



## GEOMORFOLOGIA GLACIAL DOS MONTES PATRIOT E MONTES INDEPENDENCE, MONTANHAS ELLSWORTH, MANTO DE GELO DA ANTÁRTICA OCIDENTAL

**Rosemary Vieira**

*Departamento de Geografia - Universidade Federal Fluminense – Polo Universitário de Campos dos Goytacazes, Rua José do Patrocínio, 71, Centro, Campos dos Goytacazes - CEP 28.010-385, RJ - e-mail: rosenupac@yahoo.com.br*

**Jefferson Cardia Simões**

*Centro Polar e Climático, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre - CEP. 91501-970, RS - e-mail: jefferson.simoies@ufrgs.br*

---

### Resumo

Neste trabalho são descritas e analisadas as geoformas glacialmente modificadas dos montes Patriot e Independence, as quais se erguem sobre a superfície do manto de gelo da Antártica Ocidental, e os processos nelas atuantes associados à dinâmica do manto de gelo. Investigações de campo foram realizadas durante a Expedição Deserto de Cristal, no verão de 2008/2009. Dois conjuntos de geoformas foram identificadas e são associados às variações do manto de gelo da Antártica Ocidental: (a) geleiras de rochas e feições periglaciais associadas de gelo-rocha (*RIFs – Rock-Ice Features*); (b) morainas supraglaciais (*supraglacial moraines*) e morainas de gelo azul (*blue-ice moraines*). As feições deposicionais dominantes nos montes Patriot e Independence envolvem dois processos: (1) atividades de vertentes que proporcionam abundante material supraglacial; (2) detrito basal e englacial que alcançam a superfície do gelo, quando esta é rebaixada pela ablação, tais detritos ficam expostos. Proeminentes morainas de núcleo de gelo formam cordões de quilômetros de extensão e dezenas de metros de largura. Os cordões morânicos mais próximos às paredes rochosas, em especial, nos montes Independence, sofrem também a influência do material das vertentes, remobilizando assim os depósitos originais. Nos cordões morânicos mais externos os detritos alcançam a superfície por ablação ou por movimentos ascendentes do gelo, com pouco movimento pós-deposicional. Os processos de sublimação do gelo são frequentes na superfície das geleiras e das morainas, produzindo uma superfície irregular. A radiação solar e a ação do vento também podem contribuir para a ablação em alguns pontos das morainas.

**Palavras-chave:** Antártica, manto de gelo, geomorfologia glacial.

### Abstract

This paper describes and analyzes the glacially modified landforms in Patriot and Independence Hills, which rise on the surface of the West Antarctica ice sheet, and the processes acting on them associated to the dynamics of the ice sheet. Field investigations were conducted during Expedition Crystal Desert in the summer of 2008/2009. Two sets of landform were identified and are associated with changes in West Antarctica ice sheet: (a) rock glaciers and periglacial rock-ice features; (b) supraglacial moraines and blue-ice moraines. The dominant depositional features in Patriot and Independence Hills involve two processes: (1) activities of slopes that provide abundant supraglacial material, (2) basal and englacial debris that reach the surface of the ice when it is lowered by ablation processes. Prominent ice core morainic ridges, with kilometers long and tens of meters wide. Morainic ridges closest to the rock walls, especially in the Independence Hills, also suffer the influence of the slope activity, so remobilizing the

original deposits. Morainic ridges are generated as sediment reaches the surface by ablation or by upward movements of the ice, with little post-depositional movement. The processes of sublimation of ice are common on the surface of the glaciers and moraines, producing an uneven surface. Solar radiation and wind action can also contribute to the ablation in some points of the moraine.

**Keywords:** Antarctica, West Antarctic Ice Sheet, glacial geomorphology.

## Introdução

Estudar o manto de gelo da Antártica Ocidental é importante. Ele possui sua base no fundo do mar e o seu centro está sobre o basamento rochoso abaixo do nível do mar. O volume do manto de gelo da Antártica Ocidental passa por flutuações desde o Quaternário, variando de eventos de expansão, com a cobertura de montanhas e vales locais pelo gelo a eventos de retração com a exposição da topografia subglacial. Como resultado dessa variação as áreas livres de gelo constituem uma área de concentração de uma variedade de feições erosivas e depósitos superficiais, cuja interpretação ainda constitui um quebra-cabeça para a geomorfologia e, conseqüentemente, para a história glacial.

Reconstruções geológicas e geomorfológicas da história dos mantos de gelo da Antártica são importantes para a elaboração de modelos glaciológicos e para compreender os mecanismos potenciais que envolvem os processos de deglaciação acelerada (Chen *et al.*, 2006), pois podem prover evidências do comportamento pretérito associado com ciclos glaciais. Como exemplo, uma questão-chave sobre os processos de deglaciação no embaimento do mar de Weddell requer conhecimentos acerca do tempo e das taxas de diminuição do manto de gelo nas montanhas Ellsworth (Sugden *et al.*, 2006).

Marcas erosivas proeminentes (*trimline*) foram mapeadas por Denton *et al.* (1992) nas montanhas Ellsworth, a 800m acima da superfície atual do manto de gelo, na vertente oeste (continental) e acima de 1000m na vertente leste. A *trimline* é interpretada como antigo limite de espessura do manto de gelo, no entanto, a data deste evento ainda é desconhecida. Assim, é assumido o Último Máximo Glacial (20.000 – 18.000 antes do presente) como base para os modelos desenvolvidos do manto de gelo da Antártica Ocidental (Bentley *et al.*, 2010).

Modelos baseados nas feições erosivas identificadas nas montanhas Ellsworth sugerem que o manto de gelo da Antártica Ocidental esteve de 450 a 600 metros mais espesso durante o Último Máximo Glacial (Denton *et al.*, 1991).

Mapeamentos geomorfológicos mais recentes (Bentley *et al.*, 2010) revelam outra *trimline* nas montanhas Ellsworth (montes Marble), expondo um limite para o manto de gelo entre 440-480 metros acima da superfície atual, nos últimos 15 mil anos.

Apesar da grande relevância dos estudos geológicos/geomorfológicos para a compreensão da dinâmica do manto de gelo da Antártica Ocidental, as montanhas Ellsworth ainda carecem de estudos mais detalhados das formas e dos processos geomorfológicos.

Neste trabalho introdutório são descritas e analisadas algumas das geoformas glacialmente modificadas dos Montes Patriot e Independence, a partir dos trabalhos de campo realizados durante a Primeira Expedição Brasileira ao manto de gelo da Antártica Ocidental, no verão 2008/2009. A descrição e o mapeamento das formas glaciais são usados neste trabalho como meio para o entendimento dos eventos glaciais.

## Área de estudo

Os montes Patriot e Independence formam um grupo montanhoso localizado na parte mais meridional da cadeia Heritage, montanhas Ellsworth, no manto de gelo da Antártica Ocidental (Figura 1a). Entre os dois conjuntos montanhosos está o vale Universidad (Figura 1b). As montanhas Ellsworth localizam-se próximas a atual zona de *grounding line*, entre o manto de gelo da Antártica Ocidental e a plataforma de gelo Ronne-Filchner, tendo, portanto, o registro de antigos níveis da expansão e do fluxo do manto de gelo em direção ao mar de Weddell (Denton *et al.*, 1992). Entende-se por zona de *grounding line* a zona sobre a qual o gelo da plataforma continental começa a flutuar, desprendendo-se do embasamento rochoso. A região é marcada por fortes ventos catabáticos ( $> 30\text{m s}^{-1}$ ; Carrasco *et al.*, 2000) e por baixas taxas de acumulação ( $\sim 50\text{ kg m}^{-2\text{a}^{-1}}$ , Casassa *et al.*, 1998).

Os Montes Patriot (Figura 1c) possuem aproximadamente 8.500 metros de extensão, dentro dos quais sete vales deglaciados e de orientação nor-nordeste, estão subdivididos ao longo de 6.100 metros de extensão. Os montes Independence (Figura 1c), de maior extensão – 14 quilômetros – e com maiores altitudes, também expõem suas principais feições com orientação nor-nordeste. No entanto, estes não apresentam vales longitudinais, tais como os montes Patriot, e sim, paredes rochosas de pendentes elevadas.

## Geologia e história glacial

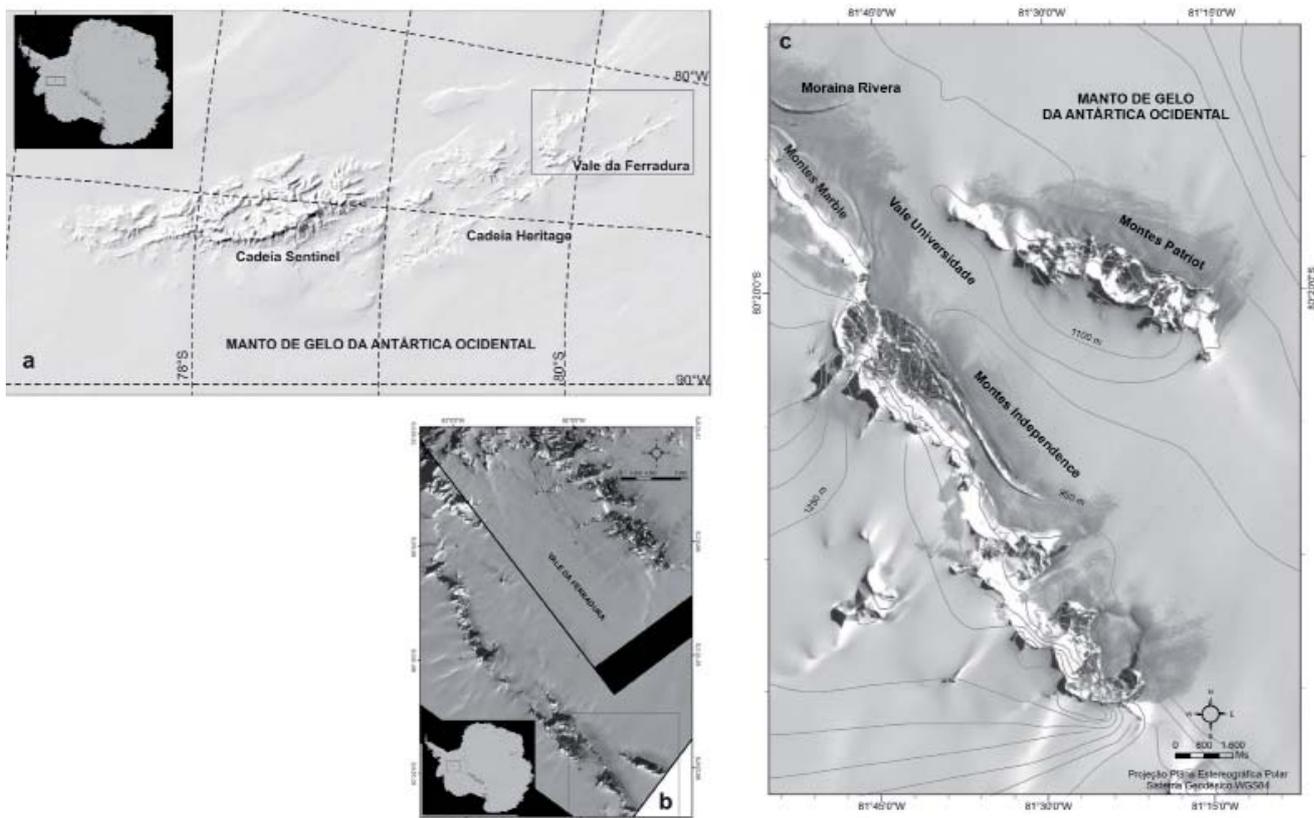


Figura 1 - Área de estudo: (a) Montanhas Ellsworth (modificado do Antarctica Digital Database); (b) Vale da Ferradura e (c) Montes Patriot e Independence (Imagens ASTER).

A história tectônica das montanhas Ellsworth exerce importante papel no desenvolvimento do manto de gelo da Antártica Ocidental. As montanhas resultam do soerguimento que se seguiu a fragmentação do continente do Gondwana no Cretáceo e coincide com a abertura do mar de Weddell (Dalziel, 2007). Elas fazem parte de um braço da deriva de soerguimento associado com as montanhas Transantárticas e com o sistema de deriva da Antártica Ocidental formados no Cenozóico tardio (Behrendt e Cooper, 1991), Constituem, portanto, uma barreira entre o mar de Weddell e o mar de Ross, sem as quais, como alguns autores argumentam, o manto de gelo não poderia existir (Dalziel e Lawer, 2001). As montanhas Ellsworth atuam assim como balizas que registram as variações da espessura do manto de gelo (Dalziel, 2007).

As fases da história glacial pelas quais a região passou produziram um conjunto de formas e depósitos, muitos dos quais ainda não estão completamente compreendidos. Alguns trabalhos dividem em duas importantes fases: a primeira, que corresponde a glaciações de vale, possivelmente iniciada no Mesozóico Superior e Cenozóico Inferior, quando as Montanhas Ellsworth formavam um arquipélago ou uma ilha. A

segunda fase envolveu a glaciação continental que cobriu a área, deixando apenas os picos mais elevados expostos como *nunataks* (Rutford, 1972; 1980) (Figura 3). Posteriormente, a região sofreu deglaciação com oscilação do nível do manto de gelo.

Rutford (1972) e Rutford *et al.* (1980) traçaram a história geomorfológica pós-tectonismo das montanhas Ellsworth por meio da sequência a seguir: (1) erosão fluvial e o desenvolvimento dos principais sistemas de vales atuais; (2) início da glaciação de vale que segue até o presente e de processos dominantes no desenvolvimento das formas nas partes mais elevadas da cadeia; (3) glaciação continental com o preenchimento das partes mais baixas e médias das montanhas pelo gelo continental e (4) deglaciação parcial com a redução do nível do gelo continental.

Craddock *et al.* (1964) estimaram uma antiga superfície do manto de gelo entre 300 e 500 metros sobre a superfície atual. Craddock *et al.* (1964) e Rutford (1972) sugeriram que a diminuição da superfície do manto de gelo ocorreu recentemente e de forma rápida, devido a presença de blocos

erráticos e de rochas estriadas bem preservadas, o que sugere que as rochas não estiveram expostas ao intemperismo por longo tempo.

Bentley *et al.* (2010) mostraram por meio de datação por  $^{10}\text{Be}$  que o manto de gelo na região das montanhas Ellsworth diminuiu cerca de 480 metros nos últimos 15 mil anos.

A presença de blocos erráticos originários dos picos Soholt, nos montes Marble, mostra que mesmo com um manto de gelo mais espesso, o fluxo seguia para leste ao redor e através das montanhas e um importante componente do fluxo seguia para o sudeste ao redor da cadeia, tal como é hoje (Denton *et al.*, 1992).

## Métodos

Para a identificação e mapeamento das feições morfológicas mais marcantes foram usadas imagens do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* – anos 2004 e 2005), com resolução espacial de 15m, nas três bandas VNIR (visível e infravermelho-próximo). Foram introduzidos parâmetros de correção de projeção, sistema de coordenadas Polar Estereográfica e sistema geodésico de referência WGS84. Modelo Digital de Elevação foi elaborado a partir de dados altimétricos, obtidos do *Antarctic Digital Database* (ADD), do *Scientific Committee on Antarctic Research* (SCAR), em formato ESRI Arc/Info Export e convertidos para formato *shapefile*, utilizando o software comercial ARCGIS 9.2. Dados morfométricos foram obtidos das imagens com o uso dos *softwares* ARCGIS e ERDAS 9.2. Um mapa geomorfológico foi confeccionado usando legendas que carregam informações de morfologia e morfometria. Legendas para a diferenciação das feições morfológicas são baseadas em Baroni *et al.* (2004), Rau *et al.* (2005), Gustavsson *et al.* (2006) e em Millar e Westfall (2008).

Atividades de campo foram realizadas durante a Expedição Deserto de Cristal, no verão de 2008/2009, e concentradas nos montes Patriot e Independence, incluindo a moraina Rivera, localizada no vale Universidad. Uma breve visita foi realizada aos montes Marble, localizado a nor-noroeste dos montes Independence. As feições morfológicas observadas nas imagens de satélite foram identificadas e georreferenciadas, usando um GPS portátil com margem de erro de aproximadamente 3 metros.

Amostras de sedimentos foram coletadas na geleira de rocha em transecto longitudinal. As amostras foram coletadas com uma pá, em pequenas cavidades rasas até atingir a superfície do gelo, na quantidade superior a 100 gramas e postas em sacos plásticos, contendo o código de cada amostra. Em cada local de coleta foram tomados

pontos de controle de GPS (altitude e coordenadas), fotografias com escala e descrição do ambiente de entorno. Análises morfométricas dos sedimentos foram realizadas no laboratório de sedimentologia do CECO (Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica – UFRGS), para determinar a distribuição granulométrica e características morfoscópicas.

Dados meteorológicos locais de dezembro de 2008, como direção e intensidade do vento, foram obtidos com a estação automática WX7, e disponibilizados pela *Antarctic Logistic Expeditions* (ALE).

## Resultados

A diferença morfológica mais marcante entre os montes Independence e os montes Patriot é a sequência de sete cordões elevados de morainas supraglaciais, distribuídos paralelamente às paredes rochosas dos montes Independence e ao vale Universidad. Esses cordões separam duas grandes áreas de gelo azul (*Blue-ice areas – BIAs*): a primeira junto às paredes rochosas e a segunda, já no vale Universidad, junto ao cordão morainico mais externo. Nos montes Patriot a zona de gelo azul também acompanha paralelamente o cinturão morainico (Figura 1c, Figura 2 e Figura 3).

A geomorfologia glacial analisada reflete dois conjuntos de formas relacionadas às variações do manto de gelo da Antártica Ocidental: (a) *geleiras de rochas e feições periglaciais de gelo-rocha* (*RIFs – Rock-Ice Features*) e (b) morainas supraglaciais (*supraglacial moraines*) e morainas de gelo azul (*blue-ice moraines*).

### Geleiras de rochas e feições associadas de gelo-rocha (*RIFs – Rock-Ice Features*)

Geleiras de rocha e feições de gelo-rocha ocorrem sob amplo espectro de formas e localizações topográficas, em ambientes montanhosos com baixas temperaturas, baixa umidade e fornecimento abundante de detritos rochosos (Giardino e Vitek, 1988).

Foram identificadas geleiras de rocha e feições de gelo-rocha nos montes Patriot e Marble, porém nenhuma geleira de rocha típica foi identificada nos montes Independence, devido à sua configuração; não existem vales abrigados como nos montes Patriot e Marble, as quais constituem um ambiente gerador de detritos e/ou de desenvolvimento de antigas geleiras de vale (Figuras 4a e 4b).

No entanto, feições de gelo-rocha puderam ser amplamente observadas e classificadas em: (i) vertentes de detritos com movimento gradual; (ii) vertentes de detritos abruptas.

## Geleira de rocha

Feições típicas de geleiras de rocha foram identificadas em apenas um dos vales dos montes Patriot e também nos montes Marble: formas lobulares com as partes frontais e laterais abruptas e a parte superior relativamente plana (Figuras 5a e 5b).

Nos montes Patriot, a geleira de rocha desenvolve-se na base da zona de anfiteatro glacial, que é caracterizada por vertentes mais inclinadas nas partes mais elevadas e com diminuição da inclinação à medida que se aproxima da cabeceira da geleira de rocha (Figura 5a). O corpo da geleira de rocha desenvolve-se no setor sul-sudeste do único vale extenso dos montes Patriot e possui, aproximadamente, 450 metros de extensão. Superficialmente, o gelo é raramente visível, excepcionalmente em alguns pontos de fusão expostos das paredes laterais. A cobertura superficial de detritos varia de 6cm na parte mais interna a 30cm de espessura na parte frontal. Análise morfométrica dos sedimentos da superfície da geleira de rocha mostrou clastos não selecionados, predominando os angulosos e muito angulosos, o que aponta para transporte passivo dos sedimentos. Nas camadas inferiores já podem ser observados clastos de granulometria média a fina, devido à percolação e meteorização por eventuais eventos de fusão (Figura 5c). A origem potencial dos detritos seria: (1) glacial – pela acumulação de detritos rochosos sobre a geleira original; (2) periglacial – interação do gelo com o aporte de detritos das paredes rochosas do vale.

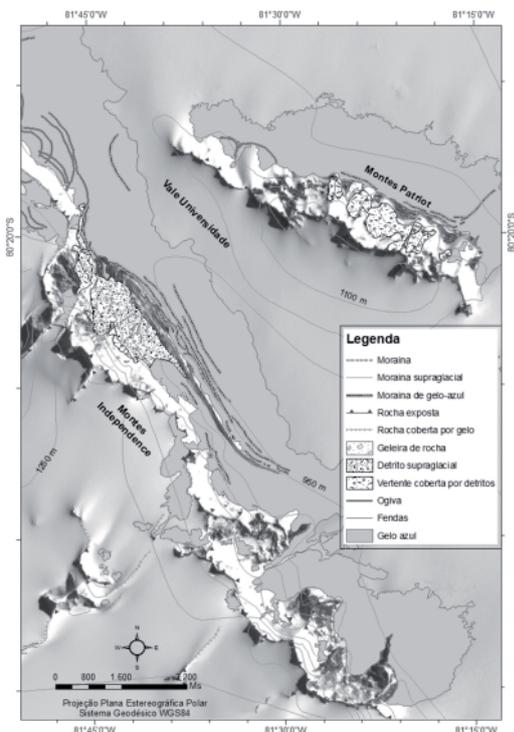


Figura 2 - Mapa geomorfológico.

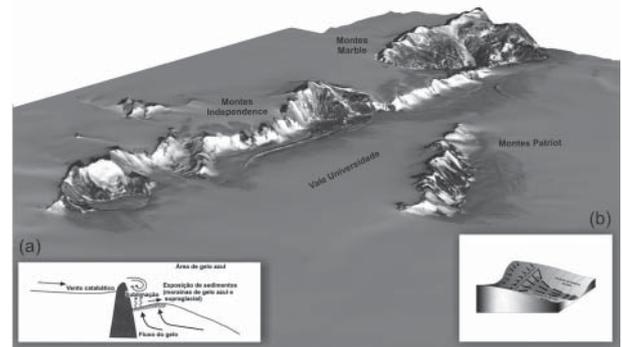


Figura 3 - Modelo Digital de Elevação da área de estudo. (a) esquema de formação das áreas de gelo azul e da exposição de sedimentos à superfície; (b) deslocamento dos ventos predominantes pelos vales.

A parte frontal abrupta da geleira de rocha se comunica com um sistema de morainas com núcleo de gelo (*ice-core moraines*), que corresponde a um processo genético distinto associado possivelmente a ablação diferencial; estas possuem o interior de gelo, pois a cobertura de detritos superficial retarda a fusão do gelo. Tais formas encontram-se junto à zona de gelo azul e são intercaladas com zonas de poças congeladas (*frozen polls*) (Figura 5d).

Nessas áreas, devido à irregularidade das formas, parte do gelo fica exposta principalmente em seus flancos laterais. Foi observada fusão em pontos de contato entre a neve e o gelo com rochas ou fragmentos de rocha devido à maior absorção por parte destes da radiação solar.

## Feições associadas de gelo-rocha

### Vertentes de detritos com movimento gradual

Estas existem na maioria dos vales nos montes Patriot e também nos montes Independence. Ocorrem nas paredes dos vales e em outras vertentes de declividades variadas (Figura 6), podendo ser vistas tanto na vertente inteira como em pequenas áreas.

Embora não seja observado nenhum tipo de fluxo líquido na vertente, a deformação dessas formas aponta para movimentos graduais do manto de detritos, porém irregulares vertentes abaixo. No entanto, nessa latitude não há umidade nas camadas subsuperficiais que as torne ativas. Portanto, outros agentes podem também ser responsáveis pelo movimento dos detritos nessas vertentes. A área possui uma temperatura média anual de  $-30^{\circ}\text{C}$  (Casassa *et al.*, 2004), mas o terreno pode sofrer alterações de temperatura como resultado da variação na radiação ou ventos. Nas montanhas Thiel, também localizada no interior da Antártica ( $85^{\circ}15'S/91^{\circ}00'W$ ), estudos sugeriram que movimentos de detritos são o resultado de contrações do gelo subsuperficial, propiciando assim a formação de feições similares a rampas de talude (Ford e Andersen, 1967). O mesmo processo foi identificado por French e Guglielmin (1999) na baía da Terra Nova.

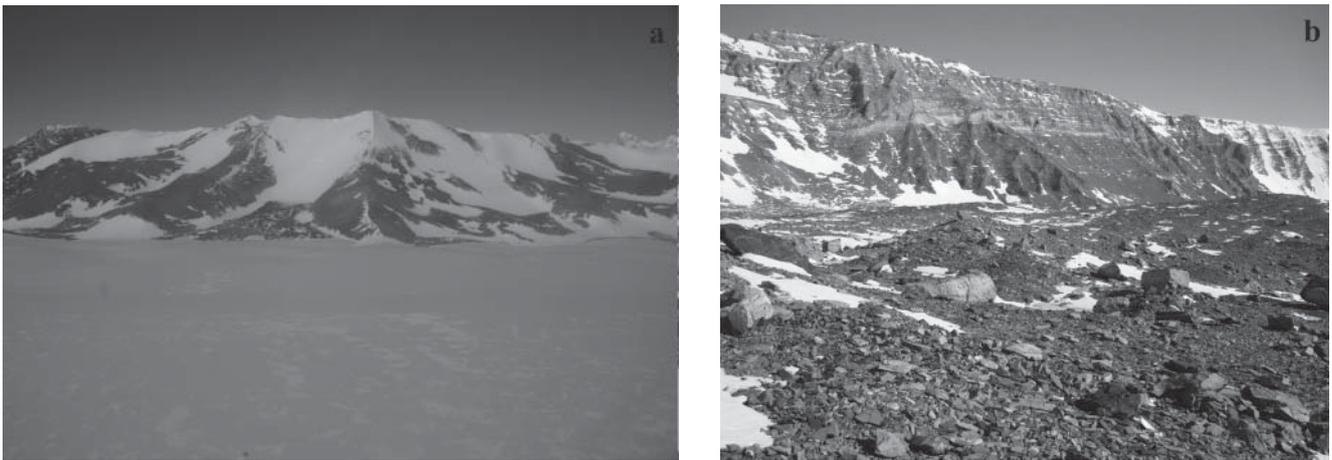


Figura 4 - Montes Patriot (a) e montes Independence (b) (Fotos: Rosemary Vieira/CPC, 2008-2009).

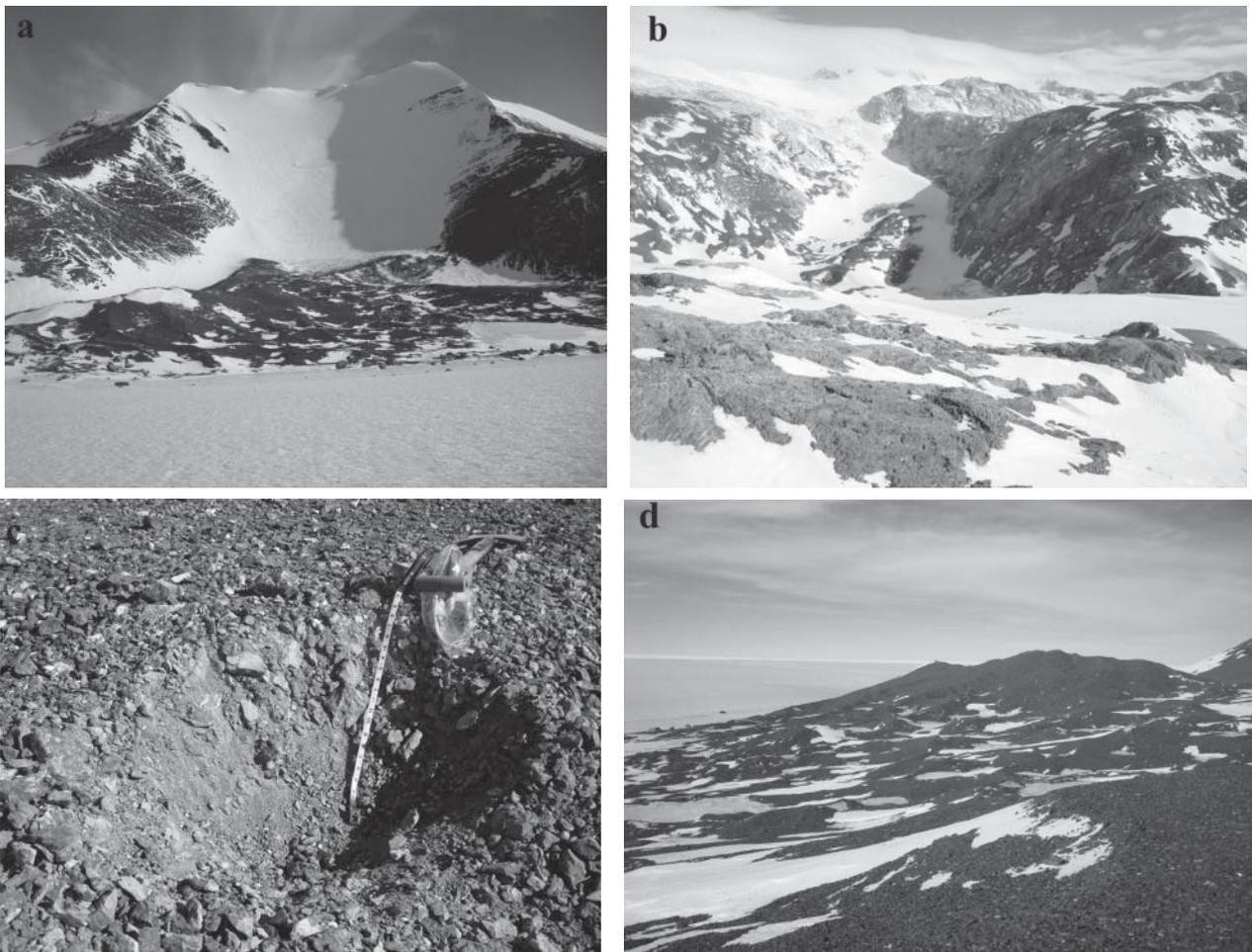


Figura 5 - Geleira de rocha nos montes Patriot (a) e nos montes Marble (b); ponto de coleta de sedimentos na superfície da geleira de rocha (c); poças congeladas que se desenvolvem entre morainas hummocky em um dos vales nos montes Patriot (d) (Fotos: Rosemary Vieira/CPC, 2008-2009).



Figura 6 - Vertente de detritos com movimento gradual em um dos vales dos montes Patriot (Foto: Rosemary Vieira/CPC, 2008-2009).

### Vertentes de detritos abrupta

Essas formas ocorrem preferencialmente nas vertentes que separam os vales transversais dos montes Patriot. Apesar de ocuparem vertentes com elevado gradiente, não foram observadas deformações, indicativo de movimentos vertente abaixo (Figura 7).

No setor noroeste do montes Independence, os detritos das vertentes intersectam detritos supraglaciais, resultado da nítida acumulação na base das vertentes, e que revelam intensa atividade nesse setor (Figura 8).



Figura 7 - Vertente de detritos abrupta em um dos vales de Patriot Hills (Foto: Rosemary Vieira/CPC, 2008-2009).

### Áreas de gelo azul e formações morânicas

Os montes Patriot e Independence apresentam em sua margem nordeste uma ampla faixa de gelo exposto, onde a

cobertura de neve foi removida e o gelo mais antigo surge à superfície. Estas zonas de ablação, também conhecidas como áreas de gelo azul, são caracterizadas pelo balanço de massa negativo, não pela fusão, e sim pelo aumento da sublimação sobre o gelo exposto e pela erosão da neve transportada pelo vento. Regiões antárticas de topografia superficial irregular (áreas montanhosas, *nunatacks*) criam condições favoráveis para a formação de áreas de gelo azul (Figura 3a). Além disso, na área de estudo a precipitação é baixa e as médias anuais da velocidade do vento são elevadas (Birtanjan, 1999; Carrasco *et al.*, 2000).

Nos montes Patriot e Independence as áreas de gelo azul ocorrem nos setores a sotavento. Também ocorrem sobre superfícies glaciaizadas localizadas nas vertentes dos vales atingidas pelos ventos que descem dos obstáculos topográficos (Figuras 1-3).

A zona de gelo azul, localizada na margem nordeste dos montes Patriot, possui 8,5 km de extensão e 1,7 km de largura, com área aproximada de 13 mil metros quadrados; nos montes Independence 9,5 km de extensão e 1,2 km de largura, em média, podendo alcançar 1,7 km no extremo sul-sudeste. A área aproximada é de 25 mil metros quadrados (Figura 2).

Os complexos morânicos de deriva supraglacial geralmente apresentam uma morfologia em cordões. Somado aos processos de sublimação, o fluxo de gelo em direção às montanhas trouxe à superfície extensos e complexos cinturões de detritos, tanto como em faixas de *till* superficiais e subsuperficiais, como em cordões elevados.

Blocos erráticos ocorrem sobre superfícies rochosas e em algumas áreas de gelo azul, na maioria das vezes, isolados (Figura 9).



Figura 8 - Montes Independence, zona de encontro entre depósitos de vertentes e depósitos morânicos (Foto: Rosemary Vieira/CPC, 2008-2009).

## Morainas supraglaciais

Extensas áreas de gelo azul dos montes Patriot e, principalmente, dos montes Independence são cobertas por morainas supraglaciais. Elas possuem o interior de gelo, uma vez que a cobertura de detritos superficial retarda a fusão do gelo, por isso, poderiam ser também denominadas morainas de núcleo de gelo (*ice-cored moraines*).

Nos montes Independence foram identificados setes cordões morânicos com elevações superiores a 10 metros, localizados paralelamente aos paredões rochosos. Tal conjunto de depósitos é conhecido como moraina Casassa e ocupa uma área de 1,97 km<sup>2</sup>, com uma largura média de 450 metros. Cada cordão tem em média 35 metros de largura, mas as extensões são variadas. O cordão mais externo, junto à área de gelo azul, é também o mais extenso com cerca de 4600 metros. No setor extremo sudeste dos montes eles são separados das vertentes rochosas por outras áreas de gelo-azul interna (Figura 10).

Nessa parte, alguns cordões morânicos desenvolvem-se paralelamente às paredes rochosas, porém não há contato com os cinturões mais externos (Figura 10). Seguindo a noroeste os cordões morânicos se conectam às paredes rochosas por uma sequência de depósitos que representam origens e processos distintos, tais como atividades de vertentes, atividades periglaciais e glaciais, essas últimas representadas por uma moraina latero-frontal (Figura 2).

Os cordões têm amplitude de 1-5 metros, embora essas morainas possam alcançar ~10 metros acima da superfície de gelo (Figura 11). A morfologia das morainas é o resultado das irregularidades do gelo subjacente.

A cobertura de detritos normalmente varia de 5 a 30cm. Partes naturalmente expostas ao longo das morainas estão presentes nos flancos laterais, nos quais a espessura da cobertura de detritos pode ser confirmada.

As morainas produzem uma topografia caracterizada pela “inversão” e pela ablação diferencial, onde a cobertura de sedimentos ocorre no topo dos cordões, em função da proteção do gelo interno e a ablação nesses pontos é mais lenta do que nas áreas expostas. Isso pode resultar no isolamento e maior desenvolvimento das partes de gelo protegidas pelos detritos, formando cordões alongados e refletindo assim a distribuição de detritos sobre a superfície.

Entre os cordões morânicos é comum a presença de zonas de gelo exposto, mas não de gelo maciço, e sim de aparente formação recente, em função da presença de bolhas de ar internas (Figura 12). Essas poças congeladas (*frozen pools*), também identificada por Cassasa *et al.* (1998), podem ser o resultado de pulsos de fusão do gelo, provavelmente em, períodos de temperaturas mais elevadas, como os verificados em 1997 por Carrasco *et al.* (2000), quando a temperatura esteve acima de zero grau durante três dias seguidos. Exemplos desses processos são encontrados no cordão morânico mais externo, onde poças congeladas localizadas no interior se comunicam com a área de gelo azul por meio de um possível canal de escoamento até a zona de gelo azul, o que segmentou a moraina (Figura 13).



Figura 9 - Bloco errático no Vale Universidad (Foto: Vieira/CPC, 2008-2009).



Figura 10 - Montes Independence, zona de gelo azul interna (Foto: Rosemary Vieira/CPC, 2008-2009).



Figura 11 - Montes Independence, cordões de morainas supraglaciais (Foto: Rosemary Vieira/CPC, 2008-2009).

A composição da cobertura de detritos dessas morainas varia de areia grossa e seixos a matacões. O grau de arredondamento das partículas observadas em campo é, em sua maioria, anguloso a muito anguloso. Grandes matacões ocupam tanto a crista das morainas como nas partes côncavas entre elas. A litologia dos materiais se diferencia de um cordão para o outro, não refletindo em alguns setores as características litológicas locais.

Foram encontrados seixos e blocos estriados em alguns dos pontos de coletas dos cordões morânicos, porém a sua posição sobre os detritos não indica uma direção confiável dos fluxos de gelo passados.

Nos montes Patriot os cordões morânicos são diferenciados quanto ao desenvolvimento de suas formas e em quantidade. A configuração dos vales transversais que alcançam a área de gelo azul favorece a formação de morainas de núcleo de gelo próximas às suas saídas. Contudo, no setor extremo sudeste dos montes um cordão de altura superior a 10 metros se ergue junto a área de gelo azul e da saída dos vales (Figura 14). É também nessa zona a maior concentração de blocos erráticos e de detritos expostos sobre o gelo azul, o que pode apontar uma concentração da atividade dos ventos predominantes, favorecendo a ablação e, conseqüentemente, a exposição dos materiais.

A concentração de blocos rochosos expostos e de seixos estriados é também notável nos montes Patriot e a litologia de parte das formações morânicas corresponde à litologia dos vales locais. A direção das estrias observadas nas rochas expostas é, predominantemente, de N30°NE (Figura 15).

#### **Morainas de gelo azul (*Blue-ice moraines*)**

São mais notáveis junto aos montes Independence, mas ocorrem também em cinturões perpendiculares a alguns dos vales transversais dos montes Patriot (Figura 16). Apesar de ter a princípio a mesma origem das morainas supraglaciais, essa formação se distingue por sua configuração. Elas afloram em muitos trechos na superfície, como bandas de sedimentos e sequência de criaconitas (Figuras 17a-b).

A granulometria dos sedimentos superficiais varia de clastos médios – alguns estriados e subarredondados - a areia média e fina.



Figura 12 - Montes Independence, poças congeladas (Foto: Rosemary Vieira/CPC, 2008-2009).



Figura 13 - Montes Independence. Sessão interrompida do cordão morânico. No interior, uma poça congelada – frozen pool (Foto: Rosemary Vieira/CPC, 2008-2009).



Figura 14 - Montes Patriot, setor sudeste, com concentração de material sobre o gelo azul e maior elevação das morainas (Foto: Rosemary Vieira/CPC, 2008-2009).



Figura 15 - Montes Patriot, bloco rochoso estriado (Foto: Rosemary Vieira/CPC, 2008-2009).



Figura 18 - Moraina Rivera. (Foto: Fernando Reis/CPC, 2008-2009).



Figura 16 - Morainas de gelo azul, montes Independence. (Foto: Rosemary Vieira/CPC, 2008-2009).



Figura 19 - Montes Patriot, zonas de gelo azul cobrindo alguns dos vales transversais. (Foto: Rosemary Vieira/CPC, 2008-2009).



Figura 17 - Crioconitas no vale Universidad (Foto: Rosemary Vieira/CPC, 2008-2009).

## Discussão

Geleiras cobertas por detritos são comuns na Antártica, especialmente na forma de geleiras de rochas, e morainas de núcleo de gelo, cujo gelo glacial está coberto por camadas de detritos (Bockheim e Hall, 2002). No entanto, não existem estudos sobre geleiras de rocha nas montanhas Ellsworth, tampouco na área dos montes Patriot e Independence.

A formação de morainas por geleiras polares, as quais estão congeladas em sua base, está relacionada a vários mecanismos de mobilização de grande parte de detritos, seu transporte e deposição. A região dos montes Patriot, apresenta um grande potencial para a reconstrução de antigas elevações da superfície do gelo e da extensão e idade das áreas de gelo azul.

### Geleiras de rocha e feições de gelo-rocha

A tradicional classificação para os diferentes tipos genéticos de geleira de rocha, utilizada em outras áreas montanhosas do planeta, (p.e. Ferrando *et al.*, 2002 e Soto *et al.*, 2004), não pode ser aplicada para os montes Patriot, devido a complexidade das formas e, em especial, pela ausência de fluxo de água nas camadas subsuperficiais, ao contrário do que ocorre em outras zonas de geleira de rocha do mundo. No entanto, o aumento da espessura da cobertura de detritos observado ao longo da geleira de rocha, revela uma dinâmica ativa, ainda que o movimento possa ser de escala de mm/ano. Por ser uma área sob influência de ventos constantes, predominantes dos quadrantes sul e sudoeste, deve ser considerada a contribuição dos ventos oriundos do platô polar, junto com outros fatores, na formação e dinâmica de parte das feições de gelo e rocha. As vertentes de detritos com movimento gradual identificadas nos montes Patriot e montes Independence (Figura 6 e Figura 10) estão a sotavento das montanhas, em setores que acompanham a direção dos ventos predominantes. Por outro lado, as vertentes de detritos abruptas, que ocupam as paredes inter-vaies em posição paralela aos ventos, apesar de sua localização em encostas mais inclinadas, não apresentam sinais de movimento (Figura 3b). French e Guglielmin (1999) localizaram formas semelhantes no continente antártico, na baía Terra Nova, e as associaram à ação predominante dos ventos catabáticos.

### Origem das morainas supraglaciais e de gelo azul

Estudos sobre as morainas supraglaciais na Antártica tiveram início a partir de sua relação com as áreas de gelo azul e, em especial, por estas áreas serem os pontos de acumulação de grande parte dos meteoritos que são coletados e estudados no continente: os meteoritos que caem na superfície das zonas de acumulação são transportados para as áreas de gelo azul pelo fluxo de gelo e aí se acumulam na superfície (Birtanjanja, 1999). A presença das morainas supraglaciais com registros de sedimentos finos e clastos estriados produziu o interesse sobre a ligação dessas feições com condições ambientais pretéritas no interior do continente antártico, com estudos desenvolvidos principalmente na Terra Vitória e na Antártica Oriental (Rains e Shaw, 1981; Hasegawa *et al.*, 1992; Hätterstrand e Jhansen, 2005).

A partir desses trabalhos, foi compreendido que em áreas relativamente pequenas de ablação em geleiras polares e subpolares, os detritos englaciais e subglaciais podem ser trazidos à superfície da geleira por vários meios: por planos de cisalhamento e linhas de fluxo ascendente; pela exposição gradual de concentrações de crioconita (Figura 17); pela interseção de zonas de fendas/zonas terminais contendo algum detrito, e pela redução da superfície de gelo pela ação da ablação. As condições dominantes que afetam o relevo superficial são a espessura dos detritos na base das vertentes e a espessura diferencial dos detritos sobre as morainas supraglaciais, que levam à formação de cordões paralelos as paredes rochosas.

Os detritos supraglaciais, espessos o suficiente para insular e com isso inibir a fusão por crioconita, podem ser trans-

portados sem significativa dispersão. Com isso, a espessura diferencial de detritos de ablação pode resultar de combinações de fontes de detritos supra e subglaciais (Rains e Shaw, 1981). Por outro lado, estudos recentes sugerem que tais conjuntos morânicos resultam do controle dos sedimentos supraglaciais sobre as taxas de ablação, e conseqüentemente, sobre a topografia da superfície do gelo (Evans, 2009). Portanto, as morainas supraglaciais poderiam também ser denominadas de morainas controladas (*controlled moraines* – Evans, 2009).

Alguns autores atribuem o depósito de materiais na superfície às bandas de cisalhamento dentro da geleira formadas em áreas de fluxo compressivo (Hambrey e Glasser, 2003). Na área de estudo, os detritos trazidos à superfície são acumulados como *till* de sublimação, quando o gelo adjacente sublima em grande parte pela ação dos fortes e constantes ventos do platô polar.

Existem algumas evidências locais dessas bandas de cisalhamento, as quais incluem a presença de bandas de detritos sub-verticais em seções do gelo, e sinais de transporte subglacial, como sedimentos finos, clastos sub-arredondados e estriados encontrados na superfície e subsuperfície das faixas de morainas de gelo azul.

Os detritos supraglaciais na área que conecta as paredes rochosas aos cordões morânicos, no setor noroeste dos montes Independence (Figura 12), podem ser interpretados como material coluvial, originados nas vertentes próximas, os quais penetrando supraglacialmente foram transportados e acumulados nas partes inferiores. Portanto, a origem poderia ser local, contrastando com a origem subglacial dos cordões morânicos supraglaciais e das morainas de gelo azul, localizadas nos setores mais afastados das paredes rochosas. Com as atividades de vertentes, os detritos destas paredes intersectam os detritos supraglaciais e alteram a posição original dos blocos, descartando assim essa zona para a coleta de amostras para estudos de datação.

Sendo assim, os dois conjuntos morânicos, ou seja, as morainas supraglaciais e as de gelo azul seriam diferenciados entre si pelo estágio de evolução. Os cordões elevados emergiram na superfície anteriormente às faixas de detritos, hoje expostas na superfície e subsuperfície. A ação dos ventos facilitou os processos de sublimação, produzindo ablação diferencial e o desenvolvimento das morainas a partir de sua ascensão à superfície. As paredes rochosas fornecem, por sua vez, os detritos supraglaciais. A cobertura supraglacial mais espessa com o tempo passou a exercer assim um controle sobre as taxas de ablação nessas áreas; tal controle topográfico pode ser considerado como indicativo de condições estáveis, como já preconizava Hooke (1970).

Exemplo atual da ação do vento no processo de ablação diferencial é observado na moraina Rivera, situada a noroeste do vale Universidad e configurada em forma de arco. Sua parte direcionada a nor-noroeste, junto aos montes Marble, tem sua superfície mais elevada do que sua parte voltada a sur-sudeste, cuja extremidade está no presente emergindo a superfície, atestando assim a ação mais efetiva do vento nesse setor junto aos montes Marble (Figura 18).

## Interpretação dos eventos glaciais e cronologia

As formações morânicas supraglaciais são feições relictas de um período de maior espessura e elevação da superfície do manto de gelo da Antártica Ocidental, o que também é confirmado pela observação de gelo glacial nas partes mais elevadas de alguns dos vales transversais dos montes Patriot, e por depósitos morânicos acima de 50 metros da superfície do gelo e cobertas por camadas de detritos pouco espessas. Segundo Denton *et al.* (1992), a *trimline* na cadeia Heritage ocorre somente nos picos mais elevados e exibem uma vertente regional consistente com o fluxo continental ao redor da cadeia mais do que o fluxo de saída da cadeia alpina. A distribuição das *trimline* indica que a área foi intensamente coberta pelo manto de gelo, sendo os picos mais elevados provavelmente *nunatacks*. Subsequentes balanços de massa negativos rebaixaram posteriormente a superfície do manto de gelo nessa área, enquanto protegida da sublimação nas áreas cobertas por detritos supraglaciais, embora a configuração irregular das morainas aponte para ablação diferencial, induzida também pelo aquecimento local das rochas.

Ainda, segundo Denton *et al.* (1992), os blocos erráticos que ocorrem sobre superfícies rochosas e de forma isolada em alguns setores da área de gelo azul, tanto no vale Universidad como na margem sudeste dos montes Patriot, foram transportados pelo fluxo de gelo de direção sudeste assim como pelo fluxo para leste através dos montes. Isso poderia explicar o maior desenvolvimento de depósitos morânicos no vale Universidad, junto aos montes Independence do que nos montes Patriot. A disposição paralela dos dois blocos montanhosos resultou no aumento do influxo do gelo pelo vale Universidad, na maior concentração e emersão de detritos subglaciais, representados pelos cordões morânicos supraglaciais e paralelos aos montes Independence. Tais cordões, portanto, indicam antigas estruturas dos fluxos de gelo.

A identificação, pela imagem de satélite (Figuras 1 e 2), de dois arcos morânicos transversais às paredes rochosas dos montes Independence, um interno e bem preservado, de aproximadamente 650 metros de extensão, e outro externo, cujo arco sudeste é a única parte preservada, revela outro período em que geleiras de vale desciam das vertentes. Não se sabe, no entanto, se esses arcos remontam a um período anterior a ocupação do manto de gelo da área, ou se eles se desenvolveram no período de rebaixamento do mesmo e possivelmente, contemporâneo a emersão e desenvolvimento das morainas supraglaciais.

Informações futuras sobre as idades das morainas supraglaciais podem estabelecer um vínculo entre tais depósitos e os que se encontram junto às vertentes e em maiores elevações.

Nos montes Patriot, quando a espessura do gelo era maior, eram favorecidas a entrada e o transporte de material coluvial desde as paredes dos vales transversais, desenvolvendo as morainas de anfiteatro em altitudes mais elevadas, como nos setores mais abaixo, na saída dos vales, agora sob a

configuração já alterada de morainas *hummocky* (Figura 5d). A superfície das vertentes e a estrutura das morainas em alguns vales indicam fluxo de gelo desde as paredes dos anfiteatros e de deformações pós-deposicionais. Isso revela que a superfície do gelo foi maior quando as morainas foram depositadas nesses setores. Portanto, nos montes Patriot as condições glaciológicas no passado podem ter padrões similares aos observados hoje em alguns de seus vales: com cobertura e concentração de gelo azul nas zonas de cabeceira dos vales e fluxo de gelo sobre as vertentes em direção à atual superfície do manto de gelo (Figura 19). Nessas condições o material supraglacial se acumulou nas partes interiores dos anfiteatros dos vales. Seguindo esse raciocínio, algumas das partes internas dos vales dos montes Patriot também foram locais de ablação, como se observa hoje, pois em condições contrárias, o material supraglacial seria transportado para fora do vale.

As rochas estriadas observadas na saída de alguns vales nos montes Patriot (Figura 15) indicam que aí houve uma mudança no regime termal: da acumulação de material nos anfiteatros durante eventos anteriores ao fluxo de material supraglacial em períodos posteriores

A configuração das morainas supraglaciais também pode ser usada para esboçar algumas conclusões sobre a paleoglacilogia local, já que conjunto processo-forma das morainas está adstrito a regimes termo-basais (Evans, 2009).

Embora não exista um controle cronológico sobre a área, alguns trabalhos dão informações sobre a cronologia dos eventos de deglaciação. Denton *et al.*, (1992) dataram morainas e *trimlines* nas montanhas Ellsworth e registraram volumes de gelo acima de 1900 metros sobre o atual nível da superfície do manto. Registros obtidos por Todd *et al.* (2003) nos montes Marble indicam valores da cobertura de gelo de pelo menos 430 metros mais espesso, o qual retrocedeu gradualmente nos últimos 10.600 anos, ao longo do Holoceno. Blocos erráticos a 1390 metros de altitude, e datados entre 571 a 770 mil anos levantam a dúvida se os montes Marble estiveram cobertos pelo manto de gelo durante o Último Máximo Glacial (entre 20-18 mil anos), podendo seus picos estar expostos há pelo menos 500 mil anos.

Estudos recentes de Fogwill *et al.* (2011), aplicando datação por isótopos cosmogênicos ( $^{10}\text{Be}$ ) em sedimentos coletados na zona de gelo azul, nos montes Patriot, mostram que o manto de gelo da Antártica Ocidental, embora tenha passado por flutuações em sua espessura durante os ciclos glaciais, pode ter tido o seu domo central preservado pelos últimos 200 mil anos.

Segundo Birtanja (1999) e Sinisalo e Moore (2010), o próprio gelo azul e os materiais nele contidos podem ser muito antigos. Isso devido ao fluxo de gelo desde as zonas de acumulação em direção às barreiras topográficas que torna o gelo estagnado na zona de ablação na área em que esse ascende. Dessa forma, existe uma estratigrafia horizontal na

zona de ablação, em que o gelo de idade mais antiga está mais próximo das barreiras topográficas. Tais condições fariam das áreas superficiais de gelo azul melhores fontes para a datação do que a estratigrafia vertical.

A determinação da idade das morainas por métodos de datação por isótopos cosmogênicos pode gerar problemas, se os blocos a serem datados forem os blocos erráticos encontrados nas áreas de gelo azul, ou coletados sobre os cordões morânicos, além dos depósitos próximos às vertentes rochosas, devido aos movimentos destes durante o seu transporte ou de alterações pós-deposicionais. Foram identificados, no entanto, alguns sítios de rochas expostas na saída de alguns dos vales dos montes Patriot.

## **Conclusão**

O manto de gelo da Antártica Ocidental tem oscilado quanto ao seu comportamento e quanto ao seu volume, no entanto não há ainda respostas para esse comportamento. Portanto, é importante explorar novas linhas de investigação. A interpretação de ambientes geomorfológicos e sedimentares do manto de gelo da Antártica Ocidental é baseada na observação de complexos deposicionais contemporâneos nos montes Patriot e Independence, nas montanhas Ellsworth. Os elementos presentes nos registros geomorfológicos e sedimentológicos constituem um poderoso instrumento na reconstrução de padrões de fluxos e da distribuição de massas de gelo passadas e possuem evidências-chave na configuração e evolução do manto de gelo. Depósitos em áreas de gelo azul podem ser muito antigos, uma vez que boa parte dos sedimentos possui origem subglacial e advém de outros locais. No entanto, a identificação e interpretação desses depósitos podem ser dificultadas por modificações morfológicas associadas a processos paraglaciais e periglaciais.

As feições deposicionais dominantes nos montes Patriot e Independence envolvem dois importantes processos: (1) atividades de vertentes que proporcionam abundante material supraglacial, favorecendo a formação de geleiras de rocha e de feições de gelo-rocha; (2) detritos basal e englacial que alcançam a superfície do gelo. Onde esta é rebaixada pela ablação tais detritos ficam expostos. Proeminentes morainas de núcleo de gelo formam cordões de quilômetros de extensão e dezenas de metros de largura. Os cordões mais próximos às paredes rochosas, principalmente nos montes Independence, sofrem também a influência do material das vertentes, remobilizando assim os depósitos originais. Nos cordões morânicos mais externos, uma vez os detritos chegando à superfície por movimentos do gelo, estão sujeitos a movimentos pós-deposicionais, principalmente, pela atuação constante do vento. Os processos de sublimação do gelo são mais frequentes na parte superior da geleira e nas morainas, produzindo uma superfície irregular. A radiação solar contribui para a formação de algumas morainas de ablação. Processo de atividade subglacial foi observado em rochas expostas nos vales transversais dos montes Patriot

e em seisos distribuídos ao longo das bandas de morainas de gelo azul.

Os complexos de morainas nos montes Patriot e Independence podem estar associados aos processos de desenvolvimento de morainas controladas, pois por definição, elas são associações de deposição supraglacial. No entanto, elas contêm além de materiais transportados supraglacialmente, aqueles sub e englacialmente. A linearidade dessas morainas é em parte dada pela estrutura do gelo, o que torna importante a aplicação dessas estruturas na reconstrução paleoglaciológica, já que implica a ação de processos específicos.

Existe uma escala temporal que precisa ser considerada, isto é, embora processos atuais possam ser observados diretamente, como os das dinâmicas das vertentes, existem outros que remontam a outras condições glaciológicas, tais como regime termal e outras dinâmicas do gelo que se alteraram no tempo.

Evidências geomorfológicas sugerem que os controles principais sobre os processos de deposição e formação dos depósitos sedimentares são climáticos, a dinâmica do fluxo de gelo e as atividades de vertentes. O regime termal-basal do gelo tem importância na gênese dos sedimentos subglaciais que emergem na superfície.

## **Agradecimentos**

Ao Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR) e ao CNPq. À Sérgio Zilberstein, Fernando Scotta, Luiz Felipe Velho e Patrícia Scalco pelo processamento das imagens de satélite.

## **Referência Bibliográfica**

- BARONI, C.; FREZZOTTI, M.; SALVATORE, M. C.; MENEGHEL, M.; TABACCO, I. E.; VITTUARI, L.; BONDESAN, A.; BIASINI, A.; CIMBELLI, A.; OROMBELLI, G. Antarctic geomorphological and glaciological 1:250.000 map series: Mount Murchison quadrangle, northern Victoria Land. Explanatory notes. *Annals of Glaciology*, London, n. 39, p. 256-264, 2004.
- BEHRENDT, J. C.; COOPER, A. K. Evidence of rapid Cenozoic uplift of the shoulder escarpment of the Cenozoic West Antarctic rift systems, and a speculation on possible climate forcing. *Geology*, Washington, DC, n. 19, p. 315-319, 1991.
- BENTLEY, M. J.; FOGWILL, C. J.; LE BROCCQ, A. M.; HUBBARD, A. L.; SUGDEN, D. E.; DUNAI, T. J.; FREEMAN, S. P. H. T. Deglacial history of the West Antarctic Ice Sheet in the Weddell Sea embayment: Constraints on past ice volume change. *Geology*, Washington, DC, v. 38, n. 5, p. 411-414, 2010.
- BIRTANJA, R. On the glaciological, meteorological and climatological significance of Antarctic blue ice areas. *Reviews of Geophysics*, Washington, DC, v. 37, n. 3, p. 337-359, 1999.
- BOCKHEIM, J. G.; HALL, K. J. Permafrost, active-layer dynamics and periglacial environments of continental Antarctica. *South African Journal of Science*, Pretoria, n. 98, p. 62-90, 2002.

- CARRASCO, J. F.; CASASSA, G.; RIVERA, A. A warm event at Patriot Hills, Antarctica: an ENSO related phenomenon? SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, 2000. Santiago, American Meteorological Society, Boston, 2001, p. 240-241.
- CASASSA, G.; BRECHER, H. H.; CÁRDENAS, C.; RIVERA, A. Mass balance of the Antarctic ice sheet at Patriot Hills. *Annals of Glaciology*, London, n. 27, p. 130-134, 1998.
- CHEN, J. L.; WILSON, C. R.; BLANKENSHIP, D. D.; TAPLEY, B. D. Antarctic mass rates from GRACE: *Geophysical Research Letters*, Washington, DC, v. 33, L11502, doi: 10.1029/2006GL026369, 2006.
- CRADDOCK, C.; ANDERSON, J. J.; WEBERS, G. F. Geologic outline of the Ellsworth Mountains, in Adie, R.J. (Eds), *Antarctic Geology*, Amsterdam, p. 155-170, 1964.
- DALZIEL, I. W. D.; LAWVER, L. A. The lithospheric setting of the West Antarctic Ice Sheet, in: Alley, R. B.; Bindschadler, R. A., (Eds) *The West Antarctic Ice Sheet: Behavior and Environment. Antarctic Research Series: Washington, DC, American Geophysical Union, n° 77, p. 29-44, 2001.*
- DALZIEL, I. W. The Ellsworth Mountains: Critical and enduringly enigmatic. USGS, *Short Research Paper* 004, doi: 10.3133/of2007-1047.srp004, 2007.
- DENTON, G. H., PRENTICE, M. L.; BURKLE, L. H., in Tingey, R. J. (Ed). *The Geology of Antarctica*, Clarendon, Oxford, p. 365-419, 1991.
- DENTON, G. H.; BOCKHEIM, J. G.; RUTFORD, R. H.; ANDERSEN, B. G. (1992). Glacial history of the Ellsworth Mountains, West Antarctic, in Webers, G. F., Craddock, C.; Spletstoeser, J. F. (Eds), *Geology and Paleontology of the Ellsworth Mountains, West Antarctic: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Memoir 170, p. 403-432.*
- EVANS, D. J. A. Controlled moraines: origins, characteristics and palaeoglaciological implications. *Quaternary Science Reviews*, Amsterdam, n. 28, p. 183-208, 2009.
- FOGWILL, C. J.; HEIN, A. S.; BENTLEY, M. J.; SUGDEN, D. E. Do blue-ice moraines in the Heritage Range show the West Antarctic ice sheet survived the last interglacial? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. No prelo, 2011.
- FRENCH H. M.; GUGLIELMIN, M. Observations on the Ice-Marginal, Periglacial Geomorphology of Terra Nova Bay, Northern Victoria Land, Antarctica. *Permafrost and Periglacial Processes*, West Sussex, n. 10, p. 331-347, 1999.
- GIARDINO, R. R.; VITEK, J. D. The significance of rock glaciers in the glacial-periglacial landscape continuum. *Journal of Quaternary Science*, West Sussex, n. 3, p. 97-103, 1988.
- GUSTAVSSON, M.; KOLSTRUP, E.; SEIJMONSBERGEN, A. C. A new symbol-and-GIS based detailed geomorphological mapping system: Renewal of a scientific discipline for understanding landscape development. *Geomorphology*, Amsterdam, v. 77, n. 1-2, p. 90-111, 2006.
- HAMBREY, M. G.; GLASSER, N. F. The role of folding and foliation development in the genesis of medial moraines: examples from Svalbard glaciers. *Journal of Geology*, Chicago, n. 111, p. 471-485, 2003.
- HASEGAWA, H.; IWATA, S.; MATSUOKA, N. Observations of clayey till and underlying glacier ice in the central Sør Rondane Mountains, East Antarctica. *Recent Progress in Antarctic Earth Science*, in Yoshida et al. (Eds), Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo, p. 679-681, 1992.
- HÄTTERSTRAND, C.; JOHANSEN, N. Supraglacial moraines in Scharffenbergbotnen, Heimefrontfjella, Dronning Maud Land, Antarctica – significance for reconstructing former blue ice areas. *Antarctica Science*, Cambridge, v. 17 n. 2, p. 225-236, 2005.
- HOOKE, R. L. Morphology of the ice-sheet margin near Thule, Greenland. *Journal of Glaciology*, London, v. 9, n. 57, 303-324, 1970.
- MILLAR C. I.; WESTFALL, R. D. Rock glaciers and related periglacial landforms in the Sierra Nevada, CA, USA; inventory, distribution and climatic relationships. *Quaternary International*, Amsterdam, n. 188, p. 90-104, 2008.
- RAINS, R. B.; SHAW, J. Some mechanisms of controlled moraine development. *Journal of Glaciology*, London, v. 27, n. 95, p. 113-128, 1981.
- RAU F.; MAUZ, F.; VOGT, S.; KHALSA, S. J. S.; RAUP, B. *Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual*, Institute Fur Physische Geographie, Albert Ludwigs Universitat Freiburg, 32 p, 2005.
- RUTFORD, R. H. Drainage system of the Ellsworth Mountains area, in Adie, R. J. (Ed). *Antarctic Geology and Geophysics*, Oslo, Universitetsforlaget, 875 p, 1972.
- RUTFORD, R. H.; DENTON, G. H.; ANDERSON, B. G. Glacial history of the Ellsworth Mountains: *Antarctic Journal of the United States*, Arlington, n. 15, p. 56-57, 1980.
- SINISALO, A.; MOORE, J. C. Antarctic blue ice areas – towards extracting paleoclimate information. *Antarctic Science*, Cambridge, v. 22, n. 2, p. 99-115, 2010.
- SUGDEN, D. E.; BENTLEY, M. J. COFAIGH, C. O. Geological and geomorphological insights into Antarctic ice sheet evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, n. 364, p. 1607-1625, 2006.
- TODD, C.; STONE, J.; MANN, D. Deglaciation of the Weddell Sea sector of the West Antarctic Ice Sheet. In: SEATTLE ANNUAL MEETING, 2003, Seattle. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, Seattle, 2003, v. 35, n. 6, p. 423.