glims.org/>. Acesso em: maio de 2018.

HECKMANN, T.; MCCOLL, S.; MORCHE, D. Retreating ice: research in pro-glacial areas matters. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 41, n. 2, p. 271-276,

2015.

HOWAT, I. M.; PORTER, C.; SMITH, B. E.; NOH, M. J.; AND MORIN, P. **The Reference Elevation Model of Antarctica**, *The Cryosphere*, v.13, p. 665-674, 2018.

HUGGEL, C.; KÄÄB, A.; HAEBERLI, W.; TEYSSEIRE, P.; PAUL, F. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. *Can. Geotechnol. J.*, v. 39, p. 316–330, 2002.

IZAGUIRRE, I.; PIZARRO, H.; ALLENDE, L.; UNREIN, F.; RODRÍGUEZ, P.; MARINONE, M.C.; TELL, G. Responses of a Maritime Antarctic lake to a catastrophic draining event under a climate change scenario. *Polar Biology*, v. 35, p. 231–239, 2012.

JANSKY, B.; ŠOBR, M.; ENGEL, Z. Outburst flood hazard: Case studies from the Tien-Shan Mountains, Kyrgyzstan. *Limnologica*. v. 40, n. 4, p. 358-364, 2010.

KEJNA, M.; ARAZNY, A.; SOBOTA, I. Climatic change on King George Island in the years 1948 – 2011. *Polish Polar Research*, v. 34, n. 2, p. 213-235, 2013.

KHIM, B.; YOON, H.; KANG C.; ZHAO J. Holocene Variations of Organic Carbon Contents in Lake Langer of King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica. *Ocean and Polar Research*, v. 26, n. 3, p. 507-514, 2004.

KOMORI, J. Recent expansions of glacial lakes in the Bhutan Himalayas. *Quaternary International*, v. 184, p. 177–186, 2008.

KUNZLER M.; HUGGEL, C.; LINSBAUER, A.; HAEBERLI, W. Emerging risks related to new lakes in deglaciating areas of the Alps. *In Mountain Risks Bringing Science to Society*, Malet JP, Glade T, Casagli N (eds). CERG: Strasbourg. p. 453–458, 2010.

JAWAK, S. D.; MATHEW, J. Semi-automatic extraction of water bodies and roads from high-resolution QuickBird satellite data. *Proceedings of Geospatial World Forum, Hyderabad*, v. 263, p. 247–257, 2011.

LI, J.; SHENG, Y.; LUO, J. Automatic extraction of Himalayan glacial lakes with remote sensing. *Journal Remote Sensing*, v. 15, n.1, p. 29–43, 2011.

LLIBOUTRY, L. Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. II. Movement of a covered glacier embedded within a rock glacier. *Journal of Glaciology*, v. 18, p. 255–273, 1977.

MERGILI, M.; MÜLLER, J. P.; SCHNEIDER, J. F. Spatio-temporal development of high-mountain lakes in the headwaters of the Amu Darya River (Central Asia). *Global and Planetary Change*, v. 107, p. 13–24, 2013.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, n. 7, p.1425-1432, 1996.

NEDBALOVÁ, L.; NÝVLT, D.; KOPÁČEK, J.; ŠOBR, M.; ELSTER, J. Freshwater lakes of Ulu Peninsula, James Ross Island, north-east Antarctic Peninsula: Origin, geomorphology and physical and chemical limnology. **Antarctic Science**, v. 25, n. 3, p. 358-372, 2013.

NIE, Y.; SHENG, Y.; LIU, Q.; LIU, L.; LIU, S.; ZHANG, Y.; SONG, C. A regional-scale assessment of Himalayan glacial lake changes using satellite observations from 1990 to. **Remote Sensing Of Environment**, v. 189, p.1-13, 2015.

OLIVA, M.; ANTONIADES, D.; SERRANO, E.; GIRALT, S.; LIU, E.; GRANADOS, I.; PLA-RABES, S. The deglaciation of Barton Peninsula (King George Island, South Shetland Islands, Antarctica) based on geomorphological evidence and lacustrine records. **Polar Record**, v. 55, p. 177-188, 2019.

OLIVEIRA, M.A.G.; **Processo de retração nas geleiras do campo de gelo Krakow, Ilha Rei George, Antártica**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) UFRGS, Porto Alegre, p. 56, 2018.

PERONDI, C. **Análise da evolução do ambiente proglacial das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, Ilha Rei George, Antártica**. Dissertação (Mestrado) UFRGS, Porto Alegre, p.123, 2018.

PETSCH, C. **Evolução hidro geomorfológica da zona proglacial da geleira Collins, Ilha Rei George, Antártica**. Tese (Doutorado) UFRGS, Porto Alegre, p.120, 2018.

QUESADA, V.; VINCENT, W.F.; KAUP, E.; HOBBIE, J.E.; LAURION, I.; PIENITZ, R.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, J.; DURÁN, J.; KAUP, H. L. Landscape control of high latitude lakes in a changing climate. *In*: BERGSTROM, D. M. *et al.* (eds.), **Trends in Antarctic Terrestrial and Limnetic**. Dordrecht: Springer, p. 221-252, 2006.

RAI P.K.; MOGAN K.; MISHRA S.; AHMAD A.; MISHRA V.N. A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Kanhar River Basin, India. **Appl Water Sci**, v. 7, p. 217-232, 2017.

RAU, F.; MAUZ, F.; DE ANGELIS, H.; JAÑA, R.; ARIGONY-NETO, J.; SKVARCA, P.; VOGT, S.; SAURER, H.; GOSSMANN, H. Variations of Glacier Frontal Positions on Northern Antarctic Peninsula. **Annals of Glaciology**, v. 39, p. 525–530, 2004.

RIGNOT, E.; JACOBS, S.; MOUGINOT, J.; SCHEUCHL, B. Ice-shelf Melting Around Antarctica. **Science**, v. 341, p. 266–270, 2013.

ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C. Dinâmica Glacial e Características Sedimentares Resultantes na Zona Proglacial da Geleira Ecology - Baía Do Almirantado, Ilha Rei George – Antártica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, p. 51–60, 2006.

ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; FERRANDO, F. A.; SIMÕES, J. C.; Comparações entre os ambientes de deglaciação das geleiras Wanda e Ecology, ilha Rei George. Antártica. *In*: **XVII Simpósio Brasileiro sobre Pesquisa Antártica**, São Paulo. Livro de resumos do XVII Simpósio Brasileiro sobre Pesquisa Antártica. São Paulo: USP, p.

135-136, 2009.

ROSA, K.K.; VIEIRA, R.; VELHO, L.F.; HAMMES, F.; SIMÕES, F.L.; MARQUETTO, L.; SIMÕES, J.C. Processos de evacuação sedimentar por canais de água de degelo fluvioglaciais na geleira Wanda, ilha Rei George, Antártica In: Livro de resumos: Geología siglo XXI: Llave para el desarrollo de nuestros recursos naturales. **VI Congreso Uruguayo de Geología**, Cidade de Minas, p.32-33, 2010.

ROSA, K.K.; FREIBERGER, V.L.; VIEIRA, R.; ROSA, C.A.; SIMÕES, J.C. Mudanças glaciais recentes e variabilidade climática na ilha Rei George, Antártica. **Revista Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 5, n. 2. p. 176–183, 2014.

ROSA, K. K.; PETSCH, C.; SIMÕES, C. L.; CAMPANA, A. S.; GONCALVES, M. A.; VIEL, J. A. Evolução de ambientes proglaciais em resposta às mudanças climáticas. In: XI SINAGEO, Maringá. **Anais do Simpósio Brasileiro de Geomorfologia**, n.252, 2016.

SHEVNINA, E.; KOURZENEVA, E. Thermal regime and components of water balance of lakes in Antarctica at the Fildes peninsula and the Larsemann Hills. **Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography**, v. 69, n.1, 2017.

SLAYMAKER, O.; KELLY, R.E.J. The Cryosphere and Global environmental Change. **Blackwell Publishing**, p. 280, 2007.

SIMÕES, J. C.; BREMER, U. F. Investigation of King George Island ice cover using ERS1 SAR and SPOT imagery. **Selver**, v. 11, p. 56–60, 1995.

SIMÕES, C. L.; ROSA, K. K.; CZAPELA, F.; VIEIRA, R.; SIMOES, J. C. Collins Glacier retreat process and regional climatic variations, King George Island, Antarctica. **Geographical Review**, v. 105, p. 462–471, 2015.

SONG, C.; HUANG, B.; KE, L.; RICHARDS, K. S. Remote sensing of alpine lake water environment changes on the Tibetan Plateau and surroundings: a review. **ISPRS J. Photogram Remote Sensing**, v. 92, p. 26–37, 2014.

SZIŁO, J.; BIALIK R. J. Recession and Ice Surface Elevation Changes of Baranowski Glacier and Its Impact on Proglacial Relief (King George Island, West Antarctica). **Geosciences**, v. 8, n. 10, p. 1-18, 2018.

WANG, W.; YAO, T.; YANG, V. Variations of glacial lakes and glaciers in the Boshula mountain range, southeast Tibet, from the 1970s to 2009. **Annals of Glaciology**, v. 52, n. 58, p.9-17, 2011.

ZHANG, G.; YAO, T.; XIE, H.; WANG, W.; YANG, W., Uma invenção oria do lago glaciales no Região do Terceiro Pólo e sua mudanças em resposta ao aquecimento global. **Glob. Planet Chang**, v. 131, p.148 – 157, 2015.

CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por estarem em uma área de alta sensibilidade às alterações climáticas, a ilha Rei George e Nelson apresentaram mudanças na área de lagos nas últimas décadas. Na ilha Rei George há 85 lagos totalizando uma área de 2,016 km², e na ilha Nelson 56 lagos totalizando 0,320 km². Na ilha Rei George a maior área (1,002 km²) de lagos se encontra no campo de gelo Warszawa, seguido da península Fildes com área de 0,346 km²; já, as menores áreas (529 m² e 697 m²) com lagos estão associados à geleiras do campo de gelo Krakow na ilha Rei George. Na ilha Nelson, as maiores áreas de lagos (0,181 km²) estão em áreas recentemente expostas pela retração glacial.

Na ilha Rei George é possível delimitar dois setores: o primeiro corresponde as penínsulas voltadas para baía Maxwell, nestas áreas os lagos se localizam entre as cotas 0-140 m e declividade entre 0-20%, principalmente em zonas distantes da geleira. O segundo setor é na baía Rei George e baía do Almirantado onde os lagos são conectados diretamente à frente da geleira ou por canais glaciofluviais, e se encontram entre as cotas de 0-160 m e declividade entre 0-40%. Na ilha Nelson os lagos se localizam em baixas declividades (0-20%) e baixas altitudes (0-40 m), sendo a maioria das áreas expostas recentemente, com exceção da Ponta Harmony e Stansbury que apresentam uma área há mais tempo exposta. Os valores de elevação, baixa declividade e maior proximidade ao mar são semelhantes aos lagos que ocupam ambientes marginais ao gelo expostos pela retração glacial mais recente. A característica de proximidade da margem da geleira revela a alimentação do lago pela geleira em contato direto ou por canais glaciofluviais.

Foi encontrado um aumento de 114% na área total de lagos (de 0,752 km² para 1,616 km²) nas ilhas Rei George e Nelson desde 1988. Na ilha Rei George o aumento foi de 0,645 km² representando 110% (da área de lagos em 1988 de 0,586 km²) e na ilha Nelson 0,219 km², representando 131% (da área de lagos em 1989 de 0,166 km²). Estas variações acompanham as oscilações nas geleiras que apresentaram contínua retração no período analisado, dando lugar a novas áreas livres e com lagos marginais às geleiras.

Estas variações de área e número de lagos servem como indicativo de mudanças nas geleiras e ainda mudanças na variabilidade climática local, são

importantes no entendimento de modificações nos regimes de fluxo hidrológico em áreas livres. O aumento total de área de lagos nas áreas livres de gelo nesta região antártica poderá estar relacionada a uma possível maior estocagem de água e sedimentos no continente, variação no albedo, alterações no fluxo de metano e carbono e na biota local.

A variação detectada nas últimas décadas é resposta à retração de geleiras nas ilhas Rei George e Nelson e às mudanças climáticas. Com o aquecimento evidenciado na região até 1998 houve maior aumento na área de lagos, principalmente aqueles conectados diretamente à geleira ou por canais glaciofluviais, estes lagos evoluem de forma diferente daqueles lagos sem conexão à geleira.

O maior aumento de lagos é evidenciado no primeiro período nas ilhas Rei George e Nelson (0,458 km² e 0,122 km², respectivamente), no segundo período (2000-2018) há uma desaceleração na retração glacial e conseqüentemente na área de lagos (0,187 km² na IRG e 0,097 km² na IN). Mesmo com a desaceleração no aumento de lagos no segundo período, este processo de aumento é contínuo no período todo (1988-2018) nas duas ilhas, da mesma forma que as geleiras apresentaram retração contínua e assim abasteceram os lagos marginais a elas.

Em setores de montanha os problemas podem ser pelo rompimento de morainas que mantêm estes lagos represados fazendo com que haja riscos para populações à jusante. No caso da região antártica, os lagos podem aumentar em percentuais altos a medida que a geleira mantêm conexão com ele, porém quando há distanciamento da frente da geleira este lago poderá perder a conexão, deixando de ser abastecido por ela, e passará a diminuir sua área e até mesmo desaparecer. Os setores com maiores variações foram os ambientes marginais às geleiras Wanda, Viéville, Znosco, e Anna Sul (633%, 214% 173% e 110% respectivamente) e as menores variações (71%, 68%, 43% e 20%) ocorrem em lagos não alimentados pelas geleiras nas áreas livres de gelo associadas à retração das geleiras Polar Club (Península Potter), da calota de gelo da ilha Nelson, da geleira Fourcade (Península Barton) e das áreas livres de gelo na península Fildes, respectivamente. A geleira Baranowski apresentou aumento no número de lagos (5 novos lagos no período 2000-2018) e aumento de 83% na área de lagos, embora não seja um grande aumento comparado a outros setores, esta área faz parte dos setores com maiores mudanças e precisa ser monitorada.

Estas variações são explicadas pelas características ambientais de cada setor. Os maiores aumentos percentuais são áreas recentemente expostas, os lagos são conectados diretamente à geleira ou por canais glaciofluviais, se encontram em áreas planas (favorecendo a coalescência de lagos) com elevações que não passam de 30 m e baixas declividades (0-7%). No setor proglacial das geleiras Viéville e Znosco há apenas 1 lago, sendo que em 2000 eram dois lagos em cada uma das áreas. Isso mostra que houve coalescência de lagos neste período. Já as áreas que registraram menores aumentos apresentam também algumas características ambientais importantes no entendimento desta dinâmica, ambas são áreas livres da ação glacial há mais tempo, a maioria dos lagos nestes setores estão afastados da geleira e não recebem aporte de água de degelo glacial, apresentam declividades variadas e elevações que podem chegar a 150 m. Nestas áreas alguns lagos se originam entre vales esculpidos pela tectônica do ambiente e são mantidos pelo derretimento de neve e precipitação líquida.

Na Ilha Nelson houve aumento de área de lagos principalmente em novas áreas livres de gelo, estes lagos são conectados diretamente à geleira ou por canais glaciofluviais e apresentam as mesmas características ambientais encontradas na IRG; apenas nas penínsulas Harmonia e Stansbury há lagos distantes das geleiras e por isso não recebem mais aporte hidrológico delas.

O sensoriamento remoto e as técnicas de SIG foram importantes no estudo de lagos marginais ao gelo, pois assim foi possível observar e monitorar o aumento em cada área e com isso buscar o entendimento da dinâmica das geleiras que abastecem estes lagos. Um dos desafios do mapeamento temporal de lagos na Antártica Marítima provém da disponibilidade de imagens sem cobertura de nuvens e da escala espacial dos sensores e por isso o banco de dados adotado para essa pesquisa é composto de imagens de diferentes escalas espaciais. Ao comparar a área de lagos em 4 imagens do mesmo ano, com escalas espaciais diferentes, provenientes dos sensores do Landsat 8, Sentinel 2, Quickbird e SPOT, verifica-se a limitação do primeiro satélite na identificação de lagos com menor área. No caso da península Harmony e Potter ocorreu uma diminuição da área mapeada de lagos com a imagem Sentinel 2, o que se explica devido a presença de gelo e neve recobrendo a superfície dos lagos. Nesse sentido, o aumento da resolução espacial de 30 m (Landsat) para 10 m (Sentinel 2) não implicou em resultados satisfatórios. Dessa

forma, visando diminuir os erros de mapeamento e aumentar a acurácia da classificação, optou-se por comparar a área e número de lagos provenientes de imagens Landsat somente para as penínsulas Fildes, Barton, Potter, Harmony e Stanbury. Para as áreas das geleiras Anna Sul, Vieville, Wanda, Znosco, Baranowski e Windy foram utilizadas as imagens SPOT e Sentinel 2, visto que são lagos não mapeados na escala espacial de 30 metros apresentada pela série Landsat. As cartas topográficas de alguns setores disponíveis para a IRG possibilitaram verificar que estes lagos não existiam na década de 1980.

Outra dificuldade encontrada é a influência atmosférica na resposta espectral dos alvos, foi utilizada a segmentação para agrupar pixels com comportamentos espectrais similares, o que permitiu a identificação de uma série de alvos, entre eles as áreas de sombras, que foram também delimitadas a partir do MDE. A resposta espectral das áreas de sombras e lagos é similar, o que inviabiliza a diferenciação somente segundo esse critério. Dessa forma, foram usados os mapas de hipsometria e declividade do MDE Tandem-X para excluir áreas de sombra da segmentação.

A aplicação da técnica de NDWI foi importante na validação dos dados, e por isso, o índice de acurácia encontrado foi adequado. Conforme a discussão apresentada sobre a questão da escala espacial das imagens satelitais utilizadas, pode-se afirmar que o resultado de aumento de área de lagos pode ser ainda maior. Imagens de satélite com resoluções de maior detalhe tornariam possíveis o mapeamento de outros lagos com áreas inferiores, e provavelmente evidenciariam um número maior de corpos hídricos.

Seria relevante considerar em futuros estudos sobre a importância das morainas frontais no represamento de lagos, bem como as condições de preservação de cada uma delas, já que nas ilhas Rei George e Nelson há lagos próximos e que abastecem estações de pesquisa, há risco da instabilidade das morainas por processos paraglaciais e periglaciais que podem se romper e propiciar um extravasamento de lagos diante do aumento de cada um deles. O padrão de evolução pode ser considerado para futuro monitoramento dos lagos e para entender a formação e futura evolução de lagos proglaciais na Antártica com a retração e formação de novas áreas livres de gelo. Da mesma forma, seria importante considerar em futuros trabalhos a geologia como um fator determinante na formação e permanência dos lagos proglaciais .

Os resultados obtidos nessa dissertação mostram recentes mudanças ambientais nas Ilhas Rei George e Nelson, que indicam que os setores que apresentaram as maiores mudanças são aqueles onde os lagos são marginais à geleira e recebem aporte hidrológico delas. As geleiras Wanda, Znosco, Baranowski e Windy apresentaram mudança de término e deixaram de ser marinhas no período analisado, destas, o setor proglacial da geleira Baranowski é o que apresenta maior número (6) de lagos.

As áreas com maiores mudanças devem ser monitoradas para verificarmos os impactos destas alterações na paisagem e na biota local, além de entendermos como o ambiente está respondendo às mudanças climáticas na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGARWAL, S.; RAI, S.C.; THAKUR, P.K.; EMMER, A. Inventory and recently increasing GLOF susceptibility of glacial lakes in Sikkim, Eastern Himalaya. **Geomorphology**, v. 295, p. 39–54, 2017.

ANDRADE, A. M. de; POELKING, E. L.; SCHAEFER, C. E. R.; FILHO FERNANDES, E. I.; JUSTINO, F. B. Mudanças climáticas regionais e seus reflexos nas variações da frente da geleira Polar Club, península Potter, Ilha Rei George, entre 1986 e 2009. *In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Curitiba, Brasil, p.5624-5631, 2011.

ANDRADE, A. M. de; ARIGONY-NETO, J.; POELKING, E. L.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BREMER, U. F.; FERNANDES FILHO, E. I. Avaliação da influência da radiação solar na distribuição superficial da vegetação na península Potter, Antártica Marítima. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 21, n. 66, p. 14-26, 2014.

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 (Mestrado), UFRGS. Porto Alegre, p. 98, 2001.

ARIGONY NETO, J.; BREMER, U. F.; SIMÕES, J. C. Variações nas frentes de gelo da Enseada Martel, Ilha Rei George, Antártica, entre 1956 e 2000. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 10, Foz do Iguaçu. **Anais**, Foz do Iguaçu: INPE, 2001, p. 709-711, 2001.

ASSINE, M. L.; VESELY, F. F. **Ambientes Glaciais**. Disponível em: www.geologia.ufpr.br/ambientesglaciais.pdf. Acesso em: 17 de maio 2015

AQUINO, F. E. **Sedimentação moderna associada à geleira de maré Lange**.

Dissertação (Mestrado), UFRGS, Porto Alegre, p.106, 1999.

AUGUSTINUS, P. Rock mass strength and the stability of some glaciated valley slopes. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 39, n. 1, p. 55-68, 1995.

BAJRACHARYA, S. R.; MOOL, P. Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. **Annals of Glaciology**, v. 50, p. 81–86, 2009.

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

BELL, R. C. **Glacial systems and landforms: A Virtual Interactive Experience**. Londres. Anthem Press, p.150, 2013.

BENN, D.I.; EVANS, D.J.A. **Glaciers and Glaciation**. London: Arnold, p. 734, 1998.

BENN, D. I.; EVANS, D. J. A. **Glaciers and Glaciation**. Londres: Edward Arnold, p. 734, 2006.

BENN, D. I.; EVANS, D. J. A. **Glaciers and Glaciation**. 2^a ed. London: Hodder Education, p. 802, 2010.

BENNETT, M. R. The morphology of glacially fluted terrain: Examples from the Northwest Highlands of Scotland. **Proceedings of the Geologists Association**, v. 106, p. 27-38, 1995.

BENNETT M.R.; GLASSER, N.F. **Glacial Geology – Ice Sheets and Landforms**. England: John Wiley & Sons Ltd, p. 364, 1996.

BERTRAND, D.; BOËS, X.; CASTIAUX, J.; CHARLE, F. Temporal evolution of sediment supply in Lago Puyehue (Southern Chile) during the last 600 yr and its climate significance. **Quaternary Research** v. 64, n. 2, p. 163-175, 2005.

BINTANJA, R., Glaciological and meteorological investigations on Ecology Glacier, King George Island, Antarctica (Summer 1990-1991). **Circumpolar Journal**, v. 7, p. 59-71, 1992.

BIRKENMAJER, K. Lithostratigraphy of the Point Hennequin Group (Miocene volcanics and sediments at King George Islands, Antarctica). **Studia Geologica Polonica**, v. 72, p. 59-73, 1981.

BJÖRCK, S.; HJORT, C.; INGÓLFSSON, Ó.; ZALE, R.; ISING, J. Holocene glacial chronology from lake sediments. In LÓPEZ-MARTÍNEZ, J., THOMSON, M. R. A. & THOMSON, J. W., eds. Geomorphological map of Byers Peninsula, Livingston Island. BAS GEOMAP series, sheet 5-a, 1:25 000, with supplementary text. **Cambridge: British Antarctic Survey**, p. 49-51, 1996.

BOLCH, T.; KULKARNI, A.; KÄÄB, A.; HUGGEL, C.; PAUL, F.; COGLEY, J. G. The state and glaciers fate of Himalayan. **Science**, v. 336, p. 310–314, 2012.

BOULTON, G. S. The origin of glacially fluted surfaces: Observations and theory. **Journal of Glaciology**, v. 17, p. 287-309, 1976.

BRAUN, M. Ablation on the Ice Cap of King George Island (Antarctica) – an Measurements, modelling and Remote Sensing. **PhD Thesis**, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, p. 165, 2001.

BRAUN, M.; GOSSMANN, H. Glacial changes in the area of Admiralty Bay and Potter Cove, King George Island, Antarctica. In: BEYER, L.; BÖLTER, M. **Geocology of Terrestrial Antarctic Oasis**. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag, p. 75–89, 2002.

BREMER, U. F. **Morfologia e Bacias de Drenagem da Cobertura de Gelo da ilha Rei George, Antártica**. Dissertação (Mestrado), UFRGS. Porto Alegre, p.117, 1998.

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

CAÑA, B. B.; ROSA, K.K; ANDRADE, A. M. Caracterização geomorfológica das áreas livres de gelo e flutuações na geleira Polar Club, Península Potter, Ilha Rei George. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 1, p. 149-167, 2018.

CARRIVICK, J.L.; TWEED, F.S. Proglacial lakes: character, behaviour and geological importance. **Quaternary Science Reviews** v. 78, p. 34-52, 2013.

CARRIVICK, J. L.; QUINCEY, D. J. Progressive increase in number and volume of ice-marginal lakes on the western margin of the Greenland Ice Sheet. **Global and Planetary Change**, v. 116, p.156-163, 2014.

CARRIVICK, J. L.; HECKMANN, T. Short-term geomorphological evolution of proglacial systems. **Geomorphology**, v. 287, p.3-28, 2017.

CARROLL, J.R.G.; TOWNSHEND, C.M.; DIMICELI, T.; LOBODA, R.A.; SOHLBERG, R.A. Shrinking lakes of the Arctic: spatial relationships and trajectory of change **Geophysical Research Letters**, v. 38, p. 1-5, 2011.

CHEN, M.; ROWLAND, J.C.; WILSON, C.J.; ALTMANN, G.L.; BRUMBY,S.P. Temporal and spatial pattern of thermokarst lake area changes at Yukon Flats, **Alaska Hydrol. Process**, v. 28, p. 837-852, 2014.

CLAGUE, J. J.; EVANS, S. G. A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia. **Quaternary Science Review**, v. 19, p. 1763–1783, 2002.

CLAPPERTON, C. M.; SUGDEN, D. E. Holocene glacier fluctuations in South America and Antarctica. **Quaternary Science Reviews**, v. 7, p. 185-198, 1988.

COHEN, A.S. **Paleolimnology – The History and Evolution of Lake System**. Oxford University Press: New York, 2003.

COMIN, A. N.; JUSTINO, F. Investigação Climatológica na Península Antártica e no

Arquipélago das Shetland do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 40, n. 2, p. 74–81, 2017.

CONVEY, P. Antarctic Terrestrial Ecosystems: Responses to Environmental Change. **Polar Forschung**, v. 75, n. 2-3, p. 101-111, 2006.

COOK, A. J.; HOLLAND, P. R.; MEREDITH, M. P.; MURRAY, T.; LUCKMAN, A.; VAUGHAN, D. G. Ocean forcing of glacier retreat in the western Antarctic Peninsula. **Science**, v. 353, n. 6296, p.283-286, 2016.

CURL, J. E. A glacial history of the South Shetland Islands, Antarctica. **Ohio State University**, Institute of Polar Studies Report, v. 63, p.129, 1980.

COWTON, T.; NIENOW, P.; SOLE, A.; WADHAM, J.; LIS, G.; BARTHOLOMEW, I.; MAIR, D.; CHANDLER, D. Evolution of drainage system morphology at a land terminating Greenlandic outlet glacier. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 118, p. 29–41, 2013.

CUFFEY, K. M.; PATERSON, W.S. **Physics of glaciers**. Oxford: Pergamon/Elsevier, n. 4, p. 704, 2010.

CURL, J. E. A glacial history of the South Shetland Islands, Antarctica. Ohio State University, **Institute of Polar Studies Report**, v. 63, p.129, 1980.

DEBNATH, M.; SYIEMLIH, H. J.; SHARMA, M. C.; KUMAR, R.; CHOWDHUR.; LAL, U. Glacial lake dynamics and lake surface temperature assessment along the Kangchengayo-Pauhunri Massif, Sikkim Himalaya,1988–2014. **Remote Sensing Applied Society Environmental**, v. 9, p. 26–41, 2018.

DYURGEROV, M. B.; MEIER, M. F. Year-to-year fluctuations of global mass balance of small glaciers and their contribution to sea-level changes. **Journal Arctic and Alpine Research**, v. 29, n. 4, p. 392–402, 1997.

DOMACK, E. W.; ISHMAN, S. E. Oceanographic and physiographic controls on modern sedimentation within Antarctic fjords. **Geological Society of America Bulletin**, v. 105, p. 1175-1189, 1993.

EMMER, A.; VILÍMEK, V. Lake and breach hazard assessment for moraine-dammed lakes: an example from the Cordillera Blanca (Peru). **Nature Hazards Earth Systems Science**, v. 13, p. 1551, 2013.

EMMER, A.; LOARTE, E. C.; KLIMEŠ, J.; VILÍMEK, V. Recent evolution and degradation of the bent Jatunraju glacier (Cordillera Blanca, Peru). **Geomorphology**, v. 228, p. 345–355, 2015.

EMMER, A.; KLIMEŠ, J.; MERGILI, M.; VILÍMEK, V.; COCHACHIN, A. 882 lakes of the Cordillera Blanca: an inventory, classification, evolution and assessment of susceptibility to outburst floods. **Catena**, v. 147, p. 269–279, 2016.

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.

FERRON, F. A.; SIMÕES, J. C.; AQUINO, F. E.; SETZER, A. W. Air temperature time series for King George Island, Antarctica. **Pesquisa Antártica Brasileira**, v. 4, p. 155-169, 2004.

GARDELLE, J.; ARNAUD, Y.; BERTHIER, E. Contrasted evolution of glacial lakes along the Hindu Kush Himalaya mountain range between 1990 and 2009. **Global and Planetary Change**, v. 75, n. 1-2, p.47-55, 2011.

GORDON, J. E.; WHALLEY, W. B.; GELLATLY, A. E e VERE, D. M. The formation of glacial flutes: assessment of models with evidence from Lynsdalen, North Norway. **Quaternary Science Reviews**, v. 11, p. 709-732, 1992.

HAMBREY, M. **Glacial Environments**. London: UCL Press, KLEMAN, J.; HATTESTRAND, C.; STROEVEN, A. P.; JANSSON, K. J.; ANGELIS, p. 296, 1994.

HEWITT, K. Disturbance regime landscapes: mountain drainage systems interrupted by large rockslides. *Progress in Physical Geography* 30: 365–393. Icefield, Chile. **Holocene**, v.8, p. 481– 485, 2006.

HOWAT, I. M.; PORTER, C.; SMITH, B. E.; NOH, M. J.; MORIN, P. The Reference Elevation Model of Antarctica, **The Cryosphere**, v.13, p. 665-674, 2018.

HUGGEL, C.; KÄÄB, A.; HAEBERLI, W.; TEYSSEIRE, P.; PAUL, F. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. *Can. Geotechnology Journal*, v. 39, p. 316–330, 2002.

IZAGUIRRE, I.; PIZARRO, H.; ALLENDE, L., UNREIN, F.; RODRÍGUEZ, P.; MARINONE, M.C., TELL, G. Responses of a Maritime Antarctic lake to a catastrophic draining event under a climate change scenario. **Polar Biology**, v. 35, p.231–239, 2012.

JANSKY, B.; ŠOBR, M.; ENGEL, Z. Outburst flood hazard: Case studies from the Tien-Shan Mountains, Kyrgyzstan. **Limnologica**. v. 40, p. 358-364, 2010.

JONES, B.; ARP, C.D.; GROSSE, G.; JONES, M.C.; ANTHONY, K.W.; ROMANOVSKY, V.E. Modern thermokarst lake dynamics in the continuous permafrost zone, northern Seward Peninsula, **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 116, p. 1-13, 2011.

KARLSSON, J. M.; JARAMILLO, F.; DESTOUNI, G. Hydro-climatic and lake change patterns in Arctic permafrost and non-permafrost áreas. **Journal of Hydrology**, v. 529, p. 134-145, 2015.

KEJNA, M.; ARAZNY, A.; SOBOTA, I. Climatic change on King George Island in the years 1948 – 2011. **Polish Polar Research**, v. 34, n. 2, p. 213-235, 2013.

KÖPPEN, W. **Climatologia: Con un studio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Econômica, p.479, 1948.

- LØNNE, I. Sedimentary facies and depositional architecture of ice-contact glaciomarine systems. **Sedimentary Geology**, v. 9, p. 13-43, 1995.
- KOMORI, J. Recent expansions of glacial lakes in the Bhutan Himalayas. **Quaternary International**, v. 184, p. 177–186, 2008,
- KNIGHT, J.; HARRISON, S. limitations of uniformitarianism in the Anthropocene. **Anthropocene**, v. 5, p. 71-75, 2014.
- KNIGHT, J.; HARRISON, S. Transience in cascading paraglacial systems. **Land Degradation & Development**, v. 29, n. 6, p. 1991-2001, 2018.
- LLIBOUTRY, L. Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. II. Movement of a covered glacier embedded within a rock glacier. *Journal of Glaciology*, v. 18, p. 255–273, 1977.
- MACHADO, M. R.; OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FRANCELINO, M. R.; MICHEL, R. F. M. Paisagens polares não glaciais (Proglacial, paraglacial e periglacial): Revisão de conceitos e contribuições da pesquisa pedogeomorfológica brasileira. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 3, p.603-622, 2019.
- MAIZELS, J. Sediments and landforms of modern proglacial terrestrial environments. In: MENZIES, J. (ed.). **Modern glacial environments: processes, dynamics and sediments**. Oxford: Butterworth-Heinemann, p.621, 1995.
- MAROTTA, H.; DUARTE, C.M.; SOBEK, S.; ENRICH-PRAST, A. Large CO2 disequilibria in tropical lakes. **Global Biogeochem Cycles**, v. 23, n.4, p.1-4, 2009.
- MARTINEZ DE PISON, E.; LOPEZ-MARTINEZ, J.; ARCHE, A. Relieve, unidades y tipos glaciares de la Isla Livingston, Islas Shetlands del Sur. In: Congresso Geológico de España, **Congresso Latinoamericano de Geologia**, v. 3, p. 261-270, 1992.
- MENDES, C. W. J. **Monitoramento da zona superficial de neve úmida da Península Antártica pelo uso de dados de sensors SMMR e SSM/I**. Tese (Doutorado) UFRGS, Porto Alegre, p.148, 2011.
- MERGILI, M.; MÜLLER, J. P.; SCHNEIDER, J. F. Spatio-temporal development of high-mountain lakes in the headwaters of the Amu Darya River (Central Asia). **Global and Planetary Change**, v. 107, p. 13–24, 2013.
- OLIVEIRA, M. A. G. **Processo de retração das geleiras do campo de gelo Krakow, ilha Rei George**. Monografia (Trabalho de conclusão de curso), UFRGS, Porto Alegre, p. 53, 2018.
- OVSTEDAL, D. O.; SMITH, R. I. L. **Lichens of Antarctica and South Georgia: A guide to their Identification and Ecology**. Cambridge: Cambridge University Press, p. 453, 2001.
- PENCK A.; BRUCKNER, E. **Die Alpen im Eiszeitalter**. Leipzig: Tauchnitz, p.1199 1909.

PETLICKI, M.; SZILLO, J.; MACDONELL, S.; VIVERO, S.; BIALIK. Recent Deceleration of the Ice Elevation Change of Ecology Glacier (King George Island, Antarctica). **Remote Sensing**, v. 9, p. 49–56, 2017.

PETSCH, C. **Evolução hidro geomorfológica da zona proglacial da geleira Collins, ilha Rei George, Antártica**. Tese (Doutorado) UFRGS, Porto Alegre, p.120, 2018.

PERONDI, C. **Análise da evolução do ambiente proglacial das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, ilha Rei George**. Dissertação (Mestrado) UFRGS, Porto Alegre, p.123, 2018.

PUDEŁKO, R.; PIOTR, A.; MARIUSZ, P.; ANNA, E.; MAŁGORZATA, K. Fluctuation of Glacial Retreat Rates in the Eastern Part of Warszawa Icefield, King George Island, Antarctica, 1979–2018. **Remote Sensing**, v. 10, n. 872, p. 1-15, 2018.

QUESADA, V.; KAUP, H. L. Landscape control of high latitude lakes in a changing climate. In: BERGSTROM, D. M. *et al.* (eds.), **Trends in Antarctic Terrestrial and Limnetic**, p. 221-252, 2006.

REES, G. W. **Remote Sensing of Snow and Ice**. Londres: Taylor and Francis, p. 285, 2006.

RIORDAN, D.; VERBYLA, D.; MCGUIRE, A.D. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, 2006.

ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; FERRANDO, F. J.; SIMÕES, J. C. Feições Sedimentológicas e Geomorfológicas do Ambiente de Deglaciação das Geleiras Wanda e Ecology, Ilha Rei George - Antártica. **Revista Pesquisas em Geociências**, v. 37, p. 315-326, 2009.

ROSA, K. K. **Dinâmica glacial, sedimentológica e variações ambientais em geleiras na enseada Martel, ilha Rei George, Shetlands do Sul**. Tese (Doutorado), UFRGS, Porto Alegre, p. 175, 2012.

ROSA, K. K.; SARTORI, R.Z.; MENDES, C. W. JR.; SIMÕES, J. C. Análise das mudanças ambientais da Geleira, Baía do Almirantado, Ilha Rei George, Antártica. **Pesquisas em Geociências**, v. 42, n.1, p. 61 – 72, 2015.

ROSE, J. Drumlins as part of a glacier bedform continuum. In: Menzies, J.; Rose, J. (eds), **Drumlin Symposium**. Balkema, Rotterdam, p. 103-116, 1987.

SANCHES, A. M. **Variações na extensão da cobertura de gelo do Nevado Cololo, Bolívia**. Dissertação (Mestrado em Geociências), UFRGS, Porto Alegre, p. 93, 2013.

SKVARCA, P.; DE ANGELIS, H. Impact assessment of regional climatic warming on glaciers and ice shelves of the northeastern Antarctic Peninsula. In: Domack E.; Leventer, A.; Burnett, A.; Bindschadler, R.; Convey, P. & Kirby, M. (Eds.): Antarctic Peninsula climate variability: historical and paleoenvironmental perspectives.

Antarctic Research Series, v. 79, p. 69–78, 2003.

SEONG, Y. B.; LIM, H. S.; YOON, H. I.; LEE, Y. I.; KIM, Y. e OWEN, L. A., A preliminary geomorphic overview of Late Quaternary glacier fluctuations in the South Shetland Islands, West Antarctica: **Journal of the Korean Geographical Society**, v. 41, p. 513-526, 2006.

SENTINEL 2, MSI. Nível 1C. Informações disponíveis em: https://lta.cr.usgs.gov/sentinel_2. Acesso em: 20/10/2017.

SHRIDHAR, J. D.; KAMANA, K.; ALVARINHO, L. J. A review on extraction of lakes from remotely sensed optical satellite data with a special focus on cryospheric lakes. **Advances in Remote Sensing**, v. 4, p. 196-213, 2015.

SIMÕES, J. C.; BREMER, U. F. Investigation of King George Island ice cover using ERS1 SAR and SPOT imagery. **Selver**, v. 11, p. 56–60, 1995.

SIMÕES, J. C.; BREMER, U. F.; AQUINO, F. 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.

SIMÕES, J.C.; FERRON, F.A.; BERNARDO, R.T.; ARISTARAIN, A.J.; STIEVENARD, M.; POURCHET, M.; DELMAS, R.J. Ice core study from the King George Island, South Shetlands, Antarctica. **Pesquisa Antártica Brasileira**, v. 4, p. 9–23, 2004.

SIMÕES, J. C.; GARCIA, C. A. E.; EVANGELISTA, H.; CAMPOS, L. S.; MATA, M.M.; BREMER, U. F. Antártica e as mudanças globais: um desafio para a humanidade. José Goldemberg (Coord.). **Série Sustentabilidade**. São Paulo: Blucher, p. 168, 2011.

SIMÕES, C. L.; ROSA, K. K.; CZAPELA, F.; VIEIRA, R.; SIMOES, J. C. Collins Glacier retreat process and regional climatic variations, King George Island, Antarctica. **Geographical Review**, v. 105, p. 462–471, 2015.

SLAYMAKER, O.; KELLY, R.E.J. The cryosphere and global environmental Change. **Blackwell Publishing**, p. 280, 2007.

SLAYMAKER, O. Proglacial, Periglacial or Paraglacial? **The Geological Society**, v. 320, p. 71 – 84, 2009.

SLAYMAKER, O. Criteria to Distinguish Between Periglacial, Proglacial and Paraglacial Environments. **Quaestiones Geographicae**, v. 30, p. 85 – 94, 2011.

SMITH, Y.; SHENG, G.M.; MACDONALD, L.D.; HINZMAN. Disappearing arctic lakes **Science**, v. 308, p. 1429, 2005.

SMITH, N. D.; ASHLEY, G. M. Proglacial lacustrine environments. In: ASHLEY, G. M.; SHAW, J.; SMITH, N. D. (ed.) Glacial Sedimentary Environments. **Tulsa, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Short Course**, v. 16, p. 135-216, 2007.

SOBOTA, I.; KEJNA, M.; ARA´ZNY, A. Short-term mass changes and retreat of the Ecology and Sphinx glacier system, King George Island, Antarctic Peninsula. **Antarctic Science**, v. 27, p. 500–510, 2015.

SONG, C.; HUANG, B.; KE, L.; RICHARDS, K. S. Remote sensing of alpine lake water environment changes on the Tibetan Plateau and surroundings: a review. **ISPRS J. Photogram Remote Sensing**, v. 92, p. 26–37, 2014.

STROZZI, T.; WIESMANN, A.; KÄÄB, A.; JOSHI, S.; MOOL, P. Glacial lake mapping with very high resolution satellite SAR data. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v.12, n.8, p. 2487-2498, 2012.

SUGDEN, D. E.; JOHN B. S. **Glaciers and Landscape**. London: Edward Arnold Ltda. p. 376, 1976.

SZIŁO, J.; BIALIK R. J. Recession and Ice Surface Elevation Changes of Baranowski Glacier and Its Impact on Proglacial Relief (King George Island, West Antarctica). **Geosciences**, v. 8, n. 10, 2018.

TOMAZELLI, L. J. **Ambientes de sedimentação**. Porto Alegre: Gráfica da UFRGS, p. 102, 2002.

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**, v. 21, n.6, p. 541-563, 2009.

TURNER, J.; LU, H.; WHITE, I.; KING, J. C.; PHILLIPS, T.; HOSKING, J. S.; BRACEGIRDLE, T. J.; MARSHALL, G. J.; MULVANEY, R.; DEB, P. Absence of 21 120 st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability, **Nature**, v. 535, p. 411–415, 2016.

VIEIRA, R.; ROSSATO, M. S.; AQUINO, F. E.; SIMÕES, J. C. Feições Morfológicas Associadas ao Ambiente de Deglaciação da Geleira Ecology, Ilha Rei George, Antártica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, p. 51-64, 2005.

VIEIRA, R.; MAROTTA, H.; ROSA, K. K.; JANA, R.; SIMOES, C.L.; SOUZA JUNIOR, E; FERREIRA, F.; SANTOS, L.R.; SANTOS, J.V; PERRONI, M.A.; GONCALVES, M.; SANTOS, J.P.F.; RODRIGUES, R.I; GALVAO, J.C.M.; FELIZARDO, J.P.S. Análisis Sedimentológico y geomorfológico de áreas lacustres en la Península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica Marítima. **Investigaciones Geográficas**, n.49, p. 3-30, 2015.

VINCENT, W. F. **Microbial Ecosystems of Antarctica**. Cambridge: Cambridge University Press, 1988.

WANG, W.; YAO, T.; YANG, X. Variations of glacial lakes and glaciers in the Boshula mountain range, southeast Tibet, from the 1970s to 2009. **Annals Of Glaciology**, [s.l.], v. 52, n. 58, p. 9-17, 2011.

WATANABE, T.; IVES, J. D.; HAMMOND, J. E. Rapid growth of a glaci lake in Khumbu Himal, Himalaya: prospects for a catastrophic flood. **Moutain Res. E Devel.**

v. 4, n. 4, p. 329-340, 1994.




WILSON, R.; GLASSER, N.F.; REYNOLDS, J.M.; HARRISON, S.; ANACONA, P.I.; SCHAEFER, M.; SHANNON, S. Glacial lakes of the Central and Patagonian Andes. **Global and Planetary Change**, v.162, p. 275-291, 2018.

ZHANG, G.; YAO, T.; XIE, H.; WANG, W.; YANG, W. Uma invenção do lago glaciales no Região do Terceiro Pólo e sua mudanças em resposta ao aquecimento global. **Glob. Planet Chang**, v.131, p. 148 – 157, 2015.

ANEXOS

ARTIGO 1 - Artigo submetido à Revista do Departamento de Geografia-USP Documento comprobatório de submissão do artigo

[RDG] Agradecimento pela submissão

FK Fernando Shinji Kawakubo <fsk@usp.br>    ...
Ter, 21/04/2020 11:06
Você ∨

Manoela Araujo Gonçalves de Oliveira,

Agradecemos a submissão do trabalho "Um inventário de lagos glaciais nas ilhas Nelson e Rei George, Antártica Marítima" para a revista Revista do Departamento de Geografia.

Acompanhe o progresso da sua submissão por meio da interface de administração do sistema, disponível em:

URL da submissão:

<http://www.revistas.usp.br/rdg/authorDashboard/submissao/168950>

Login: manoelaoliveira

Em caso de dúvidas, entre em contato via e-mail.

Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de compartilhar seu trabalho.

Fernando Shinji Kawakubo

ARTIGO 2 - Artigo submetido à Revista Brasileira de Cartografia
Documento comprobatório de submissão do artigo

[RBC] Agradecimento pela submissão

P

Prof. Dr. João Vitor Meza Bravo <
sistemasjava@cti.ufu.br>



Ter, 21/04/2020 11:40

Você

Manoela,

Agradecemos a submissão do trabalho "Variações em lagos proglaciais nas últimas décadas na ilha Rei George e Nelson, Shetlands do Sul" para a revista Revista Brasileira de Cartografia.

Acompanhe o progresso da sua submissão por meio da interface de administração do sistema, disponível em:

URL da submissão:

<http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/authorDashboard/submission/53905>

Login: manoelaoliveira



Em caso de dúvidas, entre em contato via e-mail.

Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de compartilhar seu trabalho.

Prof. Dr. João Vitor Meza Bravo

ARTIGO 3 - Artigo submetido à Revista Brasileira de Geomorfologia
Documento comprobatório de submissão do artigo

[RBG] Agradecimento pela submissão

R Roberto Arnaldo Trancoso Gome
s <robertogomes@unb.br>    ...
Dom, 19/04/2020 19:59
Você ∨

Manoela Araujo G. de Oliveira,

Agradecemos a submissão do trabalho "Evolução dos lagos de áreas livres de gelo das ilhas Nelson e Rei George, Antártica Marítima desde 1988: um estudo comparativo por setor ambiental" para a revista Revista Brasileira de Geomorfologia.

Acompanhe o progresso da sua submissão por meio da interface de administração do sistema, disponível em:

URL da submissão:

<http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/author/submission/1911>

Login: manoelaoliveira

Em caso de dúvidas, entre em contato via e-mail.

Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de compartilhar seu trabalho.

Editores da Revista Brasileira de Geomorfologia

Revista Brasileira de Geomorfologia

<http://www.lsie.unb.br/rbg>