



OBTENÇÃO DE CAMPOS DE VENTO NA SUPERFÍCIE DO MAR NO GOLFO DO
MÉXICO A PARTIR DE IMAGENS DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA
(SAR)

Douglas Fraga Rodrigues

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Luiz Landau

Audálio Rebelo Torres Junior

Rio de Janeiro

Julho de 2011

OBTENÇÃO DE CAMPOS DE VENTO NA SUPERFÍCIE DO MAR NO GOLFO DO
MÉXICO A PARTIR DE IMAGENS DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA
(SAR)

Douglas Fraga Rodrigues

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Luiz Landau, D.Sc.

Prof. Audálio Rebelo Torres Junior, D.Sc.

Dr. Fernando Pellon de Miranda, Ph.D.

Prof. Edilson Marton, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2011

Rodrigues, Douglas Fraga

Obtenção de campos de vento na superfície do mar no Golfo do México a partir de imagens de Radar de Abertura Sintética (SAR)/ Douglas Fraga Rodrigues. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XIII, 78 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Luiz Landau

Audálio Rebelo Torres Junior

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 71 - 75.

1. Campos de vento marinho. 2. Radar de Abertura Sintética. 3. Golfo do México. I. Landau, Luiz *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

“Verás que um filho teu não foge à luta”

Joaquim Estrada

AGRADECIMENTOS

Aos professores Nelson Violante, Audálio, Landau e Pellon, que foram os primeiros colaboradores dessa empreitada.

Ao João e Maria Emilia Vassallo, por acreditarem nesse projeto e incentivá-lo.

Ao meu gerente e amigo Helton, por estar sempre a meu lado e a toda a galera da Threetek.

Ao Carlos Beisl, pela sugestão do tema do trabalho e ao LabSAR pelo fornecimento dos dados.

Ao Manlio e Enrico, pelo suporte.

Ao prof. Lorenzetti, que inventou tempo para me receber no INPE e esclareceu muitas questões fundamentais.

Ao Prof. Edilson Marton.

A meus amigos, que sempre estiveram a meu lado, trocando alguns finais de semanas de cerveja pelos estudos, aliviando a pressão nos momentos difíceis, me divertindo. Em especial ao Victor, meu mestre de Matlab, e à Soyla. Não poderia me esquecer da Aline!

A meus pais, Nilton e Graça, e meus familiares, alicerces que me mantêm firme e forte na luta.

A todos que participaram de alguma forma dessa jornada.

E, principalmente, a Deus!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

OBTENÇÃO DE CAMPOS DE VENTO NA SUPERFÍCIE DO MAR NO GOLFO DO
MÉXICO A PARTIR DE IMAGENS DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA
(SAR)

Douglas Fraga Rodrigues

Julho/2011

Orientadores: Luiz Landau

Audálio Rebelo Torres Junior

Programa: Engenharia Civil

Neste trabalho, foi aplicada uma metodologia para estimativa de campos de vento, com resolução espacial de 1600 x 1600 metros, sobre o mar, a partir de dados de Radar de Abertura Sintética. Foram utilizados dados do satélite RADARSAT-2, modos *Wide* e *ScanSAR Narrow*, adquiridos sobre a região do Golfo do México e o modelo empírico CMOD-IFR2 para a modelagem dos ventos. Para inicializar o modelo CMOD-IFR2, foram utilizados dados de direção do vento obtidos com o escaterômetros *QuikSCAT*.

Os valores estimados foram comparados às medições *in situ* observadas no mesmo instante das aquisições dos dados SAR, obtidas por anemômetros instalados em plataformas exploratórias da empresa estatal Petróleos Mexicanos (PEMEX) e no recife Cayo Arcas. Os campos de vento modelados foram sub-amostrados para a mesma resolução espacial do *QuikSCAT* e o cálculo do coeficiente de correlação e do erro médio quadrático entre os dois dados foi aplicado.

Os resultados obtidos apresentaram concordância com os resultados encontrados na literatura, mostrando que o método pode ser aperfeiçoado e operacionalizado.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SEA SURFACE WIND EXTRACTION USING SYNTHETIC APERTURE RADAR
(SAR) IMAGES OVER GULF OF MEXICO

Douglas Fraga Rodrigues

July/2011

Advisors: Luiz Landau

Audálio Rebelo Torres Junior

Department: Civil Engineering

A marine wind field extraction methodology that can produce results with 1600 x 1600 meter of spatial resolution using Synthetic Aperture Radar (SAR) data was applied in this study. A set of RADARSAT-2 data on Wide and ScanSAR Narrow Beam modes were acquired over the Gulf of Mexico area and the empiric CMOD-IFR2 model was applied to modeling the wind. The wind direction information used to initialize the CMOD-IFR2 model was obtained from the QuikSCAT scatterometer.

The estimated values were compared with *in situ* measurements from anemometers installed on PEMEX Exploration and Production oil rigs and in the Cayo Arcas reef meteorological mast. Modeled wind fields were sub-sampled to the same QuikSCAT spatial resolution and the correlation coefficient and root mean square error were calculated.

The results were in agreement with previous results presented in the literature, demonstrating that the method can be improved and become operational.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa da Pesquisa	3
1.2. Objetivo	4
1.3. Estrutura do Trabalho	4
2. ÁREA DE ESTUDO	5
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
3.1. Conceitos de Radar	9
3.2. Obtenção de Campos de Vento por SAR	14
3.3. Modelos C-MOD	22
3.4. Sensores Utilizados	27
3.4.1. Satélites RADARSAT	27
3.4.2. Escaterômetro <i>QUIKSCAT</i>	29
3.4.3. Anemômetros	30
4.1. Materiais	32
4.1.1. Dados RADARSAT-2	32
4.1.2. Dados <i>QUIKSCAT</i>	32
4.1.3. Medições <i>in situ</i>	33
4.2. Métodos	34
4.2.1. Implantação do Algoritmo CMOD-IFR2	34
4.2.2. Seleção dos Dados RADARSAT-2	35
4.2.3. Processamento dos Dados RADARSAT-2	35
4.2.5. Aplicação dos Algoritmos	38
5.1. Consistência do Modelo CMOD-IFR2	40
5.2. Dados RADARSAT-2 Utilizados	42
5.3. Dados Auxiliares Utilizados	50
5.4. Valores Calculados	54
5.4.1. Campo de Vento Calculado para 30/06/2008	57
5.4.2. Campo de Vento Calculado para 31/07/2008	58
5.4.3. Campo de Vento Calculado para 14/08/2008	60
5.4.4. Campo de Vento Calculado para 31/08/2008	61
5.4.7. Campo de Vento Calculado para 08/05/2009	66

5.5. Resultados Encontrados na Literatura	67
6. CONCLUSÕES.....	69
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ANEXO.....	76

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Mapa da área de estudo sobre o Golfo do México. O polígono verde representa a região onde foram estimados campos de vento e os pontos pretos representam as posições das estações: 1) IXTOC-A, 2) ECO-1, 3) Rebombeco e 4) Cayo Arcas..... 5
- Figura 2 - Ocorrência de Ciclones Tropicais Atlânticos reportados pelo Centro Nacional de Furacões para ano de 2008. Fonte: *National Hurricane Center*, 2008..... 7
- Figura 3 - Conceito de resolução espacial para o radar de abertura real. A) Alcance. B) Azimute. Fonte: SILVA, 2010. 10
- Figura 4 - O conceito de resolução espacial para o radar de abertura sintética. Fonte: SILVA, 2010. 10
- Figura 5 - Espectro eletromagnético, incluindo as bandas de frequência de microondas e a porcentagem de sinal que é transmitido através da atmosfera para cada comprimento de onda. Fonte: Modificado de BERENS, 2006..... 11
- Figura 6 - Imagens SAR adquiridas com diferentes comprimentos de onda sobre a mesma região. a) Banda X com comprimento de onda variando entre 2,5cm a 3,7cm. b) Banda C com comprimento de onda variando entre 3,7cm e 7,5cm. c) Banda L com comprimento de onda variando entre 15,0cm e 30,0cm. Fonte: JENSEN, 2009. 12
- Figura 7 - Relação entre ângulo de incidência, ângulo de depressão e declividade do terreno. Fonte: SABINS, 1999. 12
- Figura 8 - A. Esquema da orientação do sinal vertical e horizontal em relação à antena. B1. Composição colorida formada a partir de imagens adquiridas com sinal HV no canal vermelho, HH no canal verde e VV no canal azul. B2. Imagem adquirida com sinal HV. B3. Imagem adquirida com sinal HH. B4. Imagem adquirida com sinal VV. Fonte: CCRS, 2010..... 13
- Figura 9 - Exemplo de ondas capilares denominadas ondas Bragg. As ondas de maiores amplitudes não influenciam a interação com o sinal de radar. Fonte: Modificado de WACKERMAN & COLÓN, 2001..... 14
- Figura 10 - Mecanismo de ressonância Bragg, onde λ_{el} é o comprimento de onda do sinal e λ_w é o comprimento de onda das ondas capilares. Fonte: ESA, 2010..... 15
- Figura 11 - Mecanismos de reflexão e espalhamento do sinal em função da rugosidade do terreno. a) Vento fraco. b) Vento moderado. c) Vento forte. d) vento fraco e presença de estruturas na água. Fonte: Modificado de HENDERSON & LEWIS, 1998. 16
- Figura 12 - Variação do ângulo de incidência sobre a superfície da água em função do aumento da distância em alcance..... 17
- Figura 13 - Curvas representando diferentes velocidades do vento, relacionando σ_0 com o ângulo de incidência (θ). No intervalo (a), não é possível relacionar adequadamente as

curvas de velocidade ao σ_0 , pois o sinal de retorno é muito alto, independentemente do vento. O intervalo (b) representa a variação de ângulos recomendável para a estimativa do vento, pois as curvas de velocidade são bem características. No intervalo (c), o σ_0 é fraco em qualquer condição de vento. Fonte: Modificado de ROBINSON, 2004..... 17

Figura 14 - Relação entre o efeito de ruído *speckle* e o tamanho da célula de resolução espacial. Cada diamante representa a velocidade média de cada célula. A curva sólida representa a velocidade média para toda a imagem e a linha pontilhada representa o intervalo de confiança de 90%. Fonte: Modificado de HORSTMANN *et al.*, 2000. 18

Figura 15 - Representação em vermelho das direções de visada do vento que apresentaram maiores erros nos resultados de intensidade calculados pelos modelos C-MOD4. Fonte: HORSTMANN *et al.*, 2000. 19

Figura 16 – Exemplo de ausência de informações de vento provenientes do escaterômetro *QuikSCAT* próximo a regiões costeiras. A faixa marítima desprovida de dados ultrapassa dezenas de quilômetros em alguns locais, dependendo da configuração da linha de costa. Fonte: *Remote Sensing Systems*, 2000. 20

Figura 17 - Feições de fluxo secundário associadas aos rolos da camada limite atmosférica. Fonte: Modificado de ALPERS *et al.* 1997. 21

Figura 18 - Exemplo de sombras de vento provocadas pela costa destacados pelos polígonos vermelhos. Tais feições são indícios da direção do vento e permitem resolver a ambiguidade de 180°. A direção do vento é representada pelos vetores pretos. Fonte: Modificado de KOCH, 2004. 22

Figura 19 - Variação da velocidade do vento em função da direção, utilizando os modelos C-MOD4 e CMOD-IFR2, com valores de σ_0 de -15dB e -20dB, bem como θ de 30 e 45 graus. Fonte: Modificado de KIM & MOON, 2002. 26

Figura 20 - Esquema ilustrando os diferentes modos de aquisição do satélite RADARSAT-2 Fonte: SILVA, 2010. 27

Figura 21 - Convenção oceanográfica da direção do vento aplicada aos dados do satélite *QuikSCAT*. Fonte: *Remote Sensing Systems*, 2010..... 30

Figura 22 - Perfil de intensidade de um fluido viscoso como o ar (U_∞) em contato com um plano (*e.g.* interface oceano/atmosfera). As forças de atrito exercidas pelo plano reduzem a velocidade do fluido (u) verticalmente. Fonte: ARYA, 2001..... 30

Figura 23 - Resultados do experimento para validação do algoritmo CMOD-IFR2 implementado em Matlab. À esquerda, o resultado calculado neste trabalho: curvas representando velocidades de vento de 5, 10, 15, 20 e 25 m.s⁻¹ para ângulos de visada (Φ) variando entre 0° e 360° e ângulo de incidência (θ) fixo de 45°. A direita, figura modificada do trabalho de HORSTMANN *et al.* (2000) ilustrando o mesmo experimento. 41

Figura 24 - Resultados do experimento para validação do algoritmo CMOD-IFR2 implementado em Matlab. À esquerda, o resultado calculado neste trabalho: curvas vermelhas representando valores de σ_0 calculados a partir de velocidades do vento

variando de 2 a 24 m.s⁻¹ para ângulos de visada (Φ) de 90° e 180° e ângulo de incidência (θ) fixo de 40°. As cruces azuis representam o experimento inverso, onde os valores da velocidade do vento foram calculados a partir de valores de σ_θ . A direita, figura modificada do trabalho de CHRISTIANSEN *et al.* (2006) ilustrando o mesmo experimento. 41

Figura 25 - Imagem SAR, modo *ScanSAR Narrow* (SCNB), de 30 de junho de 2008, horário de aquisição 00:23:34 UTC, passagem ascendente. Os *pixels* saturados na região oceânica representam plataformas petrolíferas ou embarcações. 43

Figura 26 - Imagem SAR, modo *ScanSAR Narrow* (SCNB), de 31 de julho de 2008, horário de aquisição 00:19:27 UTC, passagem ascendente. Os *pixels* saturados na região oceânica representam plataformas petrolíferas ou embarcações. 44

Figura 27 - Imagem SAR, modo *ScanSAR Narrow* (SCNA), de 14 de agosto de 2008, horário de aquisição 00:11:12 UTC, passagem ascendente. Os *pixels* saturados na região oceânica representam plataformas petrolíferas ou embarcações. 45

Figura 28 - Imagem SAR, modo *ScanSAR Narrow* (SCNA), de 31 de agosto de 2008, horário de aquisição 00:15:21 UTC, passagem ascendente. Os *pixels* saturados na região oceânica representam plataformas petrolíferas ou embarcações. 46

Figura 29 - Imagem SAR, modo *Wide* (W1), de 08 de setembro de 2008, horário de aquisição 12:07:00 UTC, passagem Descendente. Os *pixels* saturados na região oceânica representam plataformas petrolíferas ou embarcações. 47

Figura 30 - Imagem SAR, modo *Wide* (W1), de 26 de outubro de 2008, horário de aquisição 12:07:04 UTC, passagem descendente. Os *pixels* saturados na região oceânica representam plataformas petrolíferas ou embarcações. 48

Figura 31 - Imagem SAR, modo *ScanSAR Narrow* (SCNB), de 08 de maio de 2009, horário de aquisição 00:23:50 UTC, passagem ascendente. Os *pixels* saturados na região oceânica representam plataformas petrolíferas ou embarcações. 49

Figura 32 - Campo de vento de 30 de junho de 2008. 58

Figura 33 - Campo de vento de 31 de julho de 2008. 59

Figura 34 - Campo de vento de 14 de agosto de 2008. 61

Figura 35 - Campo de vento de 31 de agosto de 2008. 62

Figura 36 - Campo de vento de 08 de setembro de 2008, com as células de resolução do *QuikSCAT* evidenciadas (setas marrons). 64

Figura 37 - Campo de vento de 26 de outubro de 2008. 65

Figura 38 - Campo de vento de 08 de maio de 2009. 67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ciclones Tropicais no Atlântico reportados pelo Centro Nacional de Furacões para ano de 2008. Fonte: <i>National Hurricane Center</i> , 2008.....	6
Tabela 2 - Coeficientes c do modelo CMOD-IFR2. Fonte: CLARO, 2007.....	24
Tabela 3 - Características dos satélites RADARSAT. Fonte: MDA, 2009.....	28
Tabela 4 - Posição geográfica e altura das estações de medições de vento <i>in situ</i> . Fonte: Dados fornecidos pelo LabSAR/COPPE.....	33
Tabela 5 - Características dos dados SAR selecionados. Fonte: MDA (2010).	42
Tabela 6 - Data e horário (UTC) de aquisição das imagens SAR (Fonte: LabSAR/COPPE, 2010), dados <i>QuikSCAT</i> (Fonte: <i>Remote Sensing Systems</i> , 2010), e informações <i>in situ</i> das estações IXTOC-A, ECO-1 e Rebombeco e Cayo Arcas (Fonte: LabSAR/COPPE, 2010). As datas destacadas em cinza apresentam defasagem entre os horários de aquisição dos dados SAR e <i>QuikSCAT</i>	50
Tabela 7 - Velocidade do vento medida <i>in situ</i> a uma altura de 35 metros, e os mesmos valores convertidos para a altura de 10 metros acima do nível do mar. Os valores da estação Cayo Arcas não foram convertidos, pois foram adquiridos a 10 metros de altura.	51
Tabela 8 - Comparações pontuais entre as informações de velocidade do vento medidas <i>in situ</i> e adquiridas pelo <i>QuikSCAT</i>	52
Tabela 9 - Comparações pontuais entre as informações de direção do vento medidas <i>in situ</i> e adquiridas pelo <i>QuikSCAT</i> . Os valores de direção foram convertidos para a convenção meteorológica, ou seja, o sentido de onde o vento vem.	53
Tabela 10 - Valores médios de velocidade do vento ($m.s^{-1}$) adquiridos pelo <i>escaterômetro</i> e pelas imagens SAR, utilizando como dado inicial, a direção obtida pelo <i>QuikSCAT</i> . Comparação entre as duas formas de estimativa: diferença média, desvio padrão (DP), diferença RMS e coeficiente de correlação (R).	54
Tabela 11 - Valores pontuais de velocidade do vento ($m.s^{-1}$) adquiridos pelos sensores <i>in situ</i> (Velocidade <i>in situ</i>) e pelas imagens SAR (Velocidade Calculada). O “X” representa que a plataforma está situada fora da área de processamento e os valores sombreados em cinza representam valores das estações próximas as áreas de processamento.	56

1. INTRODUÇÃO

Os ventos que escoam sobre a superfície marinha são de grande relevância para a humanidade. A partir deles, o homem foi capaz de navegar pelos oceanos.

Diversas aplicações dependem da estimativa do vento sobre a superfície do mar (BARTHELMIE & DRYOR, 2003). O vento constitui um parâmetro importante para a oceanografia física, uma vez que sua fricção sobre a superfície da água é responsável por processos dinâmicos na camada limite oceano-atmosfera como, por exemplo, a geração de ondas, correntes de deriva e camadas de mistura (ROBINSON, 2004). A meteorologia também necessita do conhecimento de campos eólicos para o estudo de fenômenos atmosféricos.

A busca por fontes energéticas no meio marinho, seja através da instalação de aerogeradores em alto mar ou da exploração de campos de petróleo submarinos, motiva o desenvolvimento e aprimoramento de técnicas de monitoramento dos campos de vento sobre os oceanos.

As indústrias do petróleo que atuam em alto mar necessitam de informações do vento para estimar as condições meteorológicas e oceanográficas visando à segurança de suas operações. Com o conhecimento dos campos de vento, a probabilidade de detecção de um possível vazamento de óleo pode ser estimada (STAPLES & MENDOZA, 2002), assim como a deriva da mancha. Trata-se de uma informação fundamental na metodologia de detecção de manchas de óleo através de imagens SAR, na qual as manchas são mais visíveis num intervalo de velocidade do vento entre 3 m.s^{-1} e 10 m.s^{-1} (PEDROSO, 2009).

A estatal mexicana PEMEX faz o monitoramento operacional de manchas de óleo no mar sobre sua área de atuação no Golfo do México através do LabSAR-COPPE/UFRJ, desde 2002. Conseqüentemente, existe um grande acervo de imagens SAR sobre a área de atuação da PEMEX. Por esse motivo, a área de estudo selecionada se localiza na porção sul do Golfo do México, na região onde estão localizadas as estações IXTOC-A, ECO-1, Rebombeco e Cayo Arcas. Essas estações adquirem informações pontuais *in situ* de direção e velocidade do vento, importantes para a validação dos resultados deste trabalho. Trata-se de uma região onde os ventos variam de intensidade culminando com a estação dos furacões.

Existem diferentes maneiras de avaliar o comportamento do vento através da análise de medidas quantitativas da sua direção e velocidade, que podem ser adquiridas por

sensores *in situ*, geradas por modelos atmosféricos e sensores remotos de microondas (CLARO, 2007).

Medidas *in situ* através de equipamentos instalados em embarcações, bóias, plataformas marítimas e mastros meteorológicos são os métodos empregados há mais tempo e, conseqüentemente, possibilitam a existência de séries históricas de dados em determinadas regiões, além de apresentarem resultados mais confiáveis, por se tratar de métodos diretos de medições.

No entanto, as medições *in situ* têm sua efetividade operacional limitada por serem pontuais (STAPLES & MENDOZA, 2002). As dificuldades operacionais e o alto custo de instalação e manutenção desses equipamentos inviabilizam a distribuição espacial de um grande número de sensores em regiões oceânicas. Informações de vento sinópticas são adquiridas por modelos meteorológicos ou escaterômetros a bordo de satélites com resolução espacial de 50 km (HORTMANN *et al.*, 2000).

Em 1972, foi colocado em órbita o Landsat, que foi o primeiro satélite de observação dos recursos terrestres (NOVO, 1989). Com o início da era do sensoriamento remoto orbital, diversos esforços foram empregados em estudos e desenvolvimento de técnicas para obtenção de informações sobre a superfície terrestre. A utilização de escaterômetros instalados a bordo de plataformas orbitais possibilitou a obtenção de campos de vento sinópticos sobre a superfície marinha.

Modelos matemáticos foram desenvolvidos com base na comparação entre a resposta do sinal de radar dos escaterômetros e observações *in situ*. Esses experimentos deram origem a modelos empíricos como o C-MOD2 e o C-MOD4 (STOFFELEN & ANDERSON, 1997). Assim, os escaterômetros possibilitaram a estimativa direta do campo global de vetores de vento sobre o oceano com resolução espacial de 50 km, acurácia de $2,00 \text{ ms}^{-1}$ na velocidade e 15° na direção, porém com uma ambigüidade direcional de 180° . O sensor *SeaWinds* a bordo do satélite *QuikSCAT* gerou informações de vento com resolução espacial de $0,25^\circ$ de latitude por $0,25^\circ$ de longitude (*Remote Sensing Systems*, 2010).

A baixa resolução espacial dos escaterômetros inviabiliza a obtenção de informações em regiões próximas à costa. O valor médio do sinal de retorno que compõe o *pixel* (elemento básico da imagem que cobre determinada área do terreno) é contaminado pela influência de feições terrestres. Portanto, a utilização de dados de escaterômetros em regiões costeiras é limitada em muitas ocasiões pela indisponibilidade de informações.

O Radar de Abertura Sintética, ou SAR (*Synthetic Aperture Radar*), também emite sinais eletromagnéticos na faixa de microondas. VAN DER SANDEN (2004) enumera uma série de aplicações para os dados SAR do satélite RADARSAT-2, dentre as quais se destacam, no ambiente marinho, a detecção de filmes de óleo na superfície da água, determinação de espectro de ondas, estudo de correntes e obtenção de campos de vento. A metodologia utilizada na obtenção de campos de vento a partir de imagens SAR é mundialmente difundida, porém pouco explorada no Brasil, onde destaca-se o trabalho desenvolvido por CLARO (2007).

A capacidade do SAR em gerar imagens de alta resolução espacial, superiores a 10 metros, através de técnicas de processamento de sinais, permite a aquisição de informações quantitativas do vento em escala local. ZECCHETO & DE BIASIO (2007) afirmam que estruturas locais provocadas pelo vento são identificadas apenas em resoluções espaciais mais finas, não sendo detectáveis em outras fontes de baixa resolução espacial, como modelos atmosféricos e escaterômetros com 25 km de tamanho de célula. Portanto, a utilização de dados SAR para estimativa de campos de vento de alta resolução, na ordem de 1 km de tamanho de célula, permite compreender processos costeiros como a dinâmica de correntes, ondas e transporte por vento, como pode ser observado em HORSTMANN *et al.* (2000), KIM & MOON (2002) e KOCH (2004).

O conhecimento prévio da direção do vento é parâmetro fundamental para a estimativa da velocidade utilizando os modelos C-MOD. Tal informação pode ser obtida por dados auxiliares: medidas *in situ*, modelos meteorológicos, escaterômetros, ou a própria imagem SAR. A precisão das informações de direção do vento é muito importante, pois a menor diferença na direção determinada pode resultar em grandes diferenças nos valores de intensidade do vento calculado. CHRISTIANSEN *et al.* (2006) compararam os resultados obtidos pelos modelos C-MOD4, C-MOD5 e C-MOD-IFR2, utilizando informações iniciais de direção provenientes de medidas *in situ* e da própria imagem SAR.

1.1. Justificativa da Pesquisa

Tendo em vista que indústrias petrolíferas como a PETROBRAS e a PEMEX utilizam operacionalmente dados SAR para identificar manchas de óleo no mar, seja para fins de controle ambiental ou exploratórios, e que o conhecimento do vento no mesmo momento da aquisição dos dados SAR é fundamental para a aplicação dessa

metodologia (STAPLES & MENDOZA, 2002), cabe destacar que a estimativa do vento utilizando o próprio dado SAR pode aumentar a efetividade das análises.

Outra vantagem da metodologia é sua aplicação em regiões costeiras, onde os dados de vento adquiridos por escaterômetros de baixa resolução espacial são contaminados por influência de feições continentais (KIM & MOON, 2002; STAPLES & MENDOZA, 2002). Isso subsidia a detecção de manchas de óleo próximas a costa, viabilizando a prevenção e o contingenciamento de acidentes em regiões de alta vulnerabilidade ambiental.

Além de gerar dados com alta resolução espacial, os custos operacionais para estimar informações de vento são menores quando comparados aos custos de instalação de mastros meteorológicos para medidas *in situ* em alto mar (CHRISTIANSEN *et al.*, 2006), o que configura uma alternativa a estudos de potencial energético e viabilidade de instalação de aerogeradores em regiões marítimas.

1.2. Objetivo

Estimar campos de vento na superfície marinha do Golfo do México a partir de imagens SAR do satélite RADARSAT-2 e informações auxiliares de direção do vento, e comparar os resultados com os publicados por outros autores.

1.3. Estrutura do Trabalho

No capítulo 2, a área de estudo é apresentada, com enfoque em suas características meteorológicas. A fundamentação teórica é apresentada no capítulo 3, onde os conceitos gerais de radar são explicados. Os modelos C-MOD são apresentados no mesmo capítulo, assim como os sensores utilizados. No capítulo 4 são apresentados os materiais e métodos utilizados para obtenção de campos de vento por radar. A consistência da codificação do modelo CMOD-IFR2 e os resultados obtidos são apresentados e discutidos no capítulo 5. No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange uma região marítima ao sul do Golfo do México (Figura 1). A definição dessa área é justificada pela presença de estações de medição de vento *in situ*, localizadas nas plataformas IXTOC-A, ECO-1 e Rebombeo e no recife Cayo Arcas, bem como pela disponibilidade de imagens RADARSAT-2 cedidas pelo LabSAR-COPPE/UFRJ.

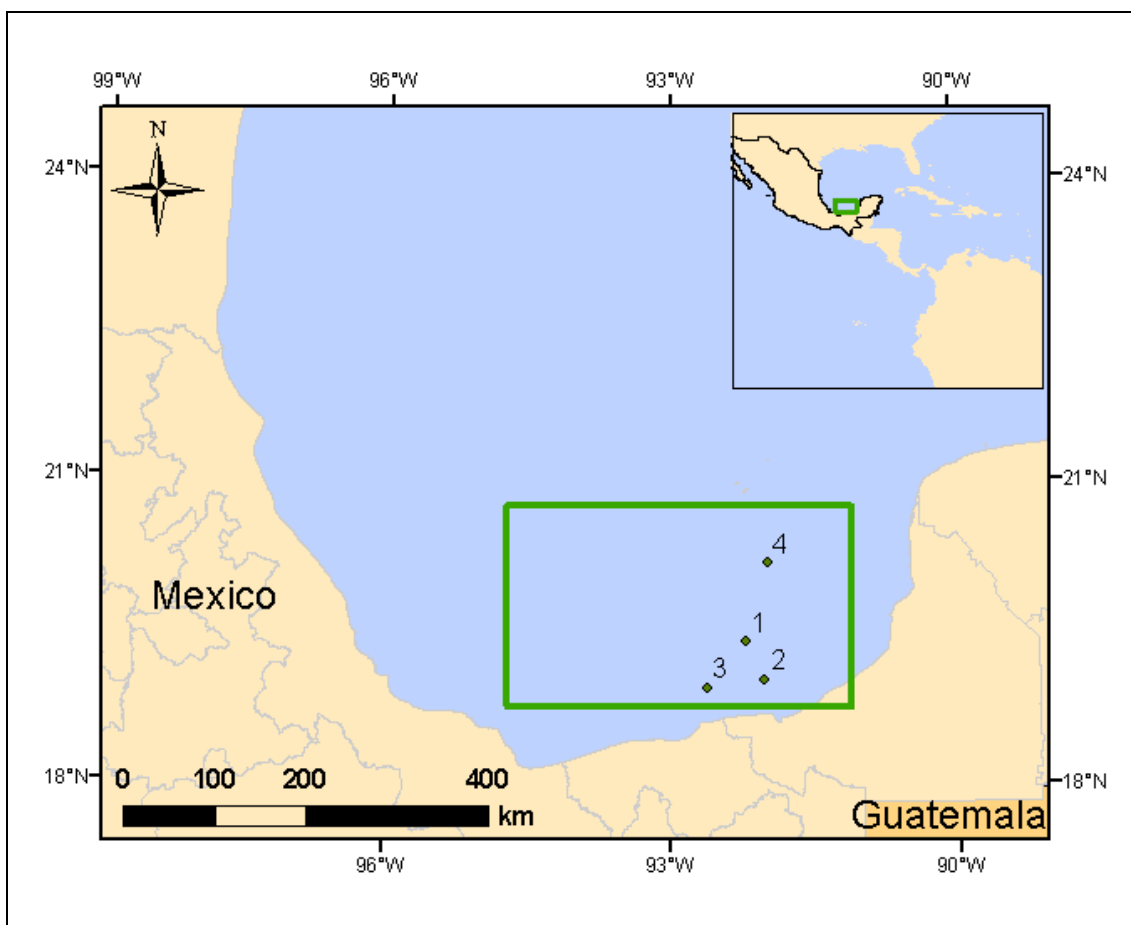


Figura 1 - Mapa da área de estudo sobre o Golfo do México. O polígono verde representa a região onde foram estimados campos de vento e os pontos pretos representam as posições das estações: 1) IXTOC-A, 2) ECO-1, 3) Rebombeo e 4) Cayo Arcas.

Devido às altas temperaturas de suas águas, o Golfo do México é alvo de intensos furacões, como, por exemplo, o Katrina, de categoria 5 SSHS (*Saffir-Simpson Hurricane Scale*), ocorrido em 2005 (PEDROSO, 2009).

O Centro Nacional de Furacões (*National Hurricane Center*) registrou, no ano de 2008, 16 ciclones tropicais formados no Oceano Atlântico Norte, dentre tempestades tropicais (T), furacões (H) e furacões de grande magnitude (MH). A temporada de furacões em 2008 se iniciou no final de Maio e terminou na primeira quinzena de Novembro (Tabela 1). A temporada de 2009 se iniciou em Agosto e terminou em Novembro.

Tabela 1 - Ciclones Tropicais no Atlântico reportados pelo Centro Nacional de Furacões para ano de 2008. Fonte: *National Hurricane Center*, 2008.

Número	Tipo	Nome	Período
1	T	Arthur	31/05 a 01/06
2	MH	Bertha	03/07 a 20/07
3	T	Cristobal	19/07 a 23/07
4	H	Dolly	20/07 a 25/07
5	T	Edouard	03/08 a 06/08
6	T	Fay	15/08 a 26/08
7	MH	Gustav	25/08 a 04/09
8	H	Hanna	28/08 a 07/09
9	MH	Ike	01/09 a 14/09
10	T	Josephine	02/09 a 06/09
11	H	Kyle	25/09 a 29/09
12	T	Laura	29/09 a 01/10
13	T	Marco	06/10 a 07/10
14	T	Nana	12/10 a 14/10
15	MH	Omar	13/10 a 18/10
16	MH	Paloma	05/11 a 09/11

Tipo: T = *Tropical Storm* H = *Hurricane* MH = *Major Hurricane*

Na Figura 2, os ciclones estão representados temporal e espacialmente. É possível notar que diferentes ciclones alcançaram a área de estudo, localizada na costa mexicana do Golfo do México. No entanto, não houve ocorrência de tais fenômenos durante as datas de aquisição dos dados SAR.

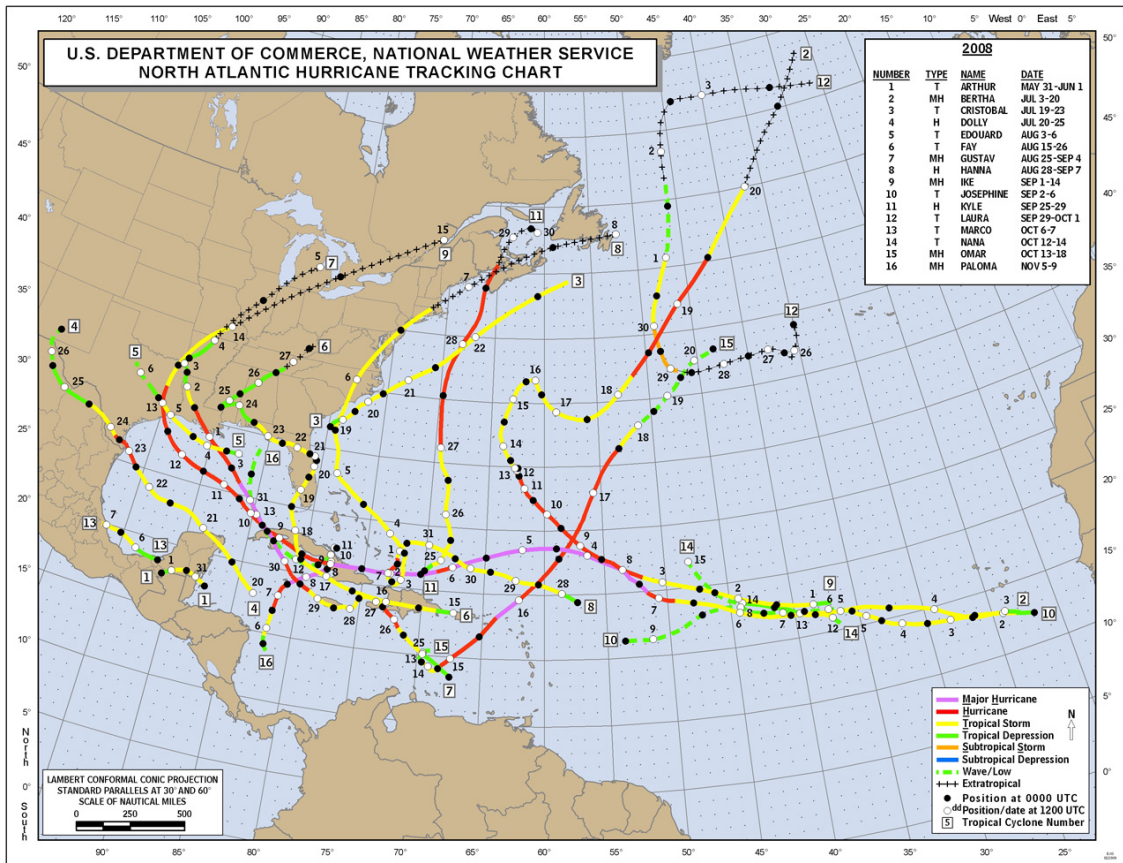


Figura 2 - Ocorrência de Ciclones Tropicais Atlânticos reportados pelo Centro Nacional de Furacões para ano de 2008. Fonte: *National Hurricane Center*, 2008.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O vento que incide sobre a superfície da água troca energia cinética com o meio marinho através de forças cisalhantes. A energia transferida pelo vento gera ondas de pequena amplitude denominadas ondas capilares, que são responsáveis pelo aspecto rugoso da água. À medida que a velocidade do vento aumenta, a quantidade de energia transferida também aumenta, fazendo com que a rugosidade superficial se torne mais intensa. O sinal de radar interage com a rugosidade superficial da água e é a partir dessa relação que é possível utilizar imagens de radar para inferir a velocidade do vento marinho. Para entender esse conceito, faz-se necessário compreender os princípios básicos de Sensoriamento Remoto (SR) por radar.

O sensoriamento remoto consiste na arte e na ciência de estudar a matéria sem ter contacto físico com a mesma, baseando-se somente na interação da radiação eletromagnética com os alvos (LILLESAND & KIEFER, 1994). Tal tecnologia teve início com a invenção da câmera fotográfica e suas aplicações eram primordialmente militares. A grande revolução do SR aconteceu no início da década de 70, com o lançamento do primeiro satélite de recursos naturais terrestres (FIGUEIREDO, 2005).

Existem dois tipos de sistemas sensores: passivos e ativos. Os sistemas passivos dependem de fonte de energia externa para registrar as informações. Um exemplo é o sensor óptico, que registra a energia eletromagnética na faixa do espectro visível emitida pelo sol e refletida pela Terra. Esse tipo de sensor limita-se a adquirir informações durante o dia. Além disso, o comprimento de onda do espectro visível faz com que a energia seja refletida pelas nuvens, impossibilitando a aquisição de informações sobre regiões por elas encobertas.

Os sistemas ativos possuem sua própria fonte de radiação eletromagnética que é emitida e interage com os alvos na superfície terrestre, possibilitando a aquisição de informações. Dessa forma, os sensores ativos não dependem de fontes de radiação externas, como a luz solar, sendo capazes de adquirir imagens durante o dia e a noite. Isso aumenta a flexibilidade operacional do satélite, pois reduz o período de revisita para aquisição dos dados.

3.1. Conceitos de Radar

Os princípios do SAR foram concebidos no início dos anos 50. Desde então, a tecnologia foi desenvolvida rapidamente e atualmente, diversos sistemas estão operando em aeronaves e plataformas orbitais. O progresso da tecnologia e das técnicas de processamento de sinal permitiu que os sistemas fossem utilizados para fins militares e civis (BERENS, 2006).

Os radares são sensores ativos montados em plataformas aerotransportadas ou em satélites orbitais. Ao contrário dos sensores passivos, que captam a energia solar refletida pela Terra, os radares emitem sua própria energia, e, por isso, podem adquirir dados durante a noite.

O transmissor produz os pulsos de microondas que são enviados para a superfície terrestre através da antena. Quando os pulsos de microondas atingem a superfície do objeto, a energia é espalhada em várias direções (retroespalhamento). Parte da energia retroespalhada retorna na direção da antena e é registrada pelo sensor.

O primeiro radar capaz de gerar imagens foi denominado SLAR (*Side Looking Airbone Radar* ou radar de visada lateral). Neste sistema, a resolução azimutal é diretamente proporcional ao comprimento físico da antena (SILVA, 2010). Portanto, para se obter melhor resolução azimutal, é necessário diminuir a distância entre o radar e o alvo ou aumentar o comprimento da antena (Figura 3).

Com o desenvolvimento do SAR, a resolução azimutal se tornou independente da distância entre o radar e o alvo (Figura 4). Os sensores SAR atuais são capazes de gerar imagens com resolução espacial superior a 10 metros através de técnicas avançadas de processamento de sinal.

Além da resolução espacial, outros parâmetros, como comprimento de onda (frequência), ângulo de incidência e polarização compõem a teoria que explica a física do processo de geração de imagens SAR.

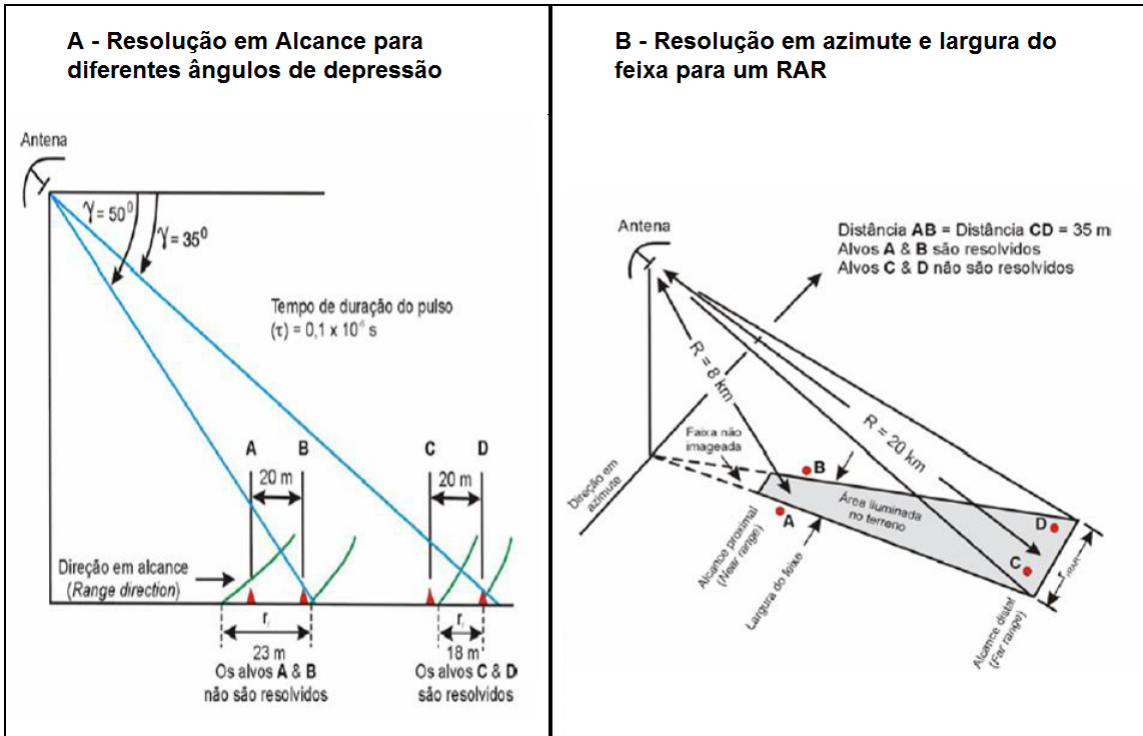


Figura 3 - Conceito de resolução espacial para o radar de abertura real. A) Alcance. B) Azimute. Fonte: SILVA, 2010.

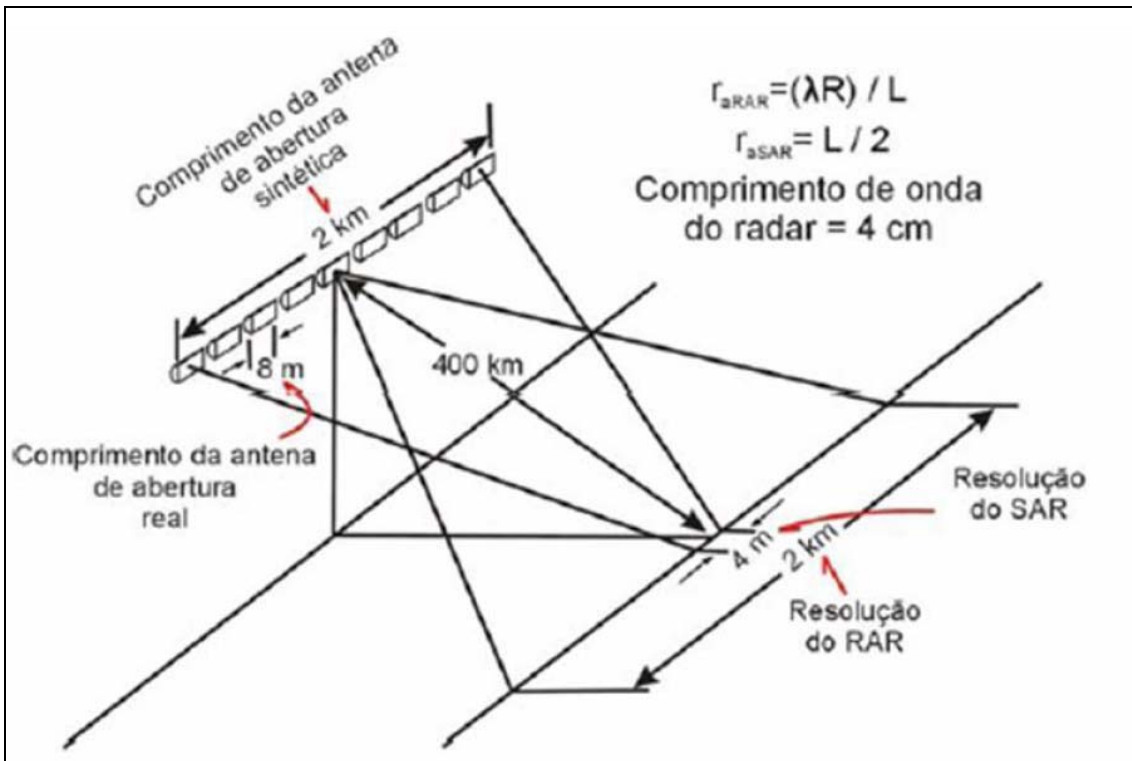


Figura 4 - O conceito de resolução espacial para o radar de abertura sintética. Fonte: SILVA, 2010.

A frequência é um dos principais fatores que afetam o conteúdo de informações de uma imagem SAR. Frequência (GHz) e comprimento de onda são diferentes maneiras de descrever a mesma onda de radar. O comprimento de onda (inverso da frequência) do sinal de radar varia na faixa das microondas entre 1,0 mm e 1000,0 mm. A frequência afeta a geração de uma imagem SAR de diversas formas, mas a influência mais significativa é no nível de penetração do sinal nos alvos. Essa característica permite que os radares adquiram informações sob qualquer condição atmosférica, uma vez que as microondas penetram as nuvens e não sofrem interferência considerável de partículas em suspensão no ar (Figura 5).

A influência dos diferentes comprimentos de onda fica evidente nas três imagens SAR apresentadas na Figura 6. Fica visível que os alvos no terreno interagem de maneiras distintas entre as imagens, apresentando respostas diferentes. Nota-se também que a influência das nuvens diminui (da imagem **a** para **c**), pois a penetrabilidade do sinal aumenta à medida que o comprimento de onda se torna maior.

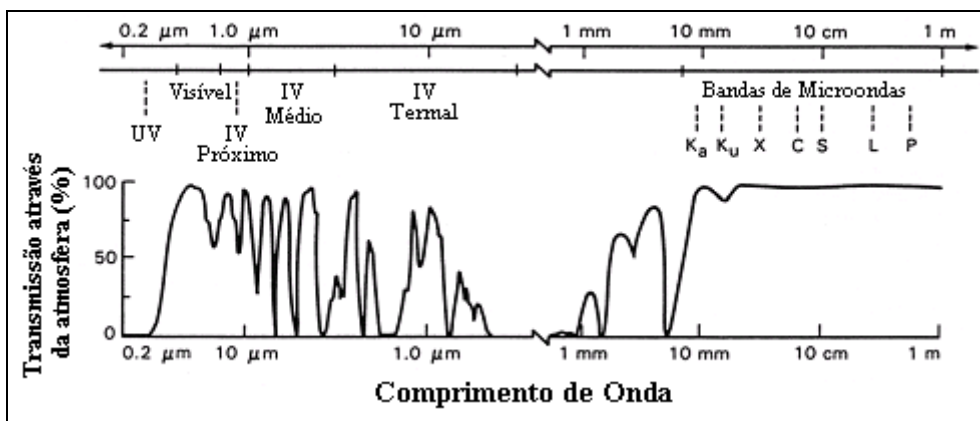


Figura 5 - Espectro eletromagnético, incluindo as bandas de frequência de microondas e a porcentagem de sinal que é transmitido através da atmosfera para cada comprimento de onda. Fonte: Modificado de BERENS, 2006.

O ângulo de incidência (θ) é formado pela linha perpendicular ao plano do relevo e pela direção do pulso incidente de radar. A forma com que o sinal interage com os alvos e a intensidade do sinal de retorno varia em função de θ . Ângulos de incidência altos resultam em respostas mais fracas, pois a maior parcela do sinal de retorno é refletida para longe do sensor. Ângulos de incidência menores resultam em resposta mais intensa, pois grande parte do sinal de retorno é refletida na direção do sensor (Figura 7).

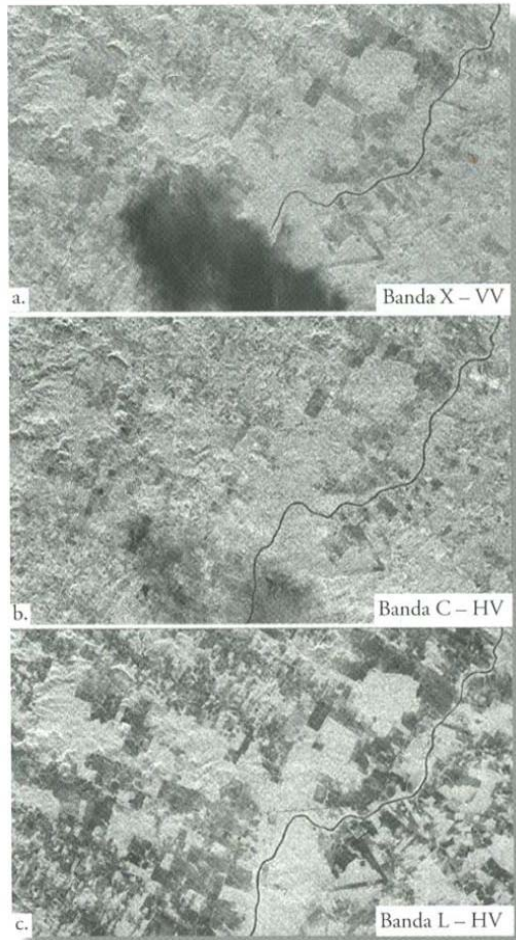


Figura 6 - Imagens SAR adquiridas com diferentes comprimentos de onda sobre a mesma região. a) Banda X com comprimento de onda variando entre 2,5cm a 3,7cm. b) Banda C com comprimento de onda variando entre 3,7cm e 7,5cm. c) Banda L com comprimento de onda variando entre 15,0cm e 30,0cm. Fonte: JENSEN, 2009.

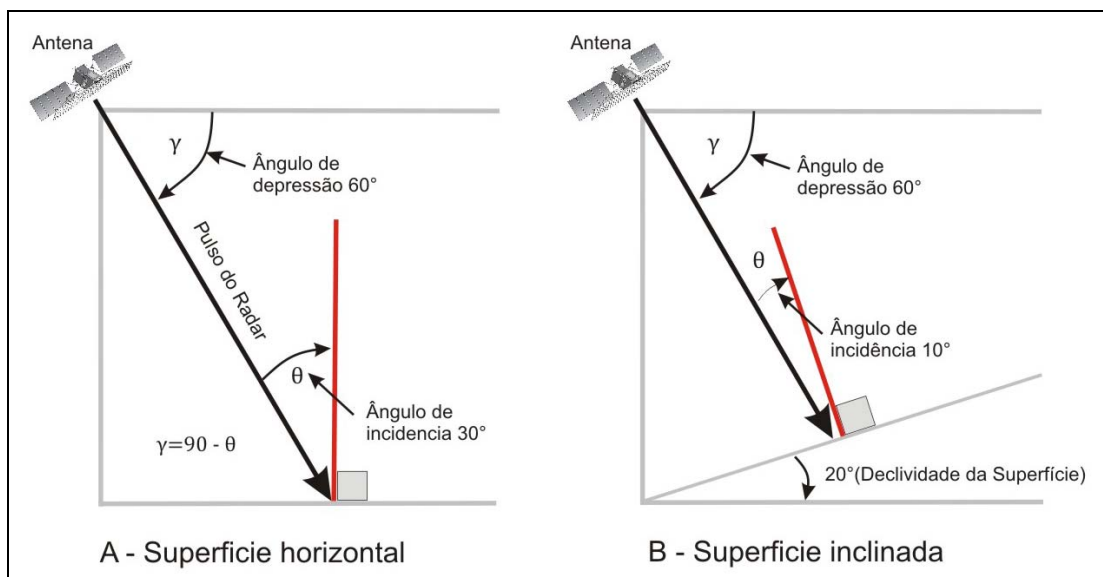


Figura 7 - Relação entre ângulo de incidência, ângulo de depressão e declividade do terreno. Fonte: SABINS, 1999.

A polarização se refere à orientação do campo elétrico do pulso de radar em relação ao eixo horizontal da antena (Figura 8 A). Os radares podem ter diferentes configurações de polarização: HH (transmissão horizontal e recepção horizontal), VV (transmissão vertical e recepção vertical), HV (transmissão horizontal e recepção vertical) e VH (transmissão vertical e recepção horizontal). A polarização influencia na forma como o sinal interage com os alvos. A utilização de diferentes tipos de polarizações possibilita adquirir maior quantidade de informações, uma vez que cada polarização resulta em um padrão de resposta do sinal (Figura 8 B).

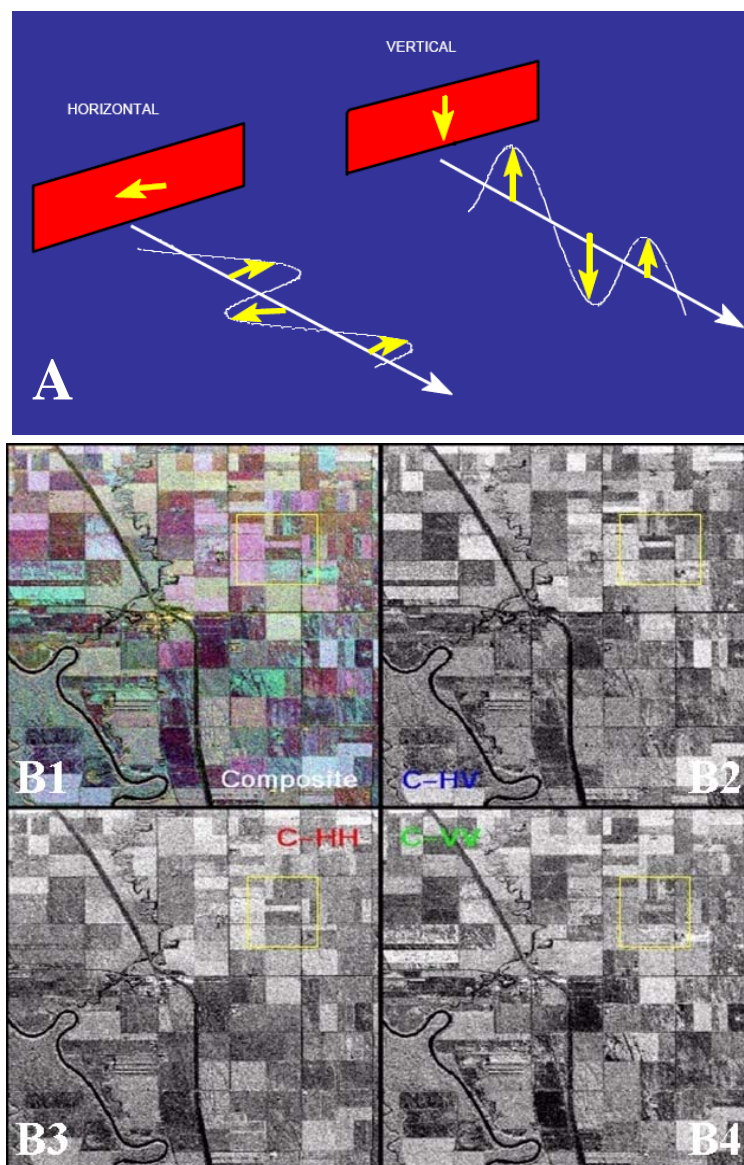


Figura 8 - A. Esquema da orientação do sinal vertical e horizontal em relação à antena. B1. Composição colorida formada a partir de imagens adquiridas com sinal HV no canal vermelho, HH no canal verde e VV no canal azul. B2. Imagem adquirida com sinal HV. B3. Imagem adquirida com sinal HH. B4. Imagem adquirida com sinal VV. Fonte: CCRS, 2010.

3.2. Obtenção de Campos de Vento por SAR

O SAR é um sensor que permite a aquisição de informações de velocidade do vento sobre o mar, uma vez que possibilita a interação do sinal com a superfície marinha, mesmo na presença de nuvens. O comprimento de onda é um fator fundamental na interação da radiação eletromagnética com a superfície do mar.

O retroespalhamento do sinal de radar é basicamente dominado pela rugosidade superficial do oceano, formada por ondas mistas compostas por ondas capilares e ondas de gravidade de pequeno comprimento, que entram em ressonância com a radiação na faixa das microondas emitida pelo radar (HORSTMANN *et al.*, 2000). As ondas capilares são dominadas pela tensão superficial do fluido, sendo que a gravidade quase não tem influência. À medida que sua amplitude aumenta, a gravidade passa a dominar e as ondas recebem a denominação de gravidade.

No caso do mar apresentar ondulações de grande amplitude, as mesmas não interagirão com o sinal de radar de forma a contribuir com a aquisição de informações de vento. Apenas as ondulações de pequena amplitude interagem com o sinal de radar em um processo conhecido como mecanismo de ressonância *Bragg* (Figura 9).

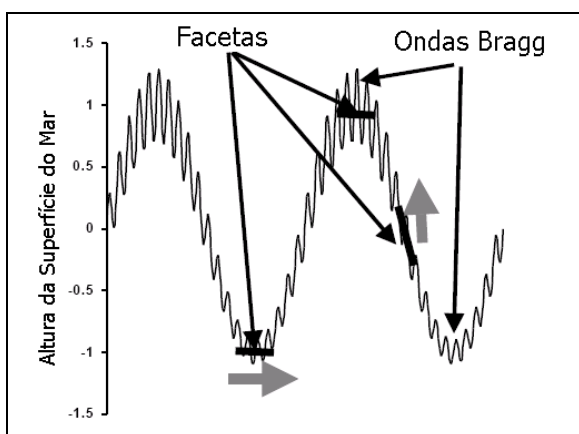


Figura 9 - Exemplo de ondas capilares denominadas ondas Bragg. As ondas de maiores amplitudes não influenciam a interação com o sinal de radar. Fonte: Modificado de WACKERMAN & COLÓN, 2001.

Segundo HORSTMANN *et al.* (2000), o número de onda na água que entra em ressonância com o sinal de radar (K_w) é relacionado com o número de onda do sinal (K_e) de acordo com a Equação 1, onde θ é o ângulo de incidência do pulso de radar (Figura 10).

$$K_w = 2K_{el} \sin \theta$$

Equação 1

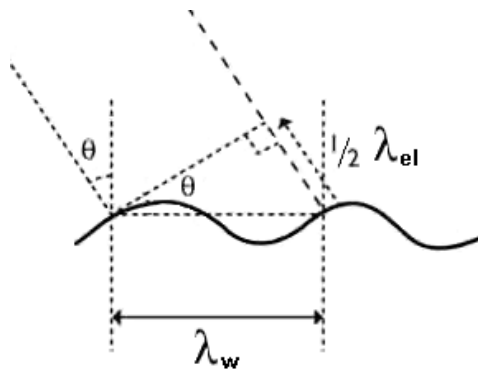


Figura 10 - Mecanismo de ressonância Bragg, onde λ_{el} é o comprimento de onda do sinal e λ_w é o comprimento de onda das ondas capilares. Fonte: ESA, 2010.

A rugosidade é definida de acordo com a quantidade de energia de microondas retroespalhada na direção do sensor, e está relacionada ao comprimento de onda da energia eletromagnética incidente (λ), ao ângulo de incidência (θ) e a variação de altura (h), em escala centimétrica, que se encontram na célula de resolução iluminada (PEDROSO, 2009).

Segundo o critério de *Rayleigh* modificado, uma região considerada lisa, ou sem rugosidade superficial, apresenta baixo retorno de energia para a antena. Tal superfície especular, definida na Equação 2, reflete a maior parte da energia na direção oposta ao sensor. Por outro lado, uma superfície rugosa resulta em sinal de retorno forte, segundo o critério de *Rayleigh* modificado, que é representado na Equação 3 (PEAKE & OLIVER, 1971).

$$h < \frac{\lambda}{25 \sin \lambda} \quad \text{Equação 2}$$

$$h > \frac{\lambda}{4,4 \sin \lambda} \quad \text{Equação 3}$$

Portanto, é importante destacar que sob a mesma condição de vento superficial, a imagem SAR pode apresentar respostas diferentes, de acordo com a variação do comprimento de onda eletromagnética (λ) e do ângulo de incidência local (θ).

Considerando λ e θ fixos, à medida que a intensidade do vento aumenta, a rugosidade superficial da água cresce, tornando o sinal de retorno cada vez maior (Figura 11 – a, b e c). Além disso, a presença de estruturas na água, como embarcações e plataformas de petróleo, provocam reflexão dupla (Figura 11 – d), intensificando significativamente o sinal de retorno.

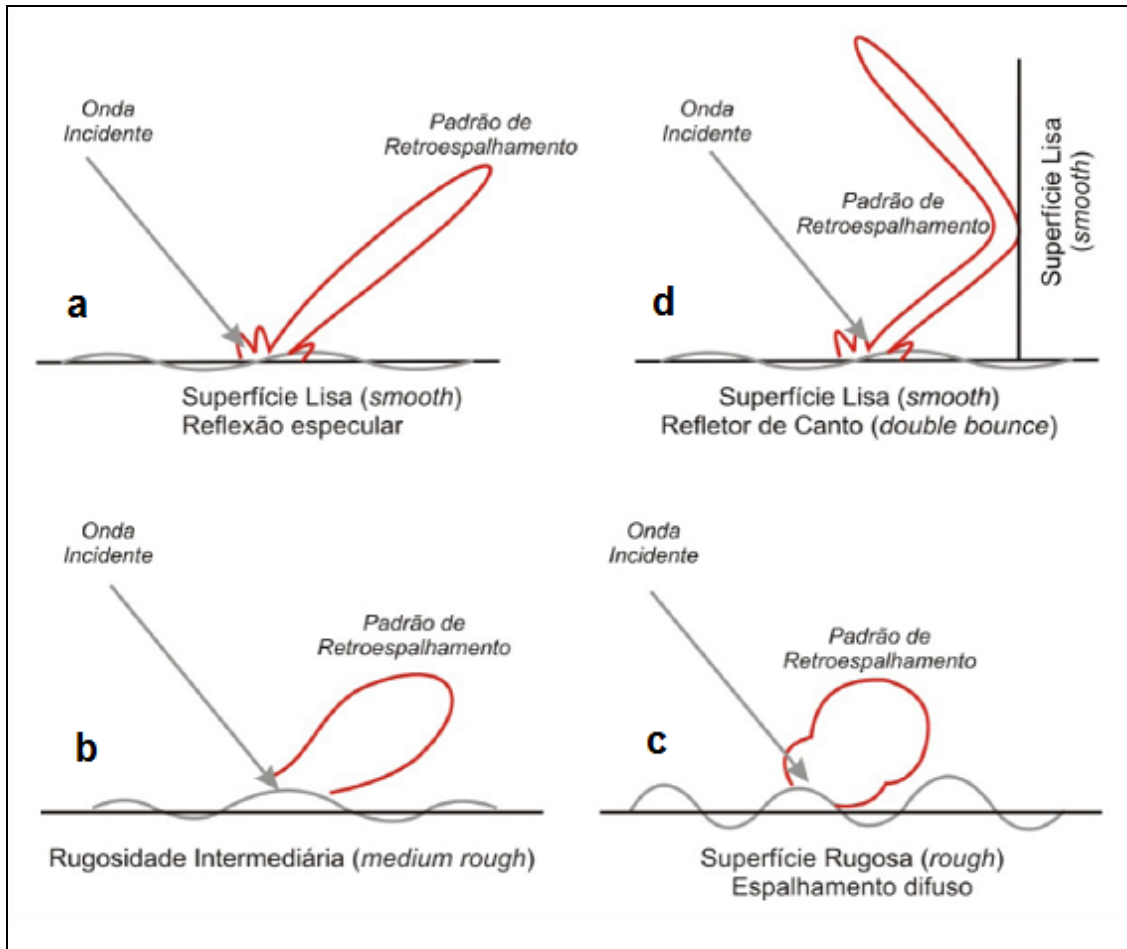


Figura 11 - Mecanismos de reflexão e espalhamento do sinal em função da rugosidade do terreno. a) Vento fraco. b) Vento moderado. c) Vento forte. d) vento fraco e presença de estruturas na água. Fonte: Modificado de HENDERSON & LEWIS, 1998.

A superfície marinha é considerada plana, com sua linha perpendicular apontando para o zênite. Com isso, o ângulo de incidência passa a variar apenas em função da distancia em alcance (Figura 12).

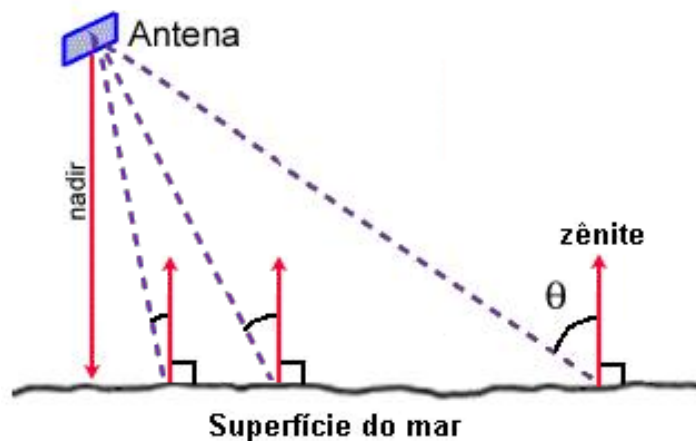


Figura 12 - Variação do ângulo de incidência sobre a superfície da água em função do aumento da distância em alcance.

O ângulo de incidência tem relação direta com o valor de σ_0 . Ângulos muito pequenos resultam em valores de σ_0 altos, independente da velocidade do vento (Figura 13 - a). Por outro lado, ângulos muito altos proporcionam valores de σ_0 baixos, devido à pequena razão sinal/ruído (Figura 13 - c). Existe um intervalo intermediário de ângulos que permite a relação entre σ_0 e velocidade do vento (Figura 13 - b).

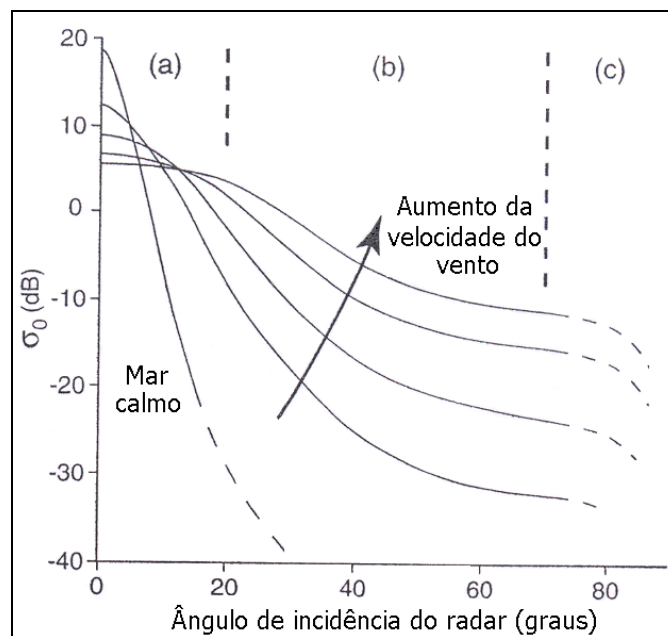


Figura 13 - Curvas representando diferentes velocidades do vento, relacionando σ_0 com o ângulo de incidência (θ). No intervalo (a), não é possível relacionar adequadamente as curvas de velocidade ao σ_0 , pois o sinal de retorno é muito alto, independentemente do vento. O intervalo (b) representa a variação de ângulos recomendável para a estimativa do vento, pois as curvas de velocidade são bem características. No intervalo (c), o σ_0 é fraco em qualquer condição de vento. Fonte: Modificado de ROBINSON, 2004.

A resolução espacial não pode ser muito grande (*pixels* muito pequenos) quando se trata de obtenção de informações de vento. Segundo HORSTMANN *et al.* (2000) diferenças na resolução espacial provocam acréscimo de erro na velocidade do vento devido ao aumento de ruído multiplicativo na imagem, conhecido como *speckle*.

Para células de grade menores que 2 km, o efeito de *speckle* começa a dominar o efeito da variação do vento; no entanto, células maiores que 500 metros podem ser utilizadas em imagens ERS SAR (HORSTMANN *et al.*, 2000). KIM & MOON (2000) reamostraram as imagens SAR para 1,6 x 1,6 km e o vento calculado para essas células foram reamostrados para 12,8 x 12,8 km.

O efeito da variação no tamanho da célula de resolução espacial sobre a velocidade resultante do vento é evidenciado na Figura 14. A distribuição da velocidade do vento entre células de 0,1 e 0,5 km é influenciada principalmente por *speckle* e variações de pequena escala na direção do vento. Para células maiores que 0,5 km, a distribuição das velocidades é dominada pela variação do vento.

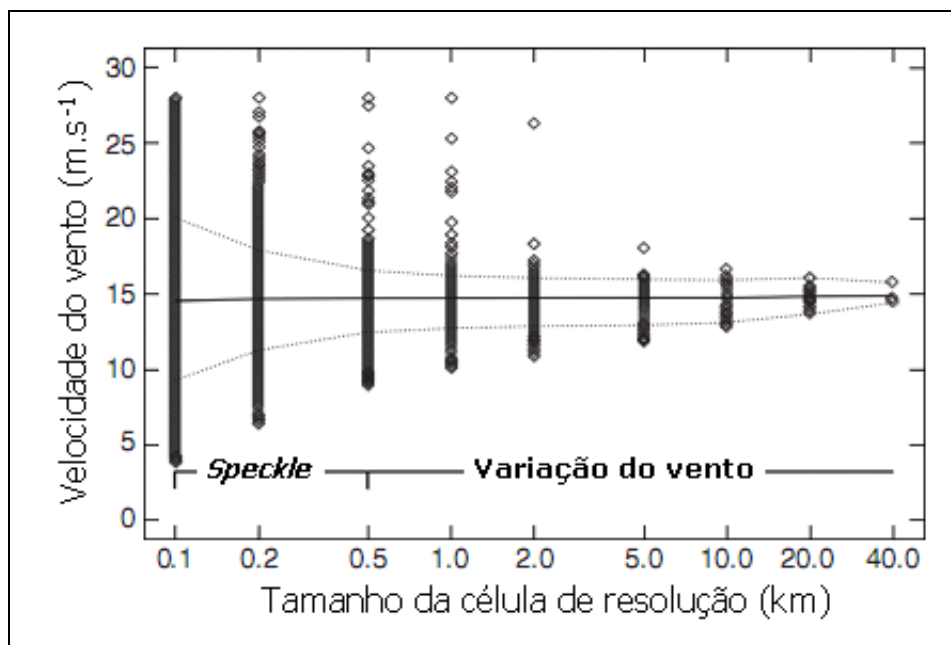


Figura 14 - Relação entre o efeito de ruído *speckle* e o tamanho da célula de resolução espacial. Cada diamante representa a velocidade média de cada célula. A curva sólida representa a velocidade média para toda a imagem e a linha pontilhada representa o intervalo de confiança de 90%. Fonte: Modificado de HORSTMANN *et al.*, 2000.

A polarização VV é mais adequada para estimar campos de vento, uma vez que a interação do sinal VV com as ondas capilares é mais intensa. Por este motivo, os modelos C-MOD foram desenvolvidos para utilizar o sinal nessa polarização. No entanto, existem relações que permitem utilizar tais modelos com imagens adquiridas por sinal HH. THOMPSON *et al.* (1998) sugerem uma expressão empírica para converter os valores HH em VV, possibilitando a utilização desses dados nos modelos C-MOD. A Equação 4 descreve essa expressão, onde σ_0^{HH} é o valor de sigma zero em polarização HH, σ_0^{VV} é o valor de sigma zero equivalente à polarização VV, θ é o ângulo de incidência do sinal, U_{10} é a velocidade do vento a uma altura de 10 metros, Φ é a direção do vento em relação a direção de visada da antena e α é uma constante igual a 0,6.

$$\sigma_0^{HH} = \frac{(1 + \alpha \tan^2 \theta)^2}{(1 + 2 \tan^2 \theta)^2} \sigma_0^{VV}(U_{10}, \theta, \phi) \quad \text{Equação 4}$$

A direção do vento é determinada a partir do ângulo (Φ) formado com a direção de visada do sinal de radar. Essa informação é de extrema importância, pois pequenas diferenças na direção podem resultar em grandes diferenças na intensidade do vento calculada pelo modelo C-MOD.

HORSTMANN *et al.* (2000) estimaram o erro na velocidade do vento em função da direção. Os cálculos foram realizados com o modelo C-MOD4, polarização VV e um ângulo de incidência de 23°. A velocidade do vento variou entre 3 e 25 m.s⁻¹ e as direções entre 90° (*upwind*) e 270° (*downwind*) no sentido horário a partir da direção de voo do satélite. Os maiores erros foram encontrados nas direções 45°, 135°, 225° e 315°, devido à simetria dos modelos C-MOD (Figura 15).

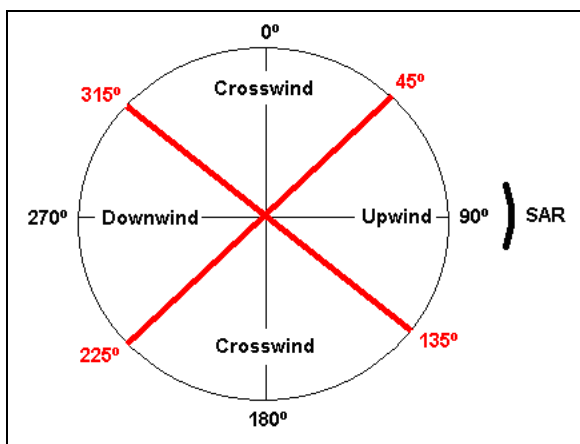


Figura 15 - Representação em vermelho das direções de visada do vento que apresentaram maiores erros nos resultados de intensidade calculados pelos modelos C-MOD4. Fonte: HORSTMANN *et al.*, 2000.

A estimativa da direção do vento sobre a superfície do mar pode ser feita de duas maneiras: através de medições auxiliares sobrepostas, advindas de medidas *in situ* (bóias, mastros meteorológicos e embarcações), escaterômetros, ou modelos; ou através de feições presentes na própria imagem SAR (ZECCHETO & DE BIASIO, 2007).

A PEMEX utiliza estações *offshore* para obter informações de direção do vento em intervalos de cinco minutos. Como tais informações são pontuais, STAPLES & MENDOZA (2002) sugerem que as mesmas sejam distribuídas espacialmente ao longo da imagem SAR. Os escaterômetros são uma alternativa para aquisição de informações espacializadas de vento. Todavia, sua baixa resolução espacial inviabiliza a estimativa do vetor de vento próximo à costa (KIM & MOON, 2002), onde as informações são saturadas pela influencia do continente (Figura 16).

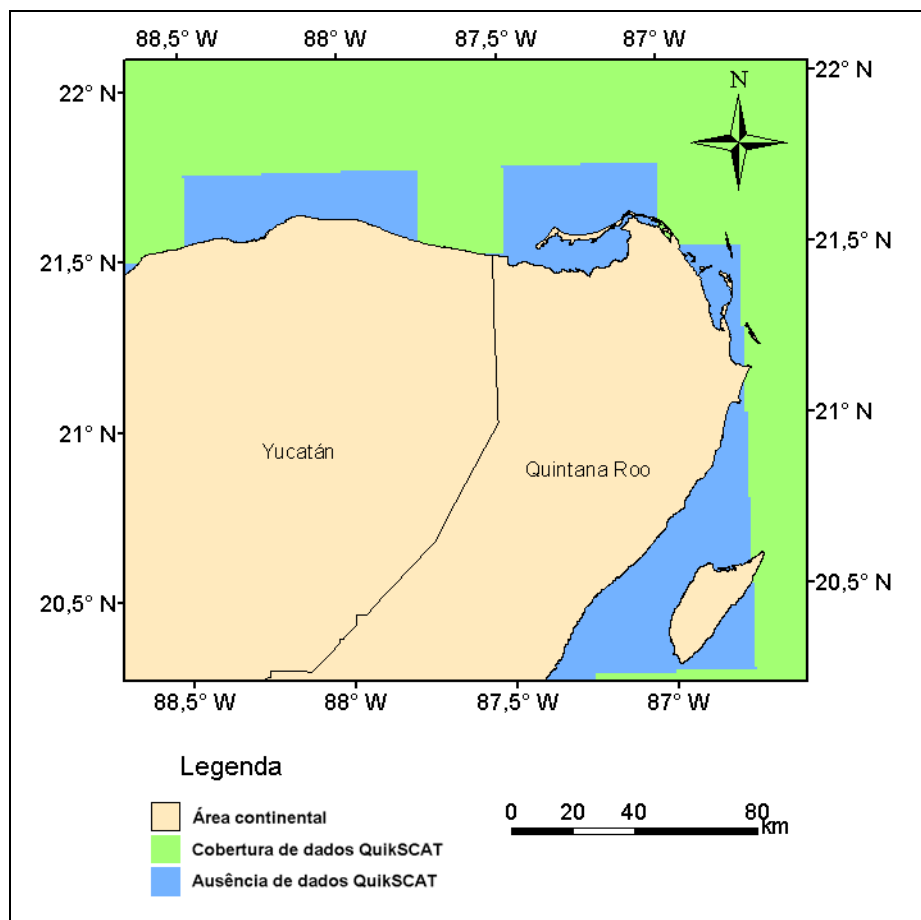


Figura 16 – Exemplo de ausência de informações de vento provenientes do escaterômetro *QuikSCAT* próximo a regiões costeiras. A faixa marítima desprovida de dados ultrapassa dezenas de quilômetros em alguns locais, dependendo da configuração da linha de costa. Fonte: *Remote Sensing Systems*, 2000.

A imagem SAR pode ser utilizada para determinar a direção do vento através da análise de feições estriadas por ele induzidas, visíveis na maioria das imagens SAR (HORSTMANN *et al.*, 2000). O vento que incide sobre a superfície da água cria vórtices alongados e devido à sua periodicidade, cuja direção é possível estimar (KIM & MOON, 2002). ALPERS *et al.* (1997) assumem que a direção média do vento é paralela à direção das estrias provocadas pelo mesmo (Figura 17), que são visíveis na imagem SAR.

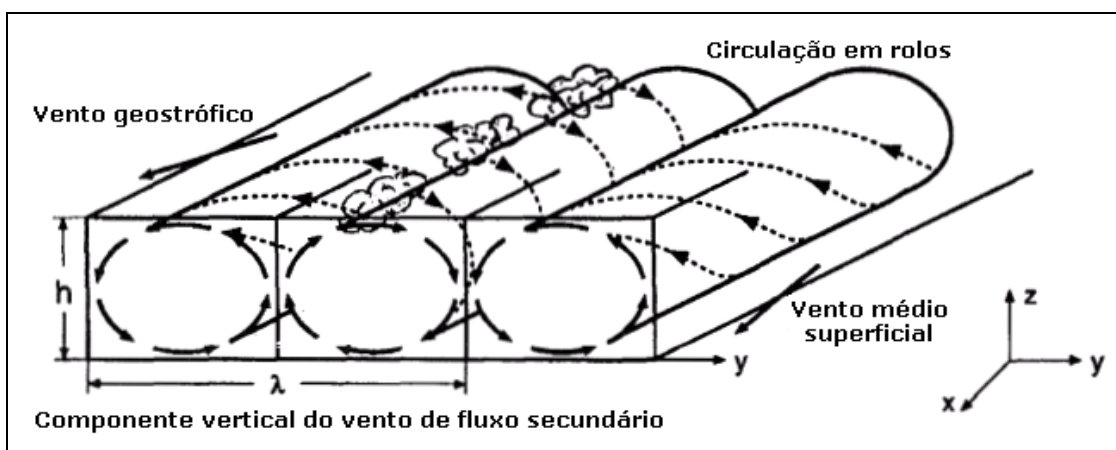


Figura 17 - Feições de fluxo secundário associadas aos rolos da camada limite atmosférica. Fonte: Modificado de ALPERS *et al.* 1997.

Existe uma ambiguidade de 180 graus na direção do vento estimada a partir das imagens SAR (STAPLES & MENDOZA, 2002). Essa ambiguidade pode ser resolvida utilizando-se informações sobrepostas (dados *in situ*, informações de modelos atmosféricos, escaterômetros) ou algum parâmetro extraído da própria imagem (ZECCHETTO & DE BIASIO, 2007), como sombras de vento (Figura 18).

Diferentes técnicas que utilizam tanto o domínio espectral quanto o domínio espacial podem ser utilizadas para determinar a orientação dos vórtices gerados pelo vento. KIM & MOON (2002) aplicaram o método da transformada de *Fourier* 2-D e ZECCHETTO & DE BIASIO (2007) utilizaram a transformada contínua *Wavelet* para determinar a direção do vento através de imagens SAR. KOCH (2004) utilizou o Método do Gradiente Local para o mesmo propósito.

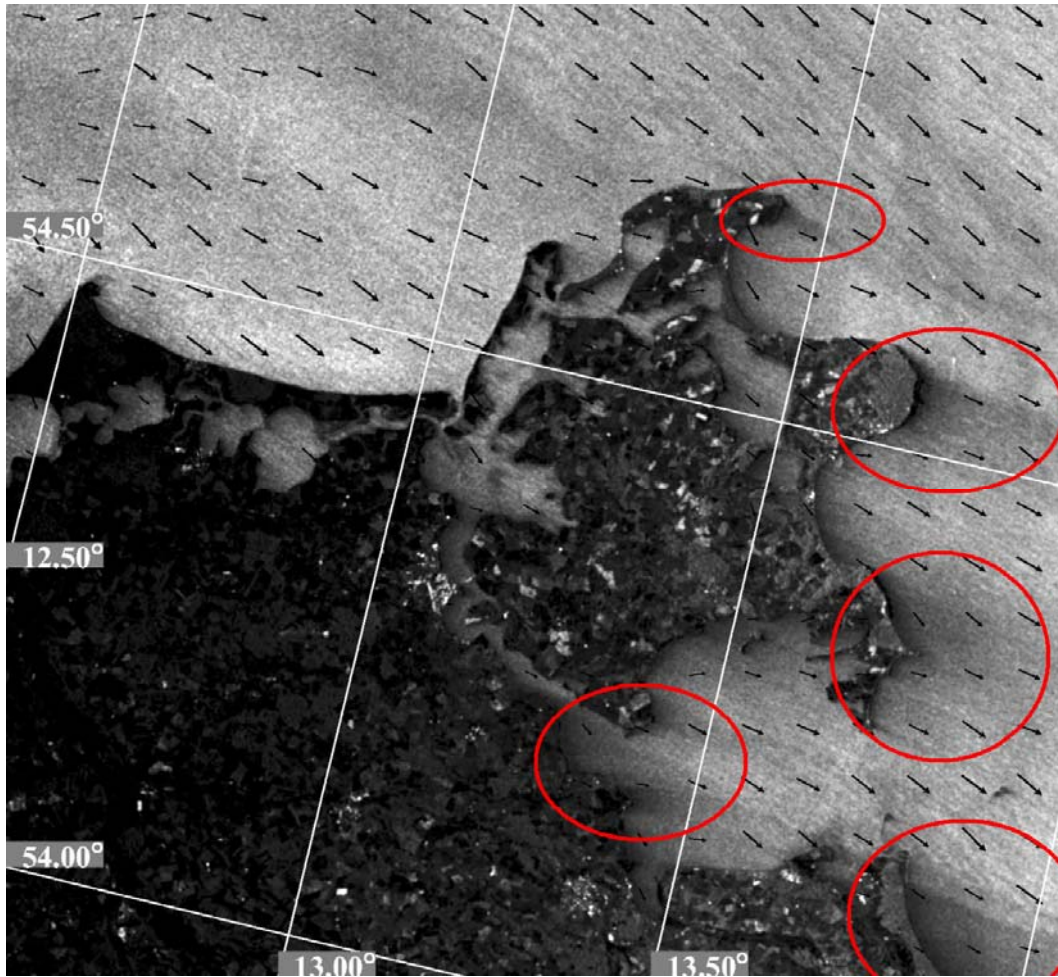


Figura 18 - Exemplo de sombras de vento provocadas pela costa destacados pelos polígonos vermelhos. Tais feições são indícios da direção do vento e permitem resolver a ambiguidade de 180°. A direção do vento é representada pelos vetores pretos. Fonte: Modificado de KOCH, 2004.

3.3. Modelos C-MOD

Os modelos C-MOD foram desenvolvidos com o objetivo de relacionar informações de direção e intensidade do vento com a seção transversal de radar (σ_0) operando em banda C (5,6 cm de comprimento de onda). A criação de modelos que permitem a relação de σ_0 , frequência do pulso (f) e ângulo de incidência desse pulso (θ) com a velocidade e direção do vento empregou relações empíricas entre o σ_0 , medido a partir de escaterômetros operando na banda C, e a velocidade e direção do vento, adquiridas em campo por embarcações e bóias. Através desses experimentos, chegou-se a formulação dos modelos empíricos C-MOD. O modelo CMOD-IFR2 aplicado neste trabalho, é composto pelas Equações 5 a 19.

$$\sigma_o = 10^{\alpha + \beta \times \sqrt{V}} \times (1 + b_1 \times \cos \phi + \tanh b_2 \times \cos 2\phi) \quad \text{Equação 5}$$

com:

$$\alpha = c_1 + c_2 \times P_1 + c_3 \times P_2 + c_4 \times P_3 \quad \text{Equação 6}$$

$$\beta = c_5 + c_6 \times P_1 + c_7 \times P_2 \quad \text{Equação 7}$$

onde:

$$P_1 = x \quad \text{Equação 8}$$

$$P_2 = \frac{(3x^2 - 1)}{2} \quad \text{Equação 9}$$

$$P_3 = \frac{x(5x^2 - 3)}{2} \quad \text{Equação 10}$$

$$x = \frac{(\theta - 36)}{19} \quad \text{Equação 11}$$

As variáveis b_1 e b_2 :

$$b_1 = c_8 + c_9 \times v_1 + c_{10} \times P_1 + c_{11} \times P_1 \times v_1 + c_{12} \times P_2 + c_{13} \times P_2 \times v_1 \quad \text{Equação 12}$$

$$b_2 = c_{14} + c_{15} \times P_1 + c_{16} \times P_2 + (c_{17} + c_{18} \times P_1 + c_{19} \times P_2) \times v_1 + (c_{20} + c_{21} \times P_1 + c_{22} \times P_2) \times v_2 + (c_{23} + c_{24} \times P_1 + c_{25} \times P_2) \times v_3 \quad \text{Equação 13}$$

onde:

$$P_1 = x \quad \text{Equação 14}$$

$$P_2 = 2x^2 - 1 \quad \text{Equação 15}$$

$$x = \frac{(2 \times \theta - 76)}{40} \quad \text{Equação 16}$$

$$v_1 = \frac{(2v - 28)}{22} \quad \text{Equação 17}$$

$$v_2 = 2v_1^2 - 1 \quad \text{Equação 18}$$

$$v_3 = v_1 \times (2v_2 - 1) \quad \text{Equação 19}$$

A variável v representa a velocidade em m.s^{-1} , θ é o ângulo de incidência e Φ é o ângulo relativo em graus. Os coeficientes c são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes c do modelo C-MOD-IFR2. Fonte: CLARO, 2007.

Coeficiente	Valor	Coeficiente	Valor	Coeficiente	Valor
c1	-2,437597	c10	0,08635	c19	0,015958
c2	-1,567031	c11	0,0551	c20	-0,069514
c3	0,370824	c12	-0,05845	c21	-0,062945
c4	-0,04059	c13	-0,0961	c22	0,035538
c5	0,404678	c14	0,412754	c23	0,023049
c6	0,188397	c15	0,121785	c24	0,074654
c7	-0,027262	c16	-0,024333	c25	-0,014713
c8	0,06465	c17	0,072163		
c9	0,0545	c18	-0,062954		

O C-MOD estima os valores de σ_0 a partir dos valores de velocidade e direção do vento a uma altura de 10 metros acima do nível do mar, considerando a atmosfera estável (ALPERS *et al.*, 1997). Portanto, é necessário calibrar a imagem para valores de σ_0 . Tal parâmetro caracteriza a magnitude de espalhamento de determinado alvo por unidade de área na direção do sensor. De acordo com a Equação 20, o σ_0 é definido como a seção transversal de radar de um alvo distribuído em uma área A , normalizado por essa área (KIM & MOON, 2002):

$$\sigma_0 = \sigma/A \quad \text{Equação 20}$$

A imagem SAR é composta por valores de DN (*Digital Numbers*) que representam a magnitude de cada *pixel*. Para transformar o valor de DN em σ_0 é necessário aplicar um fator de escala e uma função com o ângulo de incidência (SRIVASTAVA & SHEPHERD, 1998). O σ_0 é geralmente expresso em decibel, de acordo com as Equações 21 e 22.

$$\sigma_0 = \beta_0 + 10 \times \log_{10}(\sin \theta)(dB) \quad \text{Equação 21}$$

$$\beta_0 = 10 \times \log_{10} \left[\frac{(DN^2 + A_3)}{A_2} \right] (dB) \quad \text{Equação 22}$$

A variável θ representa o ângulo de incidência, A_2 é o ganho em função da distância, A_3 é o *offset* (geralmente igual a zero) e DN é o Número Digital apresentado na imagem (KIM & MOON, 2002).

Segundo HORSTMANN *et al.* (2000) erros na determinação da velocidade são fortemente relacionados com a precisão de σ_0 . A precisão radiométrica de uma imagem RADARSAT-1 *ScanSAR* varia de acordo com o centro de processamento, e está acima de 1,6 db. Portanto, é necessário considerar erros nos resultados de velocidade do vento causados por erros de calibração nos valores de σ_0 .

O modelo CMOD-IFR2 gera melhores resultados para o intervalo de velocidade entre 5 e 15 m.s⁻¹. Sob condições de vento fraco, tal modelo deve ser utilizado com cautela, pois em muitos casos, os fenômenos oceanográficos predominam sobre o padrão de σ_0 (FUREVIK, 2009).

Em geral, para determinada velocidade e direção de vento, existe um sinal de retorno característico. Contudo, a recíproca não é verdadeira. Para determinado sinal de retorno, existem uma série de pares de valores de velocidade e direção de vento correspondentes.

Essa ambiguidade implica que, para determinar a velocidade a partir de σ_0 , é necessário ter o conhecimento prévio da direção do vento. Segundo KIM & MOON (2002), a informação de direção do vento deve ser precisa para estimar a velocidade utilizando-se os modelos C-MOD (Figura 19).

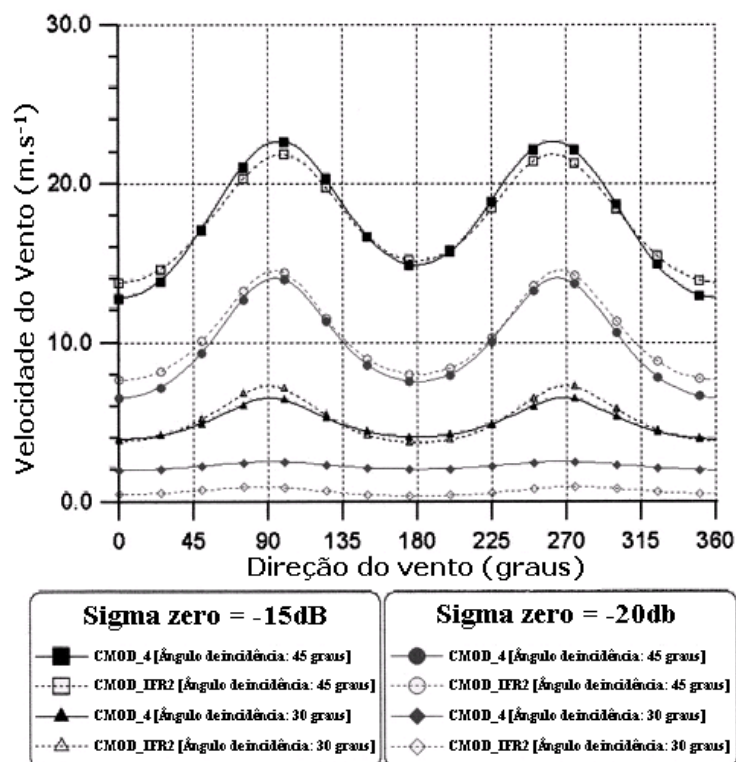


Figura 19 - Variação da velocidade do vento em função da direção, utilizando os modelos C-MOD4 e CMOD-IFR2, com valores de σ_0 de -15dB e -20dB, bem como θ de 30 e 45 graus. Fonte: Modificado de KIM & MOON, 2002.

Existem diferentes modelos empíricos como o C-MOD4 (STOFFELEN & ANERSON, 1997), o CMOD-IFR2 (QUILFEN, 1999) e o C-MOD5 (HERSBACH *et al.*, 2007), adequado para estimar velocidades mais intensas. Para que os modelos C-MOD apresentem resultados satisfatórios, é necessário que os dados iniciais sejam precisos, ou seja, que a imagem esteja calibrada de maneira correta e as informações auxiliares apresentem valores coerentes.

A imprecisão na direção do vento é a maior fonte de erro nos modelos C-MOD. A resolução espacial do dado, ou seja, a escolha do tamanho da célula da grade, também pode inserir erros nos resultados, assim como a calibração em σ_0 (HORSTMANN *et al.*, 2000).

Além disso, existem outras fontes de erro que podem influenciar a qualidade dos resultados, como a presença de feições superficiais dominadas por outros fatores, como filmes de óleo ou algas e a presença de gelo (LEHNER, 2001), que reduzem a rugosidade superficial da água. A topografia (HORSTMANN *et al.*, 2000; KIM & MOON, 2000) também altera os resultados, devido ao efeito das sombras de vento. O

aumento do ângulo de incidência e o aumento da velocidade implicam em acréscimo de erro na velocidade (HORSTMANN *et al.*, 2000).

3.4. Sensores Utilizados

No contexto tecnológico, os principais sensores de radar operando em banda C são o RADARSAT-1 e 2 e o ENVISAT. O satélite ENVISAT permite que o usuário escolha as combinações de bandas com polarizações diferentes. O RADARSAT-2 é atualmente um dos satélites de mais alta tecnologia e diversidade de opções. Além de operar em diferentes resoluções espaciais, variando de 3 a 100 metros, com ângulos de incidência de 10° a 50° , órbita ascendente e descendente, ele adquire dados polarimétricos e permite a aquisição de imagens com visadas tanto para direita quanto para a esquerda. Tal capacidade possibilita que a mesma região tenha mais opções de aquisições de dados emergenciais ou operacionais (VAN DER SANDEM, 2004).

3.4.1. Satélites RADARSAT

Os satélites RADARSAT foram desenvolvidos pela CSA – *Canadian Space Agency*. O primeiro satélite da série foi lançado em 1995 e o segundo em 2008. Os satélites RADARSAT-1 e 2 permitem especificar com grande flexibilidade o ângulo de incidência e a resolução espacial, através da escolha do modo de aquisição (Figura 20).

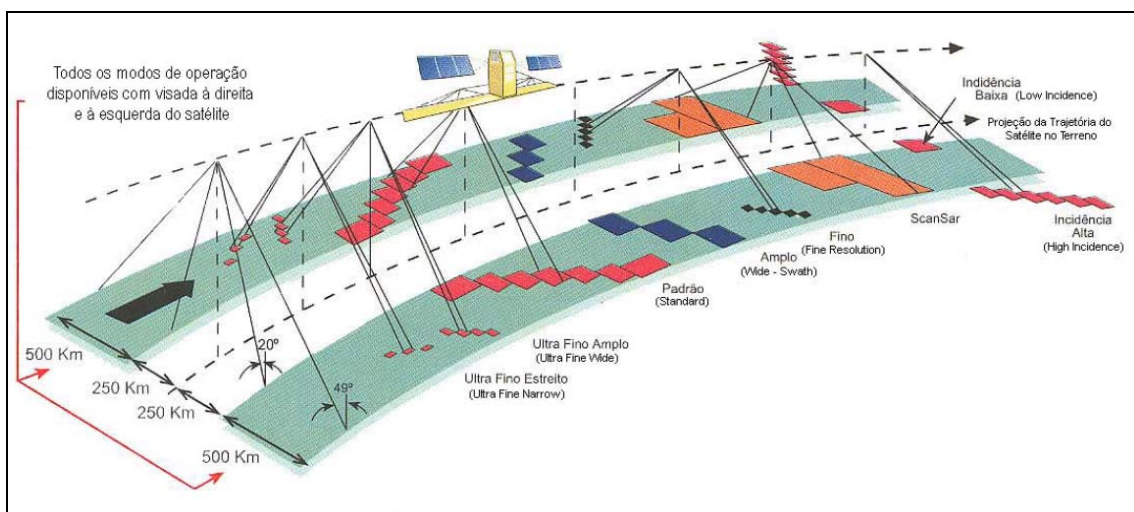


Figura 20 - Esquema ilustrando os diferentes modos de aquisição do satélite RADARSAT-2 Fonte: SILVA, 2010.

As características dos satélites RADARSAT-1 e 2 podem ser observadas na Tabela 3, enquanto que as especificações dos modos de aquisição estão descritas no Anexo.

Tabela 3 - Características dos satélites RADARSAT. Fonte: MDA, 2009.

	RADARSAT-1	RADARSAT-2
Geometria de órbita	Circular, sol-síncrona	Circular, sol-síncrona
Altitude	798 km	792 a 821 km
Inclinação	98,6°	98,6°
Período	100,7 minutos	100,7 minutos
Ciclo de repetição	24 dias	24 dias
Órbitas por dia	14	14
Frequência	5,300 GHz	5,405 GHz
Comprimento de onda	5,6 cm (banda C)	5,6 cm (banda C)
Polarização	HH (horizontal-horizontal)	HH, VV, HV, VH

O modo *Wide* permite a aquisição de dados em uma região abrangente, porém, à custa da resolução espacial que é reduzida. O modo *Wide 1* (W1) cobre uma faixa de aquisição de dados de aproximadamente 170 km com ângulos de incidência que variam de 20° no alcance próximo até 31° no alcance distante. STAPLES & MENDOZA (2002) afirmam que o modo *Wide* dos satélites RADARSAT é adequado para aquisição de informações de vento, pois oferece um balanço entre ângulo de incidência ideal (boa razão sinal-ruído) e cobertura espacial (165 km de faixa de aquisição de dados).

Os modos *ScanSAR* geram imagens que cobrem grandes áreas a partir da associação de outros modos de passagem simples. São ideais para fins de monitoramento. O modo *ScanSAR Narrow* é produzido a partir da composição de outros modos. O tamanho do *pixel* equivale a uma área de 50 x 50 metros e a cena total cobre uma área de 300 x 300 quilômetros. O tamanho da faixa de aquisição dos dados é de aproximadamente o dobro da faixa dos modos *Wide*. A combinação dos modos *Wide 1* (W1) e *Wide 2* (W2) geram o modo *ScanSAR Narrow A* (SCNA) com ângulo de incidência que varia entre 20° e 39°. A combinação dos modos *Wide 2* (W2), *Standard 5* (S5) e *Standard 6* (S6) geram o modo *ScanSAR Narrow B* (SCNB) com ângulo de incidência que varia entre 31° e 47° (MDA, 2009).

3.4.2. Escaterômetro *QUIKSCAT*

O *QuikSCAT* é um radar escaterômetro desenvolvido para gerar dados de direção e velocidade do vento na superfície oceânica. O satélite foi lançado em 1999, com o objetivo de dar continuidade à aquisição de dados de vento do satélite escaterômetro NSCAT da NASA, que parou de operar em 1997 (CLARO, 2007). O *QuikSCAT* operou até Novembro de 2009.

Tal satélite carregava a bordo o sensor *SeaWinds*, um radar ativo que emitia pulsos de energia eletromagnética para a superfície oceânica enquanto seguia em sua órbita. O sinal de retorno de cada pulso (σ_0) era registrado e relacionado com a velocidade do vento.

O *SeaWinds* operava na faixa do espectro eletromagnético da banda C, com polarização vertical e órbitas que cobriam uma faixa de 1800 km, amostrando 90% da superfície oceânica por dia (CLARO, 2007). O sensor media ventos de 3 a 20 m.s⁻¹, com resolução espacial de 0,25° x 0,25° e acurácia de 20° na direção e 2 m.s⁻¹ em intensidade (*Jet Propulsion Laboratory*, 2010).

As variáveis obtidas através dos arquivos disponibilizados no sítio *Remote Sensing Systems* são: horário de aquisição (UTC - *Coordinated Universal Time*, na literatura inglesa), velocidade do vento a 10 metros da superfície do oceano considerando-se estratificação atmosférica neutra (metros por segundo), direção do vento (graus) e marcação para presença de células de chuva.

Os arquivos estão organizados em matrizes de dimensão 1440x720x4x2, onde cada eixo representa, respectivamente, longitude (de 0° a 360°), latitude (de -90° a 90°), a variável observada e o seguimento de órbita do satélite, ascendente ou descendente. A primeira célula da matriz de dados é centrada na longitude 0,125°E e na latitude 89,875°, com resolução espacial de 0,25° x 0,25°.

Os dados de direção seguem a convenção oceanográfica, indicando o rumo do vento (o sentido para onde escoa) e não de onde ele vem, conforme é ilustrado na Figura 21. Esses dados são usados como variáveis iniciais nos modelos C-MOD para determinação da velocidade do vento.

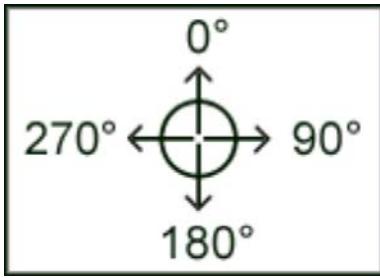


Figura 21 - Convenção oceanográfica da direção do vento aplicada aos dados do satélite *QuikSCAT*. Fonte: *Remote Sensing Systems*, 2010.

3.4.3. Anemômetros

Anemômetros são sensores de campo que registram a velocidade e a direção do vento com grande precisão. São geralmente instalados em mastros meteorológicos ou bóias a diferentes altitudes.

Por se tratar de um fluido viscoso, o ar em movimento está sujeito a forças de atrito que atuam na camada limite atmosférica. A intensidade e a direção do vento variam verticalmente, sendo que a intensidade diminui de altitudes maiores de aproximadamente 100 metros até a interface oceano/atmosfera ou superfície terrestre (Figura 22).

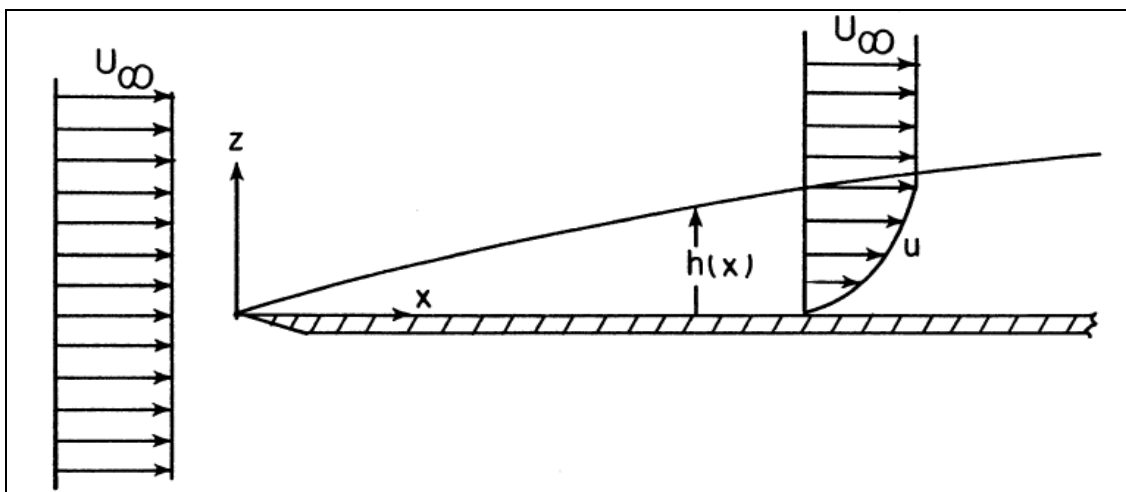


Figura 22 - Perfil de intensidade de um fluido viscoso como o ar (U_{∞}) em contato com um plano (e.g. interface oceano/atmosfera). As forças de atrito exercidas pelo plano reduzem a velocidade do fluido (u) verticalmente. Fonte: ARYA, 2001.

Neste trabalho, foram utilizadas informações de velocidade e direção do vento observadas por anemômetros instalados em plataformas da PEMEX a uma altura de 35 metros acima do nível médio do mar. Essas medidas foram inicialmente convertidas para uma altura de 10 metros acima do nível do mar utilizando a Lei de Potência do Perfil de Vento. Essa conversão é necessária, pois tanto os dados adquiridos pelo *QuikSCAT* como os resultados gerados pelo modelo CMOD-IFR2 consideram a velocidade do vento a 10 metros de altura. A Lei de Potência é definida pela Equação 23.

$$\frac{u_2}{u_1} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad \text{Equação 23}$$

A variável u_2 representa a velocidade do vento na altura de referência z_2 . A altura de referência geralmente é considerada no valor de 10 metros, que é a altura preconizada pela Organização Mundial de Meteorologia. A variável u_1 representa a velocidade do vento na altitude z_1 e o expoente α adimensional é função da estabilidade atmosférica, da velocidade do vento e da rugosidade aerodinâmica (ROBALLO & FISCH, 2008).

HSU *et al.* (1994) calcularam o valor de α para a superfície oceânica utilizando medições adquiridas por anemômetros distribuídos em plataformas produtoras de petróleo e bóias distribuídas pelo mar do Golfo do México e chegaram ao valor médio de 0,11.

4. METODOLOGIA

Nas seguintes seções serão descritos os materiais empregados no presente trabalho, assim como a metodologia utilizada.

4.1. Materiais

Para a realização deste trabalho foram utilizados os seguintes materiais:

1. Imagens RADARSAT-2 em diferentes modos de aquisição e datas;
2. Dados de velocidade e direção do vento do escaterômetro *QuikSCAT*;
3. Dados de velocidade e direção do vento de sensores *in situ*;
4. *Software* PCI Geomatica 10.3;
5. *Software* Matlab 10.

4.1.1. Dados RADARSAT-2

Os dados RADARSAT-2 foram disponibilizados pelo LabSAR (COPPE/UFRJ). O satélite RADARSAT-2 possui diferentes modos de aquisição. Foram utilizadas imagens resultantes dos modos de aquisição *ScanSAR Narrow* (SCNA e SCNB) e *Wide* (W1), com ângulos de incidência variáveis. Todas as imagens utilizadas são de polarização VV. O modo *Wide* cobre uma área de 150 km² e possui resolução espacial de 25 metros em alcance por 28 metros em azimute, e espaçamento de *pixel* de 12,5 metros. O modo *ScanSAR Narrow* cobre uma área de 300 km² e possui resolução espacial de 50 x 50m (alcance e azimute), com espaçamento de *pixel* de 25m.

4.1.2. Dados QUIKSCAT

Os dados *QuikSCAT* foram acessados no endereço eletrônico *Remote Sensing Systems*, através da aquisição de arquivos binários contendo informações diárias. Uma rotina do *software* Matlab foi utilizada para fazer a leitura dos dados, a seleção das variáveis velocidade e direção do vento e a preparação dessas variáveis para serem utilizadas como informações iniciais no modelo C-MOD.

Para a seleção dos dados *QuikSCAT*, foi considerada a informação disponível no momento mais próximo da aquisição da imagem RADARSAT-2.

4.1.3. Medições *in situ*

As informações adquiridas em campo foram coletadas por estações meteorológicas localizadas nas plataformas da PEMEX e no recife de Cayo Arcas no momento da aquisição das imagens RADARSAT-2. As informações foram fornecidas pelo LabSAR (COPPE/UFRJ). A localização espacial das estações foi demarcada na Figura 1 e nos mapas que ilustram as áreas que foram processadas para cada imagem selecionada (Figura 25 a Figura 31). Na Tabela 4, são apresentadas as coordenadas de cada estação, bem como sua altura em relação ao nível médio do mar.

Tabela 4 - Posição geográfica e altura das estações de medições de vento *in situ*.
Fonte: Dados fornecidos pelo LabSAR/COPPE.

Estação	longitude	latitude	altura (m)
IXTOC-A	92°12'37,31"W	19°24'26,09"N	35
ECO-1	92°01'05,57"W	19°01'47,66"N	35
REBOMBEO	92°37'08,09"W	18°56'45,14"N	35
CAYO ARCAS	91°59'27,00"W	20°11'27,09"N	10

De acordo com técnicos da PEMEX, os sensores medem a direção do vento seguindo a convenção da OMM (Organização Meteorológica Mundial), ou seja, o sentido de onde o vento vem.

Para efeitos de comparação, como o vento calculado pelos modelos C-MOD equivale a uma altura de 10 metros da superfície marinha, os valores medidos em campo a uma altura de 35 metros foram convertidos para a altura de 10 metros, através de equações que representam a camada limite para fluidos viscosos, como o ar (Item 3.4.3).

4.2. Métodos

A metodologia para estimativa de campos de vento a partir de imagens SAR foi empregada de acordo com as seguintes etapas:

1. Implantação do algoritmo CMOD-IFR2;
2. Seleção dos dados RADARSAT-2;
3. Processamento dos dados RADARSAT-2;
4. Preparação dos dados auxiliares;
5. Aplicação dos algoritmos;
6. Comparação e avaliação dos resultados.

4.2.1. Implantação do Algoritmo CMOD-IFR2

Os modelos C-MOD foram concebidos para determinar os valores de σ_0 a partir dos valores de velocidade e direção do vento. Para se determinar a velocidade do vento a partir de valores de σ_0 , é necessário inverter os modelos C-MODs.

Foi utilizado neste trabalho o modelo direto CMOD-IFR2. Sua inversão foi baseada na metodologia proposta por CLARO (2007), onde, para se determinar a velocidade do vento (V), é atribuído um valor inicial de velocidade de 0 m.s^{-1} ao modelo C-MOD direto. O σ_0 calculado é comparado ao valor medido na imagem SAR. Caso a diferença entre os dois valores seja grande, um segundo ciclo de cálculos é realizado, tomando como valor inicial de V , o valor anterior acrescido de $0,001 \text{ m.s}^{-1}$.

Os ciclos são repetidos até o σ_0 calculado convergir para o σ_0 medido na imagem SAR. A interação é interrompida quando a diferença entre os valores de σ_0 calculado e medido se apresenta igual ou menor a 1%. Esse processo é realizado em cada *pixel* da imagem, gerando, para cada célula de resolução, um valor correspondente de V .

O algoritmo baseado nas formulações do modelo CMOD-IFR2 inverso foi implantado em rotina do *software* Matlab. Os *pixels* que apresentaram valores de σ_0 errôneos e, conseqüentemente, as velocidades do vento modeladas foram maiores que 20 m.s^{-1} , tiveram seus valores descartados do processamento e foram marcados como *NaN* (*Not a Number*).

4.2.2. Seleção dos Dados RADARSAT-2

Para a seleção dos dados RADARSAT-2, foram considerados os seguintes critérios:

1. Disponibilidade de imagens RADARSAT-2 no acervo do LabSAR;
2. Disponibilidade de dados *QuikSCAT* próximos ao momento da aquisição dos dados SAR, pois as informações de direção foram utilizadas para iniciar o modelo C-MOD-IFR2, e as informações de velocidade foram aplicadas nas análises comparativas dos resultados;
3. Maior número possível de estações *in situ* (IXTOC-A, ECO-1, Rebombero e Cayo Arcas) dentro do recorte retangular cobrindo apenas a região marinha de cada imagem. Dependendo da orientação da imagem e da linha de costa, todas as estações se localizavam fora do recorte. Como as informações *in situ* foram utilizadas para validar os resultados, imagens cujo recorte não abrangia nenhuma das quatro estações foram descartadas;
4. Imagens com distribuição espacial homogênea de valores de σ_0 e ausência de manchas escuras provocadas por filmes de óleo, que acrescentam ruído aos resultados;
5. Modos de aquisição com ângulos de incidência compatíveis a metodologia proposta.

4.2.3. Processamento dos Dados RADARSAT-2

As imagens RADARSAT-2 fornecem duas variáveis iniciais para os modelos C-MOD, o sinal de retorno normalizado (σ_0) e o ângulo de incidência (θ). A rotina de processamento das imagens para geração da variável σ_0 foi definida em quatro etapas.

1. Calibração Absoluta em σ_0

Para este cálculo, foi utilizado o *software* PCI Geomatica Focus que já possui rotinas para calibração da imagem em valores de σ_0 . Cabe ressaltar que os valores de σ_0

devem estar em escala linear e não em escala logarítmica, pois os mesmos terão seus valores médios calculados.

2. Registro das imagens

O registro das imagens foi realizado utilizando-se modelo polinomial do *software* PCI Geomatica OrthoEngine e os pontos de controle armazenados no próprio dado SAR.

3. Recorte da área de interesse

A área de interesse foi recortada utilizando um polígono para delimitá-la. Esse procedimento foi realizado para que todas as matrizes de dados de cada campo (σ_0 , θ e Φ) ficassem com as mesmas dimensões, facilitando a inicialização do algoritmo de estimativa da velocidade do vento.

4. Re-amostragem espacial

A re-amostragem espacial foi realizada utilizando-se o algoritmo RESAMP (*Average*) da versão 10.3 do *software* PCI Geomatica. O algoritmo re-amostra os *pixels* da imagem calculando os valores médios das células resultantes e reduzindo, dessa forma, o efeito de *speckle*. Conforme mencionado anteriormente, a média dos valores de σ_0 devem estar em escala linear e não em escala logarítmica. As imagens foram re-amostradas para um tamanho de *pixel* com lados de aproximadamente 1600 x 1600 metros.

A rotina de processamento das imagens para geração da variável θ foi definida em quatro etapas. Para a criação da imagem θ , foi utilizado o segmento de informação com a variação dos ângulos de incidência na direção de alcance. Esse segmento é disponibilizado com os dados RADARSAT-2. É necessário repetir os valores de θ contidos em cada linha na direção de azimute. Para tanto, foi utilizado o algoritmo PSINANG do *software* PCI Geomatica Focus.

As etapas seguintes (registro das imagens θ , recorte da área de interesse e re-amostragem espacial) são semelhantes às etapas para criação das imagens σ_0 .

4.2.4. Preparação dos Dados Auxiliares

Dados *QuikSCAT*

A metodologia para adequação dos dados do *QuikSCAT* se baseia no trabalho de CLARO (2007). Os dados foram obtidos no sítio *Remote Sensing Systems* (2010). Foram utilizados dados diários das variáveis velocidade e direção do vento, para as datas das imagens analisadas.

Como os dados *QuikSCAT* são organizados em matrizes de dimensão 1440x720x4x2, foi utilizada uma rotina no aplicativo Matlab para separar as informações relevantes (variáveis direção e velocidade do vento) do restante da matriz de dados. As matrizes de direção e velocidade foram recortadas para a região do polígono de interesse.

Como as informações de direção do *QuikSCAT* foram utilizadas como variável inicial do modelo C-MOD inverso, as matrizes com os valores de direção foram re-amostradas espacialmente para ficar com as mesmas dimensões das matrizes preparadas a partir das imagens SAR (σ_0 , θ). A re-amostragem espacial foi realizada no *software* PCI Geomatica Focus.

A velocidade do vento fornecida pelo *QuikSCAT* foi utilizada para comparar com os resultados calculados; portanto, suas matrizes não foram re-amostradas. No entanto, para efeito de comparação, as matrizes contendo os resultados de velocidade do vento calculados a partir das imagens SAR foram re-amostradas para a mesma resolução das matrizes de vento do *QuikSCAT*, ou seja, de um *pixel* com lados de aproximadamente 1600 x 1600 metros para um *pixel* de aproximadamente 25000 x 25000 metros.

Dados de Anemômetros

As informações de velocidade observadas em campo a uma altura de 35 metros foram convertidas para uma altura de 10 metros. Para isso, a Equação 23 descrita no item 3.4.3 foi reescrita na Equação 24.

$$u_2 = u_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad \text{Equação 24}$$

A variável u_2 representa a velocidade do vento a 10 metros de altitude, $z_2 = 10$ metros, $z_1 = 35$ metros, ou seja, a altura em que os anemômetros se encontram, e u_1 equivale a velocidade registrada na altura $z_1 = 35$ metros. Para o expoente α foi considerado o valor proposto por HSU *et al.* (1994) para superfícies oceânicas ($\alpha = 0,11$). Considerando esses valores, a Equação 24 é escrita em função da velocidade (Equação 25).

$$u_2 = u_1 \times 0,87 \quad \text{Equação 25}$$

4.2.5. Aplicação dos Algoritmos

O modelo CMOD-IFR2 inverso foi desenvolvido em rotina do *software* Matlab e utilizou, como informações iniciais, valores de σ_0 e ângulos de incidência obtidos a partir dos dados SAR, assim como valores de direção do vento obtidos pelo escaterômetro *QuikSCAT*.

4.2.6. Comparação e Avaliação dos Resultados

Os resultados obtidos foram avaliados comparando-se os valores de velocidade calculados pelo modelo CMOD-IFR2 com os valores de referência. Foram utilizados os seguintes dados como informações de referência:

- Velocidade obtida pelo escaterômetro *QuikSCAT*;
- Medições pontuais *in situ*.

A comparação entre os resultados e os dados *QuikSCAT* foi feita através do cálculo do coeficiente de correlação e do cálculo do erro médio quadrático (RMS ou *Root Mean Square*), cuja sua formulação (Equação 26) é descrita por CLARO (2007).

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N}}$$

Equação 26

X_i é o valor calculado a partir das imagens SAR, Y_i é o valor de referência do QuikSCAT e N é o número de observações comparadas.

Cabe ressaltar que as matrizes contendo os resultados calculados pelo CMOD-IFR2 foram re-amostradas para a mesma resolução das matrizes de referência, ou seja, de aproximadamente 1,6 km para aproximadamente 25 km.

A comparação entre os resultados e os dados *in situ* foi feita através da diferença entre os valores medidos em campo e da média dos *pixels* vizinhos à posição das estações. Os *pixels* contendo as estações não foram considerados por apresentarem valores de σ_0 saturados, devido ao efeito de *double bounce*, apresentando velocidades calculadas não representativas.

O RMS também foi calculado para as comparações pontuais, onde X_i representa o valor modelado a partir das imagens SAR, Y_i equivale ao valor de referência do anemômetro e N é o número de observações comparadas. Nesse caso, como existiam, no máximo, quatro observações por campo de vento calculado, N equivaleu a todas as comparações pontuais dos sete campos, ou seja, o RMS foi calculado uma única vez para todo o conjunto de observações, e não para cada um dos sete campos individualmente.

Esse mesmo procedimento foi aplicado na avaliação dos dados QuikSCAT, onde X_i representa o valor da célula de 25 km na qual a estação de campo se localiza e Y_i equivale ao valor de referência do anemômetro instalado na estação.

5. RESULTADOS

Nas seções seguintes, estão contidos os resultados obtidos. A avaliação da consistência do modelo CMOD-IFR2 é apresentada na seção 5.1. A seção 5.2 descreve os dados RADARSAT-2 utilizados e a seção 5.3 descreve os dados auxiliares. Os valores calculados são apresentados na seção 5.4 e os resultados obtidos por outros autores são apresentados na seção 5.5.

5.1. Consistência do Modelo CMOD-IFR2

A confiabilidade nos resultados gerados por modelos empíricos depende, a priori, da consistência do algoritmo utilizado. Caso o algoritmo não tenha sido implementado de maneira correta, os resultados apresentarão erros sistemáticos não relacionados a erros provenientes das informações iniciais (calibração do sinal de radar, ou direção do vento). Portanto, a consistência do modelo CMOD-IFR2 codificado em rotina do *software* Matlab foi avaliada para fins de validação do algoritmo utilizado. Dois experimentos foram realizados comparando os resultados apresentados na literatura com os resultados gerados pelo algoritmo implementado.

No primeiro experimento, o resultado de uma simulação do modelo direto foi comparado ao resultado da mesma simulação realizada por HORSTMANN *et al.* (2000). Na simulação, os valores de σ_0 foram calculados para velocidades de 5 a 25 m.s^{-1} , variando o ângulo de visada (ϕ) entre 0° e 360° . Esses valores foram calculados para um ângulo de incidência (θ) fixo de 45° . As curvas resultantes dessa simulação estão representadas na Figura 23.

O segundo experimento consistiu na estimativa de valores de NRCS a partir de valores de vento variando de 2 a 24 m.s^{-1} para um ângulo de incidência (θ) fixo de 40° e ângulos de visada (ϕ) de 90° e 180° . O resultado foi comparado ao mesmo experimento realizado por CHRISTIANSEN *et al.* (2006).

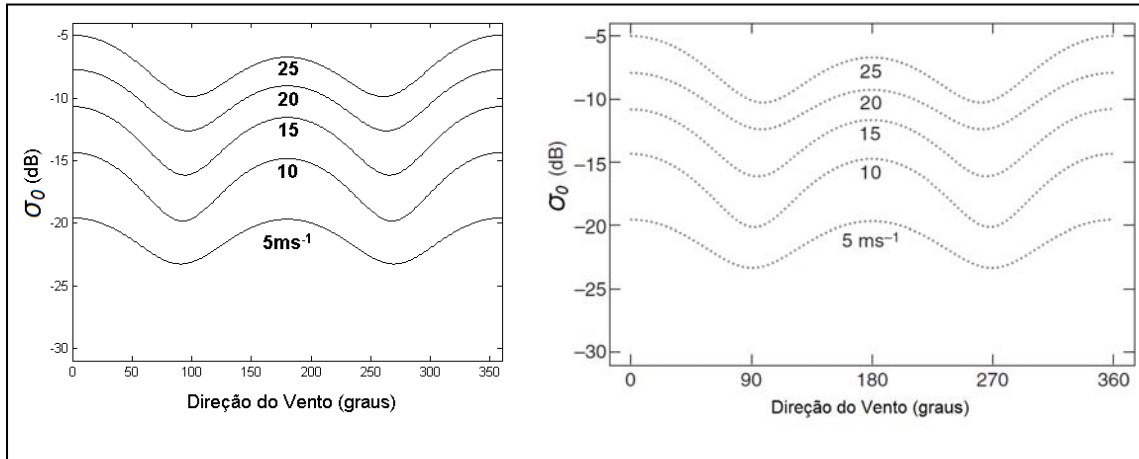


Figura 23 - Resultados do experimento para validação do algoritmo CMOD-IFR2 implementado em Matlab. À esquerda, o resultado calculado neste trabalho: curvas representando velocidades de vento de 5, 10, 15, 20 e 25 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ para ângulos de visada (Φ) variando entre 0° e 360° e ângulo de incidência (θ) fixo de 45° . A direita, figura modificada do trabalho de HORSTMANN *et al.* (2000) ilustrando o mesmo experimento.

A rotina do modelo CMOD-IFR2 inverso também foi avaliada repetindo o segundo experimento. Porém, dessa vez, o vento foi calculado a partir de diferentes valores de σ_0 . Os resultados do segundo experimento são apresentados na Figura 24.

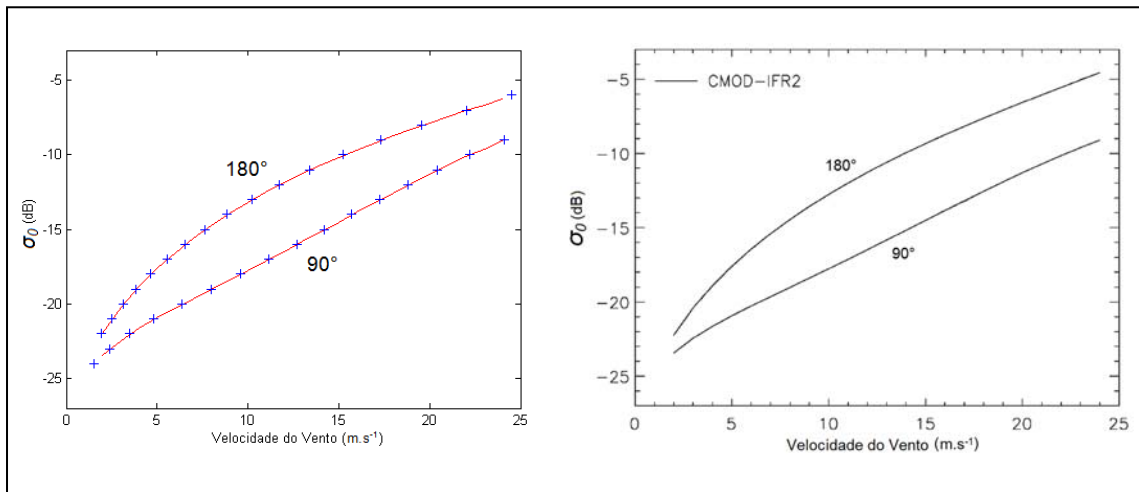


Figura 24 - Resultados do experimento para validação do algoritmo CMOD-IFR2 implementado em Matlab. À esquerda, o resultado calculado neste trabalho: curvas vermelhas representando valores de σ_0 calculados a partir de velocidades do vento variando de 2 a 24 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ para ângulos de visada (Φ) de 90° e 180° e ângulo de incidência (θ) fixo de 40° . As cruzes azuis representam o experimento inverso, onde os valores da velocidade do vento foram calculados a partir de valores de σ_0 . A direita, figura modificada do trabalho de CHRISTIANSEN *et al.* (2006) ilustrando o mesmo experimento.

Os experimentos descritos evidenciam que o modelo CMOD-IFR2 foi devidamente codificado e implementado em linguagem do *software* Matlab.

5.2. Dados RADARSAT-2 Utilizados

A seguir, são apresentados os dados de polarização VV e características distintas que foram utilizados. Apesar de o LabSAR possuir um grande acervo de imagens RADARSAT-2, o número de cenas que atendiam aos critérios de seleção descritos na seção 4.2.2 ficou reduzido a sete.

Na Tabela 5, são apresentadas as informações de cada imagem selecionada (modo de aquisição, *beam mode*, variação do ângulo de incidência e órbita).

Tabela 5 - Características dos dados SAR selecionados. Fonte: MDA (2010).

Nome	Modo	Beams	Variação do ângulo de incidência	Órbita
SCNB_20080630	<i>ScanSAR Narrow</i> (SCNB)	W2 S5 S6	30,6° a 46,7°	Ascendente
SCNB_20080731	<i>ScanSAR Narrow</i> (SCNB)	W2 S5 S6	30,6° a 46,7°	Ascendente
SCNA_20080814	<i>ScanSAR Narrow</i> (SCNA)	W1 W2	19,4° a 39,5°	Ascendente
SCNA_20080831	<i>ScanSAR Narrow</i> (SCNA)	W1 W2	19,4° a 39,5°	Ascendente
W1_20080908	<i>Wide</i>	W1	19,5° a 31,2°	Descendente
W1_20081026	<i>Wide</i>	W1	19,5° a 31,2°	Descendente
SCNB_20090508	<i>ScanSAR Narrow</i> (SCNB)	W2 S5 S6	30,6° a 46,7°	Ascendente

As imagens utilizadas estão representadas na Figura 25 até a Figura 31. O polígono amarelo delimita a área onde o vento foi calculado e os diamantes vermelhos marcam as posições das estações que adquiriram as informações *in situ*. É possível reparar que algumas áreas de processamento não abrangeram todas as quatro estações.

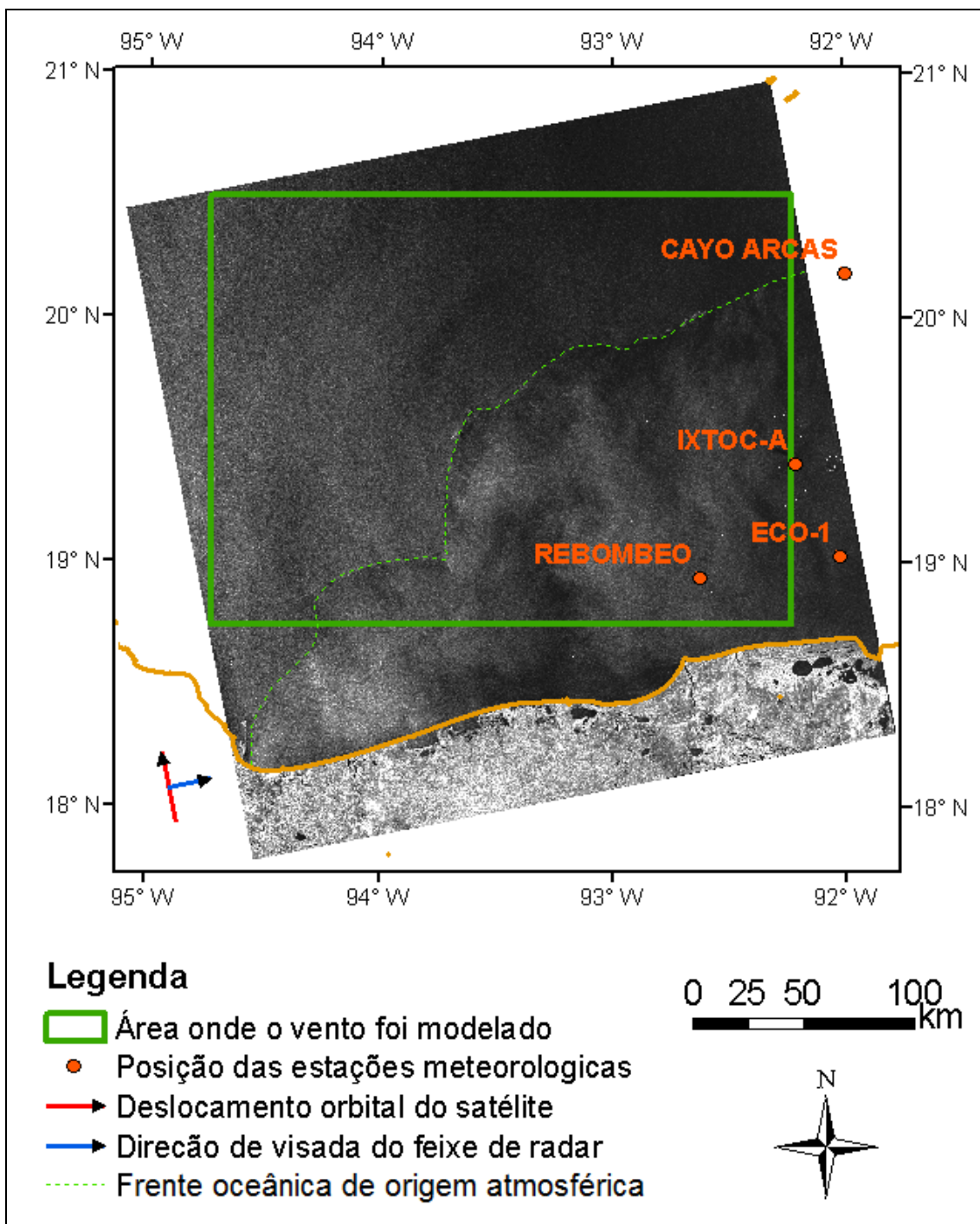


Figura 25 - Imagem SAR, modo *ScanSAR Narrow* (SCNB), de 30 de junho de 2008, horário de aquisição 00:23:34 UTC, passagem ascendente. Os *pixels* saturados na região oceânica representam plataformas petrolíferas ou embarcações.

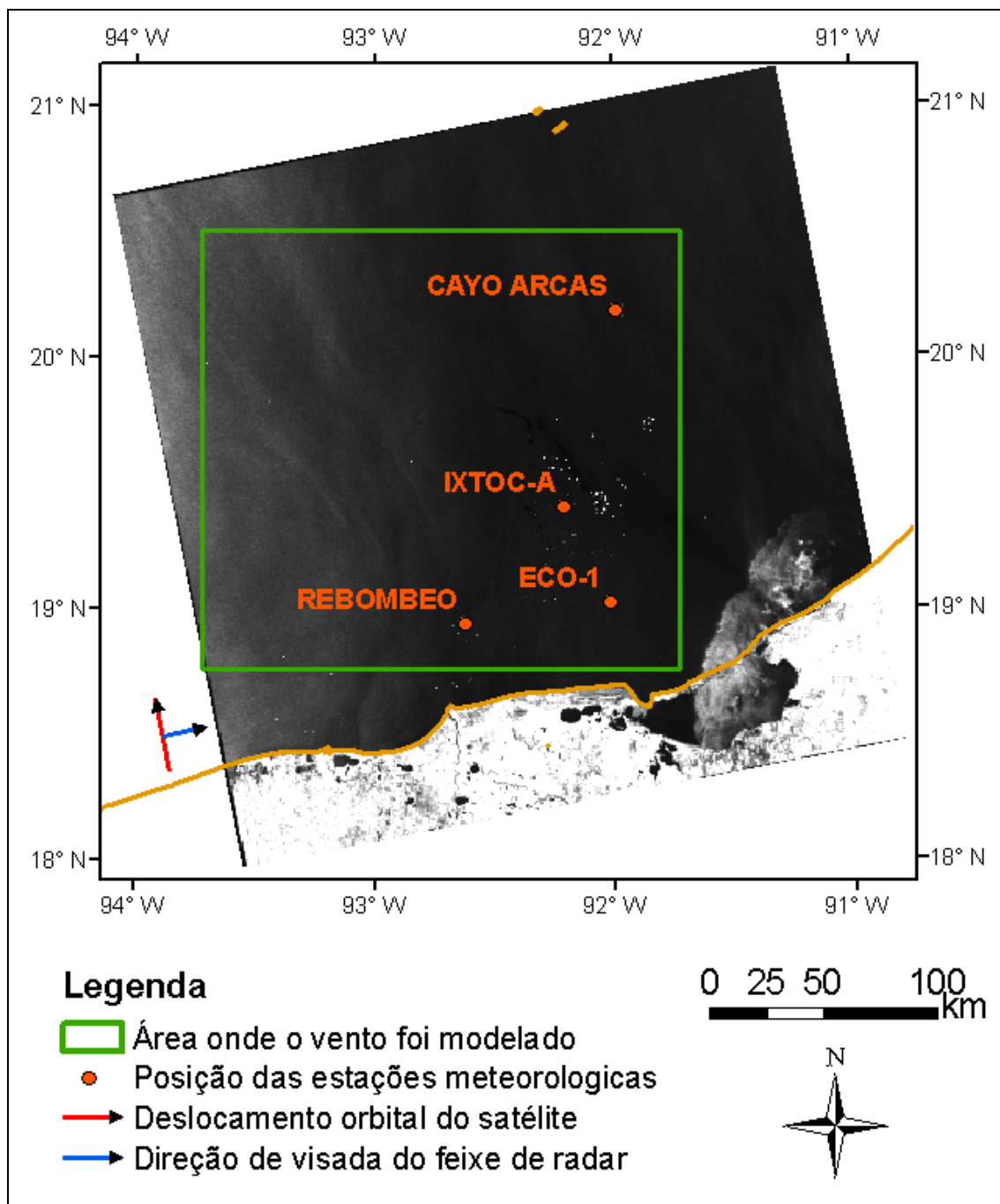


Figura 26 - Imagem SAR, modo *ScanSAR Narrow* (SCNB), de 31 de julho de 2008, horário de aquisição 00:19:27 UTC, passagem ascendente. Os *pixels* saturados na região oceânica representam plataformas petrolíferas ou embarcações.

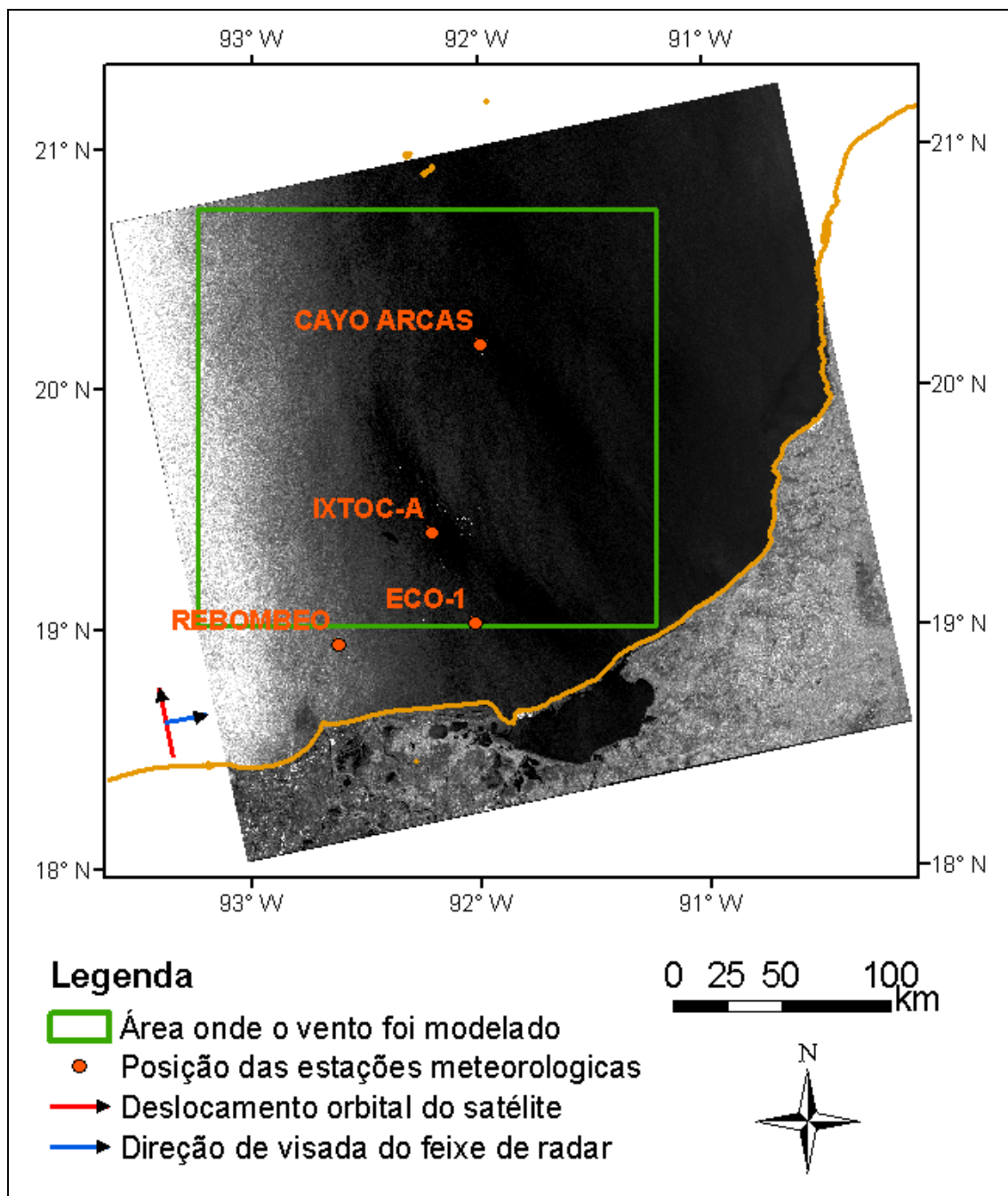


Figura 27 - Imagem SAR, modo *ScanSAR Narrow* (SCNA), de 14 de agosto de 2008, horário de aquisição 00:11:12 UTC, passagem ascendente. Os *pixels* saturados na região oceânica representam plataformas petrolíferas ou embarcações.

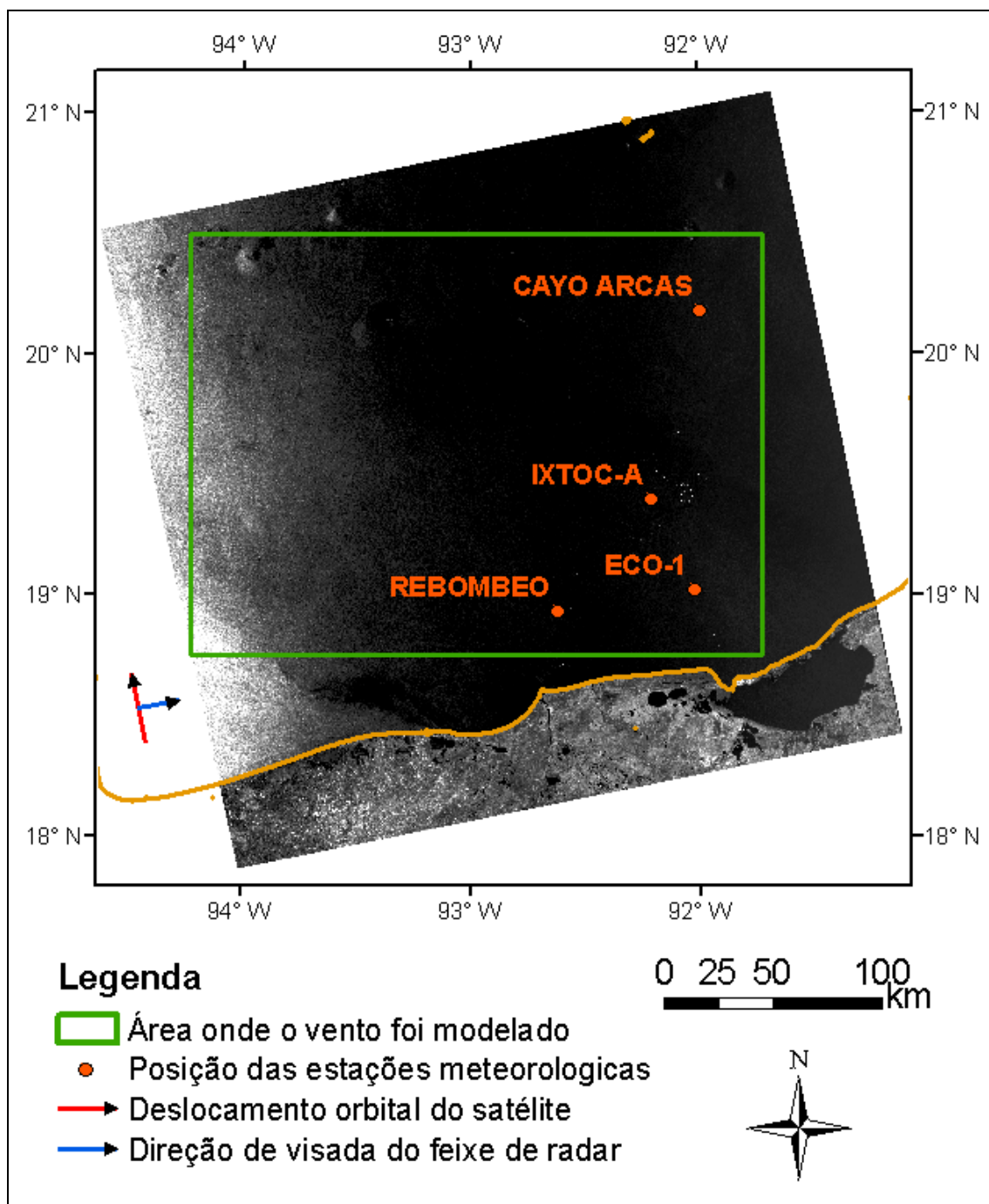


Figura 28 - Imagem SAR, modo *ScanSAR Narrow* (SCNA), de 31 de agosto de 2008, horário de aquisição 00:15:21 UTC, passagem ascendente. Os *pixels* saturados na região oceânica representam plataformas petrolíferas ou embarcações.

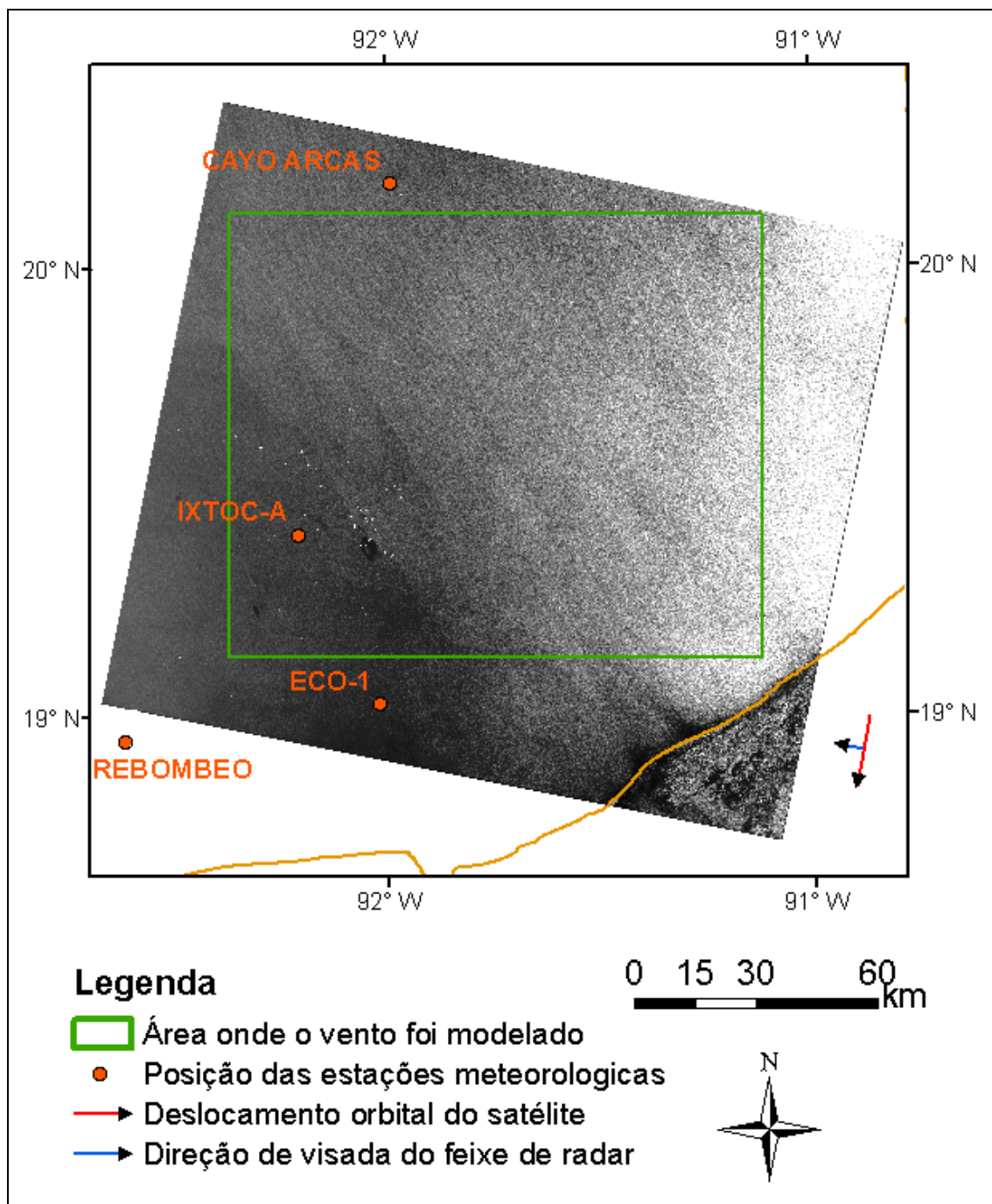


Figura 29 - Imagem SAR, modo *Wide* (W1), de 08 de setembro de 2008, horário de aquisição 12:07:00 UTC, passagem Descendente. Os *pixels* saturados na região oceânica representam plataformas petrolíferas ou embarcações.

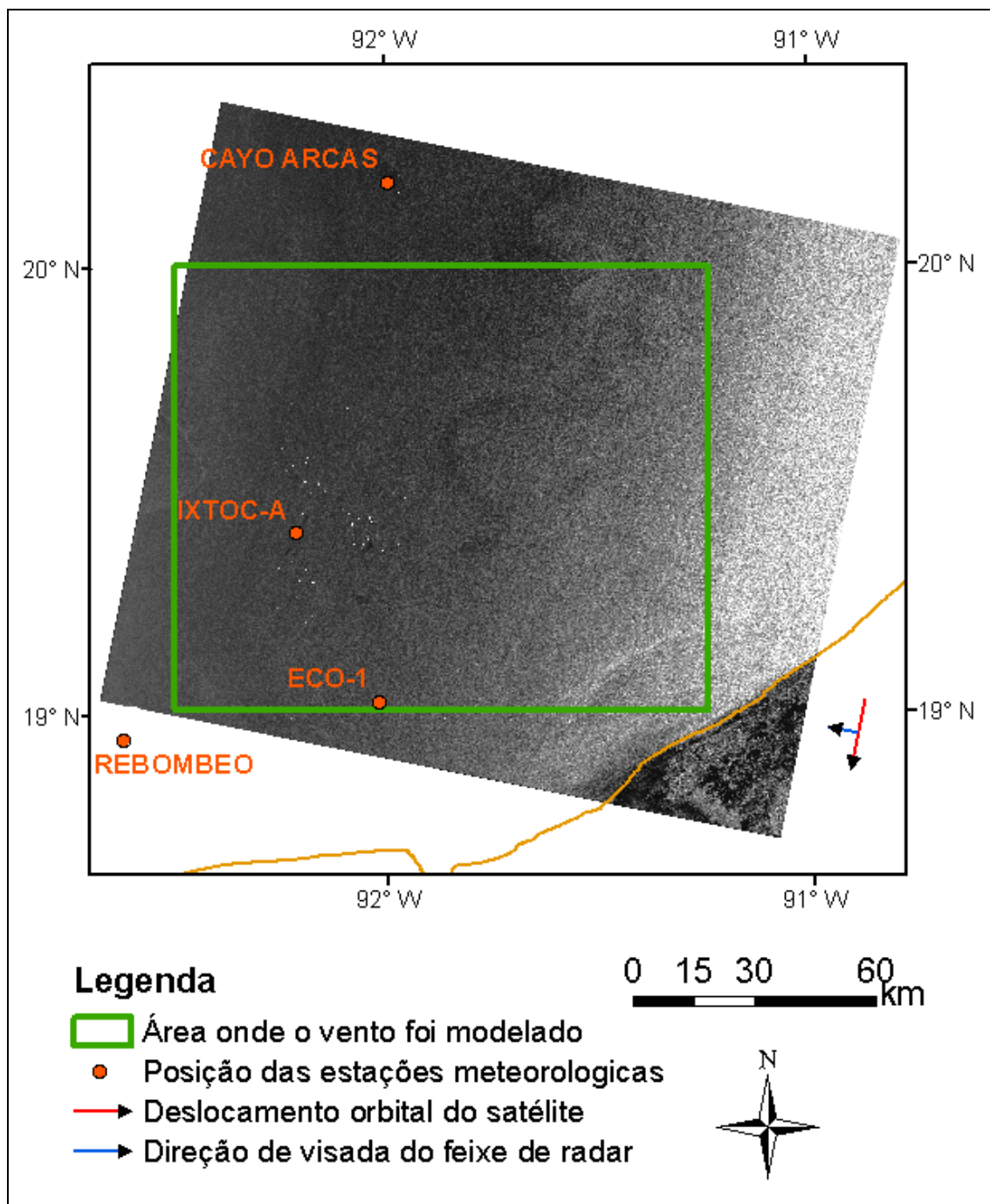


Figura 30 - Imagem SAR, modo *Wide* (W1), de 26 de outubro de 2008, horário de aquisição 12:07:04 UTC, passagem descendente. Os *pixels* saturados na região oceânica representam plataformas petrolíferas ou embarcações.

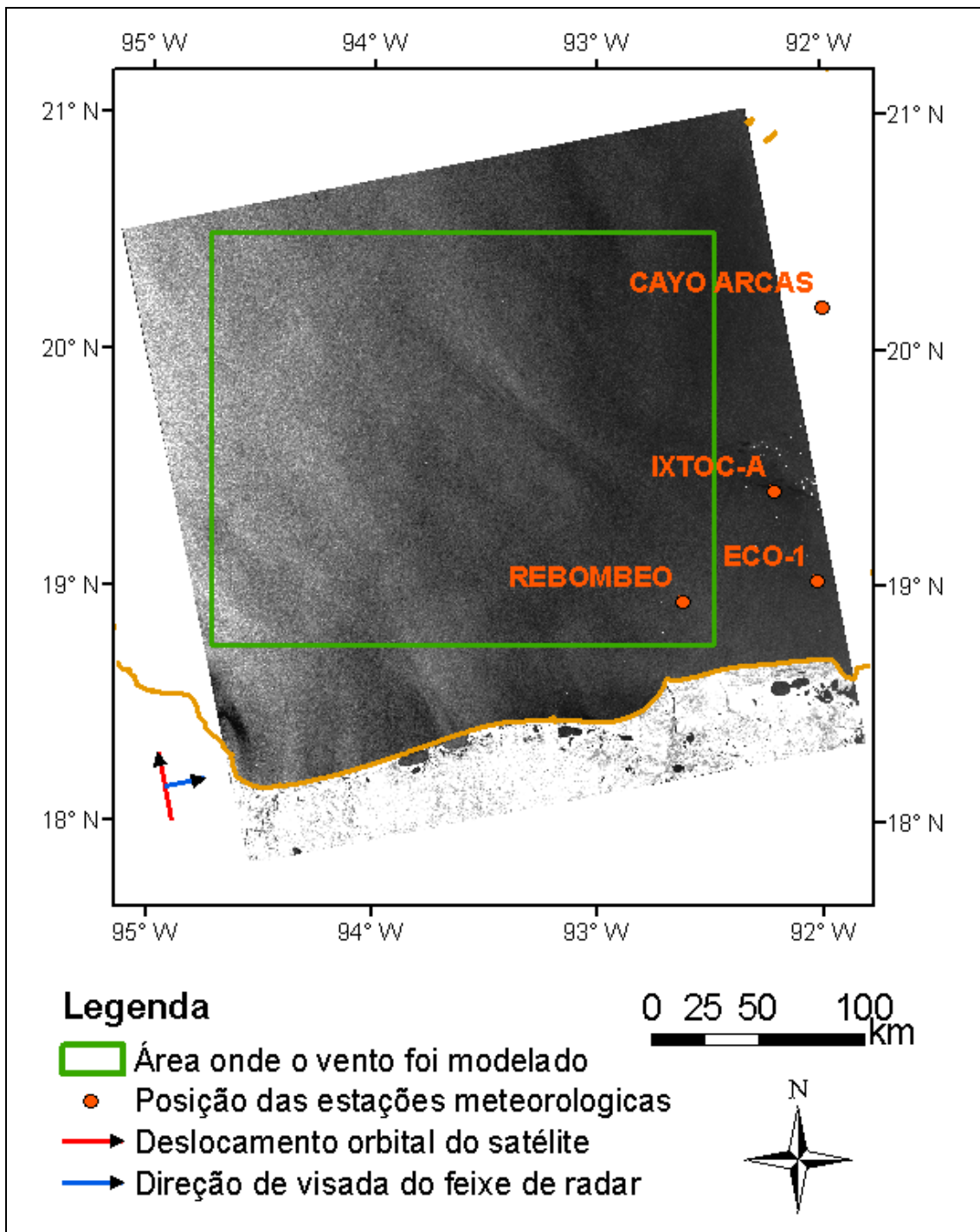


Figura 31 - Imagem SAR, modo *ScanSAR Narrow* (SCNB), de 08 de maio de 2009, horário de aquisição 00:23:50 UTC, passagem ascendente. Os *pixels* saturados na região oceânica representam plataformas petrolíferas ou embarcações.

5.3. Dados Auxiliares Utilizados

Os dados auxiliares foram selecionados de acordo com a proximidade de horário de aquisição das imagens SAR. O momento (UTC) da aquisição dos dados SAR, *QuikSCAT* e *in situ* são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Data e horário (UTC) de aquisição das imagens SAR (Fonte: LabSAR/COPPE, 2010), dados *QuikSCAT* (Fonte: *Remote Sensing Systems*, 2010), e informações *in situ* das estações IXTOC-A, ECO-1 e Rebombeco e Cayo Arcas (Fonte: LabSAR/COPPE, 2010). As datas destacadas em cinza apresentam defasagem entre os horários de aquisição dos dados SAR e *QuikSCAT*.

	Imagem SAR		<i>QuikSCAT</i>		Sensor <i>in situ</i>
	Data	Hora	Data	Hora	Hora
SCNB_20080630	30/6/2008	00:23:34	29/6/2008	11:54:00	00:23:27
SCNB_20080731	31/7/2008	00:19:27	31/7/2008	00:18:00	00:19:18
SCNA_20080814	14/8/2008	00:11:12	14/8/2008	00:54:00	00:11:01
SCNA_20080831	31/8/2008	00:15:21	31/8/2008	00:12:00	00:15:10
W1_20080908	8/9/2008	12:07:00	8/9/2008	00:06:00	12:06:48
W1_20081026	26/10/2008	12:07:04	26/10/2008	12:06:00	12:06:48
SCNB_20090508	8/5/2009	00:23:50	8/5/2009	00:18:00	00:23:32

As informações das quatro estações foram adquiridas quase simultaneamente ao instante da aquisição da imagem SAR. Observa-se, no entanto, que, para os dias 30/06/2008 e 08/09/2008, existe uma defasagem de aproximadamente 12 horas entre os momentos de aquisição das imagens SAR e os dados *QuikSCAT*, fato que pode influenciar nos resultados de vento calculado.

Como os valores de velocidade do vento provenientes do *QuikSCAT* foram utilizados como base de comparação dos resultados, os mesmos foram previamente avaliados por meio de comparações com as observações *in situ* da PEMEX, com o objetivo de observar se existe concordância entre os dois tipos de dados. As medidas *in situ* observadas a uma altitude de 35 metros foram convertidas para uma altitude de 10 metros (Tabela 7).

Tabela 7 - Velocidade do vento medida *in situ* a uma altura de 35 metros, e os mesmos valores convertidos para a altura de 10 metros acima do nível do mar. Os valores da estação Cayo Arcas não foram convertidos, pois foram adquiridos a 10 metros de altura.

Estações		30/06/2008	31/07/2008	14/08/2008	31/08/2008	08/09/2008	26/10/2008	08/05/2009
Velocidade <i>in situ</i> observada a 35 metros de altitude (m.s ⁻¹)	IXTOC-A	7,6	4,8	3,4	3,4	4,8	9,0	7,6
	ECO-1	6,2	2,0	3,4	7,6	3,4	7,6	7,6
	Rebombeo	9,0	4,8	6,2	4,1	2,0	9,0	7,6
Velocidade <i>in situ</i> convertida de 35 para 10 metros de altitude (m.s ⁻¹)	IXTOC-A	6,6	4,2	3,0	3,0	4,2	7,8	6,6
	ECO-1	5,4	1,7	3,0	6,6	3,0	6,6	6,6
	Rebombeo	7,8	4,2	5,4	3,6	1,7	7,8	6,6
Velocidade <i>in situ</i> observada a 10 metros de altitude (m.s ⁻¹)	Cayo Arcas	5,5	3,4	3,4	4,8	9,0	6,2	4,1

As velocidades convertidas para 10 metros de altura apresentaram valores inferiores as velocidades originais observadas a 35 metros. Esse resultado era esperado, pois a 10 metros, as forças de atrito atuantes sobre o ar em movimento são maiores que a 35 metros, devido à maior proximidade da interface oceano/atmosfera.

Na Tabela 8, são apresentados os valores médios pontuais das estações IXTOC-A, ECO-1, Rebombeo e Cayo Arcas equivalentes a 10 metros. São apresentados também os valores espacialmente mais próximos das estações, adquiridos pelo escaterômetro *QuikSCAT* e a diferença entre esses dois valores (*in situ* a 10 m de altura menos *QuikSCAT*).

Ao considerar as medições observadas a 35 metros de altura, desconsiderando a estação Cayo Arcas, os valores de velocidade adquiridos pelo *QuikSCAT*, apesar de

superestimados em relação aos valores registrados pelos anemômetros, apresentaram alguma concordância, com diferença média de $0,72 \text{ m.s}^{-1}$ e $\text{RMS} = 1,98 \text{ m.s}^{-1}$.

Entretanto, ao considerar os valores de campo convertidos para altura de 10 metros, e as medições da estação Cayo Arcas, observou-se que os valores adquiridos pelo *QuikSCAT* se apresentaram ainda maiores que os valores de campo. A diferença média entre os dados foi de $1,56$ com $\text{RMS} = 2.17 \text{ m.s}^{-1}$.

Tabela 8 - Comparações pontuais entre as informações de velocidade do vento medidas *in situ* e adquiridas pelo *QuikSCAT*.

Estações		30/6/2008	31/7/2008	14/8/2008	31/8/2008	8/9/2008	26/10/2008	8/5/2009
Velocidade <i>in situ</i> equivalente a altura de 10 metros (m.s^{-1})	IXTOC-A	6,6	4,2	3,0	3,0	4,2	7,8	6,6
	ECO-1	5,4	1,7	3,0	6,6	3,0	6,6	6,6
	Rebombeo	7,8	4,2	5,4	3,6	1,7	7,8	6,6
	Cayo Arcas	5,5	3,4	3,4	4,8	9,0	6,2	4,1
Velocidade QS pontual (m.s^{-1})	IXTOC-A	9,8	4,8	5,0	7,6	6,4	7,8	6,6
	ECO-1	8,3	4,2	5,3	8,0	6,4	7,2	5,4
	Rebombeo	8,2	5,2	4,8	5,8	5,9	7,4	6,2
	Cayo Arcas	8,6	5,9	5,7	7,4	8,5	7,5	5,6
Diferença (<i>in situ</i> - QS)	IXTOC-A	-3,2	-0,6	-2,0	-4,6	-2,2	0,0	0,0
	ECO-1	-2,9	-2,5	-2,3	-1,4	-3,4	-0,6	1,2
	Rebombeo	-0,4	-1,0	0,6	-2,2	-4,2	0,4	0,4
	Cayo Arcas	-3,1	-2,5	-2,3	-2,6	0,5	-1,3	-1,5

A direção do vento, por ser uma variável inicial dos modelos C-MOD, deve ser acurada, pois valores errôneos de direção do vento geram outros tantos de velocidade do vento calculada. Assim, os valores de direção do vento provenientes do *QuikSCAT* também foram avaliados por meio de comparações com as medidas *in situ* (Tabela 9),

com o objetivo de observar se existe concordância entre os dois tipos de dados. A diferença média encontrada entre a direção medida *in situ* e a direção estimada pelo *QuikSCAT* foi de 39,9°.

Tabela 9 - Comparações pontuais entre as informações de direção do vento medidas *in situ* e adquiridas pelo *QuikSCAT*. Os valores de direção foram convertidos para a convenção meteorológica, ou seja, o sentido de onde o vento vem.

Estações		30/6/2008	31/7/2008	14/8/2008	31/8/2008	8/9/2008	26/10/2008	8/5/2009
Direção <i>in situ</i> (graus)	IXTOC-A	157,5	67,5	67,5	360,0	180,0	22,5	67,5
	ECO-1	112,5	45,0	67,5	45,0	202,5	45,0	45,0
	Rebombeo	67,5	90,0	67,5	45,0	202,5	45,0	67,5
	Cayo Arcas	45,0	90,0	90,0	45,0	135,0	45,0	67,5
Direção QS pontual (graus)	IXTOC-A	89,0	65,0	57,0	21,0	3,0	25,0	20,0
	ECO-1	96,0	58,5	28,5	21,0	321,0	16,5	27,0
	Rebombeo	106,5	60,0	53,0	15,0	354,0	31,5	45,0
	Cayo Arcas	103,0	30,0	28,0	29,0	52,5	12,0	21,0
Diferença entre direção <i>in situ</i> e QS (graus)	IXTOC-A	68,5	2,5	10,5	41,0	177,0	2,5	47,5
	ECO-1	16,5	13,5	39,0	24,0	118,5	28,5	18,0
	Rebombeo	39,0	30,0	14,5	30,0	151,5	13,5	22,5
	Cayo Arcas	58,0	60,0	62,0	16,0	82,5	33,0	46,5

Os dois dados apresentam correlação, com RMS de 26,7°. Alguns fatores que podem justificar tal disparidade são o erro instrumental do *QuikSCAT*, de 20°, a diferença de aproximadamente 12 horas nos momentos de aquisição entre os dados *QuikSCAT* e medidas *in situ* para os dias 30/06/2008 e 08/09/2008 e a diferença de altitude entre a aquisição dos dados *in situ* (35 metros) e dos dados de escaterômetro (10 metros).

5.4. Valores Calculados

Os valores calculados pelo modelo CMOD-IFR2 (SAR), utilizando como variável inicial, os dados de direção obtidos pelo *QuikSCAT*, são apresentados na Tabela 10. São apresentados na mesma tabela os valores de velocidade do vento (m.s^{-1}) adquiridos pelo *QuikSCAT*. A diferença média entre os dois dados, desvio padrão (DP), diferença RMS e coeficiente de correlação (R) também são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores médios de velocidade do vento (m.s^{-1}) adquiridos pelo *escaterômetro* e pelas imagens SAR, utilizando como dado inicial, a direção obtida pelo *QuikSCAT*. Comparação entre as duas formas de estimativa: diferença média, desvio padrão (DP), diferença RMS e coeficiente de correlação (R).

Data	SAR (m.s^{-1})		QuikSCAT (m.s^{-1})		Diferença SAR - QuikSCAT			
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	RMS	R
30/06/2008	7,41	1,38	8,18	1,03	-0,78	1,85	1,99	-0,33
31/07/2008	4,29	0,95	5,69	1,04	-1,38	0,57	1,49	0,85
14/08/2008	3,09	0,77	5,51	0,73	-2,43	0,60	2,50	0,63
31/08/2008	3,84	0,94	5,83	1,10	-2,00	0,60	2,08	0,85
08/09/2008	4,84	1,10	7,89	1,98	-3,05	1,99	3,64	0,25
26/10/2008	5,57	0,64	7,38	0,40	-1,81	0,80	1,98	-0,15
08/05/2009	5,37	0,65	6,44	0,63	-1,07	0,29	1,11	0,89

É possível observar que os valores calculados pelo modelo CMOD-IFR2 foram, na média, subestimados em aproximadamente $1,80 \text{ m.s}^{-1}$ em comparação aos dados obtidos pelo *QuikSCAT*. No entanto, o desvio padrão dos valores calculados pelo modelo CMOD-IFR2 apresentaram proximidade com o desvio padrão dos valores obtidos pelo *QuikSCAT*, o que demonstra que, apesar de subestimados, os valores calculados apresentaram correlação aos valores obtidos pelo escaterômetro.

A diferença RMS entre a velocidade do vento calculada a partir de dados SAR e do vento adquirido pelo *QuikSCAT* foi de $2,11 \text{ m.s}^{-1}$. Ao considerar apenas os resultados onde os dados SAR e *QuikSCAT* foram adquiridos dentro de um intervalo de até seis

minutos, ou seja, excluindo os campos modelados para os dias 30/06/2008, 14/08/2008 e 08/09/2008, a diferença média foi ainda menor, com os valores resultantes subestimados em aproximadamente $1,57 \text{ m.s}^{-1}$ em relação ao *QuikSCAT*, e $\text{RMS} = 1,67 \text{ m.s}^{-1}$. Isso é um indício de que, quanto menor o intervalo entre as aquisições dos dados SAR e das informações de direção, melhores são os resultados.

O campo de vento calculado para o dia 08 de maio de 2009 apresentou os melhores resultados com RMS de $1,11 \text{ m.s}^{-1}$ e coeficiente de correlação de 0,89. O campo de vento calculado para o dia 08 de setembro de 2008 apresentou os piores resultados com RMS de $3,64 \text{ m.s}^{-1}$ e coeficiente de correlação de 0,25. Uma possível explicação para isso é o fato dos dados *QuikSCAT* mais próximos do momento de aquisição dos dados SAR terem sido adquiridos com 12 horas de antecedência, registrando um cenário diferente.

Os campos de vento calculados para os dias 30 de junho de 2008 e 26 de outubro de 2008 também apresentarem coeficientes de correlação baixos, $R = -0,33$ e $R = -0,15$ respectivamente. A baixa correlação registrada no dia 30 de junho pode ser explicada pelo mesmo motivo encontrado no dia 08 de setembro de 2008, quando os dados de escaterômetro foram adquiridos com 12 horas de antecedência em relação aos dados SAR. Entretanto, para o dia 26 de outubro de 2008, os dados SAR e do *QuikSCAT* foram adquiridos com um minuto de intervalo, ou seja, praticamente no mesmo instante, registrando o mesmo cenário.

Os campos dos dias 30 de junho de 2008 e 26 de outubro de 2008 foram os únicos a apresentarem coeficientes de correlação negativos. Cabe ressaltar que todos os dados *QuikSCAT* foram adquiridos por volta da meia noite, com exceção desses dois casos, quando os dados *QuikSCAT* foram adquiridos por volta do meio dia. No entanto, não é possível relacionar esse fato ao coeficiente de correlação negativo.

Os valores calculados foram comparados pontualmente com as medidas *in situ* e os resultados estão apresentados na Tabela 11. Assim como ocorreu nas comparações com os dados *QuikSCAT*, observa-se que na média, os valores calculados utilizando os dados SAR foram subestimados em relação às medidas de campo. Ao considerar as medições observadas a 35 metros de altura, desconsiderando a estação Cayo Arcas, os valores de velocidade calculados, apesar de subestimados em relação aos valores registrados pelos anemômetros, apresentaram grande concordância, com diferença média de $1,43 \text{ m.s}^{-1}$ e $\text{RMS} = 2,02 \text{ m.s}^{-1}$.

Ao considerar os valores de campo convertidos para altura de 10 metros, e as medições da estação Cayo Arcas, observou-se que as comparações com os valores calculados apresentaram diferenças ainda menores. A diferença média entre os dados foi de 0,74 com RMS = 1,56 m.s⁻¹.

Tabela 11 - Valores pontuais de velocidade do vento (m.s⁻¹) adquiridos pelos sensores *in situ* (Velocidade *in situ*) e pelas imagens SAR (Velocidade Calculada). O “X” representa que a plataforma está situada fora da área de processamento e os valores sombreados em cinza representam valores das estações próximas as áreas de processamento.

	Estações	30/6/2008	31/7/2008	14/8/2008	31/8/2008	8/9/2008	26/10/2008	8/5/2009
Velocidade <i>in situ</i> (m.s ⁻¹)	IXTOC-A	6,6	4,2	3,0	3,0	4,2	7,8	6,6
	ECO-1	5,4	1,7	3,0	6,6	3,0	6,6	6,6
	Rebombeo	7,8	4,2	5,4	3,6	1,7	7,8	6,6
	Cayo Arcas	5,5	3,4	3,4	4,8	9,0	6,2	4,1
Velocidade Calculada pontual (m.s ⁻¹)	IXTOC-A	5,4	3,3	1,4	4,5	2,7	5,1	X
	ECO-1	X	4,1	2,7	5,2	3,2	5,7	X
	Rebombeo	9,1	3,2	3,2	3,6	X	X	5,5
	Cayo Arcas	X	4,1	2,7	5,4	5,4	X	X
Diferença (<i>in situ</i> - Calculada)	IXTOC-A	1,2	0,9	1,6	-1,5	1,5	2,7	X
	ECO-1	X	-2,4	0,3	1,4	-0,2	0,9	X
	Rebombeo	-1,3	1,0	2,2	0,0	X	X	1,1
	Cayo Arcas	X	-0,7	0,7	-0,6	3,6	X	X

Ao considerar que os dados de campo representam uma base de referência mais confiável que os dados do *QuikSCAT*, pode-se afirmar que as comparações entre os dados *in situ* e os valores calculados utilizando os dados SAR apresentaram resultados mais próximos que os valores adquiridos pelo *QuikSCAT*, quando comparados aos dados *in situ*.

Os campos de vento calculados foram analisados caso a caso, como pode ser observado nos itens 5.4.1 a 5.4.7.

5.4.1. Campo de Vento Calculado para 30/06/2008

Na estimativa do campo de vento dessa data utilizou-se o recorte de aproximadamente 193,5 km x 262,5 km da imagem SAR do dia 30/06/2008 (Figura 25), modo *ScanSAR Narrow*, órbita ascendente, com ângulo de incidência variando de 30,6° a 46,7°, horário de aquisição 00:23:34 UTC. Os dados de direção do vento foram extraídos com o mesmo recorte do *QuikSCAT* do dia 29/06/2008 as 11:54:00. O campo direcional do *QuikSCAT* foi adquirido aproximadamente doze horas e meia antes da aquisição da imagem SAR.

O campo de velocidade do vento de 30/06/2008, com resolução espacial de aproximadamente 1600 metros, apresentou valores de intensidade variando entre 2,63 m.s⁻¹ e 12,69 m.s⁻¹, velocidade média de 8,18 m.s⁻¹ e desvio padrão de 1,03 m.s⁻¹. Dentre os sete campos calculados, foi o que apresentou maior valor de velocidade média. É possível identificar na Figura 25 a passagem de uma frente oceânica de origem atmosférica registrada pelos dados SAR, o que pode ser um possível motivo para este fato. Comparado aos dados de velocidade do *QuikSCAT*, apresentou coeficiente de correlação de -0,33 e RMS = 1,99 m.s⁻¹. A baixa correlação pode ser atribuída ao intervalo de 12 horas entre o momento de aquisição dos dados *QuikSCAT* e dos dados SAR associada a passagem da frente atmosférica, que altera o cenário de ventos em um curto intervalo de tempo.

Os resultados da comparação pontual com as medidas *in situ* foram: IXTOC-A = 1,2 m.s⁻¹ e Rebombeo = -1,3 m.s⁻¹. As estações ECO-1 e Cayo Arcas estavam situadas fora da área de recorte para o campo em questão. As estações encontravam-se sobre a região de alcance distante da imagem SAR, onde os ângulos de incidência são maiores, e conseqüentemente, a razão sinal ruído é menor. A diferença negativa registrada na comparação da plataforma IXTOC-A indica que o valor calculado foi subestimado em relação à medida *in situ* naquele ponto e a diferença positiva registrada na comparação da plataforma Rebombeo indica que o valor calculado foi superestimado. Essas comparações são coerentes, pois a plataforma IXTOC-A está mais distante na direção de alcance da imagem SAR que a plataforma Rebombeo.

O campo de velocidade do vento está representado na Figura 32.

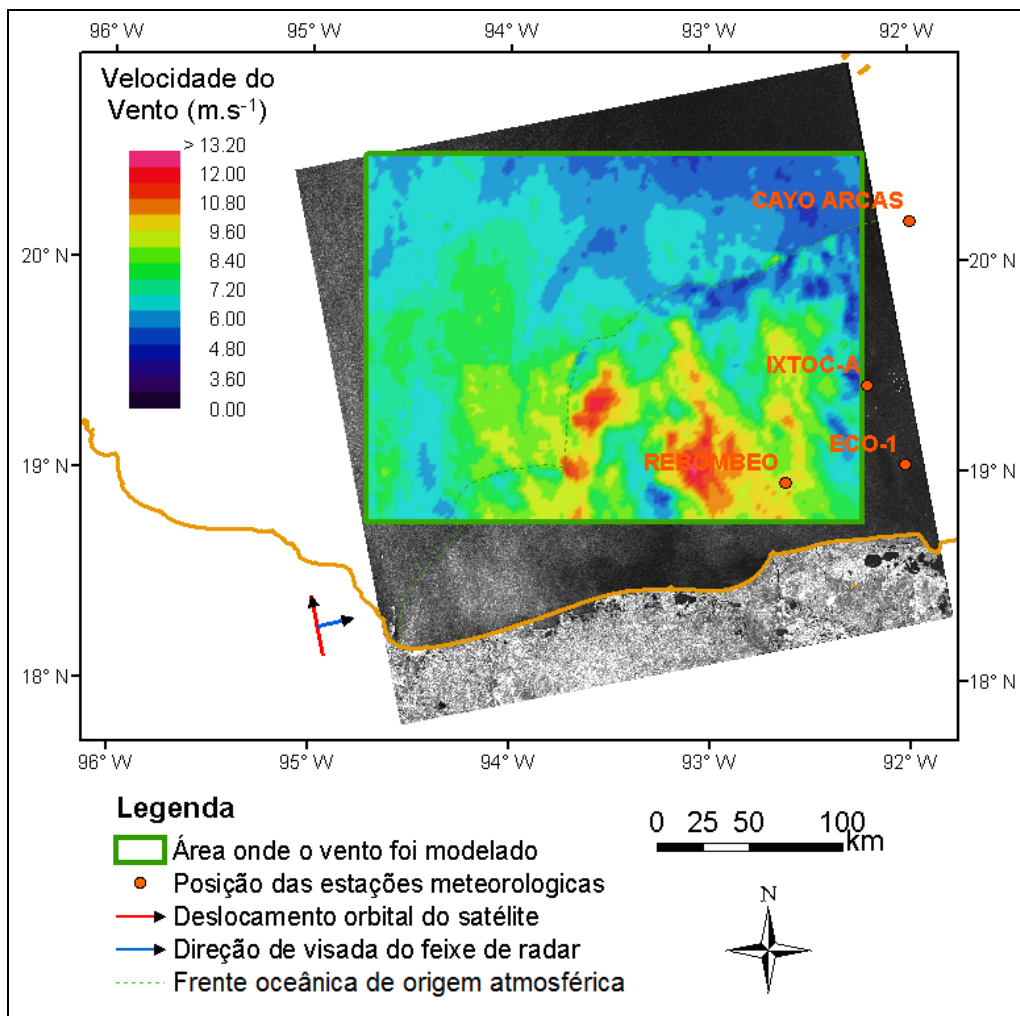


Figura 32 - Campo de vento de 30 de junho de 2008.

5.4.2. Campo de Vento Calculado para 31/07/2008

Na estimativa do campo de vento dessa data utilizou-se o recorte de aproximadamente 193,5 km x 211,0 km da imagem SAR do dia 31/07/2008 (Figura 26), modo *ScanSAR Narrow B*, órbita ascendente, com ângulo de incidência variando de 30,6° a 46,7°, horário de aquisição 00:19:27 UTC. Os dados de direção do vento foram extraídos com o mesmo recorte do *QuikSCAT* do dia 31/07/2008 as 00:18:00.

O campo de velocidade do vento de 31/07/2008, com resolução espacial de aproximadamente 1600 metros, é caracterizado por grande variabilidade em

intensidade, com valores de $0,00 \text{ m.s}^{-1}$ a $17,88 \text{ m.s}^{-1}$, velocidade média de $5,69 \text{ m.s}^{-1}$ e desvio padrão de $1,04 \text{ m.s}^{-1}$. No entanto, valores iguais a zero foram atribuídos a *pixels* que tiveram a velocidade impossibilitada de ser calculada e valores muito altos foram atribuídos a *pixels* dominados pela presença de plataformas exploratórias que ocasionam retorno muito forte de σ_0 .

Comparado aos dados de velocidade do *QuikSCAT*, apresentou coeficiente de correlação de 0,85 e $\text{RMS} = 1,49 \text{ m.s}^{-1}$. Os resultados da comparação pontual com as medidas *in situ* foram: IXTOC-A = $0,9 \text{ m.s}^{-1}$, ECO-1 = $-2,4 \text{ m.s}^{-1}$ e Rebombeco = $1,0 \text{ m.s}^{-1}$ e Cayo Arcas = $-0,7 \text{ m.s}^{-1}$. As estações encontravam-se sobre a região de alcance médio da imagem SAR.

O campo de velocidade do vento está representado na Figura 33.

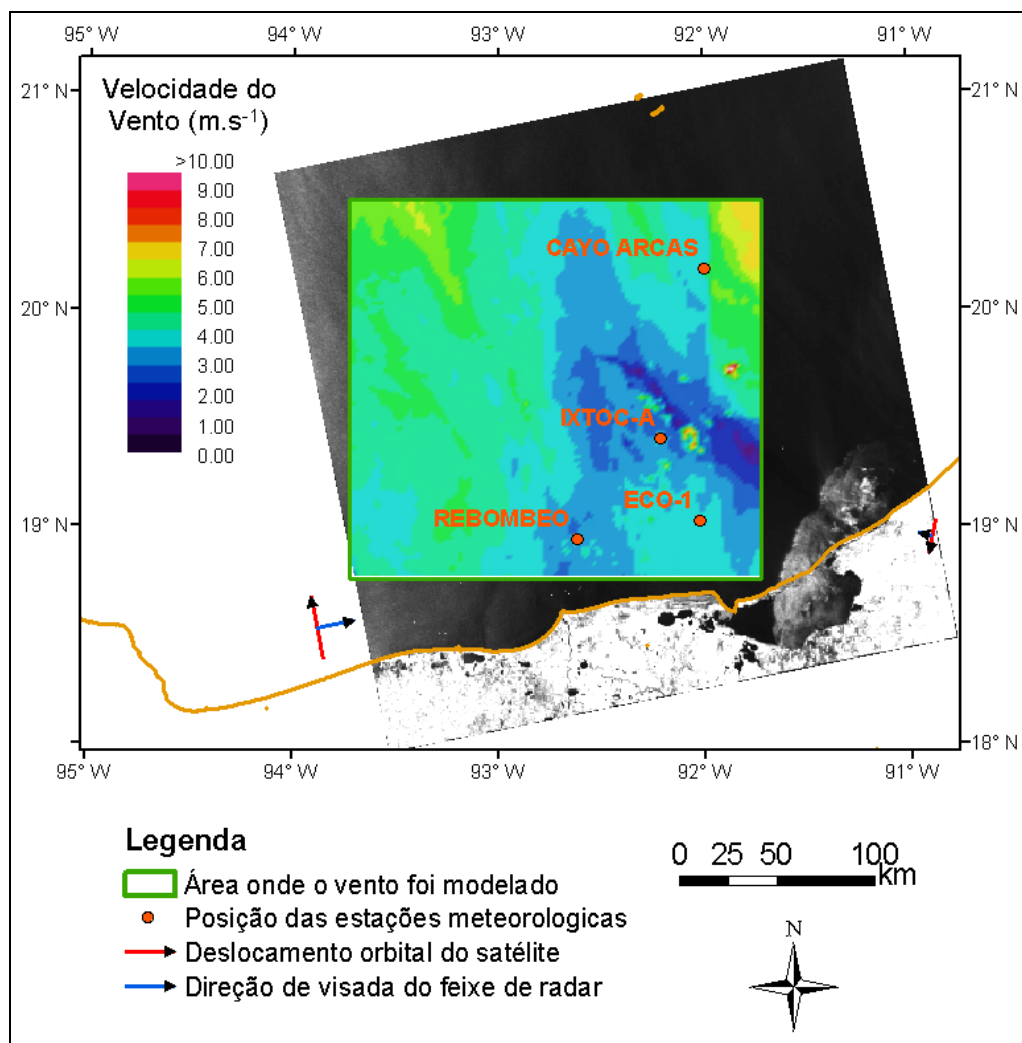


Figura 33 - Campo de vento de 31 de julho de 2008.

5.4.3. Campo de Vento Calculado para 14/08/2008

Na estimativa do campo de vento dessa data utilizou-se o recorte de aproximadamente 192,0 km x 211,0 km da imagem SAR do dia 14/08/2008 (Figura 27), modo *ScanSAR Narrow*, órbita ascendente, com ângulo de incidência variando de 19,4° a 39,5°, horário de aquisição 00:11:12 UTC. Os dados de direção do vento foram extraídos com o mesmo recorte do *QuikSCAT* do dia 14/08/2008 as 00:54:00. O campo direcional do *QuikSCAT* foi adquirido aproximadamente 43 minutos após a aquisição da imagem SAR.

O campo de velocidade do vento de 14/08/2008, com resolução espacial de aproximadamente 1600 metros apresentou variabilidade em intensidade de 0,00 m.s⁻¹ a 8,50 m.s⁻¹, velocidade média de 5,51 m.s⁻¹ e desvio padrão de 0,73 m.s⁻¹. Dentre os sete campos calculados, foi o que apresentou menor valor de velocidade média.

Comparado aos dados de velocidade do *QuikSCAT*, apresentou coeficiente de correlação de 0,63 e RMS = 2,50 m.s⁻¹. O valor de correlação pode ser atribuído ao intervalo de 43 minutos entre o momento de aquisição dos dados *QuikSCAT* e dos dados SAR. Os resultados da comparação pontual com as medidas *in situ* foram: IXTOC-A = 1,6 m.s⁻¹, ECO-1 = 0,3 m.s⁻¹, Rebombeo = 2,2 m.s⁻¹ e Cayo Arcas = 0,7 m.s⁻¹. As estações IXTOC-A, ECO-1 e Rebombeo encontravam-se sobre a região de alcance próximo da imagem SAR, onde os ângulos de incidência são menores, e consequentemente, a razão sinal ruído é maior. A estação Cayo Arcas encontrava-se sobre a região de alcance médio.

O campo de velocidade do vento está representado na Figura 34.

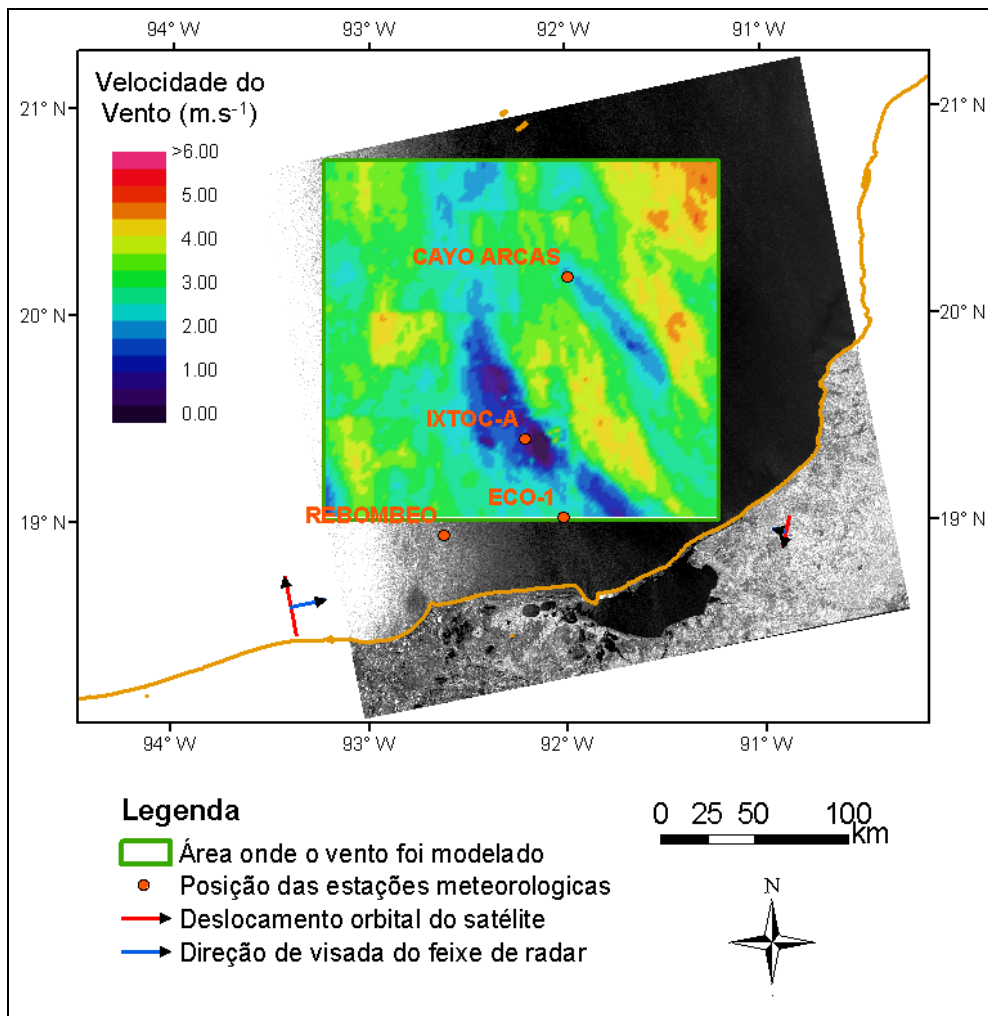


Figura 34 - Campo de vento de 14 de agosto de 2008.

5.4.4. Campo de Vento Calculado para 31/08/2008

Na estimativa do campo de vento dessa data utilizou-se o recorte de aproximadamente 193,5 km x 262,5 km da imagem SAR do dia 31/08/2008 (Figura 28), modo *ScanSAR Narrow*, órbita ascendente, com ângulo de incidência variando de 19,4° a 39,5°, horário de aquisição 00:15:21 UTC. Os dados de direção do vento foram extraídos com o mesmo recorte do *QuikSCAT* do dia 31/08/2008 as 00:12:00.

O campo de velocidade do vento de 31/08/2008, com resolução espacial de aproximadamente 1600 metros, é caracterizado por grande variabilidade em intensidade, com valores de 0,00 m.s⁻¹ a 16,30 m.s⁻¹, velocidade média de 5,83 m.s⁻¹ e desvio padrão de 1,10 m.s⁻¹. Assim como ocorreu com o campo de 31/07/2008, valores iguais a zero foram atribuídos a *pixels* que tiveram a

velocidade impossibilitada de ser calculada e valores muito altos foram atribuídos a *pixels* dominados pela presença de plataformas exploratórias que ocasionam retorno muito forte de σ_0 .

Comparado aos dados de velocidade do *QuikSCAT*, apresentou coeficiente de correlação de 0,85 e RMS = 2,08 m.s⁻¹. Os resultados da comparação pontual com as medidas *in situ* foram: IXTOC-A = -1,5 m.s⁻¹, ECO-1 = 1,4 m.s⁻¹, Rebombeco = 0,0 m.s⁻¹ e Cayo Arcas = -0,6 m.s⁻¹. A plataforma Rebombeco encontrava-se sobre a região de alcance médio e as estações IXTOC-A, ECO-1 e Cayo Arcas encontravam-se sobre a região de alcance distante da imagem SAR, onde os ângulos de incidência são maiores, e conseqüentemente, a razão sinal ruído é menor.

O campo de velocidade do vento está representado na Figura 35.

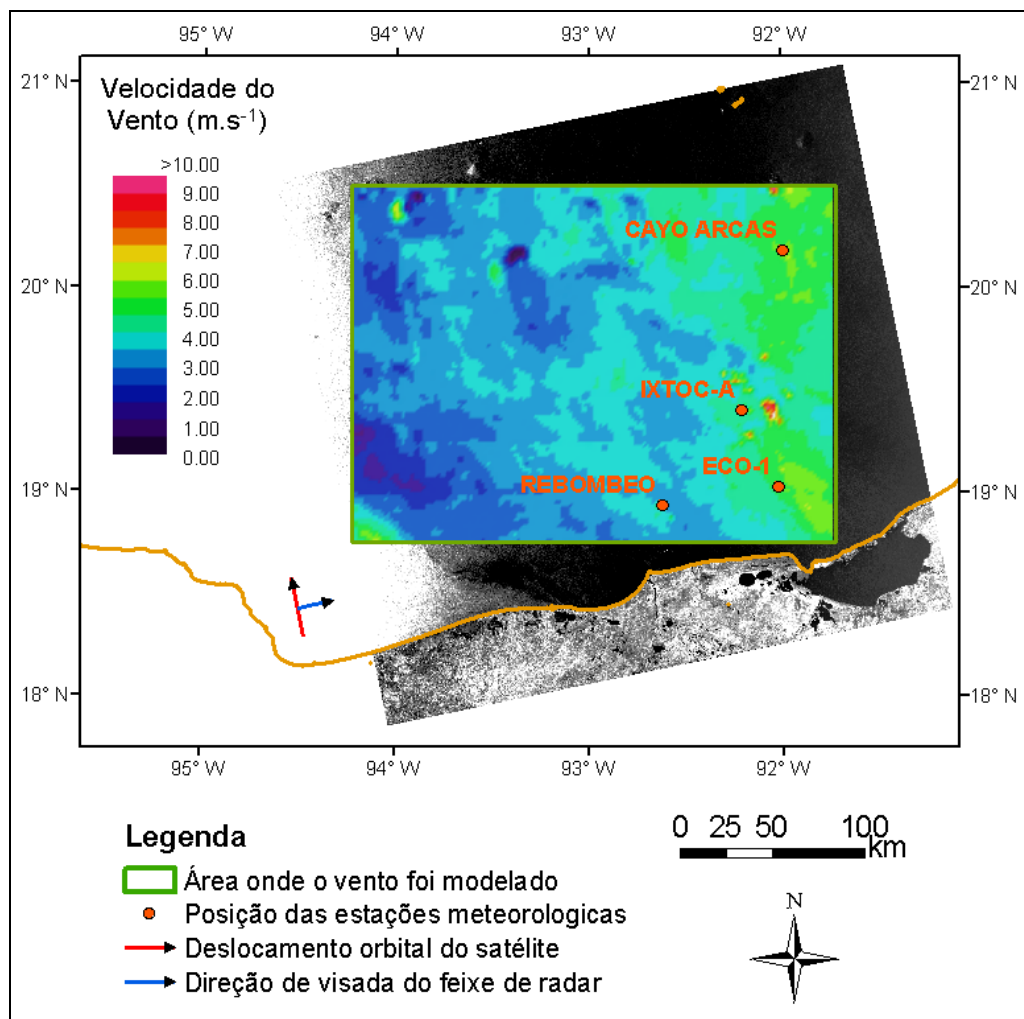


Figura 35 - Campo de vento de 31 de agosto de 2008.

5.4.5. Campo de Vento Calculado para 08/09/2008

Na estimativa do campo de vento dessa data utilizou-se o recorte de aproximadamente 110,5 km x 131,5 km da imagem SAR do dia 08/09/2008 (Figura 29), modo *Wide*, órbita descendente, com ângulo de incidência variando de 19,5° a 31,2°, horário de aquisição 12:07:00 UTC. Os dados de direção do vento foram extraídos com o mesmo recorte do *QuikSCAT* do dia 08/09/2008 as 00:06:00. O campo direcional do *QuikSCAT* foi adquirido aproximadamente doze horas antes da aquisição da imagem SAR.

O campo de velocidade do vento de 08/09/2008, com resolução espacial de aproximadamente 1600 metros, apresentou variabilidade em intensidade, com valores de 1,10 m.s⁻¹ a 11,95 m.s⁻¹, velocidade média de 4,84 m.s⁻¹ e desvio padrão de 1,10 m.s⁻¹.

Comparado aos dados de velocidade do *QuikSCAT*, apresentou os piores resultados, com coeficiente de correlação de 0,25 e RMS = 3,64 m.s⁻¹. A baixa correlação e o alto valor de diferença RMS podem ser atribuídos ao intervalo de 12 horas entre o momento de aquisição dos dados *QuikSCAT* e dos dados SAR. Os resultados da comparação pontual com as medidas *in situ* foram: IXTOC-A = 1,5 m.s⁻¹, ECO-1 = -0,2 m.s⁻¹ e Cayo Arcas = 3,6 m.s⁻¹. A plataforma Rebombeco estava situada fora da área de recorte para o campo em questão e a plataforma ECO-1 encontrava-se sobre a região de alcance médio da imagem SAR. As estações IXTOC-A e Cayo Arcas encontravam-se sobre a região de alcance distante onde os ângulos de incidência são maiores, e conseqüentemente, a razão sinal ruído é menor o que justifica os valores calculados subestimados na região dessas estações.

O campo de velocidade do vento está representado na Figura 36, onde as células de resolução do *QuikSCAT*, de aproximadamente 25 km, estão evidenciadas no padrão de distribuição das velocidades modeladas. Isso ocorre devido à mudança abrupta entre uma célula e outra do *QuikSCAT*, dos valores de direção utilizados como informação inicial do modelo CMOD-IFR2. Tal mudança se reflete na intensidade do vento calculada.

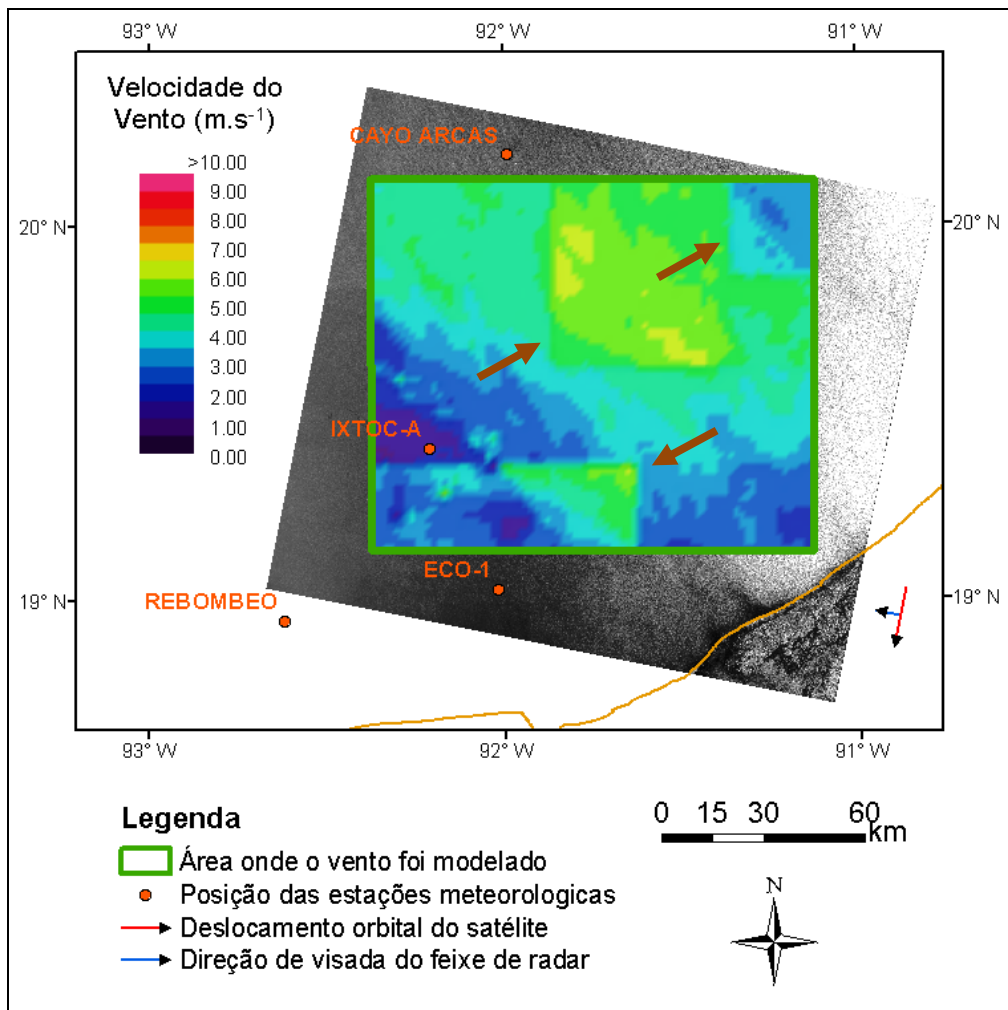


Figura 36 - Campo de vento de 08 de setembro de 2008, com as células de resolução do *QuikSCAT* evidenciadas (setas marrons).

5.4.6. Campo de Vento Calculado para 26/10/2008

Na estimativa do campo de vento dessa data utilizou-se o recorte de aproximadamente 109,5 km x 131,0 km da imagem SAR do dia 26/10/2008 (Figura 30), modo *Wide*, órbita descendente, com ângulo de incidência variando de 19,5° a 31,2°, horário de aquisição 12:07:04 UTC. Os dados de direção do vento foram extraídos com o mesmo recorte do *QuikSCAT* do dia 26/10/2008 as 12:06:00.

O campo de velocidade do vento de 26/10/2008, com resolução espacial de aproximadamente 1600 metros, é caracterizado por grande variabilidade em intensidade, com valores de 0,00 m.s⁻¹ a 13,72 m.s⁻¹, velocidade média de 7,38 m.s⁻¹ e desvio padrão de 0,40 m.s⁻¹.

Comparado aos dados de velocidade do *QuikSCAT*, apresentou coeficiente de correlação de -0,15 e $RMS = 1,98 \text{ m.s}^{-1}$. Os resultados da comparação pontual com as medidas *in situ* foram: IXTOC-A = $2,7 \text{ m.s}^{-1}$, ECO-1 = $0,90 \text{ m.s}^{-1}$. As estações Rebombeco e Cayo Arcas estavam situadas fora da área de recorte para o campo em questão. A plataforma ECO-1 encontrava-se sobre a região de alcance médio e a plataforma IXTOC-A encontrava-se sobre a região de alcance distante da imagem SAR, onde os ângulos de incidência são maiores, e consequentemente, a razão sinal ruído é menor.

O campo de velocidade do vento está representado na Figura 37.

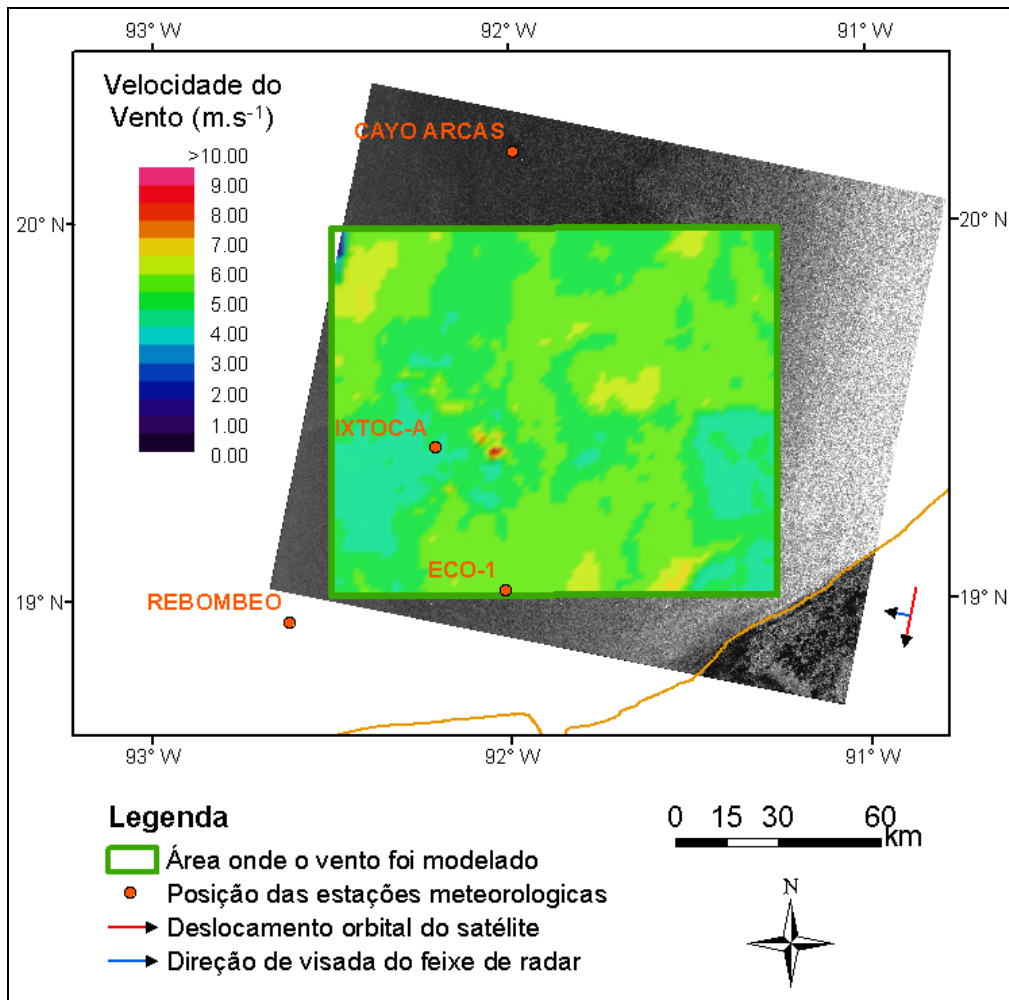


Figura 37 - Campo de vento de 26 de outubro de 2008.

5.4.7. Campo de Vento Calculado para 08/05/2009

Na estimativa do campo de vento dessa data utilizou-se o recorte de aproximadamente 193,5 km x 235,0 km da imagem SAR do dia 08/05/2009 (Figura 31), modo *ScanSAR Narrow*, órbita ascendente, com ângulo de incidência variando de 30,6° a 46,7°, horário de aquisição 00:23:50 UTC. Os dados de direção do vento foram extraídos com o mesmo recorte do *QuikSCAT* do dia 08/05/2009 as 00:18:00.

O campo de velocidade do vento de 08/05/2009, com resolução espacial de aproximadamente 1600 metros, apresentou variabilidade em intensidade, com valores de 3,60 m.s⁻¹ a 11,25 m.s⁻¹, velocidade média de 6,44 m.s⁻¹ e desvio padrão de 0,63 m.s⁻¹.

Comparado aos dados de velocidade do *QuikSCAT*, apresentou o melhor resultado dentre os campos calculados, com coeficiente de correlação de 0,89 e RMS = 1,11 m.s⁻¹. Os resultados da comparação pontual com as medidas *in situ* da plataforma Rebombeo foi de 1,1 m.s⁻¹. As estações IXTOC-A, ECO-1 e Cayo Arcas estavam situadas fora da área de recorte para o campo em questão. A plataforma Rebombeo encontrava-se sobre a região de alcance distante da imagem SAR, onde os ângulos de incidência são maiores, e conseqüentemente, a razão sinal ruído é menor o que justifica o valor calculado subestimado em relação à medida *in situ*.

O campo de velocidade do vento está representado na Figura 38.

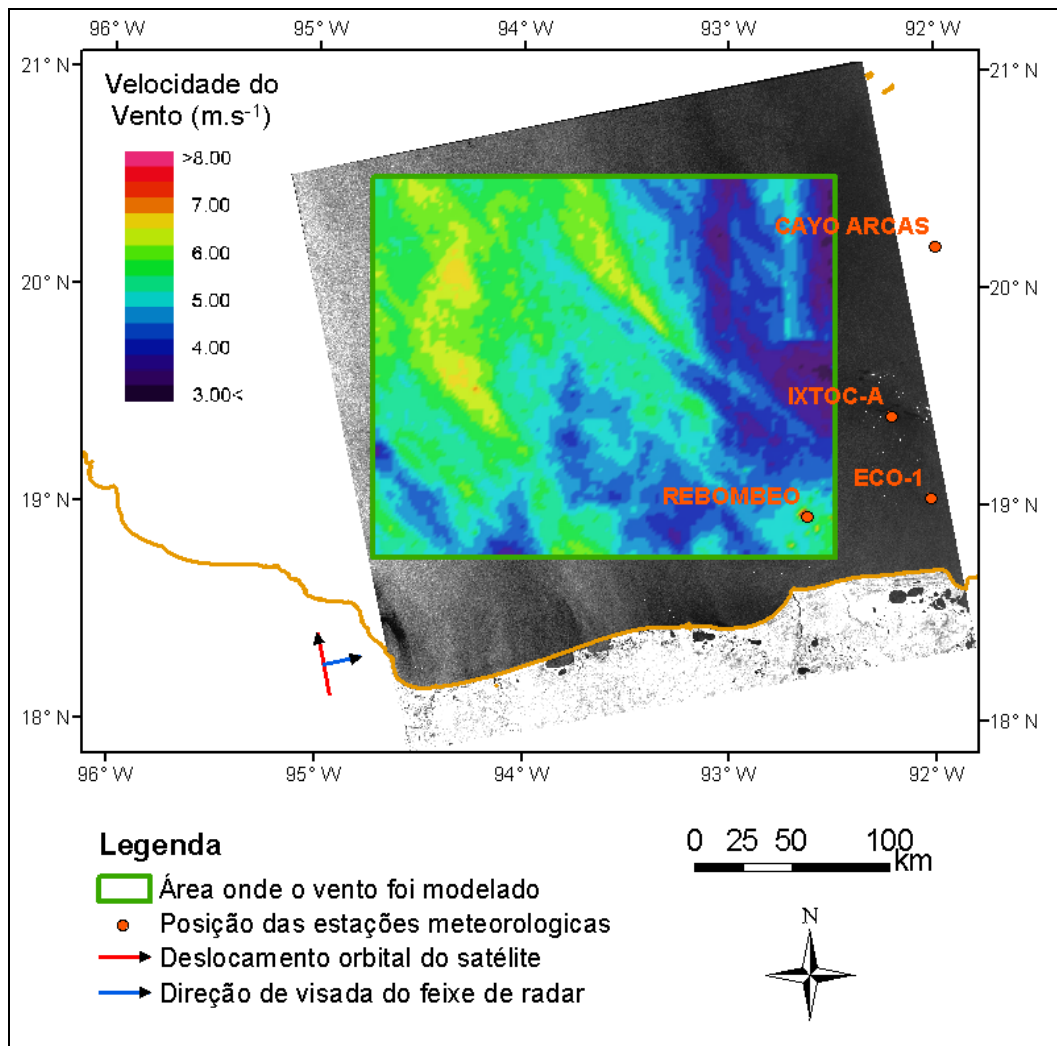


Figura 38 - Campo de vento de 08 de maio de 2009.

5.5. Resultados Encontrados na Literatura

KIM & MOON (2000) encontraram um erro RMS de 42° na direção e $1,70 \text{ m.s}^{-1}$ na velocidade utilizando a razão de polarização para imagens RADARSAT-1.

STAPLES & MENDOZA (2002) analisaram seis imagens RADARSAT-1 no modo *Wide* e encontraram uma diferença média entre dados de bóias de $2,40 \text{ m.s}^{-1}$ na velocidade e $51,8^\circ$ na direção.

MONALDO *et al.* (2004) extraíram campos de velocidade do vento a partir de imagens RADARSAT-1 utilizando o modelo CMOD4 adaptado para polarização HH. Foram utilizados dados de direção do vento do modelo do NOGAPS e do *QuikSCAT*. As

comparações com os dados *QuikSCAT* apresentaram valores de desvio padrão de $1,36 \text{ m.s}^{-1}$.

HORSTMANN *et al.* (2005) utilizou os modelos CMOD4 e CMOD5 para determinar os campos de vento a partir de imagens SAR do satélite RADARSAT-1. Os campos resultantes foram comparados com dados de modelo numérico de ciclones tropicais, com coeficiente de correlação igual a 0,68 e $\text{RMS} = 3,77 \text{ m.s}^{-1}$ para o modelo CMOD4 e coeficiente de correlação igual a 0,72 e $\text{RMS} = 3,75 \text{ m.s}^{-1}$ para o modelo CMOD5.

CHRISTIANSEN *et al.* (2006) compararam os modelos CMOD4, CMOD5 e CMOD-IFR2 aplicados a diferentes imagens SAR. Foram utilizadas 91 imagens ERS-2 e ENVISAT para obter um desvio padrão de $1,10 \text{ m.s}^{-1}$ com a direção estimada por dados *in situ* e $1,30 \text{ m.s}^{-1}$ com o método do gradiente local para estimar a direção.

Segundo ZECCHETTO & DIBIASIO (2007), resultados derivados do SAR apresentaram menores valores médios que os dados do QuickSCAT, fato também relatado neste trabalho.

XIE & PERRIE (2010) relataram que os dados obtidos pelo *QuikSCAT* foram superestimados em relação as medições observadas em campo por anemômetros instalados em bóias e que os valores calculados utilizando os dados SAR foram subestimados em relação aos dados de campo, fato também relatado neste trabalho.

6. CONCLUSÕES

Os campos de vento da região do Golfo do México foram calculados com a utilização de sete imagens SAR do satélite RADARSAT-2 e o modelo empírico CMOD-IFR2. As informações de direção utilizadas como dados iniciais para modelo CMOD-IFR2 foram adquiridas com o satélite escaterômetro *QuikSCAT*. Nenhuma data coincidiu com a passagem de tempestades tropicais.

Os resultados obtidos foram comparados com as velocidades adquiridas pelo *QuikSCAT* e o RMS médio encontrado foi de $2,11 \text{ m.s}^{-1}$. Esse resultado é semelhante ao apresentado em CLARO (2007) que apresentou RMS médio de $2,00 \text{ m.s}^{-1}$. Os valores calculados pelo modelo CMOD-IFR2 foram, na média, subestimados em aproximadamente $1,80 \text{ m.s}^{-1}$ em comparação aos dados obtidos pelo *QuikSCAT*, fato também relatado por ZECCHETTO & DE BIASIO (2007) e por XIE & PERRIE (2010).

Ao considerar apenas os resultados onde os dados SAR e *QuikSCAT* foram adquiridos dentro de um intervalo de até seis minutos, a diferença média foi ainda menor, com os valores resultantes subestimados em aproximadamente $1,57 \text{ m.s}^{-1}$ em relação ao *QuikSCAT*, e $\text{RMS} = 1,67 \text{ m.s}^{-1}$. Isso é um indício de que, quanto menor o intervalo entre as aquisições dos dados SAR e das informações de direção, melhores são os resultados.

O campo de vento calculado para o dia 08 de maio de 2009 apresentou os melhores resultados com RMS de $1,11 \text{ m.s}^{-1}$ e coeficiente de correlação de 0,89. O *QuikSCAT* parou de operar em 2009, e atualmente, existem outros escaterômetros em operação como o ASCAT (*Advanced Scaterometer*).

Assim como ocorreu nas comparações com os dados do *QuikSCAT*, observou-se que os valores calculados utilizando os dados SAR foram, em média, subestimados em relação às medições de campo. Esse fato também foi relatado por XIE & PERRIE (2010).

Enquanto as comparações pontuais dos dados *QuikSCAT* com as medições de campo apresentaram diferença média de $1,56 \text{ m.s}^{-1}$ e $\text{RMS} = 2,17 \text{ m.s}^{-1}$, os valores calculados apresentaram melhores resultados, com diferença média para as medições *in situ* de $0,74 \text{ m.s}^{-1}$ e $\text{RMS} = 1,56 \text{ m.s}^{-1}$. Ao tomar as informações dos anemômetros como um referencial de comparação mais confiável, é possível dizer que a estimativa da velocidade do vento a partir dos dados SAR apresentou resultados mais consistentes que os valores de velocidade adquiridos pelo *QuikSCAT*.

Os campos de vento dos dias 31 de Julho de 2008 e 08 de Maio de 2009, que apresentaram os melhores resultados, foram estimados com o modo de aquisição *ScanSAR Narrow B*. Os valores apresentados neste trabalho indicam que os resultados obtidos estão em concordância com os valores encontrados na literatura. No entanto, o número de imagens processadas não é estatisticamente suficiente para estabelecer valores definitivos de RMS.

Para obtenção de resultados mais consistentes, recomenda-se:

- Adquirir informações de direção do vento no instante mais próximo possível da aquisição dos dados SAR.
- Utilizar algoritmos para estimativa da direção do vento utilizando as feições estriadas presentes na própria imagem SAR, para estimar a direção de maneira instantânea.
- Converter as informações de direção utilizadas como dados iniciais dos modelos CMOD para a altitude de 10 metros, caso essas tenham sido estimadas para outra altitude.
- Alterar a célula de resolução básica da imagem para o tamanho de 500 x 500 metros ou superior, para redução do efeito de *speckle*.
- Desconsiderar *pixels* que apresentem valores de σ_0 errôneos, ou que cubram áreas contendo plataformas, embarcações, filmes biogênicos e gelo. Esses *pixels* devem ser interpolados.

Para os próximos trabalhos, serão utilizados algoritmos para estimativa da direção do vento a partir da própria imagem SAR. Os métodos do Gradiente Local e a Transformada de Fourier serão avaliados. Os algoritmos de processamento dos dados serão aprimorados no intuito de operacionalizar a metodologia e os resultados serão testados na avaliação do potencial de geração de energia eólica em alto mar.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALPERS, W.; BRUMMER, B. "Atmospheric boundary layer rolls observed by the synthetic aperture radar aboard the ERS-1 satellite", *Journal of Geophysical Research*. 99, 1994, pp. 12613-12621.
- ALPERS, W.; MULLER, G.; BRUMMER, B. – “Study of Atmospheric Boundary Layer Rolls Near Spitsbergen by Using ERS SAR Images of the Sea Surface and a Numerical Model”, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE International*. v. 03, pp. 1162-1164, 1997.
- ARYA, S.P. – *Introduction to Micrometeorology*. Second Edition, Academic Press, North Carolina, 2001.
- BARTHELMIE, R.J.; DPRYOR, S.C. – “Can satellite sampling of offshore wind speeds realistically represent wind speed distributions?”, *Journal of Applied Meteorology*. V. 42, pp. 83-94, 2003.
- BERENS, P. – “Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR)”, *Advanced Radar Signal and Data Processing*. Educational Notes RTO-EN-SET-086, Paper 3. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. pp. 3-1 – 3-14, 2006.
- CLARO, M.S. - *Extração do campo de vento na Bacia de Campos, RJ, a partir de imagens ENVISAT/ASAR*. Dissertação de M.Sc. INPE. São José dos Campos, 2007. 112p; (INPE-15218-TDI/1312).
- CHRISTIANSEN, M.B.; KOCH, W.; HORSTMANN, J.; HASAGER, C.B.; NIELSEN, M. – “Wind resource assessment from C-band SAR”, *Remote Sensing of Environment* -105. pp. 68–81, 2006.
- FIGUEIREDO, D. – “Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto”, Setembro de 2005. Disponível em <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf>. Acessado em Julho de 2010.
- FUREVIK, B.R. – “CMOD-IFR2 Algorithm”, *Nansen Environmental and Remote Sensing Center*, Norway. Disponível em <http://marsais.nersc.no/algorithm_cmod_ifr2.html>. Acessado em Fevereiro de 2009.

- HENDERSON, F.M.; LEWIS, A.J. - *Principles and Applications of Imaging Radar. Manual of Remote Sensing*, 3a ed., v. 2, pp. 631 - 675. USA, John Wiley & Sons, Inc, 1998.
- HERSBACH, H.; STOFFELEN, A.; HAAN, S. - "An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5", *Journal of Geophysical Research*, Volume 112, Issue C3, CiteID C03006, 2007.
- HORSTMANN, J.; LEHNER, S.; KOCH, W.; TONBOE, R. - "Computation of wind vectors over the ocean using spaceborn synthetic aperture radar", *Johns Hopkins APL Technical Digest*, v. 21, n. 01, pp. 100-107, 2000.
- HORSTMANN, J.; GRABER, H.C.; KOCH, W.; IRIS, S. - "Investigation of SAR wind field retrieval with respect to hurricane winds", *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'05*. Seoul: IEEE International. pp. 4018-4021, 2005.
- HSU, S.A.; MEINDL, E.A.; GILHOUSEN, D.B. - "Determining the Power-Law Wind-Profile Exponent under Near-Neutral Stability Conditions at Sea", *Journal of Applied Meteorology*. v.33, n.6, p.757-765, 1994.
- JENSEN, J.R. - *Sensoriamento Remoto do Ambiente - Uma Perspectiva em Recursos Terrestres*, University of South Carolina, tradução da segunda edição, Ed. Parêntese, 2009.
- KIM, D.; MOON, W.M. - "Estimation of sea surface wind vector using RADARSAT data". *Remote Sensing of Environment*. v. 80 pp. 55-64, 2002.
- KOCH, W. - "Directional Analysis of SAR Images Aiming at Wind Direction". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. V. 42, n. 4, pp. 702-710, 2004.
- LEHNER, S.; SCHULZ-STELLENFLETH, J.; NIEDERMEIER, A.; HORSTMANN, J. - "Global distribution of sea surface features from SAR wave mode data". *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. v. 4, pp.1767-1769, 2001.
- LILLESAND, T.M.; KIEFER, F.W. - *Remote sensing and image interpretation*. New York. Wiley & Sons, xvi, 750 p, 1994.
- MDA - MacDonald Dettwiler. - "RADARSAT-2 Product Description". In: *MDA Technical Report*. RN-SP-52-1238. Issue 1/6, 2009.

- MONALDO, F.M.; THOMPSON, D.R.; PICHEL, W.G.; CLEMENTE-CÓLON, P. - "A systematic comparison of QuikSCAT and SAR ocean surface wind speeds". *IEEE Transactions and Remote Sensing*, v. 42, n. 02, pp. 283-291, 2004.
- NOVO, E.M.L.M. - *Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações*. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1989.
- PEAKE, W.H.; OLIVER, T.L. - "Response of Terrestrial Surfaces at Microwave Frequencies". In: *Air Force Avionics Lab Report # TR - 70 - 301*, Columbus: Ohio State Univ, 1971.
- PEDROSO, E.C. - *Ranking de exsudações de óleo como suporte à exploração petrolífera em águas ultra-profundas: estudo de caso no Golfo do México*. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009. XIX, 238 p.: il.; 29,7 cm.
- QUILFEN, Y. - "Off-line wind scatterometer ERS products: user manual". In: *Technical Report C2-MUT-W-01-IF*, Version 2.1, IFREMER-CERSAT, 1999. Disponível em <<http://projets.ifremer.fr/cersat/content/download/2414/16735/file/mutw01.pdf>>. Acessado em Março de 2009.
- ROBALLO, S.T.; FISCH, G. - "Escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA): Parte 1 – Aspectos Observacionais". *Revista Brasileira de Meteorologia*. v.23, n.4, pp. 510-519, 2008.
- ROBINSON, I.S. - *Measuring the Oceans from Space – The principles and methods of satellite oceanography*. Ed. Springer-Praxis. Southampton, 2004.
- SABINS, F.F. - *Remote Sensing - Principles and Applications*. Third Edition, W.H. Freeman and Company, New York, 1999.
- SHUCHMAN, R.; JOHANNESSEN, J.; RUFENACH, C. - "Determination of wind speed wind direction and atmospheric structure using ERS-1 SAR data during NORCSEX'91". *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. pp. 537-539, 1994.
- SILVA, I.H.C. - *Caracterização da dinâmica de inundações utilizando sistemas orbitais de radar em Villahermosa, México*. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010. XV, 151 p.: il.; 29,7 cm.

- SRIVASTAVA, S.; SHEPHERD, N. - "Extraction of beta naught and sigma naught from RADARSAT CDPF products". In: Rev.2-22 May. Contract No.: 9F005-6-0025/001/SN, 1998.
- STAPLES, G.; MENDOZA, A. - "The Use of RADARSAT-1 SAR Data for Operational Wind Fields Retrieval". *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Toronto (Canada), 2002.
- STOFFELEN, A.; ANDERSON, D. - "Scatterometer Data Interpretation: Measurement Space and inversion", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. V. 14, pp. 1298-1313, 1997.
- THOMPSON, D.R.; ELFOUHAILY, T.M.; CHAPRON, B. - "Polarization Ratio for Microwave Backscattering from the Ocean Surface at Low to Moderate Incidence Angles". In: *Proc. IGARSS '98*, Seattle, WA, 1998.
- VACHON, P.W.; DOBSON, F.W. - "Validation of wind vector retrieval from ERS-1 SAR images over the ocean". *Global Atmosphere and Ocean System*, v. 5, pp.177-187, 1996.
- VAN DER SANDEN, J.J. - "Anticipated applications potential of RADARSAT-2 data", *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 30, n. 3, pp. 369-379, 2004.
- XIE, T.; PERRIE, W. - "Comparison of high wind retrieved from RADARSAT-2 SAR data with *in situ* buoy data and QuikSCAT wind vectors". SEASAR Workshop, Canada, 2010.
- WACKERMAN, C.C.; COLÓN, P.C. – *SAR Marine User Manual*, 2001.
- WISMANN, V. - "A C-band wind scatterometer model derived from the data obtained during the ERS-1 calibration/validation campaign". Proc. First ERS-1 Symp, 1992.
- ZECCHETO, S.; DE BIASIO, F. - "Computation of Wind Field from ENVISAT ASAR WIDE SWATH and ERS SAR Images Without any a Priori Information". *Envisat Symposium 2007', Montreux, Switzerland*. Pp. 23-27, April 2007 (ESA SP-636, July 2007).
- Canada Centre for Remote Sensing (CCRS). Disponível em: <http://www.cct.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter3/02_e.php>. Acessado em Julho de 2010.

European Space Agency (ESA). Disponível em:
<http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/Radar_Course_III/>. Acessado em Julho de 2010.

Jet Propulsion Laboratory (JPL). Missions-*QuikSCAT*. Disponível em:
<<http://winds.jpl.nasa.gov/missions/QuikSCAT/index.cfm>>. Acessado em Março de 2010.

MDA - MacDonald Dettwiler. Disponível em: <<http://www.mda.ca/radarsat-2/products/>>
Acessado em Setembro de 2010.

National Hurricane Centre (NHC). Disponível em
<<http://www.nhc.noaa.gov/2008atlan.shtml>>. Acessado em: Março de 2011.

Remote Sensing Systems Home Page. QSCAT. Disponível em:
<http://www.QuikSCAT.com/qscat/qscat_description.html>. Acessado em Março de 2010.

Remote Sensing Systems Home Page. QSCAT. Disponível em:
<http://www.ssmi.com/qscat/qscat_browse/html>. Acessado em Março de 2010.

Threetek. Disponível em: <http://www.threetek.com.br/radarsat_esp.php#1>. Acessado em Março de 2010.

ANEXO

Modos de operação do Satélite RADARSAT-1 Fonte: THRETEK, 2010.

Modo de operação	Posições	Faixa dos Ângulos de incidência (°)	Resolução nominal (m)	Área nominal (km²)
Fine	F1 near	36,4 – 39,6	10	50 x 50
	F1	36,5 – 39,9		
	F1 far	37,2 – 40,3		
	F2 near	38,8 – 41,8		
	F2	39,2 – 42,1		
	F2 far	39,6 – 42,5		
	F3 near	41,1 – 43,7		
	F3	41,5 – 44,0		
	F3 far	41,8 – 44,3		
	F4 near	43,1 – 45,5		
	F4	43,5 – 45,8		
	F4 far	43,8 – 46,1		
	F5 near	45,0 – 47,2		
	F5	45,3 – 47,5		
	F5 far	45,6 – 47,8		
Standard	S1	20 - 27	25	100 x 100
	S2	24 - 31		
	S3	30 - 37		
	S4	34 - 40		
	S5	36 - 42		
	S6	41 - 46		
	S7	45 - 49		
Wide	W1	20 - 31	30	165 x 165
	W2	31 - 39		
	W3	39 - 45		
ScanSAR Narrow	SN1	20 - 40	50	300 x 300
	SN2	31 - 46		
ScanSAR Wide	SW1	20 - 49	100	500 x 500

Modos de operação do Satélite RADARSAT-2 Fonte: THRETEK, 2010.

	Modo de operação	Área nominal	Faixa dos Ângulos de incidência (°)	Resolução aproximada: Alcance x Azimute
	Standard	100 km ²	20-49	25 x 28 m
	<i>Wide</i>	150 km ²	20-45	25 x 28 m
Polarização seletiva: Transmissão H ou V Recepção em H ou V ou (H e V)	Low Incidence	170 km ²	out/23	40 x 28 m
	High Incidence	70 km ²	50-60	20 x 28 m
	Fine	50 km ²	37-49	10 x 9 m
	ScanSAR <i>Wide</i>	500 km ²	20-46	100 x 100 m
	<i>ScanSAR Narrow</i>	300 km ²	20-49	50 x 50 m
Polarimetria Transmissão em H e V em pulsos alternados Recepção em H e V em todos os pulsos	Standard Quad-Pol	25 km ²	20-41	25 x 28 m
	Fine Quad-Pol	25 km ²	20-41	11 x 9 m
Polarização Seletiva Simples Transmissão em H ou V Recepção em H ou V	Multi-Look Fine	50 km ²	30-50	11 x 9 m
	Ultra-fine	20 km ²	30-40	3 x 3 m