



Mapeamento do Gelo Marinho na Península Antártica com Imagens Sentinel 1A Map of the Sea Ice on Antarctic Peninsula Using Sentinel 1A Images

Fernando Luis Hillebrand¹; Cristiano Niederauer da Rosa¹; Juliana Costi² & Ulisses Franz Bremer¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Polar e Climático, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto
Avenida Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43136, salas 208 e 210, 91501-970, Porto Alegre – RS, Brasil

²Universidade Federal do Rio Grande, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional
FURG Campus Carreiros, Avenida Itália, km 8, s/nº - Anexo do Pavilhão 2, Rio Grande – RS, Brasil

E-mails: fernando.hillebrand@rolante.ifrs.edu.br; cristianonrd@gmail.com; bremer@ufrgs.br; ju.costi@gmail.com

Recebido em: 10/10/2018 Aprovado em: 20/03/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_2_59_71

Resumo

O gelo marinho atua como isolante térmico e na sua ausência o oceano fica livre para emitir calor à atmosfera, provocando alterações na circulação oceânica. O sensoriamento remoto da cobertura de gelo marinho compreende várias técnicas e opera em uma ampla faixa de frequências no espectro eletromagnético. Este trabalho propôs a classificação e identificação de áreas livres de gelo marinho por meio de imagens SAR na banda C, através do satélite Sentinel 1A, sob polarização HH e modo de imageamento IW. Realizou-se a classificação supervisionada pelo método *Random Forest*, com treinamento das amostras através da análise de textura com imagens ópticas do Sentinel 2, classificação não supervisionada *K-Means* e análise de co-polarizações HH/HV em imagens Sentinel 1B, sob modo de imageamento EW. Foram identificados coeficientes de retroespalhamento entre -10,2 a -13,5 dB para *young ice* e/ou *first-year ice*, -17,5 a -19,6 dB ao *new ice* e -23,7 a -26,8 dB a *open water* na região oeste da Península Antártica, no período do inverno austral.

Palavras-chave: *Classificação; Retroespalhamento; RADAR*

Abstract

The sea ice acts as a thermal insulation and in its absence the ocean is free to emit heat to the atmosphere, causing changes in the oceanic circulation. Remote sensing of the sea ice cover comprises several techniques and operates over a wide range of frequencies in the electromagnetic spectrum. This work proposes the classification and identification of free areas of sea ice by means of SAR images in the C band, through Sentinel 1A satellite, under HH polarization and IW imaging mode. The supervised classification was performed using the Random Forest method, with sample training through texture analysis with Sentinel 2 optical images, K-Means unsupervised classification and analysis of HH/HV co-polarizations in Sentinel 1B images under EW imaging. Backscatter coefficients were identified from -10.2 to -13.5 dB for young ice and/or first-year ice, -17.5 to -19.6 dB for new ice, and -23.7 to -26.8 dB to open water in the western region of the Antarctic Peninsula during the austral winter.

Keywords: *Classification; Backscatter; RADAR*

1 Introdução

O gelo marinho tem potencial de influenciar o clima da Terra através do balanço de energia em função do albedo, alteração na formação de águas profundas que afeta a circulação oceânica, troca de calor, umidade e carbono (Simpkins *et al.*, 2012). Deser *et al.* (2000) ressaltam que o recuo do gelo marinho e, portanto, a redução do albedo nas regiões polares, aumenta a quantidade de radiação solar absorvida pelos oceanos, levando a um incremento no aquecimento, sendo assim é fundamental o contínuo monitoramento do gelo. A Tabela 1 apresenta os tipos de gelo marinho baseados no seu estágio de desenvolvimento que podem ser detectados por sensores remotos (Comiso, 2009).

Um dos métodos para quantificar a cobertura de gelo marinho é o sensoriamento remoto que compreende várias técnicas operando em uma ampla faixa de frequências no espectro eletromagnético. O sensoriamento remoto óptico abrange a parte visível do espectro com comprimentos de onda na faixa de 390 a 700 nm, porém as observações são limitadas nas regiões polares devido à falta de luminosidade solar durante o dia no inverno e pela nebulosidade frequente encontrada no verão. Essas limitações são superadas na faixa do microondas do sensoriamento remoto com comprimentos de onda na faixa de 0,01 m a 1 m. Nesta faixa a atmosfera é quase transparente, pois os comprimentos de onda são maiores não sendo suscetíveis à dispersão atmosférica (Aldenhoff, 2017).

Dentro da faixa do microondas encontra-se o SAR (*Synthetic Aperture Radar*). O SAR consiste em um sistema de sensor ativo RADAR (*Radio Detection And Ranging*) e que gera sua própria fonte de energia eletromagnética, sendo transmitida por meio de microondas com comprimentos de onda mais longos (3 a 25 cm). As microondas atravessam a atmosfera, interagindo com o terreno e produzindo um retroespalhamento desta energia, sendo posteriormente registrada pelo receptor do sensor remoto (Jensen, 2011). Nghiem *et al.* (2007) alertam para a dispersão do retroespalhamento devido a fusão superficial do gelo marinho durante o verão, resultando em incertezas na classificação.

Estágio de Desenvolvimento	Definição
<i>New ice</i>	Termo geral para diferentes tipos de gelo com formação recente. No processo inicial de congelamento a água apresenta-se com aspecto graxoso denominado <i>grease ice</i> . Em regiões onde predominam ventos o <i>grease ice</i> pode formar discos agregados denominado de <i>pancake ice</i> . Já em regiões com baixa incidência de vento o <i>grease ice</i> se solidifica rapidamente formando camadas finas de gelo denominado de <i>nilas</i> .
<i>Young ice e first-year ice</i>	Quando a fina camada de gelo do mar atinge uma espessura de 15 a 30 cm, torna-se <i>young ice</i> . A duração da transição do <i>young ice</i> para o <i>first-year ice</i> depende da temperatura, vento e localização. Em alguns estágios, esses dois tipos são difíceis para discriminar especialmente quando a camada de gelo é deformada e com cobertura de neve.

Tabela 1 Tipos de gelo marinho baseados no estágio de desenvolvimento do gelo. Fonte: Comiso (2009).

Nas imagens SAR podem ser empregados classificadores supervisionados e não supervisionados para diferenciar tipos de gelo, água líquida, concentração e estágio de desenvolvimento do gelo. Dentre os satélites utilizados atualmente para o sensoriamento remoto do meio ambiente está a série constelações de satélites Sentinel, desenvolvido pela ESA (*European Space Agency*) e destinado a dar continuidade nas tarefas de monitoramento ambiental. Atualmente a carga dos satélites da ESA, ERS (*European Remote Sensing*) e ENVISAT (*Environment Satellite*) SAR. O Sentinel 1A foi lançado em 3 de abril de 2014 e o Sentinel 1B em 25 de abril de 2016. Possui sensor SAR que opera na banda C (frequência de 5,405 GHz com comprimento de onda de 5,5465763 cm) nas polarizações H (Horizontal) e V (Vertical) (ESA, 2018).

Zakhvatkina *et al.* (2013) avaliaram a classificação dos tipos de gelo marinho utilizando dados do ENVISAT SAR. Verificaram que os diferentes tipos de gelo marinho possuem retroespalhamento similar na banda C com polarização HH, sendo necessário avaliar as características texturais com o coeficiente de retroespalhamento. Shokr & Sinha (2015) citam

que nos dados SAR ocorre uma redução do retroespalhamento em função do aumento do ângulo de incidência, consequentemente melhorando a discriminação entre gelo marinho e água líquida. A Figura 1 apresenta o comportamento do retroespalhamento da banda C na polarização HH para os diferentes ângulos de incidência na tipificação do gelo marinho durante o inverno.

Scheuchl *et al.* (2004) ressaltaram em seu trabalho que a detecção de água líquida com a estimativa na concentração de gelo na co-polarização HH pelo SAR pode ser melhorada incluindo a polarização cruzada HV, sendo que particularmente em ângulos baixos ($< 35^\circ$), o canal polarizado cruzado poderá fornecer informações complementares sobre o gelo marinho.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho consiste na determinação do comportamento do retroespalhamento das imagens SAR do Sentinel 1A, modo de imageamento IW (*Interferometric Wide swath*) na polarização HH para tipificação do gelo marinho, subsidiando o mapeamento do gelo marinho a oeste da Península Antártica no período de 2016 a 2018, entre os meses de Julho a Outubro.

2 Materiais e Métodos

2.1 Área de Estudo

A pesquisa foi realizada na região oceânica do noroeste da Península Antártica denominada APW (*Antarctic Peninsula West*) com os limites estabelecidos geograficamente conforme a convenção

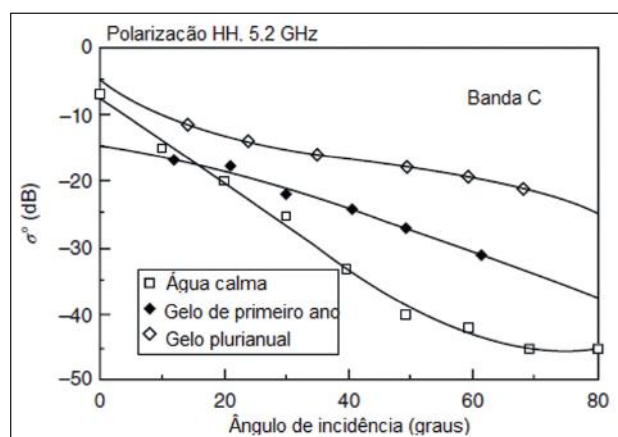


Figura 1 Comportamento do σ^0 da banda C, na polarização HH, para os diferentes ângulos de incidência na tipificação do gelo marinho durante o inverno. Fonte: Shokr & Sinha (2015).

da CCAMLR (*Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources*), apresentado na Figura 2.

Dentro da região continental da Península Antártica se encontra uma cadeia de montanhas ininterruptas com altitudes entre 1.400 a 2.000 m, formando uma barreira climática distinta (Schwerdtfeger, 1984). Na região oeste e central encontra-se um clima marítimo dominado pelo Mar de Bellingshausen e a costa leste tem um clima continental dominado pelo Mar de Weddell (Martin & Peel, 1978). Estes aspectos influenciam no comportamento distinto de formação do gelo marinho na região.

Stein (1989) e Stein & Heywood (1994) relataram que nas regiões oeste e noroeste, os ventos fortes são um mecanismo primário para o transporte das águas mais quentes do Drake para o Estreito de Bransfield. Ao mesmo tempo, ocorre à entrada da fria água do Mar de Weddell pela região oriental do Estreito. Portanto, o vento é um agente importante na regulação do fluxo de calor e sal no Estreito de Bransfield e consequentemente, na regulação da formação do gelo marinho.

O estudo do comportamento do gelo marinho nesta região é muito importante, pois o aquecimento acentuado no inverno da Península Antártica está fortemente ligado a mudanças no gelo do mar localizado a oeste da península apresentando uma retração de 10% em sua extensão por década, acompanhado com o encurtamento da sua duração sazonal (Bentley, 2015).

2.2 Dados do Satélite Sentinel 1 e 2

O Sentinel 1 é composto pelos satélites 1A e 1B, podendo obter imagens SAR em até quatro modos de imageamento: IW (*Interferometric Wide swath*) com uma largura de faixa de 250 km e resolução de 5 x 20 m, WV (*Wave mode*) a 20 x 20 km e resolução de 5 x 5 m, SM (*Strip Map*) a 80 km largura de faixa e resolução de pixel de 5 x 5 m e EW (*Extra-Wide swath*) com largura de faixa de 400 km e resolução de pixel de 20 x 40 m (Figura 3). Nos produtos disponibilizados também encontram-se três níveis de processamento incluindo o

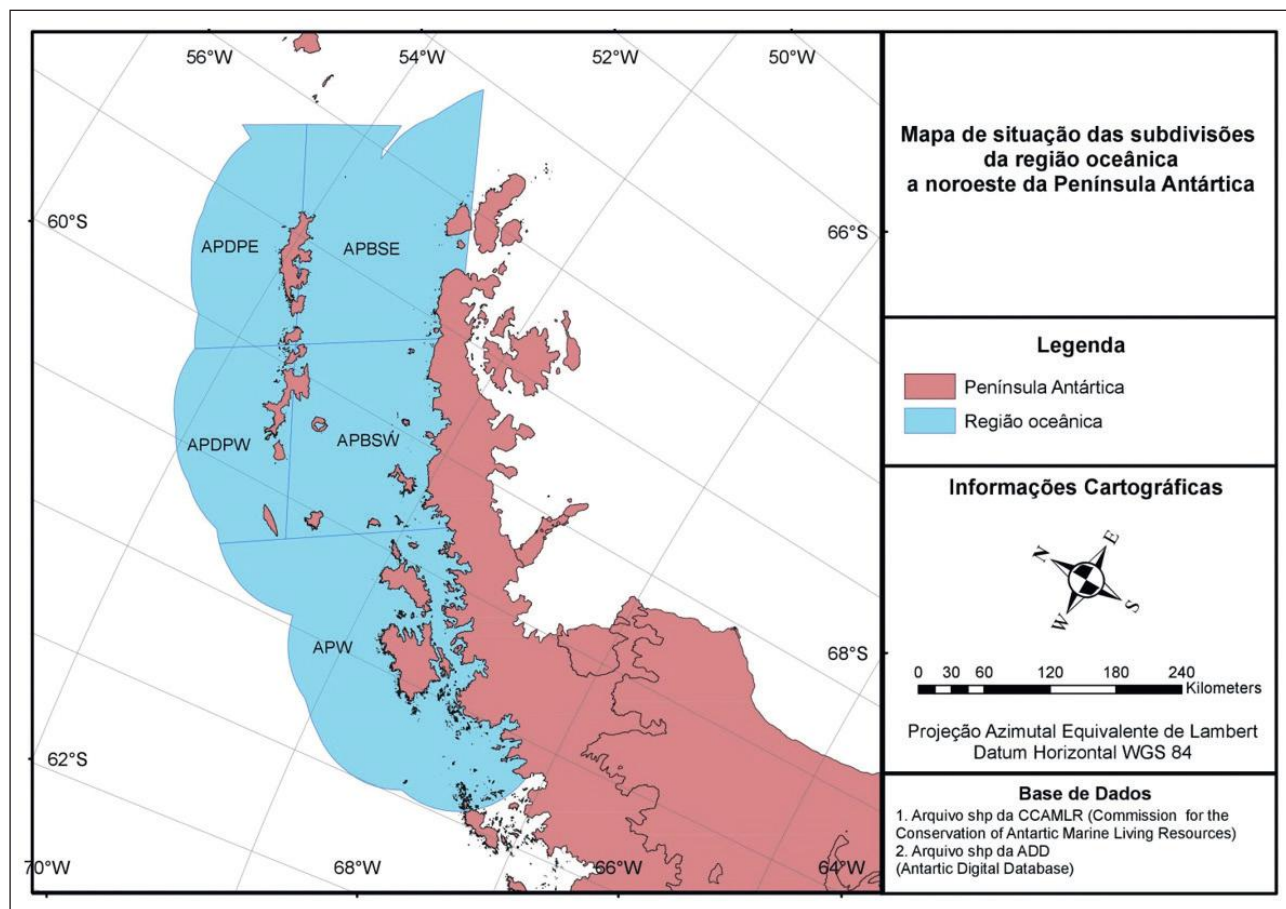


Figura 2 Localização da subárea APW, situado na região noroeste da Península Antártica, conforme divisão definida pela convenção da CCAMLR.

Level-0, Level-1 e Level-2. O Level-0 consiste nos dados brutos, o Level-1 inclui dados SLC (*Single Look Complex*) e GRD (*Ground Range Detected*) e o Level-2 contém informações oceanográficas em seu processamento (ESA, 2018). Já o Sentinel 2 é uma missão de imagem multiespectral de alta resolução, com o sensor possuindo 13 canais espectrais, incorporando quatro bandas visíveis e infravermelho próximo com resolução espacial de 10 m, seis bandas de infravermelho a 20 m e três bandas com correção atmosférica a 60 m.

Na região do Estreito de Bransfield e Gerlache estão disponibilizadas imagens Sentinel 1A no modo de imageamento IW, na polarização HH e resolução espacial em 10 m. Também foram encontradas imagens do Sentinel 1B no modo de imageamento EW, na co-polarização HH + HV e resolução espacial em

25 m, porém, somente haviam dados disponíveis com data de aquisição a partir de Abril de 2018.

A Tabela 2 apresenta os dados do satélite Sentinel utilizados para elaborar os intervalos de retroespalhamento (σ^0) das imagens SAR junto as diferentes tipologias de gelo marinho (*young ice e/ou first-year ice e new ice*) e oceano aberto e a Tabela 3 apresenta os dados do Sentinel 1A utilizados para o mapeamento do gelo marinho em distintas épocas entre 2016 a 2018.

A Figura 4 apresenta as imagens SAR do Sentinel 1A na polarização HH, em escala de retroespalhamento (dB), utilizadas para compor o mapeamento do gelo marinho na região oceânica da APW.

Devido as três sub-faixas de imageamento nas imagens SAR no modo IW, encontram-se va-

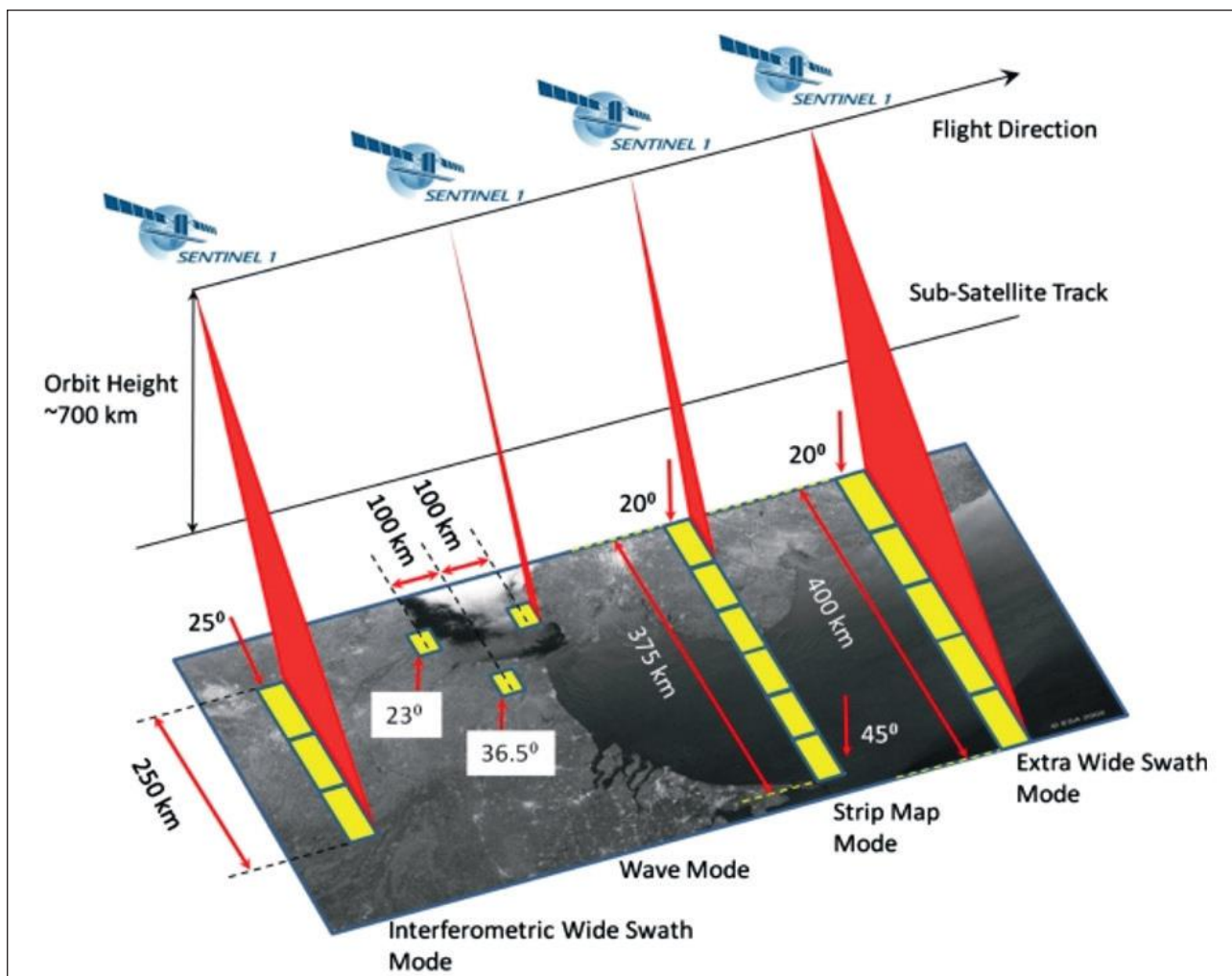


Figura 3 Os modos de aquisição do Sentinel 1. Fonte: ESA (2018).

Classificação	Aquisição	Direção da Órbita	Órbita	Tipo do produto
Outubro 2017	14/10/2017	Descendente	9	S1A_IW_GRDH_1SSH
	15/10/2017	Descendente	81	S2A_MSIL1C
Setembro 2018	27/09/2018	Descendente	9	S1A_IW_GRDH_1SSH
	22/09/2018	Ascendente	33	S1B_EW_GRDH_1SDH
	25/09/2018	Descendente	81	S2B_MSIL1C
Novembro 2018	02/11/2018	Descendente	9	S1A_IW_GRDH_1SSH
	28/10/2018	Ascendente	33	S1B_EW_GRDH_1SDH
	01/11/2018	Descendente	38	S2B_MSIL1C

Tabela 2 Imagens do satélite Sentinel do Estreito de Bransfield e Gerlache analisadas para classificação dos intervalos de retrospalhamento (σ^0) das imagens SAR

Satélite Sentinel	Aquisição	Direção da Órbita	Órbita	Tipo do Produto
1A	03/07/2016	Descendente	9	S1A_IW_GRDH_1SSH
1A	08/08/2016	Descendente	9	S1A_IW_GRDH_1SSH
1A	01/09/2016	Descendente	9	S1A_IW_GRDH_1SSH
1A	07/10/2016	Descendente	9	S1A_IW_GRDH_1SSH
1A	10/07/2017	Descendente	9	S1A_IW_GRDH_1SSH
1A	03/08/2017	Descendente	9	S1A_IW_GRDH_1SSH
1A	08/09/2017	Descendente	9	S1A_IW_GRDH_1SSH
1A	02/10/2017	Descendente	9	S1A_IW_GRDH_1SSH
1A	05/07/2018	Descendente	9	S1A_IW_GRDH_1SSH
1A	10/08/2018	Descendente	9	S1A_IW_GRDH_1SSH
1A	03/09/2018	Descendente	9	S1A_IW_GRDH_1SSH
1A	09/10/2018	Descendente	9	S1A_IW_GRDH_1SSH

Tabela 3 Imagens dados do Sentinel 1A utilizados para o mapeamento do gelo marinho no Estreito de Bransfield e Gerlache

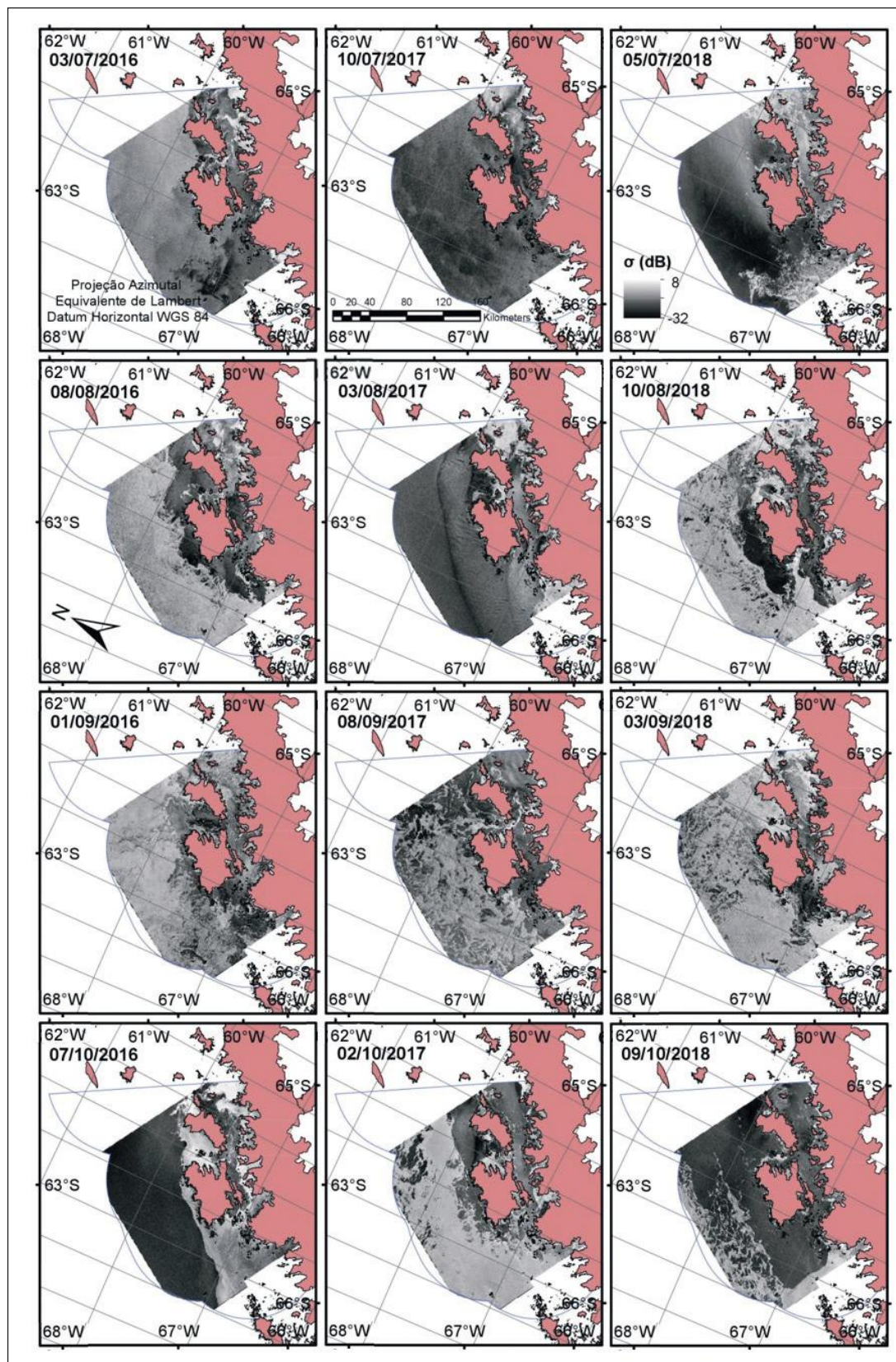


Figura 4 Imagens SAR do Sentinel 1A na polarização HH, em escala de retroespalhamento (dB), utilizadas para compor o mapeamento do gelo marinho na região oceânica da APW.

riação no ângulo de incidência resultando na perda de energia no retroespalhamento ao longo da faixa de alcance (*range*) na órbita. Esta variação dificulta a delimitação de faixas de retroespalhamento (σ) normalizadas para os diferentes alvos. Um método proposto por Mladenova *et al.* (2013) e Topouzellis (2016), aplicado também por Zhou & Zheng (2017) permite normalizar os dados por meio do cosseno, limitando as variações de σ° dentro dos diferentes ângulos de incidência (equação 1):

$$\sigma_{ref}^\circ = \frac{\sigma_\theta^0 \cos^2(\theta_{ref})}{\cos^2(\theta)} \quad (1)$$

Sendo:

σ_{ref}° : Coeficiente de retroespalhamento normalizado;

θ : Ângulo incidente local;

σ_θ^0 : Coeficiente de retroespalhamento mensurado;

θ_{ref} : Ângulo de referência, sendo para este estudo aplicado 30°.

2.3 Processamento das Imagens do Sentinel 1

As imagens SAR do satélite Sentinel 1 foram obtidas por meio do *download* no portal ESA *Copernicus Open Access Hub* disponibilizado no sítio <<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>>. O processamento das imagens do Sentinel 1 foram efetuadas pelo programa SNAP (*Sentinel Application Platform*). A Figura 5 ilustra as etapas realizadas no processamento das imagens SAR do Sentinel 1.

Obtidas as imagens, o primeiro processamento realizado foi à calibração radiométrica. A calibração de imagens de RADAR tem como objetivo associar o valor de *pixel* da cena diretamente às microondas refletidas pela superfície da imagem. A imagem não calibrada permite executar análises qualitativas, mas análises quantitativas somente são possíveis após a calibração (Astri Polska, 2018).

Em sequência foi realizada a correção do terreno das imagens SAR, pois a topografia tem in-

fluência significativa nas propriedades geométricas e radiométricas das imagens. A geometria de imagem está relacionada com diferentes mecanismos de retroespalhamento e distorções induzidas pelo terreno. As alterações de retroespalhamento induzidas por relevo devem ser tratadas como um erro sistemático e devem ser compensadas, sendo importante para a análise de conjuntos de dados de imagens multitemporais em terrenos acidentados, com geometrias de imagem variáveis (Loew & Mauser, 2007). Para esta etapa foi utilizado o GDEM ACE (*Altimeter Corrected Elevations*) gerado a partir das alturas mensuradas pelo altímetro a bordo do ERS-1 com resolução espacial de 30 segundos de arco. Apesar da sua baixa resolução espacial em comparação a outros modelos digitais para o Continente Antártico como o TanDEM-X (resolução espacial em 12 m \approx 0,4 segundos de arco) e o Modelo de Referência de Elevação da Antártida (resolução espacial em 8 m \approx 0,25 segundos de arco), apresentam modelagem sobre o oceano localizado próximo as regiões costeiras da Península Antártica.

Para minimizar o ruído *Speckle*, utilizou-se o processamento com filtro mediano possuindo di-

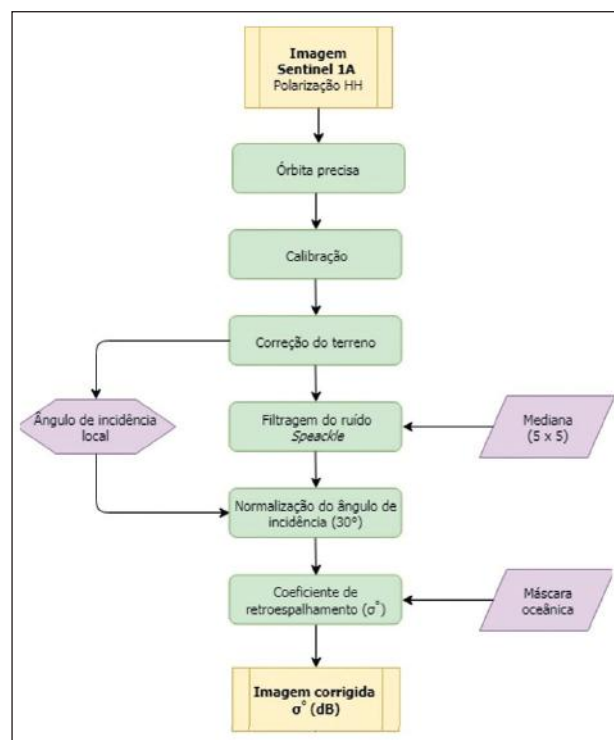


Figura 5 Etapas do processamento das imagens SAR do Sentinel 1 no *software* SNAP.

mensão de janela em $5 \times 5 \text{ pixels}$, pois além de apresentar alta eficiência computacional é um método eficiente no processamento de imagens SAR para a classificação de zonas superficiais de neve e gelo, preservando as mudanças abruptas de sinal, não danificando os limites das feições imageadas (Arigony Neto, 2006).

Para efetuar a classificação da imagem SAR foi realizado a conversão dos valores digitais dos *pixels* por valores de retroespalhamento em decibéis (dB), conforme a equação 2.

$$\sigma_{db}^{\circ} = 10 * \log_{10} (\sigma_{ref}^{\circ}) \quad (2)$$

Sendo: σ_{db}° : Valor de retroespalhamento em decibel (dB).

A delimitação da região oceânica APW na Península Antártica foi realizada por meio de arquivo *shapefile* com os polígonos de delimitação costeira de alta resolução, disponibilizados pela ADD (*Antarctic Digital Database*) no sitio <https://add.data.bas.ac.uk/repository/entry/show?entryid=f477219b-9121-44d6-afa6-d8552762dc45>.

2.4 Classificação dos Intervalos de Retroespalhamento (σ°) das Imagens SAR do Sentinel 1A para o Mapeamento do Gelo Marinho

Para este artigo foram aplicadas as classificações supervisionadas e não supervisionadas no mapeamento e tipificação do gelo marinho. A classi-

ficação supervisionada garante que as assinaturas espectrais correspondam às classes temáticas de interesse para análise dos dados, mas por outro lado, não garante que essas assinaturas não se sobreponham, causando ambiguidade no processo de classificação. A classificação não supervisionada é projetada para produzir resultados distintos, não sobrepostos às assinaturas espectrais, mas não garante que elas correspondam para classes temáticas (Ress, 2006).

Mäkynen & Karvonen (2017) determinaram a concentração de gelo marinho por meio da discriminação entre água aberta e gelo marinho onde a borda do gelo foi extraída por diferentes métodos de segmentação como análise de textura através da autocorrelação local e retroespalhamento de polarização dupla HH/HV. A Figura 6 ilustra as etapas para classificação das regiões cobertas de gelo marinho ou água líquida.

Para a classificação não supervisionada da imagem SAR com polarização HH, foi empregado o método *K-means*, formando três *clusters* correspondendo às classes *open water*, *new ice* e *young ice* e/ou *first-year ice*. Segundo Johnson & Wichern (1992), o método *K-means* ou análise de *cluster* é o particionamento de um conjunto de dados em subconjuntos (*clusters* ou classes), de modo que os dados em cada subconjunto compartilhem algum ponto em comum em um espaço *n*-dimensional, relacionando-os por meio de coeficientes de similaridade ou de distâncias, no caso do *software* SNAP utiliza a distância euclidiana.

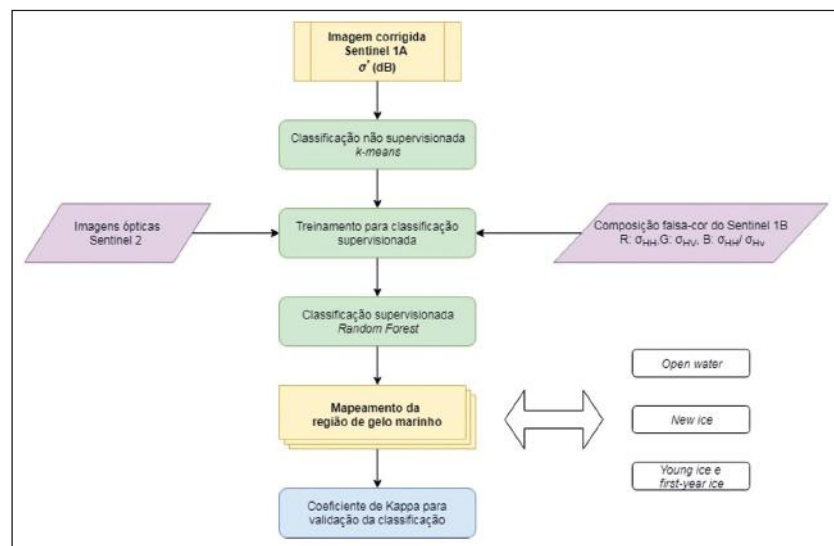


Figura 6 Etapas para classificação supervisionada delimitando as regiões cobertas de gelo marinho ou água líquida.

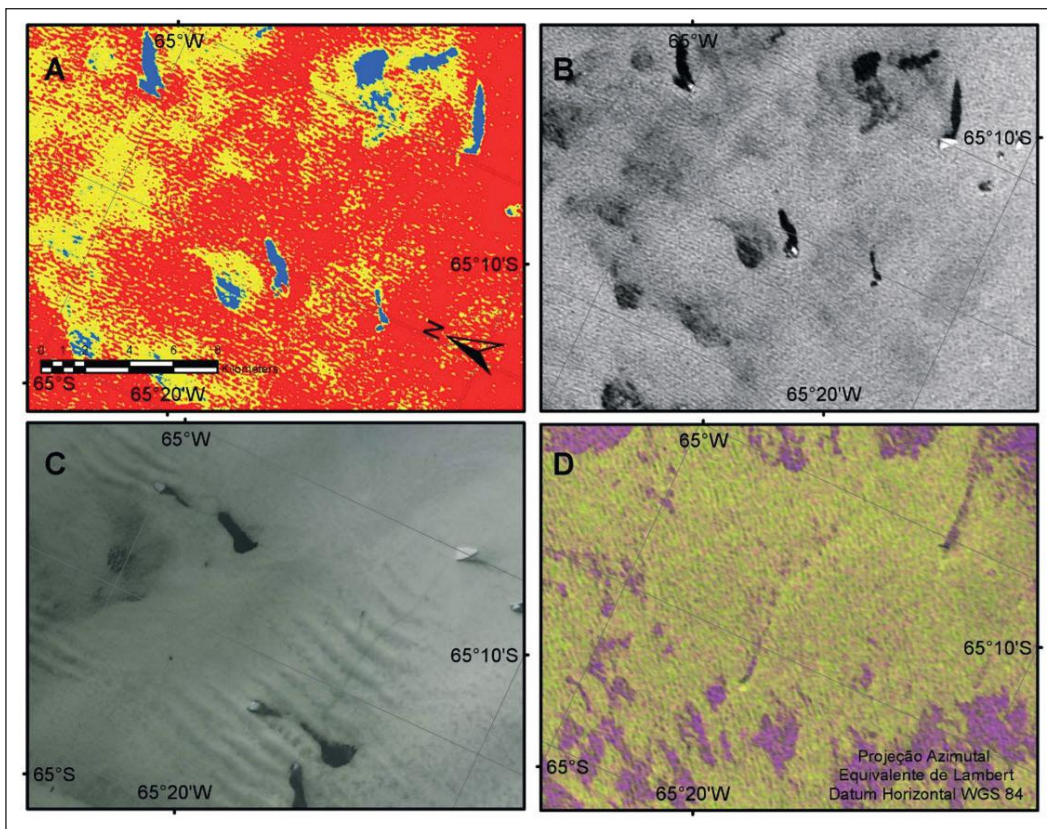
As imagens do sensor MSI do satélite Sentinel 2 foram obtidas por meio do *download* no portal *Earth Explorer* da USGS (*United States Geological Survey*) disponibilizado no sítio <https://earthexplorer.usgs.gov/>, com o período de aquisição mais próximo as imagens do Sentinel 1 utilizadas neste estudo. Para o treinamento do classificador supervisionado foram selecionadas as bandas 2 (490 nm), 3 (560 nm) e 4 (665 nm) com resolução espacial de 10 metros (ESA, 2018) para elaboração da composição colorida com cores verdadeiras RGB 432.

Para a pesquisa foi utilizado o classificador supervisionado *Random Forest* que consiste em um modelo agregado, o que significa que ele usa a saída de diferentes modelos, também denominados árvores de decisão, para calcular a variável da resposta (Dahinden *et al.*, 2011). O método que se utiliza para ajustar a árvores é o CART (*Classification And Regression Tree*) descrito no trabalho de Breiman *et al.* (1984). As árvores de decisão são modelos preditivos que dividem recursivamente um conjunto de dados em regiões usando um conjunto de regras bi-

nárias para calcular um valor de destino para fins de classificação ou regressão, sendo necessário inserir dois parâmetros. O primeiro parâmetro é o número de árvores de decisão, sendo utilizadas no trabalho 500 árvores, pois conforme Lawrence *et al.* (2006) os erros que possam haver geralmente se estabilizam antes que esse número seja alcançado. O segundo parâmetro é o número de variáveis que são selecionadas aleatoriamente ao criar um ponto de divisão. O valor padrão é calculado usando a raiz quadrada do número total de variáveis (Gislason *et al.*, 2006).

Com o treinamento do classificador supervisionado *Random Forest* por meio da classificação não supervisionada *K-means*, imagem SAR do Sentinel 1 do modo de imageamento EW na composição falsa-cor R: σ_{HH} , G: σ_{HV} , B: σ_{HH}/σ_{HV} e as imagens ópticas do Sentinel 2 (Figura 7), gerou-se a alocação (*labelling*) da imagem do Sentinel 1 modo IW. Este processo consiste na rotulagem dos grupos de *pixels* conforme uma das duas tipologias de gelo marinho (*new ice* ou *young ice* e/ou *first-year ice*) ou água líquida.

Figura 7 Conjunto de dados utilizados para classificação supervisionada pelo método *Random Forest*: A. Classificação não supervisionada pelo método *K-means* na imagem SAR do Sentinel 1A do dia 02/11/2018, modo IW, formando 3 *clusters*; B. Imagem SAR do Sentinel 1A do dia 02/11/2018, modo de imageamento IW, em dB; C. Composição com cores verdadeiras da imagem óptica obtida pelo Sentinel 2 do dia 01/11/2018; D. Imagem SAR do Sentinel 1B do dia 28/10/2018, modo de imageamento EW, com composição falsa-cor R: σ_{HH} , G: σ_{HV} , B: σ_{HH}/σ_{HV} .



Para determinar a acurácia da classificação no mapa final, foram extraídos *pixels* de controle para cada classe por meio de polígonos gerados sobre imagens do Sentinel 2. A partir disto, foi realizada a comparação entre as categorias geradas pelo mapa classificado com as encontradas nas imagens do sensor óptico, gerando posteriormente a matriz de confusão e o cálculo do coeficiente Kappa, possibilitando o cálculo do desempenho da classificação (Congalton, 1991).

3 Resultados e Discussões

3.1 Definição dos Intervalos de

Retroespalhamento (σ^0) das Imagens Sentinel 1A

Nas imagens classificadas obtiveram-se os valores limiares (*thresholds*) de retroespalhamento para cada alvo, resultando nos seguintes valores máximos e mínimos ao nível de confiança de 90%, conforme Tabelas 4 e 5.

Tipologia de Gelo Marinho	Outubro 2017		Setembro 2018		Novembro 2018	
	σ^0 min	σ^0 max	σ^0 min	σ^0 max	σ^0 min	σ^0 max
Open water	-26,6	-24,1	-28,1	-24,1	-25,6	-22,8
New ice	-20,3	-17,5	-19,1	-17,6	-19,3	-17,3
Young ice e/ou first-year ice	-14,1	-9,9	-13,8	-10,4	-13,2	-10,4

Tabela 4 Valores de retroespalhamento (σ^0) em dB para as classificações supervisionadas realizadas sob imagens polarização HH do Sentinel 1A, modo de imageamento IW, com ângulo de incidência normalizado a 30°

Tipologia de gelo marinho	Média		Desvio-padrão	
	σ^0 min	σ^0 max	σ^0 min	σ^0 max
Open water	-26,8	-23,7	1,3	0,8
New ice	-19,6	-17,5	0,6	0,2
Young ice e/ou first-year ice	-13,5	-10,2	0,5	0,3

Tabela 5 Análise estatística dos valores de retroespalhamento (σ^0) em dB para as classificações supervisionadas realizadas sob imagens polarização HH do Sentinel 1A, modo de imageamento IW, com ângulo de incidência normalizado a 30°

Zakhvatkina *et al.* (2013) também avaliaram a classificação de diferentes tipos de gelo marinho utilizando dados do ENVISAT SAR encontrando os intervalos de retroespalhamento (σ^0) para *new ice* entre -18,7 a -17,2 dB e para *first-year ice* entre -17,5 a -11,2 dB, derivados com ângulo de incidência a 25° no Ártico. Já Wohl (1995) em seu trabalho com imagens SAR na banda C do ERS-1 encontrou σ^0 em -22 dB para *open water*.

O baixo desvio-padrão encontrado para as três classificações supervisionadas está relacionado com as amostragens serem efetuadas no mesmo período do ano, localização da imagem SAR (órbita e cena), mesmo modo de imageamento (IW), ângulo de incidência normalizado e mesma polarização (HH). Bovith & Andersen (2005) relatam sobre a dificuldade em gerar um algoritmo para o cálculo da concentração de gelo marinho para todos os sensores SAR com polarização única, uma vez que classificação geralmente é limitada devido a interação entre os parâmetros do sistema de RADAR (comprimento de onda, polarização, ângulo de incidência, entre outros) e as propriedades da superfície, ou seja, como as superfícies de gelo e água refletem o sinal podendo variar de região geográfica e estação do ano.

Observa-se que o maior desvio-padrão se encontra para a classe *open water* e pode estar relacionado com a variabilidade do retroespalhamento da superfície da água em função da rugosidade causada pelo vento (Kwok *et al.*, 1992). Leshkevich & Nghiem (2007) relataram em seu trabalho que a velocidade e a direção do vento podem confundir a discriminação entre água líquida e gelo, uma vez que dados polarizados (HH ou VV) são mais sensíveis que dados provenientes de polarização cruzada (HV ou VH). Fernandez *et al.* (2006) quantificaram o aumento do coeficiente de retroespalhamento com a velocidade do vento entre 25 a 45 m/s e, constataram um incremento em até 1,5 dB para a polarização horizontal sob ângulo de incidência a 31°.

3.2 Mapeamento do Gelo Marinho em Imagens Sentinel 1A

No resultado do mapeamento com o Sentinel 1A observa-se uma rápida expansão do gelo marinho *young ice e/ou first year ice* ao longo do inverno e início da primavera austral. Rafferty (2010) cita que

em condições onde a água encontra-se turbulenta devido ao efeito das ondas e do vento, os cristais de gelo aglomeram-se formando o *pancake ice* (*new ice*). Em sequência ocorre uma rápida expansão em diâmetro destas panquecas de gelo e, logo, através da ação mecânica dos ventos haverá a sobreposição destas estruturas de gelo, solidificando e aumentando em espessura. Este fenômeno explica a rápida ampliação da área coberta por gelo marinho no Continente Antártico. A Figura 8 ilustra o mapeamento do gelo marinho em imagens na polarização HH do Sentinel 1A, modo de imageamento IW, com ângulo de incidência normalizado a 30°.

Porém, na imagem classificada em outubro de 2016 não se encontraram registros de *young ice* e/ou *first year ice* nas regiões oeste e sudoeste da APW em comparação aos anos de 2017 e 2018. Conforme relatado por Ionita *et al.* (2018), ocorreu na primavera austral em 2016 o maior recuo do gelo marinho na Antártida desde 1979 (início das observações por sensoriamento remoto). Esta retração foi ocasionada pelo aquecimento generalizado das zonas costeiras e também no interior do Continente Antártico, acompanhado ainda com forte fase negativa do SAM (*Southern Hemisphere Annular Mode*). Nos mares de Amundsen e Bellingshausen observou-se a maior anomalia negativa na concentração diária de gelo marinho, acompanhado com a entrada de ar quente e úmido em direção ao Pólo Sul.

4 Conclusões e Recomendações

O trabalho permitiu propor os seguintes coeficientes de retroespalhamento para o mapeamento do gelo marinho: -10,2 a -13,5 dB para *young ice* e/ou *first-year ice*, -17,5 a -19,6 dB ao *new ice* e -23,7 a -26,8 dB a *open water*.

Ressalta-se que estes dados foram obtidos em imagens SAR do satélite Sentinel 1A, na polarização única HH, modo de imageamento IW e sob o ângulo de incidência normalizado a 30°. Também se observa que estes resultados foram obtidos para os meses de Julho a Outubro na região oceânica APW, aspecto importante a ser considerado uma vez que a classificação pode ser limitada devido à interação entre os parâmetros do sistema SAR com as propriedades da

superfície, ou seja, localização geográfica e estação do ano em que foi realizado o registro da imagem (Bovith & Andersen, 2005).

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001, e ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelo fomento ao desenvolvimento desta pesquisa.

6 Referências

- Aldenhoff, W. 2017. *Sea Ice Concentration Estimation and Ice Type Classification from Dual-frequency Satellite Synthetic Aperture Radar*. Department of Space, Earth and Environment, Chalmers University of Technology, Monografia de Graduação, 48 p.
- ADD. 2018. *Antartic Digital Database*. Disponível em: <https://www.add.scar.org/home>. Acesso em: 21 de Agosto de 2018.
- Arigony-Neto, J. 2006. *Monitoring glacier parameters on the Antarctic Peninsula - a centerline approach combining satellite and GIS data*. Faculdade de Ciências Ambientais e Florestais, Universidade de Freiburg (Albert-Ludwigs), Tese de Doutorado, 136 p.
- Astri Polska. 2018. Disponível em: http://www.eo4sd-eastern.eu/sites/default/files/publications/snap_workbook_english.pdf. Acesso em: 28 de Setembro de 2018.
- Bentley, M.J. 2015. Recent Climate Change. In: *Exploring the Last Continent*, Springer, p. 505-520.
- Bovith, T. & Andersen, S. 2005. Sea ice concentration from single-polarized SAR data using second-order grey level statistics and learning vector quantization. *Scientific Report*, 2215.
- Breiman, L.; Friedman, J.H.; Olshen, R.A. & Stone, C.J. 1984. *Classification and regression trees*. Wadsworth International Group, Belmont, California, USA, 368 p.
- Comiso, J.C. 2009. *Polar Oceans from Space* (Atmospheric and Oceanographic Sciences Library), Springer-Verlag New York, 507 p.
- Congalton, R.G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37: 35-46.
- Dahinden, C. & Ethz, M. 2011. An improved Random Forests approach with application to the performance prediction challenge datasets. *Hands-on Pattern Recognition, Challenges in Machine Learning*, 1: 223-230.
- Deser, C.; Walsh, J.E. & Timlin, M.S. 2000. Arctic sea ice variability in the context of recent atmospheric circulation trends. *Journal of Climate*, 13: 617-633.
- ESA. 2018. *European Space Agency*. Disponível em: <https://>

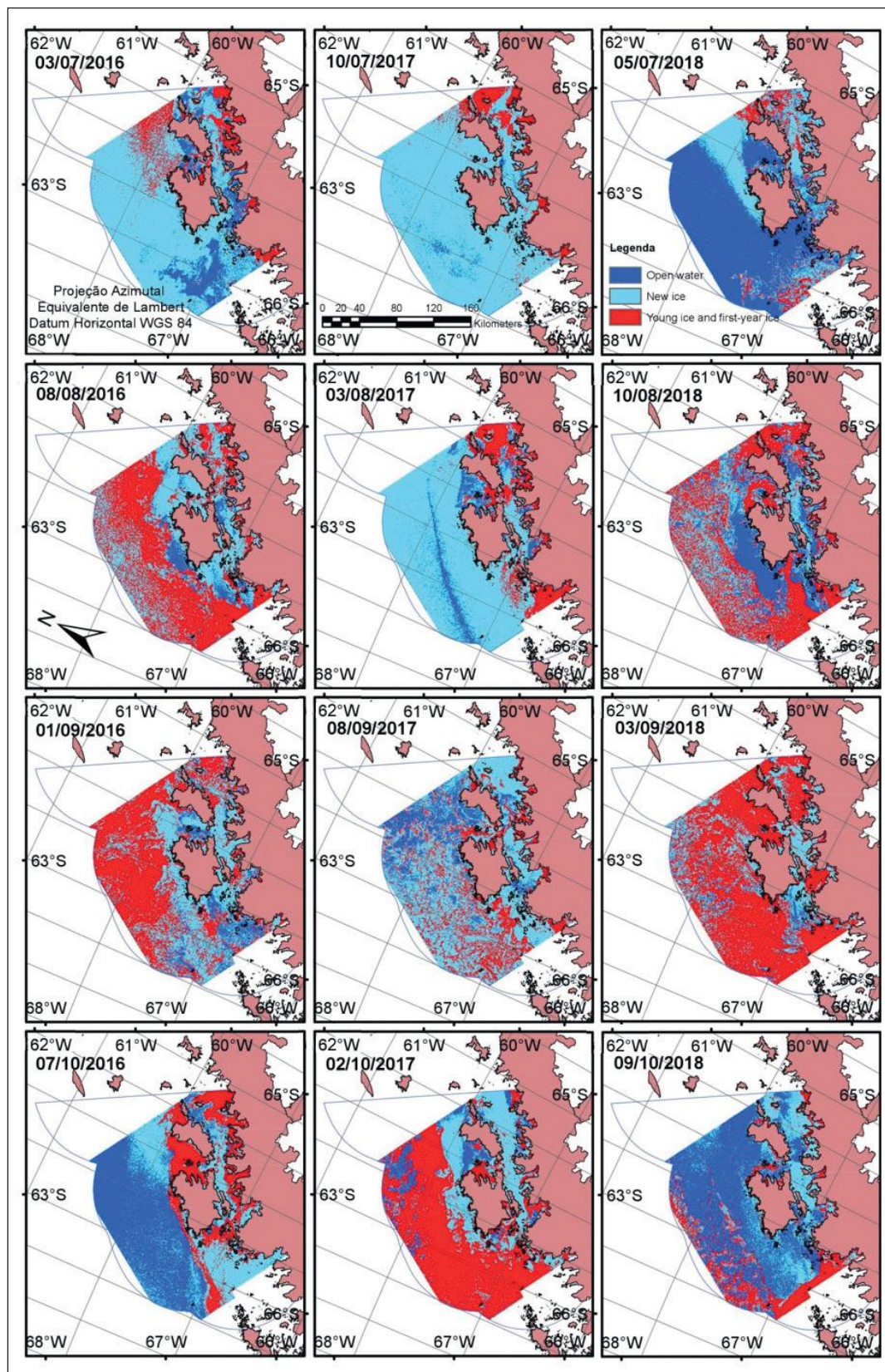


Figura 8 Classificações sob imagens de polarização HH do Sentinel 1A, modo de imageamento IW, com ângulo de incidência normalizado a 30° na região oceânica da APW.

- sentinel.esa.int/documents/247904/1877131/Sentinel-1-Product-Definition. Acesso em: 28 de Setembro de 2018.
- Fernandez, D.E.; Carswell, J.R.; Frasier, S.; Chang, P.S.; Black, P.G. & Marks, F.D. 2006. Dual-polarized C-and Ku-band ocean backscatter response to hurricane-force winds. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111: C8.
- Gislason, P.O.; Benediktsson, J.A. & Sveinsson, J.R. 2006. Random forests for land cover classification. *Pattern Recognition Letters*, 27: 294-300.
- Ionita, M.; Scholz, P.; Grosfeld, K. & Treffeisen, R. 2018. Moisture transport and Antarctic sea ice: austral spring 2016 event. *Earth System Dynamics*, 9: 939-954.
- Jensen, J.R. 2011. *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. Editora Parêntese, 598 p.
- Johnson, R.A. & Wichern, D.W. 1992. *Applied multivariate statistical analysis*. New Jersey: Prentice-Hall, 3 Ed., 800 p.
- Kwok, R.; Cunningham, G. & Holt, B. 1992. An approach to identification of sea ice types from spaceborne SAR data. *Microwave Remote Sensing of Sea Ice*, 68: 355-360.
- Lawrence, R.L.; Wood, S.D. & Sheley, R.L. 2006. Mapping invasive plants using hyperspectral imagery and Breiman Cutler classifications (Random Forest). *Remote Sensing of Environment*, 100: 356-362.
- Leshkevich, G.A. & Nghiem, S.V. 2007. Satellite SAR remote sensing of Great Lakes ice cover, part 2. Ice classification and mapping. *Journal of Great Lakes Research*, 33: 736-750.
- Loew, A. & Mauser, W. 2007. Generation of geometrically and radiometrically terrain corrected SAR image products. *Remote Sensing of Environment*, 106: 337-349.
- Mäkynen, M. & Karvonen, J. 2017. Incidence angle dependence of first-year sea ice backscattering coefficient in SENTINEL-1 SAR imagery over the Kara Sea. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55: 6170-6181.
- Martin, P.J. & Peel, D.A. 1978. The spatial distribution of 10 m temperatures in the Antarctic Peninsula. *Journal of Glaciology*, 20: 311-317.
- Mladenova, I.E.; Jackson, T.J.; Bindlish, R. & Hensley, S. 2013. Incidence angle normalization of radar backscatter data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51: 1791-1804.
- Nghiem, S.V.; Rigor, I.G.; Perovich, D.K.; Clemente-Colón, P.; Weatherly, J.W. & Neumann, G. 2007. Rapid reduction of Arctic perennial sea ice. *Geophysical Research Letters*, 34: 19.
- Rafferty, J. P. (Ed.). 2010. *Glaciers, Sea Ice, and Ice Formation*. The Rosen Publishing Group, 253 p.
- Ress, G. 2006. *Remote sensing of snow and ice*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 312 p.
- Scheuchl, B.; Flett, D.; Caves, R. & Cumming, I. 2004. Potential of RADARSAT-2 data for operational sea ice monitoring. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30: 448-461.
- Schwerdtfeger, W. 1984. *Weather and Climate of the Antarctic*. Amsterdam: Elsevier, 261 p.
- Shokr, M. & Sinha, N. 2015. *Sea ice: physics and remote sensing*. American Geophysical Union, John Wiley & Sons, 600 p.
- Simpkins, G.R.; Ciasto, L.M.; Thompson, D.W. & England, M.H. 2012. Seasonal relationships between large-scale climate variability and Antarctic sea ice concentration. *Journal of Climate*, 25: 5451-5469.
- Stein, M. 1989. Seasonal variation of water masses in Bransfield Strait and adjacent waters. *Arch FischWiss*, 39: 15-38.
- Stein, M. & Heywood, R.B. 1994. Antarctic environment-physical oceanography: the Antarctic Peninsula and Southwest Atlantic region of the Southern Ocean. *Southern Ocean ecology: the BIOMASS perspective*: 11-24.
- Topouzelis, K.; Singha, S. & Kitsiou, D. 2016. Incidence angle normalization of Wide Swath SAR data for oceanographic applications. *Open Geosciences*, 8: 450-464.
- Wohl, G.M. 1995. Operational sea ice classification from synthetic aperture radar imagery. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 61: 1455-1462.
- Zakhvatkina, N.Y.; Alexandrov, V.Y.; Johannessen, O.M.; Sandven, S. & Frolov, I.Y. 2013. Classification of sea ice types in ENVISAT synthetic aperture radar images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51: 2587-2600.
- Zhou, C.; Zheng, L. 2017. Mapping radar glacier zones and dry snow line in the Antarctic Peninsula using Sentinel-1 images. *Remote Sensing*, 9: 1171