

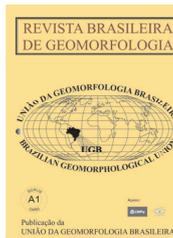


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 20, nº 4 (2019)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i4.1480>



GEOMORFOLOGIA GLACIAL E CONTEXTO PALEOGLACIOLÓGICO DA PENÍNSULA FILDES, ILHA REI GEORGE, ANTÁRTICA

GLACIAL GEOMORFOLOGY AND PALEOGLACIOLOGICAL CONTEXT OF THE FILDES PENINSULA, KING GEORGE ISLAND, ANTARCTICA

Carina Petsch

*Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
Avenida Roraima, 1000, Santa Maria, Rio Grande do Sul. CEP 97105-900. Brasil*

ORCID: 0000-0002-1079-0080

E-mail: carinapetsch@gmail.com

Rafaela Mattos Costa

*Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91501-970. Brasil*

ORCID: 0000-0003-0496-7377

E-mail: raffaellamattos@hotmail.com

Kátia Kellem da Rosa

*Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91501-970. Brasil*

ORCID: 0000-0003-0977-9658

E-mail: katiakellem@gmail.com

Rosemary Vieira

*Departamento de Geografia, Universidade Federal Fluminense
Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/n, Niterói, Rio de Janeiro. CEP: 24210-346. Brasil*

ORCID: 0000-0003-0312-2890

E-mail: rosemaryvieira@id.uff.br

Jefferson Cardia Simões

*Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91501-970. Brasil*

ORCID: 0000-0001-5555-3401

E-mail: jefferson.simois@ufrgs.br

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):

04/07/2018

Aceito (Accepted):

01/07/2019

Resumo:

A interpretação das principais feições geomorfológicas glaciais é relevante para entender a evolução de ambientes de deglaciação. Esta pesquisa analisou a evolução glacial da península Fildes (Antártica) desde o Último Máximo Glacial (UMG), interpretando registros geomorfológicos subglaciais e marginais ao gelo. Foi utilizado um Modelo Digital de Elevação do TanDEM-X para obter-se dados

Palavras-chave:

Paleoglaciologia; Deglaciação; Mapeamento Geomorfológico.

Keywords:

Paleoglaciology; Deglaciation; Geomorphological Mapping

hipsométricos, de declividade e índice de rugosidade. Para desvendar a evolução da paisagem da península Fildes e da dinâmica de avanço e recuo da adjacente geleira Collins durante a deglaciação, foi elaborada uma compartimentação geomorfológica e espacialização das principais feições geomorfológicas subglaciais e marginais ao gelo. O relevo foi compartimentado em duas classes: planaltos e depressões. Esta última ainda foi dividida em: Depressão Klotz (DK) com paleovales em U, aretês e vales em circo; Depressão Artigas (DA) com formas deposicionais de flutings e morainas e um vale erodido (vale B) preenchido por um sistema de lagos proglaciais e deposição de material sedimentar pela geleira; Depressão Maxwell (DM), com vales de anfiteatro na parede da meseta Norte; Depressão Escudero (DE), com vales em U; Depressão Grande Muralha (DGM), com vales esculpidos em fraturas geológicas; e Depressão Nelson (DN), com vales em anfiteatro esculpidos nas paredes da meseta Sul. A evolução geomorfológica indica uma paisagem que sofreu rápida mudança pós-deglaciação. A península possui vários vales e feições glaciais que atualmente estão sendo retrabalhados pelos canais fluviais alimentados pela água de fusão da neve, por precipitação líquida e por processos periglaciais, como gelifluxão e crioturbação.

Abstract:

The interpretation of the main glacial geomorphological features is relevant to understand the evolution of deglaciation environments. This research analyzed the glacial evolution of the Fildes Peninsula (Antarctica) since the Last Glacial Maximum (LGM), interpreting subglacial and marginal ice geomorphological records. A TanDEM-X Digital Elevation Model was used to obtain hypsometric, slope and roughness index data. To unravel the evolution of the Fildes Peninsula landscape and the advance and retreat dynamics of the adjacent Collins Glacier during the deglaciation, it was drawn one geomorphological partitioning and the spatial distribution of the main sub-glacial geomorphological features and marginal to the ice. The relief was compartmentalized into two classes: plateaus and depressions. The latter was further divided into: Klotz Depression (DK) with paleovales in U, aretes and cirque valleys; Artigas Depression Artigas (DA) with flutings and morainas depositional forms and an eroded valley (valley B) filled by a system of proglacial lakes and deposition of sedimentary material by the glacier; Maxwell Depression (DM), with cirquevalleys on the northern plateau wall; Escudero Depression (DE), with U-valleys; Depression Great Wall (DGM), with valleys carved into geological fractures; Depression Nelson (DN), with cirque valleys carved on the walls of the southern plateau wall. Geomorphological evolution indicates a landscape that underwent rapid post-deglaciation change. The Peninsula has several valleys and glacial features that are currently being reworked by fluvial channels fed by snow melted water, liquid precipitation and periglacial processes such as gelifluction and cryoturbation.

1. Introdução

A Península Antártica (PA) é uma das áreas que apresentaram maior aquecimento da temperatura superficial do ar na Terra, na ordem de 3,0°C entre 1961 e 2000 (STEIG *et al.* 2009), sendo considerada uma região de mudanças drásticas nos sistemas climáticos e glaciais (BRAUN e HOCK, 2004). Da mesma forma, a região da Antártica Marítima¹ tem sofrido alterações em seus ecossistemas terrestres em função das recentes mudanças climáticas (BRAUN e GOBMAN, 2002). Vários estudos evidenciam a retração de geleiras, espe-

cificamente na ilha Rei George, relacionada ao aumento da temperatura média do ar na região da PA entre 1948 e o início do século XXI (SIMÕES e BREMER, 1995; BREMER, 1998; PARK *et al.* 1998; SIMÕES *et al.* 1999; BRAUN e GOSSMANN, 2002; ROSA *et al.* 2009; RÜCKAMP *et al.* 2011; SIMÕES *et al.* 2015).

Durante a movimentação das geleiras, algumas formas de erosão e deposição são formadas como resultado da dinâmica glacial (RUSZKICZAY-RÜDIGER *et al.* 2016) e registram as mudanças climáticas no Holoceno (BARCLAY *et al.* 2013). As geleiras são sistemas

¹O termo Antártica Marítima é utilizado para definir as áreas localizadas às margens do continente antártico e um grupo de ilhas antárticas e subantárticas (HOLDGATE, 1970). Essa divisão biogeográfica é dada a partir das diferenças no clima e na vegetação da região em relação ao continente e outras zonas longitudinais (ØVSTEDAL e SMITH, 2001).

sensíveis às alterações climáticas, apresentando variações em extensão e volume em resposta às mudanças de temperatura do ar e precipitação de neve. As flutuações das geleiras no passado e presente servem como uma importante fonte de informação sobre o funcionamento e variabilidade do sistema climático global (BENN e EVANS, 2010; CUFFEY e PATERSON, 2014). Nesse sentido, a identificação das principais feições geomorfológicas glaciais é relevante para interpretar os processos subglaciais e inferir a dinâmica de avanço e recuo da geleira e, assim, reconstruir a evolução do ambiente de deglaciação (BENNETT e GLASSER, 1996; GLASSER e HAMBREY, 2002; KLEMAN *et al.* 2006).

A disponibilidade dos MDEs, bem como o rápido avanço no campo da tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica, oferece novas oportunidades na análise do relevo (CHENG *et al.* 2004). Classificações de unidades geomorfológicas se baseiam principalmente nas características morfométricas (MILIARESI, 2001). A avaliação e o entendimento da origem das formas são relevantes para estudos ambientais (CUFFEY *et al.* 2000, STOKES e CLARK, 2003), sendo que os produtos de análise do relevo podem auxiliar na investigação de mudanças morfométricas na paisagem glacial ao longo do tempo (ROSA *et al.* 2014). Para a Antártica, a qualidade dos MDEs tem aumentado, permitindo análises geomorfológicas mais detalhadas. O TanDEM-X (TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurements) está relacionado a uma missão realizada pelos satélites gêmeos TerraSAR-X e TanDEM-X, com o objetivo de disponibilizar um MDE mundial, consistente e de alta precisão para várias áreas de pesquisas científicas, assim como para o uso operacional e comercial (DLR, 2017). O TerraSAR-X foi lançado em junho de 2007 e o TanDEM-X em junho de 2010 (GRUBER *et al.* 2012; TRIDON *et al.* 2014). Sendo assim, o objetivo desta pesquisa é analisar a evolução glacial da península Fildes (Antártica) desde o Último Máximo Glacial, com a interpretação dos registros geomorfológicos subglaciais e marginais ao gelo.

2. Caracterização da Área

A Península Fildes (Figura 1) localiza-se na parte sul da ilha Rei George (62°08' e 6°14' S; 59°02' e 58°51' O), sendo limitada a nordeste por um pequeno domo de gelo (também chamado de geleira Collins) que atinge

300 m de elevação. A frente da geleira não oscilou significativamente nos últimos 5000 anos e, de acordo com Mäusbacher *et al.* (1989), depois que a geleira Collins retraiu da bacia do lago Tiefersee (500 m a frente da geleira atual) não houve mais uma grande resposta desse sistema. Durante parte da Pequena Idade do Gelo (650 anos atrás), a geleira Collins apresentou um período de avanço (HALL, 2007), com formação de uma crista morânica de aproximadamente 17 m de altura.

Quanto ao clima, ocorre na ilha um tipo marítimo relativamente ameno, resultando em baixa variabilidade anual das temperaturas mensais médias do ar (SMITH *et al.* 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; TURNER e LEONARD, 1996). Os ventos provenientes de Noroeste e Oeste são mais frequentes, alcançam as velocidades mais altas e são relativamente quentes. Em fevereiro, eles são mais comuns, trazendo fortes precipitações, umidade relativa e cobertura de nuvens (RAKUSA-SUSZCZEWSKI *et al.* 1993).

Lopez Martinez *et al.* (2012) identificaram as seguintes morfologias na península Fildes: plataformas marinhas soerguidas, vales planos, solos com padrão e lóbulos de gelifluxão. A Península Fildes possui um número significativo de praias elevadas e bacias isoladas com elevação inferior a 20 m, concentrando lagos e alagados de idade holocênica (WATCHAM *et al.* 2011). As praias holocênicas, situadas entre a linha de costa atual e a cota de 20 m de elevação, foram formadas nos últimos 6000 anos (BARSCH e MAUSBACHER, 1986).

As rochas vulcânicas do grupo Jurássico, localizadas no sul da península, são compostas basicamente de lavas andesíticas e piroclásticas e duas subdivisões estratigráficas são reconhecidas: uma série inferior de andesitos dobrados separados por inconformidades e uma superior de fragmentos de rochas piritizadas, calcificadas e silicificadas suavemente dobrados (BIRKENMAJER, 1989; BARTON, 1995). As rochas do grupo Península Fildes foram formadas entre o Paleoceno tardio (59 Ma) e o Eoceno Médio (43–42 Ma), e estão localizadas na parte central e norte, sendo subdivididas por inconformidades em pelo menos 4 subdivisões estratigráficas: andesitos, que são, predominantes, sedimentos de rochas, aglomerados e andesitos intercalados por tufos (BIRKENMAJER, 1989; BARTON, 1995).

Os processos geomorfológicos que ocorrem atualmente na Península Fildes são nivação, solifluxão, ablação, erosão e crioturbação (SIMAS *et al.* 2008). De acordo com Michel *et al.* (2014), os solos da Península Fildes são bem desenvolvidos para as condições ambientais presentes na Antártica, sendo os criossolos dominantes relacionados à crioturbação e processos da

camada ativa. Os processos periglaciais são dominantes, com elevação acima de 50 m onde são comuns solos em padrão. Bremer (2008) afirma que as áreas livres de gelo das ilhas Shetland do Sul são compostas por terrenos jovens e drenados por canais intermitentes; a morfodinâmica está associada a processos físicos e químicos devido ao derretimento da neve e do gelo.

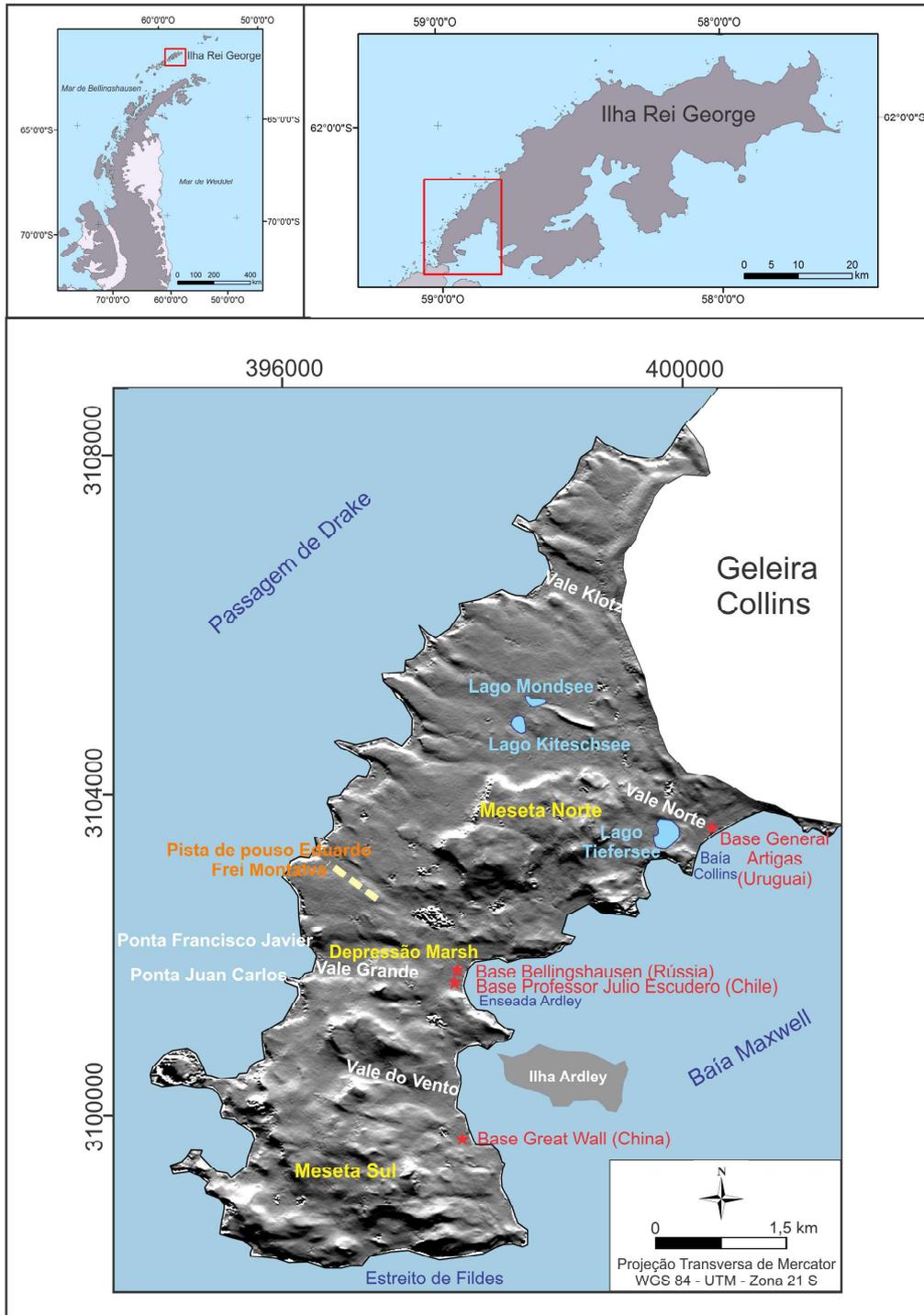


Figura 1 - A-Península Antártica com destaque no quadrado vermelho para a ilha Rei George; B-Ilha Rei George com destaque em vermelho para a Península Fildes; C-Península Fildes e, ao norte, a geleira Collins.

3. Materiais e Métodos

O mapeamento das formas de relevo foi desenvolvido a partir das descrições em campo e da interpretação da imagem QuickBird (adquirida em fevereiro de 2008). Essa imagem foi corregistrada com dados de linha de costa disponível no site do Antarctica Digital Database (www.add.scar.org). Foi aplicado um realce de ajuste de histograma para facilitar a identificação de feições geomorfológicas.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado foi produzido por Braun *et al.* (2016), com resolução espacial de 12 m, para toda a ilha Rei George e a partir de imagens TanDEM-X, de janeiro de 2012, referenciadas e validadas com base em medições com DGPS. Os dados foram processados utilizando interferometria como referência (BRAUN *et al.* 2016).

Para a interpretação geomorfológica, foram elaborados mapas no software QGIS 2.18 de hipsometria, declividade, acumulação de água, orientação das vertentes e índice de rugosidade. As áreas com acúmulo de água foram delimitadas com base na direção do escoamento, calculado a partir do MDE. A declividade foi delimitada com as seguintes classes de porcentagem: 0%–3% (plano), 3%–8% (suave ondulado), 8%–20% (ondulado), 20%–45% (forte ondulado), 45%–75% (montanhoso).

A hipsometria foi aplicada entre 0 m e 300 m com intervalos definidos de 50 m. A orientação das vertentes foi elaborada a partir da ferramenta “Aspect”, a partir do MDE; o índice de rugosidade foi calculado com a ferramenta “Análise de terreno” e apresentou valores entre 0–6. Sampaio (2008) define o Índice de Concentração de Rugosidade (ICR) expressando-o como número adimensional que resulta do produto entre a amplitude altimétrica (Hm) e a densidade de drenagem (Dd).

A delimitação dos vales foi realizada a partir dos dados de hipsometria, declividade, índice de rugosidade e acumulação de água. Também foram elaborados perfis topográficos para as principais feições visando sua classificação em vales de anfiteatro ou paleovales em U. Nos trabalhos de campo de 2015 e 2016 foram obtidos registros fotográficos para a interpretação dessas feições erosivas.

Para o entendimento da evolução da paisagem da Península Fildes e da dinâmica de avanço e recuo da geleira Collins durante a deglaciação, foi realizada a elaboração de uma compartimentação geomorfológica a partir do contexto geológico, hipsométrico, de declividade, ICR e da espacialização das principais feições geomorfológicas subglaciais e marginais ao gelo (Tabela 1).

Tabela 1: Variáveis físicas consideradas para realização da compartimentação geomorfológica. Valores estabelecidos segundo as características do terreno.

Compartimento	Declividade (%)	Hipsometria (m)	ICR
Planalto	>8	>80	>3
Depressão	<8	<80	<3

4. Resultados e Discussões

4.1. Deglaciação na Península Fildes Desde o Último Máximo Glacial

A partir de 10.000 AP, quando se iniciou o processo de deglaciação da península, 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. Esses planaltos são nomeados de Meseta Sul e Meseta Norte. Na Meseta Sul, havia provavelmente um maior número de drenagens, esculpindo formas de esporões (horn) que atualmente abrigam canais glacio-

fluviais no período de verão, fluindo por antigos vales de anfiteatros e outros encaixados em fraturas geológicas. Na Meseta Norte, provavelmente não existia um campo de gelo muito espesso, sendo um sistema com baixa capacidade erosiva, resultando em um topo aplainado (Figura 3). Durante o Último Máximo Glacial (UMG), provavelmente o gelo escoava atravessando a Península Fildes no sentido O–E (JOHN, 1972), cobrindo toda área, e possuía um escoamento com origem no campo de gelo da ilha Rei George. As feições, atualmente retrabalhadas, são de origem subglacial, provenientes dos campos de gelo do UMG.

Foi elaborado um mapa de retração dos sistemas glaciais (Figura 2) a partir das idades da Península Fildes fornecidas por diversos autores (BARSCH e MÄUSBACHER, 1986; MÄUSBACHER *et al.* 1989; MÄUSBACHER, 1991; MARTINEZ-MACCHIAVELLO *et al.* 1996; HALL, 2007; WATCHAM *et al.* 2011). De maneira geral, a deglaciação da Península Fildes ocorreu entre 11000 anos e 5000 anos AP e pode ter havido avanços e retrações nesse período, com a presença de

campos de gelo sob as mesetas Norte e Sul. No avanço do período da Pequena Idade do Gelo (PIG), a geleira Collins provavelmente avançou até o mar em dois pontos, na Baía Maxwell e em outro voltado para a Passagem de Drake, pois nessas áreas não se observa a presença da moraina de avanço. A área total perdida da geleira Collins foi de 1,4 km² no período entre o avanço da PIG e da retração ocorrida até 2018 (com base em imagem Landsat 8/OLI).

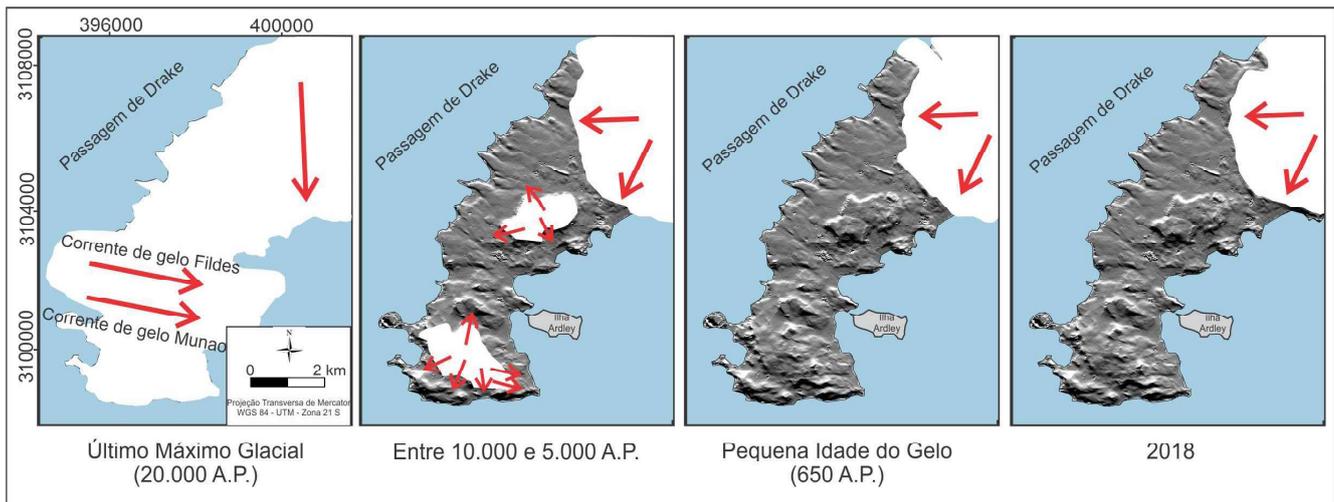


Figura 2 - Deglaciação na península Fildes. A) Último Máximo Glacial; B) período de deglaciação, entre 10.000 e 5.000 AP.; C) Avanço na PIG; D) atual posição da frente da geleira Collins. Setas em vermelho indicando o sentido do escoamento do gelo, de acordo com o MDE.

4.2 Caracterização dos Vales

Os perfis topográficos (Figura 3), juntamente com os dados de hipsometria, declividade, áreas de acumulação de água de degelo e índice de rugosidade permitiram identificar 4 tipos de vales na península Fildes. O primeiro são os paleovales em U (perfis A, D, F e K) localizados na porção oeste, voltados para a Passagem de Drake, nos grupos geológicos Jurássico e Península Fildes (BIRKENMAJER, 1989; BARTON, 1995), com elevação entre 30m e 90 m e comprimento entre as vertentes de 450 m (vale A) a 600 m (vale F). A declividade nas falésias é superior a 45%, enquanto nos fundos dos vales é, na maioria, entre 0%-20%. O segundo tipo de vale está na zona proglacial da geleira Collins (perfil B), na área de rochas do grupo Península Fildes, e caracteriza-se pela sequência de três lagos com exutório na Baía Maxwell (Figura 1). A elevação observada está entre 0 m e 60 m e a declividade é de 0%-20%. O comprimento do sistema, entre a nascente e o exutório é de 2000 metros, aproximadamente.

Os vales em anfiteatro compreendem o terceiro tipo observado e se formam nas paredes das Mesetas Norte (perfil C e E) e Sul (perfil J); geologicamente, compreendem as formações do Grupo Jurássico e península Fildes (BIRKENMAJER, 1989; BARTON, 1995). A altitude dos vales compreende cerca de 130 m, com um desnível que varia de 30m a 60 m entre a porção mais alta e a mais baixa da feição. Todos os vales apresentam uma área de deposição em 60 m após a área erosiva do vale em circo. A declividade na parede das Mesetas é superior a 20%, enquanto na maior parte dos vales prevalece o valor de até 20%, como também observado neste estudo. Os vales encaixados em falhas geológicas na formação do Grupo Jurássico (perfis G, H e I) se localizam no sudoeste da península Fildes e representam o quarto tipo encontrado na área de estudo. A elevação máxima desses vales é de 80 m e as vertentes têm entre 300 m e 600 m de comprimento; a porção encaixada do vale tem aproximadamente 30 m. A declividade varia entre 0%-75%, sendo que o vale G tem uma área de deposição próxima ao mar, com 0% -3%.

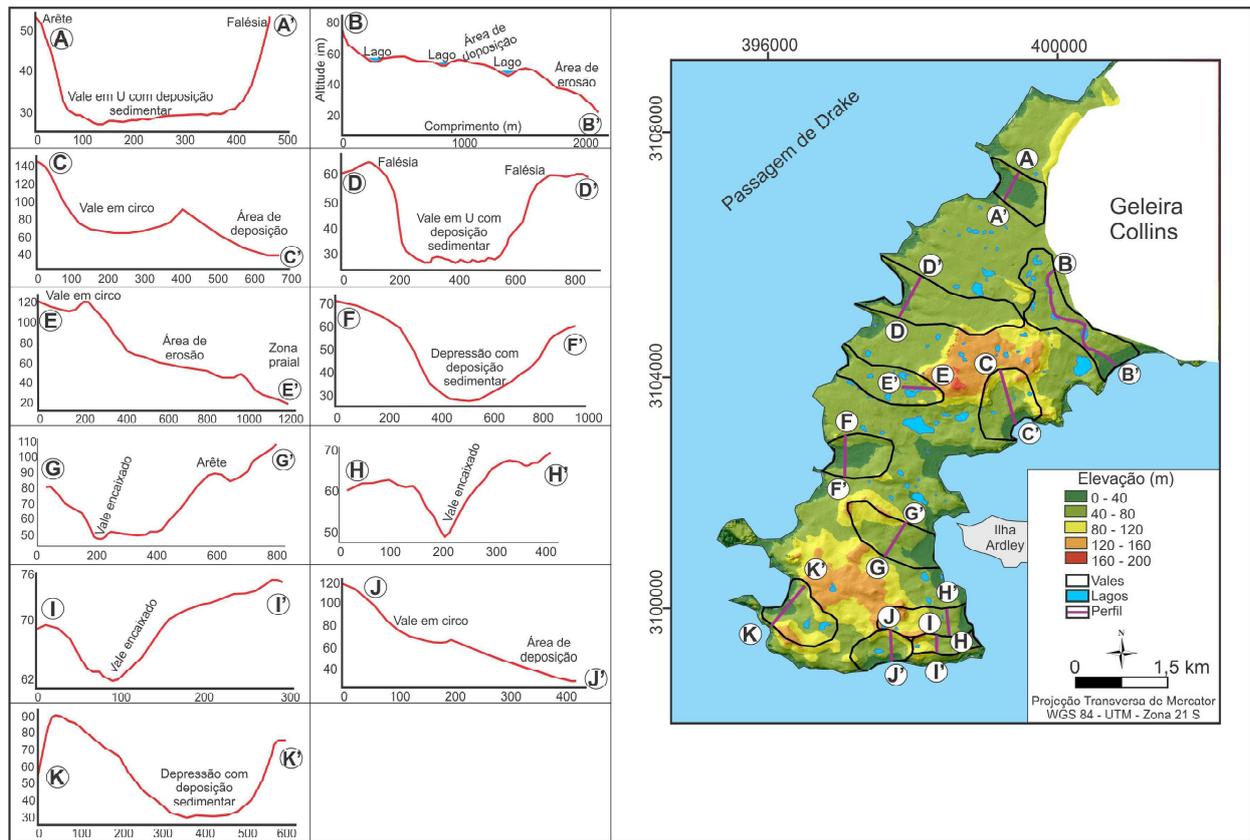


Figura 3 - Principais feições identificadas com uso de perfis topográficos em alguns dos vales da península Fildes. Os vales estão nomeados (letras) de acordo com a figura 4.

Paleovales em U

O vale Klotz (Figura 4—vale A) localiza-se na porção noroeste da península Fildes. O fundo do vale Klotz é relativamente plano e com elevações entre 15 m e 50m; as porções laterais do vale são escarpadas e íngremes (com declividade em torno de 45%) e apresentam ação erosiva do mar junto à passagem de Drake, formando falésias. Possui vertentes orientadas para Norte e Oeste e áreas que permanecem sem cobertura de neve por mais tempo no verão, permitindo um maior retrabalhamento pelas águas de degelo.

O vale Klotz recebe atualmente o escoamento de água de degelo da porção noroeste da geleira Collins. O aporte de água de degelo, somado ao intemperismo local, faz desse vale uma área com sedimentos arredondados e pouco angulosos, conforme estudo de Petsch (2018). Ocorre deposição de sedimentos finos transportados por canais de degelo e fluviais. Verificou-se a formação de depósitos de detritos junto às vertentes rochosas mais íngremes. No setor lateral voltado para o Sul do vale há uma paleoaresta (*arête*), formada pela deposição de duas correntes antigas de gelo. No contato com o mar observam-se dois promontórios que provavelmente

ancoravam a geleira que fluiu por esse vale até o mar.

O vale D (Figura 4 - D) está voltado para a passagem de Drake, com a orientação das vertentes predominando para Norte. Neste vale as elevações predominam entre 50 m e 100m, com os maiores valores observados nas paredes da Meseta, que atinge 150 m. A declividade predominante do fundo do vale está entre 0 e 6%, atingindo um máximo de 44% nas encostas da Meseta Norte. Esse vale apresenta uma área alagada alimentada por canais de fusão de neve, formando um leque de deposição sedimentar. Possui uma escarpa até a praia, entre 0 m–30 m, possivelmente devido ao soerguimento dessa parte, seguido por erosão marinha; apresenta promontórios que provavelmente ancoravam à frente da geleira.

No Vale Grande (Figura 4 - vale F) predominam elevações inferiores a 50 m, atingindo a máxima de 100m. As escarpas do vale (Figura 4 - F) possuem declive entre 20%–45% e as duas paredes do vale têm orientação predominante Norte e Sul. O vale se desenvolve suavemente até a parte plana, onde são observados canais anastomosados, a presença de dois lagos e um delta progradante com sedimentos finos, conforme Petsch 2018. Predomi-

nam formas suaves e de deposição fluvial de sedimentos derivados das áreas marginais mais altas.

O vale K (Figura 4 - K) apresenta elevações de até 150 metros. Verificou-se a existência de paredes rochosas íngremes com declividade de 20% e com fluxo de detritos. As orientações predominantes das vertentes são Norte e Oeste. Há a formação de um lago na porção central do vale, num patamar formado pelos processos erosivos da geleira que fluía nesse local no passado. Constatou-se a presença de sedimentos arredondados no leito do vale, como resultado do retrabalhamento pela ação fluvial e marinha em condições distintas rela-

cionadas às variações glacioeustáticas do nível do mar. As pontas Rvegg e Eddy podem representar a extensão lateral do fluxo glacial que se inseria no local.

Todos os paleovales em U foram esculpidos pela ação de um escoamento glacial posterior ao UMG. Na porção próxima ao mar ocorrem enseadas onde os promontórios rochosos possivelmente estão relacionados ao ponto de ancoragem de um fluxo de uma geleira que chegava ao mar. O vale Grande e o vale Klotz, em particular, se desenvolvem numa depressão formada pela corrente de gelo Munao (ZHU *et al.* 1996) e são posteriormente retrabalhados pelos canais de fusão de neve.

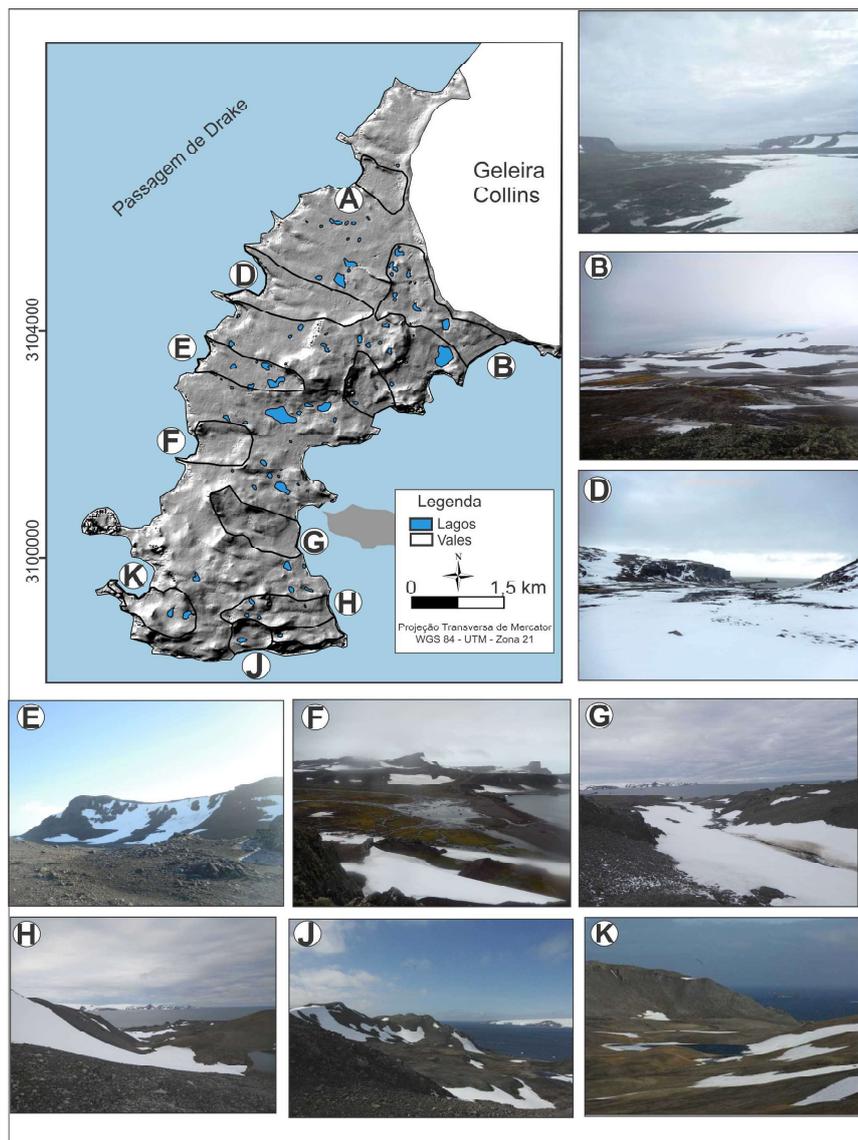


Figura 4 - Fotografias de vales da península Fildes - A) Vale Klotz localizado na porção norte da península Fildes; B) bacia proglacial que drena até a baía Collins; C) não há fotografias do vale C; D) vale em U, que no passado fluía da Meseta Norte até a Passagem de Drake; E) vale de antiga geleira de anfiteatro; F) vale em “U” na porção central da península Fildes; G) vale encaixado em fratura geológica; H) vale encaixado em fratura geológica; I) não há fotografias do vale I; J) vale de geleira de anfiteatro; K) vale encaixado em vale de anfiteatro. Os vales estão nomeados de acordo com a figura 6.

Vale proglacial

O vale B (Figura 4 - B) possui orientação Oeste-Leste e é composto por uma série de lagos conectados e alimentados por múltiplos canais que desaguam na baía Maxwell. Esses recebem influxo d'água de derretimento da geleira e também de neve. Possui uma feição rochosa que pode ser indicativo de um paleoaresta que dividia o escoamento de dois vales (ou bacias) que fluíam da geleira Collins em direção à passagem de Drake. Essa feição se apresenta erodida por processos de deglaciação, pelo efeito alternado de congelamento e descongelamento e queda de blocos.

Esse vale ainda está sujeito a processos paraglaciais, com água e sedimentos que fluem da geleira, desestabilizando o ambiente. Ele é o vale mais jovem da península Fildes. Segundo Schmidt *et al.* (1990), o lago Tiefensee (Figura 1) não existia há 6000 anos, enquanto o lago Kiteschsee já estava formado. Para o lago Mondsee (Figura 1) a datação da camada inferior é de 4700 anos e a camada mais recente de musgos é aproximadamente 800 anos mais velha do que a equivalente no lago Tiefensee (MÄUSBACHER *et al.* 1989), sugerindo, então, que o degelo da porção oeste aconteceu antes que o da porção leste. É uma área que apresenta vários canais de água de degelo que formam três alagados, e os lagos atuam no represamento dos sedimentos, já que estão localizados em sequência. Com o aumento de processos erosivos e intemperismo, os canais glaciofluviais tenderão a aumentar a incisão vertical no relevo.

Vales em circo

O vale C (Figura 4) possui 3 patamares distintos: o primeiro está localizado entre 100 m e 150 m de elevação, o segundo entre 50 m e 100 m e o terceiro começa em 0 e segue até 50 m. A declividade é superior a 20% na parede da Meseta Norte e fica entre 20% e 45% em um terraço marinho localizado próximo à praia. Possui a orientação predominante das vertentes em Sul e Leste. Esse vale possivelmente foi esculpido por uma geleira que se localizava na reentrância na Meseta Norte e os três patamares escalonados foram formados pela ação da erosão.

No vale E (Figura 4E) predominam elevações que possuem entre 50 e 100 metros. A declividade atinge 45% na parede da Meseta Norte e na porção próxima

à praia, mas o restante da área é predominantemente plano e faz parte da plataforma marinha. A orientação predominante das vertentes no vale é de Oeste e Norte. Possui lagos e alagados provenientes de fusão de neve. Ao sopé da Meseta Norte, no setor de maior declividade, há uma morfologia do tipo anfiteatro, como resultado da erosão por uma geleira de circo que anteriormente fluía ao longo do vale até a zona costeira. Essa área foi modificada para a construção de uma pista de pouso de aeronaves. A massa de gelo provavelmente fluía para a passagem de Drake e por meio de dois pontos de ancoragem na praia.

O vale J apresenta uma área inferior a 1 km² (Figura 4-J) com vertentes orientadas para o Sul. A elevação apresenta entre 50 m e 100 m e a declividade é maior que 45% na parede da Meseta Sul. A feição em circo foi formada por erosão, provavelmente no período de retração dos sistemas glaciais pós UMG. O vale J é o único com morfologia de circo que se formou na Meseta Sul, o que provavelmente se deve a fatores estruturais, diferenciando-se da Meseta Norte. Apesar de o vale J estar há mais tempo exposto à erosão, as formas de relevo aparentam um menor retrabalhamento.

Vales esculpidos em falhas geológicas

Um total de três vales, com direção Oeste-Leste (Figura 4 - vales G, H e I) aparecem acompanhando os falhamentos tectônicos existentes ao sul da península (BIRKENMAJER, 1989). A orientação das vertentes predomina em Leste e Sul. A declividade e elevação já estão apresentadas no item 4.2. Os vales possuem sistemas de drenagens fluviais extensos, estreitos e encaixados na parte superior e central (Figura 4 - G e H), com praias soerguidas na porção à jusante. Na porção encaixada os três vales assumem uma morfologia em "V", provavelmente como resultado da erosão diferencial nessa zona de fratura e posterior retrabalhamento por canais de degelo.

Foram encontrados blocos com formato de *stoss and lee* retrabalhados pela ação marinha, com ausência de estriamentos. Atualmente, nota-se o retrabalhamento do fundo do vale pela ação fluvial e a acumulação de água de fusão e de sedimentos nas porções topograficamente mais baixas, onde estão os lagos. Também foi encontrada uma zona de deposição sedimentar mais espessa, indicando morainas marginais do fluxo de gelo pretérito.

Mudanças ambientais atuais nos vales

A maior parte dos paleovales em “U” localizados no Compartimento de Depressão Klotz está passando por um processo de diminuição do grau de entalhamento. A maioria dos vales se encaixa na classe de baixa dimensão interfluvial e estão evoluindo de um grau de entalhamento muito forte (>160 m) para médio (40 m–80m) (Figura 5). Os vales encaixados em fraturas geológicas pertencentes ao compartimento “Grande Muralha” também estão diminuindo seu grau de entalhamento de muito forte para forte (80 m–160m).

Ressalta-se que esses vales em U e os encaixados em falhas geológicas estão, na sua maioria, há mais tempo expostos a processos periglaciais do que o vale proglacial (vale B), o que explica a diminuição do grau de entalhamento. Petsch et al. (2017) indicam que os vales em U voltados para a passagem de Drake possuem um considerável crescimento e fixação de vegetação. López-Martínez et al. (2012) evidenciam o desenvolvimento

de solos para a área dos paleovales na península Fildes. Esses estudos demonstram a estabilidade dessas feições. *É possível inferir*, então, que a paisagem é de rápida transição, de proglacial para periglacial, de mudança pós-deposicional com a retração da geleira Collins.

Atualmente, esses vales estão sendo preenchidos por sedimentos provenientes das paredes das falésias, também transportados por canais de fusão da neve. Saliencia-se que esse processo pode se intensificar caso haja aumento da precipitação líquida ou maior quantidade de água de degelo proveniente da retração da geleira Collins. Maiores períodos sem cobertura de neve também tendem a contribuir para a atuação de processos intempéricos. A diminuição do entalhamento dos vales pode ser considerada uma mudança ambiental ligada a mudanças climáticas para a região da Antártica Marítima, já que a presença de maior quantidade de água de degelo contribui para o transporte de sedimentos nas bacias glaciais.

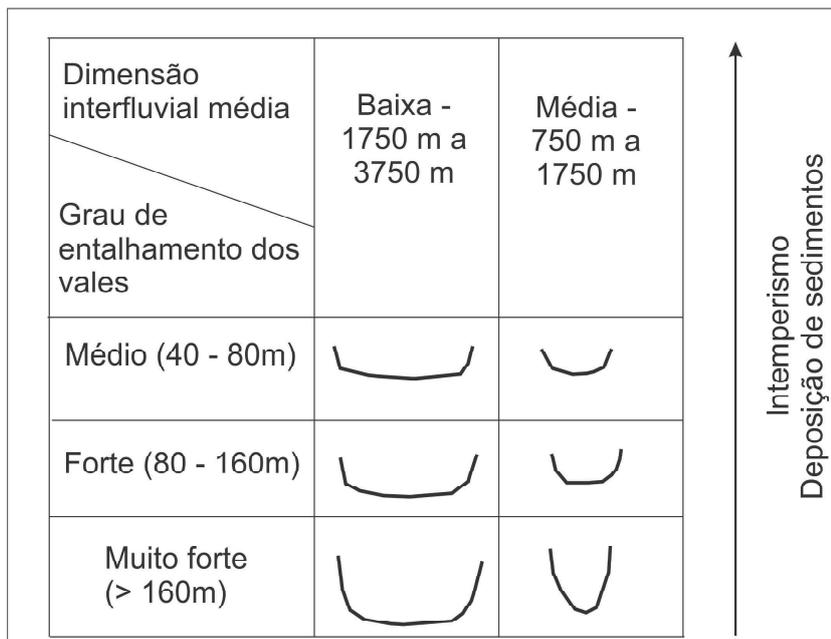


Figura 5 - Grau de entalhamento dos vales encontrados na Península Fildes. Com o processo de desnudação, os vales passaram a sofrer sedimentação e intemperismo, diminuindo o grau de entalhamento. Adaptado de Ross (1994).

4.3 Compartimentação Geomorfológica da Península Fildes

Os dados de elevação (Figura 6) indicaram valores de máxima elevação, entre 150 e 200 metros, localizados em duas áreas rochosas relacionadas às litologias de andesitos e conglomerados, na Meseta Norte, e rochas

piroclásticas, na Meseta Sul (BIRKENMAJER, 1989; BARTON, 1995). As áreas menos elevadas estão nos setores costeiros e em um eixo central, com litologia de conglomerados. Quanto à declividade (Figura 6), os maiores valores percentuais estão relacionados às escarpas das Mesetas Norte e Sul. Estes dados, junta-

mente com os de orientação da vertente e rugosidade, foram utilizados para a descrição dos principais vales da Península Fildes (Figura 3).

O ICR determinou as zonas de escarpa das duas áreas delimitadas como planaltos da Meseta Norte e Meseta Sul. Quanto maior o índice de rugosidade, maior a ação da erosão na área devido a uma maior declividade. Os valores baixos de rugosidade indicam as áreas de

depressão e planícies com áreas de deposição. O ICR permite discriminar as áreas homogêneas de zonas mais dissecadas, permitindo analisar as formas de relevo. Os valores de maior rugosidade foram encontrados nos setores de maior amplitude topográfica, principalmente no setor sul e nas bordas da Meseta Norte. Foram delimitadas, também, as áreas de acumulação de água (Figura 6).

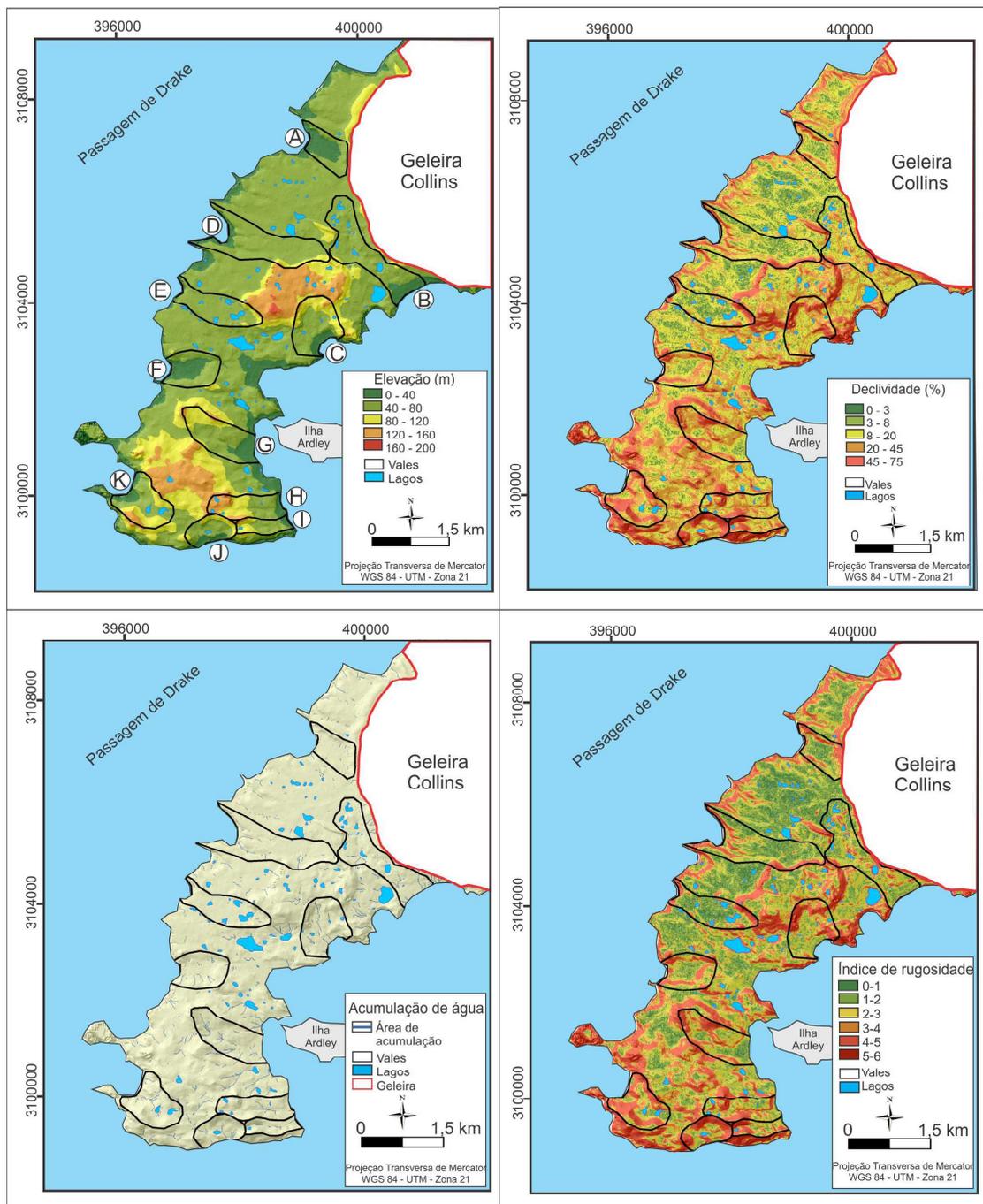


Figura 6 - Relevo da Península Fildes: A) Hipsometria; B) Declividade; C) Áreas de acumulação de água; D) Índice de rugosidade (quanto mais alto o valor significa que o relevo é mais dissecado). A sequência de letras no mapa A (elevação) representa a nomenclatura atribuída aos vales.

A partir da análise dos vales e dos dados de geologia, elevação e declividade, a Península Fildes foi compartimentada em duas unidades geomorfológicas: planaltos e depressões periféricas. As unidades morfoesculturais dos Planaltos (Figura 7) correspondem à área da Meseta Norte (Planalto Norte) e a Meseta Sul (Planalto Sul). O PN possui a morfologia tabuliforme, inserida geologicamente na Formação Grupo Península Fildes. A elevação predomina entre 80 m e 100 m, com declividade na zona de borda superior a 45%, e na por-

ção plana entre 8%–20%. A Meseta Norte apresenta um total de oito lagos, formados principalmente na porção mais ao norte, e as bordas erodidas com dois vales em circo. O PS está inserido na Formação Grupo Jurássico Vulcânico, com reentrâncias abrigando um vale em circo. Apresenta uma área planáltica com presença de três lagos, elevações entre 80m e 160 m e declividade média de 8%–20% com vários picos de declividade acima de 45%. Há uma feição do tipo paleohorn, na parte central da Meseta Sul.

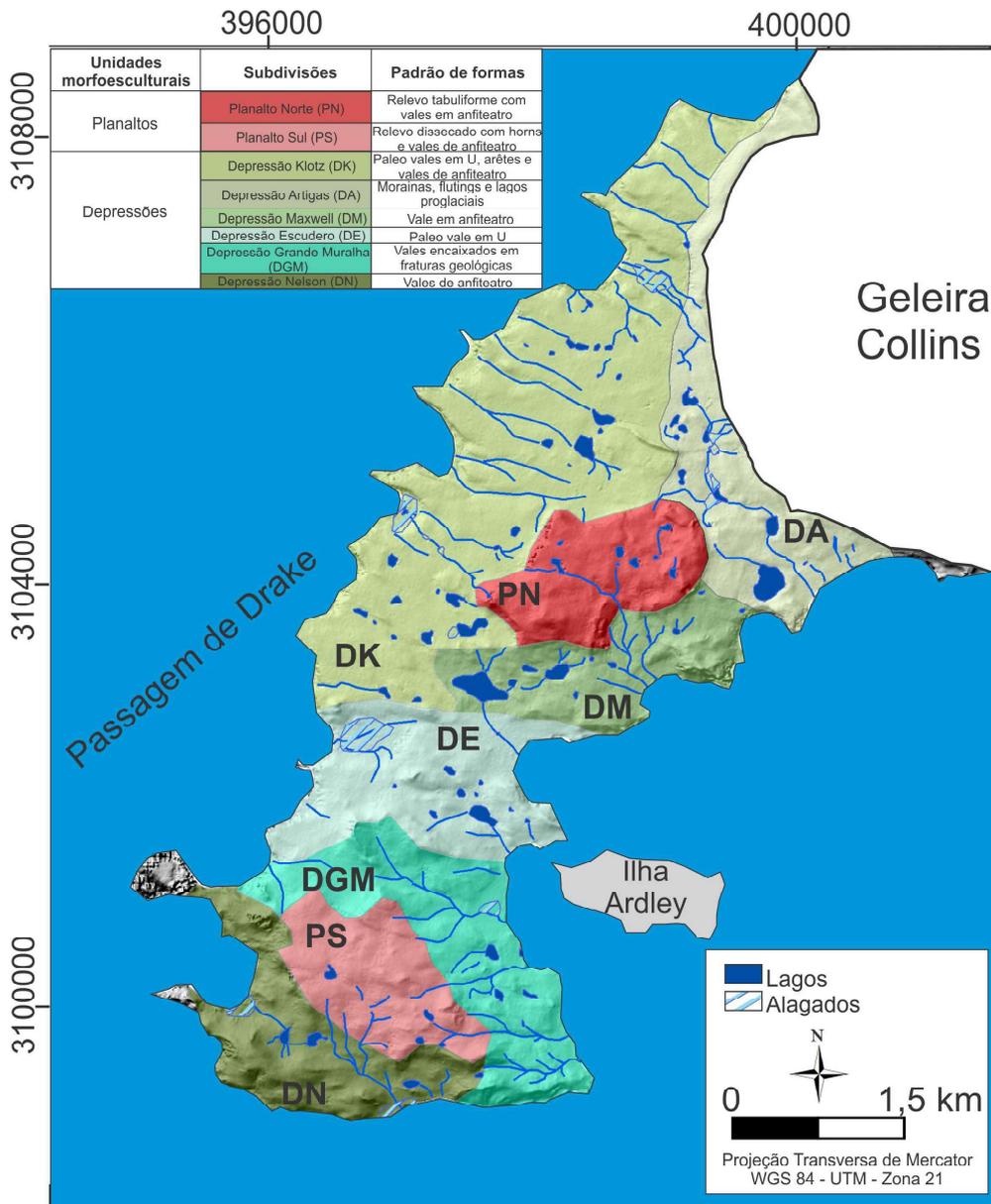


Figura 7 - Compartimentos do relevo encontrados na Península Fildes. As unidades morfoesculturais dos Planaltos correspondem à área da Meseta Norte (Planalto Norte – PN) e a Meseta Sul (Planalto Sul - PS). A Depressão Klotz (DK) apresenta paleovales em U, arêtes e vales em circo; a Depressão Artigas (DA) mostra formas deposicionais de flutings, morainas e um vale erodido; a Depressão Maxwell (DM) tem vales de anfiteatro na encosta da meseta Norte; a Depressão Escudero (DE) apresenta vales em U; a Depressão Grande Muralha (DGM), mostra vales esculpidos em fraturas geológicas; e Depressão Nelson (DN), tem vales em anfiteatro esculpidos nas paredes da meseta Sul.

Provavelmente, os compartimentos PN e PS, no passado, poderiam ter sido embasamento subglacial para correntes de gelo com menor volume e, portanto, com menor capacidade de ação erosiva. De acordo com Mausbacher et al. (1989), por volta de 9 mil anos AP, as geleiras retraíram para as porções mais altas e deixaram pequenos fiordes gerados por fluxos tributários, assim como porções terrestres da ilha Rei George começaram a se tornar áreas livres de gelo. Esses fluxos tributários provavelmente causaram a erosão nas paredes das mesetas, os vales em circos que compõem os compartimentos DM e DN (abaixo descritos). Estes compartimentos se diferenciam por apresentarem uma formação geológica distinta, sendo o DM pertencente ao Grupo Península Fildes e o DN ao grupo Jurássico Vulcânico.

As unidades morfoesculturais de depressões (Figura 7) possuem 4 paleovales em U (vales A, D, F e K) na porção oeste e 3 vales esculpidos em falhas geológicas (G, H e I). Trata-se de um relevo suave, com baixo índice de rugosidade (1–2) e com declividades menores que 8%. É possível identificar as seguintes depressões: Depressão Klotz (DK) com paleovales em U, aretês e vales em circo; Depressão Artigas (DA) com formas deposicionais de flutings e morainas e vale erodido (vale B) preenchido pelo sistema de lagos proglaciais e deposição de material sedimentar pela geleira; Depressão Maxwell (DM) com vales de anfiteatro estabelecidos na parede da Meseta Norte; Depressão Escudero (DE) com vales em U (vale F); Depressão Grande Muralha (DGM) com vales esculpidos em fraturas geológicas (vales G, H e I); Depressão Nelson (DN) com vales em anfiteatro (vales J e K) esculpidos nas paredes da Meseta Sul (Figura 7).

A formação dessas depressões está ligada a processos periglaciais e intempéricos desde o Último Máximo Glacial sendo que essas feições eram possivelmente subglaciais e ficaram expostas após a retração dos sistemas glaciais. Os compartimentos DE e DGM têm sua formação ligada à passagem de antigas correntes de gelo. John (1972) e Zhu et al. (1996) sugerem que houve duas correntes de gelo, uma chamada Fildes e outra Munao, que possuíam direção Noroeste-Sudeste, cruzando a Península Fildes e causando a erosão da baía Maxwell. O mesmo autor propõe, ainda, que essa massa de gelo não tinha origem na porção emersa conhecida atualmente, pois nem a Península Fildes nem a península de Rip Point são suficientemente extensas ou altas para ter um domo de gelo ativo. Dessa forma, é provável que tenha

existido uma massa de gelo a noroeste da atual Península Fildes, que originou a corrente de gelo responsável pela erosão que deixou uma depressão esculpida entre as duas mesetas (JOHN, 1972). No compartimento DK, provavelmente uma corrente de gelo da geleira Collins teria sido responsável pela erosão e entalhamento do vale Klotz. Toda porção plana desse compartimento pode ser considerado como uma plataforma marinha.

O compartimento DA, apesar de ser recente, conforme citado na descrição do vale B (proglacial), tem sua origem anterior à Pequena Idade do Gelo. Hall (2007), com base em datações de musgos (650 A.P.) em morainas de avanço da geleira Collins, concluiu que a frente dessa geleira é relativamente estável e que não retrocedeu mais do que algumas dezenas de metros ao longo do Holoceno tardio. As morainas de avanço foram provavelmente formadas nos últimos 650 anos.

No compartimento DGM e no DA, a diminuição do volume de gelo e a elevação isostática regional da porção continental durante o Holoceno permitiram a formação progressiva de uma série de praias marinhas em áreas litorâneas elevadas abaixo de 20 metros na Península Fildes. É comum encontrar uma sequência de três a oito praias sendo mais desenvolvidas na costa leste onde a erosão marinha não é tão forte (VALE *et al.* 2002; WATCHAM *et al.* 2011; MICHEL *et al.* 2014).

5. Considerações Finais

De forma geral, os principais planaltos e depressões resultam de formas subglaciais anteriores à deglaciação. Alguns paleovales em U e vales em circo são prováveis testemunhos de corpos de gelo menores que fluíam de campos de gelo localizados nas Mesetas Norte e Sul, nos compartimentos DM, DK e DGM. Posteriormente, a ação intempérica e de retrabalhamento dos canais de degelo esculpiu os principais vales; com o processo de deglaciação, tem-se a formação predominante de depressões periféricas e planaltos e o deposicional resultando na formação de planícies.

A identificação das formas dos vales e seus processos atuantes permitiu traçar a evolução do ambiente desde o período de deglaciação até a atual posição da geleira. Os produtos gerados a partir do MDE permitiram a caracterização do relevo e posterior compartimentação, o que é importante, pois está associado com a história de evolução da paisagem da península. O índice de rugosidade apresenta dados de dissecação e

declividade e permite delimitar unidades geomorfológicas homogêneas.

Com base no grau de entalhamento dos vales, conclui-se que a maioria está diminuindo o valor de dissecação, pois está passando por um momento de sedimentação dos fundos, alimentado por canais glaciofluviais e intemperismo das áreas escarpadas. Dessa forma, é possível inferir que a paisagem é de rápida transição de paraglacial para periglacial, de mudança pós deposicional com a retração da geleira Collins. Além disso, essa diminuição no entalhamento pode ser considerada como uma mudança ambiental ligada ao aumento de precipitação líquida e água de degelo da geleira.

Agradecimentos

Ao Programa Antártico Brasileiro, INCT-Crioseira e FAPERGS pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

BARCLAY, D. J.; YAGER, E. M.; GRAVES, J.; KLOCZKO, M.; CALKIN, P. E.; Late Holocene glacial history of the Copper River Delta, coastal south-central Alaska, and controls on valley glacier fluctuations. *Quaternary Science Reviews*, v. 81, p. 74–89, 2013. DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.10.001.

BARTON, C. M. The geology of the South Shetland Islands: The stratigraphy of King George Island. *British Antarctic Survey Scientific Bulletin*, v. 44, p.33, 1995.

BARSCHE, D.; MAUSBACHER, R. New Data on the Relief Development of the South Shetland Islands. *Antarctica-Interdisciplinary Science Review*, n.11, 2, p. 211–218, 1986. DOI: 10.1179/isr.1986.11.2.211.

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

BENNETT M. R.; GLASSER, N. F. *Glacial Geology - Ice Sheets and Landforms*. Inglaterra, John Wiley, 1996.364p.

BINTANJA, R.; VAN DEN BROEKE, M. R. The surface energy balance of Antarctic snow and blue ice. *Journal of Applied Meteorology*, v. 34, p. 902–926, 1995. DOI: 10.1175/1520-0450(1995)034<0902:TSEBOA>2.0.CO;2

BIRKENMAJER, K. A guide to tertiary geochronology of King George Island, West Antarctica. *Polish Polar Research*, n. 10, p. 555–579, 1989.

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.

BRAUN, M. H.; BETSCH, T.; SEEHAUS, T. (2016): **King George Island TanDEM-X DEM, link to GeoTIFF**. Institut für Geographie, Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen-Nürnberg, PANGAEA, 2016. DOI:10.1594/PANGAEA.863567

BRAUN, M.; HOCK, R. Spatially distributed surface energy balance and ablation modelling on the ice cap of King George Island (Antarctica). *Global and Planetary Change*, v. 42, n. 1, p. 45–58, 2004. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2003.11.010.

BREMER, U. F. **Morfologia e bacias de drenagem na cobertura de gelo da ilha Rei George, Antártica**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1998. 135 p.

BREMER, U. F. **Solos e geomorfologia da borda leste da península Warszawa, Ilha Rei George, Antártica Marítima. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Curso de Pós Graduação em solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2008. 136 p.**

CHENG, Q.M.; ZHANG, G.; LU, C.; KO, C. GIS spatial-temporal modeling of water systems in greater Toronto area, Canada. *Journal of China University of Geosciences*. n. 15 (3), p. 275–282, 2004. DOI:10.1016/j.cageo.2003.06.002.

CUFFEY, K. M.; PATERSON, W. S. B. **The Physics of Glaciers**. 4ª ed. Oxford: Pergamon/Elsevier Science, 2014.380 p.

CUFFEY, K.M.; CONWAY, H.; GADES, A.M.; HALLET, B.; LORRAIN, R.; SEVERINGHAUS, J.P.; STEIG, E.J.; VAUGHN, B.; WHITE, J.W.C. Entrainment at cold glacier beds. *Geology*, v. 28, p. 351–354. 2000. DOI: 10.1130/0091-7613(2000)28<351:EACGB>2.0.

DLR, Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt. The Satellite. Disponível em: http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10388/574_read-425/. Acesso em: 25 de outubro de 2017.

GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; Sedimentary facies and landform genesis at a temperate outlet glacier: Soler Glacier, North Patagonian Icefield. *Sedimentology*, v. 49(1), p. 43–64, 2002. DOI 10.1046/j.1365-3091.2002.00431.x.

GRUBER, A.; WESSEL, B.; HUBER, M.; ROTH, A. Operational TanDEM-X DEM calibration and first validation results. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. v. 73, p.

- 39–49, 2012. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.06.002.
- HALL, B. Late-Holocene advance of the Collins Ice Cap, King George Island, South Shetland Islands. **The Holocene**, v. 17, p. 1253–1258, 2007. DOI: 10.1177/0959683607085132.
- HOLDGATE, M. W., ed. **Antarctic Ecology**. Londres: Academic Press, 1970. 732 p.
- JOHN, B. S. **Evidence from the South Shetland Islands towards a glacial history of West Antarctica**. In: D.E. Sugden and R. J. Price (eds) Polar Geomorphology. Institute of British Geographers, London. p. 75–92, 1972.
- KLEMAN, J. et al. **Reconstruction of paleo ice sheets inversion of their glacial geomorphological record**. In: Knight, P. G. (ed). Glacier Science and Environmental Change. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 527 p., 2006.
- LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. SERRANO, E.; SCHMID, T.; MINK, S.; LINÉS, C. Periglacial processes and landforms in the South Shetland Islands (Northern Antarctic Peninsula region). **Geomorphology**, v. 155–156, p. 62–79, 2012. DOI: 10.18172/cig.2965.
- MARTINEZ–MACCHIAVELLO J. C.; TATUR, A.; SERVANT–VILDARY S.; DEL VALLE, R. Holocene environmental change in a marine–estuarine sediment sequence, King George Island, South Shetland Islands. **Antarctic Science**, n. 8, p. 313–322, 1996. DOI: 10.1017/S095410209600048X.
- MÄUSBACHER, R. Die Jungkvartäre Relief – und Klimageschichte im Bereich der Fildeshalbinsel, Süd-Shetland-Inseln, Antarktis: Heidelberger. **Geographische Arbeiten**, 89, 207 p., 1991.
- MÄUSBACHER, R.; MULLER, J.; MUNNICH, M.; SCHMIDT, R. Evolution of postglacial sedimentation in Antarctic lakes (King George Island). **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 33, p. 219–234, 1989.
- MICHEL, R. F. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, J.; SIMAS, F. N. B.; HAUS, N. W.; SERRANO, E.; BOCKHEIM, J. G. Soils and landforms from Fildes Peninsula and Ardley Island, Maritime Antarctica, **Geomorphology**, v. 225, p. 76–86, 2014. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.03.041.
- MILIAREISIS, G. C. Geomorphometric mapping of Zagros Ranges at regional scale. **Computers and Geosciences**, New York, v. 27, p. 775–786, 2001.
- ØVSTEDAL, D. O.; SMITH, L. **Lichens of Antarctica and South Georgia: A guide to their identification and ecology**. Cambridge: Cambridge University Press, 424 p., 2001.
- PARK, B. K.; CHANG, S. K.; YOON, H. I.; CHUNG, H. Recent retreat of ice cliffs, King George Island, South Shetland Islands, Antarctic Peninsula. **Annals of Glaciology**, v. 27, p. 633–635, 1998. DOI: 10.3189/1998AoS27-1-633-635.
- PETSCH, C. **Evolução hidro geomorfológica da zona proglacial da geleira Collins, Ilha Rei George, Antártica**. Tese (Doutorado em Geografia). Curso de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2018. 121 p.
- PETSCH, C.; SIMÕES, C. L.; COSTA, R. M.; ROSA, K. K. DA; SIMÕES, J. C. **Cambios climáticos y aumento de la vegetación en la Península Fildes, Antártica**. Visiones sobre Ciencia Antártica - IX Congreso Latino Americano de Ciencia Antártica, p. 684–687, 2017.
- RAKUSA-SUSZCZEWSKI S.; MIETUS M.; PIASECKI J. Weather and climate. In: Rakusa-Suszczewski S. **The maritime Antarctic coastal ecosystem of Admiralty Bay**. Varsóvia: Polish Academy of Sciences, p. 19–25, 1993.
- ROSA, K. K.; VIEIRA, R., FERRANDO, F.; SIMÕES, J. Erosional landforms and deposition processes product of the deglaciation evolution at Wanda Glacier, King George Island. **Pesquisas em Geociências**, v. 36, n. 3, p. 315–326, 2009.
- ROSA, K. K.; MENDES JR, C. W.; VIEIRA, R.; DANI, N.; SIMOES, J. C. Análise Morfométrica do Setor Norte da Baía do Almirantado, Ilha Rei George, Shetlands do Sul, Antártica. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 32, n. 1, p. 52–61, 2014. DOI: 10.4025/bolgeogr.v32i1.18710
- ROSS, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, nº 8. São Paulo: FFLCH-USP, 1994. DOI: 10.7154/RDG.1994.0008.0006.
- RÜCKAMP, M.; BRAUN, M.; SUCKRO, S.; BLINDOW, N. Observed glacial changes on the King George ice cap, Antarctica, in the last decade. **Global and Planetary Change**, v.79, p. 99–109, 2011. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2011.06.009.