

EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES SOBRE A VELOCIDADE DE FLUXO DA GELEIRA DRYGALSKI, PENÍNSULA ANTÁRTICA, A PARTIR DE IMAGENS ASTER

Fernando Comerlato SCOTTÁ¹

Luiz Felipe VELHO^{1,2}

Jorge ARIGONY-NETO^{1,3}

Resumo

Este trabalho tem o objetivo de desenvolver um método para estimar a velocidade de fluxo de geleiras na Península Antártica a partir de dados do sensor ASTER. A área definida para o desenvolvimento dessa metodologia foi a geleira Drygalski (64°40'S, 61°00'W). Para isso, foi utilizado o algoritmo de correlação cruzada, que consiste na identificação automática de feições homólogas (*i.e.*, fendas) em duas imagens co-registradas para a obtenção de vetores de deslocamentos. Na seleção de bandas, foi utilizada a banda 3N e o algoritmo de principais componentes, sendo a componente principal 1 selecionada. Filtros passa-alta foram aplicados nessas bandas. Dessa forma, para a extração dos deslocamentos por correlação cruzada, quatro fluxos de processamentos distintos foram realizados: (i) utilizando a principal componente 1 entre as bandas do ASTER VNIR, (ii) filtro passa-alta na principal componente 1, (iii) filtro passa-alta na banda 3N e (iv) banda 3N. Apenas o fluxo utilizando a banda 3N apresentou resultados adequados. O valor de 1,54 m d⁻¹, obtido na área de fendas no centro da geleira, é semelhante aos resultados de outros estudos realizados para os anos de 1999 e 2007, não caracterizando grandes variações na velocidade da geleira Drygalski para o período entre 22/11/2001 e 02/02/2003.

Palavras-chave: Criosfera. Geleira. Correlação cruzada. Dinâmica glacial.

Abstract

Extraction of flow velocity fields of Drygalski glacier using ASTER images

This paper proposes a method based on cross-correlation algorithms for estimating flow velocity fields at Drygalski glacier (64°40'S, 61°00'W), Antarctic Peninsula, using ASTER data. For that, a cross-correlation algorithm was used. This approach is based on automatic identification of homologous features (*i.e.*, crevasses) in two co-registered images to obtain displacement vectors. Band 3N and principal component algorithm were used, in which the first component was selected. High-pass filters were applied in these bands. Four types of processing were performed: (i) using the principal component 1 from the ASTER VNIR channels, (ii) principal component 1 from the ASTER VNIR channels after high-pass filter, (iii) high-pass filter in band 3N and (iv) band 3N. Only the processing chain using band 3N showed adequate results. The displacement of 1.54 m d⁻¹, estimated at the crevasses zone in the center of the glacier, is similar to results of other studies for the years 1999 and 2007, featuring no big changes in flow velocities of Drygalski glacier for the period between 22/11/2001 and 02/02/2003.

Key words: Cryosphere. Glacier. Cross correlation. Glacial dynamics.

¹ **Universidade Federal do Rio Grande do Sul** - Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera - Centro Polar e Climático - Av. Bento Gonçalves, 9500 - Bairro Agronomia - 91501-970 - Porto Alegre/RS - E-mail: fcscotta@gmail.com

² **Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - Campus Porto Alegre** - Rua Cel. Vicente, 281 - Centro Histórico - 90030-040 - Porto Alegre/RS - E-mail: luiz.velho@poa.ifrs.edu.br

³ **Universidade Federal do Rio Grande** - Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera - Laboratório de Monitoramento da Criosfera - Av. Itália, km 8 - 96201-900 - Rio Grande/RS - E-mail: jorgearigony@furg.br

INTRODUÇÃO

Informações sobre a velocidade de fluxo das geleiras são importantes por possuírem uma relação direta com o aporte de gelo que chega aos oceanos (RIGNOT; KANAGARATNAM, 2006; SCHERLER et al., 2008). Recentemente, algumas geleiras da Groenlândia e da Península Antártica apresentaram uma diminuição no seu volume de gelo devido à aceleração de seu fluxo (RIGNOT; KANAGARATNAM, 2006; SCAMBOS et al., 2004). Essa diminuição na massa de gelo contribuiu para o aumento do nível médio dos mares no período dos estudos mencionados anteriormente, o que pode ser acentuado caso as geleiras percam ainda mais massa (IPCC, 2007), além de causar alterações nos oceanos, pois modifica a salinidade nas regiões onde ocorre a descarga de água e gelo (GREENE; PERSHING, 2007).

Assim, o conhecimento da resposta das geleiras às variações nos parâmetros meteorológicos pode ser crucial no atual contexto de mudanças climáticas. Apesar disso, informações sobre a própria dinâmica glacial, como a velocidade de deslocamento das geleiras, ainda são pouco conhecidas (SCAMBOS et al., 1992; ZWALLY et al., 2002; RIGNOT; KANAGARATNAM, 2006). As dificuldades na execução de trabalhos de campo nas geleiras, devido ao risco da presença de fendas na superfície e ao alto custo envolvido na logística, dificultam a obtenção de informações sobre a dinâmica dessas massas de gelo. Apesar dessas dificuldades, existem alguns trabalhos que indicam resultados satisfatórios para poucas geleiras (ZWALLY et al., 2002; FREZZOTTI et al., 1998). No entanto, esses resultados são esparsos em termos de cobertura espacial (SCHERLER et al., 2008), principalmente em áreas caracterizadas por extensas geleiras, como a Península Antártica.

Dessa forma, a utilização de dados de sensores remotos surge como uma boa alternativa para o monitoramento da Criosfera. Algumas técnicas de processamento de dados de Sensoriamento Remoto, como algoritmos de correlação cruzada, permitem utilizar um par de imagens adquiridas com um intervalo de tempo conhecido sobre a mesma área para estimar o deslocamento de geleiras (BERTHIER et al., 2005; SCAMBOS et al., 2004; JOUGHIN et al., 2004) de forma rápida e com baixo custo. Esses algoritmos se baseiam na identificação estatística de feições homólogas em um par de imagens orbitais registradas, cujos deslocamentos são posteriormente determinados entre as referidas feições (SCHERLER et al., 2008; BERTHIER et al., 2005; KÄÄB, 2002; SCAMBOS et al., 1992).

A Península Antártica, em especial, é uma das regiões que registrou grande variação de temperatura nos últimos anos (MARSHALL et al., 2002; TURNER et al., 2005; VAUGHAN et al., 2006). A temperatura média do ar na península registrou um aumento de 0,56°C por década durante 1951-2000 (TURNER et al., 2005). Essa informação é bastante preocupante, dado que as temperaturas médias de verão, na Península Antártica, são próximas de 0°C, ou seja, do ponto de fusão do gelo. Assim, qualquer aumento na temperatura média do ar é capaz de alterar a acumulação e a ablação nas geleiras (ARIGONY-NETO et al., 2009; VAUGHAN et al., 2006).

Alguns autores relataram a alteração na descarga das geleiras e na cobertura de gelo sobre os mares e de neve e gelo sobre a Península Antártica durante o período analisado por Turner et al. (2005). Rott et al. (1996) e Rack & Rott (2004) observaram que a desintegração das plataformas de gelo acompanharam o aumento da temperatura na região. Em Rott et al. (1998) foi avaliada a perda de massa das geleiras tributárias das plataformas de gelo e concluiu-se que a intensificação na diminuição do volume de gelo se deu pela desintegração das plataformas e pelo aumento da temperatura do ar.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia para estimar a velocidade de fluxo de geleiras da Península Antártica, a partir de imagens do sensor ASTER. Contudo, a disponibilidade de imagens óticas é bastante escassa para a região da Península Antártica, pois a cobertura de nuvens é constante (HIRANO et al., 2003; JAÑA, 2006).

Após criteriosa busca por imagens da Península Antártica adquiridas pelo sensor ASTER, poucas foram as áreas com cenas de diferentes datas e baixa cobertura de nuvens, sendo a geleira Drygalski uma dessas áreas. A razão para a escolha dessa geleira está relacionada às mudanças glaciológicas que ocorreram nessa área e nas áreas periféricas (ROTT et al., 2008; RACK; ROTT; 2004; ROTT et al., 2002; ROTT et al., 1996). Essa geleira foi antiga tributária da plataforma de gelo Larsen A, a qual desintegrou em 1995. Juntamente com a desintegração da plataforma, uma significativa variação na sua velocidade foi constatada entre 1995 e 1999, como também uma diminuição de 24 km² em sua área.

ÁREA DE ESTUDO E ESCOLHA DO SENSOR

A geleira Drygalski está localizada na porção nordeste da Península Antártica, entre as latitudes 64° 30' e 64° 50' S e longitudes 60° 40' e 61° 30' W (Figura 1). Em valores aproximados, a geleira possui uma área de 1050 km², com comprimento máximo de 30 km, largura máxima de 34 km em sua área interior e largura de 7 km na área do seu término (ROTT et al., 2008), tendo sua frente no mar de Weddel.

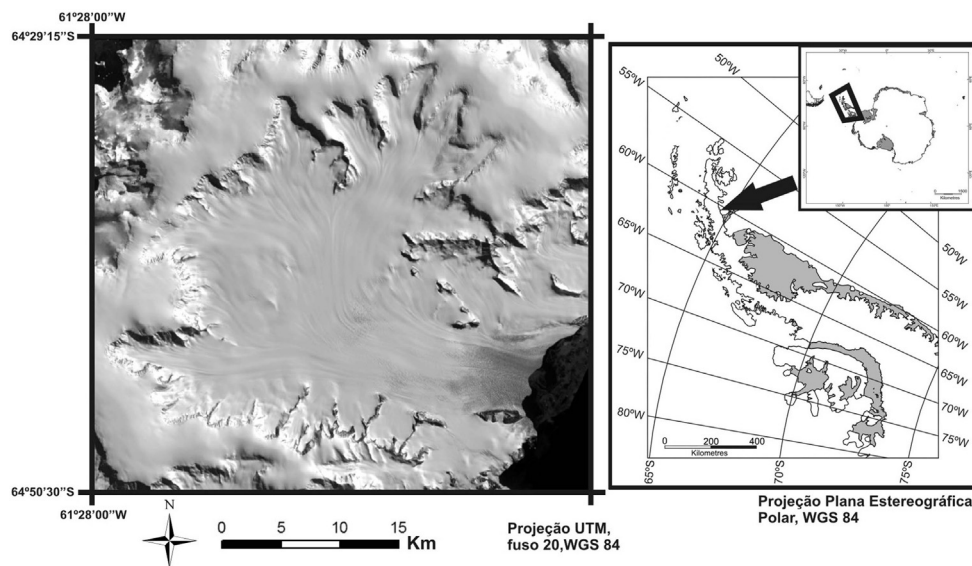


Figura 1 - Localização da área de estudo. À esquerda, imagem ASTER de 22 de novembro de 2001 (banda 3N). O mapa a direita apresenta a localização da geleira Drygalski na Península Antártica, e a localização da península no continente antártico

Para este estudo foram utilizadas apenas as bandas da câmera VNIR (*Visible and Near Infrared*) de duas imagens do sensor ASTER, cujas informações estão dispostas na tabela 1.

Tabela 1 - Características do sensor VNIR do sensor ASTER

Câmera	Banda	Intervalo Espectral (μm)	Resolução Espacial (m)	Largura da faixa imageada (km)	Visada
VNIR	1	0,52 – 0,60 μm	15	60	Nadir
	2	0,63 – 0,69 μm	15	60	Nadir
	3N	0,78 – 0,86 μm	15	60	Nadir

Algumas características dos sensores terão influência na obtenção de informações sobre o deslocamento das geleiras, sendo eles: o intervalo de tempo entre a aquisição das duas imagens, a resolução espacial do sensor e a banda espectral utilizada.

O intervalo temporal, descrito pelos diferentes imageamentos, deve ser controlado, visto que uma geleira flui ao longo dos anos e, por isso, feições poderão não mais ser representadas em uma cena, dado que geleiras com altas velocidades deslocam suas feições superficiais por quilômetros em períodos de um ano. Assim, deve-se previamente conhecer a dinâmica glacial local para saber se o intervalo temporal entre as cenas é adequado ao estudo proposto. No caso da geleira Drygalski, de acordo com Rott et al. (2002), a velocidade de deslocamento das feições variou entre 0,75 a 1,5 m d⁻¹ no final da década de 1990.

Outro fator importante com relação ao tempo de aquisição das duas imagens é a mudança na forma das feições superficiais, causada pelas deformações internas dos cristais de gelo (PATERSON, 1994; HAMBREY, 1994; BENNETT; GLASSER, 1996). Resultados satisfatórios, utilizando correlação cruzada, são gerados em áreas de geleiras que possuem feições notáveis (fendas) (VELHO, 2009). Contudo, em longo intervalo de tempo, mais tensões atuarão na massa de gelo, aumentando a chance de ocorrência de variações na superfície (SCAMBOS et al., 1992), impedindo a identificação automática de feições. Assim, faz-se necessário utilizar imagens de um mesmo sensor com uma diferença de datas moderada, não superior a 2 anos.

A identificação de feições entre as duas imagens depende da resolução espacial utilizada. Contudo, não é possível indicar a melhor resolução espacial para estudos glaciológicos, dado que cada geleira possui tensões internas bastante características que, por sua vez, formarão fendas de diferentes dimensões. Em geleiras antárticas é possível encontrar fendas com mais de 100 km de comprimento e com largura maior que veículos de neve (HAMBREY, 1994). Para saber se um sensor possui resolução espacial adequada para detectar fendas, é preciso realizar uma análise visual para confirmar a presença dessas feições na cena a ser utilizada.

ALGORITMO DE CORRELAÇÃO CRUZADA

O algoritmo de correlação cruzada permite a identificação automática de feições homólogas (e.g., fendas de uma geleira) em duas cenas previamente co-registradas (SCAMBOS et al., 1992) para, posteriormente, calcular o deslocamento entre as feições e fornecer vetores de deslocamento para as diversas feições homólogas encontradas nas cenas (NSIDC, 2010). Durante o processamento, o algoritmo gera, para cada janela na imagem de referência, uma janela na imagem de busca (Figura 2). A janela de busca será maior que a janela de referência. Utilizando co-variância cruzada, um *matching* é realizado nos histogramas das imagens, para que os valores digitais tenham média zero e desvio padrão 1, para reduzir

diferenças na iluminação entre as duas cenas (SCAMBOS et al., 1992). A partir disso, os dados da janela de referência são comparadas com os da janela de busca, e é calculada a correlação cruzada (VELHO, 2009), de acordo com a equação 1:

$$CI_{(l,s)} = \frac{\sum_{l,s} (r_{(l,s)} - \mu_r)(s_{(l,s)} - \mu_s)}{\left[\sum_{l,s} (r_{(l,s)} - \mu_r)^2 \right]^{1/2} \left[\sum_{l,s} (s_{(l,s)} - \mu_s)^2 \right]^{1/2}}$$

Sendo $CI_{(l,s)}$ o índice de correlação entre a janela de busca e a janela de referência, $r_{(l,s)}$ é o valor do pixel da janela de referência com coordenada (l,s) e $s_{(l,s)}$ é o valor do pixel da janela de busca com coordenada (l,s) . A média dos valores de pixel da janela de referência e da janela de busca é expressa por μ_r e μ_s respectivamente. A expressão terá valor máximo igual a 1 quando o valor do pixel da imagem de referência e imagem de busca forem iguais (SCAMBOS et al., 1992).

O valor do pixel central da janela de referência será comparado pixel a pixel na janela de busca, com o objetivo de localizar o pixel com maior correlação. A partir disso, o algoritmo constrói uma superfície tridimensional com os valores de correlação encontrados na região de busca, chamado índice de correlação (Figura 2). No pico de correlação entre a janela de referência e busca, será realizada uma interpolação linear e, de forma subpixel, será gerado um vetor com o deslocamento.

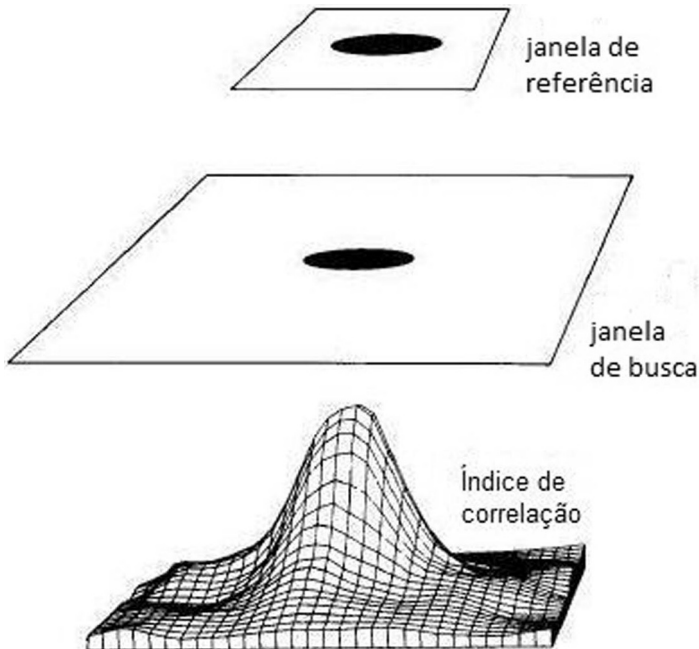


Figura 2 - Diagrama básico ilustrando o funcionamento do algoritmo de correlação cruzada

Adaptado de Scambos et al. (1992)

METODOLOGIA

Seleção das imagens e do algoritmo

A primeira etapa da metodologia corresponde à seleção das imagens. Imagens da câmara VNIR do sensor ASTER foram selecionadas em virtude da resolução espacial de 15 metros, adequada para o estudo da geleira Drygalski. Isso porque a velocidade de 1,54m d⁻¹ da geleira é baixa (ROTT et al., 2002), minimizando a possibilidade de uma fenda estar presente em uma cena e, mesmo em um curto espaço de tempo, a mesma fenda não estar mais presente na cena posterior.

Foi realizada uma busca de imagens da câmara VNIR, do sensor ASTER, na área da geleira Drygalski, disponíveis no banco de dados do portal Warehouse Inventory Search Tool da NASA (EODIS, 2008). As datas de 22/11/2001 e 02/02/2003 foram selecionadas por serem as únicas que possuíam baixa porcentagem de cobertura de nuvens.

A análise visual nas imagens foi realizada, visando a identificação das feições e a existência de uma boa relação entre as feições imageadas e a resolução espacial do sensor. Essa etapa mostrou que a resolução espacial das imagens ASTER permite representar, com bastante riqueza de detalhes, as formas das fenadas da geleira Drygalski. As informações das cenas escolhidas são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 - Identificação das imagens utilizadas neste estudo

Data	Identificação das imagens (ID)	Cobertura de Nuvens (%)
22/11/2001	SC:AST_L1A.003:2005067298 AST_L1A#003_11222001131915_12052001162208.hdf	15%
02/02/2003	SC:AST_L1A.003:2013964909 AST_L1A#00302022003133434_03012003102930.hdf	32%

O algoritmo de correlação cruzada foi selecionado por ter apresentado resultados adequados para o monitoramento de geleiras, sendo uma metodologia rápida e com baixo custo (VELHO, 2009; SCHERLER et al., 2008; BERTHIER et al., 2005; SCAMBOS et al., 2004; KÄÄB, 2002; SCAMBOS et al., 1992). Para não ser necessário implementar o algoritmo, utilizou-se o aplicativo IMCORR, pois é gratuito e é instalado no sistema operacional Linux e pode ser editado em programas também gratuitos.

Georreferenciamento e Registro das imagens

Após a escolha das cenas, foi necessário o georreferenciamento de uma das cenas para posterior registro da outra cena. Como as imagens disponíveis para o trabalho são do nível L1A de processamento, ou seja, sem coordenadas em um sistema geodésico de referência, foi preciso localizar a geleira no espaço, para que fosse possível avaliar as influências a que a geleira estava submetida e qual era a direção e sentido do fluxo da geleira, pois a circulação atmosférica e a oceânica podem alterar a dinâmica das massas de gelo.

Uma das informações disponíveis para o georeferenciamento das cenas é o mosaico GIA Landsat, elaborado com imagens da Península Antártica (BENNAT et al., 1998). Esse mosaico foi construído com cerca de 40 imagens Landsat TM, adquiridas entre 1986 e 1990,

gerando um produto final com resolução espacial de 30 metros (BENNAT et al., 1998). Esse mosaico foi escolhido por ser o único disponível na data em que as imagens foram georreferenciadas.

Para o georreferenciamento, foram escolhidos pontos do terreno em zonas de rocha exposta, privilegiando rochas que estão próximas da geleira Drygalski. A imagem de 2001 foi escolhida como imagem de referência, sendo registrada na projeção UTM, fuso 20, hemisfério sul e sistema geodésico WGS 84. Foram escolhidos 13 pontos de controle, com erro médio quadrático de 10,3 metros. Posteriormente, a imagem de 2003 foi co-registrada, utilizando a imagem de 2001 como referência. Foram escolhidos 14 pontos de controle com erro médio quadrático de 12,2 metros (Figura 3).

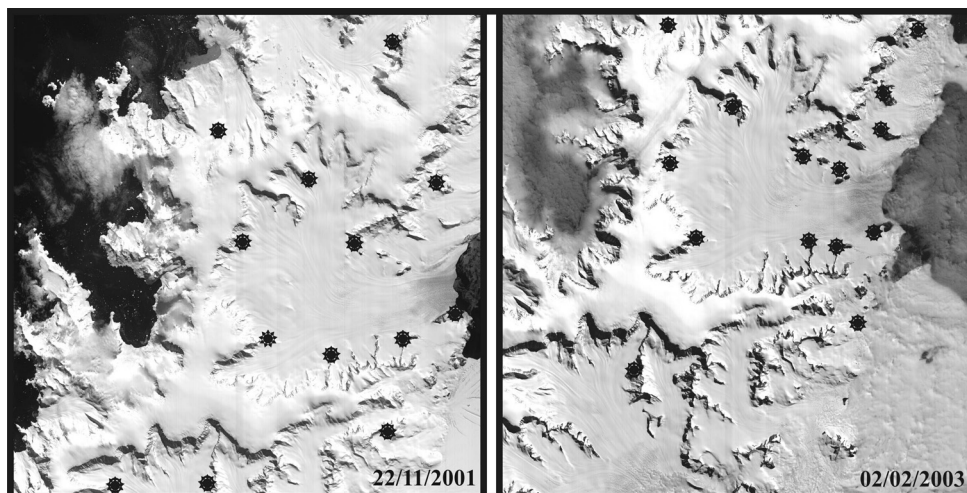


Figura 3 - Pontos de controle utilizados para o georreferenciamento da imagem de referência (esquerda) e co-registro entre as imagens (direita)

Seleção das Bandas e Processamento Digital de Imagens

Para a extração dos deslocamentos, a principal dificuldade é identificar a banda que melhor registre os deslocamentos a partir da aplicação da correlação cruzada, ou seja, a que apresente maior contraste entre as fendas e a superfície da geleira. Assim, testaram-se imagens de entrada no algoritmo, com base em estudos anteriores de sensoriamento remoto aplicado à glaciologia, seja em ambiente antártico ou em geleiras temperadas (Figura 4).

Do conjunto de imagens ASTER de duas datas diferentes, dois produtos foram inicialmente escolhidos para a utilização na extração de deslocamentos: (i) banda 1 do processamento de principais componentes, apresentado como produto adequado a estudos glaciológicos por Scambos et al. (1992), e (ii) banda 3N, que apresentou bons resultados em Kääb (2002) e Scherler et al. (2008).

A partir das bandas do VNIR do sensor ASTER (*i.e.*, bandas 1, 2 e 3), foi realizada a redução de dimensionalidade dos dados através do algoritmo de principais componentes (Figura 4a) no aplicativo Envi 4.2, na qual três componentes foram geradas. A componente principal 1 foi selecionada para a extração de deslocamentos seguindo recomendações de Scambos et al. (1992), por ser uma imagem com baixo ruído, na qual a topografia do gelo é realçada e pequenas diferenças entre a reflectância da neve e firn são suprimidas, descartando-se as componentes principais 2 e 3. Filtros passa-alta de tamanhos 5X5 a 13X13

foram aplicados na principal componente 1, visando um melhor contorno das fendas. Dessa forma, dois conjuntos de dados foram gerados por esses processamentos, um a partir da componente principal 1 e outra a partir da componente principal 1 com filtro passa-alta.

No caso da banda 3N (Figura 4b), dois tratamentos foram propostos: banda 3N sem processamentos e banda 3N com aplicação de filtro passa-alta. Foram aplicados filtros passa-alta de diferentes tamanhos (5X5 a 13X13). A utilização do tamanho das janelas do filtro passa-alta foi baseada em considerações de Velho (2009), onde o aspecto visual das imagens está diretamente associado à geração dos vetores de forma adequada. Ao final desses processamentos, dois conjuntos de dados foram gerados, ou seja, um a partir da banda 3N sem processamentos e outro a partir da banda 3N com filtro passa-alta.

Dessa forma, quatro fluxos de processamentos distintos foram realizados para a extração de deslocamentos (Figura 4). O fluxo I corresponde à utilização da componente principal 1 (PC1) resultante das bandas 1-3 do ASTER VNIR. Na cadeia II foram aplicados filtros passa-alta de diferentes tamanhos (5X5 a 13X13) na componente principal 1. Na sequência III, filtros passa-alta (janelas 5x5 a 13x13) foram aplicados na banda 3N e no fluxo IV foi utilizada apenas a banda 3N. O aspecto visual das imagens utilizadas nos fluxos de processamentos podem ser visualizados na figura 5.

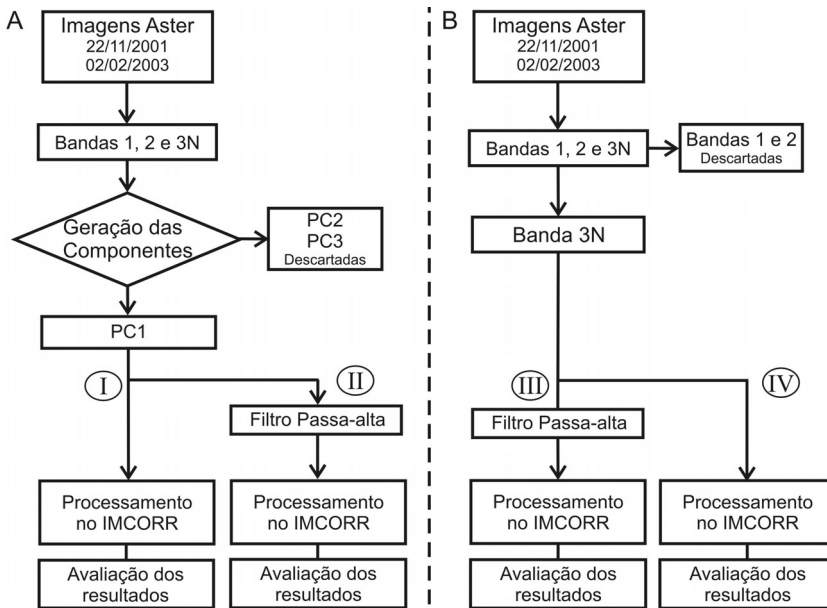


Figura 4 - Quatro fluxos de processamentos aplicados às imagens

Extração de deslocamentos e determinação da velocidade

Inicialmente, foi realizada uma análise visual nas imagens, a partir da qual as áreas de fendas na área central e frontal da geleira Drygalski foram selecionadas como áreas análise (Figura 6), pois somente as porções da imagem com grande presença de fendas são as que gerarão dados de deslocamento (VELHO, 2009).

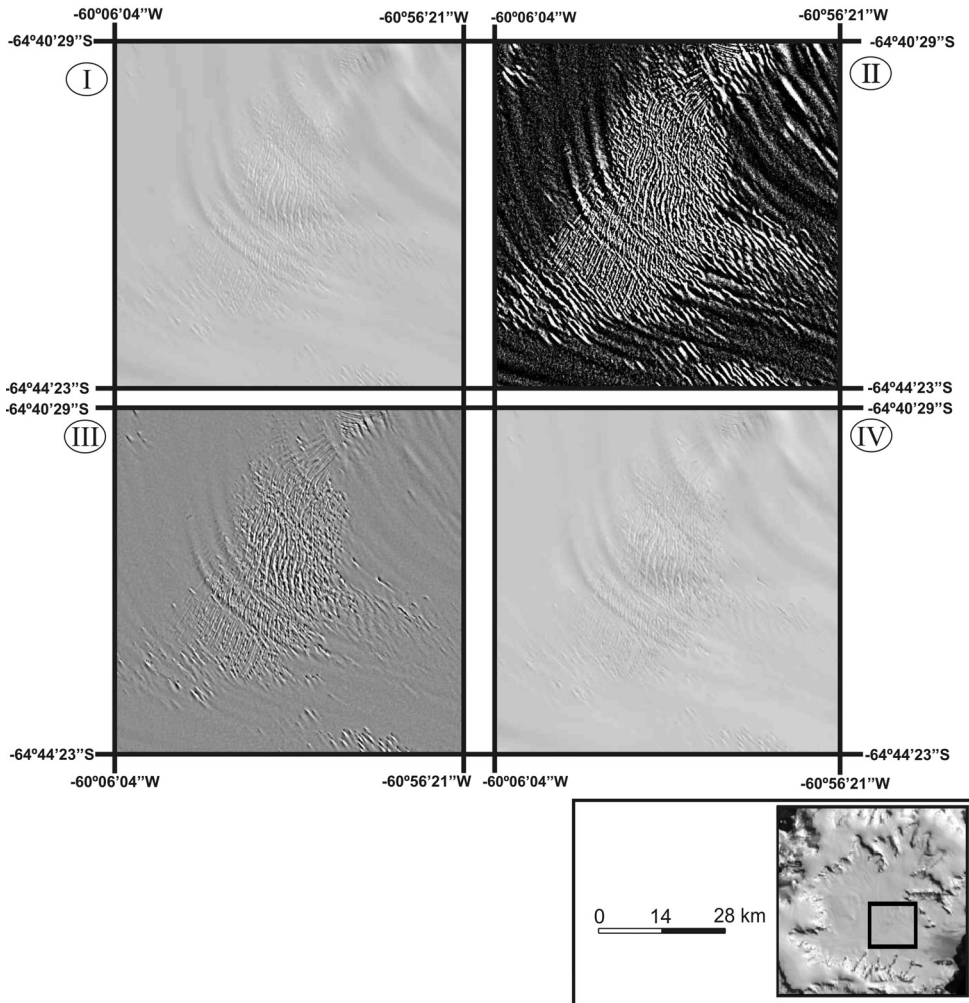


Figura 5 - Quatro imagens representando cada fluxo de processamento. A área de fendas na zona central da geleira Drygalski é destacada. Os números da figura representam: I – PC1, II – PC1 + filtro passa alta, III – Banda 3N + filtro passa-alta e IV – Banda 3N

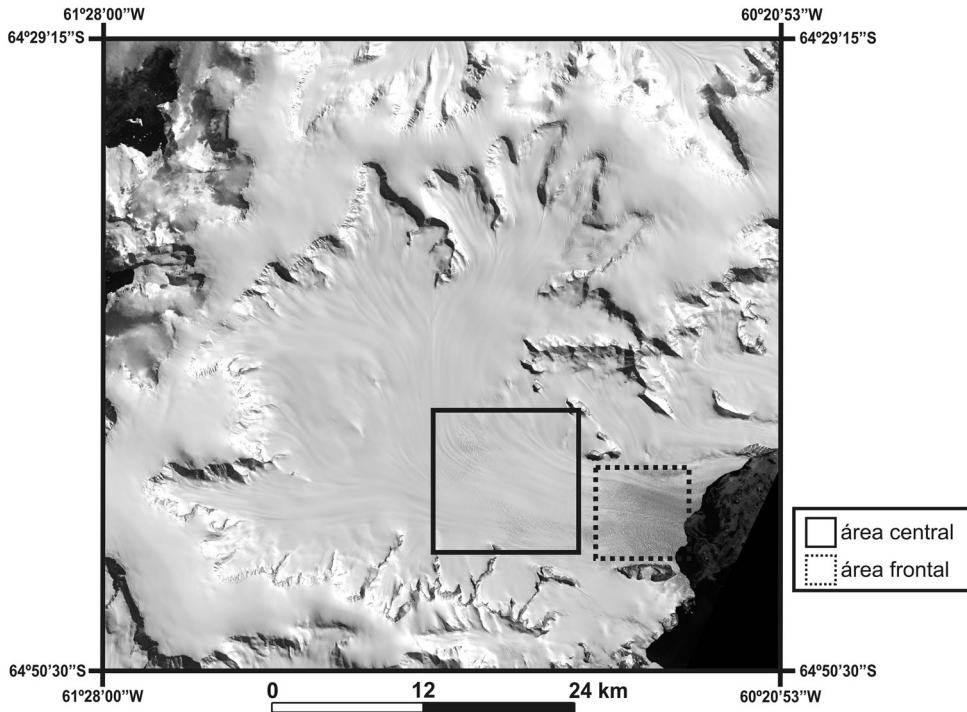


Figura 6 - Áreas analisadas para determinação da velocidade da geleira Drygalski

A partir dos dados de deslocamento, a velocidade da geleira Drygalski foi determinada pela média dos módulos de deslocamento dos vetores dividido pelo intervalo de aquisição das duas cenas (437 dias).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos quatro diferentes processamentos realizados para a extração do deslocamento da geleira Drygalski (Figura 4) foram analisados e tiveram excluídas as informações nulas geradas (*i.e.*, vetores com deslocamento igual a zero) e as que são impróprias, ou seja, quando o erro associado à determinação do deslocamento é superior ao módulo do vetor.

Apenas a sequência IV apresentou resultados satisfatórios. Os fluxos I, II e III tiveram poucos vetores gerados, localizados de forma esparsa na área central da geleira Drygalski (Figura 7). No fluxo I, utilizando PC1, 14 vetores foram gerados, sendo o segundo fluxo com mais vetores gerados. No fluxo II, três vetores gerados e, no fluxo III, nenhum vetor gerado (Figura 7).

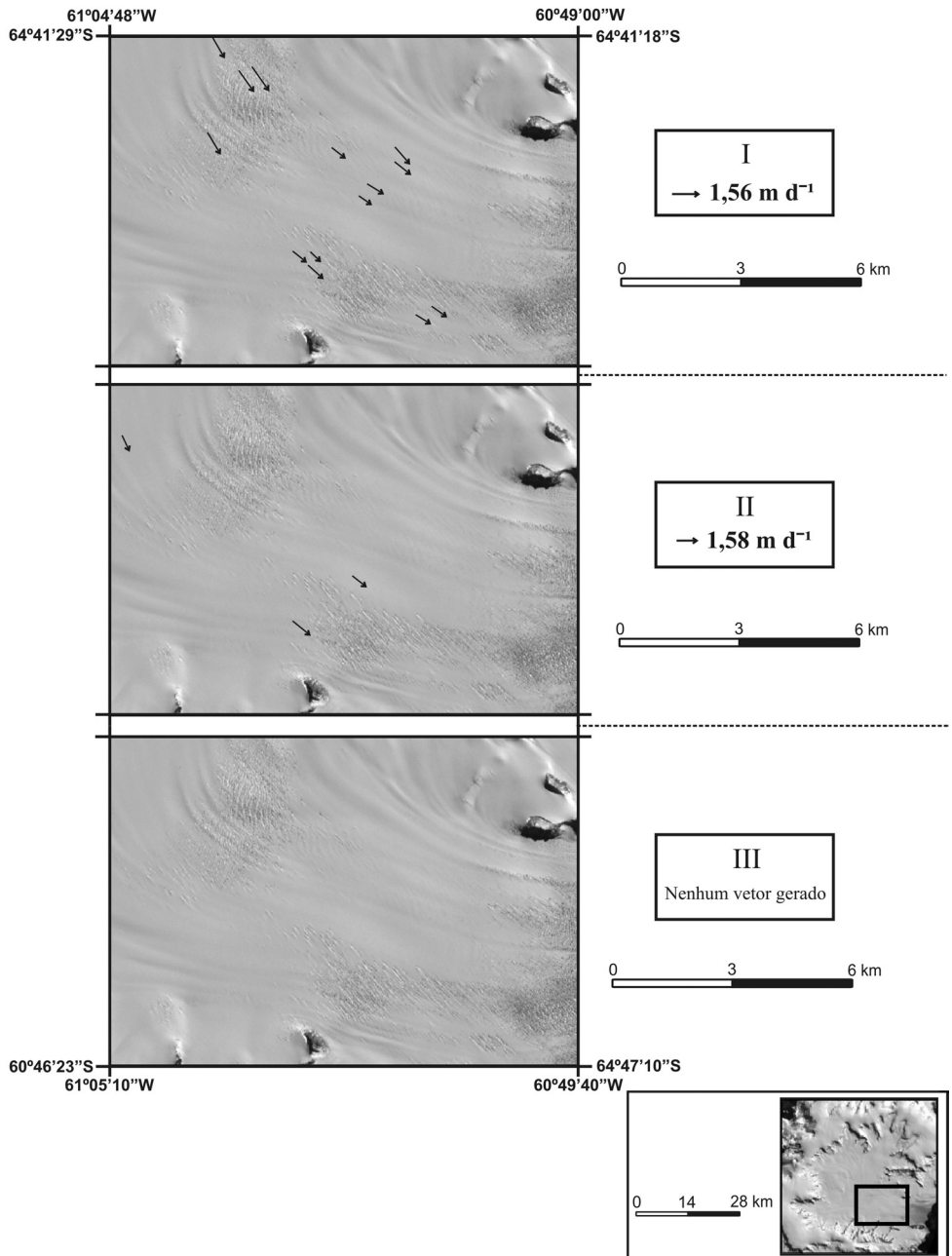


Figura 7 - Vetores de deslocamento dos fluxos I, II e III. À direita é mostrado a escala e vetor médio das imagens. Na parte inferior à direita é mostrada a área da geleira onde foram gerados os vetores

Diferentemente dos fluxos I, II e III, o fluxo IV gerou um grande número de vetores, com distribuição compatível com o fluxo da geleira Drygalski, totalizando 143 vetores na área central da geleira (Figura 8), onde há uma grande concentração de fendas. Na tabela 3, verifica-se que os vetores da área central possuem o valor do desvio padrão inferior ao valor do desvio dos vetores de toda a cena, mostrando que os dados da área central possuem menor variabilidade quando comparado com toda a cena. Dessa forma, apenas os vetores gerados na região central da geleira foram considerados.

Na área frontal da geleira Drygalski não foram encontradas correlações satisfatórias para determinação do deslocamento em nenhum dos processamentos realizados.

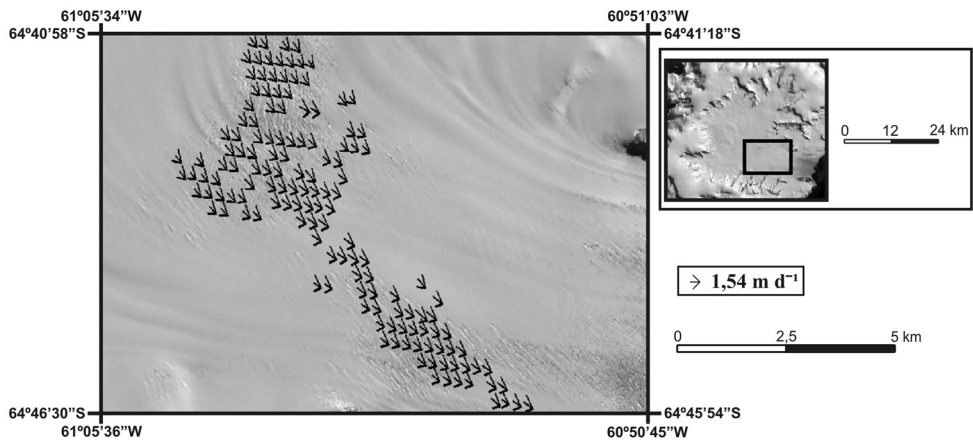


Figura 8 - Vetores gerados pelo fluxo de processamento IV. À direita é mostrado a escala e vetor médio das imagens. Na parte superior à direita é mostrada a área da geleira em que foram gerados os vetores

Tabela 3 - Média e desvio padrão dos vetores presentes em toda a cena e dos vetores presentes na área central

	Vetores em toda a cena	Vetores na área central
Número de vetores	6124	143
Média	371,05	672,9
Desvio Padrão	224,02	78,70

Dessa forma, o fluxo de processamento IV foi escolhido para a determinação da velocidade. O deslocamento médio foi de 672,9 metros num período de 437 dias, caracterizando uma velocidade de 1,54m d⁻¹.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Assim como anteriormente detectado por Kääb (2002) e Scherler et al. (2008), respectivamente para a determinação de velocidade de geleiras da Nova Zelândia e Himalaia, - a banda 3N sem qualquer filtragem foi a que apresentou os melhores resultados.

Os vetores foram gerados na área central da geleira Drygalski. Observa-se que as fendas mantiveram o mesmo padrão nas duas imagens, sendo esse fator determinante para a geração dos vetores de forma adequada. Na área frontal da geleira Drygalski não foram gerados vetores de velocidade em nenhum dos fluxos de processamentos utilizados. A razão para isso foi a presença de nuvens em parte da frente da geleira na imagem de 02/02/2003, como também a variação do padrão de fendas entre as duas imagens processadas. Novas fraturas no gelo foram formadas, devido à interação da área frontal dessa geleira com o oceano adjacente. A influência de ondas e marés na porção frontal das geleiras gera fraturas nesse local (MEIER; POST, 1987; HUGHES, 2002; BENN et al., 2007), provocando um fluxo mais rápido nessa área que no centro da geleira, o que causa diminuição da espessura e a retração da frente da massa de gelo (MEIER; POST, 1987; BENN et al., 2007).

Os resultados apresentam valores de velocidade semelhantes aos resultados encontrados por interferometria em 1999 ($1,5 \text{ m d}^{-1}$ entre 9 e 10 de novembro) (ROTT et al., 2002). As velocidades são também maiores do que os resultados de 1995 ($0,75 \text{ m d}^{-1}$ entre 31 de outubro e 1 de novembro desse ano). Esses valores reforçam a afirmação de Rott et al. (2002), ou seja, que a velocidade de 1995 era menor devido a presença da Plataforma Larsen A, a qual se desintegrou no mesmo ano e alterou a dinâmica da geleira Drygalski e de todas geleiras tributárias dessa plataforma. A desintegração da plataforma provocou *um pulso* (*surge*, em inglês), o qual consiste em uma aceleração abrupta do fluxo da geleira, acompanhada pelo avanço rápido e brusco (alguns quilômetros) do término da massa de gelo (SIMÕES, 2004).

Em um trabalho mais recente, novas informações sobre a velocidade da geleira Drygalski foram determinadas por algoritmos de correlação cruzada no período de 08 a 19 de outubro do ano de 2007 (ROTT et al., 2008). Esses resultados apontam uma velocidade de $1,5 \text{ m d}^{-1}$, sendo semelhante aos dados encontrados neste trabalho, corroborando com Rott et al. (2002), que defende a hipótese de que a geleira Drygalski entrou em equilíbrio após o pulso entre 1995-1999. Assim, desde 1999, a geleira mantém a mesma velocidade, de acordo com os resultados encontrados neste e em outros trabalhos (ROTT et al., 2008).

Este trabalho mostra que a combinação da utilização de imagens ASTER com o software IMCORR foi adequada para a obtenção de informações sobre as velocidades de fluxo de geleiras, sendo uma metodologia rápida e com baixo custo em regiões remotas onde a realização de trabalhos de campo é de alto custo. Essas informações auxiliam no estudo de dinâmica glacial e contribuem para um melhor entendimento dos efeitos das mudanças climáticas na Península Antártica. Trabalhos futuros estarão concentrados na utilização da banda 3N do satélite ASTER para determinação da velocidade de outras geleiras na Península Antártica.

AGRADECIMENTOS

Este artigo resulta de pesquisas financiadas pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através dos projetos 550041/2007-9 (coordenador Jefferson Cardia Simões) e 480701/2008-3 (coordenador Jorge Arigony Neto), constituindo também uma contribuição do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera para a obtenção de informações da dinâmica das massas de gelo, no sentido de compreender os

processos climáticos e meteorológicos que afetam a dinâmica da Criosfera. Fernando Comerlato Scottá e Jorge Arigony Neto agradecem ao CNPq pela concessão de bolsas de iniciação científica e produtividade em pesquisa.

REFERÊNCIAS

ARIGONY-NETO, J.; SAURER, H.; SIMÕES, J. C.; RAU, F.; JAÑA, R.; VOGT, S.; GOSSMAN, H. Spatial and temporal changes in dry-snow line altitude on the Antarctic Peninsula. **Climatic Change**, v. 94, p.19-33, 2009.

BENN, D. I.; WARREN, C. R.; MOTTRAM, R. H. Calving processes and the dynamics of calving glaciers. **Earth-Science Reviews**, v.82, p. 143-179, 2007.

BENNAT, H.; HEIDRICH, H.; GRIMM, J.; SIEVERS, J.; WALTER, H.; WIEDEMANN, A. et al. Das "Geowissenschaftliche Informationssystem Antarktis" (GIA) am Institut für Angewandte Geodäsie (IfAG). In: GOSSMANN, H. **Patagonien und Antarktis – Geofernerkundung mit ERS-1-Radarbildern**. PetermannsGeographischeMitteilungen, 1998. p. 13-34.

BENNETT, M. R.; GLASSER, N. F. **Glacial Geology: ice sheets and landforms**. Chichester: Wiley, 1996. 364p.

BERTHIER, E.; VADON, H.; BARATOUX, D.; ARNAUD, Y.; VINCENT, C.; FEIGL, K. L.; RÉMY, F.; LEGRÉSY, B. Surface motion of mountain glaciers derived from satellite optical imagery. **Remote Sensing of Environment**, v.95, p.14-28, 2005.

EOSDIS - Earth Observing System Data and Information System. **Earth Observing System Clearing HOuse (ECHO) / Warehouse Inventory Search Tool (WIST)**. National Aeronautics and Space Administration (NASA). Disponível em: <https://wist-ops.echo.nasa.gov/api/>. Acesso em: 26 novembro 2008.

FREZZOTTI, M.; CAPRA, A.; VITTUARI, L. Comparison between glacier ice velocities inferred from GPS and sequential satellite images. **Annals of Glaciology**, v. 27, p. 54-60, 1998.

GREENE, C. H.; PERSHING, A. J. Climate drives sea change. **Science**, v. 315, p. 1084-1085, 2007.

HAMBREY, M; ALEAN, J. **Glaciers**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 376p.

HIRANO, A.; WELCH, R.; LANG, H. Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, p. 356-370, 2003.

HUGHES, T. Calving Bays. **Quaternary Science Reviews**, v.21, p. 267-282, 2002.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller(eds.)]. New York: Cambridge University Press, 996 p. 2007.

JAÑA, R. **Digital elevation models and delineation of antarctic glaciers using stereo capabilities of ASTER satellite images**. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, 2006.

JOUGHIN, I.; ABDABATI, W.; FAHNESTOCK, M. Large Fluctuations in speed on Greenland's JakobshavnIsbrae glacier. **Nature**, v. 432, p.608-610, 2004.

- KÄÄB, A. Monitoring high-mountain terrain deformation from repeated air- and spaceborne optical data: examples using digital aerial imagery and ASTER data. **Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, p.39-52, 2002.
- MARSHALL, G. J.; LAGUN, V.; LACHLAN-COPE, T. A. Changes in Antarctic Peninsula tropospheric temperatures from 1956 to 1999: A synthesis of observations and reanalysis data. **International Journal of Climatology**, v. 22, n.3, p.291-310, 2002.
- MEIER, M. F.; POST, A. Fast tidewater glaciers. **Journal of Geophysical Research**, v.92, n.B9, p. 9051-9058, 1987.
- NSIDC – NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER. **IMCORR Software**. Disponível em: <http://nsidc.org/data/velmap/imcorr.html>. Acesso em: 26 maio 2010.
- PATERSON, W. S. B. **The Physics of Glaciers**. 3. ed. Oxford: Pergamon, 1994. 480p.
- RACK, W.; ROTT, H. Pattern of retreat and disintegration of Larsen B Ice Shelf, Antarctic Peninsula. **Annals of Glaciology**, v. 39, p.505-510, 2004.
- RIGNOT, E.; KANAGARATNAM, P. Changes in the Velocity Structure of the Greenland Ice Sheet. **Science**, v. 311, p.986-990, 2006.
- ROTT, H.; SKVARCA, P.; NAGLER, T. Rapid collapse of northern Larsen Ice Shelf, Antarctica. **Science**, v. 271, n. 5250, p.788-792, 1996.
- ROTT, H.; RACK, W.; NAGLER, T.; SKVARCA, P. Climatically induced retreat and collapse of northern Larsen Ice Shelf, Antarctic Peninsula. **Annals of Glaciology**, v. 27, p.86-92, 1998.
- ROTT, H.; RACK, W.; SKVARCA, P.; DE ANGELIS, H. Northern Larsen Ice Shelf, Antarctica: further retreat after collapse. **Annals of Glaciology**, v. 34, p.277-282, 2002.
- ROTT, H.; EINEDER, M.; NAGLER, T.; FLORICIOUI, D. New results on dynamic instability of Antarctic Peninsula glaciers detected by TerraSAR-X ice motion analysis. In: European Conference On Synthetic Aperture Radar (EUSAR), 1., 2007, Friedrichshafen. **EUSAR European Conference on Synthetic Aperture Radar 2008, 2007-06-02 - 2007-06-05**. Oberpfaffenhofen: Vde Conference Services, 2008. p. 1- 3.
- SCAMBOS, T. A.; DUTKIEWICZ, M. L.; WILSON, J. C.; BINDSCHADLER, R. A. Application of image cross-correlation to the measurements of glacier velocity using satellite image data. **Remote Sensing of Environment**, v. 42, p.177-186, 1992.
- SCAMBOS, T. A.; BOHLANDER, J. A.; SHUMAN, C. A.; SKVARCA, P. Glacier acceleration and thinning after ice shelf collapse in the Larsen B embayment, Antarctica. **Geophysical Research Letters**, v. 31, L18402, 2004.
- SCHERLER, D.; LEPRINCE, S.; STRECKER, M. R. Glacier-surface velocities in alpine terrain from optical satellite imagery: Accuracy improvement and quality assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 122, p.3806-3819, 2008.
- SIMÕES, J. C. Glossário da língua portuguesa da neve gelo e termos correlatos. **Pesquisa Antártica Brasileira**, v.4, p. 119-154. 2004.
- TURNER, J.; COLWELL, S. R.; MARSHALL, G. J.; LACHLAN-COPE, T. A.; CARLETON, A. M.; JONES, P. D.; LAGUN, V.; REID, P. A.; IAGOVKINA, S. Antarctic Climate Change During The Last 50 Years. **International Journal of Climatology**, v. 25, n. 3, p. 279-294, 2005.
- VAUGHAN, D. G. Recent Trends in Melt Conditions on the Antarctic Peninsula and their implications for ice-sheet mass balance and sea level. **Artic, Antarctic And Alpine Research**, v. 38, n. 1, p.147-152, 2006.
- VAUGHAN, D. G.; MARSHALL, G. J.; CONNOLLEY, W. M.; PARKINSON, C.; MULVANEY, R.; HODGSON, D. A.; KING, J. C.; PUDSEY, C. J.; TURNER, J. Recent Rapid Regional Climate Warming on the Antarctic Peninsula. **Climatic Change**, v. 60, n. 3, p.243-274, 2006.

VELHO, L. F. **Utilização de Filtro Lee na Redução de Speckle em Imagens SAR Usadas na determinação da velocidade de fluxo de geleiras da Península Antártica.** 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ZWALLY, H. J.; ABDALATI, W.; HERRING, T.; LARSON, K.; SABA, J.; STEFFEN, K. Surface Melt-Induced Acceleration of Greenland Ice-Sheet Flow. **Science**, v. 297, p.218-222, 2002.

Recebido em julho de 2011

Revisado em julho de 2012

Aceito em novembro de 2012