



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/07.05.19.21-TDI

**DETECÇÃO DE FEIÇÕES OCEANOGRÁFICAS,
FILMES MINERAIS E BIOGÊNICOS VIA IMAGENS
MODIS NA CONDIÇÃO DE SUNGLINT**

Lucas Barbedo de Freitas

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Milton Kampel, e João Antônio Lorenzetti, aprovada em 23 de maio de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3C8B9H2>>

INPE
São José dos Campos
2012

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/07.05.19.21-TDI

**DETECÇÃO DE FEIÇÕES OCEANOGRÁFICAS,
FILMES MINERAIS E BIOGÊNICOS VIA IMAGENS
MODIS NA CONDIÇÃO DE SUNGLINT**

Lucas Barbedo de Freitas

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Milton Kampel, e João Antônio Lorenzetti, aprovada em 23 de maio de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3C8B9H2>>

INPE
São José dos Campos
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Freitas, Lucas Barbedo de.

F884d Detecção de feições oceanográficas, filmes minerais e biogênicos via imagens MODIS na condição de sunglint / Lucas Barbedo de Freitas. – São José dos Campos : INPE, 2012.

xxx + 101 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/07.05.19.21-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

Orientadores : Drs. Milton Kampel, e João Antônio Lorenzetti.

1. sunglint. 2. cor do oceano. 3. feições oceanográficas. 4. biofilmes. 5. filmes minerais. I. Título.

CDU 528.8:551.463.5

Copyright © 2012 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2012 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto

Dr. Douglas Francisco Marcolino
Gherardi

Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Milton Kampel

Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. João Antonio Lorenzetti

Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Cristina Maria Bentz

Convidado(a) / PETROBRAS / Rio de Janeiro - RJ

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): Lucas Barbedo de Freitas

São José dos Campos, 23 de maio de 2012

*“Eu sou metal - raio, relâmpago e trovão
Eu sou metal, eu sou o ouro em seu brasão
Eu sou metal: me sabe o sopro do dragão.”*

Legião Urbana – Metal contra as nuvens, letra de Dado Villa-Lobos / Renato Russo / Marcelo Bonfá.

Aos meus amigos oceanógrafos, do sensoriamento remoto e ao Planeta Terra.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu avô Antonio Felix, pioneiro e topógrafo, por ser meu horizonte no mundo das ciências exatas da Terra. Meu pai José Flavio Vicente de Freitas por ser a grande parceria ao que tenho no mundo. Minha Esposa Fernanda Luiza e a minha filha Nicole pelo amor que recebo. A toda minha família, minha mãe Ruth Maria, avós e irmãs. Por fim, obrigado aos meus grandes amigos.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

RESUMO

O avanço da fronteira marítima devido à extração de petróleo em águas profundas e a consequência de vazamentos que possam atingir ambientes sensíveis e de difícil regeneração levam à necessidade de novas tecnologias de monitoramento. Imagens de radar de abertura sintética da superfície do oceano são largamente utilizadas para detectar manchas de petróleo e também biofilmes. Embora a aquisição SAR ocorra em qualquer condição atmosférica e de iluminação solar, a boa detecção destes surfactantes é regradada pelo vento na superfície marinha e sua influência na formação de ondas de *Bragg*. A sinergia de produtos meteo-oceanográficos é essencial para auxiliar a distinção de surfactantes, entre biogênico e de petróleo; assim como de outras feições de dinâmica oceanográfica como vórtices, meandros, ondas internas e bordas de correntes; eventos atmosféricos como ventos fracos, sombra de vento devido a relevo costeiro, estabilidade na camada limite ar-mar e precipitação. Os sensores ópticos de cor do oceano, dentro de específicas condições geométricas de aquisição e vento resultam em imagens com reflexão especular bidirecional na superfície do oceano, o *sunlint*, ao qual possui informação a respeito da rugosidade da superfície marinha. O efeito dos surfactantes impõe inelásticidade na superfície marinha, alterando o padrão de rugosidade, o que possibilita detectar filmes minerais ou biogênicos. Esta detecção via *sunlint* ocorre mesmo em condições de baixo vento (< 2m/s), dificilmente eficazes no SAR. As condições de contraste entre um filme surfactante e águas limpas circundantes são modeladas e fornecem informação qualitativa (contraste negativo ou positivo) e quantitativa sobre o contraste causado pela mancha de óleo, diminuindo ambiguidades causadas por feições oceanográficas e atmosféricas. Um caso de filme biogênico resultado de Bloom da cianobactéria *Trichodesmium*, em janeiro de 2003 e um vazamento de petróleo em novembro de 2011, ambos na costa sudeste do Brasil, são analisados com auxílio de grande diversidade de dados ambientais e demonstra o quanto imagens de *sunlint* podem ser importantes na sinergia de sensores remotos para monitorar surfactantes. O *sunlint* por ser sensível a variações da rugosidade de superfície permite a observação de feições de mesoescala, entre elas detalhadas neste estudo meandros, vórtices, borda oeste da Corrente do Brasil, ondas internas, modulação do vento pelo relevo e plumas de rios na região sudeste do Brasil.

OCEAN FEATURES, BIOGENIC AND NATURAL FILMS DETECTION BY MODIS UNDER SUNGLINT

ABSTRACT

When interpreting satellite oceanic scenes the synergy of meteo-oceanographic products is essential to assist a better separation of surfactants into oil or biofilms. The same is true for the classification of other features associated to the dynamics of the ocean such as current meanders and fronts, internal waves, eddies and to atmospheric events such as low wind zones, wind shadows due coastal or island topography and lower atmosphere boundary layer processes. Synthetic Aperture Radar (SAR) images of the ocean surface have been used with success in detecting oil spills and biofilms. The detection of these surfactants in SAR images is possible due to the damping effect of surfactants on short wavelength roughness (Bragg capillary waves) produced by the wind friction. The main goal of this study was to evaluate the usefulness of ocean color images under sunglint condition for complementing estimates of ocean features extracted from SAR images. Under specific geometric configurations of Sun's illumination, sensor viewing and wind intensity and direction, the bi-directional specular reflection of ocean surface will contain the sun glint, a region of high reflectance of solar rays. The size and intensity of the glint depends on the distribution of sea surface slopes (short scale roughness), a function of the wind. The wind induced roughness has an anomalous behavior under the action of surfactant films. These anomalous roughness regions will affect the normal glint reflection, allowing the detection of surfactants in glint images even in conditions of low wind (<2 m/s), a situation that makes SAR images almost useless for oil detection. In this work the sunglint contrast between a surfactant film and clean water is modeled using Cox and Munk (1954) sea surface slope PDF. We derive a contrast index and show that it can be used qualitatively (negative or positive) and quantitatively to help separate 15 the observed surfactant signatures from ambiguities caused by some atmospheric and oceanographic features. Two case studies are presented for the southeast coast of Brazil to demonstrate how sunglint images can be very useful as synergy tool in the remote sensing of surfactants in the ocean. One case study is of biofilms produced by cyanobacteria *Trichodesmium* Bloom in January 2002 and another refers to an oil spill in November 2011. We also present some examples of sunglint images used for the detection and observation of internal waves, ocean mesoscale features, river plumes, nearshore winds, and coastal process.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Composição colorida MERIS (0,688 μm), G (0,510 μm), B (0,443 μm), 1/1/2009 em condição de <i>sun glint</i> , na Bacia de Campos, RJ. A condição de <i>sun glint</i> interfere em estimativas da coluna d'água via imagem de cor do oceano por que a informação predominante contida no espectro refletido é da fina camada superficial.	8
Figura 2.2 – Descrição da geometria de aquisição (COX; MUNK, 1954) exemplificando o zênite solar θ_s e de visada θ_v , vento na superfície do mar e inclinações preferencial das microfacetas do oceano para a reflexão especular (Zx e Zy). O disco no centro do eixo das coordenadas representa a inclinação do termo θ (ver texto).	10
Figura 2.3 – Descrição da geometria de aquisição em relação ao azimute de visada ϕ_v e solar ϕ_s . Usadas nas equações 2.1.3 e 2.1.4 que descrevem a orientação preferencial das microfacetas da superfície marinha para a reflexão especular na direção do sol Zx e perpendicular ao azimute solar Zy (JACKSON; ALPERS,2010).	11
Figura 3.1 – Área de estudo localizada na costa sudeste brasileira e principais referências geográficas utilizadas no trabalho. Isóbatas em metros.	15
Figura 3.2 - Área de estudo com feições esquemáticas da Corrente do Brasil e dos vórtices de Vitória, São Tomé e Cabo Frio. O relevo e batimetria ETOPO1 é documentado em Amante e Eakins (2009).	16
Figura 3.3 – Campo de vento meridional à 10 m acima da superfície, média mensal em dezembro de 2011. Fonte: NCEP Reanalysis data obtido pela NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, pelo site http://www.esrl.noaa.gov/psd/	23
Figura 3.4 - Contraste negativo em filmes superficiais em imagem MODIS <i>Terra</i> de 3/02/2010 na banda centrada em 645 nm (Esquerda). Contraste positivo em filmes superficiais em imagem MODIS <i>Aqua</i> de 22/01/2010 (Direita). Feições têm origem provável de agentes surfactantes de origem continental por aporte de rios e da alta produção biológica costeira. Outros agentes também causam variações no campo de <i>sun glint</i> como variações no vento, na dinâmica superficial marinha e contaminação por nuvens.	27
Figura 3.5 – Contraste modelado pelo ICN em diferentes condições geométricas de aquisição por sensor remoto e diferentes magnitudes do vento.	29
Figura 3.6 – No intuito de compreender as feições detectadas nas imagens MODIS na condição de <i>sun glint</i> , pares de imagens ASAR do mesmo dia e mesma área e dados meteo-oceanográficos foram analisados.	31
Figura 3.7 – Metodologia empregada no caso de estudo de filmes minerais causado pelo vazamento de petróleo em novembro de 2011.	33
Figura 3.8 – Metodologia aplicada ao estudo de caso de janeiro de 2003, relacionado ao <i>Bloom</i> de <i>Trichodesmium</i> , no intuito de avaliar a capacidade de	

detecção de filmes biogênicos das imagens MODIS na condição geométrica de <i>sunlint</i>	34
Figura 4.1 - Filme biogênico originado por <i>Thichodesmium</i> observado pelo MODIS em condição de <i>sunlint</i> , banda 645 nm e resolução 250 m, no dia 26/01/2003 e as isolinhas vermelhas indicam o <i>LNglint</i> . Os pontos azuis ao largo de São Tomé indicam a detecção de <i>Trichodesmium</i> e foram obtidos via MODIS Aqua 23/01/2003, não contaminada por <i>sunlint</i> com o algoritmo de Subramaniam et al. (2002).....	41
Figura 4.2 – Dia 23 de janeiro de 2003, concentração de clorofila, detecção de <i>Trichodesmium</i> (SUBRAMANIAM et al., 2002) em pontos pretos. As imagens por sobrevoo e a microscópica são apenas ilustrativas (<i>Bloms</i> de <i>Trichodesmium</i> em outras localidades). Fonte: Imagem aérea obtida pelo projeto FITOSAT da Petrobras e microscópica de <i>Trichodesmium</i> adaptada de Carvalho et al. (2008).....	42
Figura 4.3 – Dia 31/01/2003, composição RGB (645 ,555 ,469 nm) MODIS <i>Aqua</i> nível 2 e detecção de <i>Trichodesmium</i> (SUBRAMANIAM et al., 2002) em pontos pretos próximo a pluma de ressurgência. Isobatimétricas marcadas por isolinhas pretas indicando a Plataforma Continental e Talude. A imagem não esta em condição de <i>sunlint</i> como mostra as Isolinhas vermelhas de <i>LNglint</i> com valores menores que 0.0001 sr^{-1}	43
Figura 4.4 - Média semanal de TSM obtida pelo MODIS entre 25/01/2003 e 1/02/2003 em resolução de 4 km.	44
Figura 4.5 – Concentração de clorofila média para o mês de janeiro de 2003 (esquerda) e sua anomalia em relação à climatologia para janeiro (direita). Anomalias positivas sobre a pluma de ressurgência ao norte do Cabo de São Tomé $>0.2 \text{ mg/m}^3$ e anomalias $<0.2 \text{ mg/m}^3$ caracterizando domínio da CB. ...	45
Figura 4.6 - Imagem RADASAT-1 de 26/01/2003 (21h18min GMT). Alvos de baixo sigma-zero formado pela supressão das ondas de Bragg em áreas com biofilmes.	47
Figura 4.7 - Imagem MODIS <i>Terra</i> , resolução 250 m, nível L1B em condição de <i>sunlint</i> na banda 469 nm de 26/01/2003 às 13:35 GMT, indica com contraste positivo a presença de filmes biogênicos associados à <i>bloom</i> fitoplanctônico.	48
Figura 4.8 - Vento na superfície do mar 26/01/2003 às 18:00 GMT, quase simultâneo a imagem RADARSART-1 Na área de ocorrência dos biofilmes a velocidade do vento é maior que 2 m/s.....	49
Figura 4.9 - Vento na superfície do mar 26/01/2003 às 12:00 GMT, quase simultâneo a aquisição da imagem MODIS em condição de <i>sunlint</i> . A velocidade do vento esta abaixo de 2 m/s onde ocorrem os filmes biogênicos.	49
Figura 4.10 - Contraste modelado na superfície do mar para a presença de biofilmes avaliada pelo ICN. As condições geométricas de aquisição via sensoriamento remoto e ventos na superfície do mar são idênticas as da aquisição de imagens do MODIS <i>Terra</i> em 26/01/2003 13:35 GMT. As condições geométricas de aquisição na área de influência dos biofilmes são $\varphi v - \varphi s = -161^\circ$, $v = 18.5^\circ$ e $s = 24^\circ$	50

Figura 4.11 – Superfície com biofilme 26/01/2003 às 13:35 GMT: contraste imagem MODIS, banda 645 nm, em condição de sunglint calculado pelo filtro de diferença normalizada pelo mínimo valor em relação ao centro - FDNM e isolinhas de contorno indicam o índice de contraste normalizado – ICN (ver texto).	52
Figura 4.12 – Superfície com biofilme 26/01/2003 às 13:35 GMT: radiâncias TOA geolocalizadas e calibradas, MODIS nível 1B, banda 645 nm, em condição de sunglint. Isolinhas de contorno representam o índice de contraste normalizado – ICN (ver texto). As áreas de radiâncias mais intensas são atribuídas à presença de biofilmes originais de <i>Trichodesmium</i>	53
Figura 4.13 – Superfície sem biofilme 26/01/2003 às 13:35 GMT: contraste imagem MODIS, banda 645 nm, em condição de <i>sunglint</i> calculado pelo filtro de diferença normalizada pelo mínimo valor em relação ao centro - FDNM e isolinhas de contorno indicam o índice de contraste normalizado - ICN (ver texto).	54
Figura 4.14 - Superfície sem biofilme 26/01/2003 às 13:35 GMT: radiâncias TOA geolocalizadas e calibradas, MODIS nível 1B, banda 645 nm, em condição de sunglint. Isolinhas de contorno representando o índice de contraste normalizado – ICN (ver texto).	55
Figura 4.15- Vazamento de óleo na Bacia de Campos, observado em imagem MODIS <i>Aqua</i> de 12/11/2011 16:20 GMT, em condições de <i>sunglint</i> . A geometria de aquisição (sol e sensor) e a rugosidade superficial, imposta pelo vento, resultam em uma ampla faixa de alta reflexão especular bidirecional na superfície do oceano.	56
Figura 4.16 - Campo de correntes superficiais em 12/11/2011 12:00 GMT, obtido por modelo numérico de circulação oceânica NCOM.	57
Figura 4.17 - Concentração de clorofila média do mês de novembro de 2011, estimada pelo sensor MODIS <i>Aqua</i> , com resolução de 4 km. Pode-se observar baixos valores na área de ocorrência do filme mineral.	58
Figura 4.18 – Concentração de clorofila média climatológica do mês de novembro (esquerda), estimada entre 2002 e 2011 com dados do sensor MODIS <i>Aqua</i> . Anomalia mensal de clorofila em novembro de 2011 (direita). Anomalias negativas no foco do vazamento de óleo e no vórtice de São Tomé (ver texto).	59
Figura 4.19 – TSM média de 8 dias (01/11 a 08/11/2011), estimada com dados MODIS <i>Aqua</i> , resolução de 4 km. O campo de TSM indica o vórtice ciclônico, centrado em 22°30'S-39°30'W, com temperatura superficial de 24°C em seu entorno e um núcleo relativamente mais frio (23°C).	60
Figura 4.20 – TSM média de 8 dias entre os dias 9/11/2011 e 16/11/2011, obtida pelo MODIS <i>Aqua</i> resolução de 4 km.	61
Figura 4.21 – TSM média de 8 dias entre os dias 17/11/2011 e 24/11/2011, obtida pelo MODIS <i>Aqua</i> resolução de 4 km.	61
Figura 4.22 - Imagem MODIS 12/11/2011 16:20GMT, banda 645 nm, resolução espacial 250 m, destacando a feição de óleo oriunda do vazamento no Campo de Frade, Bacia de Campos, RJ.	62

Figura 4.23 - Campo de vento na superfície do mar, obtido da reanálise NCEP em 12/11/2011 18:00 GMT. A isolinha da magnitude de 2 m/s coincide com a inversão no contraste óleo-água na pluma próxima ao foco do vazamento.....	63
Figura 4.24 - Campo de reflectância de sunglint referente à imagem MODIS de 12/11/2011 16:20 GMT.	64
Figura 4.25 - Característica do LNglint e contraste do filme surfactante em relação a áreas limpas vizinhas avaliado pelo ICN, para geometria de aquisição (sol/sensor) de zênite similar à aquisição MODIS de 12/11/2012 16:20 GMT, com azimute relativo -157° e vento entre 0-3 m/s.	65
Figura 4.26 - Imagem MODIS de 12/11/2011, 16:20 GMT, banda 645 nm, resolução espacial 250 m, destacando a feição de óleo oriunda do vazamento ocorrido na Bacia de Campos, RJ. As isolinhas vermelhas indicam o ICN. Observa-se que na pluma próxima ao foco do vazamento o contraste positivo da mancha de óleo não concorda com o ICN que indica contraste negativo (ver texto).	66
Figura 4.27 - Pluma de óleo: no foco do vazamento apresenta contraste positivo na imagem em nível de cinza MODIS de 12/11/2011 16:20 GMT, banda 645 nm, resolução 250 m.	67
Figura 4.28 – Pluma de óleo: valores de contraste no campo de <i>sunglint</i> estimado por filtro passa alta FCNM (em cores) e isolinhas indicando o ICN referentes ao detalhe da imagem MODIS de 12/11/2011 16:20GMT.	67
Figura 4.29 - Imagem ASAR do dia 25/11/2011, 12:12 GMT, da região próxima de Cabo Frio e Cabo de São Tomé, litoral norte do RJ. Faixas escuras e contínuas sobre o oceano na imagem SAR são causadas pela supressão de ondas de <i>Bragg</i> na presença de filmes de óleo na superfície do mar.....	69
Figura 4.30 - Campo de vento na superfície do mar obtido de reanálise do NCEP/NCAR, em 25/11/2011, 12:00 GMT. As áreas com velocidades entre 3-8 m/s coincidem com a presença de filmes de óleo.	71
Figura 4.31 – Imagem ASAR de 22/11/2011, adquirida às 12:22GMT, mostrando a região da Bacia de Campos, litoral norte do RJ, em condições de vento > 8 m/s.....	73
Figura 4.32 – Campo de vento na superfície do mar adquirido do NCEP/NCAR em 22/11/2011, 12:00 GMT, ventos superiores a 8 m/s dissipam os filmes de petróleo momentaneamente.....	74
Figura 4.33 – MODIS <i>Aqua</i> de 06/11/2009 16:25 GMT, resolução 250m. Onda interna solitária com radiais concêntricas alternando regiões brilhantes e escuras, destacada pela ampliação e seta vermelha.	75
Figura 4.34 - Visão esquemática da onda interna solitária formando zonas de convergência acima da termoclina (ou picnoclina) que resultam em modulações da rugosidade na superfície marinha, (Fonte: adaptada de ROBINSON, 2004).	76
Figura 4.35 – Imagem MODIS <i>Terra</i> de 02/01/2010, 13:35 GMT, banda 645 nm, resolução espacial de 250 m. Feições de <i>sunglint</i> são moduladas pelo vento sudoeste, assim que este interage com relevo costeiro do litoral de SC.	77

Figura 4.36 – Imagem ASAR ENVISAT de 02/01/2010, 12h36min GMT mostrando parte do litoral de SC. Áreas de baixo sigma-zero próximo à costa e estrias de vento acompanhando o vento sudoeste.	78
Figura 4.37 - Vento na superfície do mar (10 m) dia 2/01/2010, 12:00 GMT. As linhas de contorno indicam a magnitude do vento em 2 m/s (azul) e 8 m/s (vermelho). Vento sudeste é predominante na região de Florianópolis, SC. ...	79
Figura 4.38 - Topografia e batimetria em 3-D (em cima) e plana (em baixo) de parte do litoral de SC. Valores em metros. O relevo costeiro pode ser uma barreira natural ao vento.	80
Figura 4.39 - Feições do Vórtice de São Tomé e borda oeste da Corrente do Brasil no sensor MERIS ENVISAT em condição de <i>sunlint</i> . Composição colorida MERIS R (0,680 μm), G (0,559 μm), B (0,442 μm), 1/12/2009 na Baía de Campos, RJ.....	81
Figura 4.40 - Esquema ilustrativo da diferente resposta na rugosidade do oceano em função da ocorrência de frentes térmicas (adaptada de ROBINSON; 2004).	82
Figura 4.41 – TSM MODIS <i>Aqua</i> média mensal de novembro/2009.....	83
Figura 4.42 - Imagem MODIS <i>Terra</i> de 3/11/2009, das 13:05 GMT, banda 645 nm, com resolução de 250 m. As áreas escuras próximas a Baía de Guanabara, RJ, indicam a presença de surfactantes.....	84
Figura 4.43 - Imagem MODIS <i>Terra</i> de 22/01/2010 13:05 GMT, composição colorida (R 645 nm; G 555 nm; B 469 nm), resolução de 500 m, mostrando a região adjacente ao delta do Rio Doce, ES. Ao sul da foz do Rio Doce e próximo à costa, observam-se feições brilhantes causadas pelo <i>sunlint</i> em interação com surfactantes.	85
Figura 4.44 - Imagem MODIS-Terra de 02/02/2010, das 13:30 GMT, banda 645 nm, com resolução de 250 m. Feições escuras e brilhantes no sunlint em áreas costeiras, próximas a saídas de estuários, são causadas por surfactantes de origem antropogênica ou por biofilmes formados por Blooms. Todos os estuários desta imagem, na zona costeira entre Florianópolis - SC e Ilha de São Sebastião - SP, apresentam assinatura no sunlint.	87

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 - Características das imagens ASAR.	19
Tabela 4.1 - Número de imagens ASAR e MODIS em condição de <i>sunlint</i> , quasesimultâneas e sem cobertura de nuvens. Referente à área de estudo entre janeiro de 2009 e agosto de 2010.	37
Tabela 4.2 – Descrição das feições observadas nas imagens MODIS <i>sunlint</i> e ASAR espaço-temporal coincidentes e sem cobertura de nuvens.	38
Tabela 4.3 – Imagens MODIS na condição de <i>sunlint</i> e SAR analisadas nos estudos de caso.	40
Tabela 4.4 - Características de feições de óleo mineral em imagens da superfície do oceano via SAR (adaptado de: SAR Marine User's Manual - NOAA).	70

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASAR	<i>Advanced Synthetic Aperture Radar</i>
CB	Corrente do Brasil
ECMWF	<i>European Center for Medium-Range Weather Forecasts</i>
EOS	<i>Earth Observation System</i>
FCNM	Filtro de contraste normalizado pelo mínimo
FOV	<i>Field of View</i>
ICN	Índice de Contraste Normalizado
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MeaSURES	<i>Making Earth Science Data Records</i>
MERIS	<i>Medium Resolution Imaging Spectrometer</i>
MODIS	<i>The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MPOSW	<i>Multi-Platform Ocean Surface Wind</i>
NASA	<i>National Agency of Space Administration</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OCM	<i>Ocean Color Monitor</i>
OLCI	<i>Ocean and Land Color Imager</i>
PODAAC	<i>Physical Oceanography. Distributed Active Archive Center</i>
REM	Radiação Eletromagnética
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SeaDAS	<i>SeaWiFS Data Analysis System</i>
SeaWiFS	<i>Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor</i>
TSM	Temperatura de superfície do mar
ZCAS	Zona de convergência do Atlântico Sul
VIIRS	<i>Visible Infrared Imager Radiometer Suite</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo Físico	Descrição	Escala
	Ângulo de reflexão.	Graus
φ_s	Azimute solar.	Graus
φ_v	Azimute solar.	Graus
$(,)$	Coeficiente de reflexão Fresnel para luz não polarizada.	adimensional
	Comprimento de onda.	m
Z_y	Considerando a direção y perpendicular ao azimute solar, temos a inclinação para reflexão especular neste eixo.	$m\ m^{-1}$
Z_x	Considerando X o azimute solar, temos a inclinação para reflexão especular neste eixo.	$m\ m^{-1}$
E	Constante solar.	$W\ m^{-2}$
c21, c03, c40, c04 e c22	Constantes que modulam a assimetria e curvatura da pdf(,).	constantes
pdf(,)	Função de densidade de probabilidade das inclinações das micro-facetas de superfície, elaborada por COX; MUNK (1954) com series de Gram-Charlier.	probabilidade
	Inclinação preferencial das micro-facetas do oceano para reflexão especular.	$m\ m^{-1}$
\bar{V}	Magnitude do vento a 10 m acima da linha de água.	$m\ s^{-1}$

up	Média quadrática das inclinações das micro-facetas de superfície em função do vento, na direção do azimute solar.	
cr	Média quadrática das inclinações das micro-facetas de superfície em função do vento, perpendicular ao azimute solar.	
σ^2	Média quadrática das inclinações das micro-facetas de superfície em função apenas da magnitude do vento.	
σ_{gua}^2	Média quadrática das inclinações das micro-facetas de superfície limpas de surfactantes.	
$\sigma_{surfactante}^2$	Média quadrática das inclinações das micro-facetas de superfície com surfactantes.	
	Normalizações da inclinação da superfície do mar na direção do sol.	
	Normalizações da inclinação da superfície do mar perpendicular ao sol.	
LN _{glint}	Radiância de <i>Sun glitter</i> normalizada pela radiância solar incidente.	Razão
LN _{glint} ^{água}	Radiância de <i>Sun glitter</i> normalizada pela radiância solar incidente, utilizando σ^2 característico de águas límpidas.	Razão

$LN_{\text{glint}}^{\text{surfactante}}$	Radiância de <i>Sun glitter</i> normalizada pela radiância solar incidente, utilizando σ^2 característico de águas contaminadas por surfactantes.	Razão
L_{glint}	Radiância de <i>sunlint</i> .	$W m^{-2} sr^{-1}$
L_{solar}	Radiância solar incidente.	$W m^{-2} sr^{-1}$
R_{glint}	Reflectância <i>sunlint</i> de sensoriamento remoto.	sr^{-1}
nL	reflectâncias de sensoriamento remoto normalizadas.	$m W cm^2 \mu m^{-1} sr^{-1}$
$PDF(Z_x, Z_y)$	Simplificação física da pdf(,).	Probabilidade
v	Zênite de visada.	Graus
s	Zênite solar.	Graus

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos da dissertação	4
1.1.1. Objetivo geral	4
1.1.2. Objetivos específicos	4
2 REVISÃO TEÓRICA.....	7
2.1. Reflexão bidirecional na superfície mar entre o sol e o sensor remoto – <i>sunglint</i>	7
3 MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1. Área de estudo	15
3.2. Radar de abertura sintética	18
3.2.1. <i>Advanced Synthetic Aperture Radar - ASAR</i>	19
3.2.2. RADARSAT.....	20
3.3. Sensor de cor do oceano: MODIS.....	20
3.4. Vento na superfície do mar	21
3.4.1. <i>Cross-calibrated multi-platform ocean surface wind vector I3.0 first-look analyses</i>	21
3.4.2. Dados de vento de reanálise.....	22
3.5. Dados complementares.....	23
3.6. Contraste modelado e sua relação com o vento e a geometria de aquisição	24
3.7. Metodologia.....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1. Biofilmes.....	40
4.2. Filmes Minerais	55
4.3. Feições oceanográficas.....	75
4.3.1. Ondas internas.....	75
4.3.2. Sombra de vento por relevo costeiro.....	77
4.3.3. Frentes oceânicas, vórtices e meandros.....	80
4.3.4. Plumias costeiras de rios	83
5 CONCLUSÃO	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

1 INTRODUÇÃO

O oceano é um macrossistema que cobre três quartos do globo, local de importantes processos biológicos, físicos, geológicos e químicos, assim como descrito por Longhurst (1995). Estes processos são intimamente ligados dentro de escalas múltiplas temporais e espaciais, aos quais de acordo com Polovina et al. (2001), Falkowski (2012) e Williams (2012), regem o clima e a vida no planeta Terra.

Entender a dinâmica dos processos oceanográficos é essencial. Porém existem inúmeras limitações e barreiras, como a amostragem que inclui o grande custo financeiro de cruzeiros oceanográficos (FUJIOKA, et al. 2003), campanhas para coletas *in-situ* (SERVAIN et al., 1998), o desenvolvimento e a operação de satélites voltados ao sensoriamento remoto dos oceanos.

Uma das experiências bem sucedidas na observação oceanográfica é a executada por programas de cor do oceano. Historicamente, foram levantadas séries temporais contínuas de estimativas orbitais globais (DOGLIOTTI et al., 2009 e ANTOINE et al., 2008), iniciadas com o sensor pioneiro *Coastal Zone Color Scanner* (CZCS). Estas foram continuadas com uso do *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS), *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), *MEdium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS), *Ocean Colour Monitor-1* (OCM) e OCM-2 da *Indian Space Research Organization* e mais recentemente, pelo *Visible Infrared Imager Radiometer Suite* (VIIRS). Futuramente, são previstos novos sensores como o *Ocean and Land Colour Imager* (OLCI), a ser lançado a bordo do satélite Sentinel-3 e a missão brasileira argentina SABIA-Mar.

Mesmo que suas aquisições sejam confinadas a camada superficial eufótica (~50 m), pequena se comparada à profundidade média dos oceanos de 4 km, as informações contidas revelam feições dinâmicas como correntes, ciclos biogeoquímicos como o ciclo do carbono e do nitrogênio, condições de pesca, qualidade de águas costeiras, mudanças climáticas, catástrofes naturais e

provocadas pelo homem. Assim, as medidas obtidas por sensores de cor do oceano são uma janela para o ambiente marinho.

Além da camada eufótica, outra região amostrada via satélites é a nanométrica (ou mais fina), linha da superfície marinha, onde se concentram importantes processos de troca de calor, *momentum*, partículas e gases. Do comportamento desta fina camada podemos estimar medidas de temperatura (KILPATRICK et al., 2001), correntes geostróficas (CHAIGNEAU et al., 2009), vento e a rugosidade. A superfície livre do mar é moldada por processos dinâmicos do oceano e meteorológicos, assim como discutido em Clemente-Colón e Yan (2000). Processos biológicos (HASHIZUME; LIU, 2004) ou ligados à ação do homem podem também determinar feições na superfície marinha, como os filmes biogênicos formados pelo metabolismo do plâncton e/ou do nécton, exsudações naturais (HU et al., 2009) ou vazamentos ligados à exploração petrolífera (HU et al., 2011) e dejetos continentais (DIGIACOMO et al., 2004).

Em 1954, Cox e Munk publicam uma experiência não ecológica para os conceitos atuais, ao qual foram despejados 200 galões de uma mistura de derivados de petróleo e óleo de peixe no Golfo do México (COX; MUNK, 1954). As análises elucidaram o conhecimento sobre a rugosidade superficial em função do vento e substâncias surfactantes¹. O atrito do vento gera ondas capilares na superfície do oceano e permite conceituar a superfície em um contínuo de microfacetas com orientação variável dependente do vento.

No caso de filmes naturais ou produzidos pelo homem, de acordo com Lin et al. (2003), o caráter inelástico destas substâncias surfactantes suprime a formação de ondas capilares e impõe uma alteração na inclinação dessas microfacetas, descritas por Otremba e Piskozub (2001). Assim, devido ao diferente padrão na orientação preferencial das microfacetas de superfície, imposto pela presença de surfactantes em relação a áreas circundantes, é

¹ Surfactantes ou tensoativos descrevem a propriedade de substâncias em alterar características da superfície da água.

possível via sensores orbitais detectar filmes de óleos naturais ou antropogênicos pelo o retorno da radiação eletromagnética refletida na superfície do mar (JACKSON; ALPERS, 2010).

Quando a radiação solar é refletida na superfície do oceano diretamente à visada do sensor, ocorre a condição denominada *sunlint* ou *Sun glitter* (COX; MUNK, 1956). As informações obtidas por sensoriamento remoto em condição de *sunlint* são predominantes da rugosidade e geometria da superfície, não mais da camada eufótica.

Inúmeros trabalhos entre as décadas de 50 e 70, como os de Stilwell (1969), Bowley e Greaves (1970) e Strong e Derycke (1973), por exemplo, exploraram as feições de *sunlint* causadas por correntes e outros processos de mesoescala. Porém, talvez a relação de cobertura e resolução espacial/temporal dos sensores ópticos da época ou a confinamento sazonal do *sunlint* imposta pela posição solar, resultou num passado próximo no mais discreto uso da técnica ou preocupações voltadas a remover o efeito do *sunlint*, como as descritas por LEHNER et al. (2002) e Kay et al. (2009).

Mais recentemente, a utilização de imagens ópticas em condições de *sunlint* passa por uma revisita por vários autores, podendo-se citar, entre outros, os trabalhos de Hu et al. (2009), Lorenzetti et al. (2009), Alawadi et al (2008), Adamo et al. (2006) e Gagliardini e Clemente-Colón (2004). É consenso que este produto pode ser utilizado, de forma integrada, com imagens de radar de abertura sintética (SAR) e imagens no visível para o monitoramento oceanográficos (SANDFORD et al., 2011), proteção de ambientes sensíveis a vazamentos de petróleo (JERNELÖV, 2010) e operações *off-shore* (BENTZ et al., 2004).

O SAR tem sido considerado o mais bem sucedido sensor para monitorar o óleo na superfície do mar, com capacidade de operação em praticamente qualquer condição de iluminação e meteorológica (Brekke e Solberg, 2005). Porém, o imageamento SAR somente é realizado sob demanda e até os dias

de hoje, envolve custos financeiros que não são negligenciáveis (Espedal e Wahl, 2010). As principais vantagens do imageamento da cor do oceano em condições de *sunlint* são a disponibilidade gratuita e em tempo quase-real para a comunidade científica e sociedade em geral, através da Internet (ver <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>), sem necessidade de solicitação prévia. Os sensores de cor do oceano, em sua grande maioria, obtêm coberturas globais de forma rotineira.

Diante deste exposto, o escopo da presente dissertação é explorar de modo quantitativo a aplicabilidade de imagens em condição de *sunlint* na detecção de feições oceanográficas, filmes biogênicos e minerais na costa sudeste do Brasil. Significando uma importante validação oceanográfica, devido á particularidades locais como ressurgência costeira, batimetria da Plataforma Continental, plumas de rios e a Zona de Convergência do Atlântico Sul sob influência da Corrente do Brasil com fluxo turbulento predominante e alta atividade de mesoescala (PETERSON; STRAMMA, 1991 e SILVEIRA et al., 2004).

1.1. Objetivos da dissertação

1.1.1. Objetivo geral

Explorar o uso de imagens da cor do oceano MODIS em condições de *sunlint* para a detecção de feições oceanográficas, manchas de óleo e biofilmes presentes na superfície do mar, na costa sudeste brasileira.

1.1.2. Objetivos específicos

Identificar imagens da cor do oceano em condições de *sunlint* com a presença de óleo e filmes biogênicos superficiais na área de estudo.

Modelar o contraste causado por substâncias surfactantes na superfície do mar em imagens com *sunlint* de modo a diferenciá-las de feições de mesoescala

Comparar a identificação de filmes surfactantes em imagens SAR e *sunlint*.

Avaliar a sinergia entre o uso de imagens com *sunlint* e a aplicação de algoritmos bio-ópticos na detecção de florações fitoplanctônicas geradores de filmes biogênicos.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1. Reflexão bidirecional na superfície mar entre o sol e o sensor remoto – *sunlint*

Sunlint ou *Sun glitter* refere-se à reflexão bidirecional ocorrida na superfície do mar pela radiação eletromagnética (REM) solar diretamente à visada do sensor (BREON; HERIOT, 2006). A condição de *sunlint* é consequência de determinadas posições do sol e da visada do sensor aos quais formam ângulos propícios à reflexão na superfície do mar. A superfície do oceano raramente é plana, apresentando rugosidade em função do atrito com o vento e outros processos dinâmicos.

Imagens de sensoriamento do oceano, com condição de *sunlint*, apresentam de maneira predominante informações sobre o espectro solar em relação às propriedades da coluna d'água (Figura 2.1). Assim, a condição de *sunlint* causa interferência prejudicial em estimativas de concentração de clorofila, materiais em suspensão e demais propriedades do oceano estimadas a partir do sensoriamento remoto, em comprimentos de onda similares ao do espectro solar. Em consequência desta interferência áreas em condições de *sunlint* são frequentemente descartadas ou aplicam-se técnicas para diminuir o efeito do mesmo (HU, 2011).

A interferência do vento na rugosidade da superfície marinha já era conhecida por navegadores da antiguidade. Utilizavam óleo de baleia para evitar que em tempestades ondas se quebrem e danifiquem as embarcações. Na atual navegação eletrônica o uso de óleo diesel também é indicado em caso de tempo severo (MIGUENS, 1999).

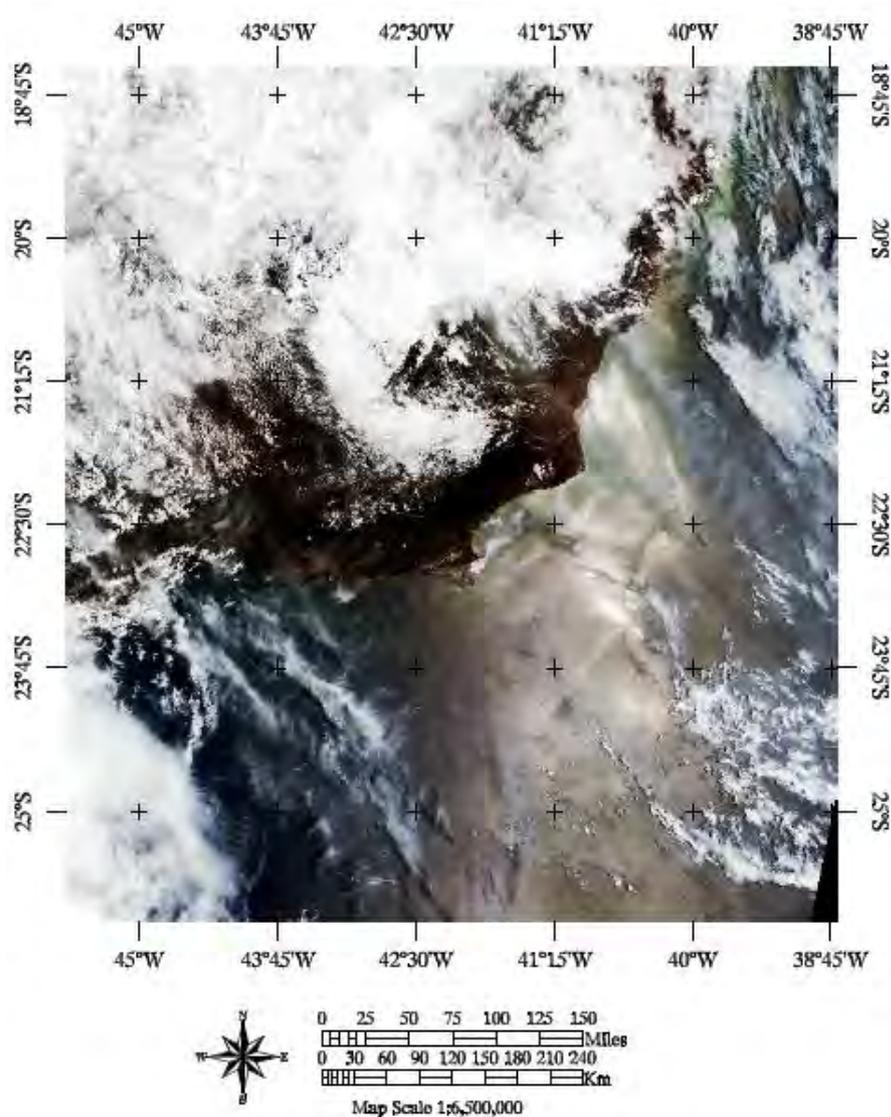


Figura 2.1 - Composição colorida MERIS (0,688 μm), G (0,510 μm), B (0,443 μm), 1/1/2009 em condição de *sunglint*, na Bacia de Campos, RJ. A condição de *sunglint* interfere em estimativas da coluna d'água via imagem de cor do oceano por que a informação predominante contida no espectro refletido é da fina camada superficial.

A quantificação do *Sunglint* foi inicialmente proposta por Cox e Munk (1954) via fotografias aéreas da superfície marinha em uma região próxima ao Havaí. Cox e Munk (1954) descrevem a relação estatística entre o *sunglint* em termos das inclinações da superfície do oceano, considerando a geometria de aquisição

(azimute/zênite do sol/visada) (Figura 2.2 e 2.3) e o vento na superfície do mar. Neste experimento de campo ocorrido em 1951, foram despejados 200 galões de uma mistura de óleo diesel e óleo de peixe para entender as alterações ocorridas no *sunglint* na presença de surfactante e em superfície limpas.

A reflectância *sunglint* de sensoriamento remoto R_{glint} (sr^{-1}) de acordo Cox e Munk (1954) é caracterizada pela reflexão especular bidirecional entre sol e sensor na superfície do oceano. Nesta secção o cálculo do R_{glint} (Equação 2.1) será explicado com detalhes.

$$R_{glint} = \frac{\pi L_{glint}}{E \cos \theta_s} = \frac{\rho(\omega, \lambda) pdf(\xi, \eta)}{4 \cos^4 \theta_v \cos \theta_s} \quad (2.1)$$

De acordo com a Equação 2.1, no segundo termo temos L_{glint} representando a radiância ($W m^{-2} sr^{-1}$) e $E \cos \theta_s$ a irradiância solar ($W m^{-2}$) de acordo com o zênite solar θ_s . No terceiro termo da Equação 2.1, temos zênite de visada θ_v e o coeficiente de reflexão Fresnel para a luz não polarizada $\rho(\omega, \lambda)$. O coeficiente de Fresnel é um termo adimensional relativo aos ângulos de reflexão e refração da água e remete à parte da equação que determina a parcela de energia que será refletida.

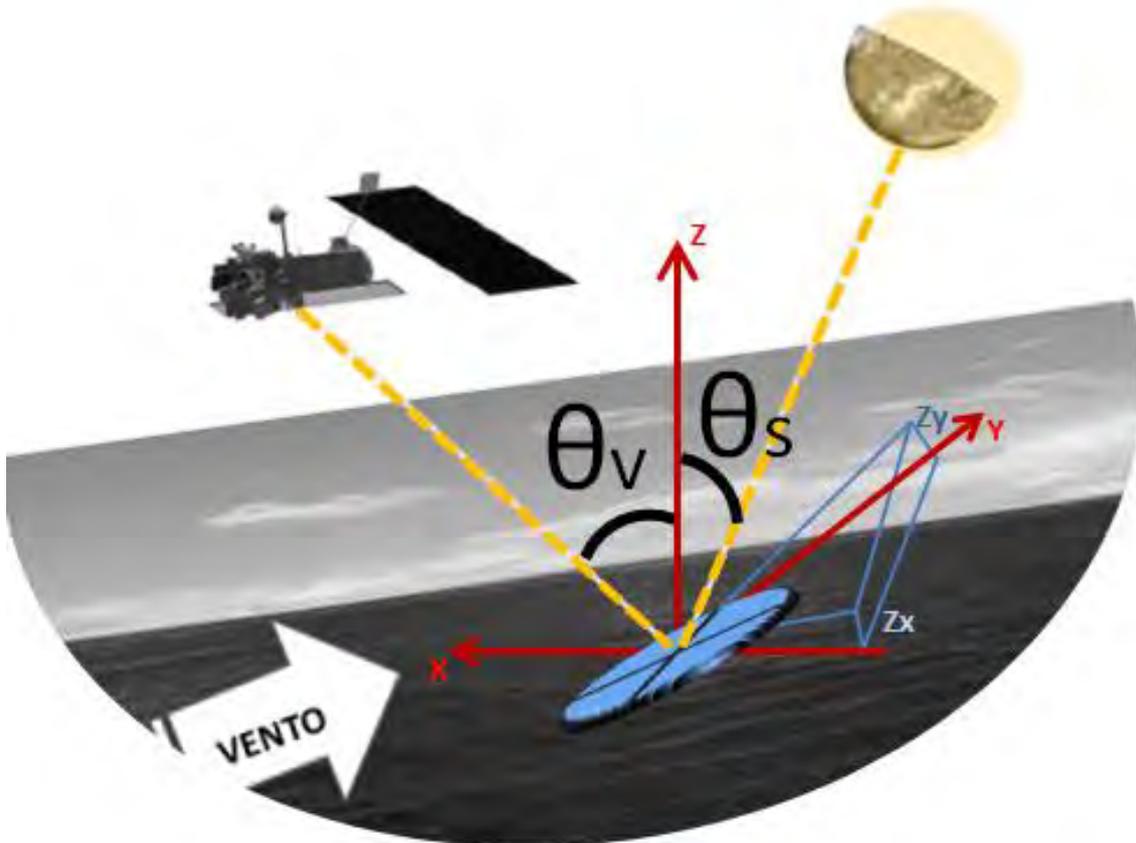


Figura 2.2 – Descrição da geometria de aquisição (COX; MUNK, 1954) exemplificando o zênite solar θ_s e de visada θ_v , vento na superfície do mar e inclinações preferencial das microfacetas do oceano para a reflexão especular (Z_x e Z_y). O disco no centro do eixo das coordenadas representa a inclinação do termo β (ver texto).

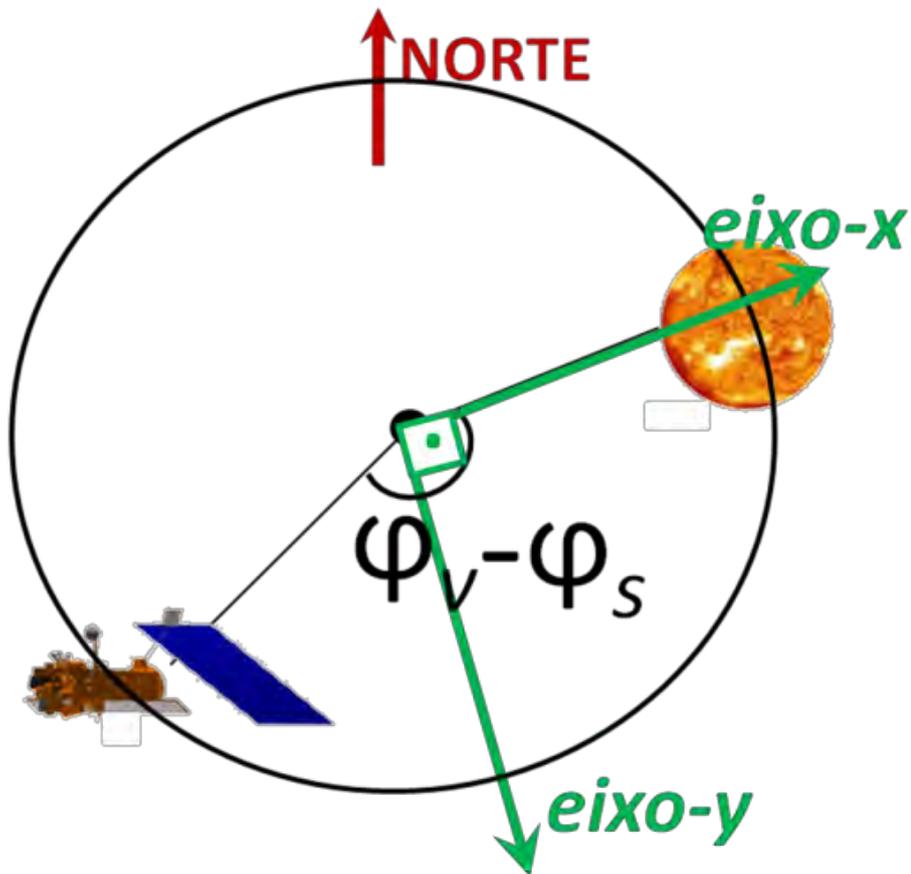


Figura 2.3 – Descrição da geometria de aquisição em relação ao azimute de visada φ_v e solar φ_s , conforme descrito por Jackson e Alpers (2010). Usadas nas equações 2.3 e 2.4 que descrevem a orientação preferencial das microfacetas da superfície marinha para a reflexão especular na direção do sol Z_x e perpendicular ao azimute solar Z_y .

O Termo β descreve a inclinação no plano da superfície do mar para a reflexão especular (Equação 2.2).

$$\tan \beta = \sqrt{Z_x^2 + Z_y^2} \quad (2.2)$$

Os termos Z_x e Z_y (Figura 2.2) descrevem as inclinações da superfície do mar, considerando o eixo-x deste sistema o azimute solar e o eixo-y perpendicular ao azimute solar. Estes termos de inclinação para a reflexão especular são descritos na Equação 2.3 e Equação 2.4, conforme elucidado por JACKSON; ALPERS (2010).

$$Z_x = \frac{\partial z}{\partial x} = -(\sin \theta_s + \sin \theta_v \cos(\varphi_v - \varphi_s))/(\cos \theta_s + \cos \theta_v) \quad (2.3)$$

$$Z_y = \frac{\partial z}{\partial y} = (\sin \theta_v \sin(\varphi_v - \varphi_s))/(\cos \theta_s + \cos \theta_v) \quad (2.4)$$

Os termos até agora descritos tratam a reflexão da luz considerando apenas os aspectos da geometria de aquisição por um sensor remoto numa simplificação física que considera a superfície marinha plana. Porém, a superfície do oceano nunca se comporta como uma superfície perfeitamente plana devido aos processos dinâmicos do oceano e principalmente pela ação do vento.

A reflexão do Sol na superfície do mar, no caso de um oceano totalmente plano, seria caracterizada nas imagens de satélites por uma esfera solar de escala 10 km. Porém, o atrito do vento insere alta frequência na superfície do mar em forma de ondas capilares ($\lambda < 0,02$ m). A ação do vento impõe que várias microfacetas estejam em geometria ótima para a reflexão especular. Esta alta frequência expande as áreas sobre condição de *sun glint* e forma uma das maiores feições observadas por sensoriamento remoto.

O termo que descreve a rugosidade do oceano em função do vento e sua interferência na radiação refletida foi descrita por COX; MUNK (1954) através de uma função de densidade de probabilidade $pdf(\xi, \eta)$, de acordo com a Equação 2.5.

$$\begin{aligned}
\text{pdf}(\xi, \eta) = & \frac{1}{2\pi\sigma_{\text{up}}\sigma_{\text{cr}}} \exp\left(-\frac{\xi^2 + \eta^2}{2}\right) & (2.5) \\
& \left\{1 - \frac{1}{2}c_{21}(\xi^2 - 1)\eta - \frac{1}{6}c_{03}(\eta^3 - 3\eta) \right. \\
& + \frac{1}{24}c_{40}(\xi^4 - 6\xi^2 + 3) + \frac{1}{24}c_{04}(\eta^4 - 6\eta^2 + 3) \\
& \left. + \frac{1}{4}c_{22}(\xi^2 - 1)(\eta^2 - 1)\right\}
\end{aligned}$$

Onde os coeficientes c_{21} , c_{03} , c_{40} , c_{04} e c_{22} configuram a curvatura e assimetria da pdf(ξ, η) em relação à componente de vento na superfície do mar. Os parâmetros ξ e η são respectivamente, as normalizações das inclinações na superfície do mar nas direções x e y (considerando a origem 0° no azimute solar), como descrito nas Equações 2.6 e 2.7. A normalização das inclinações da superfície se dá pela divisão da média quadrática das inclinações das microfacetas de superfície causadas pela componente do vento na direção do azimute solar σ_{up} e perpendicular ao azimute solar σ_{cr} .

$$\xi = \frac{Z_x}{\sigma_{\text{up}}} \quad (2.6)$$

$$\eta = \frac{Z_y}{\sigma_{\text{cr}}} \quad (2.7)$$

Aprimoramentos nos parâmetros da pdf(,) foram sugeridos pelo trabalho de BREON; HERIOT (2006), onde um conjunto amostral maior e mais representativo foi processado utilizando dados de vento obtidos com escaterômetro e reflectâncias do oceano obtidas por radiômetro multidirecional.

O conceito de ângulo crítico é um específico zênite de visada onde diferentes características da rugosidade do oceano produzem feições idênticas nos campos de *sunlint*, não permitindo diferenciação, por exemplo, de uma região com óleo de uma vizinha limpa. O estudo de JACKSON; ALPERS (2010) sobre condições de ângulos críticos em campo de *sunlint* usa uma simplificação da pdf(ξ, η). Sendo σ^2 a média quadrática das inclinações das microfacetas marinha em função da magnitude do vento, temos a expressão $PDF(Z_x, Z_y)$ descrita Equação 2.8.

$$PDF(Z_x, Z_y) = \frac{1}{\pi\sigma^2} \exp\left(\frac{-(Z_x^2 + Z_y^2)}{\sigma^2}\right) \quad (2.8)$$

As médias quadráticas das inclinações das microfacetas da superfície σ^2 , numa simplificação física, passam a ter dependência apenas da magnitude do vento \bar{V} (não importando a direção). A propriedade σ^2 da inclinação das microfacetas foi estimada por COX; MUNK (1954), tanto para superfícies livres de surfactante $\sigma_{\text{água}}^2$ (Equação 2.9), quanto para superfícies com surfactantes $\sigma_{\text{surfactante}}^2$ (Equação 2.10). Exemplos de surfactantes podem ser os filmes biogênicos ou derramamentos de petróleo.

$$\sigma_{\text{água}}^2 = 0.003 + 0.00512 \bar{V} \quad (2.9)$$

$$\sigma_{\text{surfactante}}^2 = 0.008 + 0.00156 \bar{V} \quad (2.10)$$

Assim, a pdf(ξ, η) e conseqüentemente a quantificação do *sunlint*, pode ser calculada em situações onde a geometria de aquisição e o vento próximo à superfície sejam conhecidos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A área de estudo compreende a costa sudeste do Brasil (Figura 3.1), entre as latitudes de 18°S-30°S e longitudes de 49°W-32°W. Nesta região, a Corrente do Brasil (CB) rege a circulação de superfície próxima a Plataforma Continental num fluxo sul sudeste, predominante de Água Tropical pobre em nutrientes (MANO et al., 2012).

Processos oceanográficos como oscilação da borda oeste da CB delimitada por Águas Costeiras, meandros, vórtices (LORENZZETTI et al., 2009), ondas internas (VIANA et al., 1998), eventos de ressurgência e plumas de rios (RODRIGUES et al., 2009) têm influência na entrada de nutrientes à camada eufótica. Assim, os processos envolvendo estas feições resultam em aumento significativo da biomassa e produção primária marinha em um ambiente predominante heterotrófico.

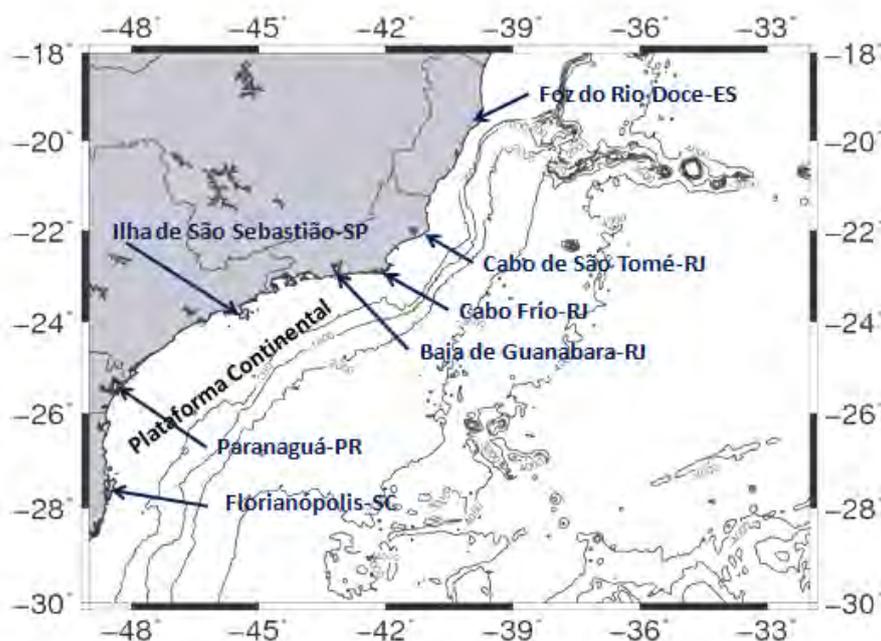


Figura 3.1 – Área de estudo localizada na costa sudeste brasileira e principais referências geográficas utilizadas no trabalho. Isóbatas em metros.

A CB é conceituada como um fluxo turbulento, com transporte relativamente baixo quando comparado com outras correntes de borda oeste como a Corrente do Golfo com transporte² na ordem de 110 Sv (MEINEN et al., 2009) ou a corrente de Kuroshio na ordem de 80 Sv (NAKANO et al., 2008). A CB desenvolve transporte menor que 11 Sv, na região entre 19°S e 25°S, com um fluxo predominante superficial e confinado pela Plataforma Continental, sendo que 50% do transporte se dá até 200 m de profundidade (PETERSON; STRAMMA, 1991).

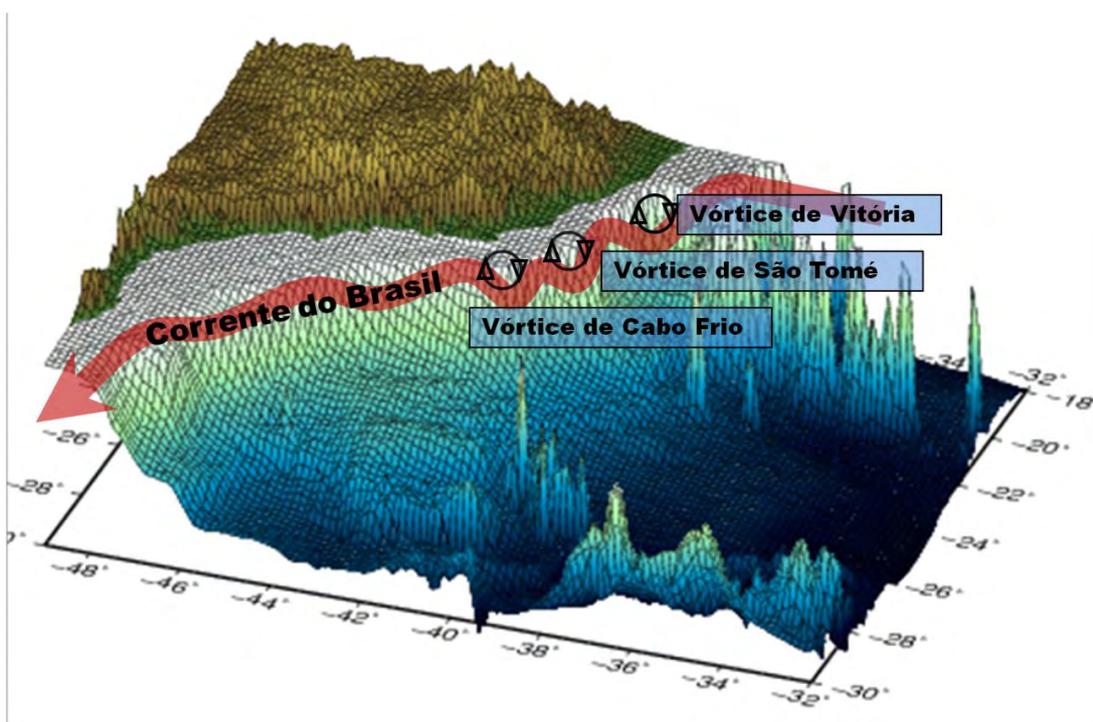


Figura 3.2 - Área de estudo com feições esquemáticas da Corrente do Brasil e dos vórtices de Vitória, São Tomé e Cabo Frio. O relevo e batimetria ETOPO1 é documentado em Amante e Eakins (2009).

² Sverdrup é uma unidade de transporte de volume ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) usual na oceanografia física.

Segundo Oliveira et al. (2009) a velocidade média da CB está entre 0,20-0,30 m/s com desvio padrão de 0,15 m/s. A CB acompanha a margem da Plataforma Continental e ao se projetar na direção oceânica gera intensa atividade de mesoescala, processo comum em correntes de borda oeste.

O estudo de Silveira et al. (2004) descreve a CB como corrente de borda oeste ao longo da margem continental com uma atividade alta de mesoescala. Podemos ressaltar as atividades dos vórtices de Vitória, São Tomé e de Cabo Frio na região, acompanhando os meandros da frente da CB (Figura 3.2). O vórtice de Vitória foi caracterizado por Gaeta et al. (1999) como um núcleo frio ciclônico de 50 km de diâmetro dentro da CB. O vórtice de Cabo Frio frequentemente se desloca para sul acompanhando o fluxo da CB e o vórtice de São Tomé acompanha a incursão do meandro para leste (CALADO et al., 2008). Estes vórtices podem interagir com a ressurgência costeira, aumentando a produtividade biológica.

Na costa sudeste do Brasil, a ressurgência costeira é causada pelo vento na Plataforma Continental em eventos quase sazonais principalmente no verão austral. O evento de ressurgência se dá na costa próximo a Cabo Frio quando o vento nordeste persiste por dias, resultando em temperaturas na superfície do mar - TSM próximas de 15°C. Com a passagem de frentes frias devido à rotação no sentido do vento para sudoeste, o processo de ressurgência é reprimido (RODRIGUES; LORENZZETTI, 2001).

A estrutura de massas d'água relevantes na superfície é composta pelo domínio na superfície da Água Tropical (AT) com temperatura >20°C e salinidade >36.4. Abaixo de 200 m predomina a Água Central do Atlântico Sul (ACAS) de temperatura <20°C e Salinidade <36.4. A ACAS tem importante função biológica devido aos fluxos de nutrientes à camada eufótica (KAMPEL, 2003).

O trabalho de Campos et al. (2000) evidencia que a presença da ACAS, a 200 m de profundidade, posicionada acima da quebra da Plataforma Continental da

Costa Sudeste do Brasil é resultado da ressurgência. No verão a interação da Plataforma Continental com meandros da CB pode ocorrer combinado à ressurgência costeira induzida por ventos predominantes de Nordeste.

Segundo Palma e Matano (2009), alterações na linha de costa e largura da Plataforma Continental, associadas às oscilações da dinâmica da CB resultam em fluxos verticais alterando a estrutura das massas d'água sobre a Plataforma Continental. A estrutura vertical da AT e ACAS é alterada quando CB direciona-se para fora da costa. Associada a formação de vórtices e meandros, fluxos ascendentes advectam ACAS à camada eufótica inserindo nutrientes e elevando a produtividade biológica (SILVEIRA et al., 2008).

Uma dificuldade na aquisição via sensoriamento remoto nesta área é a presença muito constante de nuvens formadas pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCAS é uma feição meteorológica caracterizada como uma banda convectiva formada entre 20°-40°S e 50° -20°W, presente durante quase o ano todo. Sua maior manifestação ocorre no verão austral devido à forte convecção causada por altas TSM. (BARREIRO et al., 2002).

3.2. Radar de abertura sintética

O emprego dos sensores orbitais SAR (*Synthetic Aperture Radar*) é hoje a melhor ferramenta para a detecção de manchas de óleo devido a sua capacidade de monitoramento sob variadas condições atmosféricas em qualquer condição de iluminação solar, registrando assim as propriedades de retroespalhamento (*backscattering*) da reflexão das microondas com boa resolução e cobertura espacial (BREKKE; SOLBERG, 2005; CHAN; KOO, 2008).

O radar emite energia a um determinado alvo na superfície marinha, a quantidade de energia emitida e recebida dentro dos ângulos sólidos demarcados pela antena do radar e pela área alvo pode ser quantificada pela equação do radar (ROBINSON, 2004). Desconsiderando a dissipação de

energia para fora desses ângulos sólidos e considerando apenas características reflexivas do alvo temos a grandeza adimensional denominada coeficiente de retroespalhamento ou sigma-zero (*normalized radar cross section*).

A seguir apresentaremos uma breve descrição dos SAR a bordo das plataformas orbitais RADARSAT-1 e ENVISAT.

3.2.1. *Advanced Synthetic Aperture Radar - ASAR*

O *Advanced Synthetic Aperture Radar* (ASAR) instrumento a bordo da plataforma ENVISAT lançada em 2002, opera na banda C nas polarizações horizontal, vertical e cruzadas (HH, VV, HV e VH).

O ASAR tem capacidade de operar em cinco modos (Tabela 3.1) garantindo versatilidade em sua resolução espacial, podendo utilizar resolução média para observações em larga escala do oceano e também podendo utilizar alta resolução em aplicações costeiras (MOUCHE et al., 2005). Desnos et al. (2000) demonstram a aplicabilidade do ASAR na observação e caracterização de diferentes feições oceanográficas como correntes, *swell*, ondas internas, meandros, frentes, detecção de embarcações e monitoramento de manchas de óleo.

Tabela 3.1 - Características das imagens ASAR.

MODO	Taxa de aquisição	Polarização	Resolução espacial	Largura da faixa Km	Ângulo de incidência
Imagem	Alta	HH ou VV	30 m	56-105	15°-45°
Polarização alterada	Alta	HH+VV, HH+HV, VV+VH	30m	56-105	15°-45°
Faixa ampla	Alta	HH ou VV	150 m	405	17°-42°
Monitoramento Global	Baixa	HH ou VV	1 km	405	17°-42°
Modo de onda	Baixa	HH ou VV	100 km	5	15°-45°

As imagens ASAR foram fornecidas pela Estação de Sensoriamento Remoto Marinho do INPE situado em Cachoeira Paulista – SP, numa série temporal de 194 imagens entre outubro de 2009 e julho 2010. Imagens de novembro dezembro de 2011, também foram adquiridas para o estudo de caso sobre filmes originais do petróleo.

3.2.2. RADARSAT

O SAR banda C (f 4-8 GHz, $\lambda = 3.75-7.5$ cm) e polarização HH a bordo RADARSAT-1 da *Canadian Space Agency* foi lançado em 1995. A imagens *ScanSAR Narrow near range mode* possuem resolução espacial de 50 m por 50 m (capacidade de distinguir alvos na superfície), espaçamento entre *pixels* de 25 m, ângulo de incidência entre 20° - 46° e cobertura de 300 km. (BREKKE; SOLBERG, 2005). As imagens do RADARSAT-1 foram processadas e disponibilizadas pela PETOBRAS para o estudo de caso de filmes biogênicos ocorrido em janeiro de 2003.

A velocidade do vento próximo à superfície do mar é uma variável importante na identificação de feições registradas por imagens SAR. De acordo com Holt (2004), áreas com baixos ventos costumam causar ambiguidades em imagens SAR devido ao fraco espalhamento *Bragg*. A presença de óleos biogênicos e minerais na superfície do mar, por exemplo, também produzem áreas de baixo sigma-zero.

3.3. Sensor de cor do oceano: MODIS

O sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) peça chave do programa da *National Agency of Space Administration* (NASA) *Earth Observing System* (EOS), obtém imagens a bordo das plataformas orbitais *Terra* e *Aqua* com grande valia para o entendimento de processos oceanográficos, continentais e de baixa atmosfera.

O sensor MODIS possui 36 bandas espectrais com resolução espacial de 250 m, 500 m e 1 km numa órbita polar sol sincrônica, numa distância da terra de 705 km, seu campo de visada (*field of view* – FOV) é de 2330 km perpendicular ao percurso do satélite e 10 km *along-track*.

Recentes trabalhos como o de Lotliker et al. (2008) sugerem o uso de imagens de cor do oceano como MODIS e *Medium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS) para o monitoramento de vazamento de óleo, quando as condições de aquisição favorecem o *sun glint*.

As imagens MODIS destinadas ao estudo de campos de *sun glint* foram examinadas no nível 1B (calibrada e com correção geométrica) com o uso do *software SeaWiFS Data Analysis System* (SeaDAS) versão 6.3 desenvolvido pela NASA - *Goddard Space Flight Center* (GSFC), que pode ser obtido no portal <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/seadas/>. As imagens MODIS, com o propósito de investigar campos de *sun glint*, não foram processadas para o nível 2 pois a rigorosa correção atmosférica mascara este tipo de feição (HU, 2011).

3.4. Vento na superfície do mar

3.4.1. *Cross-calibrated multi-platform ocean surface wind vector l3.0 first-look analyses*

O produto de vento na superfície do mar, denominado Cross-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind Vector L3.0 First-Look Analyses (MPOSW) é disponibilizado pelo Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) no site <http://podaac.jpl.nasa.gov>. O MPOSW foi desenvolvido para aplicações meteorológicas e oceanográficas com resolução temporal de 6 horas, série temporal de julho de 1987 a dezembro de 2010, resolução espacial de 25 km e cobertura global (ATLAS et al., 2011).

O MPOSW é resultante do programa de pesquisas da NASA *Making Earth Science Data Records* para uso em pesquisas ambientais (MeaSURES). O conjunto de dados de vento na superfície do mar MPOSW combina estimativas de vento de reanálise operacional do modelo gerado pelo *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), dados *in-situ* e estimativas via sensoriamento remoto.

O vento via sensoriamento remoto é estimado por microonda passiva (BENTAMI et al., 1999), microondas ativas e escaterômetros (CHELTON et al., 2004). Escaterômetros são específicos sensores remotos de microonda ativa que obtém a *normalized backscatter* (sigma-zero) da superfície do oceano. A magnitude e velocidade do vento na superfície podem ser estimadas por meio das suas relações empíricas com sigma-zero, estas relações são descritas pelas funções de modelo geofísico (*geophysical model function*), como as avaliadas por Chi e Li (1988) e também por Long e Mendel (1991).

3.4.2. Dados de vento de reanálise

O projeto reanálise da *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) fornece uma consistente fonte de dados de vento na superfície do mar (10 m da superfície), que podem ser obtidos no site <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

A série de dados oferecidos pelo NCEP/NCAR é caracterizada por um sistema em estado da arte na aquisição de dados ambientais. Uma reanálise paralela é feita para diminuir o efeito de erros devido à variação nos métodos de medidas dos vários parâmetros geofísicos descritos em Kalnay et al. (1996).

A reanálise do NCEP/NCAR disponibiliza estimativas de vento a cada 6 horas numa série temporal original de 1914 até o presente. Seus dados são globais, em grade de 192 por 94 pontos entre as coordenadas de 88,542°N - 88,542°S e 0°E - 358,125°E, conforme indicado na Figura 3.3. Para a costa sudeste do

Brasil, considera-se a resolução espacial aproximada de 1,7° de latitude e 1,8° de longitude.

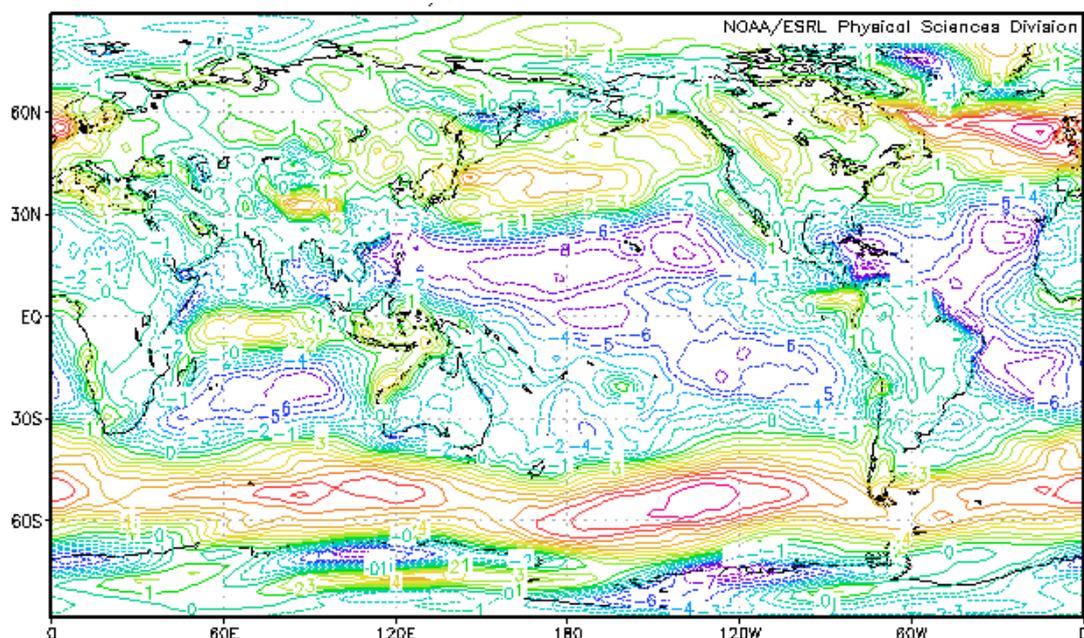


Figura 3.3 – Campo de vento meridional à 10 m acima da superfície, média mensal em dezembro de 2011. Fonte: NCEP Reanalysis data obtido pela NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, pelo site <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

As componentes do vento zonal e meridional são obtidas considerando as variações na estabilidade da atmosfera na camada limite, informação importante, considerando que a estabilidade na camada limite ar-mar suprime a formação de ondas capilares, cruciais para a distinção de filmes surfactantes em imagens SAR e de *sunlint*.

3.5. Dados complementares

As imagens orbitais ópticas sob condição de *sunlint* e SAR expressam características essencialmente da superfície do oceano como as variações da rugosidade e ondas de *Bragg*. Parâmetros obtidos por sensoriamento remoto e

modelagem da hidrodinâmica do oceano como temperatura, concentração de clorofila e correntes são essenciais para complementar com informações dentro da coluna d'água. Assim, o entendimento e a observação dos processos oceanográficos são melhorados, conectando os fenômenos da superfície aos processos físicos e biológicos abaixo da linha da superfície, sinergia utilizada também em Bentz e Barros (2005).

Para uma melhor compreensão dos casos avaliados de feições oceanográficas de mesoescala, filmes superficiais de petróleo e biogênicos, foram compilados os dados complementares listados abaixo:

- I. Corrente superficial oceânica do *Navy Coastal Ocean Model* (NCOM), com resolução espacial de $1/8^\circ$ e cobertura global (BARRON et al., 2004).
- II. Temperatura da superfície do mar (TSM), estimada pelo sensor orbital MODIS, com resolução espacial de 4 km, obtida no site: oceancolor.gsfc.nasa.gov.
- III. Concentração de clorofila na superfície do mar (CSM), estimada pelo sensor MODIS, com resolução espacial de 4 km, obtida no site: oceancolor.gsfc.nasa.gov.
- IV. Sensor de cor do oceano MERIS, (RAST et al., 1999).

3.6. Contraste modelado e sua relação com o vento e a geometria de aquisição

A sazonalidade resulta em diferentes quantidades de energia inseridas no sistema em função da posição do sol. Jackson e Alpers (2010) usam a radiância de *Sunglint* normalizada pela radiância solar incidente descrito no termo LN_{glint} da Equação 3.1. Desta maneira, normalizando a radiância de

(L_{glint}) pela radiância incidente solar (L_{solar}) podemos quantificar e intercomparar as áreas com *sunlint*, independentemente da sazonalidade. Os demais termos utilizados nesta equação já foram explicados na fundamentação teórica.

$$LN_{\text{glint}} = \frac{L_{\text{glint}}}{L_{\text{solar}}} = \frac{\rho(\omega, \lambda) PDF(z_x, z_y) (1 + \tan^2 \beta)^2}{4 \cos \theta_v} \quad (3.1)$$

As simplificações físicas do modelo de radiância de *sunlint* normalizada LN_{glint} são:

- I. Não há múltiplas reflexões na superfície do mar.
- II. A luz difusa na atmosfera não é considerada.
- III. Há uma aproximação quando o ângulo de visada tende a 90° .
- IV. Não se considera a influência atmosférica no trajeto da REM como nuvens e aerossóis.

Considera a magnitude do vento 10 m acima da linha d'água, não levando em conta as variações direcionais no campo de vento.

Conforme descrito por Cox e Munk (1954), há um efeito antagônico na rugosidade do oceano em função do vento entre regiões com surfactantes e águas limpas. Em superfícies contaminadas por surfactantes existe uma tendência de supressão das ondas capilares. Em consequência, há alisamento na rugosidade superficial que causa uma anomalia na reflexão bidirecional em relação às áreas límpidas circundantes.

O contraste entre óleo e superfícies limpas circundantes no *sunlint* é fisicamente descrito pelo comportamento da inclinação média quadrática das

microfacetas do oceano (σ^2). As Equações 2.9 e 2.10, descritas na revisão teórica, são estimativas da inclinação média quadrática das microfacetas do oceano para duas superfícies diferentes: límpidas livres de substâncias surfactantes $\sigma_{\acute{a}gua}^2$ e contaminadas por surfactantes $\sigma_{surfactante}^2$ como petróleo ou biofilmes.

Conforme explícito abaixo nas Equações 3.2 e 3.3, quando utilizamos distintos σ^2 referentes à água limpa $\sigma_{\acute{a}gua}^2$ e com surfactante $\sigma_{surfactante}^2$ obtemos valores diferentes na radiância *sunlint* normalizada (LN_{glint}).

$$LN_{glint}^{\acute{a}gua} = \frac{\rho(\omega, \lambda) PDF(z_x, z_y, \sigma_{\acute{a}gua}^2) (1 + \tan^2 \beta)^2}{4 \cos \theta_v} \quad (3.2)$$

$$LN_{glint}^{surfactante} = \frac{\rho(\omega, \lambda) PDF(z_x, z_y, \sigma_{surfactante}^2) (1 + \tan^2 \beta)^2}{4 \cos \theta_v} \quad (3.3)$$

Assim em imagens de sensoriamento remoto a presença de manchas de óleo em condições de *sunlint*, que aparecem brilhantes em relação às águas circundantes apresenta contraste positivo. De maneira oposta, as manchas mais escuras em relação ao entorno apresentam contraste negativo (Figura 3.4).

Em específicas condições de geometria de aquisição e vento, o valor de $LN_{glint}^{\acute{a}gua}$ e $LN_{glint}^{surfactante}$ podem ser idênticos. Consequentemente, não é possível distinguir uma região com óleo de uma região adjacente com água limpa em um campo de *sunlint*. Jackson e Alpers (2010) avaliam esta condição denominada “ângulo crítico”.

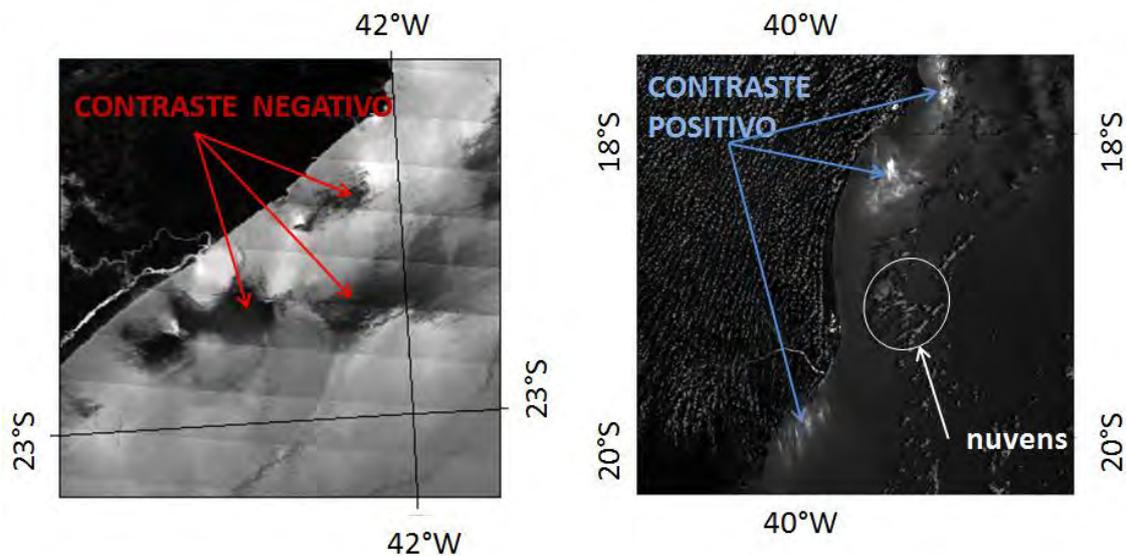


Figura 3.4 - Contraste negativo em filmes superficiais em imagem MODIS *Terra* de 3/02/2010 na banda centrada em 645 nm (Esquerda). Contraste positivo em filmes superficiais em imagem MODIS *Aqua* de 22/01/2010 (Direita). Feições têm origem provável de agentes surfactantes de origem continental por aporte de rios e da alta produção biológica costeira. Outros agentes também causam variações no campo de *sun glint* como variações no vento, na dinâmica superficial marinha e contaminação por nuvens.

O experimento teórico de Otremba e Piskozub (2001) demonstra a capacidade de quantificar o contraste causado pelo alisamento da superfície do mar na presença de óleo e demais surfactantes, em imagens sobre condição de *sun glint*. Baseado nesse método proposto, elaboramos uma modelagem inédita baseado no trabalho de Otremba e Piskozub (2001) para quantificar o contraste, ao qual denominamos de índice de contraste normalizado - ICN conforme descrito na Equação 3.4. A modelagem de contraste também foi avaliada em dois casos estudo na costa sudeste do Brasil, um relacionado a filmes biogênicos e outro a filmes minerais.

$$ICN = \frac{\left(LN_{glint}^{surfactante} - LN_{glint}^{água} \right)}{\left(LN_{glint}^{surfactante} + LN_{glint}^{água} \right)} \quad (3.4)$$

Uma das causas de diferenças entre o contraste modelado e o observado em imagens MODIS adquiridas em condições de *sun glint* é a interferência atmosférica. O ICN índice nada mais é do que uma normalização, baseada na razão entre a diferença e a soma das radiâncias, similar a realizada para o cálculo do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) de forma minimizar o efeito da atmosfera.

O contraste modelado tem o intuito de auxiliar na diferenciação de surfactantes em relação a outros processos ou agentes que modificam a rugosidade marinha. Esta capacidade é muito útil considerando-se a grande variabilidade observada nos padrões de *sun glint* devido a diferentes interferências causadas pela dinâmica atmosférica, dinâmica do oceano e condições geométricas de aquisição de imagem, além da interferência por eventuais surfactantes.

Na análise de comportamento do contraste pelo ICN ilustrada na Figura 3.5 observam-se questões muito relevantes sobre o comportamento da LN_{glint} em superfícies marinhas contaminadas por filmes surfactantes:

Quando os ângulos de visada e solar aproximam-se do zênite, encontramos os picos do ICN. Sendo que, com valores de vento maiores que 2 m/s o contraste máximo está na bissetriz $\theta_s = \theta_v$. Com ventos abaixo de 2 m/s, o padrão do gráfico se inverte e na bissetriz $\theta_s = \theta_v$ se localizam os contrastes mais negativos.

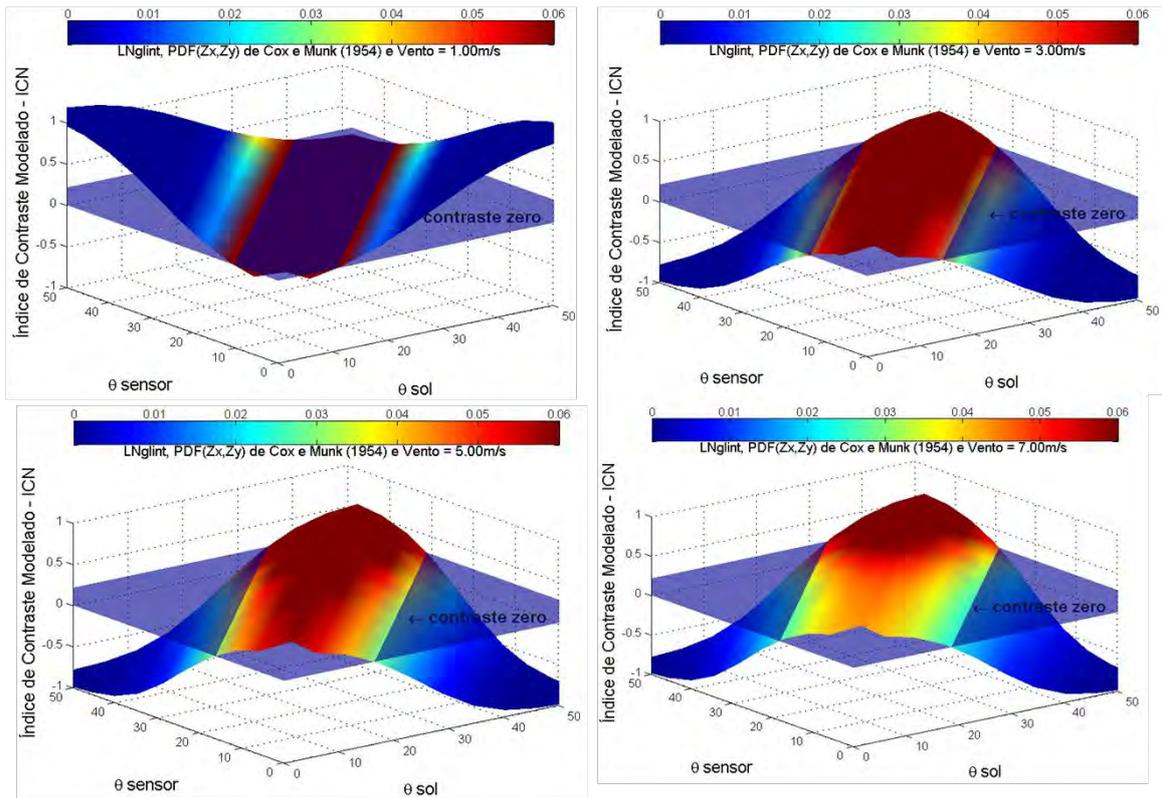


Figura 3.5 – Contraste modelado pelo ICN em diferentes condições geométricas de aquisição por sensor remoto e diferentes magnitudes do vento.

Conforme demonstrado na sequência de gráficos 4-D da Figura 3.5, considerando um ângulo azimutal entre o sensor e o sol de -180° ($\varphi_v - \varphi_s$), temos cada gráfico representando a influência de diferentes magnitudes do vento. O eixo-z representa o contraste no *sunlint* gerado por substâncias surfactantes, ou seja, o ICN (Equação 3.4). O zênite solar (θ_s) é plotado no eixo-x, e o zênite de visada (θ_v) no eixo-y. A escala de cor que representa LN_{glint} , quantificando o *sunlint* sobre a superfície do oceano (Equação 3.1). Cada gráfico da Figura 3.5 mostra os diferentes cenários devido ao aumento da velocidade de vento.

Próximo à velocidade do vento de 2 m/s, ocorre uma inversão no sinal do contraste. Desta forma, o contraste causado pela presença de um filme

surfactante pode ser modificado de positivo para negativo e *vice-versa*, conforme as variações na magnitude do vento.

O valor de contraste inexistente (ICN=0) ocorre com uma relação não linear de LN_{glint} . Em outras palavras, mesmo que o *sun glint* seja muito alto na região de uma mancha de óleo, esta pode ser indetectável.

Em teoria, a detecção de óleo a partir do contraste em campos de *sun glint* pode ocorrer mesmo com vento e LN_{glint} muito baixos. Depende apenas da resolução radiométrica do sensor e da interferência atmosférica.

A geometria de aquisição tem uma relação mais linear com o LN_{glint} do que o vento. Este insere uma aleatoriedade no sistema mesmo que exista uma geometria de aquisição favorável à reflexão especular. A caracterização das microfacetas oceânicas pode apresentar uma orientação preferencial diferente da favorável à reflexão especular.

O ICN apresenta comportamento similar em relação à geometria de aquisição. O vento atua apenas na modulação da intensidade do LN_{glint} , não alterando significativamente o padrão observado nos gráficos (formato de barraca canadense).

3.7. Metodologia

Optou-se por seleccionar pares de imagens MODIS com condição de *sun glint* e SAR coincidentes espaço-temporalmente (mesmo dia e mesma área) com o objetivo de analisar a capacidade das imagens MODIS em condição de *sun glint* em detectar filmes biogênicos, derrames de petróleo e feições oceanográficas de mesoescala na superfície do mar. As imagens ASAR foram seleccionadas para a área de estudo em 2009 e 2010 através da Estação de Sensoriamento Remoto Marinho do INPE localizado em Cachoeira Paulista, SP. A restrição

relativa à apenas pares MODIS e ASAR do mesmo dia se deve à dinâmica do oceano, dos processos atmosféricos e biológicos, os quais podem alterar as características dos filmes superficiais de petróleo ou biogênicos, assim como, das demais feições meteo-oceanográficas. Desta forma, procura-se diminuir as ambiguidades encontradas neste tipo de avaliação que possam ser causadas por alterações do meio (ADAMO et al., 2005), conforme descrito no histograma da Figura 3.6.

Informações orbitais sobre o campo de vento superficial, TSM, concentração de clorofila e corrente foram aplicadas no intuito de caracterizar o ambiente oceanográfico simultâneo às aquisições de modo identificar e entender as assinaturas das feições detectadas pelo MODIS em condição de *sunlint* e SAR.

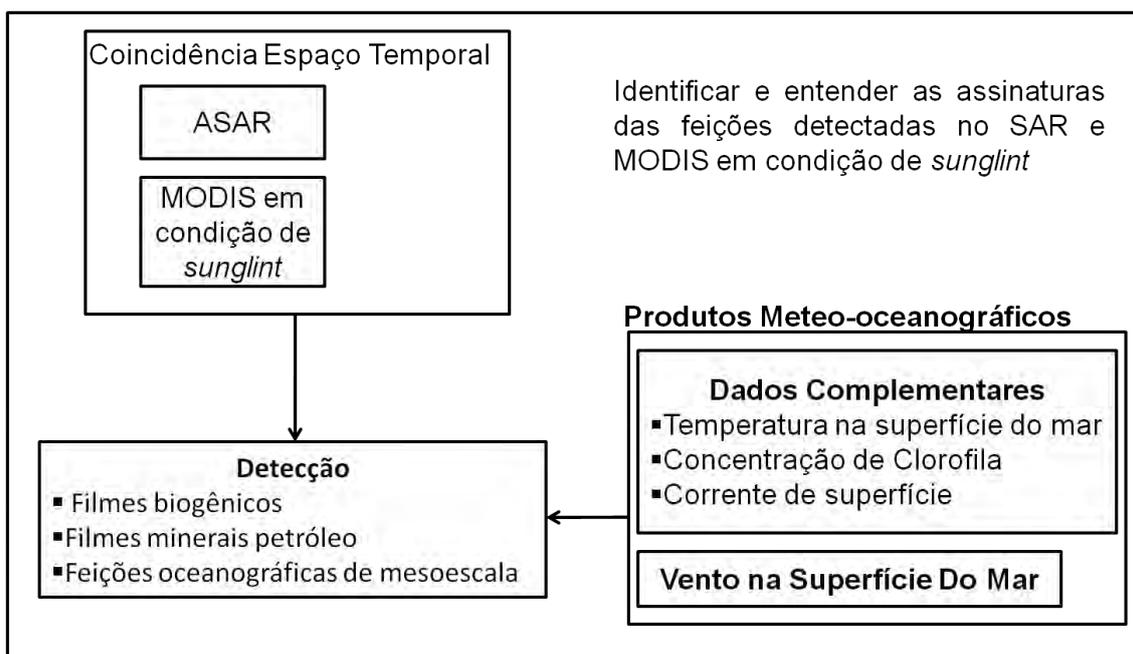


Figura 3.6 – No intuito de compreender as feições detectadas nas imagens MODIS na condição de *sunlint*, pares de imagens ASAR do mesmo dia e mesma área e dados meteo-oceanográficos foram analisados.

Conforme discutido anteriormente, além de vazamentos de petróleo, outros fatores podem gerar baixo sigma-zero no SAR. Estas são conhecidas como assemelhados ou “*look-alike*”. Baixas de vento, gelo na superfície marinha, precipitação, sistemas convectivos e filmes biogênicos podem efetivamente produzir feições assemelhadas. Ressalta-se aqui que diferenciar filmes biogênicos de filmes de petróleo depende, frequentemente, da disponibilidade de confirmações ao nível “de campo”.

Face à similaridade destes dois tipos de feições (filmes surfactantes), selecionamos dois casos confirmados por vistoria de campo, sendo um relacionado à presença de biofilme em condição de floração (*bloom*) da cianobactéria *Trichodesmium*, ocorrida em janeiro de 2003, e outro caso mais recente de vazamento de petróleo de uma plataforma de extração petrolífera localizada em 21°50’S-39°50’W, na região da Bacia de Campos em novembro de 2011. Em ambos os casos foi possível obter imagens MODIS em condições de *sun glint* e imagens SAR.

O caso de vazamento de petróleo foi amplamente divulgado pela imprensa e confirmado pela própria companhia de petróleo Chevron, responsável pela plataforma. Mesmo que existam dúvidas quanto ao volume de petróleo derramado no mar, ou sobre o uso de substâncias dispersivas de óleo durante a ocorrência, este caso foi selecionado por ser recente e por ilustrar uma das potenciais aplicações das imagens com *sun glint* para a detecção de derrames de óleo, em comparação com o imageamento SAR (Figura 3.7).

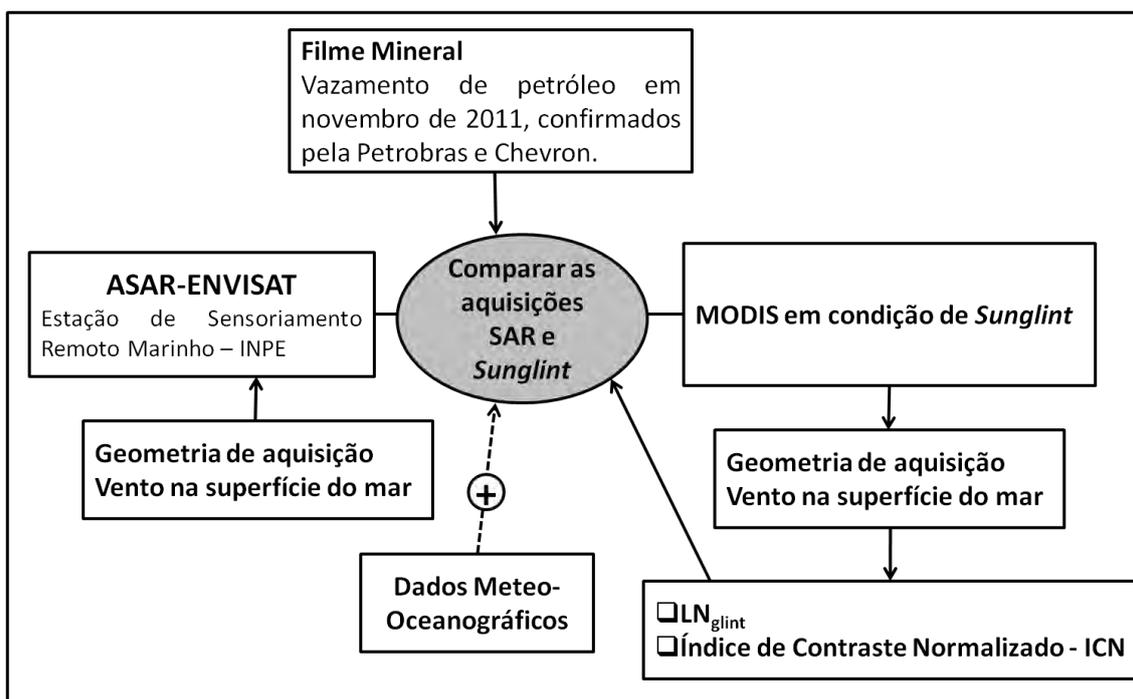


Figura 3.7 – Metodologia empregada no caso de estudo de filmes minerais causado pelo vazamento de petróleo em novembro de 2011.

As imagens MODIS em condição de *sunlint*, com presença de filmes biogênicos (Figura 3.8) e de petróleo, tiveram sua geometria de aquisição extraídas pelo *software* SeaDAS, para cada *pixel*. Combinando a geometria de aquisição ao vento na superfície foi possível modelar o LN_{glint} e o contraste (OTREMBA; PISKUZUB, 2001) pelo ICN, estas rotinas foram desenvolvidas em ambiente MATLAB.

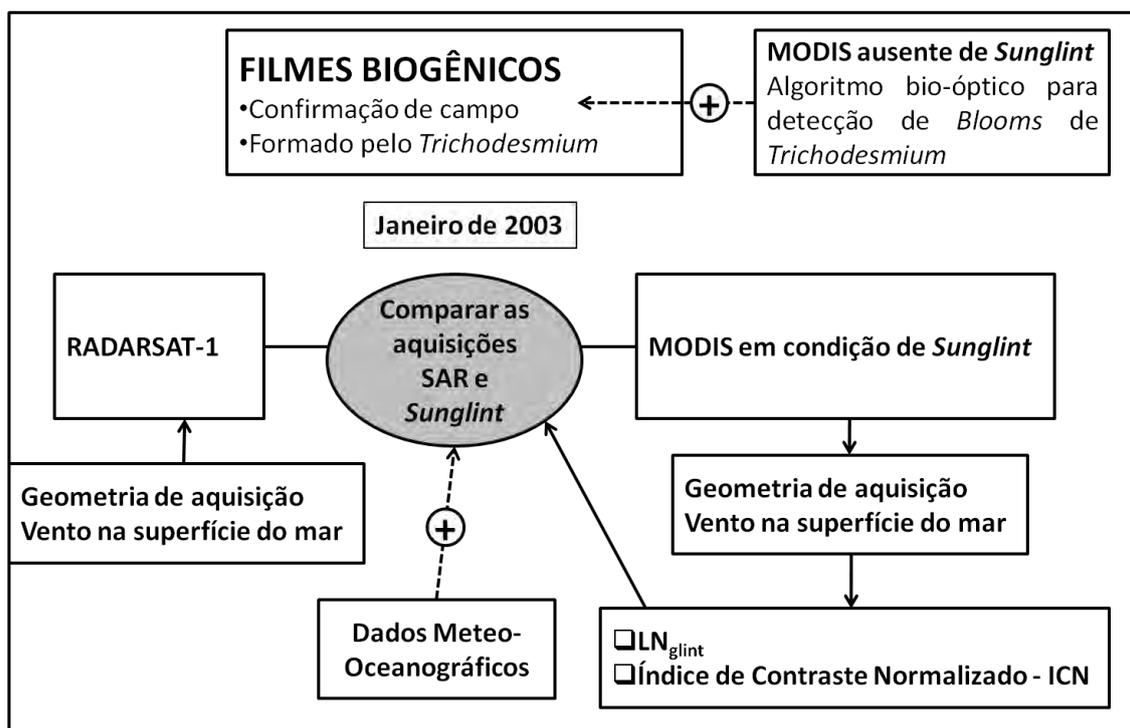


Figura 3.8 – Metodologia aplicada ao estudo de caso de janeiro de 2003, relacionado ao *Bloom* de *Trichodesmium*, no intuito de avaliar a capacidade de detecção de filmes biogênicos das imagens MODIS na condição geométrica de *sunlint*.

As imagens MODIS obtidas em nível 1A foram processadas com uso do *software* SeaDAS até o nível 1B, com radiâncias calibradas e georeferenciadas, em método similar ao de Hu et al. (2009). As imagens MODIS não foram processadas para os níveis 2 ou 3 devido à meticulosa correção atmosférica desenvolvida para uso da cor do oceano que poderia interferir e até mascarar o *sunlint*. Imagens em condições de *sunlint* não possibilitam a inferência de informações sobre a coluna de água, muitas vezes demandada em outros estudos oceanográficos, conforme descrito por Hu et al. (2011). Entretanto, no presente estudo, o que se procura é justamente, explorar o potencial dessas imagens para a observação e monitoramento oceânico. Logo, o mascaramento do *sunlint* não é desejável neste contexto.

Após o processamento das imagens MODIS para nível 1B, estas foram transformadas para o formato *Hierarchical Data Format* (HDF). Em ambiente computacional ENVI, as imagens foram tratadas com manipulação de histogramas e contrastes de modo a realçar as feições de interesse neste estudo. O processamento digital aplicado é similar à metodologia sugerida por Hu et al. (2009).

Optou-se pelo uso das bandas centradas em 645 nm e 859 nm, selecionadas devido à melhor resolução espacial de 250 m. As bandas com resolução de 500 m foram utilizadas para gerar imagens RGB, sendo interpoladas pelo método bicúbico para 250 m.

Para o processamento das imagens SAR, foram utilizados diferentes softwares, como o ENVI, SARTOOL e NEXT. As imagens RADARSAT-1 foram cedidas pela PETROBRAS para o estudo de caso relacionado ao *bloom* ocorrido em janeiro de 2003. As imagens ASAR ENVISAT foram aplicadas nos demais casos entre 2009 e 2011.

Além da capacidade de estimar a quantidade de biomassa fitoplanctônica na camada superficial do mar por sensoriamento remoto da cor do oceano, conforme descrito por Kampel et al. (2009), alguns métodos descrevem a capacidade de discriminar grupos funcionais do fitoplâncton baseados em assinaturas ópticas de cada espécie (RUDORFF; KAMPEL, 2012). Assim, é possível inferir sobre a ecologia de grupos fixadores de nitrogênio, em particular a cianobactéria *Trichodesmium* (KUDELA, 2010).

Em particular, *blooms* de *Trichodesmium* já foram observados na região da Bacia de Campos (BENTZ et al., 2004). O método de detecção de *blooms* de *Trichodesmium* por sensoriamento remoto da cor do oceano desenvolvido por Subramanian et al. (2002) foi empregado no presente trabalho para identificar a associação dos filmes observados nas imagens com a presença desta cianobactéria, aproveitando um estudo de caso confirmado por vistoria de campo, na região da Bacia de Campos, ocorrido em janeiro de 2003.

O método para classificação de *blooms* de *Trichodesmium* proposto por Subramaniam et al. (2002) é baseado em observações empíricas e resultados de modelos. Este método é restrito a concentrações moderadas de clorofila na superfície do mar, entre 0,5 e 3,0 mg.m⁻³. Assim, as bandas do sensor *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS) são aplicadas para discriminar *pixels* dominados por *Trichodesmium* seguindo 3 critérios, sendo nL a radiância espectral de sensoriamento remoto normalizada (m W cm² μm⁻¹ sr⁻¹), centradas nas respectivas bandas sobrescritas.

1. $nL_{0,490} > 1,3 \text{ m W cm}^2 \mu\text{m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ e $L_{0,490} > nL_{0,412}, nL_{0,443}, nL_{0,555}$
2. $nL_{0,510} > nL_{0,443}$
3. $0,4 < [nL_{0,490} - L_{443}] / [nL_{0,490} - nL_{0,555}] < 0,6$

Neste trabalho, adaptamos este método para as bandas do sensor MODIS centradas em 0,443 μm, 0,490 μm e 0,555 μm, respectivamente, preservando assim, as principais características da assinatura espectral dos *blooms* de *Trichodesmium*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pares de imagens MODIS em condição de *sunlint* e ASAR ENVISAT, entre janeiro de 2009 e outubro de 2010, foram selecionadas por coincidência temporal (mesmo dia) e espacial (mesma área), no intuito de diminuir incertezas ao comparar as feições oceanográficas devido à escala temporal dos processos dinâmicos. Nesta análise observa-se que a ocorrência do *sunlint* na costa sudeste do Brasil esta confinada entre os meses de outubro e fevereiro (Tabela 4.1), concordando com a expectativa de Lorenzzetti et al. (2009) devido ao ângulo zenital solar.

Tabela 4.1 - Número de imagens ASAR e MODIS em condição de *sunlint*, quasesimultâneas e sem cobertura de nuvens. Referente à área de estudo entre janeiro de 2009 e agosto de 2010.

Ano	Mês	ASAR	MODIS <i>Sunlint</i> e ASAR, quasesimultâneas.
2009	Jan.	3	1
2009	Set.	7	1
2009	Out.	16	1
2009	Nov.	15	5
2009	Dez.	11	1
2010	Jan.	21	8
2010	Fev.	17	3
2010	Mar.	19	0
2010	Abr.	19	0
2010	Mai.	16	0
2010	Jun.	17	0
2010	Jul.	19	0
2010	Ago.	14	0
	Total	194	20

Tabela 4.2 – Descrição das feições observadas nas imagens MODIS *sunlint* e ASAR espaço-temporal coincidentes e sem cobertura de nuvens.

Data e da aquisição ASAR				Área ASAR		MODIS <i>sunlint</i>		Feições observadas
Dia		Hora	Lon.	Lat.	Terra	Aqua		
2009	1	21	12:08	41°-37°	16°-22°	Sim	*	Sem feições expressivas
2009	9	26	12:15	44°-39°	21°-25°	*	Sim	Surfactante costeiro e feições da CB
2009	10	25	12:03	41°-36°	17°-24°	*	Sim	Surfactantes próximos a plumas de rio e descarte de navio
2009	11	2	1:44	50°-46°	24°-28°	*	Sim	Surfactantes próximos a plumas de rio
2009	11	3	1:14	43°-39°	20°-24°	Sim	*	Sombra de relevo e surfactante costeiro
2009	11	6	1:19	44°-40°	21°-24°	*	Sim	Surfactantes próximos a plumas de rio, ondas internas e sombra de relevo.
2009	11	10	12:00	40°-36°	20°-25°	*	Sim	Sem feições expressivas
2009	11	22	1:16	43°-39°	20°-24°	*	Sim	Surfactantes próximos a plumas de rio.
2009	12	24	1:11	42°-38°	20°-25°	*	Sim	Esteira de embarcação e surfactante costeiro.
2010	1	2	1:27	46°-41°	23°-28°	*	Sim	Surfactantes próximos a plumas de rio e em região costeira.
2010	1	2	12:36	50°-45°	24°-28°	Sim	*	Sombra de relevo.
2010	1	9	1:07	42°-37°	20°-25°	*	Sim	Feições da CB e surfactante costeiro.
2010	1	9	12:15	45°-38°	18°-28°	*	Sim	Feições da CB e surfactante costeiro.
2010	1	22	12:05	42°-37°	17°-25°	Sim	*	Feições da CB, surfactantes próximos a plumas de rio e em região costeira.
2010	1	22	1:00	40°-36°	17°-21°	Sim	Sim	Feições da CB, surfactantes próximos a plumas de rio e em região costeira.
2010	1	25	12:11	43°-39°	21°-25°	*	Sim	Feições da CB e ondas internas.
2010	2	3	1:22	45°-41°	20°-25°	Sim	Sim	Feições da CB, surfactantes próximos a plumas de rio e em região costeira.
2010	2	23	12:00	40°-35°	17°-25°	Sim	*	Feições da CB.

A Tabela 4.2 mostra os resultados da comparação entre imagens ASAR ENVISAT e MODIS, nas plataformas *Aqua* e *Terra*. Das 194 imagens ASAR escolhidas dentro da área de estudo, existem apenas 20 imagens MODIS em condição de *sunlint* espaços-temporais coincidentes. Em apenas dois pares, MODIS em condição de *sunlint* e ASAR, não foram visualizadas feições expressivas. Neste espaço amostral (Tabela 4.2) não ocorreram casos de filmes minerais como óleo ou petróleo, com exceção ao descarte por navio dia 25/10/2009.

A detecção de feições no *sunlint* resultantes de frentes oceanográficas existentes na borda oeste da CB, vórtices e meandros é frequente. Assim como mostrado por Gagliardini e Colón (2004) o *sunlint* é aplicado em observações da corrente do Golfo (Strong; Deryche, 1973 e Bowley; Greaves, 1970), corrente de Kuroshio (MITNIK e LOBANOV, 2011), corrente das Agulhas (Kudryavtsev et al., 2010), entre outras.

As feições de surfactantes próximos da costa e de plumas de rio estão presentes na maioria das imagens MODIS em condição de *sunlint*. Estas assinaturas podem ser relacionadas a substâncias tensoativas contidas no esgoto doméstico, agrícola e industrial. O aporte de nutrientes transportados por rios pode do mesmo modo ser relacionado à produção de biofilmes pelo acréscimo na produção primária marinha. O processo de ondas internas, importante para a produção primária marinha devido à resuspensão de nutrientes do sedimento contido na Plataforma Continental, é também distinguido com frequência no *sunlint* do MODIS.

A seguir, o uso do MODIS em condição de *sunlint* é aplicado em dois casos estudo, destacados na Tabela 4.3, um em janeiro de 2003 de filmes biogênicos produzidos pela cianobactéria *Trichodemium* e outro em novembro de 2011 sobre filmes minerais do recente vazamento de petróleo no Campo de Frade dentro Bacia de Campos - RJ, ambos com confirmação de campo. Finalizamos os resultados discutindo a assinatura no *sunlint* dos processos envolvendo

feições da CB, plumas de rios, sombra de vento devido a relevo costeiro e ondas internas.

Tabela 4.3 – Imagens MODIS na condição de *sunlint* e SAR analisadas nos estudos de caso.

Data de aquisição				Radar de abertura sintética	MODIS <i>sunlint</i>			Feição analisada
Data			Hora GMT	Nome do sensor	Terra	Aqua	Hora GMT	
2003	01	26	21:18	Radarsat-1	*	Sim	13:35	Filmes biogênicos originados pela cianobactéria <i>Trichodesmium</i>
2011	09	12	16:20	*	*	Sim	16:20	Filmes minerais produzidos pelo vazamento de petróleo na bacia de Frade
2011	09	22	12:22	ASAR	*	*	*	
2011	09	25	12:12	ASAR	*	*	*	

4.1. Biofilmes

Em janeiro de 2003 ocorreu uma floração fitoplanctônica da cianobactéria *Trichodesmium* na região próxima ao Cabo de São Tomé (22°S) e Cabo Frio (23°S), litoral norte do estado do Rio de Janeiro. Este *bloom* produziu uma larga feição de filme biogênico, ao qual pode ser distinguido em uma imagem MODIS do dia 26/01/2003 em condição de *sunlint* (Figura 4.1). Como mencionado anteriormente esta feição será o foco deste seção.

A presença da cianobactéria *Trichodesmium* como formadora dos biofilmes foi confirmada por sobrevoo e *coleta in-situ* pelo projeto FITOSAT descrito por Bentz et al. (2007). A cianobactéria também é detectada pelo algoritmo bioóptico de *Trichodesmium* proposto Subramanian et al. (2002), aplicado em imagens MODIS do dia 23/01/2003 (Figura 4.2) e 31/01/2003 (Figura 4.3). Estas são livres da contaminação por *sunlint* evitando interferência nas propriedades inerentes assim como discutido em Hu et al (2011).

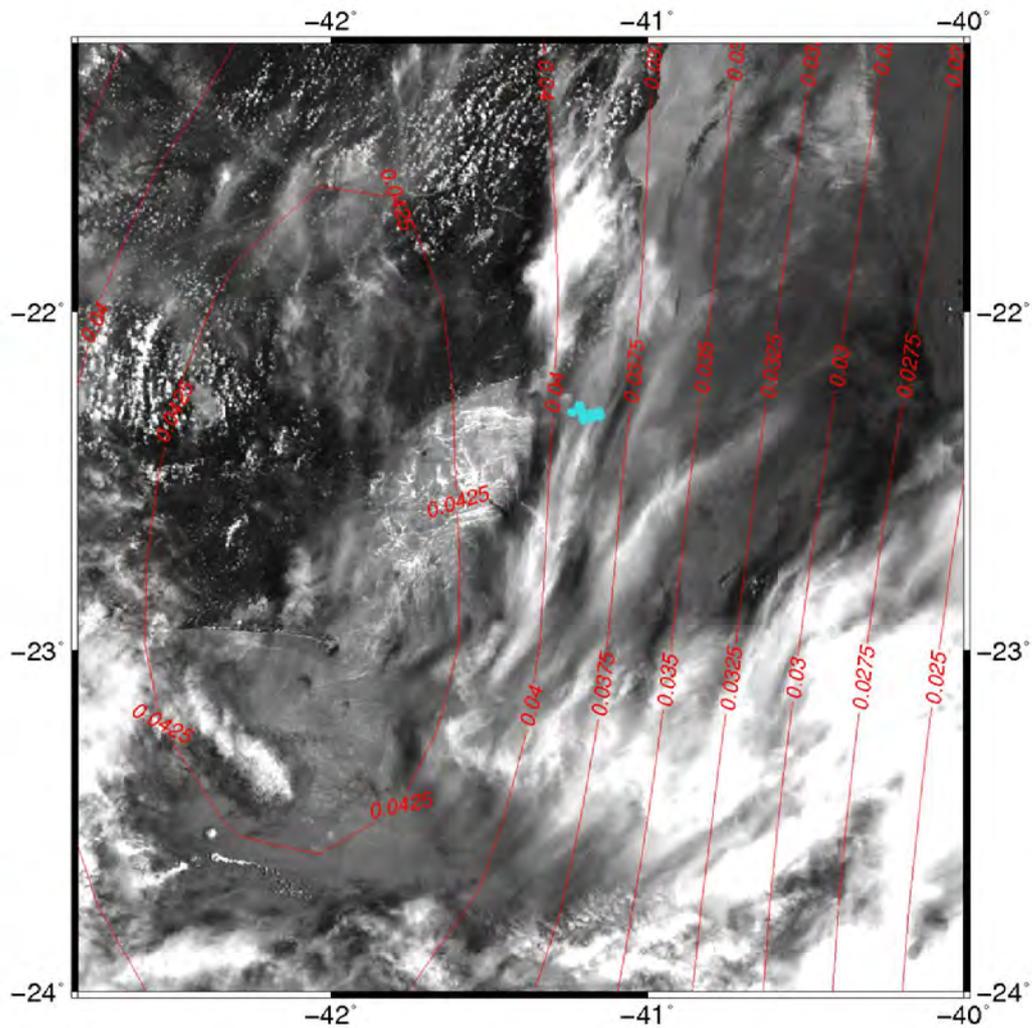


Figura 4.1 - Filme biogênico originado por *Trichodesmium* observado pelo MODIS em condição de sunglint, banda 645 nm e resolução 250 m, no dia 26/01/2003 e as isolinhas vermelhas indicam o LN_{glint} . Os pontos azuis ao largo de São Tomé indicam a detecção de *Trichodesmium* e foram obtidos via MODIS Aqua 23/01/2003, não contaminada por sunglint com o algoritmo de Subramaniam et al. (2002).

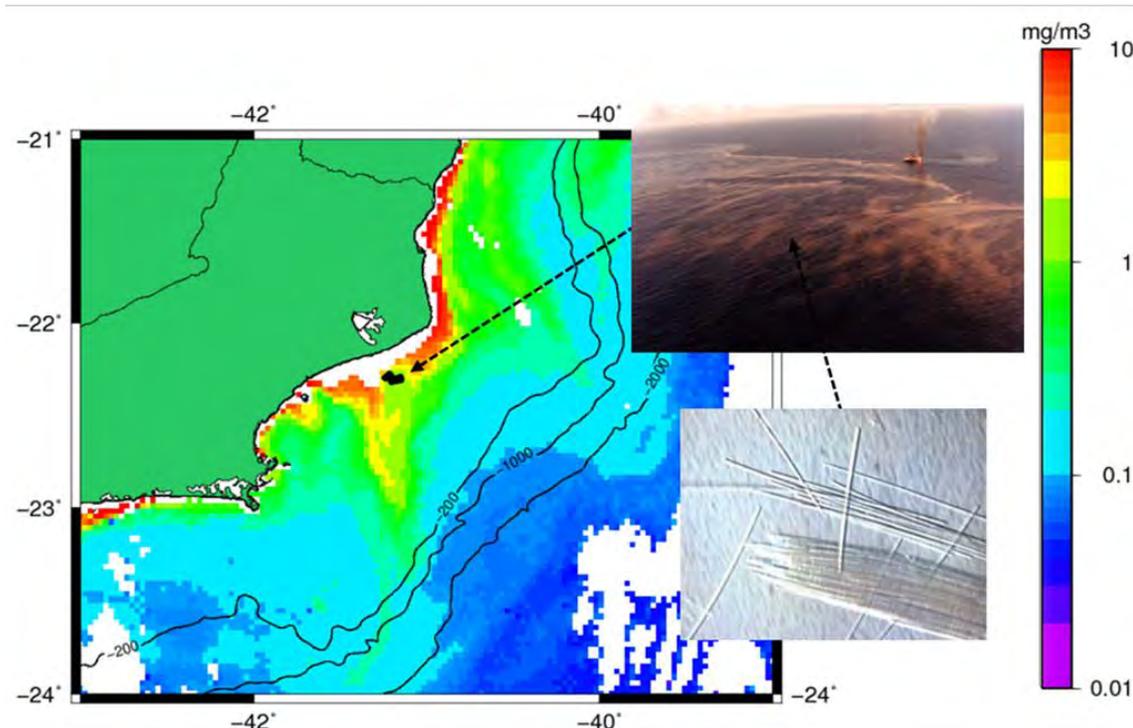


Figura 4.2 – Dia 23 de janeiro de 2003, concentração de clorofila, detecção de *Trichodesmium* (SUBRAMANIAM et al., 2002) em pontos pretos. As imagens por sobrevoo e a microscópica são apenas ilustrativas (*Bloms* de *Trichodesmium* em outras localidades). Fonte: Imagem aérea obtida pelo projeto FITOSAT da Petrobras e microscópica de *Trichodesmium* adaptada de Carvalho et al. (2008).

A detecção de *Trichodesmium* via MODIS do dia 31/01/2003 revela conexão do *Trichodesmium* como uma pluma de ressurgência (Barth et al., 2000), conforme demarcado na Figura 4.3. A pluma de ressurgência pode ser observada na média semanal de TSM obtida pelo MODIS entre 25/01/2003 e 1/02/2003 em resolução de 4 km (Figura 4.4), caracterizada por TSM entre 22° e 24°C em uma feição robusta que advecta água relativamente fria para profundidades superiores à 200 m. Este padrão ressalta a complexa relação entre processos costeiros e de talude, na região de Cabo Frio, RJ, como mencionado por Calado et al. (2010).

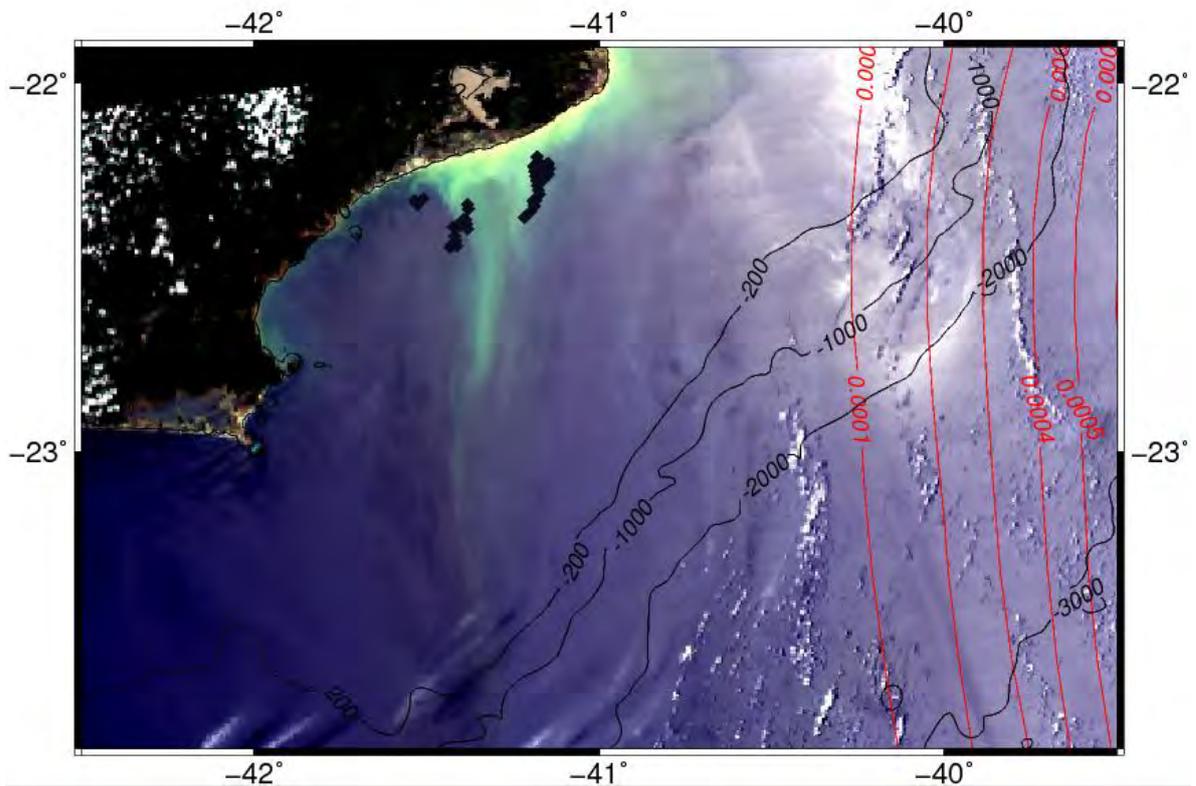


Figura 4.3 – Dia 31/01/2003, composição RGB (645 ,555 ,469 nm) MODIS *Aqua* nível 2 e detecção de *Trichodesmium* (SUBRAMANIAM et al., 2002) em pontos pretos próximo a pluma de ressurgência. Isobatimétricas marcadas por isolinhas pretas indicando a Plataforma Continental e Talude. A imagem não está em condição de sunglint como mostra as Isolinhas vermelhas de LN_{glint} com valores menores que 0.0001 sr^{-1} .

O *Trichodesmium* detectado via sensoriamento remoto orbital está localizado em frentes oceanográficas formadas por uma pluma de ressurgência (Figuras 4.3, 4.4 e 4.5). A presença deste *Bloom* de *Trichodesmium* está relacionada às áreas com grande variação de clorofila $0.01\text{-}10 \text{ mg/m}^3$ (Figura 4.2), assim como mencionado por Dupouy et al.(2011).

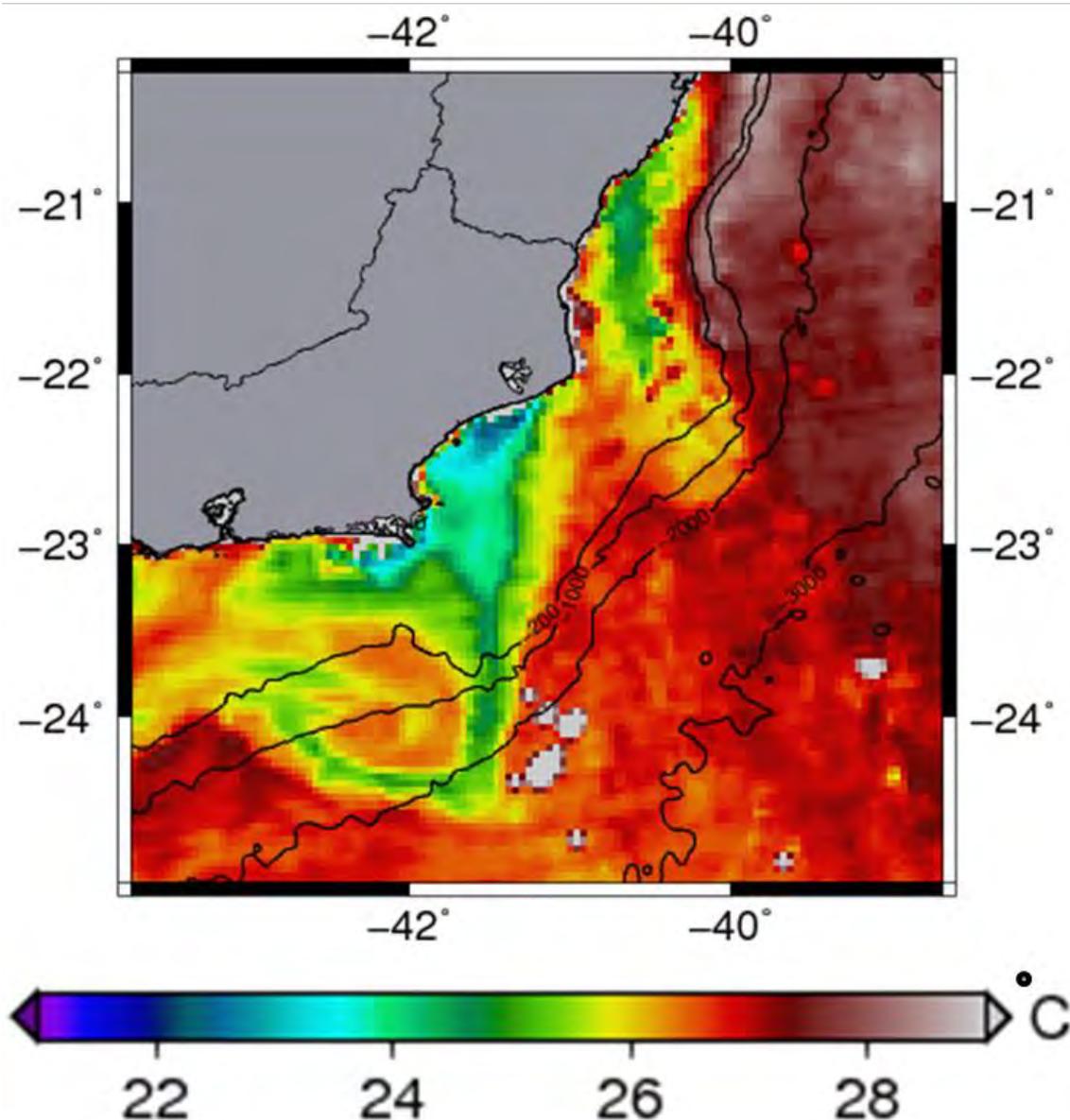


Figura 4.4 - Média semanal de TSM obtida pelo MODIS entre 25/01/2003 e 1/02/2003 em resolução de 4 km.

A concentração de clorofila média de janeiro de 2003 em relação à “climatologia³”, estimada entre 2002 e 2012, do mesmo mês indica anomalia positiva maior que 0.2 mg/m^3 numa feição robusta que sai da costa até a

³ O termo climatologia de concentração de clorofila neste trabalho refere-se a toda série temporal de aquisição pelo sensor MODIS *Aqua*, entre julho de 2002 e maio de 2012.

batimétrica de 200 m, transportando nutrientes para o *offshore* (Figura 4.5). A concentração de clorofila relativamente alta em relação à climatológica remete a ligação entre concentração de clorofila e produção de filmes biogênicos enfatizada por Lin et al. (2003).

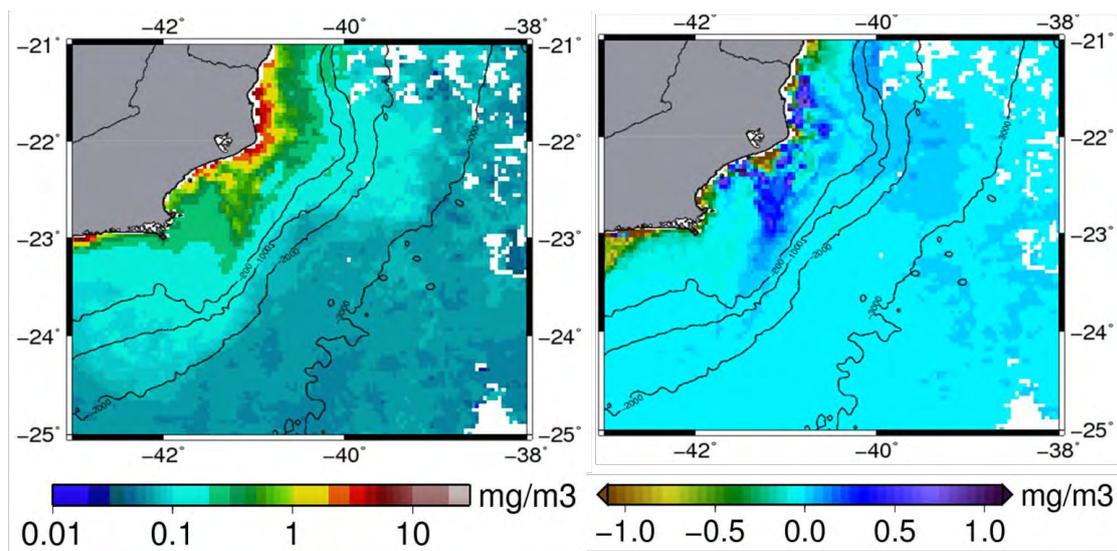


Figura 4.5 – Concentração de clorofila média para o mês de janeiro de 2003 (esquerda) e sua anomalia em relação à climatologia para janeiro (direita). Anomalias positivas sobre a pluma de ressurgência ao norte do Cabo de São Tomé >0.2 mg/m³ e anomalias <0.2 mg/m³ caracterizando domínio da CB.

O *sunlint* tem aplicação na detecção de feições oceanográficas que se expressam na rugosidade da superfície do mar, como no caso de filmes biogênicos e exsudações de óleo. Em imagens em condições de *sunlint*, a diferença de contraste entre o brilho de áreas com e sem óleo permite a identificação de manchas na superfície do mar, mesmo que estas sejam de espessura mínima (escala nanométrica) ou incolor, devido à característica surfactante de supressão de ondas capilares (HU et al., 2009).

No SAR o processo é similar, a diferenciação entre filmes de surfactantes e outras feições, conforme descrito por Holt (2004), deve-se às ondas de *Bragg*. Na presença de surfactantes, como os biofilmes, há a supressão das ondas de Bragg que resulta em atenuação do sinal que retorna da superfície do mar, gerando áreas de baixo sigma-zero.

A imagem RADARSAT-1 de 26/01/2009 (Figura 4.6) demonstra a existência de alvos de baixo sigma-zero com estrutura complexa entre a região do Cabo de São Tomé e Cabo Frio, RJ, assim como, na região de um vórtice centrado em 40,25°W- 22,5°S onde os filmes biogênicos acompanham a circulação ciclônica.

Observe as feições próximas à costa nas imagens quase simultâneas, MODIS sobre sunlint da Figura 4.7 e RADARSAT-1 na Figura 4.6. Na imagem RADARSAT-1 adquirida às 21:18 GMT, mesmo considerando a posição à *near-range* do radar das feições de biofilme sobre a Plataforma Continental, não se observa a mesma complexidade geométrica em relação a imagem MODIS em condição de *sunlint* adquirida às 13:15 GMT.

Para baixos valores de vento, a identificação de biofilmes em imagens SAR torna-se difícil, com ventos de baixa velocidade a dissipação de energia das ondas capilares (*Bragg*) é superior à introdução de energia pelo atrito do vento na camada ar-mar, fazendo que as ondas capilares não cresçam.

O vento na superfície do mar de 26/01/2003 18:00 GMT quase simultâneo à aquisição RADARSAT-1 está acima de 2 m/s na área dos biofilmes (Figura 4.8). Brekke e Solberg (2005) consideram que ventos entre 3-10 m/s são ideais para a detecção de surfactantes. No horário mais próximo da aquisição da imagem MODIS em condição de *sunlint* o vento na superfície do mar registrava magnitude menor que 2 m/s (Figura 4.1.9). O trabalho de Cox e Munk (1956) evidencia que um adequado contraste para filmes surfactantes em imagens de *sunlint* pode ser esperado com ventos entre 1-2 m/s, aos quais,

segundo a escala de vento Beaufort o estado da superfície marinha é caracterizado por pequenas ondulações, mas sem quebra de ondas.



Figura 4.6 - Imagem RADARSAT-1 de 26/01/2003 (21h18min GMT). Alvos de baixo sigma-zero formado pela supressão das ondas de Bragg em áreas com biofilmes.

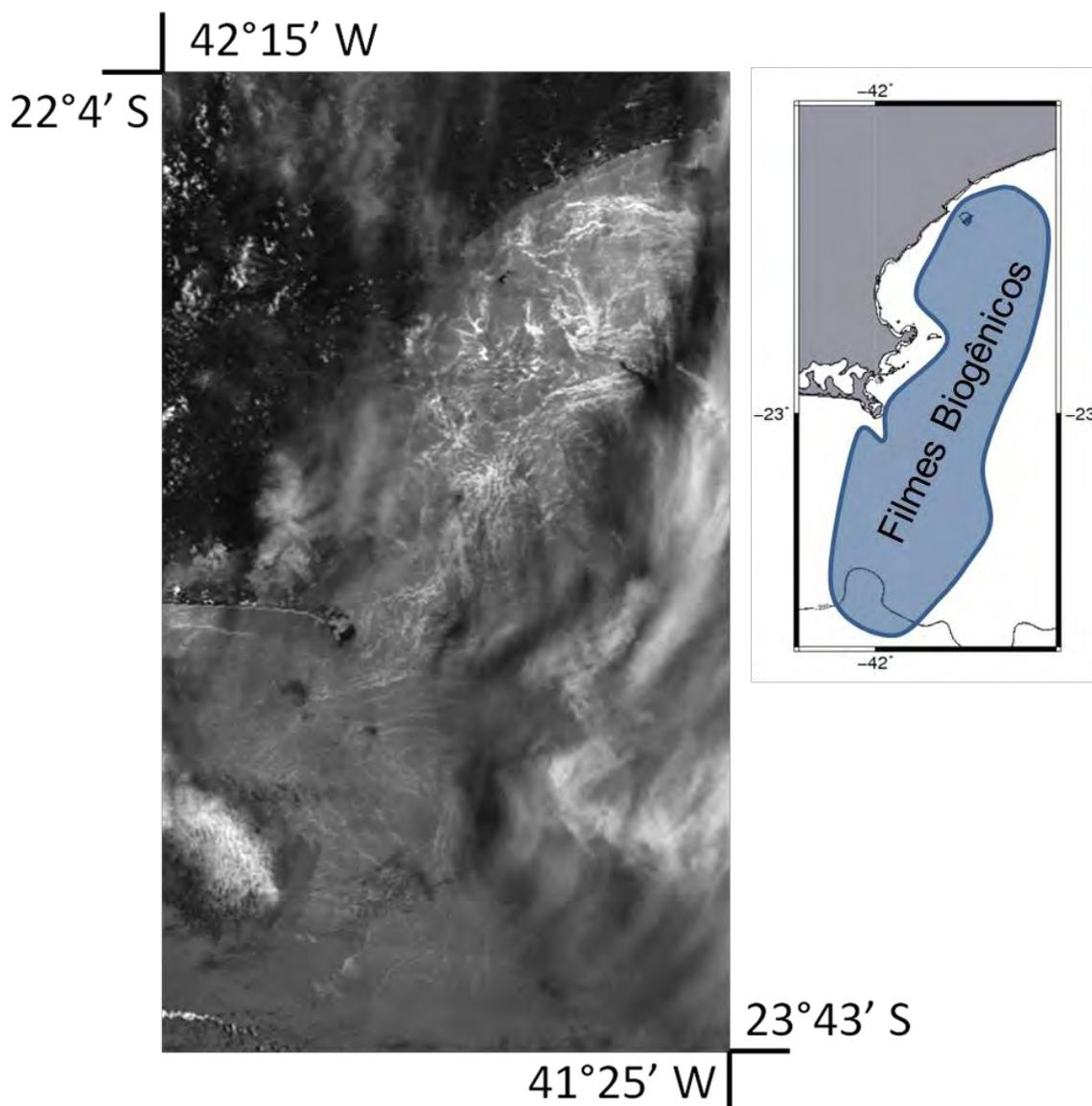


Figura 4.7 - Imagem MODIS *Terra*, resolução 250 m, nível L1B em condição de *sunlint* na banda 469 nm de 26/01/2003 às 13:35 GMT, indica com contraste positivo a presença de filmes biogênicos associados à *bloom* fitoplanctônico.

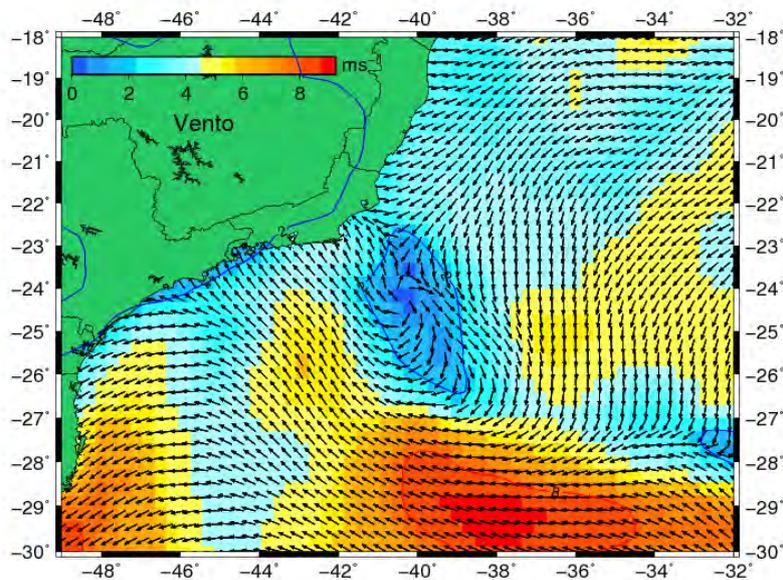


Figura 4.8 - Vento na superfície do mar 26/01/2003 às 18:00 GMT, quase simultâneo a imagem RADARSART-1 Na área de ocorrência dos biofilmes a velocidade do vento é maior que 2 m/s.

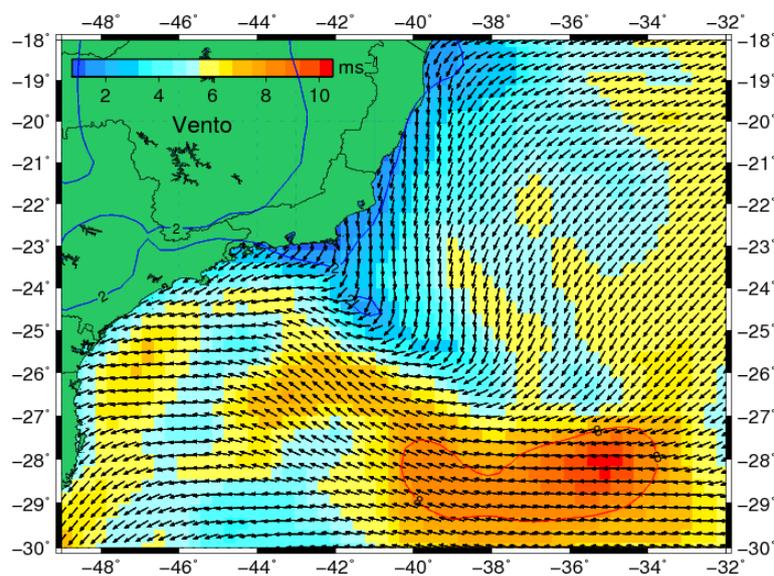


Figura 4.9 - Vento na superfície do mar 26/01/2003 às 12:00 GMT, quase simultâneo a aquisição da imagem MODIS em condição de *sun glint*. A velocidade do vento esta abaixo de 2 m/s onde ocorrem os filmes biogênicos.

Para melhor descrever a capacidade do *sunlint* em detectar filmes biogênicos modelamos o campo de LN_{glint} e o contraste (surfactante/límpido) considerando basicamente, as mesmas condições de visada do imageamento MODIS de 26/01/2003, às 16:20 GMT. Foi utilizado o azimute relativo ($\varphi_v - \varphi_s$) de -161° , velocidade do vento entre 0,1-2,1 m/s compreendendo as variações locais de acordo com as estimativas vento quase simultâneas (Figura 4.9). Teoricamente pela Figura 4.10 entre 1 e 2 m/s há uma inversão no INC que indica que o contraste do filme biogênico pode alterar-se entre negativo e positivo.

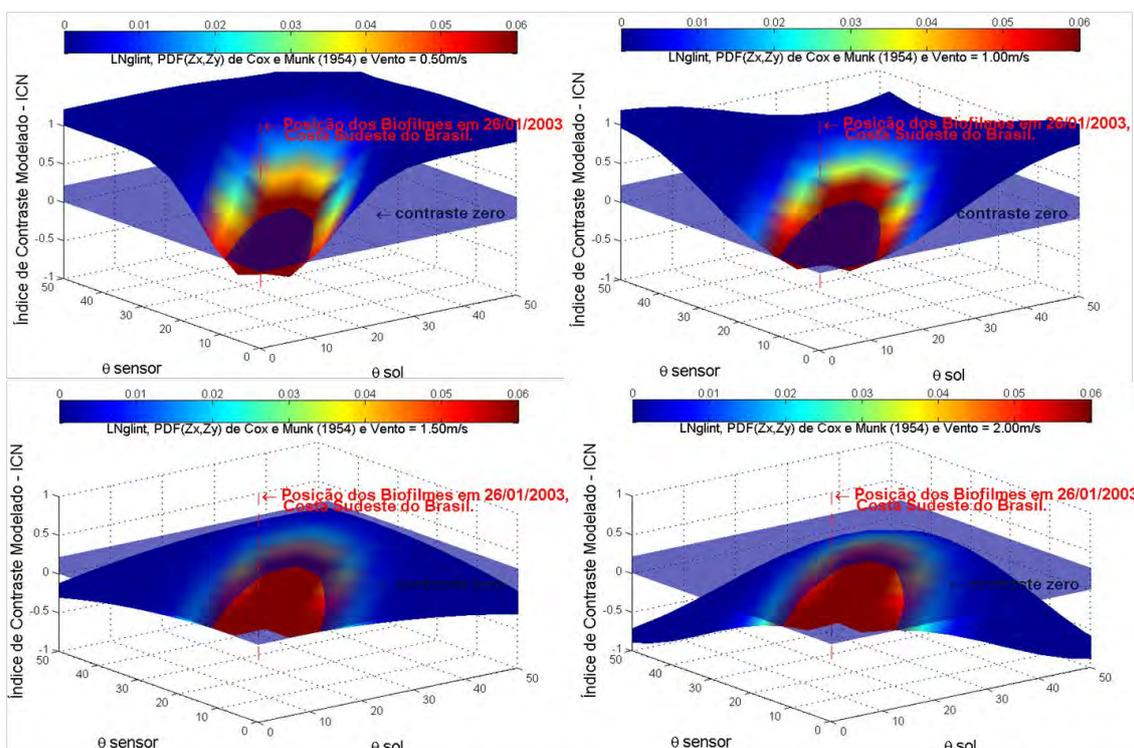


Figura 4.10 - Contraste modelado na superfície do mar para a presença de biofilmes avaliada pelo ICN. As condições geométricas de aquisição via sensoriamento remoto e ventos na superfície do mar são idênticas as da aquisição de imagens do MODIS *Terra* em 26/01/2003 13:35 GMT. As condições geométricas de aquisição na área de influência dos biofilmes são $\varphi_v - \varphi_s = -161^\circ$, $\varphi_v = 18.5^\circ$ e $\varphi_s = 24^\circ$.

Os filmes biogênicos são principalmente produzidos pelo fitoplâncton e por bactérias. Sua constituição é variada, mas na maioria dos casos são formados por proteínas, lipídios, ácidos orgânicos, sacarídeos e metais associados à matéria orgânica. Mesmo em pequenas concentrações, por ocuparem uma camada muito fina da superfície do mar (3 nm), podem se estender por grandes áreas (ALPERS; ESPEDAL, 2004).

Um problema na detecção de biofilmes na superfície do oceano é que outros processos também influem na rugosidade da superfície, como ondas internas (MYASOEDOV et al., 2010), bordas de correntes, vórtices e meandros (GAGLIARDINI; CLEMENTE-CÓLON, 2004). Outra dificuldade é que estes processos de mesoescala podem resultar em frentes oceanográficas com impactos locais na distribuição do fitoplâncton, conforme discutido em Holt (2004) e Longhurst e Pauly (2007), resultando numa feição mesclada entre a resposta da rugosidade devido a padrões de circulação e a presença de surfactantes biogênicos originados pelo plâncton. Este fato implica em ambigüidades e dificuldades ao analisar imagens de sensores da cor do oceano com *sunlint* no intuito de detectar filmes biogênicos.

No intuito de validar as expectativas teóricas de modelagem do contraste água/óleo, propostas por Otembra e Piskozub (2001). O ICN e o contraste da imagem MODIS em condição de *sunlint* são avaliados em duas áreas, uma com e outra sem a presença de biofilmes. O contraste causado por biofilmes em imagens MODIS em condição de *sunlint* foi calculado pelo o Filtro de Diferença Normalizada pelo Mínimo valor em relação ao centro (FDNM), descrito na Equação 4.1. O FDNM foi aplicado por convolução de janela 3x3 na imagem de radiância MODIS nível 1B.

$$FDNM = \frac{x_{centro} - \min(x_{vizinhos\ ao\ centro})}{x_{centro} + \min(x_{vizinhos\ ao\ centro})} \quad (4.1)$$

Conforme demonstrado pela Figura 4.11 em presença de surfactantes biogênicos, os maiores contrastes obtidos das radiâncias no topo da atmosfera (TOA) MODIS em condição de *sunlint*, estão localizados nos FDNM maiores que 0,25 o ICN tem valores similares entre 0,28 e 0,29.

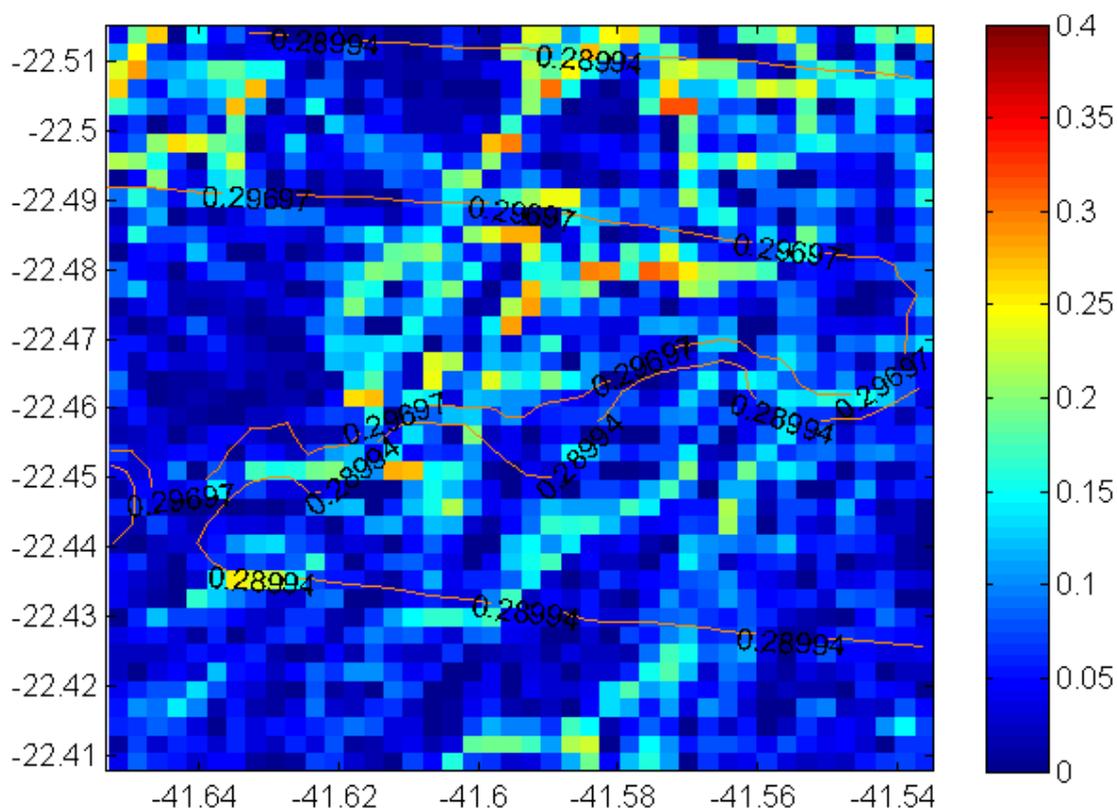


Figura 4.11 – Superfície com biofilme 26/01/2003 às 13:35 GMT: contraste imagem MODIS, banda 645 nm, em condição de *sunlint* calculado pelo filtro de diferença normalizada pelo mínimo valor em relação ao centro - FDNM e isolinhas de contorno indicam o índice de contraste normalizado – ICN (ver texto).

Na Figura 4.12 temos a imagem MODIS TOA em presença de surfactantes. Os *pixels* presentes nas áreas de borda (limiar entre regiões com e sem biofilmes) na imagem MODIS TOA coincidem com os altos valores de FDNM. O

contraste positivo causado pela presença dos biofilmes coincide com o valor positivo do ICN.

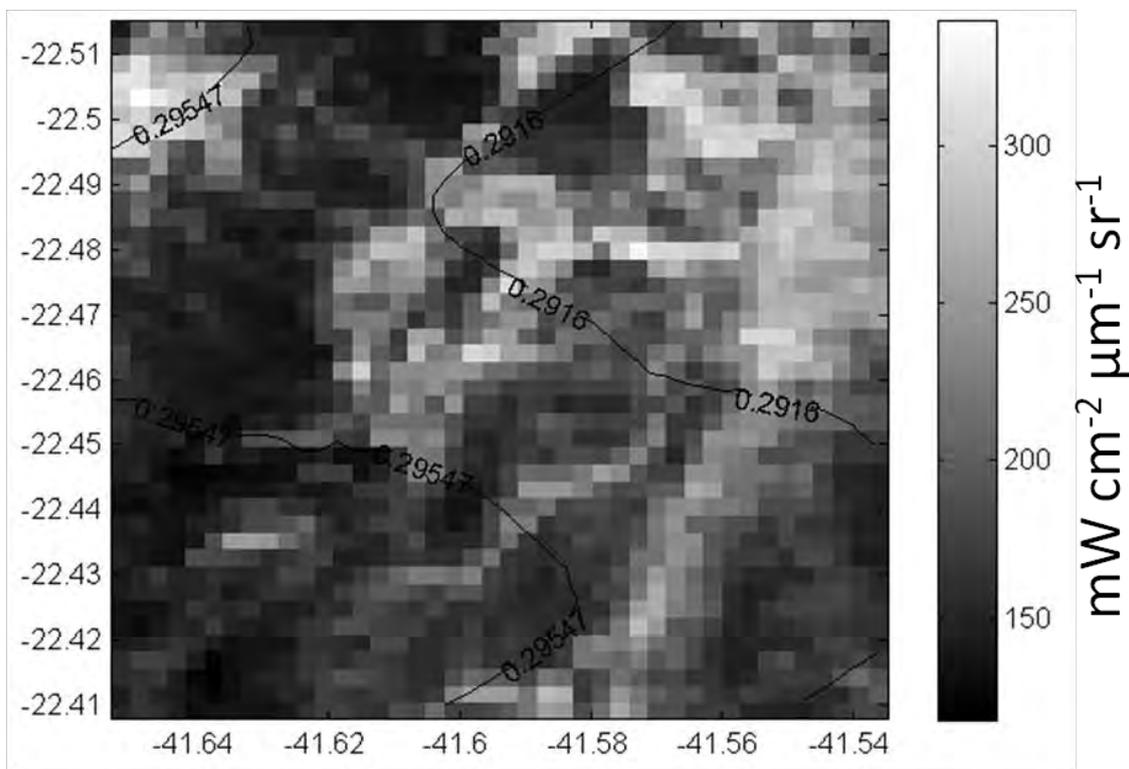


Figura 4.12 – Superfície com biofilme 26/01/2003 às 13:35 GMT: radiâncias TOA geolocalizadas e calibradas, MODIS nível 1B, banda 645 nm, em condição de sunglint. Isolinhas de contorno representam o índice de contraste normalizado – ICN (ver texto). As áreas de radiâncias mais intensas são atribuídas à presença de biofilmes originais de *Trichodesmium*.

Para comprovar a validade dos resultados apresentados, uma área sem presença de filmes biogênicos foi selecionada dentro da mesma imagem MODIS de 26/01/2003. Observa-se que as diferenças entre o ICN e FDNM são significantes (Figuras 4.13 e 4.14) quando comparados à validação na área de influência de surfactantes (Figura 4.11 e 4.12). Na área sem presença de

surfactantes o ICN Vaira entre 0,17 e 0,19 enquanto o valor de FDNM máximo é 0.07 e mínimo -0,03.

Na área da Figura 4.13 e 4.14 não há presença de filmes biogênicos e feições oceanográficas com significantes gradientes, como a borda da CB ou ondas internas, no entanto possui variações de radiância TOA na ordem de $27,4192 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ (Figura 4.12) e variação do FDNM de 0.1. Nota-se a alta variabilidade do *sunlint* dependente apenas da geometria de aquisição e do vento.

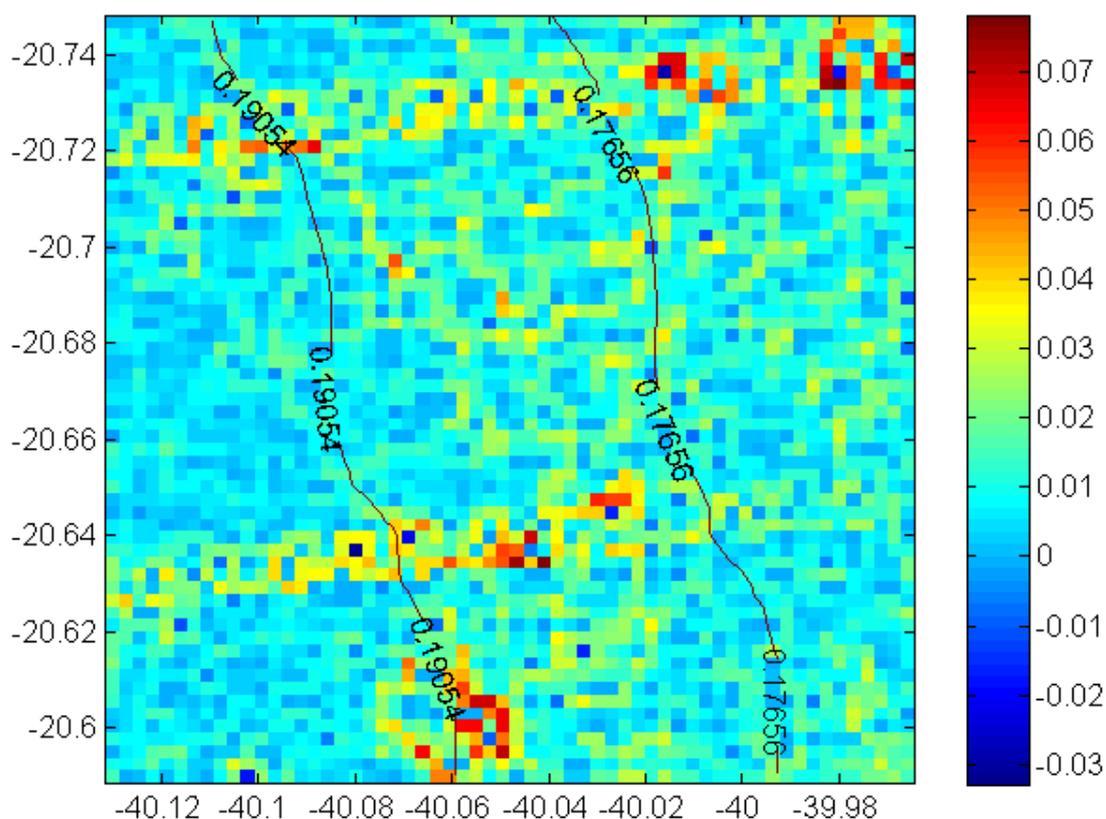


Figura 4.13 – Superfície sem biofilme 26/01/2003 às 13:35 GMT: contraste imagem MODIS, banda 645 nm, em condição de *sunlint* calculado pelo filtro de diferença normalizada pelo mínimo valor em relação ao centro - FDNM e isolinhas de contorno indicam o índice de contraste normalizado - ICN (ver texto).

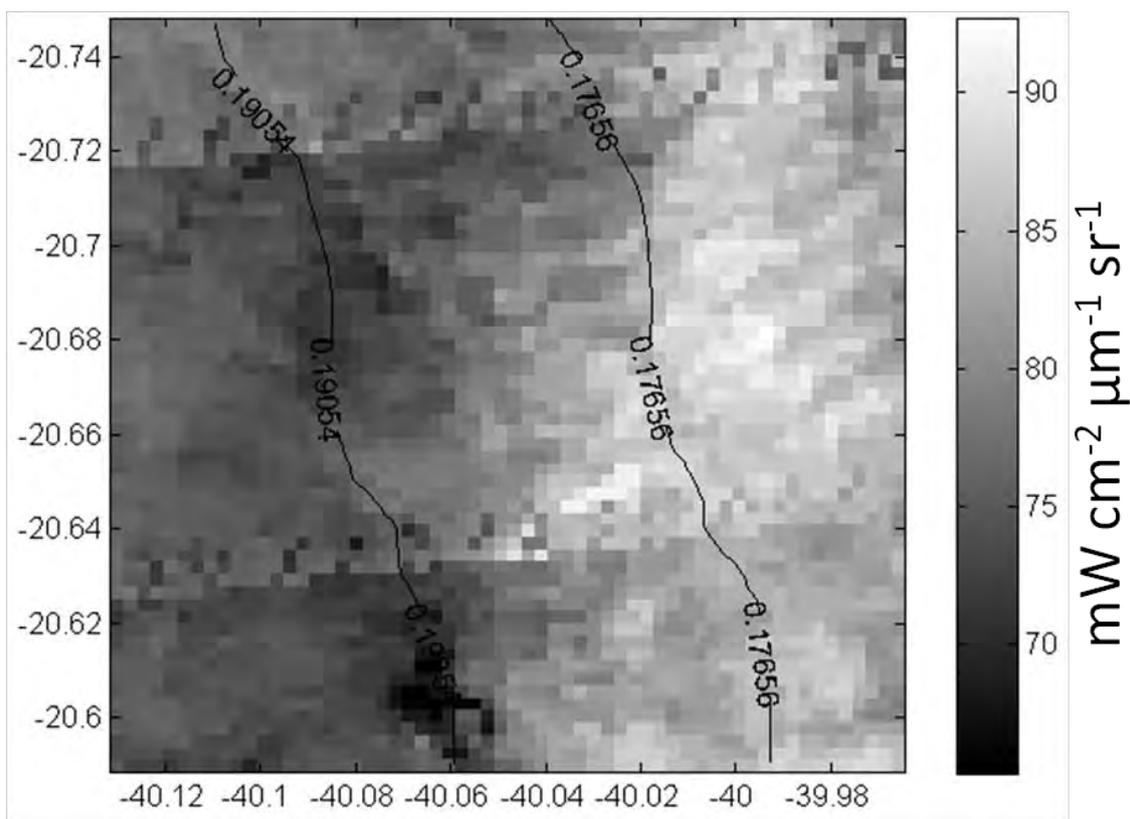


Figura 4.14 - Superfície sem biofilme 26/01/2003 às 13:35 GMT: radiâncias TOA geolocalizadas e calibradas, MODIS nível 1B, banda 645 nm, em condição de sunglint. Isolinhas de contorno representando o índice de contraste normalizado – ICN (ver texto).

4.2. Filmes Minerais

Em novembro de 2011, um vazamento de petróleo na Bacia de Campos próximo das coordenadas 21°50'S-39°50'W, foi noticiado na imprensa pela organização *SkyTruth* (<http://blog.skytruth.org>). Uma imagem MODIS *Aqua* em condições de *sunglint* (Figura 4.15), foi obtida no dia 12/11/2011 às 13:20 horário local sobre a região do vazamento. Na pluma próxima ao foco identificado, a área contaminada por óleo é brilhante em relação às águas livres de surfactantes. Conforme a pluma de óleo acompanha a deriva do vento e o fluxo da Corrente do Brasil, próximo à latitude 20°20'S, o contraste da

mancha de óleo mineral altera-se, passando a apresentar um aspecto mais escuro em relação às águas circundantes livres de óleo. O aspecto com contraste negativo se mantém e a partir da latitude 22°30'S, a mancha de óleo passa a interagir com um vórtice ao largo de São Tomé (LORENZZETTI et al., 2006), próximo à quebra de plataforma.

Este capítulo começa com a descrição das condições oceanográficas e segue discutindo a variação do contraste que ocorre entre o foco da pluma e o restante da mancha identificada no *sunglint*.

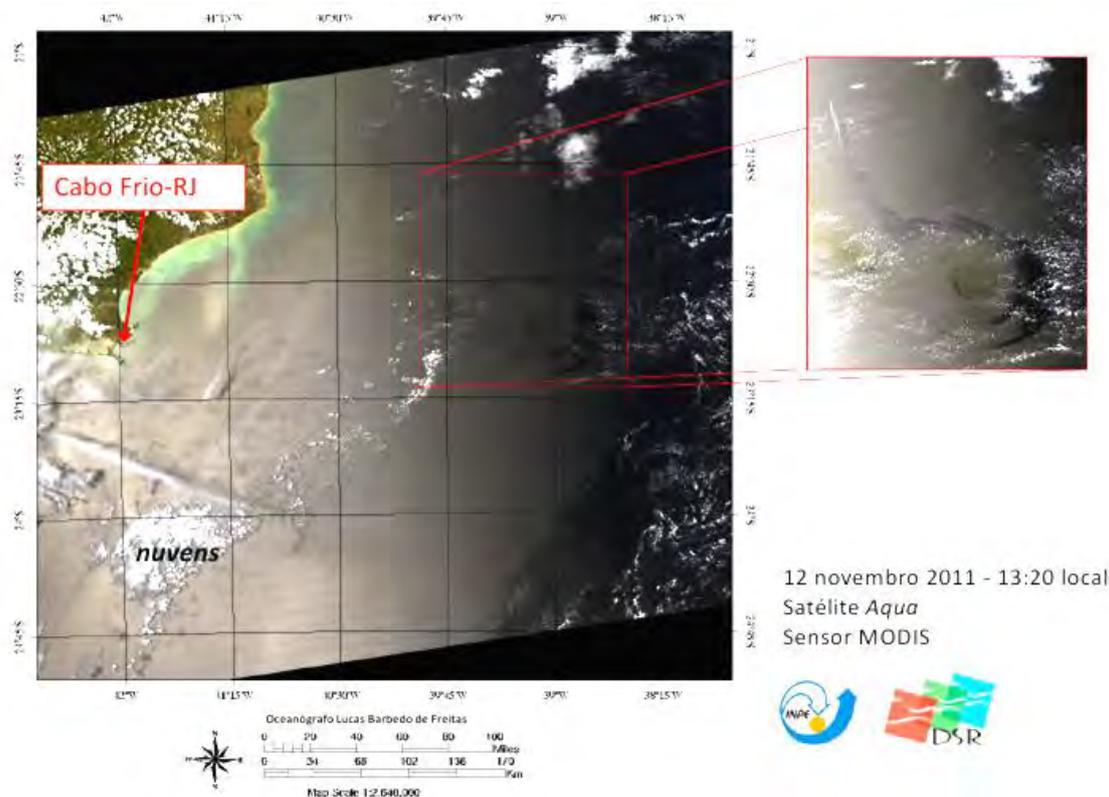


Figura 4.15- Vazamento de óleo na Bacia de Campos, observado em imagem MODIS *Aqua* de 12/11/2011 16:20 GMT, em condições de *sunglint*. A geometria de aquisição (sol e sensor) e a rugosidade superficial, imposta pelo vento, resultam em uma ampla faixa de alta reflexão especular bidirecional na superfície do oceano.

A distância percorrida pela mancha de óleo foi estimada pelo seu comprimento com o uso do *software* ENVI (ampliação da Figura 4.15). Assim, estimou-se uma distância percorrida pela mancha na imagem MODIS de aproximadamente 210,6 km num intervalo de tempo de 96 horas, a partir de 08/11/2011 ao qual foi descrito pela Chevron como início do vazamento. Assim analisando a deriva pelo vento, a velocidade calculada de $\sim 0,6$ m/s é similar a de deriva estimada na localidade da mancha pelo modelo numérico de circulação NCOM, como pode ser avaliado na Figura 4.16.

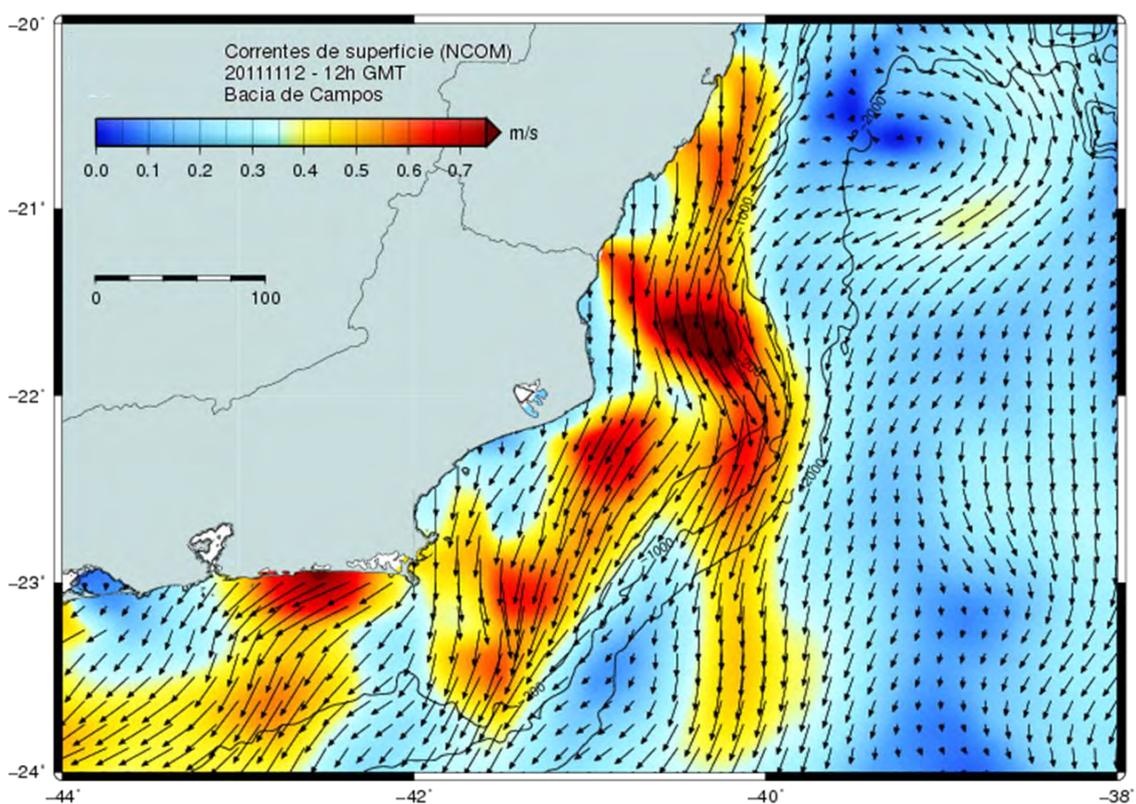


Figura 4.16 - Campo de correntes superficiais em 12/11/2011 12:00 GMT, obtido por modelo numérico de circulação oceânica NCOM (resolução $1/8^\circ$).

Filmes biogênicos podem ser associados a zonas de convergência, como ocorrem em vórtices e meandros, devido à concentração de organismos e à advecção de nutrientes enriquecendo a camada eufótica. Processos de ressurgência local também causam enriquecimento e aumento de biomassa

fitoplanctônica. Este processo pode formar filmes biogênicos detectáveis na superfície do mar em imagens SAR, gerando ambiguidades na detecção de filmes minerais (ALPERS; ESPEDAL, 2004).

Conforme discutido por Lin et al. (2003), áreas com alta concentração de clorofila podem estar associadas à presença de biofilmes. A média mensal de novembro para concentração de clorofila indica valores relativamente baixos entre 0,001 e 0,01 mg/m³ na área de influência do filme de óleo (Figura 4.17).

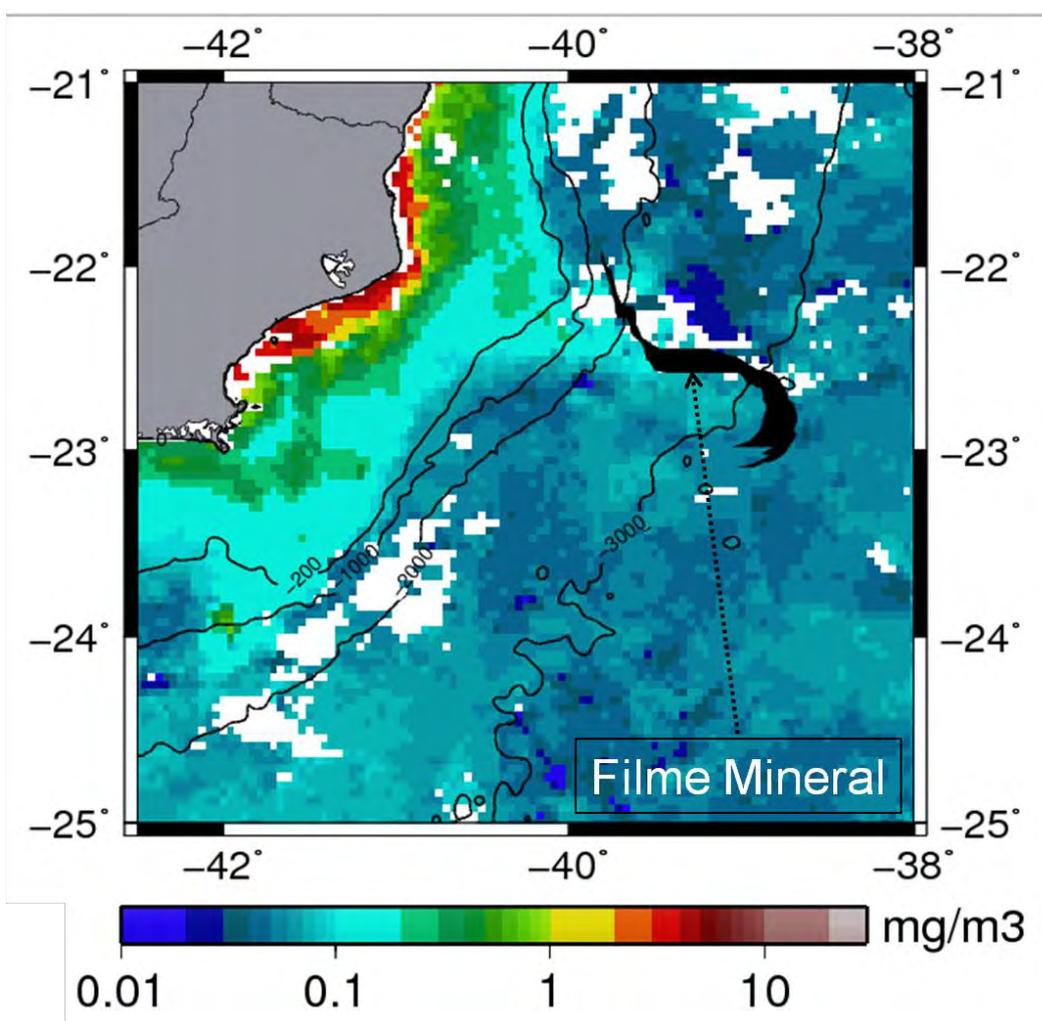


Figura 4.17 - Concentração de clorofila média do mês de novembro de 2011, estimada pelo sensor MODIS *Aqua*, com resolução de 4 km. Pode-se observar baixos valores na área de ocorrência do filme mineral.

A Figura 4.18 mostra a média mensal da concentração de clorofila em relação à climatologia, estimada entre 2002 e 2011, ambas do mês de novembro indicando baixa produção biológica nas áreas próximas ao foco do vazamento. A anomalia de clorofila mensal em relação à média climatológica é negativa na área como um todo, exceto na região costeira na latitude de 22.5°S onde as anomalias positivas de clorofila são mais expressivas $> 1 \text{ mg/m}^3$, entre Cabo Frio e Cabo de São Tomé, no litoral norte do RJ. Próximo ao vórtice de São Tomé as anomalias na concentração de clorofila tem valores $< 0,2 \text{ mg/m}^3$, caracterizando um domínio de Água Tropical, pobre em clorofila.

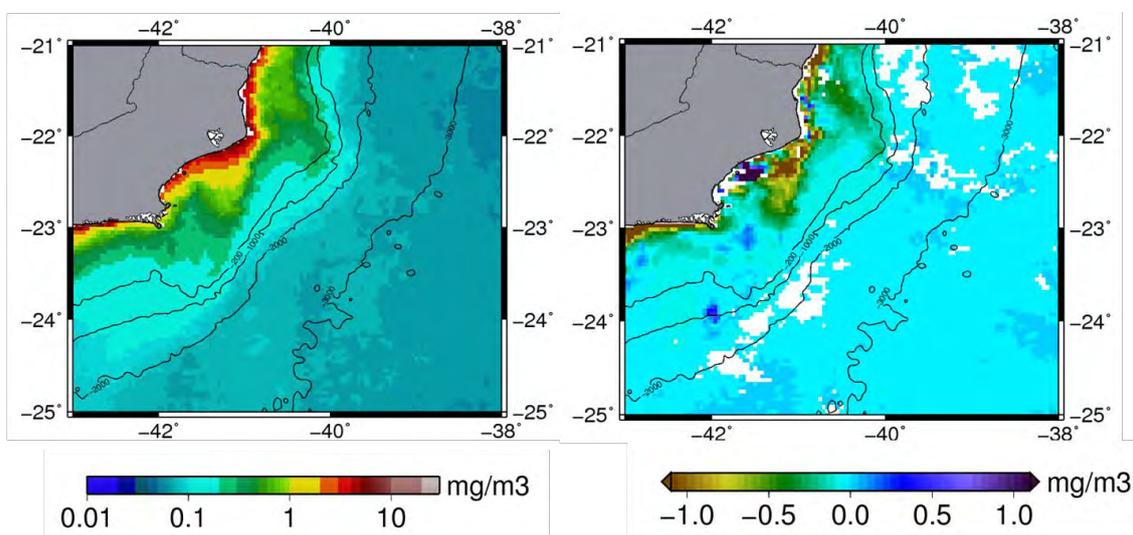


Figura 4.18 – Concentração de clorofila média climatológica do mês de novembro (esquerda), estimada entre 2002 e 2011 com dados do sensor MODIS *Aqua*. Anomalia mensal de clorofila em novembro de 2011 (direita). Anomalias negativas no foco do vazamento de óleo e no vórtice de São Tomé (ver texto).

O vórtice quase estacionário pode também ser visualizado nos campos de TSM de novembro de 2011 (Figuras 4.19, 4.20 e 4.21), centrado próximo a 22°30'S-39°30'W no mês de novembro de 2011. A dinâmica da CB gera advecção de água tropical quente ($\sim 24^\circ\text{C}$) e pobre em clorofila se misturando com águas costeiras relativamente mais frias ($\sim 22^\circ\text{C}$).

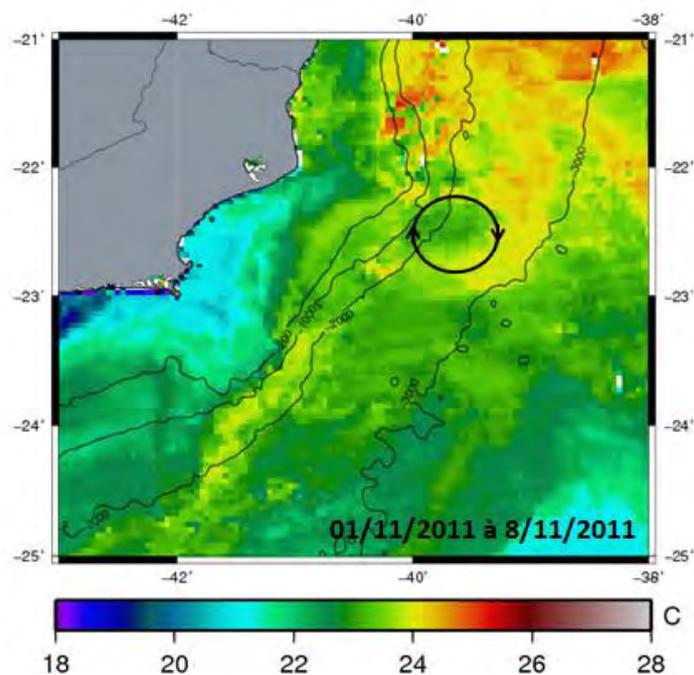


Figura 4.19 – TSM média de 8 dias (01/11 a 08/11/2011), estimada com dados MODIS *Aqua*, resolução de 4 km. O campo de TSM indica o vórtice ciclônico, centrado em 22°30'S-39°30'W, com temperatura superficial de 24°C em seu entorno e um núcleo relativamente mais frio (23°C).

O trabalho de Casciello et al. (2011) discute a possibilidade de utilizar bandas do infravermelho (IR) MODIS para detectar manchas de óleo, com base teórica na diferença de calor específico entre água e óleo e na variação da tensão superficial da água devido a ação do óleo. Os filmes minerais alteram a tensão superficial tornando a superfície mais inelástica. Assim, o menor atrito com o vento e área de contato com a atmosfera devido ao alisamento da superfície altera o fluxo de calor mar-ar e pode resultar em um resfriamento anômalo. Casos de anomalia quente são mais comuns no foco de vazamentos, forçadas pela alta concentração localizada de óleo e seu diferente calor específico.

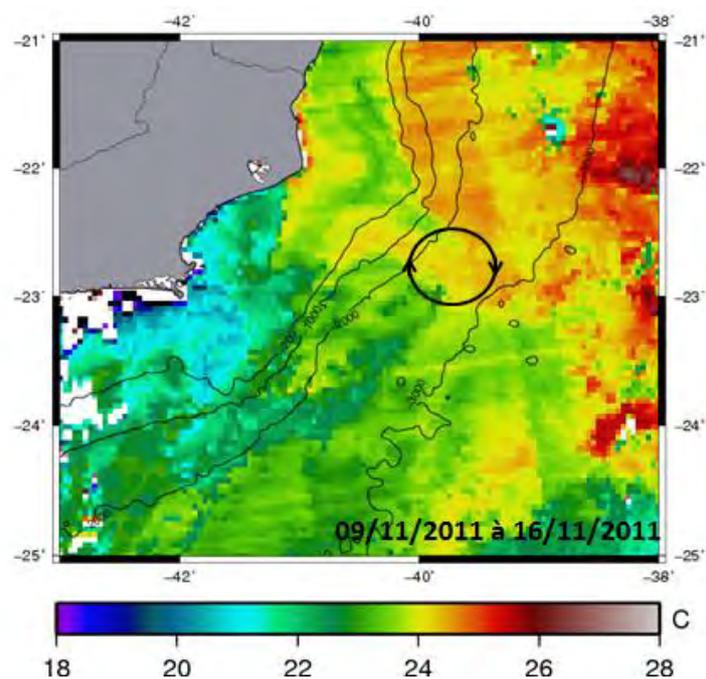


Figura 4.20 – TSM média de 8 dias entre os dias 9/11/2011 e 16/11/2011, obtida pelo MODIS *Aqua* resolução de 4 km.

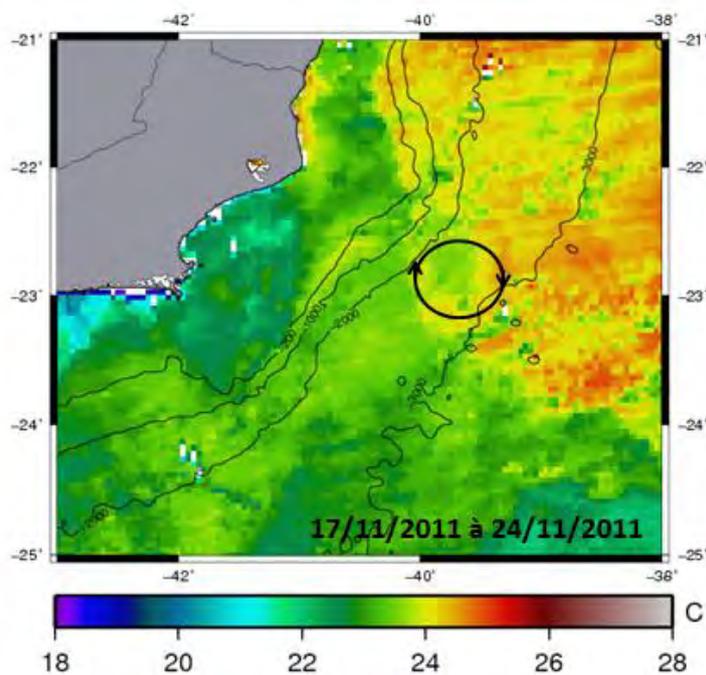


Figura 4.21 – TSM média de 8 dias entre os dias 17/11/2011 e 24/11/2011, obtida pelo MODIS *Aqua* resolução de 4 km.

A imagem MODIS em condições de *sunlint*, banda 645 nm, em nível-1B de 12/11/2011 16:20 GMT (Figura 4.22) destaca a feição ligada ao vazamento de óleo. Próximo ao ponto do vazamento, em 21°50'S-39°50'W, o campo de *sunlint* destaca com alta reflectância bidirecional a área poluída com óleo. Na área contígua à mancha, forma-se uma estrutura escura, associada à dinâmica oceanográfica do vórtice de São Tomé, litoral norte do RJ.

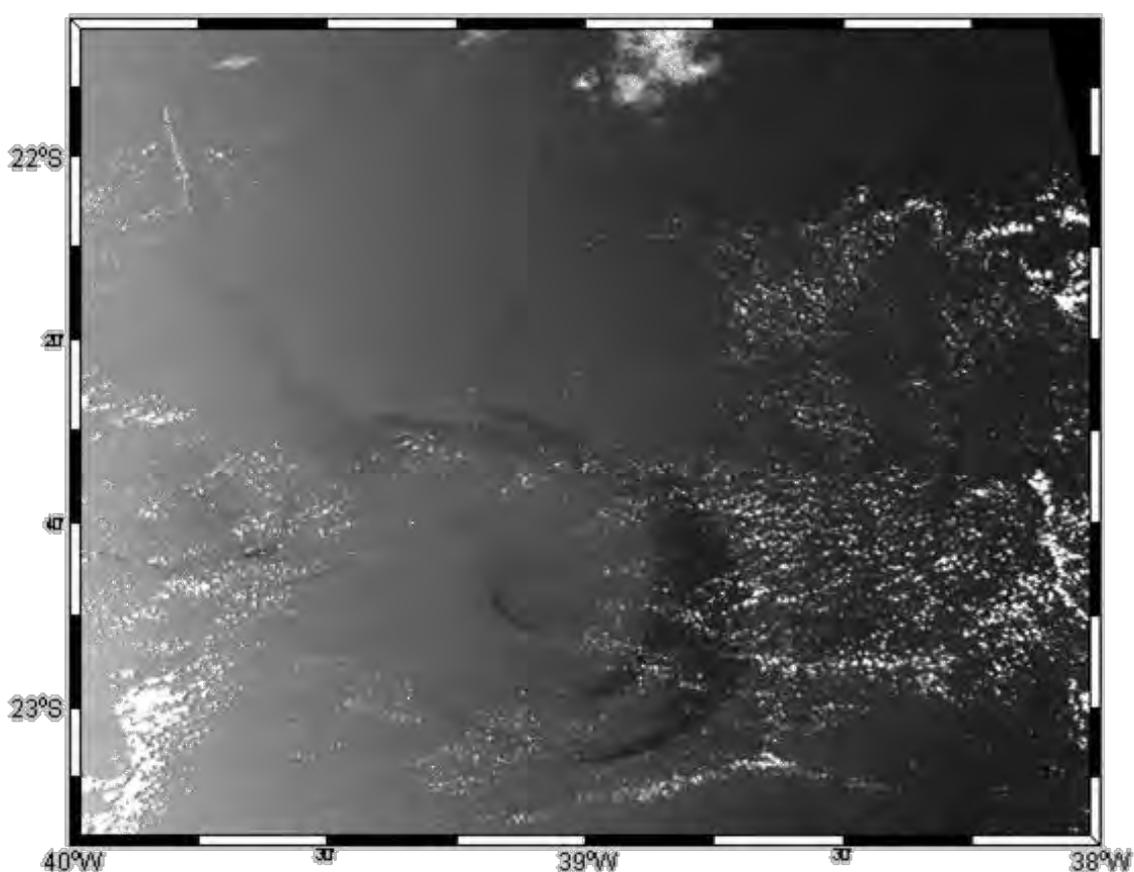


Figura 4.22 - Imagem MODIS 12/11/2011 16:20GMT, banda 645 nm, resolução espacial 250 m, destacando a feição de óleo oriunda do vazamento no Campo de Frade, Bacia de Campos, RJ.

O vento na superfície do mar obtido por reanálise NCEP/NCAR, referente às 18:00 GMT, (Figura 4.23) é analisado para entender as variações da

reflectância na área do vazamento (Figura 4.22), considerando a estabilidade não neutra da camada limite ar-mar. Em áreas com magnitude do vento > 2 m/s encontramos a pluma de óleo com contraste positivo, brilhante em relação às águas circundantes limpas. Conforme a mancha de óleo é capturada pelo vórtice de São Tomé-RJ em área de vento < 2 m/s, o contraste se inverte para negativo.

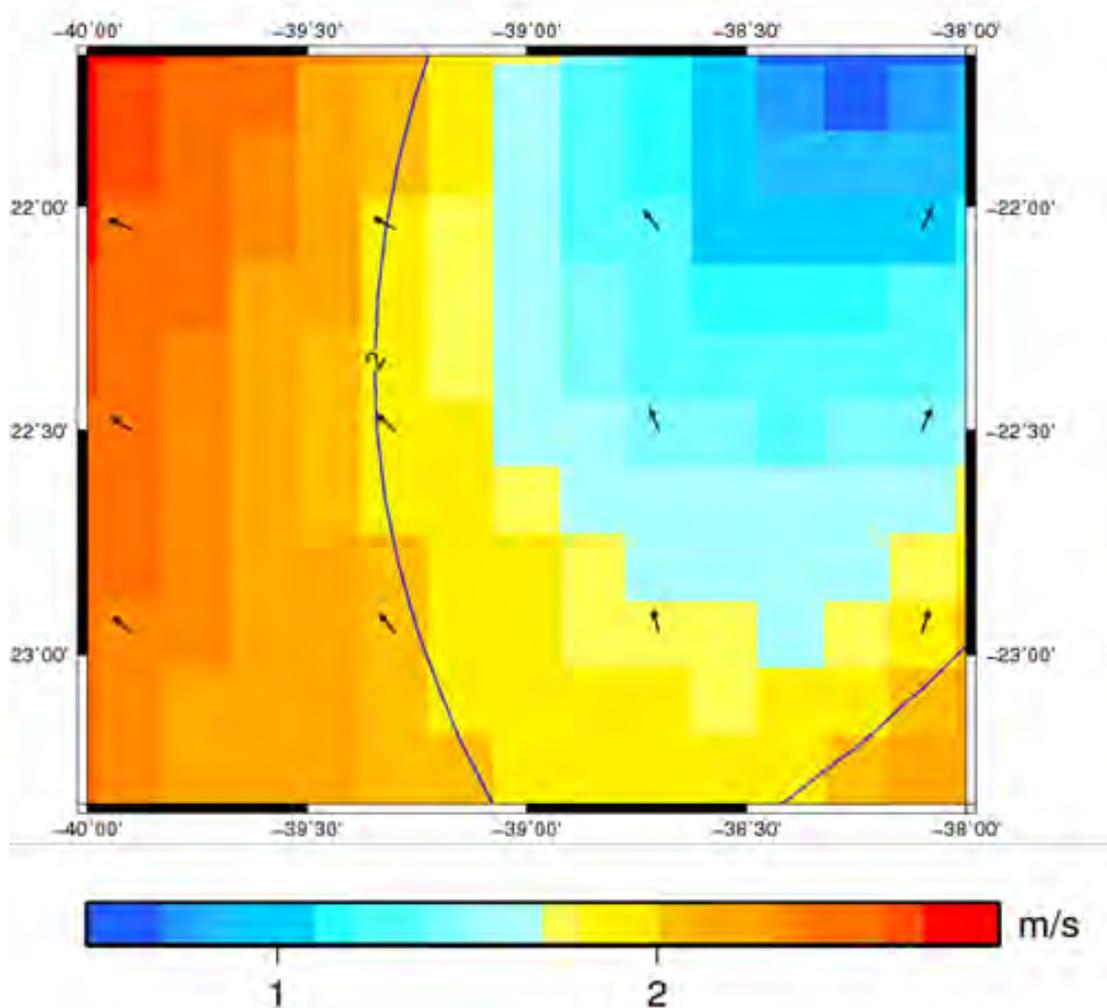


Figura 4.23 - Campo de vento na superfície do mar, obtido da reanálise NCEP em 12/11/2011 18:00 GMT. A isolinha da magnitude de 2 m/s coincide com a inversão no contraste óleo-água na pluma próxima ao foco do vazamento.

A quantificação do LN_{glint} para a aquisição da imagem MODIS de 12/11/2011 16:20GMT resulta em um campo de *sunlint* variando entre $0 < LN_{glint} < 0,4$, como visualizada na Figura 4.24. Valores de $LN_{glint} > 0,3$ coincidem com área próxima ao ponto de vazamento de óleo, onde se observa alta reflectância bidirecional em relação a águas limpas vizinhas. Na região onde a mancha de óleo aparenta ser influenciada pela dinâmica do vórtice há baixos valores de *sunlint* ($LN_{glint} < 0,2$).

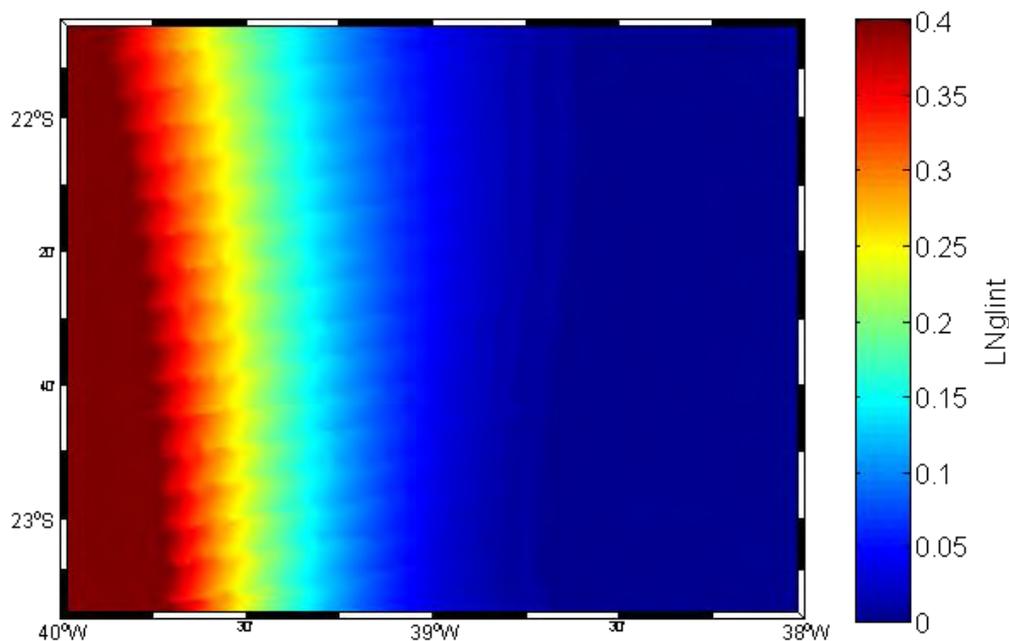


Figura 4.24 - Campo de reflectância de sunlint referente à imagem MODIS de 12/11/2011 16:20 GMT.

O campo de LN_{glint} e o ICN foram modelado com idênticas condições de vento e geometria de aquisição. As condições geométricas de visada às 12/11/2011 16:20 GMT pelo sensor MODIS com θ_v de 0 à 55° (similar ao IFOV do sensor), azimute relativo ($\varphi_v - \varphi_s$) de -157° e vento máximo e mínimo local de 0-3 m/s, de acordo com dados de reanalise NCEP/NCAR quasesimultâneos. Conforme

ilustrado nos quatro gráficos da Figura 4.25, observa-se que o padrão de ICN é invertido quando as condições de vento passam de 1,1 m/s para 2,1 m/s, independente da geometria de aquisição e valor de LN_{glint} .

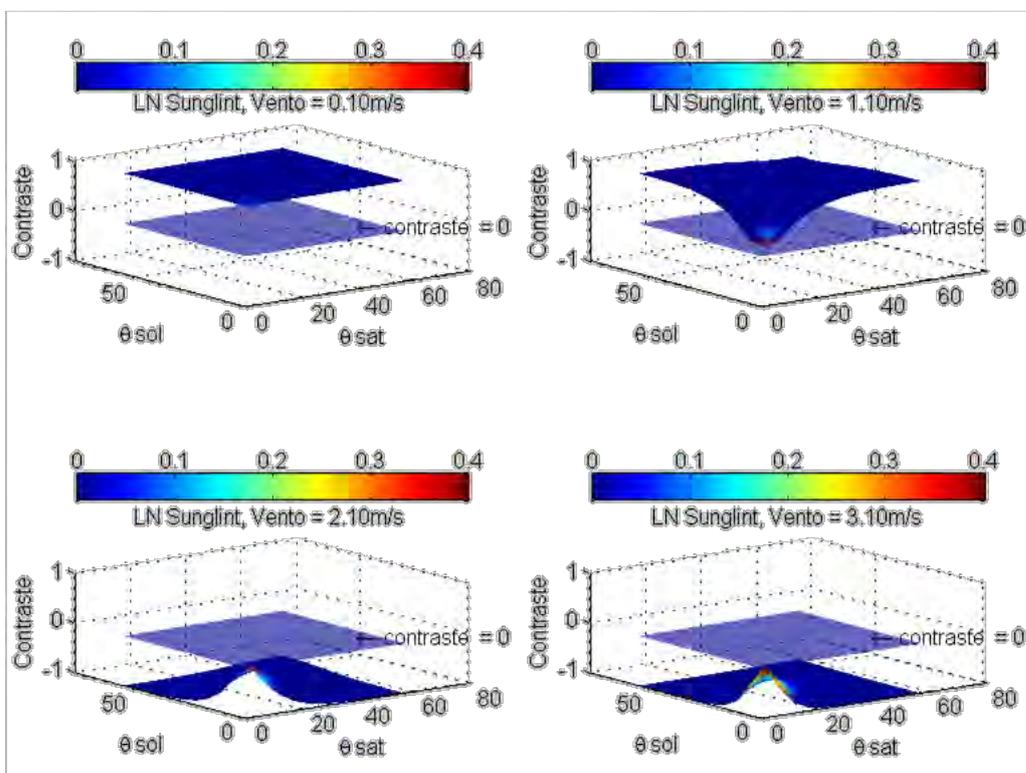


Figura 4.25 - Característica do LN_{glint} e contraste do filme surfactante em relação a áreas limpas vizinhas avaliado pelo ICN, para geometria de aquisição (sol/sensor) de zênite similar à aquisição MODIS de 12/11/2012 16:20 GMT, com azimuth relativo -157° e vento entre 0-3 m/s.

Ao analisar a imagem MODIS em condição de *sunglint*, observa-se a discordância entre contraste positivo próximo ao foco do vazamento (mancha de óleo mais clara) e ICN negativo (Figura 4.26). Se a causa da variação no resultado esperado for verdadeiramente relacionada à magnitude do vento, então é possível atribuir o comportamento observado às oscilações nas velocidades características de inversão do contraste entre 1 m/s e 2 m/s pelo vento, conforme vento estimado na Figura 4.23 e modelado na Figura 4.26.

Porém, o atraso de 1 hora e 40 minutos entre o vento e a aquisição da imagem MODIS ou a própria resolução espacial do NCEP/NCAR dificulta esta afirmação.

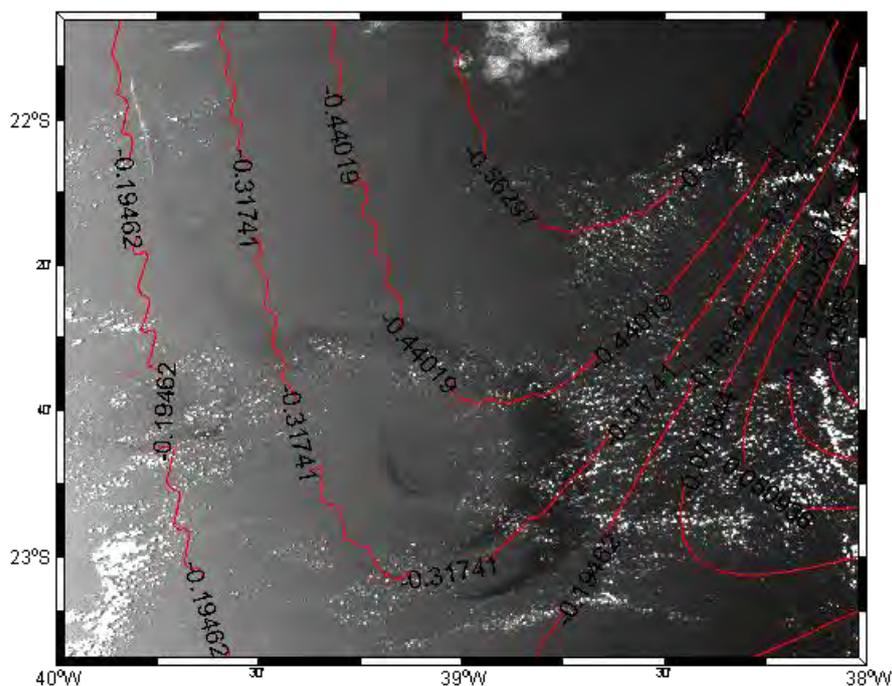


Figura 4.26 - Imagem MODIS de 12/11/2011,16:20 GMT, banda 645 nm, resolução espacial 250 m, destacando a feição de óleo oriunda do vazamento ocorrido na Bacia de Campos, RJ. As isolinhas vermelhas indicam o ICN. Observa-se que na pluma próxima ao foco do vazamento o contraste positivo da mancha de óleo não concorda com o ICN que indica contraste negativo (ver texto).

A Figura 4.27 mostra um detalhe da imagem MODIS, banda 645 nm realçando o foco do vazamento. Próximo ao foco do vazamento, o contraste da pluma de óleo é positivo porém o ICN varia entre -0,1866 e -0,2506 (Figura 4.28). Embora o sinal do ICN negativo não coincida com o contraste positivo da pluma de óleo, de acordo com a Figura 4.28 os valores absolutos de ICN e contraste estimado estão próximos em módulo $|ICN| \sim 0,2$.

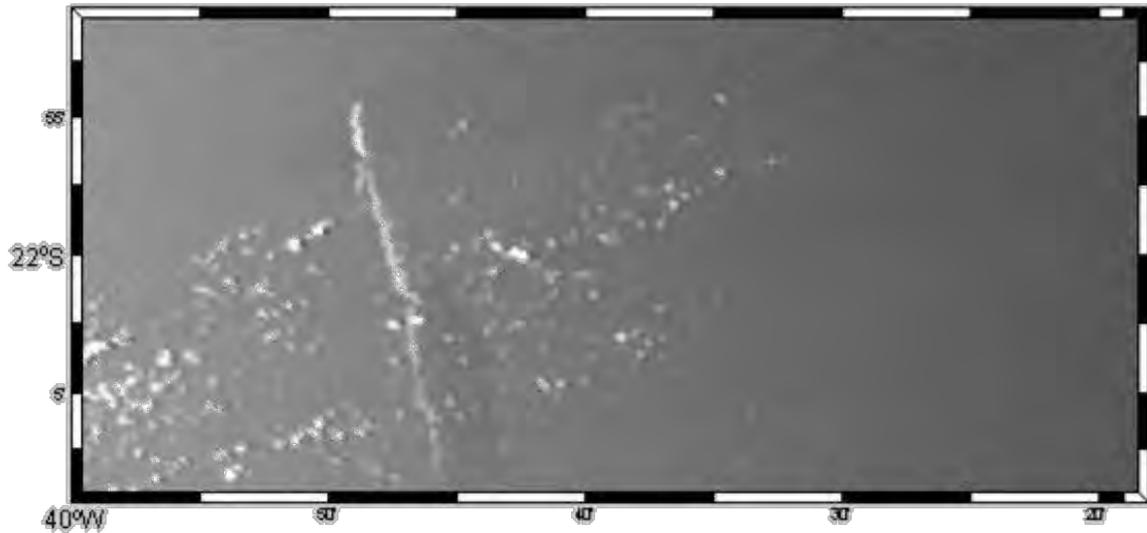


Figura 4.27 - Pluma de óleo: no foco do vazamento apresenta contraste positivo na imagem em nível de cinza MODIS de 12/11/2011 16:20 GMT, banda 645 nm, resolução 250 m.

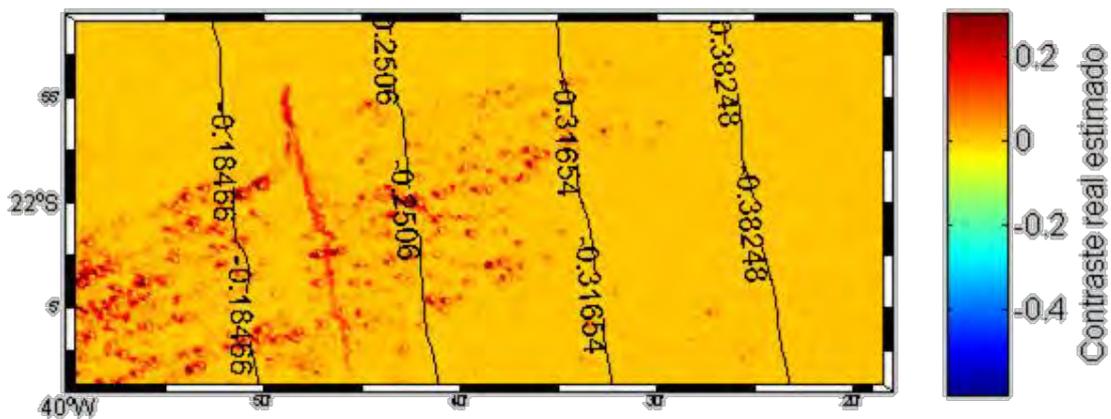


Figura 4.28 – Pluma de óleo: valores de contraste no campo de *sunlint* estimado por filtro passa alta FCNM (em cores) e isolinhas indicando o ICN referentes ao detalhe da imagem MODIS de 12/11/2011 16:20GMT.

O óleo originado por vazamentos em estruturas de exploração e produção de óleo e gás pode formar filmes muito finos (ordem de nanômetros). Pode também formar bolhas oleosas e/ou pequenas gotas submersas na coluna

d'água, capazes de alterar de modo substancial suas propriedades ópticas, assim como salientado por Stramski et al. (2004). Dessa maneira, a pluma de óleo caracterizada por contraste positivo próximo ao foco do vazamento visualizado dia 12/11/2011, na Bacia de Campos, pode não ser uma característica da rugosidade marinha da superfície e sim alterações na reflectância da coluna d'água devido à presença de emulsão água-óleo, bolhas de óleo e/ou gás submersos, capazes de alterar significativamente a qualidade do espectro refletido na coluna d'água (OTREMBA, 2000).

O óleo mineral tem capacidade efetiva em alterar as características espectrais da água marinha mesmo quando em finas camadas transparentes (OTREMBA 2009, OTEMBRA 2000). Lammoglia e Souza Filho (2011) detalham que características espectrais dos hidrocarbonetos correspondem à sua composição química e vibrações moleculares fundamentais, as quais podem ser relacionadas a diferentes estágios de emulsão entre a água do mar e o óleo. Estimativas da taxa de emulsão do óleo em ambiente marinho dependem muito do tipo de óleo, campos de vento e turbulência, além do tempo de exposição à intempérie. Porém, modelos de taxa de emulsão podem divergir muito da realidade *in-situ* dificultando estimativas de tempo de exposição do óleo (FINGAS, 1995).

O padrão de filmes de óleo com feições brilhantes de alta reflectância e inversões de contraste dentro da mancha de óleo, próximo a fonte de vazamentos e exsudações naturais, são relatados em outras publicações científicas como no Golfo de Oman (ISSA, 2010), na costa sudeste brasileira (LORENZZETTI et al., 2009), Golfo da Venezuela (CHUST; SAGARMINAGA, 2007), no Golfo do México em exsudações naturais (HU et al., 2009) e vazamento da Plataforma *Deepwater Horizon* (KLEMAS, 2010), entre outros.

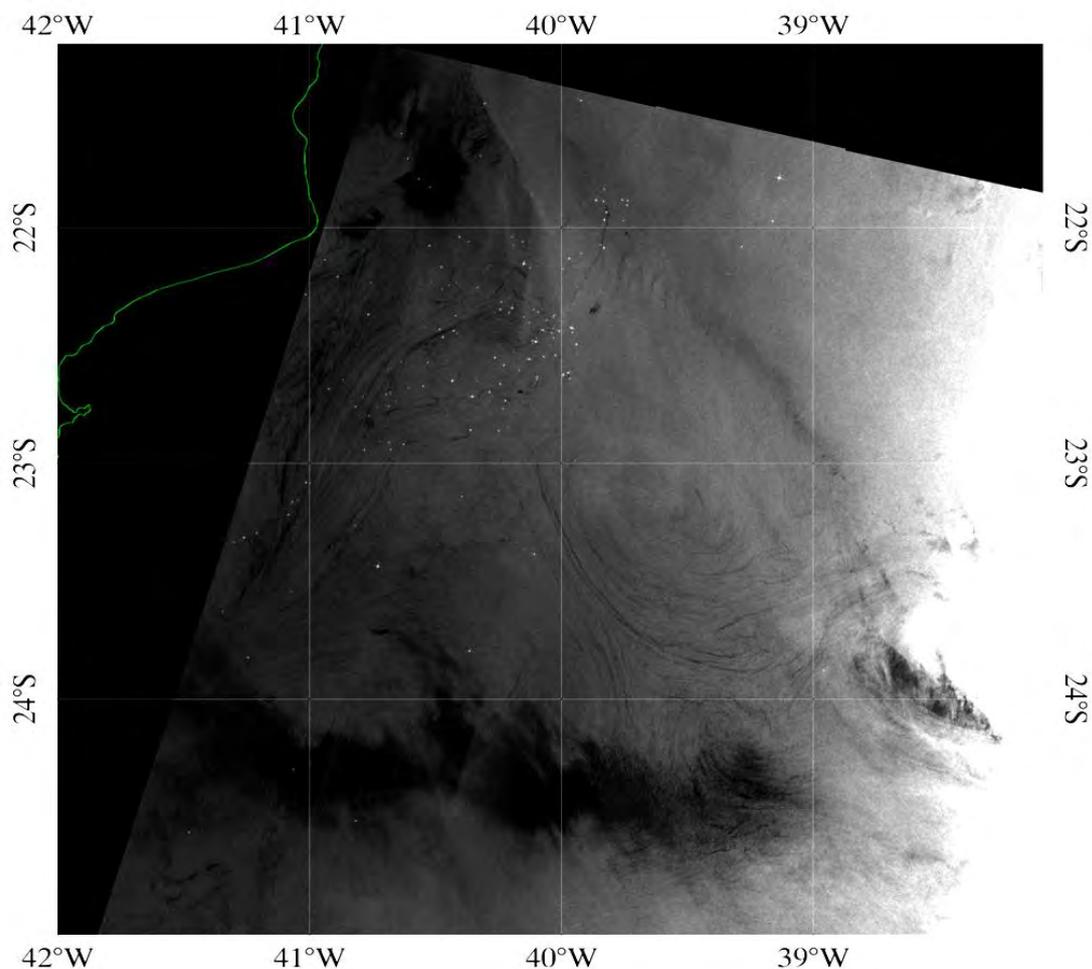


Figura 4.29 - Imagem ASAR do dia 25/11/2011, 12:12 GMT, da região próxima de Cabo Frio e Cabo de São Tomé, litoral norte do RJ. Faixas escuras e contínuas sobre o oceano na imagem SAR são causadas pela supressão de ondas de *Bragg* na presença de filmes de óleo na superfície do mar.

Imagens de radar de abertura sintética obtidas por sensoriamento remoto são citadas como uma das ferramentas mais efetivas para monitorar a poluição por óleo nos oceanos. Realmente, as imagens SAR possuem boa resolução espacial e podem ser adquiridas em praticamente qualquer situação meteorológica e condição de iluminação solar. No entanto, fatores de origem oceanográfica e meteorológica podem suavizar a rugosidade marinha gerando

feições de baixo sigma-zero com características similares ao óleo (LAVROVA; KOSTIANOY, 2012). Outro aspecto importante comentado por IVANOV et al. (2002) a se considerar é que as camadas nanométrica de óleo detectadas em imagens SAR representam, em média, menos que 10% da área real das manchas geradas por vazamentos.

A imagem ASAR de 25/11/2011, 12:15 GMT indica a presença de filmes de óleo na região da Bacia de Campos, RJ (Figura 4.29). As áreas com baixo retroespalhamento do sinal de radar (sigma-zero) resultam da supressão de ondas de *Bragg* provocada pelos filmes superficiais. Observa-se que as manchas de óleo parecem ter sido capturadas pelo vórtice centrado em 23°S-39°30'W, que impõe uma geometria espiralada ciclônica à feição observada.

Imagens SAR permitem a detecção de filmes de óleo devido a variações no sigma-zero causado pela supressão de ondas capilares. Essas ondas conhecidas como ondas de *Bragg* são formadas e dissipadas de maneira instantânea pelo atrito do vento com a superfície do oceano. Isto impõe grande importância na análise dos campos de vento ao examinar imagens SAR. A Tabela 4.4 mostrada a seguir, foi adaptada de Alpers e Espedal (2004) e demonstra a velocidade do vento ao qual é possível observar filmes de óleo.

Tabela 4.4 - Características de feições de óleo mineral em imagens da superfície do oceano via SAR (adaptado de: SAR Marine User's Manual - NOAA).

Feição	Escala	Medida derivada	Processo de formação	Velocidade do vento
Óleo mineral	>100 m ²	Área e deriva da mancha	Vazamentos, descartes de navio e exsudações naturais.	3-15 m/s

Conforme Espedal (1999), filmes que permanecem detectáveis em imagens SAR a velocidades do vento próximas de 7-8 m/s, têm alta probabilidade de serem de origem mineral, ou seja, hidrocarbonetos no caso de filmes biogênicos, estes se dispersam mais rapidamente sobre a ação de ventos desta magnitude.

A imagem ASAR de 25/11/2011 (Figura 4.29) foi adquirida em condições de velocidade do vento consideradas ideais para a detecção de manchas de óleo na superfície do mar, ou seja, entre 2 e 8 m/s. Pode-se observar a presença de filmes de óleo coincidentes com áreas de ventos neste mesmo intervalo. Em valores de vento abaixo de 8 m/s, há presença de filmes minerais na imagem ASAR caracterizadas por bandas de baixo sigma-zero, paralelas, de comprimento que podem chegar a quase 174 Km e larguras em torno de 250 m. Em latitudes ao sul de 24°S, observa-se uma área de sombra impedindo a detecção de óleo coincidindo com ventos próximos a 2 m/s. Como mencionado anteriormente, ventos fracos não chegam a formar ondas de *Bragg*.

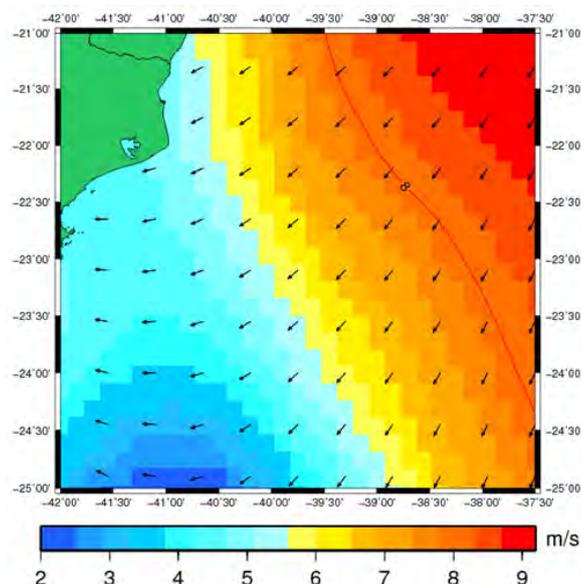


Figura 4.30 - Campo de vento na superfície do mar obtido de reanálise do NCEP/NCAR, em 25/11/2011, 12:00 GMT. As áreas com velocidades entre 3-8 m/s coincidem com a presença de filmes de óleo.

De acordo com Girard-Ardhuin et al. (2003), imagens SAR são melhor utilizadas para a detecção de filmes de óleo em condições de ventos acima de 2-3 m/s. Em condições de ventos ainda mais fracos, a detecção fica menos óbvia. Já em condições de ventos fortes, os filmes superficiais são dissipados rapidamente, ainda que detecções possam ocorrer com ventos acima de 10-14 m/s, dependendo de outros parâmetros de aquisição SAR, como o ângulo de incidência, banda, frequência e natureza do óleo. Um ponto mais importante é a respeito do intervalo de vento para detecção de filmes biogênicos em imagens SAR que esta em 3-5 m/s, este limiar é considerado um critério em chaves de decisões, desenvolvidas para diferenciar vazamentos de petróleo de filmes biogênicos.

O estudo de caso realizado na costa Chinesa por Ivanov et al. (2003) indicou que ventos fracos de até 3 m/s dificultam a distinção de filmes surfactantes em imagens SAR. Já na faixa de velocidade do vento entre 3-6 m/s, foi possível fazer a distinção, enquanto que com ventos fortes entre 10-14 m/s, observou-se a mistura do óleo para camadas subsuperficiais dificultando a detecção baseada no retroespalhamento da rugosidade superficial. As Figuras 4.31 e 4.32 apresentam uma imagem ASAR de 22/11/2011 12:22 GMT e o campo de vento na superfície do mar da reanálise NCEP/NCAR quase simultâneo (12:00GMT), respectivamente. Ressaltando que nos dias 12/11/2011 e 25/11/2011, as imagens orbitais evidenciam a presença de óleo na bacia de Frade, na imagem ASAR do dia 22/11/2011 sobre condições de vento forte de NE (> 8 m/s), as feições de manchas de óleo de Frade são removidas da imagem SAR, pela ação de processos de mistura entre o filme de óleo e águas subsuperficiais.

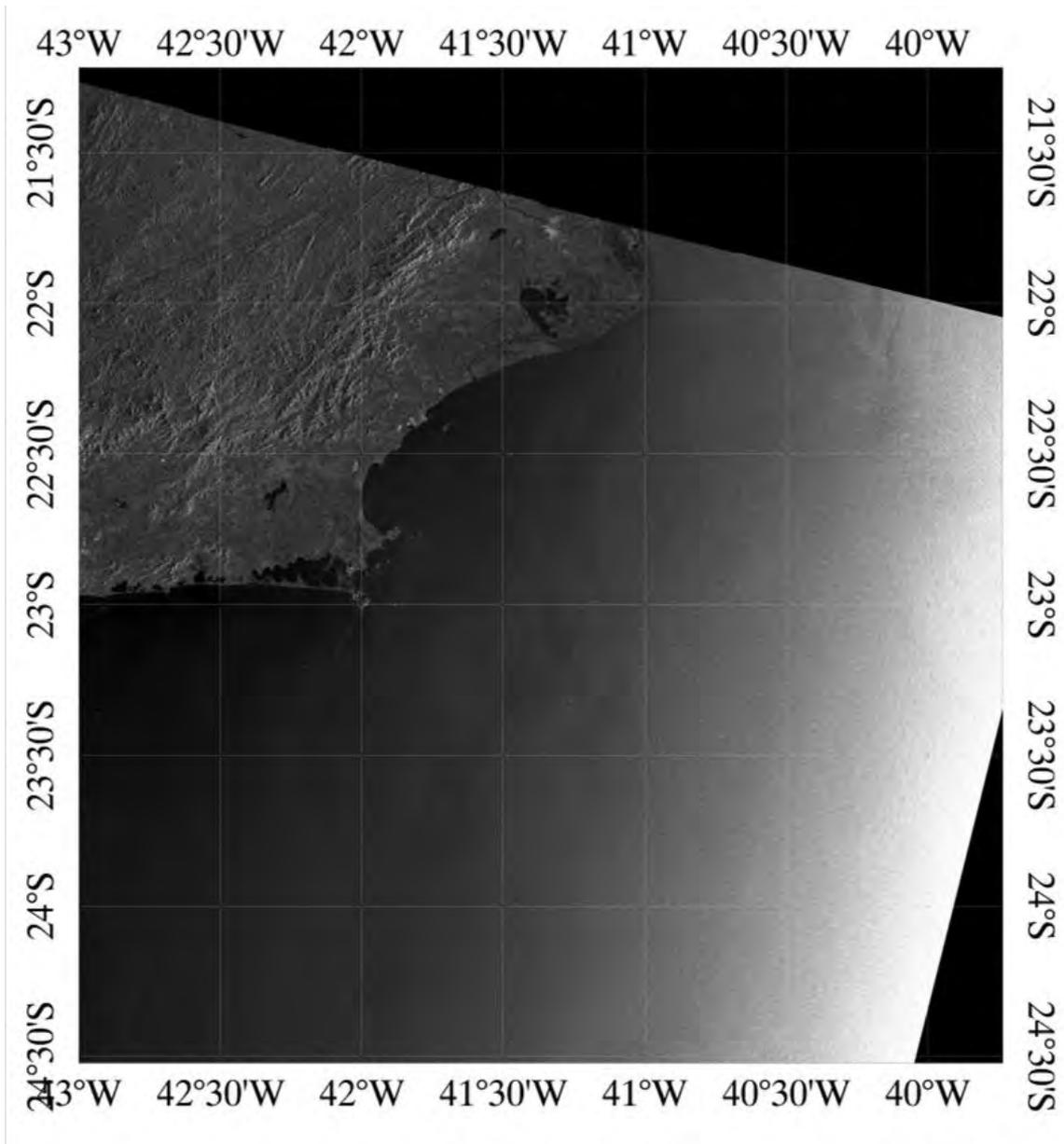


Figura 4.31 – Imagem ASAR de 22/11/2011, adquirida às 12:22GMT, mostrando a região da Baía de Campos, litoral norte do RJ, em condições de vento > 8 m/s.

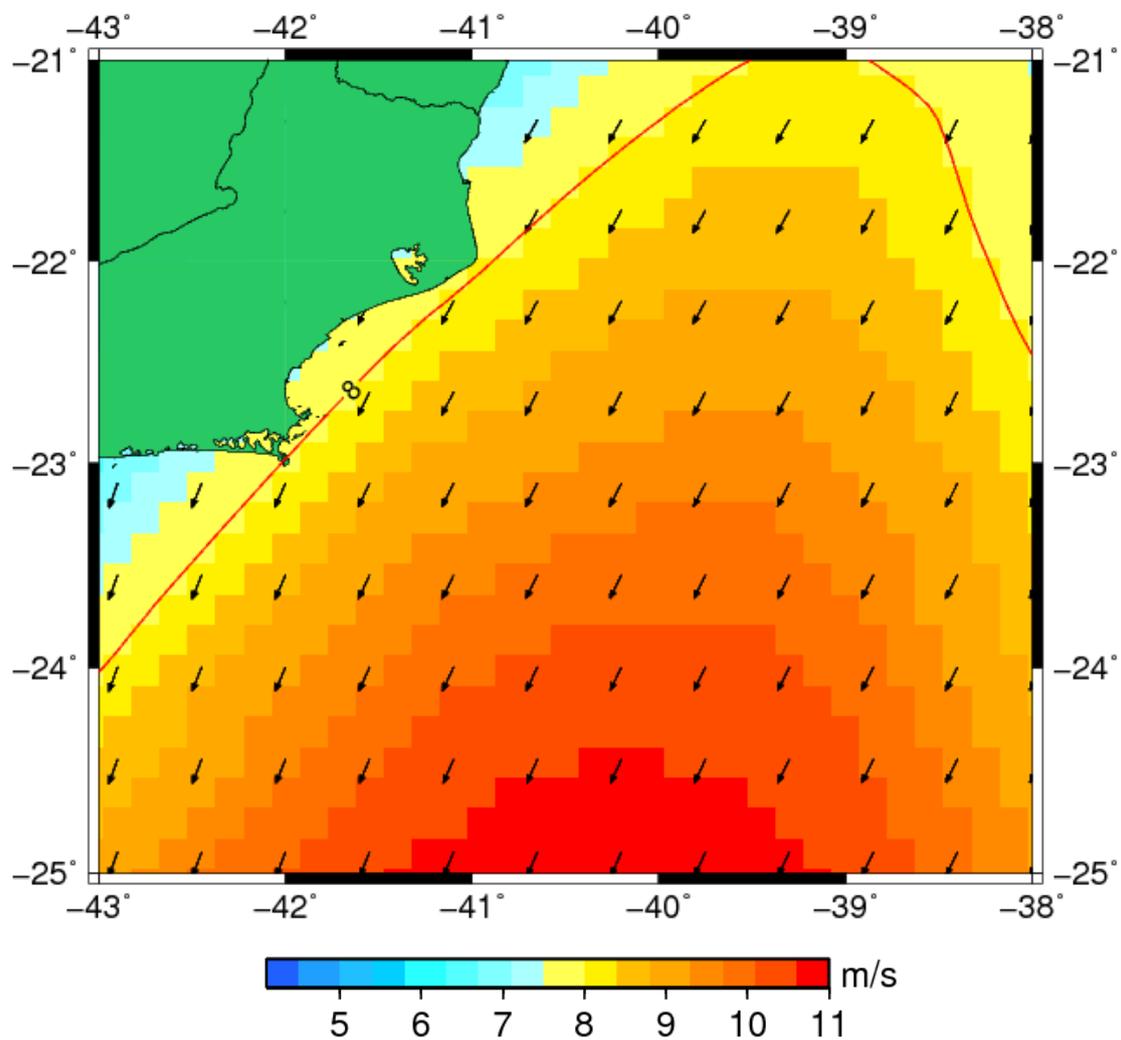


Figura 4.32 – Campo de vento na superfície do mar adquirido do NCEP/NCAR em 22/11/2011, 12:00 GMT, ventos superiores a 8 m/s dissipam os filmes de petróleo momentaneamente.

4.3. Feições oceanográficas

4.3.1. Ondas internas

Ondas internas solitárias são um fenômeno de dissipação da energia das marés sobre a Plataforma Continental em áreas com estratificação termal, conforme descrito por Pereira et al. (2007). Este processo dinâmico propaga-se horizontalmente em camadas isopícnais, sendo frequentemente acompanhado de material oleaginoso associado a incrementos da produtividade marinha, padrão discutido em Cox e Munk (1956). Cabe ressaltar que ondas internas solitárias são bastante frequentes na região de estudo como mostra Dias (2012).

Dentro do processo das ondas internas, ocorre a quebra da onda de maré que resuspende sedimentos da Plataforma Continental, inserindo nutrientes à camada eufótica. De acordo com Lagrust e Pauly (2007), nesse processo a agitação mecânica e turbulência sobre o fitoplâncton pode catalisar o aumento na produtividade marinha.

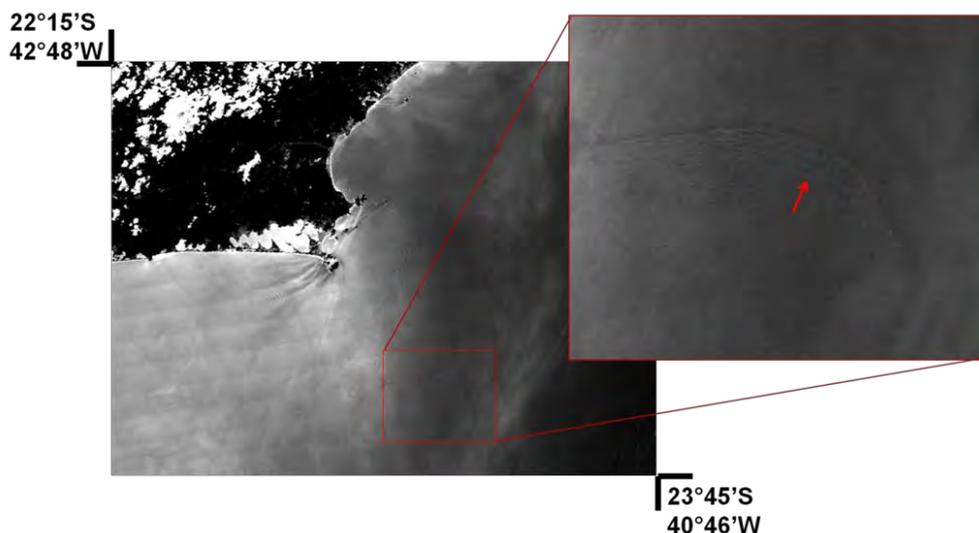


Figura 4.33 – MODIS *Aqua* de 06/11/2009 16:25 GMT, resolução 250m. Onda interna solitária com radiais concêntricas alternando regiões brilhantes e escuras, destacada pela ampliação e seta vermelha.

As ondas internas são um processo subsuperficial, mas gera rugosidade/alisamento na superfície em consequência aos padrões divergência/convergência acima da termoclina. Esta assinatura na rugosidade superficial produz um padrão na orientação das microfacetas do oceano, a Figura 4.34 descreve este sistema. O padrão das ondas internas, caracterizado por linhas de ondas concêntricas pode ser observado no *sun glint*, conforme destacado por Myasoedov et al. (2010) e observado na Figura 4.33 adquirida pelo MODIS na Região de Cabo Frio, RJ.

Fisicamente, o processo de alisamento/rugosidade ao qual interfere na inclinação das microfacetas de acordo com a posição acima da onda interna, também permite a observação das ondas internas pelo sensor SAR, assim como descrito por Robinson (2004).

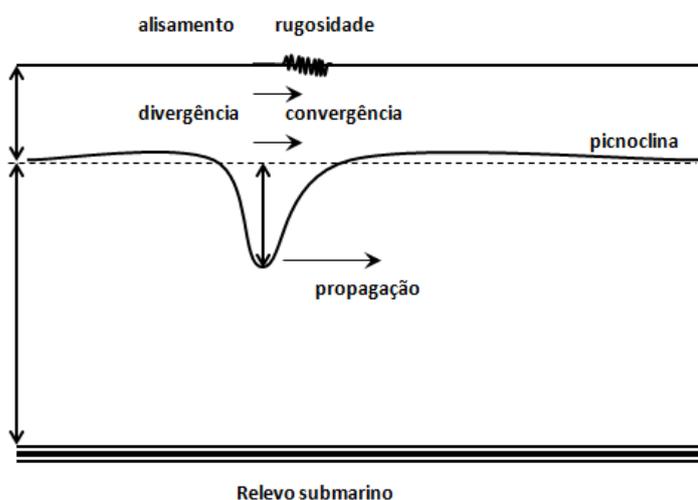


Figura 4.34 - Visão esquemática da onda interna solitária formando zonas de convergência acima da termoclina (ou picnoclina) que resultam em modulações da rugosidade na superfície marinha, (Fonte: adaptada de ROBINSON, 2004).

4.3.2. Sombra de vento por relevo costeiro

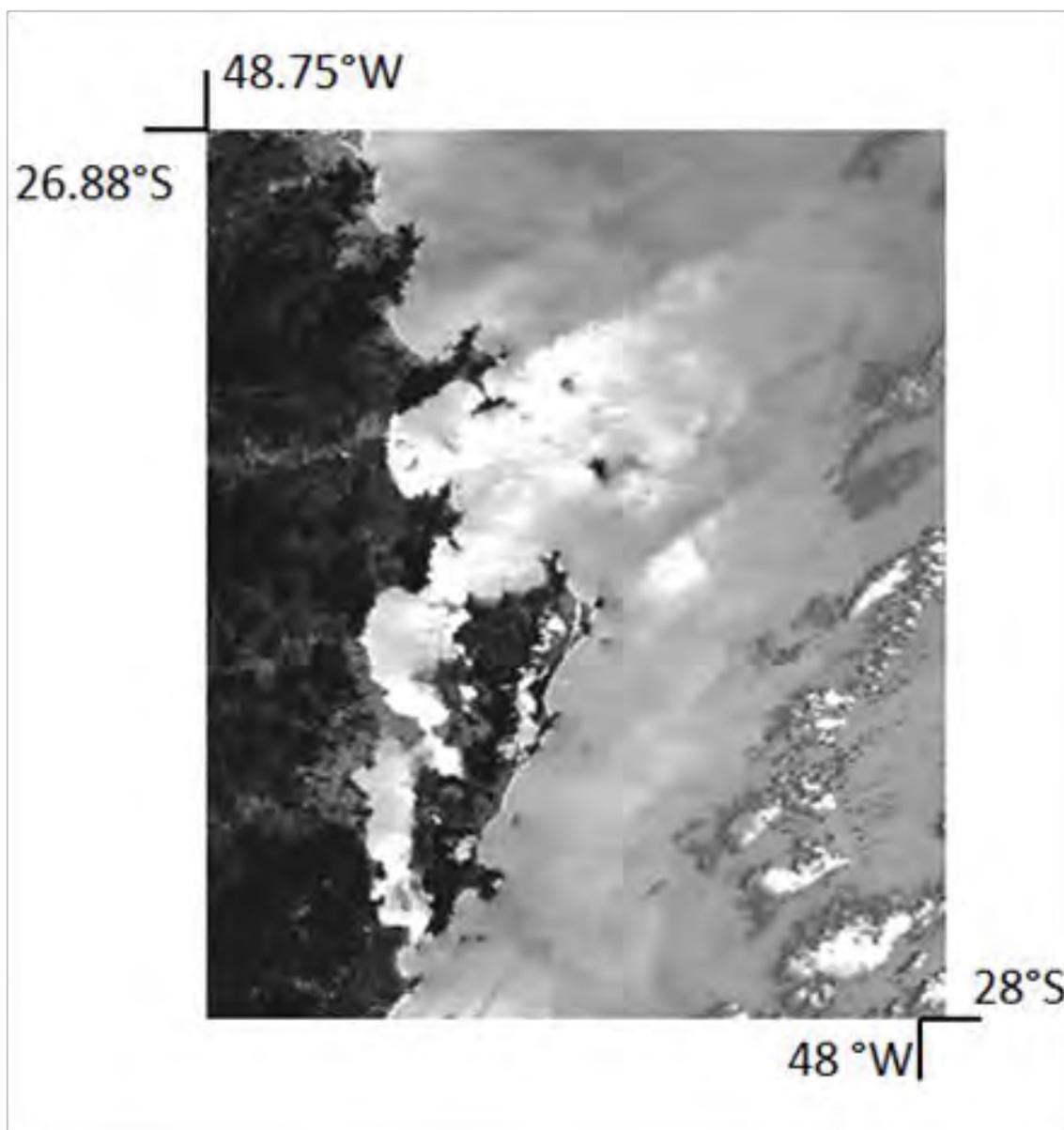


Figura 4.35 – Imagem MODIS *Terra* de 02/01/2010, 13:35 GMT, banda 645 nm, resolução espacial de 250 m. Feições de *sun glint* são moduladas pelo vento sudoeste, assim que este interage com relevo costeiro do litoral de SC.

Áreas onde o relevo costeiro ou estruturas construídas pelo homem bloqueiam o fluxo de vento na superfície do mar podem ser identificadas em imagens SAR, conforme salientado por CLEMENTE-COLLON; YAN, 2000 estas áreas são denominadas sombra de vento.

Estas feições próximas à linha da costa podem ser observadas no dia 2/1/2010, tanto em imagem MODIS *Terra* em condições de *sunlint* às 13:45 GMT (Figura 4.35) quanto na imagem ASAR adquirida às 12:36 GMT (Figura 4.36).

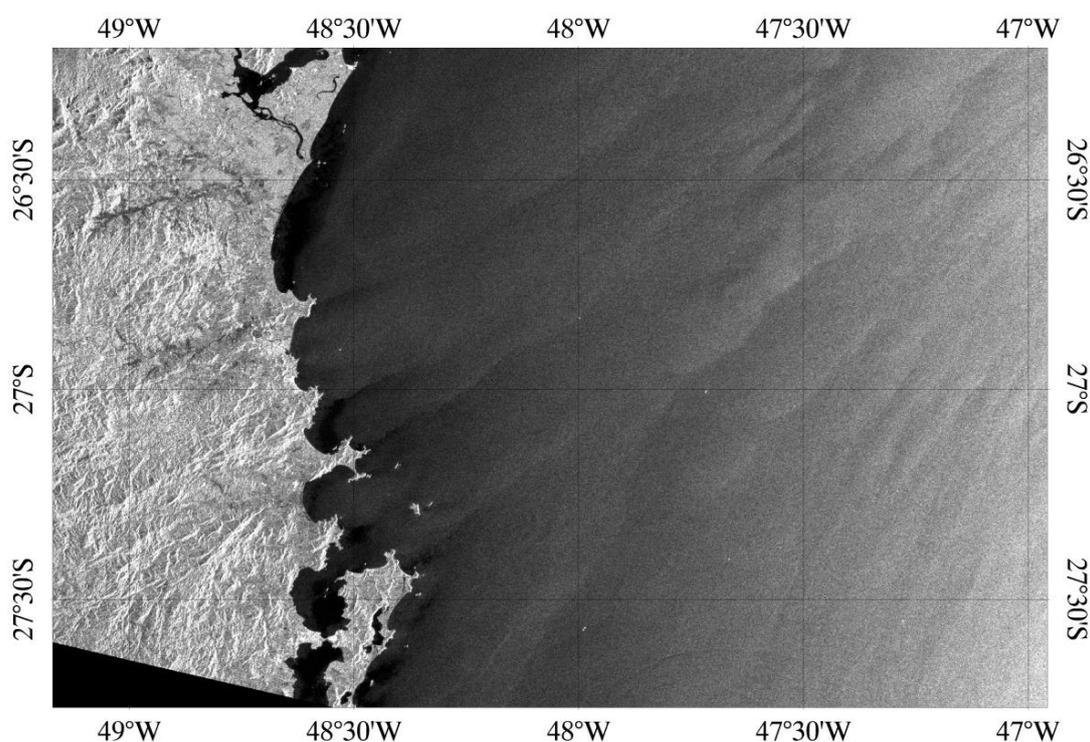


Figura 4.36 – Imagem ASAR ENVISAT de 02/01/2010, 12h36min GMT mostrando parte do litoral de SC. Áreas de baixo sigma-zero próximo à costa e estrias de vento acompanhando o vento sudoeste.

A Figura 4.37 define o vento sudoeste no litoral de SC, dia 2/1/2010 às 12 horas GMT. O vento, tanto na imagem MODIS em condição de *sunlint* quanto na ASAR produz feições denominadas estrias de vento caracterizadas por

linhas paralelas à direção do vento, este padrão é descrito por Hasager et al.(2008).

Próximo à costa, as formações do relevo litorâneo, mostradas na Figura 4.38, bloqueiam o fluxo vento sobre o mar produzindo feições de baixo sigma-zero no ASAR, devido à taxa de dissipação das ondas de *Bragg* ser maior que a sua taxa de formação pelo atrito do vento. Já na imagem de *sunglint*, a influência do relevo no vento é marcada por áreas brilhantes na imagem MODIS, devido as diferentes inclinações nas microfacetas de superfície marinha.

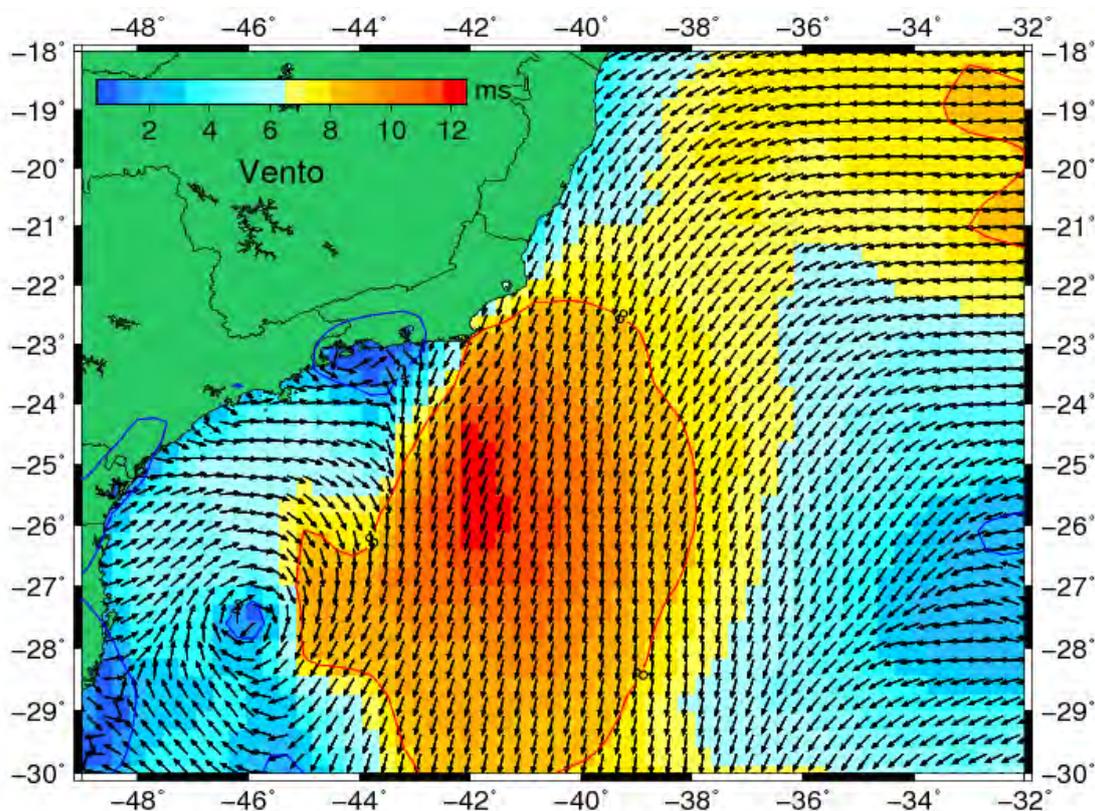


Figura 4.37 - Vento na superfície do mar (10 m) dia 2/01/2010, 12:00 GMT. As linhas de contorno indicam a magnitude do vento em 2 m/s (azul) e 8 m/s (vermelho). Vento sudeste é predominante na região de Florianópolis, SC.

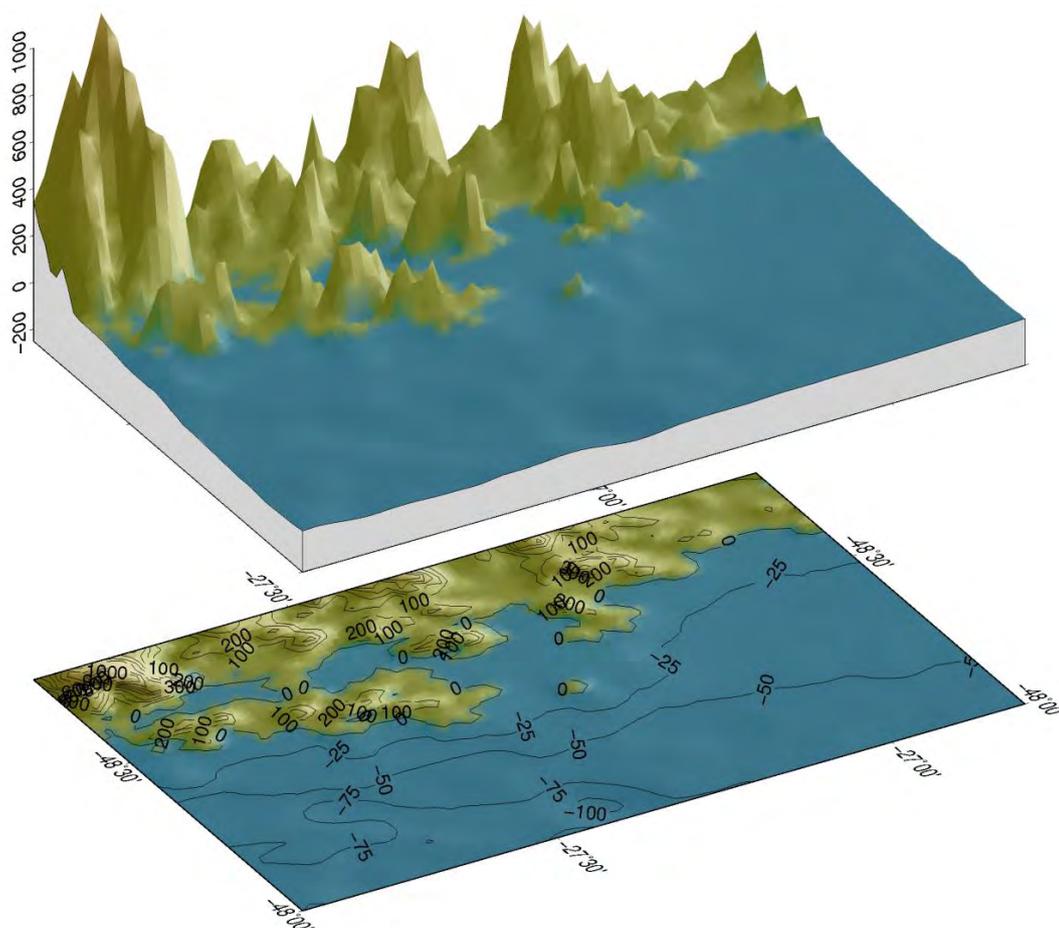


Figura 4.38 - Topografia e batimetria em 3-D (em cima) e plana (em baixo) de parte do litoral de SC. Valores em metros. O relevo costeiro pode ser uma barreira natural ao vento.

4.3.3. Frentes oceânicas, vórtices e meandros

A posição de frentes oceanográficas, vórtices e meandros possui relevância a processos biológicos no oceano, conforme discutido em Oliveira et al. (2010) e Siedlecki et al. (2011). A posição destas feições em caso de vazamentos de petróleo pode também ter grande importância em prever se sua trajetória alcançará áreas costeiras urbanizadas, ecossistemas frágeis e/ou de difícil regeneração (Hu, 2011).

A detecção dessas feições por sensoriamento remoto, requer frequentemente o uso combinado de diferentes produtos de satélites, como a TSM e concentração de clorofila, como feito em Mityagina et al. (2010).

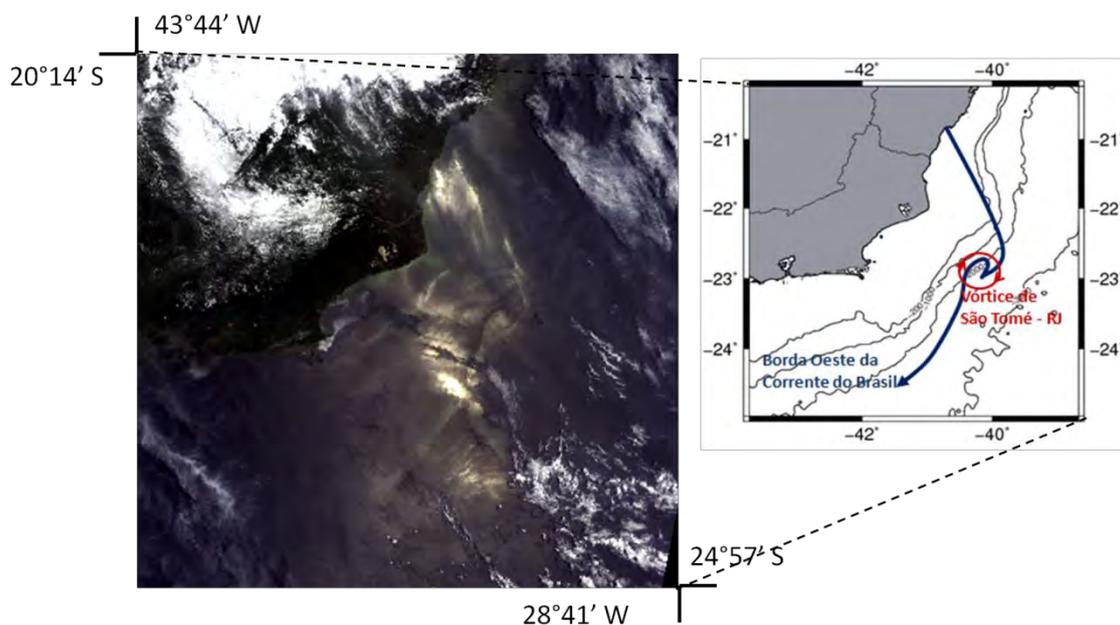


Figura 4.39 - Feições do Vórtice de São Tomé e borda oeste da Corrente do Brasil no sensor MERIS ENVISAT em condição de *sunlint*. Composição colorida MERIS R (0,680 μm), G (0,559 μm), B (0,442 μm), 1/12/2009 na Bacia de Campos, RJ.

Imagens de cor do oceano em condições geométricas específicas de *sunlint*, podem efetivamente captar alterações na rugosidade em resposta a estas feições devido a alterações de aspecto dinâmico, como divergência e convergência na superfície, ou o diferente comportamento da camada limite atmosférica ar-mar em situações de frentes térmicas. Assim como mostrado na Figura 4.39, a borda oeste da CB é identificada no *sunlint*.

O diferente padrão de rugosidade, esquematizado na Figura 4.40, resulta na assinatura dessas feições em imagens SAR e *sunlint*. Assim como discutido por Small et al. (2008) e Gagliardini e Colon (2004), na face relativamente

aquecida da superfície do mar o oceano aquece a atmosfera e insere vapor d'água na camada limite atmosférica ar-mar impondo ar em ascensão e consequente turbulência que resulta em maior rugosidade da superfície. Na face marinha mais resfriada prevalece a estabilidade, pois o oceano relativamente mais frio dificulta ascensão e o fluxo de ar próximo à superfície diminuindo o atrito ar-mar e em consequência ocorre alisamento da superfície.



Figura 4.40 - Esquema ilustrativo da diferente resposta na rugosidade do oceano em função da ocorrência de frentes térmicas (adaptada de ROBINSON; 2004).

A frente térmica esquematizada na Figura 4.40 e responsável pelas feições de *sunlint* na Figura 4.39. A borda oeste da CB pode também ser observada na média mensal de TSM em dezembro de 2009. Na Figura 4.41, assim como descrito por Lorenzetti et al. (2009), a TSM demarca feições de ressurgência, evidenciadas por temperaturas abaixo de 22°C e a borda oeste da CB na isoterma de 24°C próxima a isobata de 200 m.

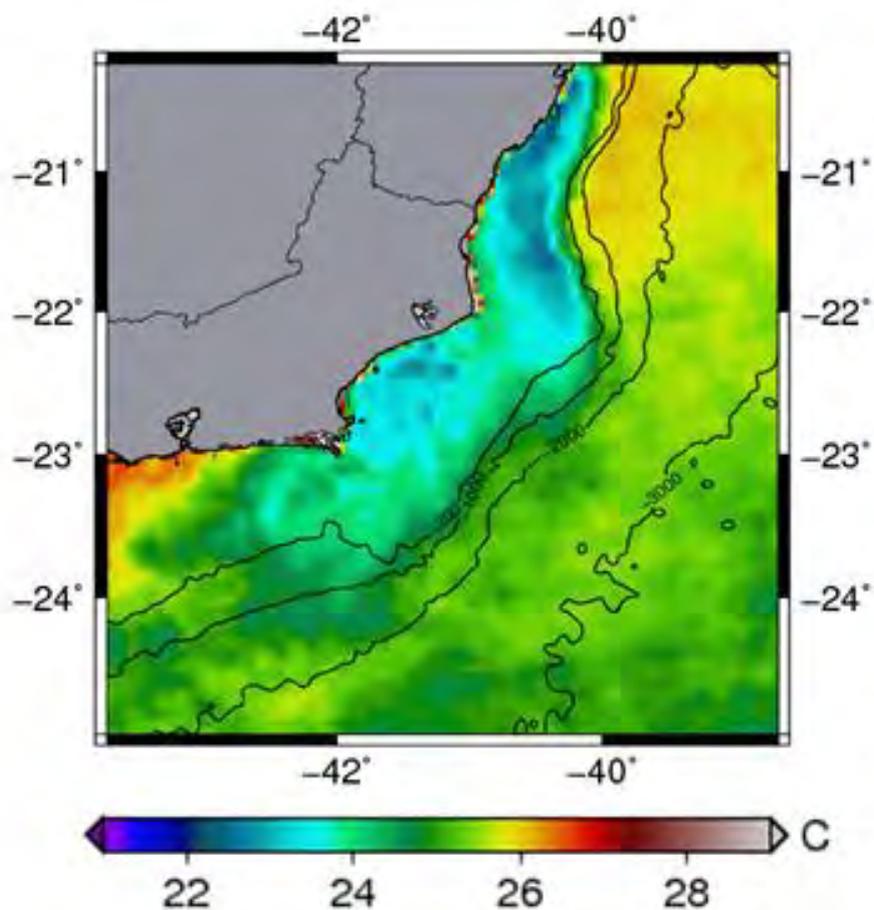


Figura 4.41 – TSM MODIS *Aqua* média mensal de novembro/2009.

4.3.4. Plumas costeiras de rios

Surfactantes (ou tensoativos) são usados em inúmeros produtos como pesticidas, herbicidas, tintas, plásticos, produtos de limpeza, além do uso em ramos importantes da indústria como a têxtil, alimentar e de mineração. Desta forma, são facilmente encontrados em rios próximos à malha urbana (MIURA et al., 2008) e outros corpos d'água estuarinos e costeiros. Testes *in-vitro* elaborados por Mastroti et al. (1998) demonstram que em água marinha a degradação de determinados grupos surfactantes pode levar entre 16 à 19 dias e podem ser menos biodegradáveis em relação a ambientes de água doce. No Brasil, um exemplo desta poluição em áreas costeiras é evidenciado em

Abessa et al. (2005), por altas concentrações de surfactantes nos sedimentos da Baía de Santos, SP.

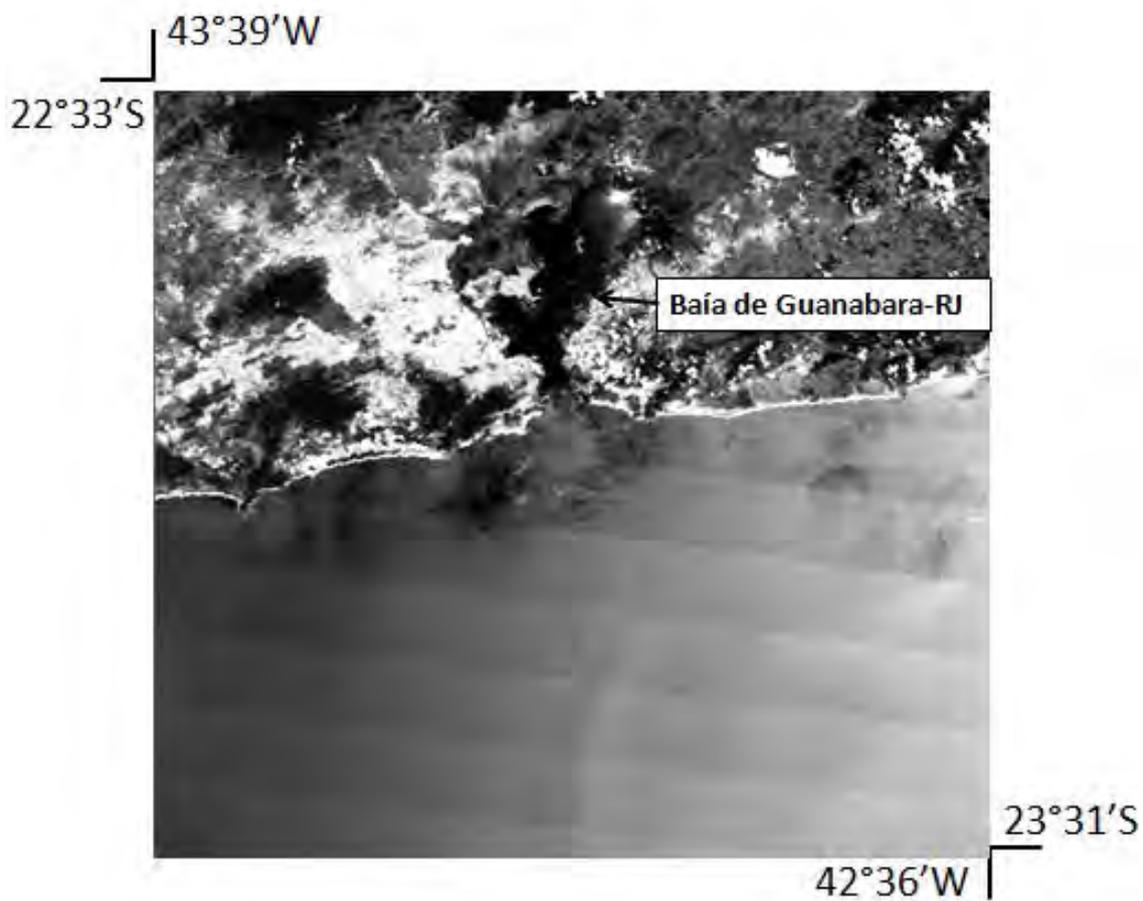


Figura 4.42 - Imagem MODIS *Terra* de 3/11/2009, das 13:05 GMT, banda 645 nm, com resolução de 250 m. As áreas escuras próximas a Baía de Guanabara, RJ, indicam a presença de surfactantes.

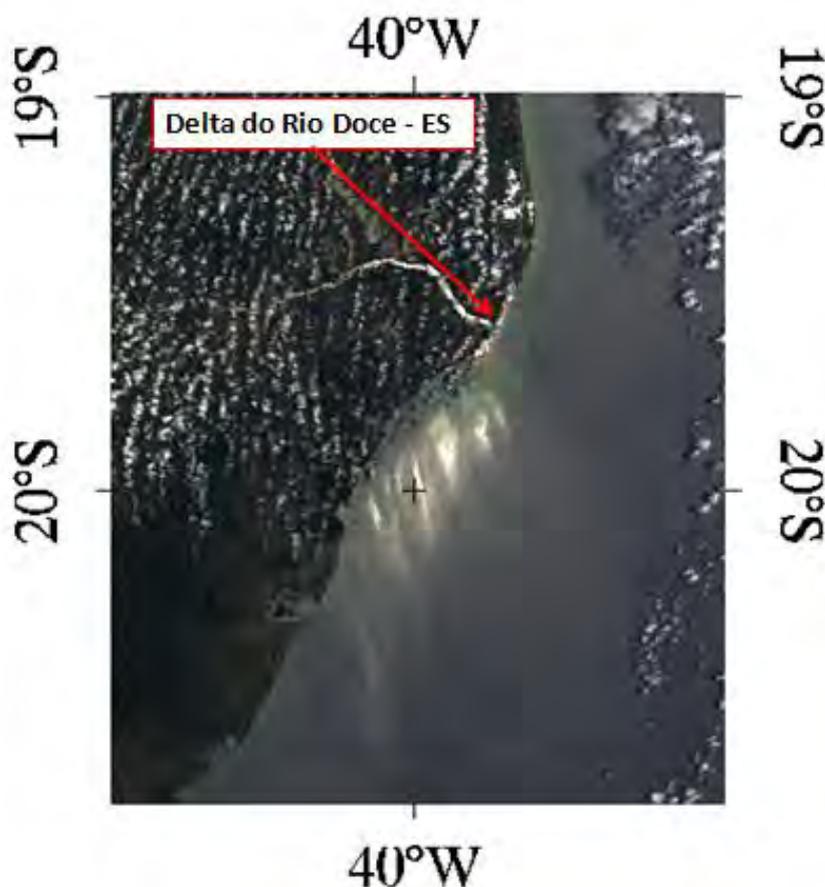


Figura 4.43 - Imagem MODIS *Terra* de 22/01/2010 13:05 GMT, composição colorida (R 645 nm; G 555 nm; B 469 nm), resolução de 500 m, mostrando a região adjacente ao delta do Rio Doce, ES. Ao sul da foz do Rio Doce e próximo à costa, observam-se feições brilhantes causadas pelo *sun glint* em interação com surfactantes.

No trabalho de Lin et al. (2003), assinaturas observadas por uso de escaterômetro foram relacionadas à presença de surfactantes de origem antropogênica originados em áreas municipais ou industriais e despejados por rios no corpo de água. Esses surfactantes de origem continental foram detectados pelo baixo sinal retroespalhado radar (sigma-zero) devido à supressão das ondas capilares. Da mesma forma, imagens em condição de *sun glint* apresentam capacidade para a observação de variações nos campos de rugosidade superficiais marinhas causadas por surfactantes.

Essa qualidade é observada em feições recorrentes formadas por surfactantes e próximas a desembocaduras de rios, estuários e baías nas imagens em condições de *sunlint* conforme mostrado nas Figuras 4.42, 4.43 e 4.44. Assim, o *sunlint* pode representar uma boa ferramenta para o estudo e análise de plumas de rios. Este tipo de monitoramento também é importante para auxiliar a detecção de poluentes por técnicas de baixo custo (ou boa relação custo/benefício) como o sensoriamento remoto.

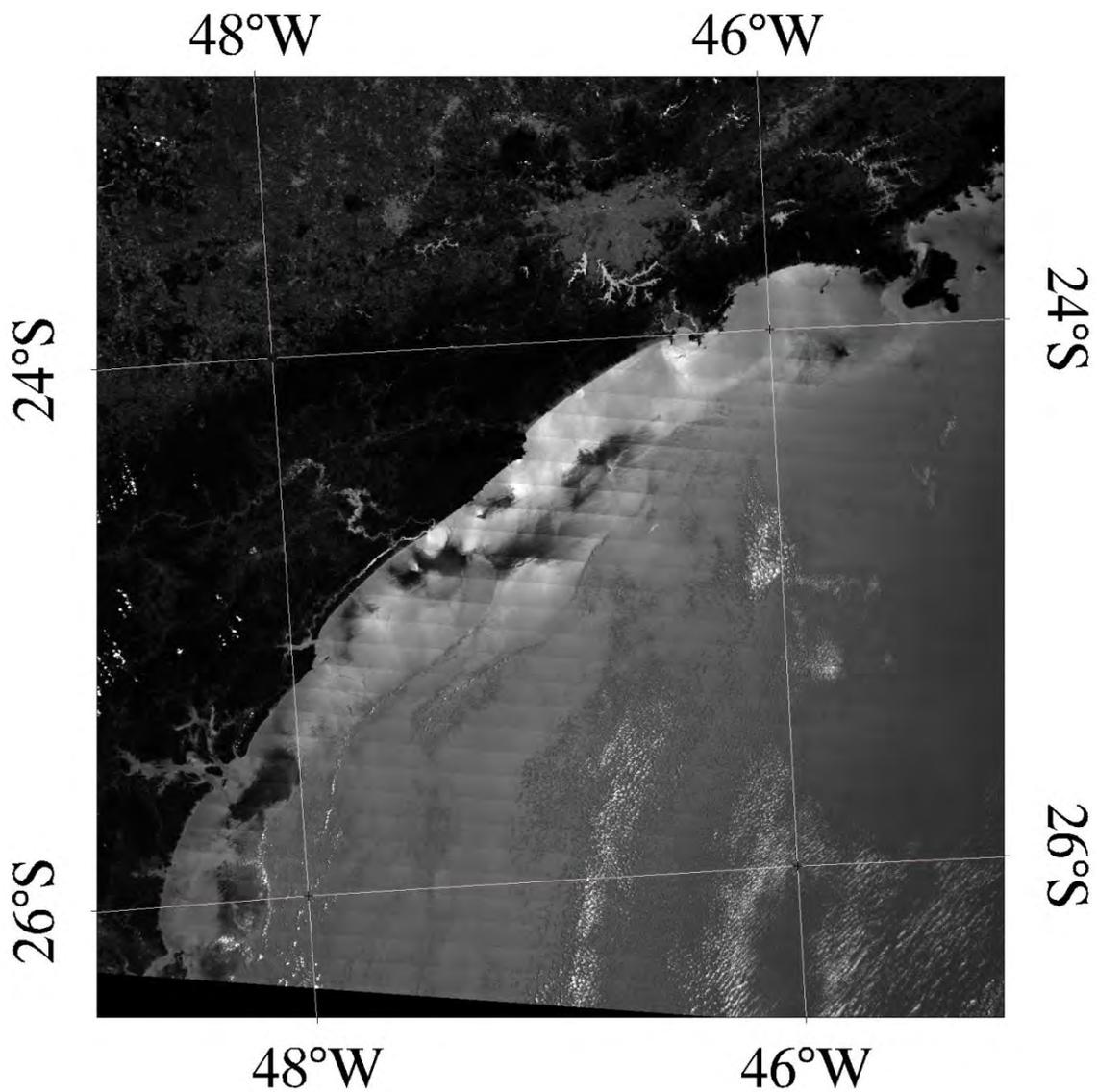


Figura 4.44 - Imagem MODIS-Terra de 02/02/2010, das 13:30 GMT, banda 645 nm, com resolução de 250 m. Feições escuras e brilhantes no sunglint em áreas costeiras, próximas a saídas de estuários, são causadas por surfactantes de origem antropogênica ou por biofilmes formados por Blooms. Todos os estuários desta imagem, na zona costeira entre Florianópolis - SC e Ilha de São Sebastião - SP, apresentam assinatura no sunglint.

5 CONCLUSÃO

Imagens MODIS em condição de *sunlint* entre 2009 e 2010 foram comparadas com aquisições quase simultâneas do ASAR. Dois estudos de caso envolvendo o Bloom de *Trichodesmium* em produção de biofilmes e o vazamento de petróleo em novembro de 2011, complementam o espaço amostral.

Dentro da série temporal entre 2009 e 2011, dentro dos pares quasesimultaneos MODIS e ASAR, não foram detectados significativos vazamentos relacionados à extração de petróleo.

Quanto às demais feições oceanográficas, o *sunlint* mostrou grande potencial na observação das feições de mesoescala na costa sudeste do Brasil, por exemplo, melhorando as estimativas da posição da borda oeste da corrente do Brasil. Na questão envolvendo plumas de rios é significativa a oportunidade em utilizar o *sunlint* para melhor entender o aporte de tensoativos ou consequente produção de biofilmes devido a nutrientes continentais.

A resolução temporal e revisita espacial pode acrescentar dados à detecção de ondas internas, importante processo no aporte de nutrientes a camada eufótica sobre a da Plataforma Continental.

O *sunlint* embora seja frequente apenas em determinadas épocas do ano e em dependência da cobertura de nuvens, se mostrou eficiente e complementar às imagens SAR, permitindo diferenciar filmes biogênicos e minerais de outras feições oceanográficas, mesmo em condições de vento fraco.

A modelagem de contraste em área de *sunlint* para detecção de biofilmes mostrou-se efetiva para o litoral Sudeste do Brasil. No caso dos biofilmes fica comprovada a capacidade do *sunlint* em detectar e detalhar a estrutura em condições de vento fraco ($< 2\text{m/s}$). Esta qualidade do *sunlint* é muito importante visto que filmes biogênicos tendem a se dissipar com vento acima

de 5 m/s , desta forma há um pequeno limiar de vento para o monitoramento operacional destas feições. Em sensores SAR a formação de áreas de escuras pela não formação de ondas de *Bragg* restringe o limiar de velocidade do vento onde podemos observar os biofilmes.

A detecção de Bloom de *Trichodesmium* a partir de dados de sensoriamento remoto da cor do oceano também se mostrou eficaz auxiliando o monitoramento da costa sudeste do Brasil. Estas abordagens metodológicas apresentam um potencial real para auxiliar a diferenciação entre manchas de óleo antropogênico e assemelhados devido ao padrão já conhecido para a bacia de campo de *Blooms* de *Trichodesmium* e consequente formação de filmes biogênicos.

A análise do recente caso de vazamento de petróleo em novembro de 2011 comprova a eficiência do *sunlint* de sensores de cor do oceano na sinergia ao SAR. Unido a informações obtidas de modelos, medidas do infravermelho termal e concentração de clorofila, o *sunlint* adiciona informações importantes sobre a estrutura e auxílio à detecção de vazamentos principalmente em situações de baixo vento impraticáveis pela aquisição SAR.

Desta forma, espera-se obter uma metodologia robusta que permita automatizar a detecção de surfactantes com base no *sunlint*, caracterizado por alta variação espacial. Mais casos confirmados de filmes biogênicos, filmes minerais e feições oceanográficas devem ser analisados similarmente, para uma melhor validação e desenvolvimento do método de contraste modelado proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABESSA, D.; CARR, R.; RACHID, B.; SOUSA, E.; EDUINETTY C.P.M. ; HORTELANI, M.; SARKIS, J. Influence of a Brazilian sewage outfall on the toxicity and contamination of adjacent sediments. **Marine Pollution Bulletin**, v. 50, p. 875-885, 2005.

ADAMO, M.; CAROLIS, G.; PASQUALE, V.; PASQUARIELLO, G. Exploiting sunglint signatures from MERIS and MODIS imagery in combination to SAR data to detect oil slicks. In: ENVISAT SYMPOSIUM, 2007, Montreux, Switzerland. **Proceedings...** Montreux: ESA, 2007.

ADAMO, M.; DE CAROLIS, G.; DE PASQUALE, V.; PASQUARIELLO, G. Oil spill surveillance and tracking with combined use of SAR and Modis imagery: a case Study. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2006, [S.I.]. **Proceedings...** [S.I.]: IEEE, 2006. p. 1327 – 1330.

ALPERS, W.; ESPEDAL, H. A. **Synthetic Aperture Radar marine user's manual: oils and surfactants**. Washington: NOAA. 2004. Disponível em: <<http://www.sarusersmanual.com/>> Acesso em: 11 fev. 2011.

AMANTE, C.; EAKINS, B. **ETOPO1 1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis**, 2009. 19 p. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24.

ANTOINE, D.; D'ORTENZIO, F.; HOOKER, S.; BÉCU, G.; GENTILI, B.; TAILLIEZ, D.; SCOTT, A. Assessment of uncertainty in the ocean reflectance determined by three satellite ocean color sensors (MERIS, SeaWiFS and MODIS-A) at an offshore site in the Mediterranean Sea (BOUSSOLE project), **Journal of Geophysical Research**, v. 113, 2008.

ATLAS, R.; HOFFMAN, R.; ARDIZZONE, J.; LEIDNER, S.; JUSEM, J.; SMITH, D.; GOMBOS, D. A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 92, p. 157-174, 2011.

BARREIRO, M.; CHANG, P.; SARAVANAN, R. Variability of the South Atlantic Convergence Zone Simulated by an Atmospheric General Circulation Model. **Journal of Climate**, v. 15, p. 745-763, 2002.

BARRON, N.; KARA, A.; HURLBURT, H.; ROWLEY, C.; SMEDSTAD, L. Sea surface height predictions from the Global Navy Coastal Ocean Model (NCOM) during 1998-2001. **J. Atmos. Oceanic Technol.**, v. 21, n. 12, p. 1876-1894, 2004.

BARTH, J.; PIERCE, S.; SMITH, R. A separating coastal upwelling jet at Cape Blanco, Oregon and its connection to the California Current System. **Deep-Sea Research**, v. 47, p. 783-810, 2000.

BENTZ, C. M.; BARROS, J. A multi-sensor approach for oil spill and sea surface monitoring, in Southeastern Brazil. In: INTERNATIONAL OIL SPILL CONFERENCE (IOSC 2005), 2005, Miami. **Proceedings...**, Miami: The International Tanker Owners Pollution Federation Ltd., 2005.

BENTZ, C. M. ; LORENZZETTI, J. A. ; KAMPEL, M. . Multi-sensor synergistic analysis of mesoscale oceanic features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, p. 4835-4841, 2004.

BENTZ, C. M.; LORENZZETTI, J. A.; KAMPEL, M.; POLITANO, A. T.; GENOVEZ, P.; LUCCA, E. V. D. Contribuição de dados ASTER, CBERS, R99/SIPAM e OrbiSAR-1 para o monitoramento oceânico - resultados do projeto FITOSAT. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3755-3762. CD-ROM; On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. (INPE-16266-PRE/10846). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.19.25.29>>. Acesso em: 11 maio 2012.

BOWLEY, C.; GREAVES, J. Sun glint Patterns in Satellite Pictures. **Science**, v.167, p. 1757-1758, 1969.

BREKKE, C.; SOLBERG, A. H. S. Oil spill detection by satellite remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 95, N. 1, p. 1-13, 2005.

BRÉON, F.; HENRIOT, N. Space observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, 2006.

CALADO, L.; GANGOPADHYAY, A.; SILVEIRA, I. C. A. Feature-oriented regional modeling and simulations (FORMS) for the western South Atlantic: Southeastern Brazil region. **Ocean Modelling**, v. 25, p. 48-64, 2008.

CALADO, L.; SILVEIRA, I. C. A.; GANGOPADHYAY A.; CASTRO, B. M. Eddy-induced upwelling off Cape São Tomé (22°S Brazil), **Continental Shelf Research**, v. 30, p. 1181—1188, 2010.

CAMPOS, E. J. D.; VELHOTE, D.; SILVEIRA, I. C. A. Shelf break upwelling driven by Brazil Current Cyclonic Meander. **Geophysical Research Letters**, v. 27, v. 6, p. 751-754, 2000.

CARVALHO, M.; GIANESELLA, S.; SALDANHA-CORREA. *Trichodesmium erythraeum* Bloom on the Continental Shelf off Santos, Southeast Brazil. **Brazilian journal of oceanography**, v. 56, n. 4, 2008.

CASCIELLO, D.; LACAVA, T.; PERGOLA, N.; TRAMUTOLI, V. Robust satellite techniques for oil spill detection and monitoring using AVHRR thermal infrared bands. **International Journal of remote sensing**, v. 32, n. 13-14, p. 4107-4129, 2011.

CHAIGNEAU, A.; ELDIN, G.; DEWITTE, B. Eddy activity in the four major upwelling systems from satellite altimetry(1992–2007). **Progress in Oceanography**, v. 83, p.117–123, 2009.

Chan, y.; Koo, v. AN INTRODUCTION TO SYNTHETIC APERTURE RADAR (SAR). **Progress In Electromagnetics Research**, v. 2, p. 27–60, 2008

CHELTON, D.; SCHLAX, M.; FREILICH, M.; MILLIFF, R. Satellite Measurements Reveal Persistent Small-Scale Features in Ocean Winds. **Science**, 2004 v. 303, p. 978-983, 2004.

CHI, C.; LI, F. A Comparative Study of Several Wind Estimation Algorithms for Spaceborne Scatterometers. **IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing**, v. 26, n. 2, mar.1988.

CHUST, G.; SAGARMINAGA, Y. The multi-angle view of MISR detects oil slicks under sun glitter conditions. **Remote Sensing of Environment**, v. 107, p. 232–239, 2007.

CLEMENTE-COLÓN, P.; YAN, X. Low-Backscatter Ocean Features in Synthetic Aperture Radar Imagery; **John Hopkins Apl. Technical Digest**, v. 21, n. 1 2000.

COX, C.; MUNK, W. Measurement of the roughness of sea surface from Photographs of the sun's glitter. **Journal of the optical society of America**, v. 44, n. 11, p. 838-850, 1954.

COX, C.; MUNK, W. Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter. **Bulletin of the Scripps Institution of Oceanography**, v. 6, n. 9, p. 401-488, 1956.

DESNOS, Y.; BUCK, C.; GUIJARRO, J.; SUCHAIL, J.; ATTEMA, R. ASAR – Envisat's Advanced Synthetic Aperture Radar, building on ERS Achievements towards Future Earth Watch Missions. **ESA Bulletin**, v. 102, mai 2000.

DIAS, F. **Uso de dados SAR para o estudo dos padrões espaço/temporais de ondas internas solitárias na costa se do brasil**. 2012. 112 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto nacional de pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos – SP, 2012.

DIGIACOMO, P. M.; WASHBURN, L.; HOLT, B.; JONES, B. Coastal pollution-hazards in southern California observed by SAR imagery: stormwater plumes, wastewater plumes, and natural hydrocarbon seeps. **Marine Pollution Bulletin**, v. 49, p. 1013-1024, 2004.

DOGLIOTTI, A.I.; SCHLOSS, I.R.; ALMANDOZ, G.O.; GAGLIARDINI, D.A. Evaluation of SeaWiFS and MODIS chlorophyll-a products in the Argentinean Patagonian Continental Shelf (38°S-55°S). **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 1, p. 251-273, 2009.

DUPOUY, C.; BENIELLI-GARY, D.; NEVEUX, J.; DANDONNEAU, Y.; WESTBERRY, T. An algorithm for detecting *Trichodesmium* surface blooms in the South Western Tropical Pacific. **Biogeosciences**, v. 8, n. 12, p. 3631-3647, 2011.

ESPEDAL H.; WAHL, T. Satellite SAR oil spill detection using wind history information. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20 n. 1, p. 49-65, 1999.

ESPEDAL, H. Detection of oil spill and natural film in the marine environment by spaceborne SAR. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium**, v.3, p.1478-1480, 1999.

FALKOWSKI, P. Ocean science: the power of the plankton. **Nature**, v. 483, p. 17-20, 2012.

FINGAS, M. Water-in-Oil Emulsion Formation: A Review of Physics and Mathematical Modelling. **Spill Science & Technology Bulletin**, v. 2, n. 1, p. 55-59, 1995.

FUJIOKA, K.; OKUMURA, S. ; SUEYOSHI, S. ; TOKUNAGA, W. ; IMAI, Y. ; NAGAHAMA, N. ; OKUMURA, S. ; MAENO, K. ; KIMURA, R. ; ADACHI, K. ; TAKAO, K. ; SAITO, C. ; TAKIZAWA, T. R/V Mirai, her missions, facilities and special project "BEAGLE 2003". In: OCEANS 2003, 22-26 Sept., Yokohama, Japan. Proceedings... Yokohama, Japan: IEEE, 2003. v. 1, p. 552 – 556.

GAETA, S. A.; LORENZZETTI, J. A. ; MIRANDA, L. B. ; RIBEIRO, S. M. S. ; POMPEU, M. ; ARAUJO, C. . The Vitória eddy and its relation to the phytoplankton biomass and primary productivity during the austral fall of 1995. **Archive of Fishery And Marine Research**, Alemanha, v. 47, n. 2/3, p. 253-270, 1999.

GAGLIARDINI, D.; CLEMENTE-COLÓN, P. Ocean feature detection using microwave backscatter and sun glint observations. **Gayana (Concepc.)**, **Concepción**, v. 68, n. 2, 2004 .

GIRARD-ARDHUIN, F.; MERCIER, G.; GARELLO, R. Oil slick detection by SAR imagery: potential and limitation. **OCEANS**, v. 1, p. 164-169, 2003.

HASAGER, C.; PENA, A.; CHRISTIANSEN, B.; ASTRUP, P.; NIELSEN, M.; MONALDO, F.; THOMPSON, D.; NIELSEN, P. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 1, n. 1, p. 67-79, 2008.

HASHIZUME, H.; LIU, W. Systematic error of microwave scatterometer wind related to the basinscale plankton bloom. **Geophysical Research Letters**, v. 31, 2004.

HOLT, B. **Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual: SAR Imaging of the Ocean Surface**. Washington: NOAA. 2004. Disponível em: <<http://www.sarusersmanual.com/>> Acesso em: 11 fev. 2011.

HU, C.; LI, X.; PICHEL, W. G.; MULLER-KARGER, F. E. Detection of natural oil slicks in the Gulf of Mexico using MODIS imagery. **Geophysical Research Letters**, v. 36, 2009.

HU, C.; WEISBERG, R. H.; LIU, Y.; ZHENG, L.; DALY, K.; ENGLISH, D.; ZHAO, J.; VARGO, G. Did the northeastern Gulf of Mexico become greener after the Deepwater Horizon oil spill? **Geophysical Research Letters**, v. 38, 2011.

ISSA, S. Monitoring Oil Spills Offshore the United Arab Emirates Using Multi Satellite Data. **International Journal of Geographical Information System Applications and Remote Sensing**, v. 1, n. 1, p.1-20. 2010.

IVANOV, A.; HE, M.; FANG, M. Oil spill detection with the RADARSAT SAR in the waters of the Yellow and East China Sea: A case study. **23rd Asian Conference on Remote Sensing**, 2002.

JACKSON, C; ALPERS, W. The role of the critical angle in brightness reversals on sunglint images of the sea surface. **Journal of Geophysical Research**, v.115, p. 1-15, 2010.

JERNELÖV, A. How to defend against future oil spills. **Nature**, v. 466, p. 182-183, 2010.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; LETMA, A.; REYNOLDS, R.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; JENNE, R.; JOSEPH, D. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 3, 1996.

KAMPEL, M. **Estimativa da produção primária e biomassa fitoplanctônica através de sensoriamento remoto da cor do oceano e dados *in situ* na Costa Sudeste Brasileira**. Tese (Doutorado em Oceanografia Biológica) Instituto Oceanográfico - Universidade de São Paulo (IO- USP), São Paulo, 2003.

KAMPEL, M.; LORENZZETTI, J.; BENTZ, C.; NUNES, R.; PARANHOS, R.; RUDORFF, F.; POLITANO, A. Simultaneous Measurements of Chlorophyll Concentration by Lidar, Fluorometry, above-Water Radiometry, and Ocean Color MODIS Images in the Southwestern Atlantic. **Sensors**, v. 9, p. 528-541, 2009.

KAY, S.; HEDLEY, J. D.; LAVENDER, S. Sunt glint corrections of high and low spatial resolution images of aquatic scenes: a review of methods for visible and near-infrared wavelengths. **Remote Sensing**, v.1, p. 687-729, 2009.

KILPATRICK, K.; PODESTÁ, G.; EVANS, R. Overview of the NOAA/NASA advanced very high resolution radiometer Pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated matchup database. **Journal Geophysical Research**, v. 106, p. 9179-9197, 2001.

KLEMAS, V. Tracking oil slicks and predicting their trajectories using remote sensors and models: case studies of the Sea Princess and Deepwater Horizon oil spills. **Journal of Coastal Research**, v. 26, n. 5, p. 789-797, 2010.

KUDELA, R. M. Does horizontal mixing explain phytoplankton dynamics? **Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 107 ,n. 43, p. 18235-18236, 2010.

LAMMOGLIA, T.; SOUZA FILHO, C. Spectroscopic characterization of oils yielded from Brazilian offshore basins: Potential applications of remote sensing, **Remote Sensing of Environment**, v.115, n. 10, p. 2525-2535, 2011.

LAVROVA, O.; KOSTIANOY, A. Catastrophic oil spill in the Gulf of Mexico in April–May 2010. **Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics**, v. 47, n. 9, p. 1114-1118, 2012.

LEHNER, S.; HOJA, D.; SCHULZ-STELLENFLETH, J. Marine parameters from synergy of optical and satellite data. **Advanced Space Research**, v. 29, n.1, p. 23-32, 2002.

LIN, I.; ALPERS, W.; LIU, W. First evidence for the detection of natural surface films by the QuikSCAT scatterometer. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 13, 2003.

LONG, D.; MENDEL, J. Identifiability in Wind Estimation From Scatterometer Measurements. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 2, mar 1991.

LONGHURST, A. Seasonal cycles of pelagic production and consumption. **Progress in Oceanography**. v. 36, p. 77-167, 1995.

LONGHURST, A. R.; PAULY, D. (1987). *Ecologia dos Oceanos Tropicais*. Trad. Sob a direção de Suzana Anita Saccardo. São Paulo: Edusp, 2007.

LORENZZETTI, J. A.; KAMPEL, M.; BENTZ, C. M. A Sun glitter analysis of CBERS (WFI and CCD) and ASTER images of an oil seepage event at Campos Basin, Brazil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 6549-6555. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. (INPE-15921-PRE/10531). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.19.31.50>>. Acesso em: 06 jul. 2012.

LORENZZETTI, J.; KAMPEL, M.; BENTZ, C.; TORRES JR, A. Meso scale Brazil Current frontal eddy: Observations by ASAR and Radarsat-1 complemented by visible and infrared sensors, in situ data, and numerical modeling. **Proceedings of SEASAR 2006**, 23-26 Jan. 2006, Frascati, Italia, 2006.

LORENZZETTI, J.; STECH, J.; MELLO FILHO, W.; ASSIREU, A. Satellite observation of Brazil Current inshore thermal front in the SW South Atlantic: Space/time variability and sea surface temperatures. **Continental Shelf Research**, v. 29, p.2061–2068, 2009.

LOTNIKER, A; MUPPARTHY, R.; KUMAR, S.; NAYAK; S. Evaluation of Hi-Resolution MODIS-Aqua data for oil spill monitoring. **Remote Sensing of Inland, Coastal, and Oceanic Waters**, v. 7150, 2008.

MANO, M.; PAIVA, A.; TORRES, A.; COUTINHO, A. Energy Flux to a Cyclonic Eddy of Cabo Frio, Brazil. **Journal of Physical Oceanography**, v. 39, n. 11, 2009.

MASTROTI, R.; SOUZA, E.; ABESSA, D.; SASS, V. Avaliação preliminar da biodegradabilidade de tensoativos aniônicos em água do mar. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 46, n. 2, p. 187-193, 1998.

MEINEN, C. S.; LUTHER, D. S.; BARINGER, M. O. Structure, transport and potential vorticity of the Gulf Stream at 68°W: Revisiting older data sets with new techniques. **Deep-Sea Research**, v. 56, n. 1, p. 41-60, 2009.

MITNIK, L.M.; LOBANOV, V.B. Investigation of Oyashio-Kuroshio frontal zone using alos PALSAR images and ancillary information. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2011, Vancouver. **Proceedings...** Vancouver: IEEE International, 2011. p. 1589-1592.

MITYAGINA, M.; LAVROVA, O.; KARIMOVA, S. Multi-sensor survey of seasonal variability in coastal eddy and internal wave signatures in the north-eastern Black Sea. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 17-18, 2010.

MIURA, K.; NISHIYAMA, N.; YAMAMOTO, A. Aquatic Environmental Monitoring of Detergent Surfactants, **Journal of Oleo Science**, v. 57, n. 3, p. 161-170, 2008.

MOUCHE, A. A.; HAUSER, D.; DALOZE, J. F.; GUÉRIN, C. Dual-Polarization Measurements at C-Band Over the Ocean: Results From Airborne Radar Observations and Comparison With ENVISAT ASAR Data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 4, p. 753-769, 2005.

MYASOEDOV, A.; KUDRYAVTSEV, V.; CHAPRON, B.; JOHANNESSEN, J. Sun glitter imagery of the ocean surface phenomena. **Proceedings of the 3rd International Workshop SEASAR**, 2010.

NAKANOA, H.; TSUJINO, H.; FURUEB, R. The Kuroshio Current System as a jet and twin "relative" recirculation gyres embedded in the Sverdrup circulation. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v.45, n. 3-4, p. 135-164, 2008.

OLIVEIRA, F. S. C.; GHERARDI, D. F. M.; STECH, J. L. The relationship between multi-sensor satellite data and Bayesian estimates for skipjack tuna catches in the South Brazil Bight. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, p. 4049-4067, 2010.

OLIVEIRA, L.; PIOLA, A.; MATA M.; SOARES, I. Brazil Current surface circulation and energetics observed from drifting buoys. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, 2009.

OTEMBRA, Z. The impact on the reflectance in VIS of a type of crude oil film floating on the water surface. **Optics Express**, v. 7, n. 3, 2000.

OTEMBRA, Z.; PISKOZUB, J. Modelling of the optical contrast of an oil film on a sea surface. **Optics Express**, v. 9, n. 8, 2001.

OTREMBA, Z. Oil-in-water emulsion as a modifier of water reflectance. **Optica Applicata**, v. 39, n. 1, 2009.

PALMA, E.; MATANO, R. Disentangling the upwelling mechanisms of the South Brazil Bight. **Continental Shelf Research**, v. 29, p. 1525–1534, 2009.

PEREIRA, A.; CASTRO, B.; CALADO, L.; DA SILVEIRA, I. Numerical simulation of M2 internal tides in the South Brazil Bight and their interaction with the Brazil Current. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, 2007.

PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Progress in Oceanography*, v. 26, p. 1-73, 1991.

Polovina, J.; Howell, E.; Kobayashi, D.; Seki, M. The transition zone chlorophyll front, a dynamic global feature defining migration and forage habitat for marine resources. **Progress In Oceanography**, v. 49, n. 1-4, Pages 469-483, 2001.

RAST, M; BEZY, J. L.; BRUZZI, S. The ESA Medium Resolution Imaging Spectrometer MERIS a review of the instrument and its mission. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n. 9, p. 1681-1702, 1999.

ROBINSON, I. (2004). *Measure the Oceans from Space: the principles and methods of satellite oceanography*. Chichester, UK: Praxis Publishing.

RODRIGUES, R. R.; LORENZZETTI, J. A. A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the Southeast Brazilian coastal upwelling. **Continental Shelf Research**, v. 21, n. 4, p. 371-394, 2001.

RODRIGUES, R.; KNOPPERS, B.;SOUZA, W.; SANTOS. E. Suspended Matter and Nutrient Gradients of a Small-Scale River Plume in Sepetiba Bay, SE-Brazil. **Brazilian Archives of Biology And Technology**. V. 52, n. 2, p. 503-512, 2009.

RUDORFF, N.; KAMPEL, M. Orbital remote sensing of phytoplankton functional types: a new review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 6, p 1-24, 2012.

SANDFORD, T.; KELLY, K.; FARMER, D. Sensing the Ocean. **Physics Today**, p. 24-28, v.64, n. 2, 2011.

SARANGI, R. K.; CHAUHAN, P. ; NAYAK, S. R. Detection and monitoring of *Trichodesmium* blooms in the coastal waters off Saurashtra coast, India using IRS-P4 OCM data. **Current science**, v. 86, n. 12, p. 1636-1641, 2004.

SERVAIN, J.; BUSALACCHI, A.; MCPHADEN, M.; MOURA, A. ; REVERDIN, G.; VIANNA, M. ; ZEBIAK, S. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 10, 1998.

SIEDLECKI, A.; ARCHER, D.; MAHADEVAN, A. Nutrient exchange and ventilation of benthic gases across the continental shelf break. **Journal Of Geophysical Research**, 2011.

SILVEIRA, I. C. A.; CALADO, L.; CASTRO, B. M.; CIRANO, M.; LIMA, J. A. M.; MASCARENHAS, A. S. On the baroclinic structure of the Brazil current-intermediate western boundary current system. **Geophysical Research Letters**. v. 31, n.14, p. 1-5, 2004.

SILVEIRA, I.; LIMA, J.; SCHMIDTA, A.; CECCOPIERI, W.; SARTORI, A.; FRANSCISCO, R. Is the meander growth in the Brazil Current system off Southeast Brazil due to baroclinic instability? **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 45, p. 187–207, 2008.

SMALL, J.; DESZOEKEA, P.; XIE, S.; O'NEILL, L.; SEOE, H.; SONG, Q.; 2008. Air-sea interaction over ocean fronts and eddies. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 45, p. 274-319, 2008.

SOLBERG, A. G.; BREKKE, C.; SOLBERG, R. Algorithms for oil spill detection in Radarsat and ENVISAT SAR images. In: Geoscience and remote sensing symposium. **Proceedings...** Anchorage, Alaska: IEEE, 2004.

STILWELL, D. Directional Energy Spectra of the Sea from Photographs. **Journal of Geophysical Research**, v. 74, n. 8, p. 1974-1986, 1969.

STRAMSKI, D.; BOSS, E.; BOGUCKI, D.; VOSS, K. The role of seawater constituents in light backscattering in the ocean. **Progress in Oceanography**, v. 61, p. 27-56, 2004.

STRONG, A.; DERYCKE, R. Ocean current Monitoring Employing a New Satellite Sensing Technique **Science**, v. 182, p. 482-484, 1973.

SUBRAMANIAM, A.; BROWN, C. H.; HOOD, R. R.; CARPENTER, E. J.; CAPONE, D. G. Detecting *Trichodesmium* blooms in SeaWiFS imagery. **Deep-Sea Research**, v.2, n. 49,p. 107-121, 2002.

VIANA, A.; FAUGERES, J.; KOWSMANN, R.; LIMA, L.; CADDAH, F.; RIZZO, J. Hydrology, morphology and sedimentology of the Campos continental

margin, offshore Brazil, **Sedimentary Geology**, v. 115, n. 1-4, p. 133-157, 1998.

WILLIAMS. R. J. Oceanography: Centennial warming of ocean jets. **Nature Climate Change**, v.2, n. 4, p. 149-150, 2012.