

Explorando dados polarimétricos SAR para o estudo de processos meteo-oceanográficos na margem continental do Brasil

Gustavo Prouvot Ortiz ¹
João Antonio Lorenzetti ¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{gustavo.ortiz, joao.lorenzetti}@inpe.br

Abstract. Polarimetric ALOS/PALSAR scenes were used to explore the behavior of metocean processes in the South Brazil Bight. The parameters evaluated from two different polarimetric approaches, the Cloude-Pottier decomposition and Kudryavtsev et al. quad-pol analysis, were the basis for the study, supported by SST and scatterometer wind data. Although the traditional H - α diagram labeled all the pixels as 'Bragg scattering dominant', when the results were analyzed in detail, subtle variations enabled a preliminary discrimination of data in three regions, where the signal is probably composed by different groups of scattering mechanisms: (1) [H : 0.11-0.14; α : 4.5°-5.5°; $A > 0.45$] region under influence of Subtropical Shelf Front (Río de la Plata plume), moderate wind from S-SW and probably a strong coastal current; (2) [H : 0.13-0.15; α : 5.0°-6.5°; $A > 0.45$] region under influence of Subtropical Shelf Front and low wind from SE; (3) [H : 0.16-0.17; α : 5.5°-6.0°; $A < 0.3$] region under influence of Brazil Current and low-to-moderate winds from SE. Kudryavtsev's parameters were complementary for that initial description of scattering mechanisms in each region. The polarimetric approach proved to be promising to discriminate metocean processes and the related scattering mechanisms. More scenes and areas should be analyzed in a near future to refine the study and start the development of a classification scheme for recurrent metocean processes at the Brazilian Margin.

Palavras-chave: PolSAR, oceanography, polarimetry, SAR, decomposition, metocean, ALOS/PALSAR

1. Introdução

O retroespalhamento do sinal de SAR (*Synthetic Aperture Radar*) no oceano ocorre devido à rugosidade de sua superfície. Para ângulos de incidência entre 20° e 70° o principal mecanismo de retroespalhamento é o efeito ressonante Bragg o principal mecanismo de espalhamento (Valenzuela, 1978). A extensa compilação feita por Jackson e Apel (2004) apresenta distintos processos meteo-oceanográficos que podem modular as ondas ressonantes de Bragg e, conseqüentemente, alterar o sinal de retorno do SAR. No entanto, além do espalhamento ressonante de Bragg, há outros mecanismos de espalhamento, geralmente menos intensos, que ocorrem da superfície do oceano. De forma geral, o espalhamento Bragg é dependente do vento local atuando na superfície, enquanto outros processos meteo-oceanográficos, como a quebra de ondas ou interação com correntes, geram diferentes tipos de espalhamento (Phillips, 1988).

O estudo da polarimetria em SAR (Kostinski e Boerner, 1986) é capaz de discriminar mecanismos de espalhamento nos alvos, através da variação do sinal retornado em diferentes polarizações. Uma pesquisa fundamental para o entendimento do comportamento polarimétrico de feições oceânicas foi realizada por Lee et. al (1998), onde foi analisada a resposta de frentes da Corrente do Golfo e foi sugerido um novo modelo teórico de espalhamento do sinal no oceano. Posteriormente, novos modelos teóricos foram desenvolvidos, discriminando diferentes mecanismos de interação do sinal de SAR com a superfície (eg. Kudryavtsev et al. 2003, 2005) e explorando a polarimetria SAR para o estudo do espectro de ondas (Schuler, 2004).

Nesta linha, a decomposição polarimétrica de alvos (Cloude e Pottier, 1996) é uma técnica efetiva para avaliar os diferentes tipos de espalhamento presentes em uma imagem SAR. O método de decomposição polarimétrica proposto por Cloude e Pottier (1997), chamado de 'H-A-alpha', embora originalmente desenvolvido para estudos no continente, é bastante utilizado em estudos no oceano para a classificação de derrames de óleo (eg. Schuler e Lee 2006, Zhang et al. 2011, Migliaccio et al. 2015), sendo capaz de descrever de forma simplificada os mecanismos de espalhamento na superfície do oceano. Buscando maior robustez no estudo da polarimetria SAR em oceanografia, Kudryavtsev et al. (2013, 2014) propuseram um novo método de análise polarimétrica específico para o oceano, utilizando apenas os dados de NRCS (*Normalized Radar Cross Section* - σ_0) em cada canal.

No Brasil, a pesquisa em oceanografia utilizando dados SAR ainda é incipiente, sendo o monitoramento de manchas de óleo o tema dominante (eg. Bentz e Miranda 2001, Bentz et al. 2004,

Almeida-Filho et al. 2005, Bentz et al. 2007, Genovez et al. 2011). Também há trabalhos realizados sobre detecção de alvos (Paes et al., 2010), estimativa do campo de vento (Claro e Lorenzetti, 2009), ondas internas (Lorenzetti e Dias, 2013) e a modelagem dos mecanismos de espalhamento do sinal pela frente da Corrente do Brasil (Macedo e Lorenzetti, 2015).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo contribuir, de forma inédita, para observação e entendimento dos processos meteo-oceanográficos que ocorrem na margem brasileira, através da exploração das características de espalhamento do sinal de SAR polarimétrico. Serão utilizadas as decomposições $H-A-\alpha$ e de Kudryavtsevet al., já mencionadas, para a discussão acerca dos mecanismos de espalhamento atuantes. Este é o passo inicial para a caracterização da resposta polarimétrica a processos ambientais na margem brasileira, que pode vir a ser de grande serventia à parametrização de modelos regionais, ao monitoramento oceânico e à correta detecção de manchas de óleo no oceano.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Dados e Área de Estudo

Este estudo baseou-se em dados do sensor ALOS/PALSAR (banda-L) adquiridas em modo Polarimétrico ao sul da Ilha de Santa Catarina, na Baía de Pelotas, em 17 de abril de 2011 (02:07 UTC). Foram utilizadas quatro cenas no nível de processamento L1.1 (*Single Look Complex*), cobrindo a região de plataforma continental e o início do talude (Figura 1). Cada uma das cenas recobre cerca de 32 x 67 km na superfície, com uma resolução nominal de 22,9 m e 3,6 m em range e azimuth, respectivamente. O ângulo de incidência do feixe de radar varia entre 22,8° em *near-range* a 25,4° em *far-range*.

A área de estudo é caracterizada pela presença sazonal da Frente Subtropical de Plataforma (Piola et al., 2000), que avança para norte sobre a zona costeira trazendo a Pluma do Rio do Prata (salinidade 33,5 *psu*), forçado pelo campo de vento, durante os meses de abril a setembro. Em períodos de tempo bom, com maior incidência de ventos de NE, há a ocorrência do processo de ressurgência costeira (Campos et al., 2013) que transporta a Água Central do Atlântico Sul (na região: salinidade 35,3 *psu* e temperatura 18,5°C) para a superfície. A região de plataforma externa e talude externo é influenciada predominantemente pela Corrente do Brasil (Matano et al., 2010), com Água Tropical (na região: salinidade 36 *psu* e temperatura 18,5°C) em superfície. O padrão de ventos de NE na região, que induz a ressurgência costeira é modificado com a passagem de sistemas frontais atmosféricos, que trazem ventos de SW, S e SE ao local e favorecem o avanço da Frente Subtropical de Plataforma (Stech e Lorenzetti, 1992).

No dia da aquisição das imagens SAR, a análise do campo de TSM (JPL MUR MEASUREs Project, 2016) nota-se a presença de pluma de água costeira mais fria (TSM < 23°C) até a área da cena 3 do SAR, onde ocorre uma transição para uma região mais quente associada ao domínio da Corrente do Brasil (Figura 1A). Já o campo de vento estimado pelo escaterômetro a bordo do satélite Oceansat-2 (SeaPAC, 2013), obtido 1h após a aquisição SAR, indica a ocorrência de um período pós-frontal (Stech e Lorenzetti, 1992), com incidência de ventos de SE na região mais *offshore* e a mudança abrupta de direção na área de cena 2 do SAR, passando à direção S-SW. A magnitude variou de aproximadamente 9 a 6 m/s (Figura 1B).

2.2 Processamento dos dados SAR

Os dados ALOS/PALSAR foram inicialmente corrigidos para geometria zero-doppler e realizou-se a calibração absoluta, estimando o NRCS (*Normalized Radar Cross Section*) para cada polarização, e a calibração polarimétrica relativa, gerando uma matriz de espalhamento S corrigida de distorções (Lavalle e Wright, 2009). Não foi aplicada correção da Rotação de Faraday pois o ângulo de rotação para as quatro cenas é menor que 1°, podendo ser desprezado este erro (Freeman e Saatchi, 2004). Posteriormente foi aplicado o filtro *speckle* IDAN (Vasile et al., 2006), com tamanho de vizinhança adaptativa de 20 pixels e 01 *look* equivalente, tanto para os dados de NRCS quanto para os dados complexos.

Os dados complexos calibrados e filtrados geraram, então, uma matriz de coerência 3x3 (T_3), segundo a formulação a seguir, onde S são os vetores de espalhamento para cada polarização e S^* são seus conjugados.

$$\mathbf{T} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH}^* + S_{VV}^*) \rangle & \langle (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH}^* - S_{VV}^*) \rangle & 2 \langle (S_{HH} + S_{VV})S_{HV}^* \rangle \\ \langle (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH}^* + S_{VV}^*) \rangle & \langle (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH}^* - S_{VV}^*) \rangle & 2 \langle (S_{HH} - S_{VV})S_{HV}^* \rangle \\ 2 \langle S_{HV}(S_{HH}^* + S_{VV}^*) \rangle & 2 \langle S_{HV}(S_{HH}^* - S_{VV}^*) \rangle & 4 \langle S_{HV}S_{HV}^* \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.3 Decomposição H-A- α

A decomposição H-A- α (Cloude e Pottier, 1997) é baseada nos autovalores e autovetores calculados da matriz $T3$. Nesta decomposição os principais parâmetros gerados são a Entropia (H), Anisotropia (A) e ângulo α . Inicialmente os autovalores são normalizados para sua probabilidade de ocorrência (p). A Entropia (H), então, é calculada como:

$$H = \sum_{i=1}^3 p_i \log_3 \frac{1}{p_i} = - \sum_{i=1}^3 p_i \log_3 p_i \quad (2)$$

A Anisotropia (A) é formulada como:

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (3)$$

O primeiro elemento de cada autovetor é modelado como $\cos(\alpha_i)$, com o ângulo α_i diferente para autovetor. É calculado, então o ângulo α médio:

$$\alpha = \sum_{i=1}^3 p_i \alpha_i \quad (4)$$

Por fim os três parâmetros são utilizados para prover uma forma de discriminação entre os mecanismos de espalhamento observados no sinal. Estes parâmetros foram calculados, neste trabalho, utilizando uma janela móvel de 7x7 sobre os elementos da matriz $T3$.

2.4 Decomposição de Kudryavtvet al.

A decomposição proposta por (Kudryavtsev et al., 2014) visa discriminar processos na superfície do oceano através dos diferentes tipos de espalhamento relacionados à variabilidade do campo de vento local e aos sinais superficiais de processos oceânicos (ondas internas, feições de meso-escala e frentes de TSM). É uma metodologia baseada somente em relações algébricas do NRCS (σ_o) nas quatro polarizações.

O parâmetro inicial é a razão polarimétrica (PR), que é a razão entre o NRCS de HH (σ_{HH}) sobre VV (σ_{VV}) em escala linear. Seguindo o modelo teórico de Phillips (1988), σ_{HH} e σ_{VV} podem ser representados como uma soma do espalhamento convencional de Bragg σ_{oB} com o espalhamento não-polarizado (NP) de quebra de ondas σ_{wb} :

$$\sigma_0^{pp} = \sigma_{oB}^{pp} + \sigma_{wb} \quad (5)$$

O espalhamento NP é originado do retorno de radar de superfícies muito rugosas e inclinadas, sendo o mesmo para ambas as polarizações. Desta forma, seguindo a equação (5), o parâmetro PR pode ser formulado como:

$$P \equiv \frac{\sigma_0^{hh}}{\sigma_0^{vv}} = \frac{\sigma_{oB}^{hh} + \sigma_{wb}}{\sigma_{oB}^{vv} + \sigma_{wb}} \quad (6)$$

A contribuição de quebra de ondas σ_{wb} pode, então, ser removida através da diferença polarimétrica (PD) entre σ_{VV} e σ_{HH} :

$$\Delta\sigma_0 \equiv \sigma_0^{vv} - \sigma_0^{hh} = \sigma_{oB}^{vv} - \sigma_{oB}^{hh} \quad (7)$$

Unindo as equações (6) e (7), o parâmetro NP (σ_{wb}) pode ser estimado como:

$$\sigma_{wb} = \sigma_0^{vv} - \Delta\sigma_0 / (1 - p_B) \quad (8)$$

Onde p_B é a razão polarimétrica do espalhamento Bragg, isto é:

$$p_B = \sigma_{0B}^{hh} / \sigma_{0B}^{vv} \quad (9)$$

Para o espalhamento Bragg, p_B é majoritariamente governado pela geometria local e efeitos de inclinação da superfície. Para ângulos de incidência $> 25^\circ$, p_B pode ser simplificado. Neste estudo, foi atribuído o valor de 0,5 seguindo Kudryavtsev et al. (2013).

Por último, é calculado o parâmetro de polarização cruzada (CP), a média entre o $NRCS$ de VH e HV , para ser gerada a razão CP/PD . Ela visa estimar a eficiência do mecanismo de espalhamento Bragg para explicar as feições observadas na polarização cruzada.

3. Resultados e Discussão

Nota-se, no campo de $NRCS$ VV (Figura 2) uma faixa com abrupta mudança da intensidade do sinal, possivelmente associado a variações no campo de vento local, passando de aproximadamente 0.175 (-7,57 dB) ao sul, para 0.200 (-6,99 dB) ao norte, com decréscimo gradual em direção à costa. A estimativa do satélite Oceansat-2 (Figura 1B) indica que houve mudança brusca de direção (de SE para S-SW) nesta posição e variações em sua magnitude que podem explicar o sinal observado no canal VV . Logo ao sul da frente meteorológica é observado o sinal de ondas internas propagando-se em distintas direções. Já no campo de $NRCS$ VH são observados sinais bem distintos (Figura 2). Na região mais *offshore* há um evidente aumento do sinal em VH , passando de aproximadamente 0.0017 (-27,70 dB) ao norte para 0.0040 (-23,98 dB) ao sul. Poder-se-ia sugerir a relação com o campo de vento local, para o qual a sensibilidade é distinta entre os canais VV e VH . Entretanto, essa diferença é mais relevante em ventos muito fortes (Hwanget al., 2014) e não há evidência de qualquer alteração similar no sinal em VV nesta posição (Figura 03). Por outro lado, campo de TSM (Figura 1A) indica que, justamente nessa posição, há a transição de um domínio de água de plataforma para o domínio oceânico da CB, relativamente mais quente. Pode-se sugerir, então, que o aumento em VH no *offshore* está relacionado de alguma forma à transição de um domínio de plataforma para oceânico. Há também um sinal bem peculiar que ocorre no canal VH na região mais ao norte, de formato linear e heterogêneo. Feições similares foram já descritas por Li et al. (2010) como distúrbios na superfície gerados pela interação corrente-batimetria ocorrendo talude continental. Mais estudos são necessários para descrever este processo e o sinal relacionado observado na região.

A decomposição ' $H-A-\alpha$ ' resultou em valores muito baixos de H (entre 0,11 e 0,17) e de α (entre $4,4^\circ$ e 7°), associando toda a área marinha estudada à Zona 9 de Claude e Pottier (1997), que classifica a área como dominada pelo espalhamento Bragg. Preliminarmente, isso poderia levar à ideia que tal decomposição não é útil para o estudo oceanográfico, visto que todos os *pixels* obtiveram a mesma classificação. No entanto, quando a variabilidade da Entropia e α é analisada em detalhes, encontram-se gradações relativas dos valores que indicam a separação em três regiões com patamares distintos, onde possivelmente o sinal resultante é composto por diferentes conjuntos de mecanismos de espalhamento (Figuras 2 e 3). Na região 1 (H : 0,11-0,14 ; α : $4,5^\circ$ - $5,5^\circ$) é onde ocorre o intenso sinal de VV , associado à maior magnitude de vento e direção S-SW e aparece o sinal linear em VH possivelmente oriundo de interação com a batimetria. Na região 2 (H : 0,13-0,15 ; α : $5,0^\circ$ - $6,5^\circ$) há os menores valores de magnitude de vento, são notados os sinais mais intensos de ondas internas em VV e está sob influência de águas relativamente mais frias de plataforma. Já na região 3 (H : 0,16-0,17 ; α : $5,5^\circ$ - $6,0^\circ$) é onde inicia a influência do domínio oceânico da Corrente do Brasil e ocorre o alto sinal homogêneo em VH . É interessante verificar que nas Regiões 1 e 2 foram obtidos valores similares da Anisotropia, entre 0,44 e 0,55, enquanto na Região 3 os valores foram mais baixos, entre 0,15 e 0,27 (Figura 2). O estudo realizado por Schuler e Lee (2006) indica a ocorrência de maiores valores de Anisotropia associados à pluma de água mais fria costeira, corroborando a sugestão de que há uma transição de um domínio de plataforma com água relativamente mais fria, na área das Regiões 1/2, para um domínio de água oceânico em 3.

Os parâmetros resultantes da análise polarimétrica de Kudryavtsev et al. (2014) são apresentados nos perfis extraídos entre os pontos A e B (Figura 3), juntamente ao parâmetro α , que delimita as regiões descritas anteriormente. Observou-se um abrupto aumento nos valores de PD na transição da região 1 para a região 2, e posterior decaimento gradual até o fim da região 3, no ponto B. O PD é modulado pela rápida resposta de ondas Bragg ao vento incidente local. Nota-se então, que a região 2, apresenta a maior resposta ao vento local, mesmo com menor magnitude indicada pelo escaterômetro

(Figura 1B). A ocorrência de outros processos meteo-oceanográficos na região 1 pode ser responsável pela menor participação relativa das ondas Bragg no espalhamento do sinal. Já a gradual diminuição de PD na região 3 pode estar relacionada, de alguma forma, à presença de água oceânica.

Já os perfis de PR e NP apresentam comportamento semelhante (Figura 3), decaindo rapidamente na transição da região 1 para a 2, com valores mínimos na região 2 e atingindo um patamar médio na região 3. O NP está relacionado ao mecanismo de espalhamento despolarizante gerado pela quebra de ondas na superfície do oceano. Então é possível notar que os dados indicam que região 1 apresentou a maior contribuição deste tipo de mecanismo ao retorno do sinal, coerentemente com a maior magnitude de vento observada; assim como os menores valores na região 2 indicam pouca contribuição de quebra de ondas. Já o parâmetro PR é, teoricamente, mínimo quando ocorre o puro espalhamento Bragg e próximo de 1 quando há outros mecanismos despolarizadores atuantes. Diferentemente do NP , que decaiu na região na aproximação do ponto A, PR manteve-se em um patamar entre 0,80 e 0,85 neste local. Pode-se sugerir, então, que outros mecanismos além da quebra de ondas foram responsáveis pela despolarização do sinal neste local, como os relacionados ao efeito corrente-batimetria já discutidos anteriormente nos resultados de H e α .

A razão CP/PD está relacionada à eficiência do espalhamento Bragg na composição do sinal de polarização cruzada CP . As regiões 1 e 2 apresentam menores valores de CP/PD , porém com grande variabilidade na região 1 possivelmente devido a ocorrência de mecanismos de espalhamento oriundos da interação corrente-batimetria e maior magnitude de vento. Já na região 3, há um abrupto aumento nos valores de CP/PD , indicando que há maior participação de espalhamento Bragg na polarização cruzada nessa região que no resto da área de estudo. A causa disso é possivelmente a presença da água oceânica nesta região.

4. Conclusões

As características de espalhamento do sinal de SAR polarimétrico no oceano foram exploradas, de forma inédita na margem brasileira, com o objetivo de discriminar os processos meteo-oceanográficos atuantes e seus respectivos mecanismos de espalhamento. Utilizando-se dos parâmetros de duas decomposições polarimétricas, foi possível separar preliminarmente a área de estudo em três regiões com conjuntos distintos de mecanismos de espalhamento do sinal SAR, associados a processos meteo-oceanográficos.

As regiões 1 e 2 possivelmente estiveram sob influência da Frente Subtropical de Plataforma, com mistura da Pluma do Rio da Prata, enquanto a região 3 esteve sob influência oceânica da Corrente do Brasil. Toda a região esteve submetida a instabilidades atmosféricas relacionadas a um período pós-frontal. Notou-se o sinal de uma frente atmosférica no limite entre as regiões 1 e 2, alterando a magnitude e direção do campo de vento.

Neste contexto de múltiplos processos meteo-oceanográficos atuantes, conclui-se que somente a riqueza de informações geradas pela análise polarimétrica de dados SAR pode ser capaz de discriminar os distintos mecanismos de espalhamento na superfície do oceano. Os diferentes métodos de decomposição polarimétrica utilizados são complementares e podem ser mais bem explorados para o estudo oceanográfico. Espera-se, futuramente, refinar a análise com a utilização de mais parâmetros polarimétricos e utilizar um conjunto maior de cenas em diferentes localidades para buscar um padrão de comportamento polarimétrico que possa descrever e classificar os processos meteo-oceanográficos atuantes da margem do Brasil.

Agradecimentos

Ao ASF DAAC (<https://www.asf.alaska.edu>) que disponibilizou gratuitamente as cenas ©JAXA/METI ALOS PALSAR L1.1 2011 utilizadas neste trabalho.

Ao PO.DAAC (NASA EOSDIS Physical Oceanography Distributed Active Archive Center) que disponibilizou gratuitamente os dados do escaterômetro Oceansat-2 e do GHRSSST-MUR-SST (The Group for High Resolution Sea Surface Temperature – Multi-scale Ultra-high Resolution SST).

Ortiz, G. P. é bolsista de mestrado CNPq (processo 131243/2016-0).

Referências Bibliográficas

- Almeida-Filho, R.; Miranda, F. P.; Lorenzetti, J. A.; Pedroso, E. C.; Beisl, C. H. RADARSAT-1 images in support of petroleum exploration: The offshore Amazon River mouth example. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 4, p. 289–303, 2005.
- Bentz, C. M.; Miranda, F. P. Application of remote sensing data for oil spill monitoring in the Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil. X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais...2001
- Bentz, C. M.; Lorenzetti, J. A.; Kampel, M. Multi-sensor synergistic analysis of mesoscale oceanic features: Campos Basin, south-eastern Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 21, p. 4835–4841, 2004.
- Bentz, C. M.; Politano, A. T.; Genovez, P. C.; Lorenzetti, J. A.; Kampel, M. The contribution of ASTER, CBERS, R99/SIPAM e OrbisAR-1 data to improve the oceanic monitoring - An example of oil and frontal eddy detection. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Anais...2007
- Campos, P. C.; Möller, O. O.; Piola, A. R.; Palma, E. D. Seasonal variability and coastal upwelling near Cape Santa Marta (Brazil). **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 118, n. 3, p. 1420–1433, 2013.
- Claro, M. S.; Lorenzetti, J. A. Avaliação do campo de vento marinho obtido a partir de imagens ENVISAT/ASAR para a Bacia de Campos, RJ. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais...2009
- Cloude, S. R.; Pottier, E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 2, p. 498–518, 1996.
- Cloude, S. R.; Pottier, E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 1, p. 68–78, 1997.
- Freeman, A.; Saatchi, S. S. On the Detection of Faraday Rotation in Linearly Polarized L-Band SAR Backscatter Signatures. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 8, p. 1607–1616, 2004.
- Genovez, P. C.; Ebecken, N. F. F.; Freitas, C. C.; Bentz, C. M., de Freitas, R. M., Dutra, L. V. Segmentação e Classificação de Imagens SAR Aplicadas à Detecção de Alvos Escuros em Áreas Oceânicas de Exploração e Produção de Petróleo. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais...2011
- Hwang, P. A.; Perrie, W.; Zhang, B. Cross-polarization radar backscattering from the ocean surface and its dependence on wind velocity. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 11, n. 12, p. 2188–2192, 2014.
- Jackson, C. R.; Apel, J. R. (Org.). **Synthetic Aperture Radar (SAR) Marine User's Manual**, NOAA NESDIS Office of Research and Applications. 2004, 464 p.
- JPL MUR MEASURES Project. 2016. GHRSSST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis. Ver. 4.1. PO.DAAC, CA, USA. Base de dados acessada em 2016-08-15: <https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/MUR-JPL-L4-GLOB-v4.1>
- Kostinski, A. B.; Boerner, W. M. On Foundations of Radar Polarimetry. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 34, n. 12, p. 1395–1404, 1986.
- Kudryavtsev, V.; Hauser, D.; Caudal, G.; Chapron, B. A semiempirical model of the normalized radar cross section of the sea surface, 2. Radar modulation transfer function. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. C3, p. 8055, 2003.
- Kudryavtsev, V. N.; Akimov, D.; Johannessen, J. A.; Chapron, B. On radar imaging of current features: 1. Model and comparison with observations. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 110, n. C7, p. 1–27, 2005.
- Kudryavtsev, V. N.; Chapron, B.; Myasoedov, A. G.; Collard, F.; Johannessen, J. A. On Dual co-polarized SAR imaging of the ocean surface phenomena. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 10, n. 4, p. 761–765, 2013.
- Kudryavtsev, V. N.; Kozlov, L.; Chapron, B.; Johannessen, J. A. Quad-polarization SAR features of ocean currents. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 119, n. 9, p. 6046–6065, 2014.
- Lavalle, M.; Wright, T. **Absolute Radiometric and Polarimetric Calibration of ALOS PALSAR Products Generated within ADEN (ALOS Data European Node)**, rev. 1.3, 18p. 2009. Disponível em: <http://earth.eo.esa.int/pcs/alos/palsar/articles/Calibration_palsar_products_v13.pdf>.
- Lee, J. S.; Jansen, R. W.; Schuler, D. L.; Ainsworth, T. L.; Marmorino, G. O.; Chubb, S. R. Polarimetric analysis and modeling of multifrequency SAR signatures from Gulf Stream fronts. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 23, n. 4, p. 322–333, 1998.
- Lorenzetti, J. A.; Dias, F. G. Internal Solitary Waves in the Brazilian SE Continental Shelf: Observations by Synthetic Aperture Radar. **International Journal of Oceanography**, v. 2013, p. 1–11, 2013.
- Matano, R. P.; Palma, E. D.; Piola, A. R. The influence of the Brazil and Malvinas Currents on the southwestern Atlantic shelf circulation. **Ocean Science Discussions**, v. 7, n. 2, p. 837–871, 2010.
- Migliaccio, M.; Nunziata, F.; Buono, A. SAR polarimetry for sea oil slick observation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 12, p. 3243–3273, 2015.
- Miranda, F. P.; Landau, L.; Bentz, C. M.; Beisl, C. H.; Pedroso, E. C. Seepage slick detection in the Brazilian continental margin using RADARSAT-1 data. In: OMAE2001 Conference Towards 3000. Anais...2001

- Paes, R. L.; Lorenzetti, J. A.; Gherardi, D. F. M. Ship Detection Using TerraSAR-X Images in the Campos Basin (Brazil). **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 7, n. 3, p. 545–548, 2010.
- Phillips, O. M. Radar Returns from the Sea Surface—Bragg Scattering and Breaking Waves. **Journal of Physical Oceanography**, v. 18, n. 8, p. 1065–1074, 1988.
- Piola, A. R.; Campos, E. J. D.; Möller Jr, O. O.; Charo, M., & Martinez, C. . Subtropical Shelf Front off eastern South America. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. C3, p. 6565–6578, 2000.
- SeaPAC. 2016. Oceansat-2 Scatterometer Level 2B **Ocean Wind Vectors in 12.5km Slice Composites Version 2**. Ver. 2. PO.DAAC, CA, USA. Base de dados acessada em 2016-08-15: <http://dx.doi.org/10.5067/OSCT2-L2BV2>
- Schuler, D. L.; Lee, J. S.; Kasilingam, D.; Pottier, E. Measurement of ocean surface slopes and wave spectra using polarimetric SAR image data. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n. 2, p. 198–211, 2004.
- Schuler, D. L.; Lee, J. S. Mapping ocean surface features using biogenic slick-fields and SAR polarimetric decomposition techniques. **IEEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation**, v. 153, p. 260–270, 2006.
- Stech, J. L.; Lorenzetti, J. A. The Response of the South Brazil Bight to the Passage of Wintertime Cold Fronts. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. C6, p. 9507–9520, 1992.
- Valenzuela, G. R. Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves - A review. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 13, n. 1–4, p. 61–85, 1978.
- Vasile, G.; Trouvé, E.; Buzuloiu, V. Intensity-driven adaptive-neighborhood technique for polarimetric and interferometric SAR parameters estimation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 6, p. 1609–1620, 2006.
- Zhang, B; Perrie, W.; Li, X.; Pichel, W. G. Mapping sea surface oil slicks using RADARSAT-2 quad-polarization SAR image. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 10, p. 1–5, 2011.

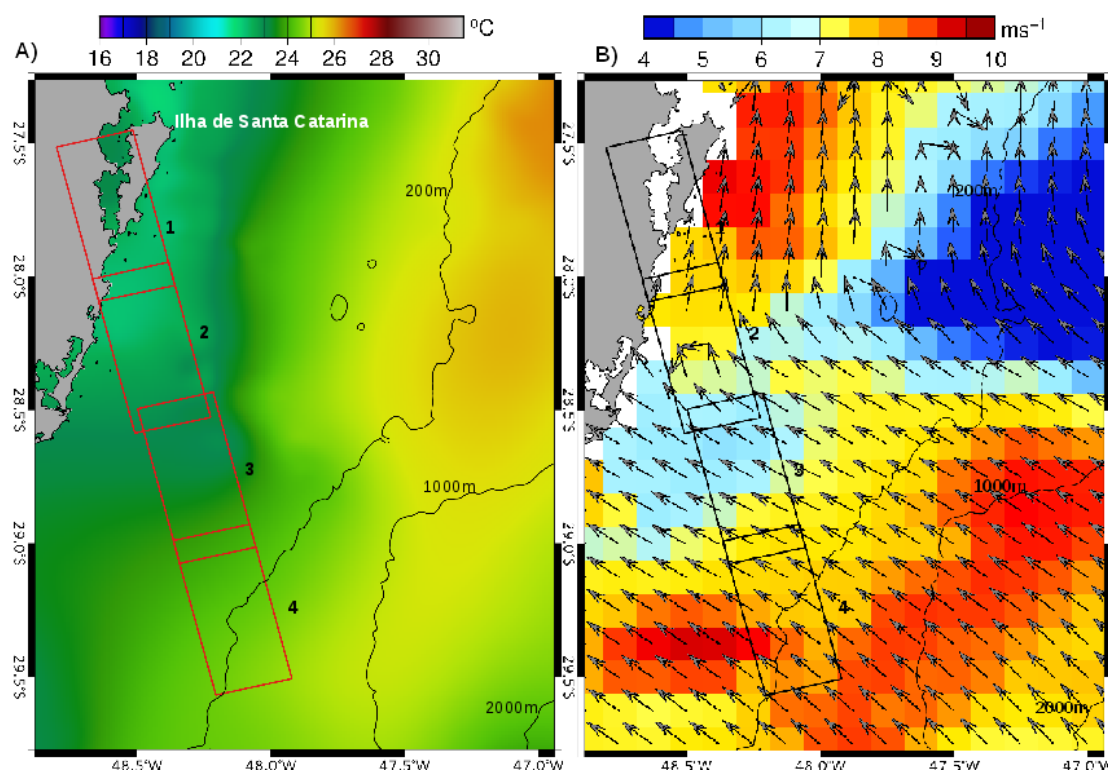


Figura 1. Localização da quatro cenas polarimétricas do ALOS/PALSAR adquiridas em 17/04/2011 (02:07 UTC). A) No dia da aquisição nota-se a presença de pluma de água mais fria (<23°C) até a área da cena 3 do SAR, onde há um aumento da TSM por influência da Corrente do Brasil. B) O campo de vento por escaterômetro (Oceansat-2) estimado 1h após a aquisição SAR, indica mudança abrupta na direção sobre a área da cena 2 do SAR, passando de SE para S-SW. A magnitude variou de aproximadamente 9 a 6 m/s. Id das quatro cenas SAR: *ALPSRP278466630*, *ALPSRP278466620*, *ALPSRP278466610*, *ALPSRP278466600*.

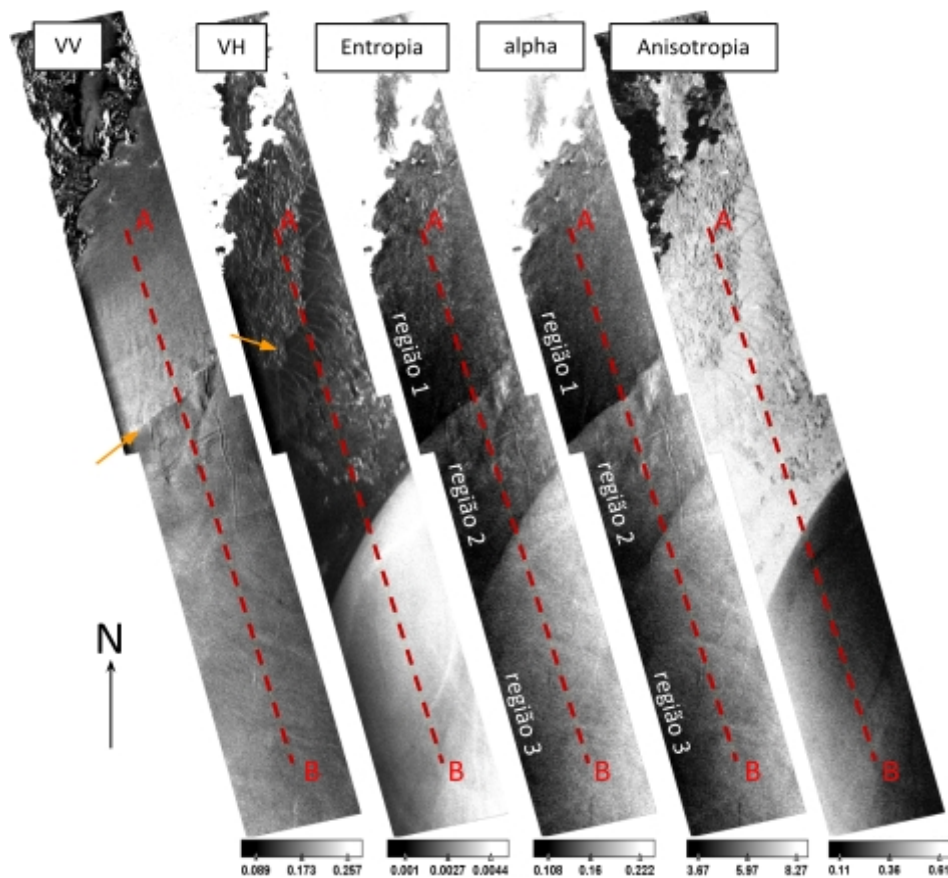


Figura 2. Mosaicos das quatro cenas ALOS PALSAR onde estão representados o NRCS nas polarizações VV e VH, e os principais parâmetros calculados com a decomposição polarimétrica de Cloude e Pottier: Entropia, Alpha e Anisotropia. Setas laranjas: (i) VV: sinal da frente meteorológica associada à brusca mudança na direção e magnitude do campo de vento superficial; (ii) VH: sinal linear heterogêneo possivelmente associado a distúrbios na superfície gerados pela interação corrente-batimetria. As linhas vermelhas tracejadas indicam a posição do transecto AB foi utilizado na discussão posterior.

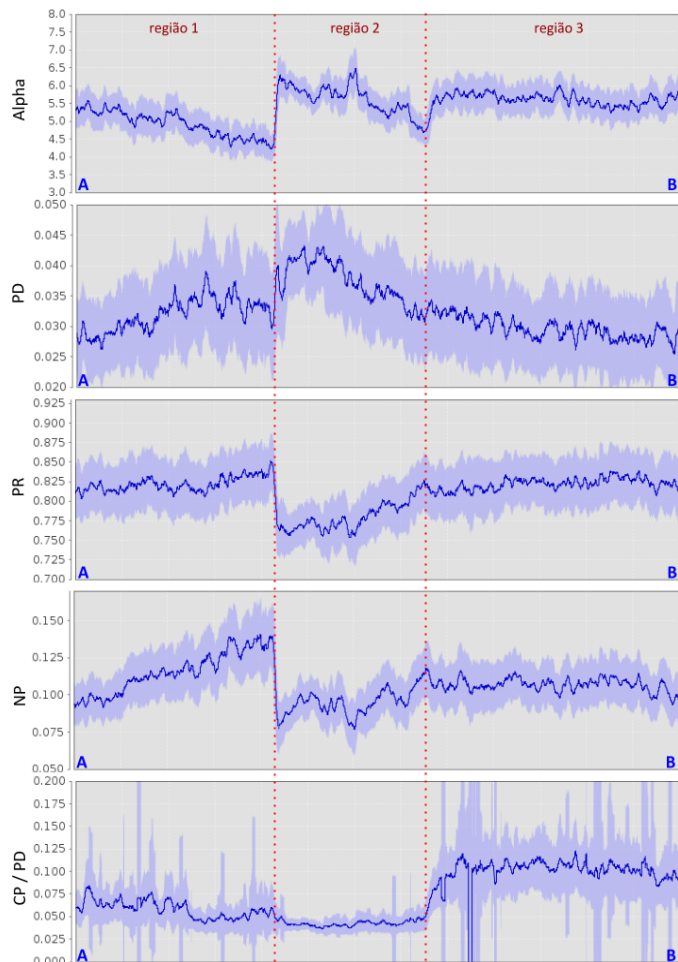


Figura 3. Perfis extraídos do transecto AB sobre os parâmetros da decomposição polarimétrica de Cloude e Pottier: (i) Alpha; e da decomposição de Kudryavtsevet al.: (ii) PD - diferença polarimétrica, (iii) PR - razão polarimétrica, (iv) NP - componente despolarizante associada à quebra de ondas e (v) CP/PD - razão entre CP (polarização cruzada) e NP. as linhas vermelhas pontilhadas representam a divisão entre as três regiões discriminadas pela parâmetros Alpha e Entropia, de Cloude e Pottier.