

Revista Brasileira de Cartografia (2017), Nº 69/4, Edição Desastres Naturais e Impactos Ambientais: 743-758
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

MAPEAMENTO DA SUPERFÍCIE DE NEVE NA CORDILHEIRA DARWIN ATRAVÉS DE IMAGENS DE SATÉLITE ÓTICAS E SUA RELAÇÃO COM DADOS CLIMÁTICOS (2005-2016)

Snow Coverage Mapping in Darwin Mountain Ranges through Satellite Images Optical and its Relationship with Data Climate (2005-2016)

**César Rojas-Zamorano¹, Eder Maier¹, Jorge Arigony-Neto²,
Jean Marcel de Almeida Espinoza³, Ricardo Jaña⁴ & Inti Gonzalez⁵**

¹Universidade Federal do Rio Grande – FURG

Instituto de Ciências Humanas e da Informação

Campus Carreiros, av. Itália km 8 – CEP 96201–200 – Rio Grande, RS - Brasil
cesar.rojas.zamorano@gmail.com, edermaier@furg.br

²Universidade Federal do Rio Grande – FURG

Laboratório de Monitoramento da Criosfera – Instituto de Oceanografia

Campus Carreiros, av. Itália km 8 – CEP 96201–200 – Rio Grande, RS - Brasil
jorgearigony@furg.br

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – IFRS

Laboratório de Geotecnologias e Médio Ambiente

Campus Rio Grande, CEP 96201 – 460 – Rio Grande – RS – Brasil
jean.espinoza@riogrande.ifrs.edu.br

⁴Instituto Antártico Chileno – INACH

Departamento Científico - Recursos Naturales / Glaciología

Plaza Muñoz Gamero 1055, Punta Arenas, Chile
rjana@inach.cl

⁵Centro Regional Fundación CEQUA

Línea de Cambio Climático y Variaciones Recientes

Av. España 184 - Punta Arenas – Chile
inti.gonzalez@cequa.cl

Recebido em 13 de Fevereiro, 2017/Aceito em 21 de Abril, 2017

Received on February 13, 2017/Accepted on April 21, 2017

RESUMO

A caracterização da superfície de neve é indispensável para compreender a dinâmica da Criosfera na patagônia austral do Chile, e torna-se mais importante quando consideramos que esta é uma área de difícil acesso devido às condições geográficas e climáticas extremas. Através do processamento de imagens orbitais dos sensores TM e OLI/TIRS presentes nos satélites LANDSAT 5 e 8, respectivamente, e a sua posterior classificação através do algoritmo de Classificação Supervisionada de Máxima Verossimilhança (CSMV) e da aplicação de limiares sobre o Índice de Neve por Diferença Normalizada (NDSI), foram obtidas imagens binárias com as classes 1 (neve) e 0 (não-neve). Essas imagens foram

vetorizadas e, então, calculadas as áreas correspondentes à superfície de neve em quilômetros-quadrados (km²). Esses resultados foram analisados e relacionados com dados climáticos de reanálise para as variáveis meteorológicas de temperatura e precipitação, obtendo um padrão de comportamento climático para cordilheira Darwin na última década. Embora os resultados mostram uma importante diminuição da superfície de neve entre junho de 2005 e junho de 2016, não pode se-considerar como um comportamento padrão. A variabilidade climática, devida a ocorrência do El Niño durante 2015 e 2016, e a diminuição da influência da Oscilação Antártica sobre a região afetou diretamente a superfície de neve da cordilheira Darwin.

Palavras chave: Cordilheira Darwin, Superfície de Neve, Sensoriamento Remoto, Dados Climáticos de Reanálise.

ABSTRACT

The characterization of the snow surface is essential to understand the dynamics of the Cryosphere in Southern Patagonia Chile, and it becomes more important when we consider that is an area of difficult access due to its extreme geographical and climatic conditions. Through the processing of orbitals images from sensors TM and OLI / TIRS present in Landsat 5 and 8, respectively, and their subsequent classification by algorithm of Maximum Likelihood Supervised Classification (CSMV) and application of the threshold to Normalized-Difference Snow Index (NDSI) were obtained binary maps with classes 1 (snow) and 0 (not snow). These images were vectorized and then calculated the areas corresponding to the snow cover in kilometers-square (km²). These results were analyzed and related with reanalysis climate data for the meteorological variables of temperature and precipitation, obtaining a pattern of climatic behavior to Darwin mountain range for the last decade. Although the results indicate a snow surface decline over the study period (June 2005 to June 2016), can't be considered as a default behavior. The climatic variability coincided with the occurrence of El Niño during 2015 and 2016, and with decreasing influence of the Antarctic Oscillation in this region. This would directly affect the snow cover in the Darwin mountain range.

Keywords: Darwin Range Mountain, Snow Surface, Remote Sensing, Climate Reanalysis Data.

INTRODUÇÃO

A Criosfera é o componente do sistema Terra que contém água em estado sólido e desempenha um papel fundamental na regulação das funções do clima global. Encontra-se nas altas latitudes, com a presença de geleiras, superfície de neve, mantos de gelo, gelo marinho e *permafrost* (STOCKER *et al.*, 2013). Devido às características de reflexão do gelo e a neve e suas interações físicas com a atmosfera, a Criosfera tem um papel importante no equilíbrio energético global. É por isso que deveria de ser monitorada continuamente em escalas espaciais e temporais (BHARDWAJ *et al.*, 2016).

Os dados de temperatura da superfície da terra e do oceano, combinados com a média global, mostram um aquecimento de 0,85° C durante o período 1880 – 2012 (STOCKER *et al.*, 2013), como consequência a atmosfera e o oceano têm aquecido, a quantidade de neve e de gelo têm diminuído, e o nível do mar tem elevado (PACHAURI *et al.*, 2014).

Diversos pesquisadores documentaram as mudanças na Criosfera nas últimas décadas, como por exemplo, os desprendimentos de plataformas de gelo, a diminuição da espessura

das geleiras e a redução da área de neve e de gelo marinho estacional e permanente (SEBENCAMPANA; ROSA & SIMÕES, 2015). Por exemplo, confirmou-se que a maioria das flutuações nas geleiras são geradas por aumentos de temperatura detectadas nas diferentes estações climáticas (RIVERA *et al.*, 2000).

A caracterização das superfícies de neve e sua extensão são fundamentais para compreender a dinâmica da Criosfera (RITTGER; PAINTER & DOZIER, 2013), já que é um fator crítico nos balanços energéticos regionais e globais devido a seu alto albedo. De acordo com Dong e Menzel (2016) a permanência da superfície de neve está influenciada, principalmente, pelas condições climáticas regionais e está-se tornando em um valioso indicador para compreender as mudanças climáticas.

Na patagônia, a redução das áreas glaciais é particularmente notória (MASIOKAS *et al.*, 2009; LOPEZ *et al.*, 2010). Ao sul dos 49°S, os campos de gelo patagônico estão sujeitos a uma precipitação bem distribuída durante todo o ano, mostrando certa estacionalidade na acumulação de neve durante o inverno (SAGREDO & LOWELL, 2012). Warren e Aniya (1999) afirmam que no setor ocidental

da cordilheira Darwin, localizada entre os 54° 20'S – 55° 00'S e os 68° 15'O – 71° 20'O, as flutuações das geleiras de alta montanha podem ser dirigidas pelas variações das precipitações, enquanto que as do setor oriental responderiam, principalmente, as mudanças das temperaturas. Enquanto que Fujita (2008) asseguram que as geleiras com acumulação de verão são mais sensíveis à temperatura que aqueles com acumulação de inverno.

Porém, a falta de observações sistemáticas nessas áreas de difícil acesso geográfico impossibilita uma estimativa mais acurada da dinâmica das superfícies de neve e sua relação com as condições climáticas na cordilheira Darwin.

1.1 Sensoriamento remoto aplicado a Criosfera e o comportamento espectral da neve e gelo

O Sensoriamento Remoto (SR) refere-se a qualquer observação aérea ou espacial utilizando radiação eletromagnética com o objetivo de analisar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície da Terra (REES, 2005). É uma ferramenta que tem permitido melhorar o conhecimento dos processos de nevadas nos glaciais de montanha, já que permitem uma grande cobertura espacial e uma amostragem temporal regular (em tempo quase real), que possibilitam uma estimativa mais exatidão da presença de gelo e neve sobre aquelas áreas de difícil acesso (CORTÉS; GIROTTO & MARGULIS, 2014).

Para o estudo da Criosfera, o SR permite analisar e determinar vários dos parâmetros da neve e gelo (OLIVEIRA *et al.*, 2013), entre eles a refletância, processo pela qual a radiação de um objeto é refletida (JENSEN, 2009; BICCA, 2012), e que varia entre 1 e 0 (PETSCH, 2014). As diferenças nas refletâncias medidas em valores numéricos e em faixas de comprimento de onda diferentes permitem a delimitação de superfícies glaciais como também a classificação dos tipos de superfície (Figura 1) (REES, 2005; PETSCH; SIMÕES & LUDERITZ, 2013).

A superfície glacial, composta por neve seca e úmida, *firn* (transformação de neve para gelo) e gelo, tem suas próprias características de refletância. A neve possui alta refletância na parte visível do espectro eletromagnético (80 - 97%) (PETSCH, 2014). O *firn* tem uma refletância de 25 - 30% menor que a neve recém caída. A refletância do gelo é moderadamente

baixa nos comprimentos de onda do espectro do visível (40 - 70%) (ZENG *et al.*, 1984; ARIGONY-NETO, 2006; BICCA, 2012; PETSCH, 2014).

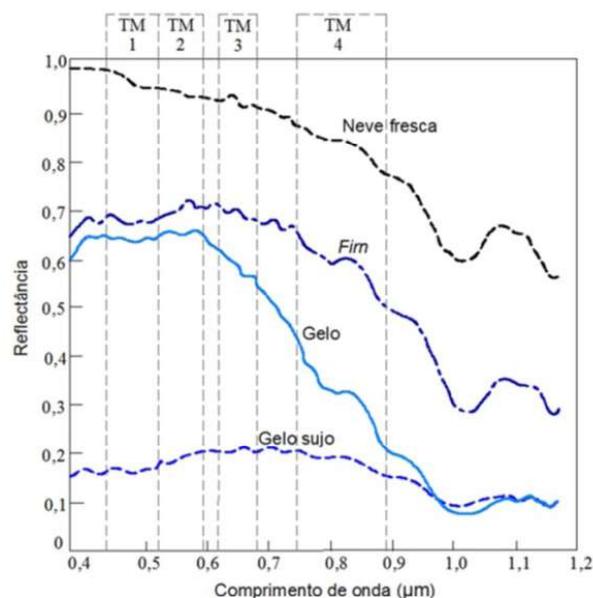


Fig. 1 - Comportamento espectral da neve e gelo. Fonte: Petsch (2014).

1.2 Caracterização climática da patagônia austral

A variabilidade do clima na patagônia austral é importante por si mesma como um fator chave das mudanças locais na Criosfera (GARREAUD *et al.*, 2013). O clima é claramente oceânico, temperado e super úmido (BERTRAND *et al.*, 2014), e com cobertura de nuvens quase permanente (WARREN & ANIYA, 1999). Tem altos níveis de congelamento, geralmente acima dos 1000 m, um ciclo estacional modesto e uma precipitação média anual em torno de 5000 - 10000 mm (GARREAUD *et al.*, 2013). As chuvas são fortemente influenciadas pela presença da cordilheira Darwin, sendo que a ocorrência das mais persistentes e intensas são entre maio e setembro. Adicionalmente, fortes ventos são característicos na maior parte do ano e a temperatura média anual da cordilheira Darwin é de 7, 4°C (SAGREDO & LOWELL, 2012).

A precipitação no lado oeste da cordilheira Darwin é parcialmente controlada pelo cinturão de ventos de oeste (TOGGWEILER, 2009; GARREAUD *et al.*, 2013), o que permite manter as geleiras temperadas que compõem os campos de gelo da região (MORENO *et al.*, 2012; BERTRAND

et al., 2014). Recentes estudos propõem que as mudanças latitudinais e as variações de intensidade dos ventos de oeste têm desempenhado um papel fundamental na promoção das mudanças climáticas em escala global e no hemisfério sul (GILLET & THOMPSON, 2003; MORENO et al., 2012). Mas, são necessários estudos adicionais que complementem as evidências empíricas atuais, para provar a hipótese descrita por Moreno et al. (2012).

As anomalias nas temperaturas e precipitações regionais teriam relação, principalmente, com as diferenças na pressão atmosférica entre latitudes médias e altas e com a influência dos ventos de oeste, fenômeno conhecido como Oscilação Antártica (OA) (GILLET & THOMPSON, 2003; GONZÁLEZ-REYES & MUÑOZ, 2013). Desde a década de 1950 até o presente este fenômeno apresentou importantes mudanças com um marcado enfraquecimento dos ventos de oeste nas zonas de latitude média e seu posterior deslocamento e intensificação para latitudes altas e polares durante outono e inverno, épocas em que, regularmente, se deslocam desde latitudes

altas para as médias (GILLET, KELL & JONES, 2006; TOGGWEILER, 2009; GONZÁLEZ-REYES & MUÑOZ, 2013).

Nesta região, também exerce influência o fenômeno *El Niño/Southern Oscillation (ENSO)*, o qual é caracterizado por alterações na interação oceano-atmosfera sobre o oceano Pacífico Equatorial que causam mudanças no balanço térmico/hídrico em escala planetária com ocorrência entre 5 e 7 anos, afetando assim, os regimes de chuva em regiões tropicais e de latitudes médias (GRIMM, 2009).

O objetivo do presente estudo é analisar o desempenho das metodologias Classificação Supervisionada de Máxima Verossimilhança (CSMV) e Índice de Neve por Diferença Normalizada (*NDSI, Normalized Difference Snow Index*) aplicada na obtenção da superfície coberta de neve na cordilheira Darwin (Figura 2), e relacionar esses resultados com dados climáticos de Reanálise II da *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* e a *National Center for Atmospheric Research (NCAR)*.

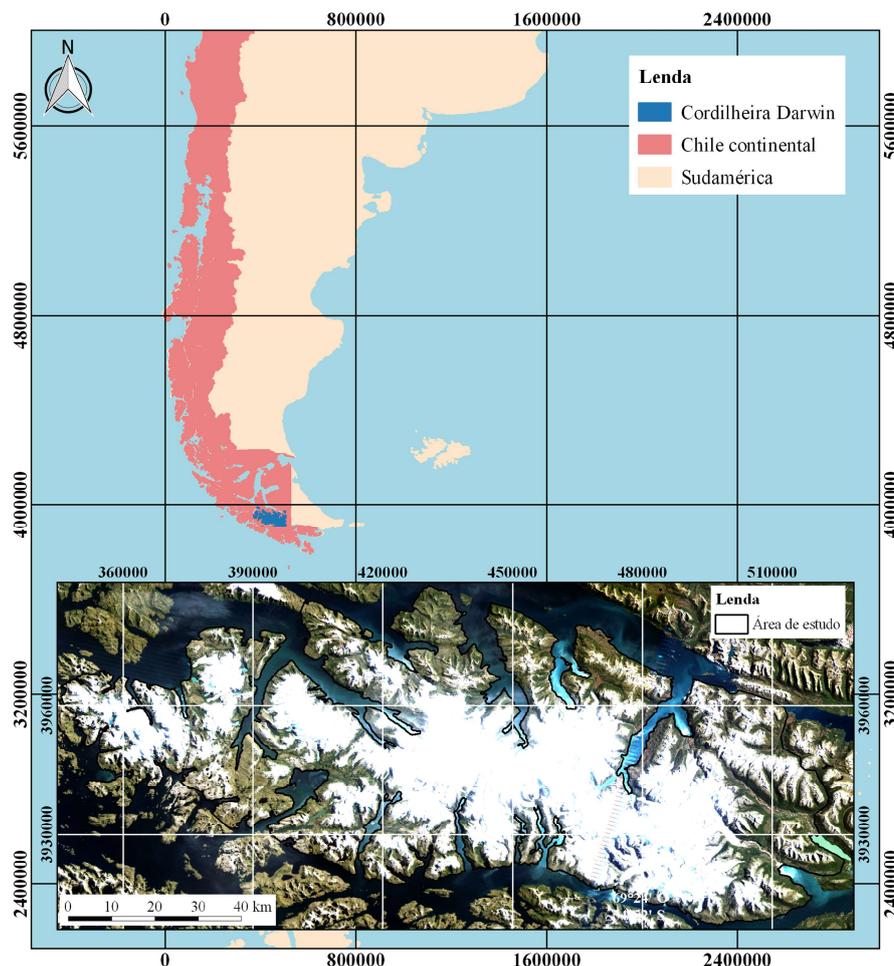


Fig. 2 - Localização da Cordilheira Darwin na patagônia austral do Chile. Imagem de fevereiro de 2005, mosaico *LANDSAT 5 TM*, Composição de bandas RGB (321).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia visa integrar diferentes bancos de dados e técnicas de processamento, com intuito de ampliar as análises de caracterização e compreensão da variabilidade da extensão da superfície coberta de neve na cordilheira Darwin.

2.1 Área de Estudo

No extremo sul da patagônia, os Andes desviam-se para leste dando origem a cordilheira Darwin, um proeminente e dobrado cordão orogênico de disposição leste - oeste (ALLAMAND; URBINA; PIRZIO-BIROLI, 2007) e está limitada ao norte pelo Seno Almirantazgo e ao sul pelo Canal do Beagle, (CUNNINGHAM, 1995; LOPEZ *et al.*, 2010). As elevações alcançadas nas cumeadas da cordilheira são superiores aos 2000 m e, em conjunto com as altas latitudes em que se localiza, permitem a existência de uma superfície glacial permanente (ALLAMAND; URBINA & PIRZIO-BIROLI, 2007).

2.2 Dados

A metodologia utiliza imagens *LANDSAT* 5 e 8 a fim de analisar um período superior a uma década, e relacionar as variações da extensão da cobertura de neve na cordilheira Darwin com dados climáticos.

2.2.1 Imagens de Satélite

Imagens de satélite *LANDSAT* foram selecionadas para análises do registro da extensão da cobertura de neve de acordo com a disponibilidade temporal (Tabela 1) e registros com o mínimo de cobertura de nuvens. Sendo usado diferentes series do sistema *LANDSAT* e modelos digital de elevação, apresentadas a seguir:

- *Thematic Mapper (TM) - LANDSAT 5*: Proporciona uma cobertura multi-espectral avançada, com média resolução espacial e discriminação espectral entre objetos da superfície terrestre. Inclui 7 bandas espectrais (Tabela 2) com dados derivados em 8 bits. Uma resolução de 30 m nas bandas 1 - 5 e 7, enquanto que para a banda 6 é de 120 m (USGS, 2016).
- *Operational Land Imager (OLI) e Thermal Infrared Sensor (TIRS) - LANDSAT 8*: Contem 11 bandas espectrais (Tabela 2) e os

dados estão derivados em 16 bits e podem ser re-escalados a valores de refletância e radiância de superfície.

- *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) - Global Digital Elevation Model (GDEM2)*: Tem resolução espacial de 1 arco-segundo, uma precisão global de 17 m e aproximadamente 30 m na linha do Equador. Referenciada para o *World Geodetic System 1984 (WGS84)* (BICCA, 2012). Abrange entre os 83°N e 83°S.

Os sensores obtêm simultaneamente bandas multi-espectrais da superfície terrestre, medidas no espectro visível, infravermelho próximo e porções do infravermelho de ondas curtas e infravermelho termal. Essas faixas espectrais têm 30 m de resolução espacial junto com 190 km de largura. O sensor *OLI* proporciona uma melhoria na relação sinal-ruído. Enquanto o sensor *TIRS* mede a emitância, relacionada à temperatura da Terra em duas faixas térmicas (infravermelho termal), detectando os comprimentos de onda da radiação emitida pela Terra, cuja intensidade depende da temperatura da superfície (NASA, 2016).

Considerando sua disponibilidade, selecionaram-se imagens de satélite do período invernal, empregando quatro imagens do sensor *TM - LANDSAT 5 (L5TM)* do mês de junho dos anos 2005 e 2006, e duas imagens dos sensores *OLI/TIRS LANDSAT 8 (L8OT)*, correspondente a junho de 2016, cobrindo 100% da cordilheira Darwin. Para a geração do mosaico *ASTER GDEM2* foram usadas quatro imagens com projeção *Universal Transversal de Mercator (UTM) 19°S*.

Imagens *LANDSAT* e *ASTER- GDEM2* encontram-se disponíveis gratuitamente no sítio eletrônico do *Earth Explorer* do Serviço Geológico Americano (*USGS*, por suas siglas em inglês), através do endereço eletrônico <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

2.2.2 Dados climáticos

Seguidamente, descrevem-se os dados climáticos empregados.

- *Dados climáticos de reanálise*: Obtidos por modelagem numérica, os que são disponibilizados pelo *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* e a

National Center for Atmospheric Research (NCAR) através de uma grade Gaussiana com uma resolução média de 1,85° de latitude e longitude, visto que a grade tem 94 linhas e 192 colunas. Os dados corresponderam ao projeto Reanálises II do NCEP/NCAR, o qual gera um produto com menor erro, visto que os erros de localização das observações (no projeto Reanálise I) foram corrigidos (KISTLER, 2001).

Os produtos dos Reanálise II, quando comparados aos dados das reanálises do *ERA 15* do *ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasting)*, mostram-se confiáveis, particularmente sobre o Pacífico Sudeste. Isso corrobora com a hipótese de que as correções foram integradas corretamente (KANAMITSU *et al.*, 2002). Adicionalmente, os dados de temperatura e de precipitação são de classes A e B das reanálises, respectivamente. Nesse contexto, os dados de temperatura são fortemente influenciados por observações, consequentemente possuem os menores erros. Já

os dados de precipitação são influenciados pelas observações e modelagem, contendo maiores erros, quando comparados aos dados da classe A (KALNAY *et al.*, 1996). Mas os dados de precipitação de áreas remotas e com precipitação de neve são fundamentais para as pesquisas, visto que não há observações meteorológicas sistemáticas, bem como, a tecnologia para mensurar o volume de água precipitada em neve é caro e consome energia elétrica, restringindo seu uso em ambientes urbanos. Consequentemente, os dados de reanálise tornam-se fundamentais para a compreensão da dinâmica ambiental dessas áreas remotas.

- Índice do Niño Oceânico (INO): A *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* utiliza o INO para identificar as fases quentes - El Niño e frios - La Niña, o índice é calculado a partir da média móvel de 3 meses a partir das anomalias de temperatura superficial do oceano Pacífico Equatorial (GONG & WANG, 1999).

Tabela 1: Cenas *LANDSAT* selecionadas, suas datas e a construção de mosaicos

ID <i>LANDSAT</i> cena	Data aquisição	ID Mosaico
<i>LANDSAT 5 TM</i>		
LT52270982005166COA00	15/06/2005	LJ05
LT52280982005173COA00	22/06/2005	
LT52260982006162COA00	11/06/2006	LJ06
LT52280982006176COA00	25/06/2006	
<i>LANDSAT 8 OLI TIRS</i>		
LC82280982016172LGN00	20/06/2016	LJ16
LC82260982016174LGN00	22/06/2016	

Tabela 2: Disposição e empilhamento das bandas utilizadas no pre-processamento e processamento das imagens

<i>LANDSAT 5 TM</i>		<i>LANDSAT 8 OLI TIRS</i>	
Bandas	Long. onda (µm)	Bandas	Long. onda (µm)
1 - Azul	0.45-0.52	2 - Azul	0.45 - 0.51
2 - Verde	0.52-0.60	3 - Verde	0.53 - 0.59
3 - Vermelho	0.63-0.69	4 - Vermelho	0.64 - 0.67
4 - Infravermelho próximo	0.76-0.90	5 - Infravermelho próximo	0.85 - 0.88
5 - Infravermelho próximo	1.55-1.75	9 - Nuvens cirrus	1.36 - 1.38
7 - Infravermelho médio	2.08-2.35	6 - SWIR 1	1.57 - 1.65
		7 - SWIR 2	2.11 - 2.29

2.3 Métodos de obtenção da superfície de neve

A identificação da extensão da cobertura de neve foi realizada empregando duas técnicas, a Classificação Supervisionada de Máxima Verossimilhança (CSMV) e Índice de Neve por Diferença Normalizada (NDSI), além disso, os seus resultados foram comparados a fim da identificação da melhor técnica de classificação. Nesse contexto, todas as imagens foram pré-processadas igualmente, seguindo os parâmetros descritos a seguir.

2.3.1 Pré-processamento das imagens de satélite

As bandas foram selecionadas avaliando o uso de longitudes de onda e resolução semelhantes. Assim, para as imagens L5TM eliminou-se a banda seis devido a sua faixa de termal única e menor resolução espacial. Já a respeito da imagem L8OT, não se consideraram as bandas *coastal/aerossol* (banda 1), pancromática (banda 8) e as infravermelhas termais (bandas 10 e 11).

O pré-processamento foi executado no software *ENVI 5.0* ®. O mesmo consistiu em um empilhamento de bandas a reprojeção de coordenadas para o sistema *WGS84* com projeção *UTM 19°S*. Sequencialmente, as mesmas foram calibradas, convertendo os números digitais (ND) para radiância a plicando a equação 1 e, corrigidas atmosféricamente através do método da Subtração do Pixel Escuro (*DOS, Dark Object Subtraction*) (CHAVEZ, 1988), obtendo-se pixels em valores de refletância aparente ou Refletância ao Topo da Atmosfera (*TOA, Top Of Atmosphere*) através de equação 2.

$$L' = (a * (ND)) + b$$

$$a = \text{ganho} = (L_{max} - L_{min}) / ND_{max} \quad (1)$$

sendo:

$a = \text{ganho}$

$b = \text{Offset} = L_{min}$

ND = Valor de nível de cinza representando o valor de radiância quantizado pelo sensor;

L_{min} = O valor de radiância mínimo o qual o sensor abrange;

L_{max} = O valor de radiância máximo o qual o sensor abrange;

ND_{max} = O valor máximo de ND com base na

resolução radiométrica da imagem, dado por: $ND_{max} = 2(n^{\circ}\text{bits})1$. A exemplo, para uma imagem quantizada em 8 bits, temos: $ND_{max} = 2(8)1 = 255$;

L' = O novo valor de radiância obtido.

Os valores de L_{max} e L_{min} representam os números onde o equivalente em ND's registra um pixel com a menor radiância adquirida pelo sensor. A transformação da imagem de ND's para radiância recupera o contraste original da cena da aquisição.

Os valores para esta transformação estão disponíveis no arquivo de metadados das imagens.

$$P_{dos} = j * (ND - ND_{esp}) \quad (2)$$

sendo:

j = Medida estimada a partir da distância Terra – Sol, do ângulo de elevação solar e do cosseno do ângulo zenital solar;

ND = Números digitais da imagem a ser corrigida;

ND_{esp} = Espalhamento atmosférico calculado para o sensor;

O parâmetro distancia Terra-Sol foi adquirido da planilha eletrônica facilitada pela *NOAA*, disponível no endereço <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/calcdetails.html>.

Por fim, para permitir a comparação espacial entre os resultados, executou-se o *co-registro* das cenas. Para as imagens dos anos 2005 e 2006 utilizou-se uma imagem L5TM de fevereiro de 2005 e para as imagens do 2016 aplicou-se outra do sensor L8OT de agosto de 2013. Elas apresentaram uma baixa cobertura de nuvens. O Erro Médio Residual (*RMS*, por suas siglas em inglês) obtido foi de 0,373. Com isso se procedeu à construção dos mosaicos para as imagens correspondentes ao mês junho de 2005, 2006 e 2016 cobrindo, aproximadamente, desde os 54° 27'S - 71° 20'O até 54° 50'S - 68° 37'O.

2.3.2 Processamento das imagens de satélite

Se baseou em duas metodologias, desenvolvidas no *ENVI 5.0* e *QGIS 2.14.6*:

- CSMV: Baseada na aquisição de regiões de interesse, com a obtenção de conjuntos de pixels que possuem uma assinatura espectral

comum e que indica tipos específicos de alvo (PETSCH *et al.*, 2014). Se definiram dois tipos de classes: neve como classe 1 e não neve como classe 0. Foi aplicada sobre imagem multiespectral, obtendo um mapa binário.

- **NDSI:** Utiliza as bandas de alta reflectância do espectro visível e a baixa reflectância do infravermelho de onda curta, através das seguintes equações:

$$NDSI_{L5TM} = (b2 - b5) / (b2 + b5) \quad (3)$$

$$NDSI_{L8OT} = (b3 - b6) / (b3 + b6) \quad (4)$$

Os valores do *NDSI* variam entre -1 e 1, conforme mostrado na Figura 3 (BICCA, 2012). Para determinar a presença de neve e devido a constante presença de nuvens, o que poderia afetar nos cálculos de superfície nevada, foi utilizado um algoritmo de classificação por limiares, onde a presença de neve pode ser admitida quando o valor do *NDSI* é superior a 0,4 (DOZIER, 1989). Alguns estudos indicam que o limiar ótimo pode variar sazonalmente (BICCA, 2012).

O *NDSI* obtido para os mosaicos de junho 2005 e junho 2006 foi classificado como 1 (neve) quando os valores foram superiores ao limiar 0,4 e como 0 (não neve) quando foram os menores (Figura 3, Tabela 3). As áreas mais elevadas voltadas para o norte foram qualificadas com valor 0 por o *NDSI*, o que poderia ter explicação na saturação dos pixels devido ao ângulo solar, a topografia e a orientação do terreno (Figura 4). Em contraposição, a CSMV qualificou elas com valor 1.

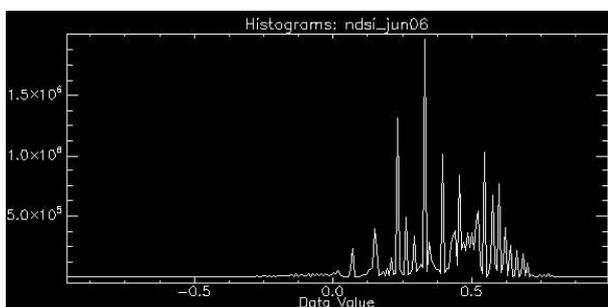


Fig. 3 - Histograma do *NDSI* LJ06 com valores que vão entre -1 e 1. Neste caso o limiar aplicado foi 0,4.

Tabela 3: Estatísticas do mosaico LJ06 obtidas a partir do cálculo do *NDSI*

Basic Stats	Min.	Max.	Mean	Stdev
Band 1	-0.9603	0.9900	0.4010	0.1821

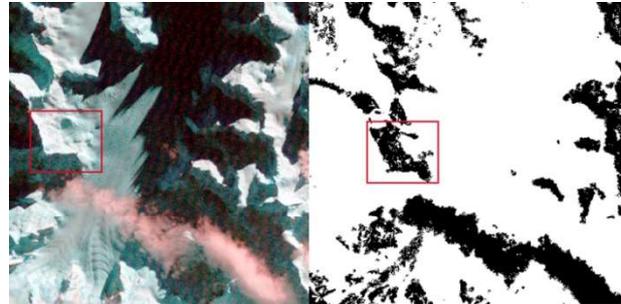


Fig. 4 - Em quadro vermelho um exemplo de uma área exposta a uma alta radiação solar, a que foi qualificada com valor 0 por o *NDSI*. Porém, não houve dificuldades para atribuir valor 1 as áreas sombreadas.

Na imagem de junho 2016 o limiar definido foi 0,15, devido a que, embora o processamento da imagem fora o correto (obtendo valores de reflectância superficiais concordantes a neve fresca), os valores obtidos a partir do cálculo do *NDSI* permaneceram entre -0.18236 e 0.48056 (Figura 5). Assim, realizou-se um detalhado exame dos valores dos pixels do *NDSI* (Tabela 4), comparando e apoiando-se na classificação obtida a partir da CSMV e definindo o referido limiar. Posteriormente, foi gerada uma imagem binária de neve e não neve nos três mosaicos.

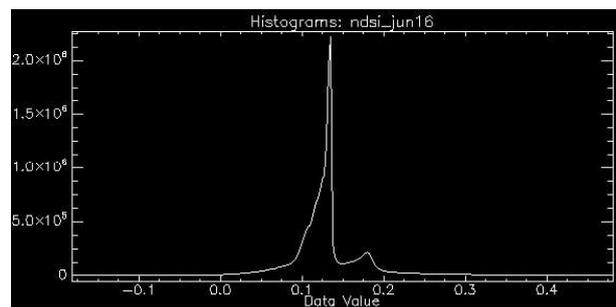


Fig. 5 - Histograma do *NDSI* LJ16 com valores que vão entre -0.18236 e 0.48056. Neste caso o limiar aplicado foi 0,15.

No software *QGIS 2.14.6* nas imagens resultantes das duas metodologias aplicou-se uma máscara perimetral correspondente à cordilheira Darwin, que foi desenvolvida através da obtenção das curvas de nível desde o mosaico

ASTER-GDEM2 e seu posterior aperfeiçoamento através de digitalização manual usando uma escala numérica de 1:15000. Finalmente as imagens foram vetorizadas para calcular as áreas em km² correspondentes a superfície de neve.

2.3.3 Processamento dos dados climáticos

No software *MATLAB* os dados climáticos de reanálise de temperatura e precipitação e do INO dos últimos onze anos foram processados através de funções de matrizes matemáticas e sua posterior

Tabela 4: Estatísticas do mosaico LJ16 obtidas a partir do cálculo do *NDSI*

Basic Stats	Min.	Max.	Mean	Stdev
Band 1	-0.1823	0.4805	0.1327	0.0440

representação através de gráficos do comportamento de cada variável. As coordenadas usadas para representar os dados de reanálise corresponderam a um ponto do setor ocidental de cordilheira Darwin, em 71,25°S e 54,28°O.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O processo metodológico (Figura 6) utilizado permitiu a obtenção de informações geográficas da cordilheira Darwin, que é uma área carente de informações devido ao difícil acesso, e possibilitou uma análise da variabilidade da superfície coberta de neve e climatológica de uma região fortemente impactada pelas mudanças climáticas.

3.1 Áreas de superfície de neve

Após da realização dos processamentos das imagens e da aplicação das metodologias, os resultados da quantificação das áreas cobertas de neve mostram-se na Tabela 5 e representam-se graficamente na Figura 7.

Tabela 5: Áreas da superfície de neve calculadas

Data	Metodologia classificação	
L5TM	CSMV (km ²)	<i>NDSI</i> (km ²)
15/06-22/06/2005	5.588,2	4.957,36
11/06-25/06/2006	5.611,94	5.980,69
L8OT		
20/06 - 22/06/2016	2.947,52	2.996,9

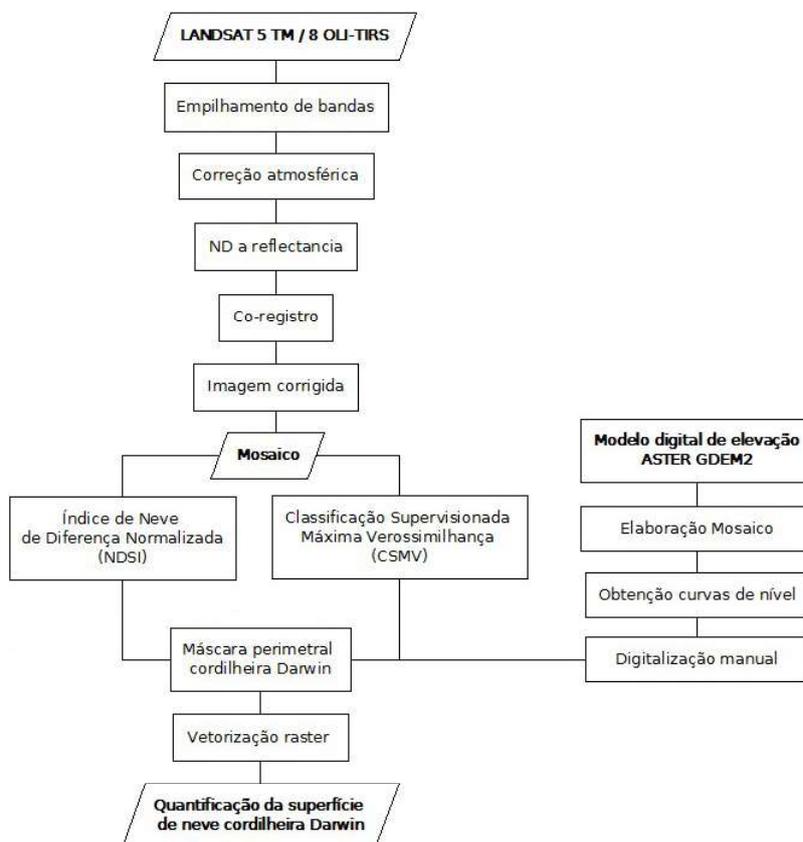


Fig. 6 - Fluxograma dos processos de desenvolvimento metodológico nos softwares *ENVI 5.0* e *QGIS 2.14.6*. para a obtenção da superfície de neve em km².

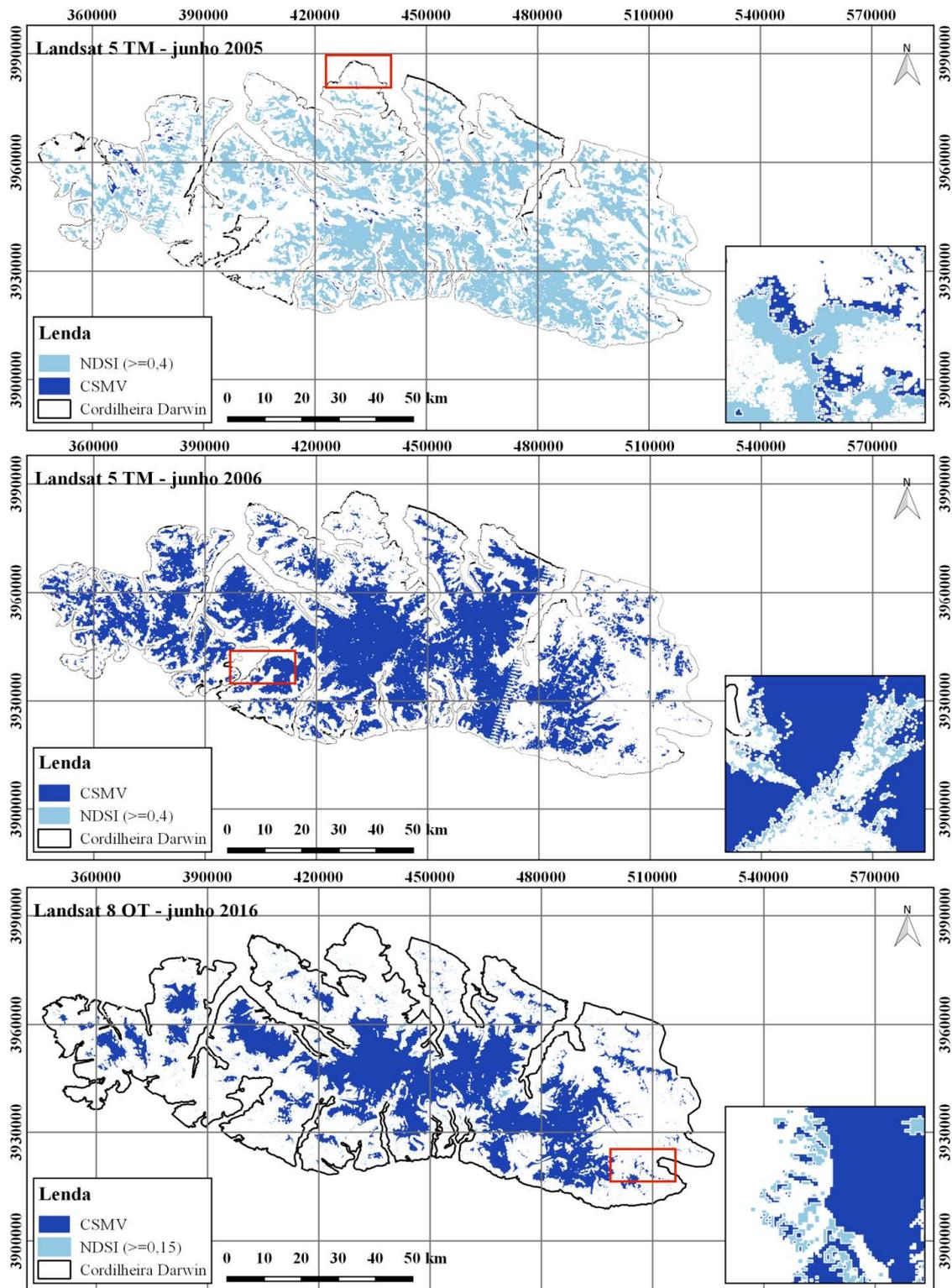


Fig. 7 - Comparação entre as superfícies calculadas com a aplicação das duas metodologias (CSMV e *NDSI*). As Imagens são demonstrativas dos valores apresentados na tabela 5. Ampliações dos mapas são mostradas no canto inferior esquerdo dos mapas e setorizados pelo quadro vermelho.

Conforme os resultados das superfícies calculadas (tabela 5) por cada metodologia aplicada e para as datas referidas:

- CSMV: No mosaico de junho de 2005 foram medidos 23,74 km² (+0,42%) mais que em

junho de 2006. Entre os mosaicos de junho de 2005 e junho de 2016 quantificou-se uma diferença de 2.640,68 km² (-47,25%). Enquanto que entre junho de 2006 e 2016 mediram-se 2.664,42 km² (-47,48%) a menos.

- NDSI: Entre os mosaicos de junho de 2005 e junho de 2006 calcularam-se 1023,33 km² (+17,11%) a mais. Em junho de 2016 mediram-se 1.960,46 km² (-39,55%) a menos que em junho de 2005, e entre junho de 2006 e junho de 2016 a diferença de superfície calculada foi de 2.983,79 km² (-49,89%) a menos.

Comparando os resultados entre as duas metodologias aplicadas (Figura 8):

- Na imagem de junho de 2005 a superfície calculada a partir do CSMV (Figura 8B) foi 630,84 km² (+11,29%) superior à calculada por NDSI (Figura 8A).
- Na imagem correspondente a junho de 2006 o NDSI (Figura 8C) calculou 368,75 km² (+6,17%) mais que o CMSV (Figura 8D).
- Finalmente, na imagem de junho de 2016 o NDSI (Figura 8E) foi 49,38 km² (+1,65%)

superior que o CSMV (Figura 8F), diminuindo a superfície de neve calculada em relação as imagens anteriores.

Atendendo a que a resposta espectral da neve e nuvens é semelhante, o NDSI foi mais seletivo no momento de diferenciar, entre os alvos de neve e nuvens, devido ao uso da banda do infravermelho próximo e um limiar de 0,4 para junho de 2005 e junho de 2006 e de 0,15 para junho de 2016. Também conseguiu reconhecer uma maior quantidade de superfície de neve em junho de 2006 e junho de 2016 baseando-se nos valores de reflectância da neve. Enquanto que a CSMV, para junho de 2005, conseguiu distinguir manualmente uma maior quantidade de pixels correspondentes a superfícies de neve, inclusive em algumas áreas cobertas por nuvens e expostas a alta radiação solar.

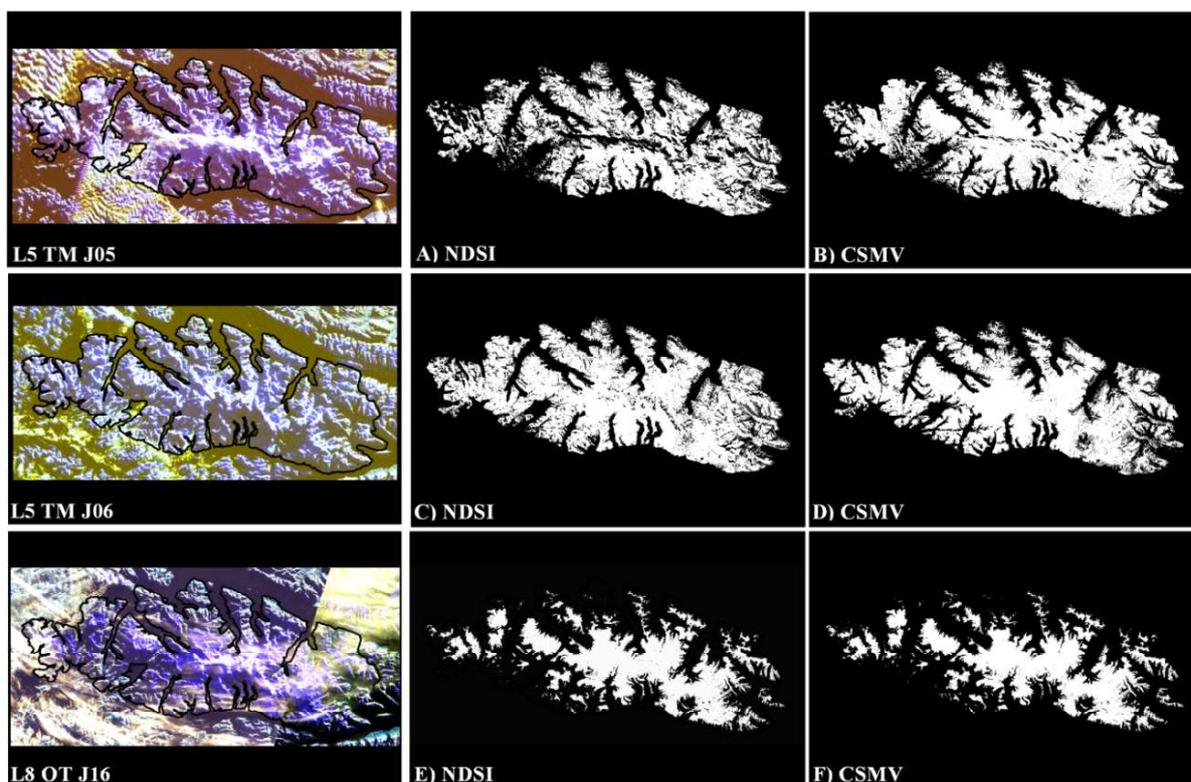


Fig. 8 - Classificação do NDSI e CSMV em valores binários, 1 para neve (branco) e 0 para não neve (preto). Em junho de 2005 e junho de 2006 aplicou-se um limiar 0,4, enquanto que para junho de 2016 0,15. O NDSI mostrasse nas imagens A, C e E, e a CSMV em B, D e F.

Outra característica a considerar é que nesta área os pixels de neve e água líquida mesclam-se, produto do constante descarregamento de gelo e neve nos fiordes. O anterior aconteceu nas imagens de junho de 2005 e junho de 2006, enquanto que a imagem de junho de 2016 não apresentou essa condição. Assim, tornou-se

primordial o uso de uma máscara perimetral da área de estudo.

3.2 Interpretações dos dados climáticos e sua relação com a superfície de neve

Os dados climáticos processados e expostos na Figura 9 sinalam que as maiores precipitações

ocorreram, principalmente, entre dezembro e maio. Também, as datas selecionadas coincidem com dois eventos cálidos (El Niño) e com o último evento frio acontecido (La Niña). Comumente junho e julho registram as menores quantidades de chuvas, uma média de 30 mm, especialmente em 2005, 2006, 2011 e 2016. Da mesma forma, as temperaturas apresentam um ciclo sazonal, com registro das maiores médias mensais (7° - 8°C) no verão austral e as menores (0° - 1°C) no inverno. A acumulação de neve em cordilheira Darwin ocorre, maiormente durante inverno, porque é quando sucede simultaneamente a precipitação de neve e temperaturas médias em torno de zero grau célsius (Figura 9), sendo que no verão ocorre à precipitação de neve e água líquida, essa por sua vez, contribui para a perda

da superfície de neve.

Junho de 2005 foi o mês mais frio da série, já que teve uma temperatura média próxima a 0°C e uma das menores precipitações de toda a série temporal, uma média aproximada de 25 mm. O fato de que na imagem ótica a cordilheira Darwin mostra-se quase totalmente coberta de neve pode ser explicado pelas abundantes precipitações de março e abril (próximos aos 150 mm) e pela baixa média na temperatura, próxima ao ponto de congelação. Somado a isto, a Figura 10 sinala que a partir de 2005 começa um resfriamento do Oceano Pacífico Equatorial e que, posteriormente, mudou-se para latitudes médias, com anomalias térmicas de entre 0,6° a -0,7°C. Foi catalogado como um episódio de El Niño fraco (Figura 10).

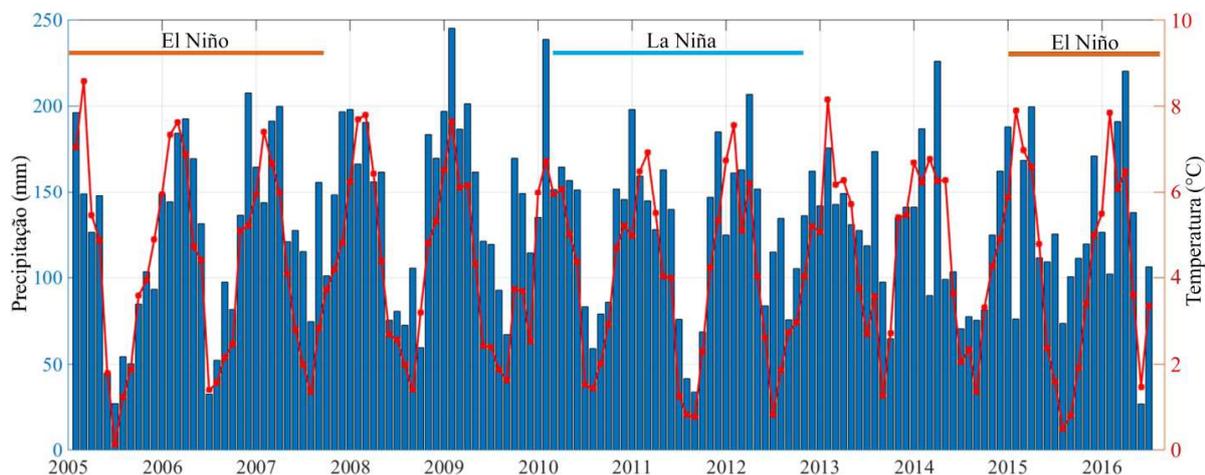


Fig. 9 - Dados meteorológicos de reanálise da série temporal janeiro 2005 - agosto 2016 para cordilheira Darwin. Linhas vermelhas correspondem as medias mensais da temperatura, enquanto que as linhas azuis as médias mensais das precipitações.

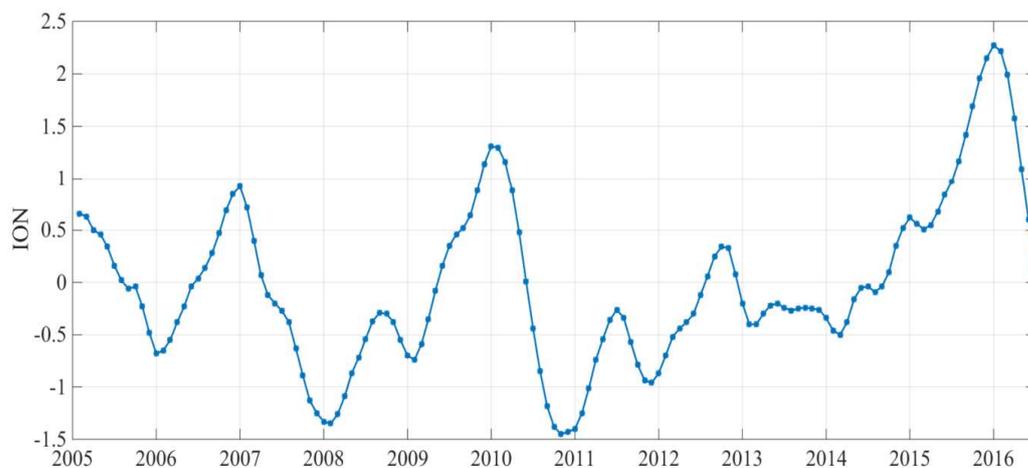


Fig. 10 - INO construído a partir das anomalias de temperatura superficial do oceano Pacífico. Expõe os ciclos de aquecimento e resfriamento que podem afetar o ciclo atmosférico da patagônia austral.

Em junho de 2006 foi registrado um total mensal de precipitação próximo da média histórica e uma temperatura média mensal elevada, próxima aos 1,7°C. Mesmo com temperaturas acima da média histórica foi registrada a existência de uma vasta área coberta por neve. Nesse contexto, destaca-se a necessidade de análises em outras escalas temporais, para averiguar se a superfície de neve é residual dos meses anteriores ou se um evento intenso de precipitações de neve ocorreu nos dias que antecedem a aquisição da imagem.

A primeira hipótese baseia-se na análise das variáveis climáticas durante 2005, quando o acúmulo de neve foi elevado, assim a temperatura do solo permaneceu baixa nos meses posteriores, permitindo manter grande parte da superfície coberta de neve, o que, favorece ao aumento do albedo e a manutenção das baixas temperaturas. Consequentemente, as precipitações de 2006 permaneceram sobre o solo frio, mesmo com as temperaturas elevadas durante verão e inverno. A segunda hipótese baseia-se na ocorrência de precipitações de neve na semana ou dias que antecedem a captura da imagem de satélite de junho 2006, assim não haveria tempo suficiente para o derretimento da neve. Mas para comprovar essa hipótese é necessário trabalhar com dados climáticos diários para identificar os fenômenos atmosféricos dinâmicos que são capazes de gerar precipitações e diminuição das temperaturas em escala temporal inferior a um mês.

A pesar do ciclo sazonal da temperatura, que diminuiu as precipitações de junho de 2005 e junho de 2006, as informações obtidas pelas imagens de satélite permitem determinar que a caída de neve fosse abundante nestas datas, mostrando que o uso do sensoriamento remoto associado às análises de dados climáticos podem revelar valiosas informações geográficas nestas regiões de difícil acesso (CORTÉS *et al.*, 2014).

Em setembro de 2011, uma das menores mínimas nas médias de temperatura foi registrada, acontecida durante um período de resfriamento associada a La Niña com características de fraca. A Figura 10 exhibe as anomalias negativas do INO no inverno de 2011 e que começaram ao princípio desse ano.

Em 2016 (Figura 9) é possível observar que os totais mensais da precipitação estão abaixo da média histórica, enquanto que as temperaturas

estão acima da média histórica, com o registro de 1,7°C em junho. As precipitações do verão foram abaixo da média histórica, mesmo com os registros médios de marco até maio, que são superiores aos 200 mm. Na sequência, outono/inverno, o ciclo sazonal diminuiu as precipitações e as temperaturas, mas é o evento El Niño acontecido durante este ano (e considerado muito forte como mostra-se na Figura 10) quem gera seca (diminuição das precipitações) e anomalias positivas na temperatura. Essa combinação do ciclo sazonal e do El Niño é atribuída à diminuição da área coberta por neve.

Como exemplo, em um contexto geográfico, a área norte e a sul- oeste da cordilheira Darwin são as que tiveram uma diminuição mais notória da superfície de neve, condição que é comum durante os meses de verão.

A diferença entre junho 2006 e junho 2016 tem como explicação a ocorrência durante 2015 e 2016 de um dos três eventos do El Niño mais fortes registrados nos últimos 65 anos. O início do ciclo quente ocorreu durante 2015, com anomalias da temperatura entre os 0,5° e 2,5°C. Além disso, Garreaud *et al.* (2009) relata o deslocamento dos ventos de oeste para latitudes maiores, que está relacionado à fase quente do fenômeno da Oscilação Antártica. Essa fase também determina uma importante diminuição nas precipitações, afetando, principalmente, o lado ocidental da cordilheira Darwin.

O anterior complementa o exposto por Warren e Aniya (1999) referente à que no setor ocidental da cordilheira Darwin as flutuações das geleiras e superfícies nevadas podem ser dirigidas, principalmente, pelas variações nas precipitações mais que por as flutuações das temperaturas. Assim também, Fujita (2008) afirma que as áreas de geleiras com acumulação de inverno, o caso de cordilheira Darwin, são mais sensíveis às precipitações.

CONCLUSÕES

Esta investigação é uma primeira aproximação para quantificar a dinâmica da superfície de neve em cordilheira Darwin e sua relação com as condições climáticas da região. Foram utilizadas imagens orbitais *LANDSAT 5 TM* e *8 OLI TIRS* para calcular a superfície de neve durante dois dias do mês de junho dos anos 2005, 2006 e 2016, e após relacionadas com

dados climáticos de reanálise. Os resultados mostram uma importante diferença negativa da superfície de neve calculada durante as datas selecionadas.

Assim, considerando a geomorfologia montanhosa e acidentada da cordilheira Darwin, as condições climáticas extremas dominantes, assim como também a constante cobertura de nuvens que geram grande quantidade de áreas sombreadas, se concluem que em termos gerais, o *NDSI* e a *CSMV* mostram resultados próximos em quantidade de superfície de neve calculada. Somente em junho de 2005 calculou-se uma maior diferença de superfície de neve através da *CSMV*.

Os limiares aplicados para obter o *NDSI* foram capazes de classificar e diferenciar os alvos correspondentes a áreas de neve e nuvens. Porém, tem algumas restrições no momento de classificar superfícies de neve em áreas expostas a alta radiação solar. Neste mesmo sentido, para ter mais exatidão no momento de diferenciar superfícies, seria necessário aplicar uma máscara de nuvens. Enquanto que para diferenciar os pixels de neve dos corpos de água poderia se aplicar o “Índice Diferencial de Água Normalizado” (*NDWI*, *Normalized Difference Water Index*) ou outras metodologias semelhantes para não subestimar os cálculos de superfície de neve.

É importante explicitar que as análises desenvolvidas a partir dos resultados somente são possíveis de aplicar para as datas expostas neste estudo. Estes resultados não podem ser considerados como um padrão de comportamento da superfície de neve na cordilheira Darwin durante a estação invernal. Para definir uma relação mais precisa entre mudanças na superfície de neve e o clima da patagônia austral do Chile, é necessário ampliar as investigações dos dados climáticos e relacionar eles com índices históricos de fenômenos atmosféricos que afetam a região, assim como também uma amostragem contínua, temporal e espacial, da superfície de neve.

Em relação com o acontecido em junho de 2006, para explicar e confirmar a hipótese exposta é preciso ter uma quantidade de dados climáticos e de satélite de, pelo menos, os últimos 12 meses anteriores.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a CAPES pela concessão da bolsa de Mestrado e a Laboratório de Monitoramento da Criosfera (LACRIO) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLAMAND, F. H.; URBINA, M. B.; PIRZIO-BIROLI, E. G. **Condiciones de formación del complejo metamórfico Cordillera Darwin, al sur del Seno Almirantazgo, Región de Magallanes, Chile**. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, p. 3-7, 2007.

ARIGONY-NETO, J. **Monitoring glacier parameters on the Antarctic Peninsula-a centerline approach combining satellite and GIS data**. Tese (Doutorado). Faculty of Forest and Environmental Sciences, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, Germany, p. 78, 2006.

BERTRAND, S.; HUGHEN, K.; SEPÚLVEDA, J.; PANTOJA, S. Late Holocene covariability of the southern westerlies and sea surface temperature in northern Chilean Patagonia. **Quaternary Science Reviews**, v. 105, p. 195-208, 2014.

BHARDWAJ, A.; SAM, L.; BHARDWAJ, A.; MARTÍN-TORRES, F. J. LiDAR remote sensing of the cryosphere: Present applications and future prospects. **Remote Sensing of Environment**, v. 177, p. 125-143, 2016.

BICCA, C. E. **Variações nas geleiras da porção norte da cordilheira Real durante o período de 1984 a 2010 através do sensoriamento remoto**. Tese (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, p. 27-28, 2012.

CHAVEZ, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24(3), p. 459-479, 1988.

CORTÉS, G.; GIROTTO, M.; MARGULIS, S. A. Analysis of sub-pixel snow and ice extent over the extratropical Andes using spectral unmixing of historical LANDSAT imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 141, p. 64-78, 2014.

CUNNINGHAM, W. D. Orogenesis at the southern tip of the Americas: the structural

- evolution of the cordillera Darwin metamorphic complex, southernmost Chile. **Tectonophysics**, v. 244(4), p. 197-229, 1995.
- DONG, C. & MENZEL, L. Improving the accuracy of modis 8-day snow products with in situ temperature and precipitation data. **Journal of Hydrology**, v. 534, p. 466-477, 2016.
- DOZIER, J. Spectral signature of alpine snow cover from the LANDSAT Thematic Mapper. **Remote Sensing of Environment**, v. 28, p. 9-22, 1989.
- FUJITA, K. Effect of precipitation seasonality on climate sensitivity of glacier mass balance. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 276(1), p. 14-19, 2008.
- GARREAUD, R.; LOPEZ, P.; MINVIELLE, M.; ROJAS, M. Large-scale control on the Patagonian climate. **Journal of Climate**, v. 26(1), p. 215-230, 2013
- GARREAUD, R. D.; VUILLE, M.; COMPAGNUCCI, R.; MARENGO, J. Present-day South American climate. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 281(3), p. 180-195, 2009.
- GILLET, N. P. & THOMPSON, D. W. Simulation of recent southern hemisphere climate change. **Science, American Association for the Advancement of Science**, v. 302(5643), p. 273-275, 2003.
- GILLET, N.; KELL, T.; JONES, P. Regional climate impacts of the southern annular mode. **Geophysical Research Letters**, v. 33(23), 2006.
- GONG, D. & WANG, S. Definition of Antarctic Oscillation index. **Geophysical Research Letters**, v. 26(4), p. 459-462, 1999.
- GONZÁLEZ-REYES, Á. & MUÑOZ, A. A. Cambios en la precipitación de la ciudad de Valdivia (Chile) durante los últimos 150 años. **Bosque (Valdivia)**, v. 34(2), p. 200-213, 2013.
- GRIMM, A. M. Variabilidade interanual do clima no Brasil, in: Cavalcanti, I.F., Ferreira, A.N.J., Justi da Silva, M.G., Silva Dias, M.A.F. (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. 1ª ed. Oficina de Textos, São Paulo, pp. 353-374, 2009.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese Editora, p. 53, 2009.
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAN, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K. C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; LEETMA, A.; REYNOLDS, R.; JANNE, R.; JOSEPH, D. - The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, p. 437-470, 1996.
- KANAMITSU, M.; EBISUZAKI, W.; WOOLEN, J.; YANG, S. K.; HNILO, J. J.; FIORINO, M.; POTTER, G. L. Ncep-doe amip-ii reanalysis (r-2). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83(11), p. 1631-1643, 2002.
- KISTLER, R.; COLLINS, W.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLEN, J.; KALNAY, E.; VAN DEN DOOL, H. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. **Bulletin of the American Meteorological society**, v. 82(2), p. 247-267, 2001.
- LOPEZ, P.; CHEVALLIER, P.; FAVIER, V.; POUYAUD, B.; ORDENES, F.; OERLEMANS, J. A regional view of fluctuations in glacier length in southern South America. **Global and Planetary Change**, v. 71(1), p. 85-108, 2010.
- MASIOKAS, M. H.; RIVERA, A.; ESPIZUA, L. E.; VILLALBA, R.; DELGADO, S.; ARAVENA, J. C. Glacier fluctuations in extratropical South America during the past 1000 years. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 281(3), p. 242-268, 2009.
- MORENO, P. I.; VILLA-MARTÍNEZ, R.; CÁRDENAS, M. L.; SAGREDO, E. A. Deglacial changes of the southern margin of the southern westerly winds revealed by terrestrial records from SW Patagonia (52 S). **Quaternary Science Reviews**, v. 41, p. 1-21, 2012.
- NASA. LANDSAT 8. Disponível em: http://LANDSAT.gsfc.nasa.gov/?page_id=4071. Acesso em: 13 de maio de 2016, 2016.
- OLIVEIRA, A. M. S. D. F. **Variações na extensão da cobertura de gelo do nevado**

- Cololo, Bolívia.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, p. 24, 2013.
- PACHAURI, R. K.; ALLEN, M. R.; BARROS, V. R.; BROOME, J.; CRAMER, W.; CHRIST, R.; DUBASH, N. K. **Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** (p. 151). IPCC, p. 2, 2014.
- PETSC H, C. **Sensoriamento remoto da calota de gelo da ilha Renaud-Antártica.** Tese (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, p. 37-63, 2014.
- PETSCH, C.; SIMÕES, J.; LUDERITZ, D. **Proposta de metodologia para diferenciação de alvos glaciais na península Antártica.** Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p. 3979-3985, 2013.
- REES, W. G. **Remote sensing of snow and ice.** [S.l.]: CRC press, p. 23, 2005.
- RIVERA, A.; CASASSA, G.; ACUNA, C.; LANGE, H. Variaciones recientes de glaciares en Chile. **Investigaciones geográficas**, n. 34, p. 29, 2000.
- RITTGER, K.; PAINTER, T. H.; DOZIER, J. Assessment of methods for mapping snow cover from modis. **Advances in Water**, v. 51, p. 367-380, 2013.
- SAGREDO, E. & LOWELL, T. Climatology of andean glaciers: A framework to understand glacier response to climate change. **Global and Planetary Change**, Elsevier, v. 86, p. 101-109, 2012.
- SEBEN-CAMPANA, A.; ROSA, K. K.; SIMÕES, J. O uso do sensoriamento remoto na detecção de mudanças na geleira Znosco, ilha Rei George, Antártica. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 919-924, 2015.
- STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; ALEXANDER, L. V.; ALLEN, S. K.; BINDOFF, N. L.; FORSTER, P. **Technical summary. In Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** (pp. 33-115). Cambridge University Press, p. 2, 2013.
- TOGGWEILER, J. Shifting westerlies. **Science**, v. 323(5920), p. 1434-1435, 2009.
- USGS. LANDSAT 5 TM. Disponível em: http://LANDSAT.usgs.gov/about_LANDSAT5.php. Acesso em: 13 de maio de 2016, 2016.
- WARREN, C.; ANIYA, M. The calving glaciers of southern South America. **Global and Planetary Change**, v. 22(1), p. 59-77, 1999.
- ZENG, Q.; CAO, M.; FENG, X.; LIANG, F.; CHEN, X.; SHENG, W. Study on spectral reflection characteristics of snow, ice and water of northwest China. **Scientia Sinica Series B-Chemical Biological Agricultural Medical & Earth Sciences**, v. 27(6), p. 647-656, 1984.