

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-8605-TDI/790

**DETECÇÃO DE MANCHAS DE ÓLEO NA SUPERFÍCIE DO MAR
POR MEIO DE TÉCNICAS DE CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL DE
IMAGENS DE RADAR DE IMAGENS DE ABERTURA SINTÉTICA
(RADARSAT-1)**

Luciana de Souza Soler

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. João Antônio Lorenzetti e Dra. Corina da Costa Freitas, aprovada em 19 de dezembro de 2000.

INPE
São José dos Campos
2002

528.711.7

SOLER, L. S.

Detecção de manchas de óleo na superfície do mar por meio de técnicas de classificação textural de imagens de radar de abertura sintética (RADARSAT-1) / L. S. Soler – São José dos Campos: INPE, 2000.

167p. – (INPE-8605-TDI/790).

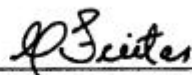
1.Mancha de óleo. 2.Radarsat-1. 3.Classificação de imagens. 4.Derramamento. 5.Poluição de óleo. 6.Texturas. 7.Imagem de radar. 8.Radar de abertura sintética (SAR). I.Título.

Aprovada pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de **Mestre** em **Sensoriamento Remoto**.

Dr. João Antônio Lorenzzetti


Orientador/Presidente/INPE/SJCampos-SP

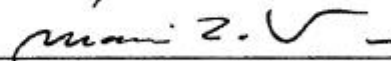
Dr^a Corina da Costa Freitas


Orientadora/INPE/SJCampos-SP

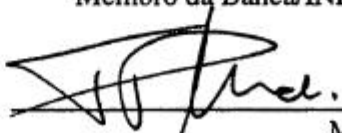
Dr. José Luiz Stech


Membro da Banca/INPE/SJCampos-SP

Dr. Márcio Luiz Vianna


Membro da Banca/INPE/SJCampos-SP

Dr. Fernando Pellon de Miranda


Membro da Banca
Convidado PETROBRÁS/Rio de Janeiro-RJ

Candidato (a): Luciana de Souza Soler

São José dos Campos, 19 de dezembro de 2000.

**“To see a world in a grain of sand
and heaven in a wild flower,
Hold infinity in the palm of your hand
and eternity in an hour.”**

Willian Blake

**A meus pais, Nelson e Terezinha, a meu irmão Wilson,
e a meu companheiro e amigo Anderson Nobre.**

AGRADECIMENTOS

A meu companheiro Anderson da Silva Nobre, pelo apoio incondicional em todos os momentos, e principalmente por seu amor, admiração e paciência.

A meus pais, Nelson e Terezinha Soler, e a meu irmão Wilson, pelo total apoio às minhas decisões e pelo amor constantemente demonstrado em gestos, palavras e atitudes.

Aos amigos Mariana Bressan (Mary), Raul Patrício Silva Gomez (Raúúl), Rita Márcia da Silva Pinto (Ritinha), Marcelo Parise (Crá), Francisco Maldonado (Fran) e Patrícia Carneiro Genovez (Patrilets), pelos excelentes momentos de diversão, pela sinceridade e carinho, pelas palavras de amizade nas horas certas e pela constante motivação.

Aos amigos de turma Linda Naura, Eliomar, Sestini, Fred, Alexandre e Fábio, e do SPD, Cláudio, Alexandre, Glauco, Marcelo, Bruno, Helena e Juliano pela amizade, pelos momentos de descontração e apoio em muitas dificuldades.

À Dra. Corina da Costa Freitas, pela dedicada orientação ao trabalho, pela indispensável ajuda, colaboração e apoio em todos os momentos, e, principalmente, pelo carinho, incentivo e motivação.

Ao Dr. João Antônio Lorenzzetti, pela oportunidade de trabalho, pela orientação e constante contribuição na elaboração deste trabalho, bem como pelas valiosas sugestões.

Ao Dr. Valdir Inocentini, pelo fornecimento dos dados meteorológicos, pela indispensável atenção dada ao trabalho, e pela constante gentileza.

Ao Dr. Fernando Pellon de Miranda, pelo apoio na obtenção dos dados SAR cedidos pela Petrobrás, e principalmente pelas incomensuráveis contribuições ao trabalho.

À Dra. Áurea Maria Ciotti, pela gentileza no processamento da imagem SeaWiFS, e principalmente pelo companheirismo, amizade e compreensão.

À MSc. Sydnéa Maluf Rosa, pela especial atenção, constante entusiasmo e carinho em todos os momentos.

Aos amigos e companheiros de trabalho Camilo Daleles Rennó, Sidnei Sant'Anna, Maria Carolina de Moraes, Rosana Okida e Manoel Araújo Souza Júnior, pela incomensurável ajuda e constante contribuição ao trabalho.

Ao Dr. Márcio Vianna, pela ajuda e especial atenção ao trabalho, pela prestatividade e amizade.

Ao Dr. João Diehl, pela enorme prestatividade na solução de inúmeros problemas operacionais, e ao Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro, pelo empenho na disponibilização e configuração da versão Spring GISAM utilizada neste trabalho.

Ao, muito em breve, Dr. João Pedro Cordeiro pela amizade, disponibilidade e prestatividade em todos momentos.

Ao Dr. Eduardo Camargo, pelo auxílio nas inúmeras correções do texto com valiosas críticas e sugestões.

Ao MSc. Carlos Eduardo Salles de Araújo, pelo processamento dos dados AVHRR/NOAA.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida. Ao INPE, pelo apoio logístico.

À RADARSAT International e THREE TEK, por ceder nove imagens de radar de abertura sintética do sistema RADARSAT-1.

À Petrobrás, por ceder gentilmente 2 imagens RADARSAT -1.

À Nau Filosófica dos Navegantes Sem Rumor pelos momentos de filosofia e crescimento cultural tão escassos nos dias de hoje.

A todas as pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho com sua atenção, conhecimento, sugestões ou amizade.

RESUMO

A procura por reservas de petróleo ao longo de plataformas continentais tem sido realizada, ao longo dos anos, em águas cada vez mais profundas, sendo que o petróleo cru e seus derivados são transportados por um número crescente de navios e oleodutos submarinos através dos oceanos. Como resultado destas atividades, o derramamento de óleo se mostra como uma séria ameaça à preservação e manutenção da saúde dos oceanos. Em virtude das limitações de técnicas convencionais de fiscalização e monitoramento da poluição do mar, tem-se buscado as técnicas de sensoriamento remoto orbital, como as apresentadas neste trabalho. Foram utilizadas imagens do sistema RADARSAT-1/SAR nos modos *Fine* e *ScanSAR Wide* obtidas na região da Bacia de Campos-RJ. A estas imagens foram aplicados dois tipos de classificadores texturais: *Texture* e CTS. Para a determinação da verdade terrestre, foram utilizados dados de direção e intensidade do vento e ondas, devido ao intervalo de 3 a 8 m/s de velocidade do vento a que se limita o monitoramento de óleo; e temperatura da superfície oceânica e cor do oceano no auxílio de localização de áreas de ressurgência, células de chuva e atividade biológica intensa. Os resultados das classificações foram analisados através de um teste estatístico, utilizando o coeficiente de concordância kappa. Observou-se que o *Texture* apresentou classificações superiores nas imagens *Fine* em relação ao CTS. Por outro lado, o CTS apresentou resultados superiores quando aplicado às imagens *ScanSAR Wide*. Conclui-se que a utilização dos classificadores *Texture* e CTS deve ser feita de modo complementar, conforme o modo de imageamento utilizado. Por fim, concluiu-se que o SAR se mostrou uma ferramenta útil na detecção de manchas na superfície oceânica.

OIL SPILL DETECTION AT THE SEA SURFACE BY TEXTURAL CLASSIFICATION TECHNIQUES OF SYNTHETIC APERTURE RADAR IMAGES (RADARSAT-1)

ABSTRACT

Oil spills are a serious threat to the ocean preservation and health. Throughout the years, the search for offshore oil reserves has been moved to deeper waters, resulting in an increasing number of ships and pipelines transporting both the crude oil and its derivatives. Because of the limitations of the conventional techniques to monitor oil pollution, remote sensing becomes a powerful tool, and Synthetic Aperture Radar (SAR) images have been used for this purpose. However, there is a need to evaluate the different image processing techniques to detect the presence of oil at the sea surface in SAR images. In this work two textural classifiers were applied: Texture and the Semivariogram Textural Classifier (STC), on RADARSAT-1/SAR Fine and ScanSAR Wide beam modes. Used images were acquired for the continental shelf of Campos Basin-RJ. Wind and wave data derived from numerical forecast models were used to help the interpretation of processed images. In addition, images of sea surface temperature and ocean color were used to indicate probable oil spill look-alikes associated with upwelling areas, rain cells or regions with intense biological activities. The results of both classifiers were analyzed by a statistical test using the kappa coefficient of agreement. Texture classifier showed better results for Fine mode images, while STC performed better on ScanSAR Wide images. Therefore, it was concluded that the use of Texture and STC classifiers should be complementary and used according to the beam mode. The results reinforce the potential of SAR data as an useful tool to detect and monitor oil spills at the sea surface, as long as concurrent auxiliary data is available to minimize misclassification.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO..... 23

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... 27

2.1 Física de Radar.....	27
2.1.1 Vantagens e Limitações.....	30
2.1.2 Sistemas de Radar.....	32
2.2 O Sistema RADARSAT-1.....	35
2.3 Detecção de Manchas de Óleo no Mar.....	41
2.3.1 Amortecimento de Ondas de Superfície.....	43
2.3.2 Vantagens de Detecção de Manchas de Óleo por SAR sobre outras Técnicas..	52
2.3.3 Limitações na Detecção de Camadas de Óleo por Radares Imageadores.....	53
2.3.3.1 Filmes Naturais.....	53
2.3.3.2 Camadas de Gelo.....	54
2.3.3.3 Baixa Velocidade dos Ventos de Superfície.....	54
2.3.3.4 Desvio de Correntes de Ar pelo Relevo.....	54
2.3.3.5 Zonas de Cisalhamento.....	55
2.3.3.6 Células de Chuva.....	55
2.3.3.7 Ondas Internas.....	56
2.3.3.8 Óleo Natural.....	56
2.4 A Poluição por Óleo no Brasil.....	57
2.5 Histórico da Utilização de Sensores Remotos na Detecção de Manchas de Óleo..	58
2.6 Histórico do Desenvolvimento de Algoritmos para Detecção de Manchas de Óleo.....	61

CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO..... 65

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA..... 69

4.1 Materiais.....	70
4.2 Métodos.....	71
4.2.1 Seleção das Imagens SAR.....	71
4.2.2 Seleção das Imagens AVHRR/NOAA.....	72
4.2.3 Determinação dos Dados Meteorológicos.....	73
4.2.4 Seleção dos Dados SeaWiFs.....	74
4.2.5 Tratamento das Imagens.....	75
4.2.5.1 Padrão da Antena.....	77
4.2.5.2 Ruído <i>Speckle</i> e as Técnicas de Filtragem.....	77

4.2.6 Cruzamento dos Dados.....	79
4.2.7 Algoritmos de Classificação.....	79
4.2.7.1 O Classificador Textural por Semivariograma (CTS).....	80
4.2.7.2 O Classificador <i>Texture</i>	86
4.2.8 Métodos de Análise das Classificações.....	95
4.2.8.1 Teste de Hipótese.....	97
4.2.8.2 Cálculo do p-valor.....	99
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	101
5.1 Resultados das Correções Radiométricas.....	101
5.1.1 Efeito do Padrão da Antena.....	101
5.1.2 Filtragem.....	101
5.2 Cruzamentos dos Dados.....	105
5.3 Resultados do Classificador CTS.....	119
5.4 Resultados do Classificador <i>Texture</i>	124
5.4.1 O Classificador Padrão.....	125
5.4.2 O Classificador por Árvore.....	127
5.4.3 Comparação entre os Resultados do Classificador <i>Texture</i>	130
5.5 Comparação entre os Resultados dos Classificadores CTS e <i>Texture</i>	131
5.6 Análises Complementares.....	138
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	147
APÊNDICE A – AMOSTRAGEM NO CTS.....	153
APÊNDICE B – DADOS EM FORMATO DIGITAL.....	167

LISTA DE FIGURAS

Pág.

1.1 - Porcentagens anuais de contribuições das fontes de óleo nos oceanos.....	24
2.1 - Espectro eletromagnético e as bandas utilizadas na região de microondas.....	28
2.1 - Janelas de transmissão atmosférica na região de microondas.....	28
2.3 - Geometria de aquisição do radar de abertura sintética	33
2.4a - Relação de Bragg entre comprimento de onda da superfície e ângulo de incidência do radar.....	35
2.4b - Relação de ressonância de Bragg quando a normal à crista das ondas da superfície forma um ângulo ϕ com a direção de visada do radar.....	35
2.5 - O sistema RADARSAT-1.....	36
2.6 - Configuração das órbitas ascendente e descendente do RADARSAT-1.....	36
2.7 - Esquema dos modos de imageamento do sistema RADARSAT-1/SAR.....	37
2.8 - Posições dos feixes de imageamento (esq.) e comparação da dimensão e parâmetros dos diferentes modos de imageamento (dir.).....	38
2.9 - Cobertura global do sistema RADARSAT-1/SAR para um dia no modo <i>ScanSAR</i>	39
2.10 - Espalhamento do sinal do radar em uma superfície livre da influência de camadas de óleo e em uma superfície amortecida pela presença de óleo.....	42
2.11 - Coeficiente (ou taxa) de amortecimento de onda como função do número de onda para superfícies d'água cobertas com substâncias viscosas que formam filmes naturais, provenientes do meio oceânico.....	48
2.12 - Ocorrência do desvio de ventos pelo relevo do continente.....	55
2.13 - Ocorrência de vazamento de óleo natural do fundo oceânico.....	56
3.1 - Localização da área de estudo	65
3.2 - Áreas de exploração de óleo e gás natural na plataforma continental do sul do Brasil.....	66
3.3 - Detalhe das áreas de exploração de óleo e gás natural na região da Bacia de Campos – RJ.....	67
4.1 - Fluxograma geral das atividades do trabalho.....	69
4.2 - Esquema da área de abrangência das imagens SAR utilizadas, sendo 1 e 2 as imagens <i>ScanSAR Wide</i> de 15/07/97, 3 a imagem <i>ScanSAR Wide</i> de 05/07/98, 4 a imagem <i>Fine</i> de 06/09/96 e 5 a imagem <i>Fine</i> de 04/09/96.....	75
4.3 - Esquema do recorte realizado nas imagens SAR utilizadas, sendo que imagem <i>Fine</i> (4) foi recortada em duas partes, 4a e 4b.....	76
4.4 - Esquema básico de funcionamento do CTS.....	81
4.5 - Semivariograma experimental.....	82
4.6a - Distribuição dos pares de pixels no caso circular para $h=2$	83
4.6b - Organização de pares de pixels no caso tradicional para $h=2$	83
4.7a - Organização de pares de <i>pixels</i> considerando a direção e a abertura para o caso tradicional.....	84

4.7b - Organização de pares de <i>pixels</i> considerando a direção e abertura para o caso circular.....	84
4.8 - Gráfico de distribuição das classes 1 (óleo), 2 (baixa de vento), 3 (água) e 4 (embarcação) em relação à média.....	92
4.9 - Gráfico de dispersão entre as medidas média e variância do vetor diferença para as classes óleo, baixa de vento, água e embarcação.....	93
4.10 - Distribuição normal da estatística z , onde a região crítica corresponde às extremidades da curva delimitadas, ou seja, menor que $-z_{\alpha/2}$ e maior que $z_{\alpha/2}$	99
5.1 - Imagem <i>ScanSAR Wide</i> de 05/07/98 original.....	102
5.2 - Imagem <i>ScanSAR Wide</i> de 05/07/98 com o filtro da Mediana 7x7.....	102
5.3 - Imagem <i>ScanSAR Wide</i> de 05/07/98 com o filtro Gama 7x7.....	102
5.4 - Imagem <i>ScanSAR Wide</i> de 05/07/98 com o filtro Gama 9x9.....	102
5.5 - Imagem <i>Fine</i> de 04/09/96 original.....	103
5.6 - Imagem <i>Fine</i> de 04/09/96 com o filtro da Mediana 7x7.....	103
5.7 - Imagem <i>Fine</i> de 04/09/96 com o filtro Gama 7x7.....	104
5.8 - Imagem <i>Fine</i> de 04/09/96 com o filtro Gama 9x9.....	104
5.9 - Recorte da imagem <i>Fine</i> de 04/09/96 com filtro da Mediana 7x7, onde as cores das setas estão relacionadas às seguintes classes: vermelho – óleo, verde – água, azul – célula de chuva e preto – embarcação/plataforma.....	107
5.10 - Imagem <i>Fine</i> de 06/09/96 com filtro da Mediana 7x7, recorte superior, onde as cores das setas estão relacionadas às seguintes classes: vermelho – óleo, verde – água e preto – embarcação/plataforma.....	108
5.11 - Imagem <i>Fine</i> de 06/09/96 com filtro da Mediana, recorte inferior, onde as cores das setas estão relacionadas às seguintes classes: vermelho – óleo, verde – água e preto – embarcação/plataforma.....	109
5.12 - Recorte da imagem <i>ScanSAR Wide</i> de 15/07/97 original (superior), onde as cores das setas estão relacionadas às seguintes classes: vermelho – óleo, verde – água, branco – baixa de vento e preto – embarcação/plataforma.....	110
5.13 - Recorte da imagem <i>ScanSAR Wide</i> de 15/07/97 original (inferior), onde as cores das setas estão relacionadas às seguintes classes: vermelho – óleo, verde – água, branco – baixa de vento e preto – embarcação/plataforma.....	111
5.14 - Recorte da imagem <i>ScanSAR Wide</i> de 05/07/98 original, onde as cores das setas estão relacionadas às seguintes classes: vermelho – óleo, verde – água, branco – baixa de vento e preto – embarcação/plataforma.....	112
5.15 - Dados de altura e direção de onda (à esquerda) e intensidade e direção do vento (à direita) de 03/09/1996, com simulação de 33 horas para o dia 04/09/1996.....	113
5.16 - Dados de altura e direção de onda (à esquerda) e intensidade e direção do vento (à direita) de 14/07/1997, com simulação de 22 horas para o dia 15/07/1997.....	114
5.17 - Dados de altura e direção de onda (à esquerda) e intensidade e direção do vento (à direita) de 05/07/1998, com simulação de 18 horas para o momento de passagem do satélite.....	114
5.18 - Mapa de TSM de 15/07/97, incluindo a região da Bacia de Campos – área relativa às imagens SAR de 15/07/97.....	115

5.19 - Mapa de TSM de 06/07/98, incluindo a região da Bacia de Campos – área relativa à imagem SAR de 05/07/98.....	116
5.20 - Mapa de temperatura de topo de nuvem, onde as áreas em preto significam temperaturas acima de -10°C , de 06/09/96 incluindo a região relativa à imagem SAR de 06/09/96.....	117
5.21 - Esquema do tamanho do <i>pixel</i> da imagem SeaWiFs, em comparação ao tamanho da maior feição escura observada.....	118
5.22 - Semivariograma das amostras de óleo, baixa de vento, água e embarcação tomadas na imagem <i>ScanSAR Wide</i> de 15/07/97 (superior), com lag 20.....	119
5.23 - Semivariograma das amostras de óleo, baixa de vento, água e embarcação tomadas na imagem <i>ScanSAR Wide</i> de 15/07/97 (superior), com lag 10.....	120
5.24 - Semivariograma das amostras de óleo, baixa de vento, água e embarcação tomadas na imagem <i>ScanSAR Wide</i> de 15/07/97 (superior), com lag 5.....	121
5.25 - Classificação pelo <i>Texture</i> - padrão da imagem <i>Fine</i> de 04/09/96 original.....	133
5.26 - Classificação pelo <i>Texture</i> - padrão da imagem <i>Fine</i> , recorte superior, de 06/09/96 original.....	134
5.27 - Classificação pelo <i>Texture</i> - padrão da imagem <i>Fine</i> , recorte inferior, de 06/09/96 original.....	135
5.28 - Classificação pelo <i>Texture</i> - padrão da imagem <i>ScanSAR Wide</i> superior de 15/07/97 filtrada.....	136
5.29 - Classificação pelo CTS da imagem <i>ScanSAR Wide</i> inferior de 15/07/97 filtrada.....	136
5.30 - Classificação pelo CTS da imagem <i>ScanSAR Wide</i> de 05/07/98 filtrada.....	137
5.31 - Gráfico de dispersão das medidas de curtose e assimetria para as amostras de óleo e célula de chuva da imagem <i>Fine</i> de 04/09/96.....	139
5.32 - Gráfico de dispersão das medidas de curtose e assimetria para as amostras de óleo e baixa de vento da imagem <i>ScanSAR Wide</i> de 05/07/98.....	139
5.33 - Gráfico de dispersão das medidas de curtose e assimetria para as amostras de óleo e baixa de vento da imagem <i>ScanSAR Wide</i> de 15/07/97.....	140
5.34 - Gráfico de dispersão das medidas de área e complexidade para amostras de óleo e baixa de vento da imagem <i>ScanSAR Wide</i> de 15/07/97.....	141
5.35 - Gráfico de dispersão das medidas de área e complexidade para amostras de óleo e baixa de vento da imagem <i>ScanSAR Wide</i> de 05/07/98.....	141

LISTA DE TABELAS

2.1 - Descrição dos modos de imageamento do RADARSAT-1/SAR.....	40
2.2 - Parâmetros dos filmes monomoleculares obtidos em um experimento de tanque de vento.....	47
2.3 - Esquema das áreas de aplicações de acordo com os instrumentos mais utilizados do sistema ERS.....	60
2.4 - Recomendações de uso dos modos de imageamento do RADARSAT-1 para aplicações oceânicas.....	61
4.1 - Valores utilizados para os parâmetros do segmentador Rwseg nos testes realizados.....	95
4.2 - Matriz de confusão.....	96
5.1 - Coeficiente kappa para as classificações da imagem <i>ScanSAR Wide de 15/07/97</i> para cada tipo de cálculo do semivariograma.....	122
5.2 - Resultados dos coeficientes de concordância kappa das classificações no CTS, e do teste de hipótese entre as classificações nas imagens originais e filtradas.....	123
5.3 - Medidas de textura utilizadas e resultados dos coeficientes de concordância kappa das classificações no <i>Texture</i> - padrão, e do teste de hipótese entre as classificações nas imagens originais e filtradas.....	126
5.4 - Medidas de textura utilizadas e resultados dos coeficientes de concordância kappa das classificações no <i>Texture</i> - árvore, e do teste de hipótese entre as classificações nas imagens originais e filtradas.....	129
5.5 - Resultados dos coeficientes de concordância kappa e do teste de hipótese entre as melhores classificações no <i>Texture</i> pelos métodos padrão e árvore.....	130
5.6 - Resultados dos coeficientes de concordância kappa e do teste de hipótese entre as melhores classificações no CTS e no <i>Texture</i>	132

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AVHRR	- Advanced Very High Resolution Radiometer
CETESB	- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CPTEC	- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CSA	- Canadian Space Agency
CTS	- Classificador Textural por Semivariograma
ENVI	- Environment for Visualizing Images
ERS	- European Remote Sensing Satellite
ESA	- European Space Agency
FAPESP	- Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
IBAMA	- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
IDL	- Interactive Data Language
IEAPM	- Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
NASA	- National Aeronautics and Space Administration
NOAA	- National Oceanic and Atmospheric Administration
RADARSAT-1	- Radar Satellite – 1
RAR	- Real Aperture Radar
SAR	- Synthetic Aperture Radar
SeaWiFS	- Sea Wide-Field Sensor
SISPESCA	- Sistema de Informações para Apoio à Pesca
SLAR	- Side Looking Airborne Radar
TSM	- Temperatura da Superfície do Mar
UNESP	- Universidade Estadual de São Paulo

“ A finalidade da ciência é a busca de um conjunto simples de princípios fundamentais, através dos quais todos os fatos conhecidos são compreendidos e novos resultados são previstos.” T.D. Lee - Prêmio Nobel de 1965

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A procura por reservas de petróleo ao longo de plataformas continentais tem sido realizada, ao longo dos anos, em águas cada vez mais profundas, sendo que o petróleo cru e seus derivados são transportados por um número crescente de navios e oleodutos submarinos através dos oceanos (Scott, 1999). Como resultado destas atividades, o derramamento de óleo se mostra como uma séria ameaça à preservação e manutenção da saúde dos oceanos.

O impacto ambiental da introdução de poluentes no mar depende não apenas do volume e composição do material despejado como também da localização geográfica, variáveis biológicas, oceanográficas, meteorológicas, entre outras. No caso de derramamentos de óleo, as propriedades físico-químicas do material possuem grande influência nos efeitos gerados (Luporini, 1996). Assim, derramamentos em regiões de alta influência das correntes marítimas podem ser deslocados para mar aberto facilitando os processos de dispersão natural do óleo por intemperismo, enquanto que, em regiões onde esta influência é menor, como baías, canais e enseadas, estes processos são mais lentos, causando impactos e desastres ecológicos que podem durar muitos anos.

O tamanho do derramamento, portanto, não está diretamente relacionado com o grau de dano causado aos ecossistemas envolvidos. Até mesmo pequenos derramamentos podem causar grandes danos a um meio ambiente ecologicamente sensível, como, por exemplo, baías, canais e enseadas onde existe pequena influência de correntes marítimas. Nestas regiões, os processos de dispersão dos poluentes são mais lentos, aumentando a probabilidade de impactos ambientais e desastres ecológicos que podem durar muitos anos. Ao contrário, em regiões de alta influência destas correntes, um

derramamento pode ser deslocado para mar aberto, facilitando os processos de dispersão natural do óleo por intemperismo (Pavlakis et al., 1996).

Estima-se que a quantidade de óleo derramado anualmente em todo o mundo ultrapassa 4,5 milhões de toneladas. Os maiores contribuintes para estes números são as operações de limpeza dos reservatórios dos navios petroleiros, onde o óleo é despejado ilegalmente no oceano, sendo, assim, responsáveis por cerca de 45% da poluição. Aproximadamente 2 milhões de toneladas de óleo são introduzidas anualmente por tais operações, o que equivale a um vazamento por semana de todo o reservatório de um petroleiro. Apenas 7% do óleo contido no mar pode ser diretamente atribuído a acidentes em plataformas e navios. Descargas de lixo urbano e industrial, as quais alcançam os oceanos pelos cursos dos rios, também estão entre os maiores fatores contribuintes para o aumento da poluição no mar (ESA, 1998). A Figura 1.1 mostra as fontes de poluição por óleo nos oceanos.

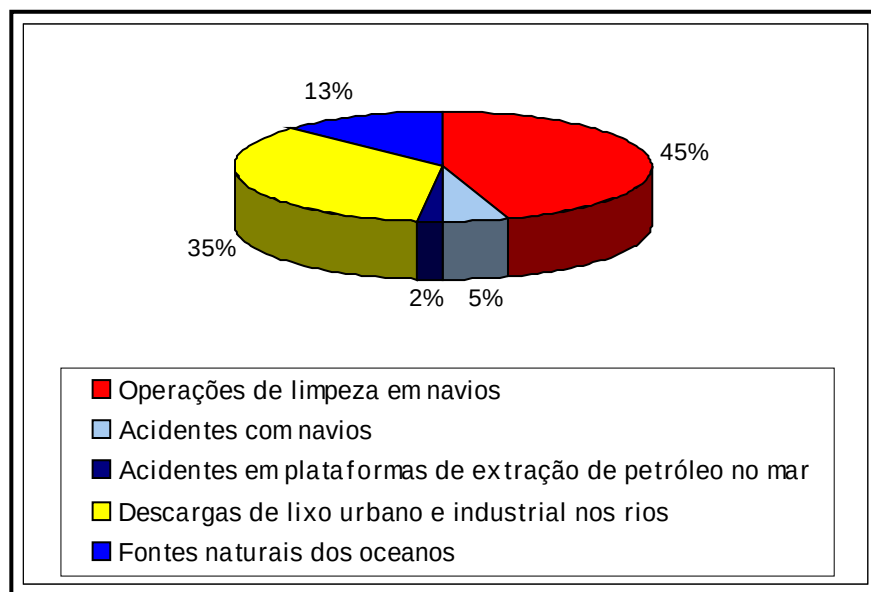


Fig. 1.1 – Porcentagens anuais de contribuições das fontes de óleo nos oceanos.
FONTE: ESA (1998).

Apesar da indústria de petróleo estar aparentemente informada da legislação imposta por órgãos internacionais e dos riscos da poluição marinha, existem ainda grandes evidências de inúmeros e repetitivos impactos causados por esta indústria aos ecossistemas marinhos. Para que sejam instaurados sistemas de monitoramento adequados, torna-se necessário um grande esforço financeiro por parte dos países envolvidos no comércio e/ou exploração de petróleo.

Algumas técnicas convencionais, como a notificação de derramamento de óleo através da observação visual de tripulantes de embarcações da guarda costeira, de navios civis e, inclusive, de aviões, têm sido utilizadas. Entretanto, cobrem uma pequena porcentagem detectável de óleo derramado.

Em virtude das limitações de técnicas convencionais de fiscalização e monitoramento da poluição do mar, tem-se buscado as técnicas de sensoriamento remoto orbital. Estas técnicas oferecem a possibilidade de complementar e otimizar as estratégias de detecção, permitindo uma cobertura mais efetiva e em tempo real (ou quase real), tanto do óleo proveniente de fontes antrópicas (acidentes e poluição), quanto daquele proveniente de fontes naturais, o que facilita, inclusive, a busca de novos pontos de exploração. O monitoramento remoto de manchas de óleo também permite uma melhor visão dos processos de dispersão das camadas de óleo, sendo, portanto, uma fonte de dados para a formulação e aferição de modelos de circulação oceânica segundo o movimento das camadas de óleo.

O Brasil, com sua imensa costa, ainda não possui um sistema de monitoramento adequado às técnicas recentes e de comprovada eficiência na detecção de manchas de óleo. Baseando-se neste fato, este trabalho foi formulado com o objetivo principal de avaliar a potencialidade de detecção de feições oceânicas de manchas de óleo através de imagens orbitais de radar de abertura sintética na região da Bacia de Campos. Os objetivos específicos foram:

- Identificar padrões estatísticos da morfologia das manchas através de medidas de área, complexidade, curtose e assimetria;
- Identificar padrões estatísticos de diferenciação de resposta ao radar entre manchas de óleo e alguns fenômenos de superfície que se assemelham a manchas de óleo;
- Avaliar a influência da variação de visada do radar em alcance, na detecção de manchas;
- Avaliar o efeito das variações ambientais tais como vento e ondas, na detecção de manchas.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo objetiva a compreensão teórica dos princípios físicos adotados e do funcionamento do sistema de radar utilizado no trabalho. Discute-se problemas envolvidos na detecção de óleo descritos pela literatura e a situação atual do monitoramento de óleo no Brasil. Por fim, apresentam-se históricos sobre detecção de óleo por sensores remotos e sobre algoritmos de classificação específicos para detecção de manchas de óleo.

2.1 Física de Radar

O princípio básico do radar imageador consiste na emissão da radiação eletromagnética direcionada à superfície terrestre e na gravação de intensidade e tempo de retardo da energia retroespalhada pelo alvo na superfície. Esta informação é transportada através de ondas eletromagnéticas que são definidas por: direção de propagação, amplitude, comprimento de onda (λ) ou frequência (ν), polarização e fase. Os radares utilizados em sensoriamento remoto emitem pulsos de radiação com comprimentos de onda entre 1 cm a 1 m que se propagam à velocidade da luz. Estes pulsos são modificados pelo alvo de forma que o sinal de retorno (eco) traz informações sobre este alvo. A Figura 2.1 mostra a distribuição dos comprimentos de onda de todo o espectro eletromagnético e as faixas correspondentes aos tipos de sensores com a classificação das ondas no espectro e as bandas (K,X,C,S,L e P) utilizadas por radares.

A faixa de microondas é especialmente adequada para aplicações em sensoriamento remoto, pois neste intervalo as ondas eletromagnéticas sofrem pequena atenuação atmosférica (Figura 2.2), penetrando, portanto, facilmente as nuvens e possibilitando assim o imageamento, mesmo sob condições de nebulosidade.

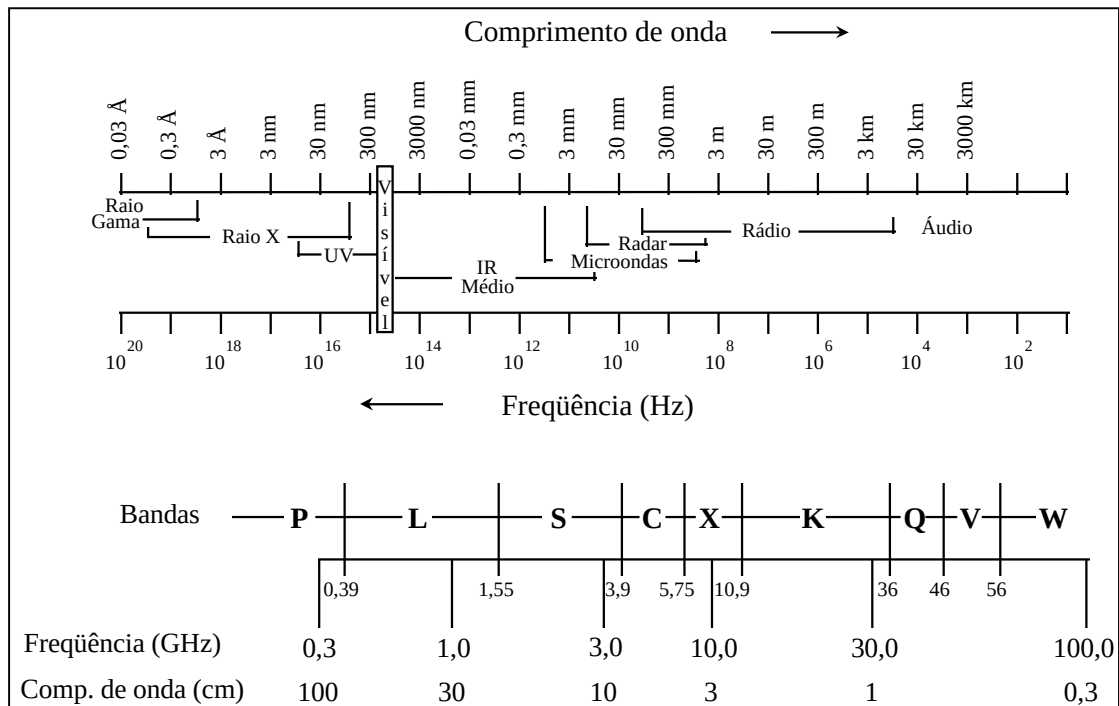


Fig. 2.1 – Espectro eletromagnético e as bandas utilizadas na região de microondas.
 FONTE: Dallemand et al. (1993, p. 4).

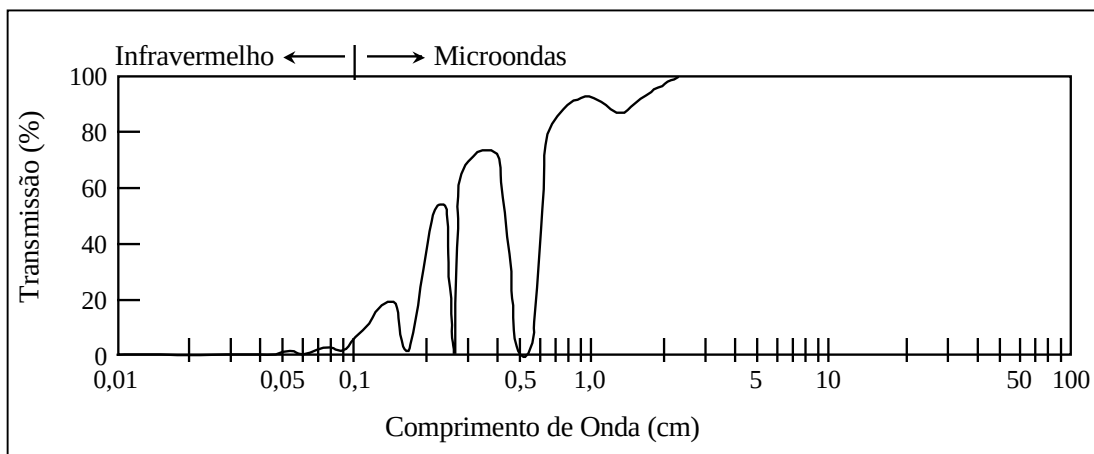


Fig. 2.2 – Janelas de transmissão atmosférica na região de microondas.
 FONTE: Adaptada de Curlander e McDonough (1991, p. 5).

A habilidade do radar em obter informações está diretamente ligada à quantidade de sinais refletidos pelos alvos. As imagens são construídas pela integração de vários pulsos refletidos. Assim o brilho de cada elemento da imagem amostral (área imageada à qual corresponde cada *pixel* após o processamento) traduz a percentagem de energia

refletida pela área no terreno correspondente. O que é retroespalhado pela superfície, retornando ao radar, é definido como a seção transversal normalizada do radar (σ_0) que é uma fração entre a potência do radar retroespalhada por unidade de ângulo sólido, e a potência recebida pela superfície em questão. Esta variável, que traduz o brilho da imagem, é determinada principalmente pelas grandezas físicas relativas ao sensor: frequência da radiação, polarização e ângulo de incidência, e relativas ao alvo: rugosidade, constante dielétrica e orientação do alvo em relação à direção do pulso do radar. Na faixa de microondas, a profundidade de penetração da radiação em uma superfície tende a ser maior para maiores comprimentos de ondas, ou seja, menores frequências. Além disso, ela é inversamente proporcional à condutividade e salinidade do alvo. Por esta razão, na água a penetração das microondas é desprezível.

A polarização traz informações a respeito da orientação dos campos elétrico e magnético de uma onda eletromagnética. Normalmente, se associa a polarização de uma onda eletromagnética à orientação de seu campo elétrico. Os radares podem ter diferentes configurações de polarização. As polarizações lineares HH, VV, HV e VH são as mais comuns, onde a primeira letra indica a polarização do pulso emitido (H – horizontal e V – vertical) e a segunda a polarização do pulso captado pelo sensor (eco).

A rugosidade de um alvo não é uma propriedade intrínseca deste, mas depende das irregularidades de sua superfície em relação ao comprimento de onda (λ) e ao ângulo de incidência da radiação que o ilumina (θ). No caso em que as dimensões das irregularidades superficiais são comparáveis ao comprimento de onda do sinal do radar, tem-se a ocorrência do chamada espalhamento Rayleigh definido por:

$$\beta(\theta, \lambda) = \frac{2\pi^2}{H\lambda^4} [n(\lambda) - 1]^2 (1 + \cos^2 \theta) \quad (2.1)$$

Onde H é número de moléculas por unidade de volume e $n(\lambda)$ é o índice de refração das moléculas. Dessa forma, uma superfície é considerada rugosa se sua estrutura possui dimensões que são comparáveis ao comprimento de onda do pulso. Portanto, deve ser considerado o comprimento de onda da radiação incidente, pois uma superfície com irregularidades de poucos centímetros pode ser rugosa na banda C ($\lambda \sim 5.6$ cm) e lisa na banda P ($\lambda \sim 75$ cm).

Como exemplo, as superfícies de águas relativamente calmas aparecem escuras em uma imagem de radar (banda C), pois a maior parte do pulso incidente é refletida em um ângulo fora do alcance de visada do receptor. Dizemos nesse caso que houve um espalhamento especular, processo inverso ao retroespalhamento, onde o pulso refletido retorna pelo mesmo caminho em que chegou à superfície. Como será melhor detalhado adiante, existem alguns tipos de onda que ocorrem na superfície do mar e que são responsáveis pela maior parte do retroespalhamento ao radar.

2.1.1 Vantagens e Limitações

O radar é um sistema ativo, ou seja, possui sua própria fonte de radiação, não necessitando de uma fonte externa, ao contrário dos sensores óticos como câmaras fotográficas, scanners de varredura, entre outros. Por este motivo, o radar pode obter imagens em qualquer hora do dia ou da noite. Além disso, as microondas podem facilmente atravessar nuvens e poluentes atmosféricos, pois a atenuação atmosférica dessas ondas é relativamente baixa. A capacidade de gerar imagens em, praticamente, quaisquer condições de tempo é uma das principais vantagens dos radares sobre os sistemas óticos. Apesar de inúmeras vantagens, o radar também possui limitações, dentre as quais as mais significativas são: grandes distorções geométricas, principalmente em regiões de alto relevo; ruído *speckle* e necessidade de um grande suporte computacional para o processamento dos dados brutos e das imagens. Estes problemas têm sido parcialmente solucionados, mas ainda constituem-se de fontes de pesquisa para melhoria do uso operacional de radares (Kux, 1997).

O ruído *speckle* é sempre associado a sistemas de imageamento coerente, tais como os obtidos por microondas, laser e ultra-sonografia. A resposta ao radar do tipo SAR, mesmo que para um simples tipo de superfície, contém importantes variações do nível de cinza que podem ocorrer entre células de resolução adjacentes. Considere que uma célula de resolução de uma cena imageada possui um número muito grande de elementos difusores. Estes elementos são responsáveis pela formação de cada pixel da imagem, e estão aleatoriamente distribuídos. Os retroespalhamentos de cada um destes elementos interferem entre si construtiva ou destrutivamente, fazendo aparecer variações súbitas na intensidade da imagem caracterizando o ruído *speckle* (INPE, 1997; Rennó, 1995).

A informação dominante de imagens SAR com frequência e polarização únicas se manifesta na forma de variações espaciais locais de tonalidade, como detalhes texturais e estruturais. O ruído *speckle*, que é inerente ao SAR, dificulta a interpretação das imagens, e portanto deve ser minimizado (Mohanty, 1997). O *speckle* pode ser reduzido através de dois métodos: o processamento multi-visadas e técnicas de filtragem (Kux, 1998).

As imagens com mais de uma visada (look) são oriundas do processamento multi-visadas, o qual consiste na divisão dos dados disponíveis em vários setores que são, então, processados independentemente. A imagem final é composta pela média de intensidade das imagens de cada visada, geradas separadamente. Supõe-se que as imagens de cada visada sejam estatisticamente independentes entre si. Esta técnica aumenta a relação sinal-ruído da imagem final, e por consequência, diminui o efeito do ruído *speckle*.

Apesar do ruído *speckle*, muitas vezes, dificultar a visualização das feições nas imagens, ele é protagonista na formação das diferenças de textura e tonalidade. Dessa forma, é importante tratar o ruído *speckle* de modo a otimizar a possibilidade de separação de alvos, porém com o mínimo de perda das informações contidas na imagem.

2.1.2 Sistemas de Radar

Os sistemas de radar podem ser agrupados em imageadores e não imageadores. Os imageadores compreendem os radares de visada lateral de abertura real (RAR/SLAR) e os radares de visada lateral de abertura sintética (SAR), e entre os não imageadores destacam-se os escaterômetros, os espectrômetros e os altímetros.

Os radares RAR e os SLAR foram os primeiros sistemas imageadores por microondas. Possuem uma antena que ilumina lateralmente os alvos, com um feixe de iluminação largo na vertical e estreito na horizontal, em relação ao movimento da aeronave onde o sistema é acoplado. A varredura de geração da imagem é feita pelo próprio movimento da aeronave durante a passagem sobre a área a ser coberta. Este tipo de radar apresenta o inconveniente de possuir a chamada resolução azimutal (paralela à trajetória da aeronave) diretamente proporcional à distância alvo-antena, e inversamente proporcional ao comprimento da antena utilizada no imageamento. Dessa forma, para se obter uma melhor resolução azimutal deve-se ou diminuir a distância alvo-antena, ou aumentar o comprimento da antena (Lillesand & Kiefer, 1994).

O radar de abertura sintética, desenvolvido na década de 50, resolve os problemas do SLAR, uma vez que a resolução azimutal desse sistema independe da distância entre o radar e o alvo, portanto pode operar a bordo de uma plataforma móvel como aeronaves ou satélites (Lillesand & Kiefer, 1994).

A resolução do sistema SAR é dependente do comprimento da antena. Existe a grande vantagem da técnica de abertura sintética. Esta técnica consiste no processamento de sinais que simula uma antena de comprimento maior que o real pela compensação coerente de cada sinal de retorno. Quando o radar se aproxima de um ponto na superfície, os sinais de retorno são alterados pelo efeito Doppler (construtivamente na aproximação e destrutivamente no distanciamento alvo-antena), o que possibilita o

imageamento do ponto durante todo o tempo em que este se encontra sob a iluminação do radar. A Figura 2.3 mostra a geometria de aquisição do SAR e os parâmetros envolvidos, onde θ é ângulo de incidência.

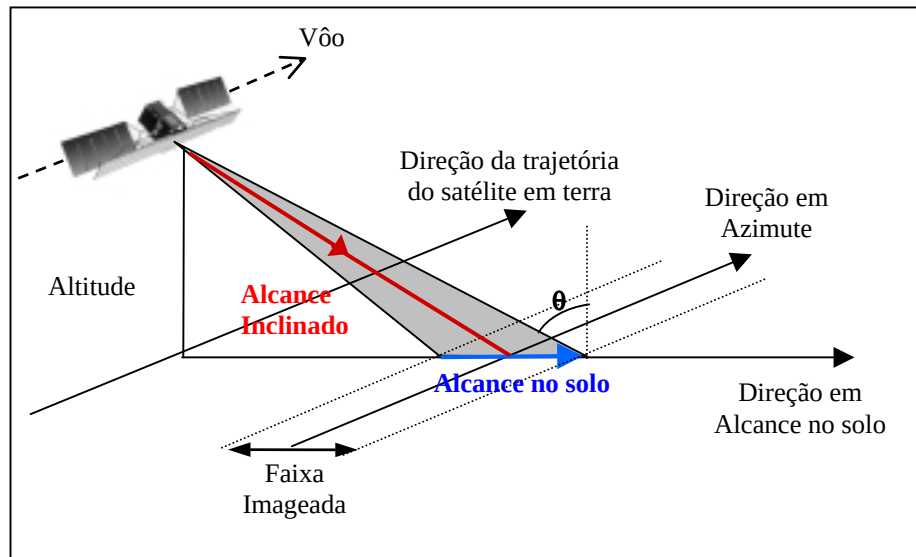


Fig. 2.3 – Geometria de aquisição do radar de abertura sintética.
FONTE: Soares (1998).

Em aplicações oceanográficas, o retorno do sinal do radar se dá pelo efeito do chamado retroespalhamento de Bragg. Este fenômeno não pode ser analisado somente através das fontes de espalhamento infinitesimais, de forma individual, mas sim através do retorno ressonante de uma única componente de onda, a qual é filtrada por uma interferência construtiva nas ondas retroespalhadas de todo o espectro de onda. A teoria de Bragg estabelece que, para uma superfície randômica dividida em seus componentes espectrais, a energia retroespalhada dominante origina-se das componentes que estiverem em ressonância com a onda incidente (Espedal, 1998a).

As ondas capilares e de gravidade são as principais responsáveis pelo processo de espalhamento da radiação de microondas na superfície do oceano, e sob as mais variadas condições oceânicas e de visada do radar (Wright, 1978). As ondas capilares refletem as ondas de radar, pois possuem comprimentos de ondas compatíveis com os

exigidos para uma condição ressonante de Bragg com ondas eletromagnéticas centimétricas, características de microondas. Embora sejam as ondas capilares as responsáveis pelo retroespalhamento de Bragg, este é modulado pelas ondas de gravidade e por outros fenômenos cinemáticos ou dinâmicos presentes nas camadas superiores do oceano. A equação 2.2 fornece os comprimentos de onda de uma superfície que satisfazem as condições de Bragg:

$$\lambda_s = \frac{n\lambda_r}{2\sin\theta} \quad n = 1, 2, 3... \quad (2.2)$$

onde λ_r é o comprimento de onda da radiação incidente (radar), θ o ângulo de incidência e n um número inteiro positivo. O retroespalhamento de Bragg é dominante quando $n=1$. Quando a superfície do mar é influenciada por ventos suaves, não havendo ocorrência de quebra das cristas das ondas, o retroespalhamento do radar se deve à componente do espectro de onda da superfície que estiver em ressonância com o comprimento de onda do sinal do radar. A normal à crista da onda de ressonância de Bragg forma um ângulo reto com a direção de visada do radar (perpendicular à direção de vôo), como mostra a Figura 2.4a. Quando este ângulo assume outros valores (Figura 2.4b), o critério de espalhamento de Bragg é dado pela equação 2.3 onde λ_s' é o comprimento de onda das ondas da superfície se propagando a um ângulo ϕ em relação à direção de visada do radar.

$$\lambda_s' = \frac{\lambda_r \sin\phi}{2\sin\theta} = \lambda_s \sin\phi \quad (2.3)$$

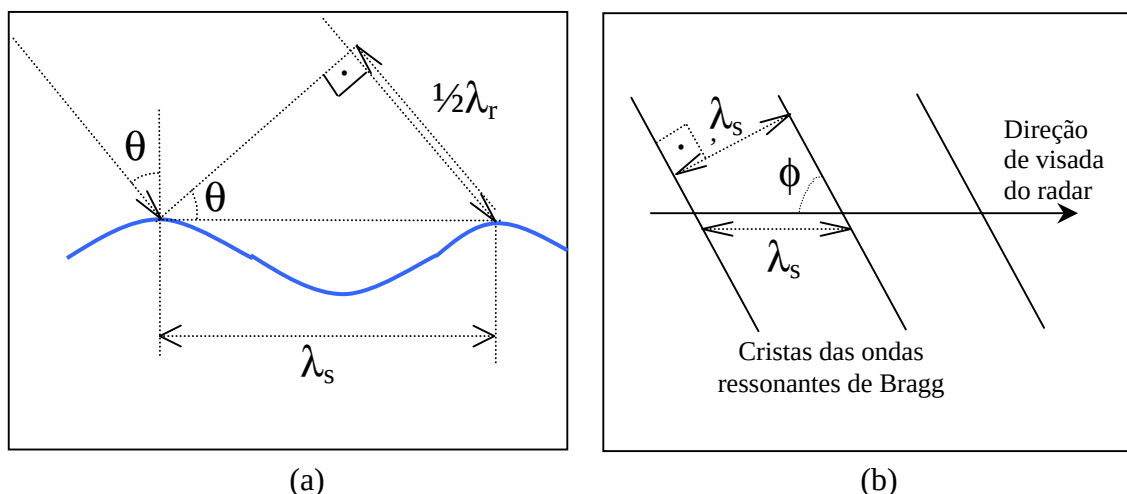


Fig. 2.4 – (a) Relação de Bragg entre comprimento de onda da superfície e ângulo de incidência do radar e (b) Relação de ressonância de Bragg quando a normal à crista das ondas da superfície forma um ângulo ϕ com a direção de visada do radar.

FONTE: ESA (1994).

2.2 O Sistema RADARSAT-1

A missão RADARSAT, desenvolvida pela Agência Espacial Canadense (CSA), teve seu início operacional em novembro de 1995, com o lançamento do RADARSAT-1 (Figura 2.5). O satélite RADARSAT-1 foi posicionado numa órbita quase polar, com inclinação de $98,6^\circ$, síncrona com o Sol, a uma altitude de 798 km. Este satélite completa um ciclo de revisita de uma mesma órbita em torno da Terra em 24 dias, com um período orbital de cerca de 100,7 minutos (CSA, 1999). O RADARSAT-1 pode adquirir imagens tanto em órbita ascendente, com visada para leste, quanto descendente, com visada para oeste (Figura 2.6).

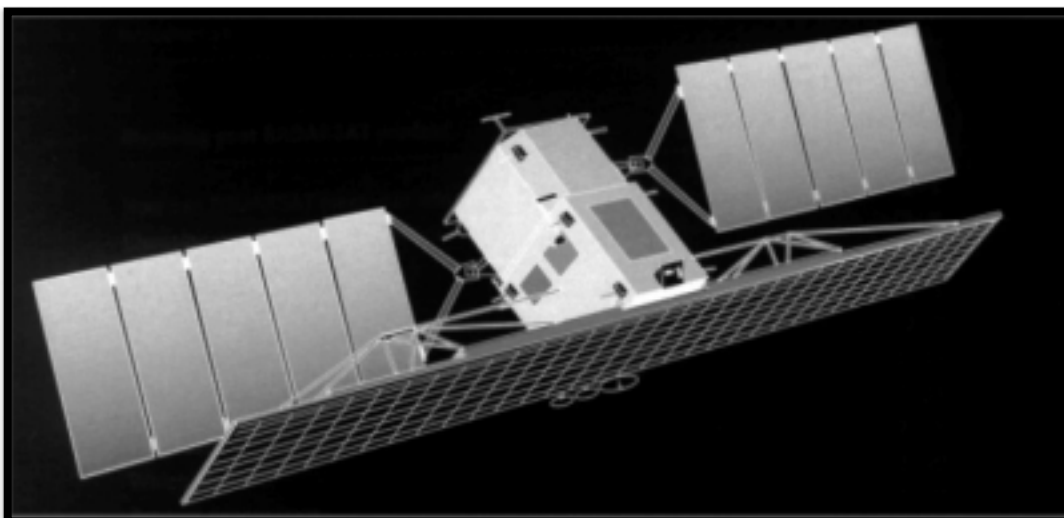


Fig. 2.5 – O sistema RADARSAT-1.
FONTE: RADARSAT Internacional (1995).

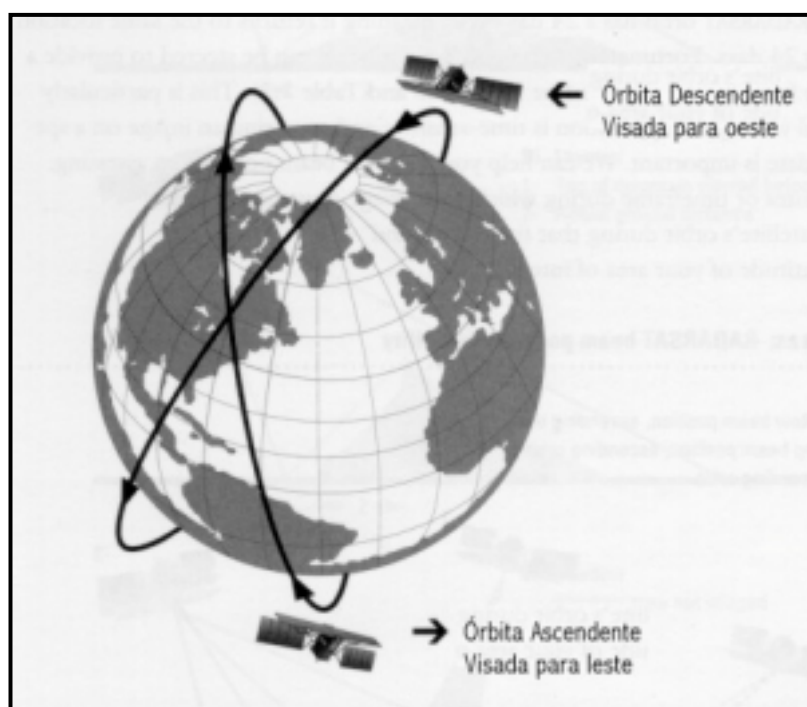


Fig. 2.6 – Configuração das órbitas ascendente e descendente do RADARSAT-1.
FONTE: RADARSAT Internacional (1995).

A passagem do satélite RADARSAT-1 sobre um mesmo ponto geográfico ocorre em dois diferentes horários durante o dia. Quando a passagem se dá na órbita descendente,

o satélite atravessa o Equador por volta de 6:00 da manhã em horário local. Se a passagem for ascendente, o satélite atravessa o Equador por volta de 6:00 da tarde, horário local. O horário de passagem segundo a localidade depende, portanto, da latitude.

O SAR a bordo do sistema RADARSAT-1 opera a uma frequência de 5,3 GHz (banda C) com polarização HH e dimensões da antena de 1,5 x 15 m. Os dados são transmitidos a estações em terra em tempo real e, quando a área imageada se encontra fora das regiões de captação, o RADARSAT-1 é capaz de armazenar os dados de imageamento em gravadores a bordo até atingir uma região abrangida por uma estação. As principais estações de recepção estão localizadas no Canadá, em Prince Albert, Saskatchewan e em Gatineau, Quebec.

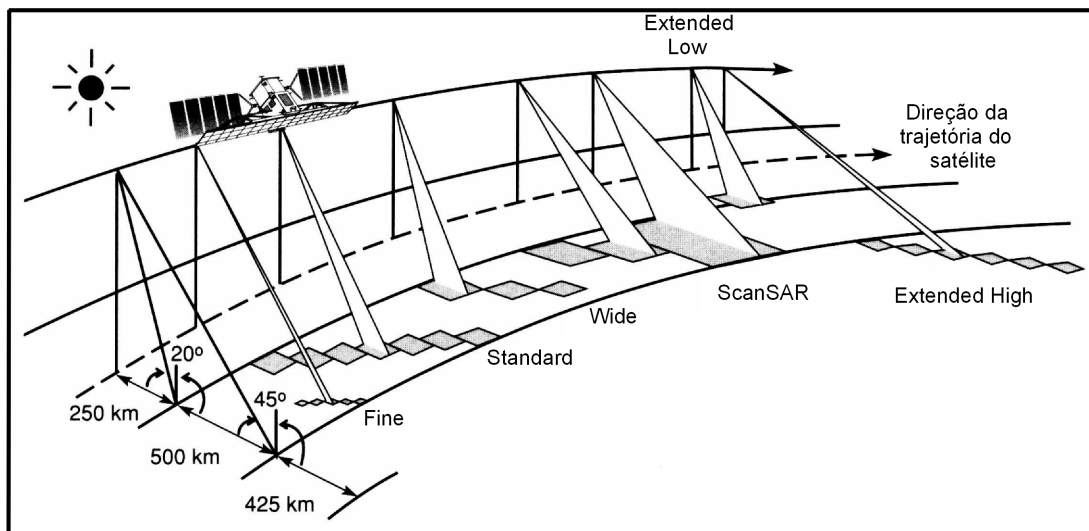


Fig. 2.7 – Esquema dos modos de imageamento do sistema RADARSAT-1/SAR.
FONTE: RADARSAT Internacional (1995).

O sistema RADARSAT-1/SAR possui diversos modos de operação, devido à sua larga variedade de feixes (Tabela 2.1). Cada modo é definido pelas dimensões da área de recobrimento (faixa imageada), e pelo nível de detalhe (resolução espacial). Os

diferentes modos de imageamento e suas especificações estão esquematizados nas Figuras 2.7 e 2.8, respectivamente.

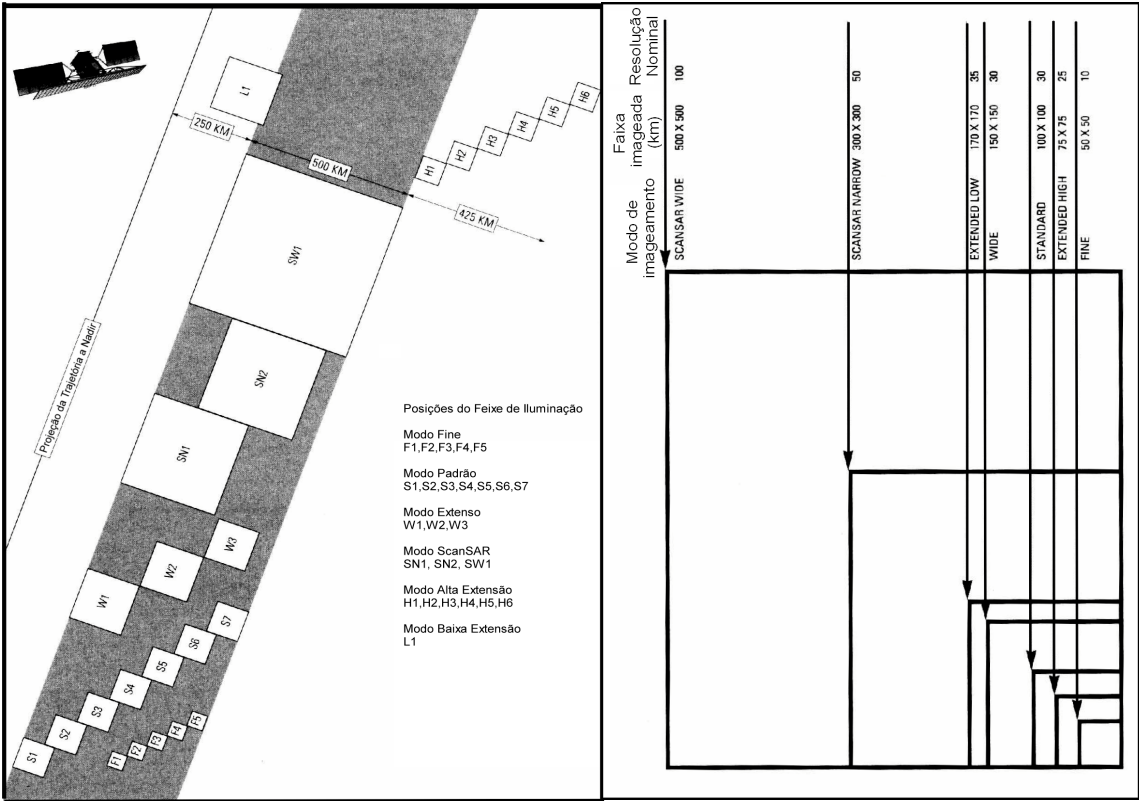


Fig. 2.8 – Posições dos feixes de imageamento (esq.) e comparação da dimensão e parâmetros dos diferentes modos de imageamento (dir.).
 FONTE: RADARSAT Internacional (1995).

O intervalo de revisita depende tanto do modo de imageamento quanto da latitude da área a ser imageada. Por exemplo, o modo *ScanSAR Wide* possui um intervalo de revisita de 2 a 4 dias em latitudes próximas a 20°, sendo que este intervalo diminui com o aumento da latitude, conforme esquematizado na Figura 2.9.

Apesar de especificadas as resoluções nominais de cada modo, comumente se trabalha com o chamado espaçamento de pixel, o qual significa a distância na superfície imageada entre o centro de um pixel e seu vizinho. Este espaçamento depende do tipo de produto utilizado. Um produto do sistema RADARSAT-1/SAR é a combinação dos

parâmetros do satélite (modo de imageamento e posição do feixe) e do nível de processamento do sinal.

Dentre os produtos disponibilizados de acordo com os parâmetros do satélite, tem-se: Imagem Complexa com um único *look* , Imagem Alinhada ao longo da órbita do satélite, com correções para erros sistemáticos do movimento deste, e Imagem Mapa já georreferenciada. É importante ressaltar que todos os produtos RADARSAT-1/SAR possuem um nível de correção radiométrica aceitável em relação aos produtos oferecidos no mercado atual.

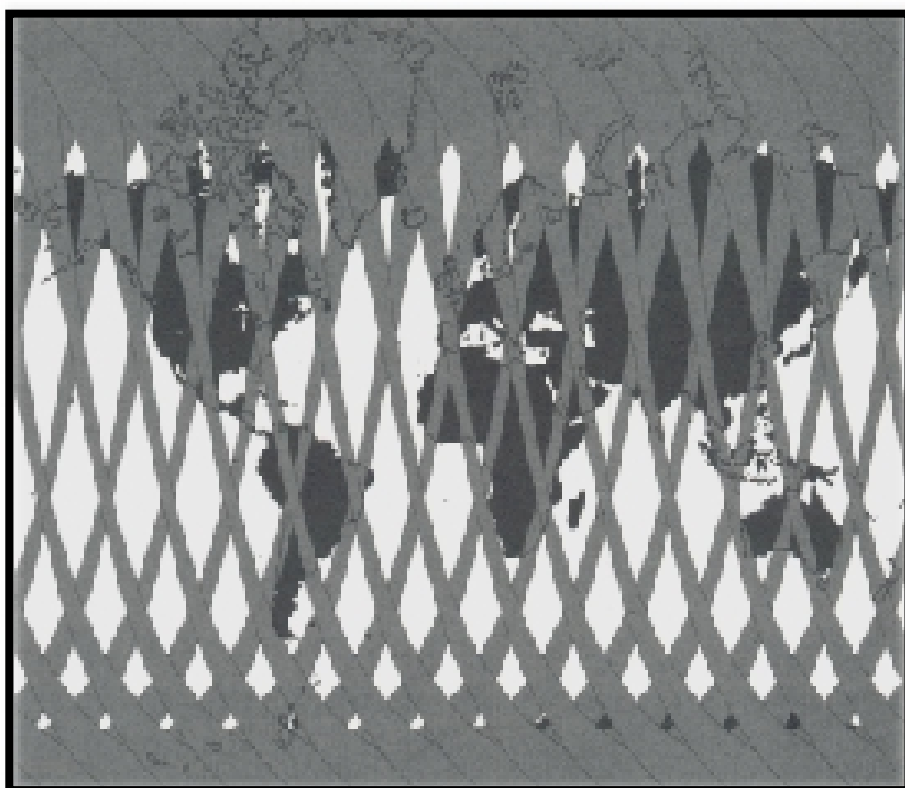


Fig. 2.9 – Cobertura global do sistema RADARSAT-1/SAR para um dia no modo *ScanSAR*.
FONTE: RADARSAT Internacional (1995).

**TABELA 2.1 – DESCRIÇÃO DOS MODOS DE IMAGEAMENTO DO
RADARSAT-1/SAR**

Modos (Beams)	Posição do feixe (Beams Position)	Ângulos de incidência (°)	Faixa Imageada (km)	Resolução Nominal (m)	Nº de Looks
Fino (<i>Fine</i>)	F1 F2 F3 F4 F5	37 - 40 39 - 42 41 - 44 43 - 46 45 - 48	50	10	1
Padrão (<i>Standard</i>)	S1 S2 S3 S4 S5 S6 S7	20 - 27 24 - 31 30 - 37 34 - 40 36 - 42 41 - 46 45 - 49	100	30	4
Extenso (<i>Wide</i>)	W1 W2 W3	20 - 31 31 - 39 39 - 45	165 150 130	30	4
ScanSAR Estreito (<i>ScanSAR Narrow</i>)	SN1 SN2	20 - 40 31 - 46	300	50	2
ScanSAR Extenso (<i>ScanSAR Wide</i>)	SW1	20 - 49	500	100	4
Alta Extensão (<i>Extended High</i>)	H1 H2 H3 H4 H5 H6	49 - 52 50-53 52-55 54-57 56-58 57-59	75	25	4
Baixa Extensão (<i>Extended Low</i>)	L1	10-23	170	35	4

FONTE: RADARSAT Internacional (1995).

O sistema RADARSAT-1/SAR tem sido indicado para uma vasta gama de aplicações, entre elas a detecção e monitoramento de manchas de óleo através dos modos *Fine*, *Standard* e principalmente *ScanSAR* (RADARSAT Internacional,1995; Vachon e Olsen, 1998; Wu et al., 2000). Entretanto, pesquisas na indústria do petróleo têm

indicado a utilização dos modos *Wide* (W1) e *ScanSAR Narrow* (N1), para a detecção de exsudações naturais (Miranda, 2000).

A utilização dos modos *ScanSAR Narrow* e *ScanSAR Wide* está ligada a duas grandes vantagens: Em primeiro lugar, oferecem uma visão mais ampla da área a ser estudada, ou seja, proporcionam uma imagem mais completa da área de interesse e suas vizinhanças. Este fato auxilia na identificação e descrição mais apurada das características ou eventos imageados. Além disso, a partir de uma visão mais ampla, torna-se possível a comparação de dados SAR com outros dados de sensoriamento remoto tais como os provenientes de escaterômetros, imagens infravermelho e imagens de cor do oceano, as quais geralmente possuem resoluções mais grosseiras (Johannessen, 1998; Wu et al., 2000).

A segunda grande vantagem de se utilizar largas faixas de imageamento são os curtos ciclos de cobertura, o que resulta numa melhor resolução temporal em comparação com outros modos. O ciclo de repetição destes modos permite imagear características de mesoescala por vários dias seguidos, ou eventos de ocorrência relativamente curta, os quais não poderiam ser monitorados de outra forma.

O modo *ScanSAR Wide*, com 500 km de faixa de imageada, pode cobrir grandes áreas costeiras a cada 3 dias, sendo este modo uma poderosa ferramenta para o monitoramento costeiro (Wu et al., 2000). Apesar disso, este modo possui a desvantagem de apresentar um produto final em 8 *bits*, e não em 16 *bits* como ocorre para os demais modos do RADARSAR-1/SAR, o que ocasiona uma diminuição da informação original da cena.

2.3 Detecção de Manchas de Óleo no Mar

A capacidade do SAR em detectar ondas de superfície no mar favorece a identificação de manchas devido ao amortecimento de certos tipos de ondas. As ondas geralmente

afetadas por camadas de óleo são as ondas capilares e de ultra gravidade, as quais são geradas pelo vento e possuem períodos muito curtos, respectivamente menores que 0,1 s e entre 0,1 e 1 s (McLellan, 1965). Quanto mais espessa a camada de óleo, maior o amortecimento das ondas, uma vez que o óleo possui, em média, uma viscosidade cerca de 7 vezes maior que a da água do mar. Este amortecimento proporciona uma baixa rugosidade na superfície oceânica, quando a camada de óleo possui espessura suficiente para diminuir, de forma significativa, a tensão superficial da água imediatamente abaixo desta. Fora da influência das camadas de óleo, a superfície do mar apresenta-se um pouco mais clara em imagens de radar, quando existe relativa rugosidade devido à ventos, vórtices e outros fenômenos meteorológicos e oceanográficos.

As áreas de ocorrência de amortecimento das ondas de superfície tendem a aparecer escuras em uma imagem SAR, devido ao baixo sinal de retorno ao radar (Espedal, 1998a; Gade et al., 1998a; Wu et al., 2000), como esquematizado na Figura 2.10.

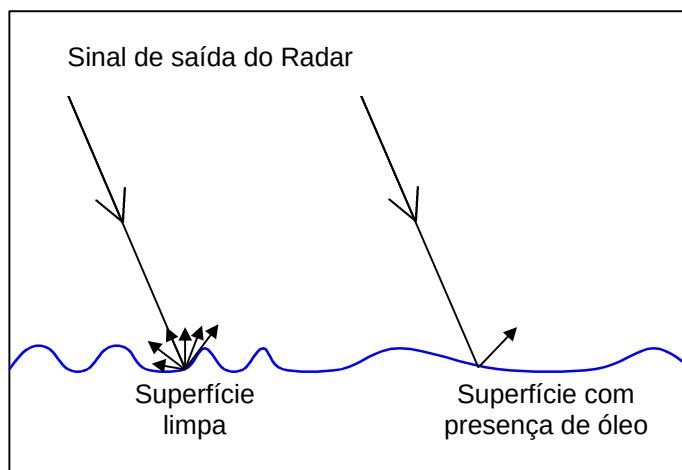


Fig. 2.10 – Espalhamento do sinal do radar em uma superfície livre da influência de camadas de óleo e em uma superfície amortecida pela presença de óleo.
FONTE: Adaptada de Projeto GlobeSAR (1997).

2.3.1 Amortecimento de Ondas de Superfície

O estudo do amortecimento de ondas de superfície por filmes superficiais tornou-se relevante somente no final do século dezenove, quando surgiu um maior interesse por parte da comunidade científica, devido a fatos como a utilização de tais materiais em situações de fortes tempestades para auxiliar no resgate de vítimas de naufrágios, entre outras situações (Alpers e Hühnerfuss, 1989; Scott, 1999).

Para a compreensão do processo de amortecimento de ondas causado por camadas de óleo, torna-se inicialmente necessário descrever o comportamento das ondas de superfície livres da influência de agentes amortecedores. A equação 2.3 descreve de forma geral o movimento ondulatório na superfície do mar, quando esta se encontra livre da influência de camadas de materiais superficiais, como manchas de óleo e filmes naturais.

$$\zeta = \zeta_0 e^{ikx + \eta t} \quad (2.4)$$

Portanto a amplitude (ζ) varia com o tempo t , seguindo um movimento ondulatório devido ao expoente complexo de e , sendo que ζ_0 é a amplitude para $t = 0$ e k é o número de onda. O termo η pode ser escrito como:

$$\eta = -\psi - i\omega \quad (2.5)$$

sendo que ψ [s^{-1}] é a taxa temporal de amortecimento e ω [s^{-1}] é a frequência angular (Espedal, 1998a). Para uma superfície limpa, esta taxa temporal mostra que ondas de baixa amplitude, como as capilares e de ultra gravidade, tendem a ser rapidamente amortecidas (quando na ausência de vento) devido à viscosidade cinemática associada

ao volume d'água (v), conforme pode ser verificado na equação 2.6, onde ψ_o é a taxa de amortecimento temporal para uma superfície limpa e k o número de onda (Lamb, 1932).

$$\psi_o = 2vk^2 \quad (2.6)$$

Segundo Alpers e Hühnerfuss (1989), o coeficiente de amortecimento ou taxa de amortecimento espacial (α_o) pode ser escrito como:

$$\alpha_o = \frac{4\kappa^2\mu\omega}{\rho g + 3\tau\kappa^2} \quad (2.7)$$

onde ρ é a densidade do fluido considerado, τ a tensão superficial, g a aceleração da gravidade e $\mu = \nu\rho$, a viscosidade dinâmica. A equação 2.7, conhecida como equação de Stokes, pode ser obtida se considerarmos $\eta = -i\omega$ e $k = \kappa + i\alpha$, portanto a variável k é então considerada complexa, sendo que sua parte real (κ) representa o número de onda e a parte imaginária a taxa de amortecimento espacial. Desta forma, as equações 2.6 e 2.7 descrevem o processo de amortecimento das ondas, no caso ondas capilares e de ultra gravidade, para uma superfície de águas limpas.

Na ausência de filmes de superfície, o amortecimento se deve principalmente à viscosidade cinemática no volume d'água, enquanto que, na presença de um filme, o amortecimento é causado principalmente pela viscosidade cinemática na camada de filme. Em uma superfície coberta com filmes, o processo de amortecimento de ondas se torna muito mais expressivo (Alpers e Hühnerfuss, 1989). O deslocamento horizontal do filme na direção x é descrito pela equação:

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} = E \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (2.8)$$

onde $\partial \tau / \partial x$ é o gradiente de tensão superficial, $\xi(x,t)$ é a função de deslocamento horizontal do filme e E é chamado de módulo de dilatação da superfície e pode ser escrito como $E = A d\tau/dA$, sendo que A é a uma área molecular, ou seja, área por molécula do agente amortecedor. Em geral, E é uma quantidade complexa que convencionalmente é escrita como $E = E_d + i\omega\eta_d$, onde E_d é chamada elasticidade de dilatação da superfície e η_d é a viscosidade de dilatação da superfície. Dessa forma:

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} = [E_d + i\omega\eta_d] \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (2.9)$$

A importância dos termos real e imaginário de E dependem da espessura da camada amortecedora a ser considerada, bem como as expressões finais do amortecimento das ondas. Dessa forma, consideramos aqui dois tipos diferentes de filmes: filmes naturais (monomoleculares) e camadas de óleo mais espessas, realizando discussões gerais de como ocorre o amortecimento em cada caso e as variáveis envolvidas.

Uma camada de óleo possui uma espessura muito superior àquela de filmes naturais, o que resulta em diferentes propriedades visco elásticas e, portanto, em um diferente amortecimento das ondas oceânicas de superfície. Alguns estudos têm sido realizados com filmes naturais e camadas de óleo (Jenkins e Jacobs, 1997; Alpers e Hühnerfuss, 1989; Wei e Wu, 1992; Gade et al. 1998b), com o intuito de investigar as características do amortecimento em cada caso. Em relação aos filmes naturais, os resultados dos experimentos em laboratório mostraram que um efeito denominado amortecimento de Marangoni, descrito a seguir, é o mecanismo dominante no amortecimento de ondas de superfície na presença de filmes monomoleculares. (Gade et al., 1998c).

A relação entre ressonância e amortecimento de ondas na água está associada ao fato de que superfícies elásticas podem transportar (dentre outros) dois tipos de ondas: as ondas de ultra gravidade e capilares, consideradas aqui como um único tipo (gravidade-capilares), e as chamadas ondas de Marangoni. O termo ondas gravidade-capilares é utilizado para indicar a propagação de ondas de superfície muito curtas e que dependem tanto da tensão superficial quanto da gravidade (Scott, 1999). As ondas de Marangoni são predominantemente ondas longitudinais na camada limite ou de separação. Da mesma forma, um líquido coberto por uma camada monomolecular viscoelástica pode transportar ondas transversais (gravidade-capilares) assim como ondas longitudinais (Marangoni).

A teoria de Marangoni mostra que ocorre um máximo no amortecimento quando para uma dada frequência o número de onda das ondas de Marangoni e gravidade-capilares coincidem (condição fundamental para a ressonância). A frequência e a magnitude do amortecimento máximo dependem da estrutura química e da constituição das moléculas do filme (Hühnerfuss et al., 1987). Como resultado desta teoria, o efeito de amortecimento de ondas por filmes monomoleculares pode ser expresso por um fator $y(f)$, que representa a razão entre os coeficientes de amortecimento de ondas do tipo gravidade-capilares em uma superfície líquida coberta por um filme (α_f), e uma superfície limpa (α_o). Portanto, este fator resulta no coeficiente de amortecimento relativo, ou seja, uma quantidade percentual entre as duas variáveis (Hühnerfuss et al., 1987; Alpers e Hühnerfuss, 1989).

$$y(f) = \frac{\alpha_f}{\alpha_o} = \frac{1 + X(\cos \Theta - \sin \Theta) + XY - Y \sin \Theta}{1 + 2X(\cos \Theta - \sin \Theta) + 2X^2} \quad (2.10)$$

onde:

$$\begin{aligned}
\Theta &= \arctg(\omega\eta_d/E_d) \\
X &= |E| \kappa^2 [2^{1/2} \omega^{3/2} (\rho\mu)^{1/2}]^{-1} \\
Y &= |E| \kappa (4\omega\mu)^{-1} \\
f &= \omega/2\pi \\
\omega^2 &= gk + \frac{\tau}{\rho} k^3
\end{aligned}
\tag{2.11}$$

A Figura 2.11 mostra a função teórica y , para superfícies d'água cobertas com três diferentes substâncias, geralmente presentes em áreas de ocorrências de filmes naturais e provenientes de animais marinhos e processos oceânicos. Supôs-se que os valores de E e θ sejam os dados pela Tabela 2.2, e ainda $\mu = 10^{-3}$ Pa.s, $\rho = 10^3$ kg m⁻³ e $\tau = 0,073$ N.m⁻¹.

**TABELA 2.2 – PARÂMETROS DOS FILMES MONOMOLECULARES
OBTIDOS EM UM EXPERIMENTO DE TANQUE DE VENTO**

Substância	$ E $, N m ⁻¹	θ (graus)
Ácido oléico metil éster (OLME)	0.010	5
Álcool oleil (C ₁₇ H ₃₃ CH ₂ OH) (OLA)	0.0255	175
Trioleína (TOLG)	0.0115	175

FONTE: Adaptado de Alpers e Hühnerfuss, (1989).

É possível observar que a taxa máxima de amortecimento ocorre em aproximadamente 85 rad/m (TOLG), 150 rad/m (OLA) e 200 rad/m (OLME). Utilizando um cálculo comparativo, observa-se que, sobre ondas de comprimento de onda λ_0 , estas substâncias ocasionam uma redução máxima em λ_0 de 26% (OLME), 32% (TOLG) e 51% (OLA).

Apesar da aparente confirmação da teoria de Marangoni em laboratório, esta foi colocada em prova em abril e outubro de 1994, durante duas missões SIR-C/X-SAR, no Mar do Norte. Segundo Gade et al. (1998a), com o auxílio de um escaterômetro a bordo de um helicóptero, foram medidos os diferentes retroespalhamentos do SAR e as

respectivas intensidades e direções do vento na superfície oceânica coberta minutos antes da passagem do SIR-C/X-SAR com a substância OLA . As medidas foram feitas com o intuito de determinar uma possível dependência do coeficiente de amortecimento de onda em relação ao vento de superfície, uma vez que os filmes de superfície quebram sob condições de ventos fortes. O experimento foi realizado em três diferentes situações: intensidade do vento entre 3,5 a 4 m/s, a 5 m/s e a 12 m/s, sendo que, nos dois primeiros casos, o efeito Marangoni foi confirmado, considerando-se o desvio padrão das medidas. Entretanto, no caso de ventos a 12 m/s, os valores de máximo de amortecimento previstos por esta teoria não foram observados, sendo que os valores de coeficiente de amortecimento de onda medidos apresentaram-se menores em relação aos previstos.

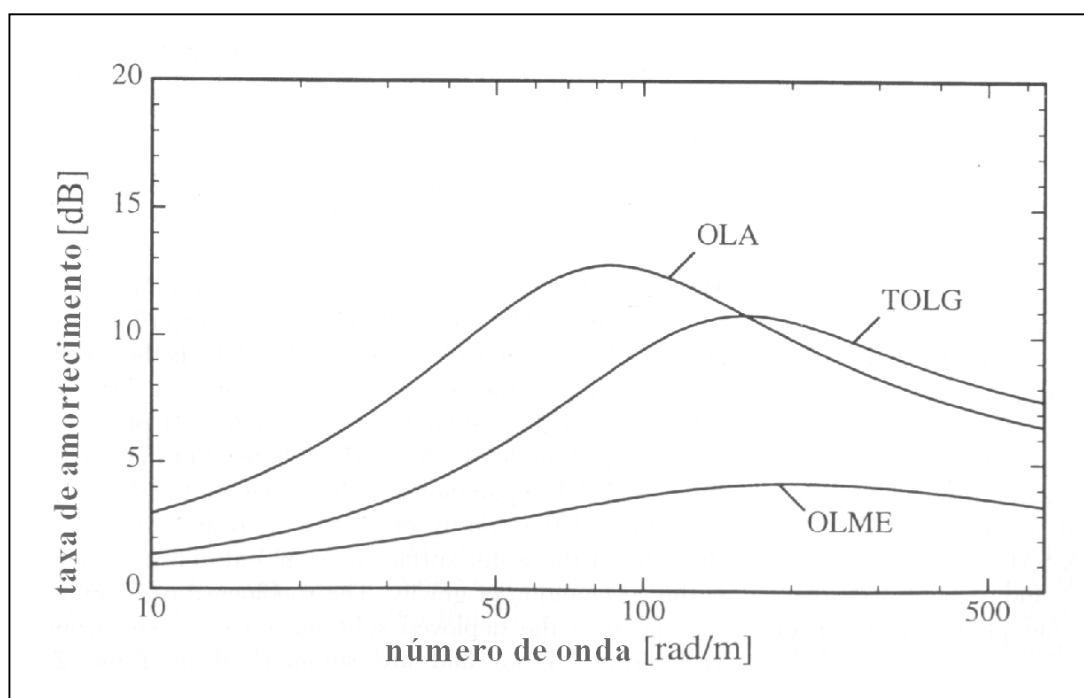


Fig. 2.11 – Coeficiente (ou taxa) de amortecimento de onda como função do número de onda para superfícies d'água cobertas com substâncias viscosas que formam filmes naturais, provenientes do meio oceânico. FONTE: Adaptado de Gade et al., (1998a).

Em virtude da não confirmação da teoria de Marangoni para ventos de superfície a 12 m/s, Gade et al. (1998a) desenvolveram um modelo de amortecimento de ondas para

altas velocidades do vento de superfície. Observou-se que os coeficientes de amortecimento de onda decrescem com o aumento da velocidade do vento, principalmente para frequências das ondas de Bragg acima de 80 rad/s (ou seja, frequências que satisfaçam as condições de espalhamento de Bragg). Dessa forma, concluiu-se que a velocidade de ventos de superfície deve ser considerada na descrição qualitativa do processo de amortecimento de ondas por filmes monomoleculares.

As medidas foram realizadas em termos de σ^o (coeficiente de retroespalhamento do radar), o qual é uma função da frequência, polarização e ângulo de incidência do SAR utilizado. Assim, foi obtida a seguinte equação de dependência entre velocidade do vento e coeficiente de amortecimento de onda:

$$\frac{\sigma^{(o)}(k)}{\sigma^{(f)}(k)} = \frac{\beta_f - 2\alpha_f c_g}{\beta_o - 2\alpha_o c_g} \cdot m^{\Delta n - 4} \left(2u \cdot \sqrt{\frac{|\cos \varphi| k}{g}} \right)^{\Delta n} \quad (2.12)$$

onde c_g é a velocidade de grupo das ondas de superfície, m é o fator de redução inerente à velocidade de fricção do vento e $\Delta n = n_o - n_f$, sendo n um número constante com valor característico do estado da superfície (baixos valores na presença de filmes e altos valores na ausência dos mesmos). Os índices o e f denotam, respectivamente, superfícies livres de filmes e sob a influência de filmes naturais e, β_i é uma variável termo convencionada como termo de entrada de dados de vento, descrita por Mitsuyasu e Honda (1982) e Plant (1982) como:

$$\beta_i = M(\cos \varphi)^{2p} \left(\frac{u_i}{c} \right)^2 \omega \quad (2.13)$$

onde φ é o ângulo entre as direções do vento e de propagação das ondas, u é a velocidade de fricção do vento (dada pela raiz quadrada da razão entre cisalhamento do vento e densidade do ar), c é a velocidade de fase das ondas de superfície, M e p são

constantes geralmente com valores considerados 0,04 e 0,5 respectivamente (Plant, 1982), e $i \in \{0;f\}$.

Este modelo mostrou-se, então, capaz de reproduzir os coeficientes de amortecimento de onda medidos, e capaz de interpretar a ausência do máximo de amortecimento previsto pela teoria de Marangoni nos casos de altas velocidades do vento de superfície. Além disso, este modelo possibilitou uma interpretação mais coerente das semelhanças de resposta entre filmes naturais e camadas de óleo sob condições de ventos fortes.

Apesar das semelhanças de resposta ao radar entre filmes naturais e camadas de óleo, o amortecimento de manchas de óleo acontece de forma diferente em relação aos filmes naturais. Isto se deve principalmente ao fato de que as manchas são geralmente mais espessas do que os filmes naturais formados por camadas monomoleculares, além de sua composição e estrutura, o que acarreta diferenças significativas dos parâmetros do material que influenciam no amortecimento. A tentativa de se descrever matematicamente o amortecimento de ondas capilares e de gravidade por camadas de óleo tem sido feita ao longo do tempo, como em Weber (1987), que estudou teoricamente uma fina camada de fluido Newtoniano altamente viscoso cobrindo uma camada de fluido com menor viscosidade, considerada de profundidade infinita. Os resultados encontrados foram aplicados ao amortecimento de ondas por camadas de blocos de gelo. Entretanto, conforme a crítica de Jacobs (1991, citado por Espedal, (1998a)), a validade prática desta aplicação pode ser falha pelo fato dos blocos de gelo serem muito grandes para sua modelagem como um fluido Newtoniano.

Jenkins e Jacobs (1997) investigaram, em teoria, a taxa de amortecimento de ondas do tipo gravidade-capilares em uma superfície coberta por uma fina camada de fluido Newtoniano de espessura d . Considerou-se que o fluido abaixo da camada, também Newtoniano, como sendo de profundidade infinita. Para uma camada onde $kd \ll 1$ (sendo k o número de onda), e considerando-se as tensões entre as camadas, e as respectivas elasticidades e viscosidades dos fluidos envolvidos, chegaram à seguinte

expressão aproximada de taxa de amortecimento representada pela parte real da expressão:

$$\delta \approx \left\{ 2 \epsilon^2 + \frac{1}{2} v_e + i \Gamma^{-1/2} [\gamma(1 - \rho_c) - \gamma_v] d + \frac{1}{2} i^{-1/2} \rho_c d \epsilon^{-1} \Gamma^{1/4} v_e + \right. \\ \left. \frac{1}{2} i^{1/2} (\rho_c d)^2 \epsilon^{-1} \Gamma^{3/4} (R^2 - 1) \right\} \times [1 + i^{1/2} \epsilon^{-1} \Gamma^{-1/4} v_e + i^{-1/2} \rho_c d \epsilon^{-1} \Gamma^{1/4}]^{-1} \quad (2.14)$$

onde $\Gamma = 1 + \gamma$ e $\gamma = \gamma_c + \gamma_v$ sendo γ_c e γ_v as tensões interfaciais da camada superior de fluido e do volume (fluido inferior). A quantidade ρ_c é a densidade e d a espessura da camada de fluido, $R = (\rho_c + \gamma_c) / \rho_c \Gamma$. E ainda, v_e é função da espessura do filme (d), da elasticidade (χ), viscosidade (v), densidade (ρ) e frequência angular (ω), e finalmente $\epsilon = v^{1/2}$. Para avaliação da equação 2.14, foi realizado um teste utilizando valores correspondentes aos da água como fluido inferior, e aos de combustíveis derivados de óleo como fluido superior com uma espessura de 0.1 mm, considerando a superfície com ondas de 2 cm de comprimento de onda. O resultado da taxa de amortecimento mostrou que, para os valores utilizados, o efeito de amortecimento é dominado pelas elasticidades interfaciais. Verificou-se ainda que o amortecimento é significativamente afetado por filmes com espessuras $d \geq 1$ mm.

Efetuada a divisão entre a parte real da equação 2.14 e a taxa de amortecimento para a água pura e, comparando os resultados com aqueles obtidos pela teoria de Marangoni, verificou-se a possibilidade da utilização desta teoria em associação com a formulada por Jenkins e Jacobs para o cálculo do amortecimento. Entretanto para aplicação desta teoria na distinção de camadas de óleo e filmes naturais através de retroespalhamento de radar, torna-se necessário a compreensão de processos de geração de ondas pelo vento e de processos de interações não-lineares entre diferentes componentes dos campos das ondas de superfície (Jenkins e Jacobs, 1997).

2.3.2 Vantagens de Detecção de Manchas de Óleo por SAR sobre outras Técnicas

O monitoramento da poluição por óleo no mar baseado na utilização de navios e aeronaves (observação visual por tripulantes e dados SLAR) apresenta algumas desvantagens relevantes, a saber:

- Extenso intervalo de tempo decorrido entre uma descarga ilegal de óleo e sua detecção (a menos quando flagrantes são registrados), tornando difícil denúncias e rápidas tomadas de decisões;
- Condições de tempo desfavoráveis impossibilitam vôos sobre as áreas afetadas;
- Os recursos disponíveis para utilização de detecção com aeronaves permitem, na maioria dos casos, cobertura de uma pequena fração das zonas costeiras afetadas pela poluição;
- Evidências de derramamento de óleo baseadas somente em dados SLAR são frequentemente consideradas insuficientes para aplicação das punições previstas em lei.

Atualmente, a disponibilidade de dados de satélite para observação da Terra oferece a possibilidade de complementação e otimização das estratégias de pesquisas. Assim, é possível aprimorar as estratégias atuais de monitoramento de óleo na superfície do mar a partir da utilização de dados SAR. São descritas a seguir as principais vantagens do uso de SAR orbital neste tipo de operação:

- Associações de dados coletados por satélites, embarcações e aeronaves aumentam as chances de detecções em tempo real e, portanto, acionamento mais rápido de operações de limpeza, evitando grandes danos ao meio ambiente;
- Cobertura regular de grandes áreas e de áreas de difícil acesso a um custo mais baixo em relação ao uso de aeronaves;
- Visões sinópticas de grandes áreas, proporcionando análises mais detalhadas e cálculos de estatísticas mais apuradas na detecção;
- Exsudações de óleo do fundo oceânico podem ser detectados e a sua ocorrência cuidadosamente monitorada;

- Possibilidade de estudos mais aprofundados do espalhamento das camadas de óleo, servindo como fonte de dados nos estudos de dispersão da poluição e de modelos de dispersão oceânica.

2.3.3 Limitações na Detecção de Camadas de Óleo por Radares Imageadores

Manifestações de camadas superficiais no oceano são repetidamente observadas em imagens de radares aerotransportados e orbitais. Sob certas condições atmosféricas, as características destas feições em imagens são muito similares às aquelas associadas a camadas de óleo derramado no mar. Este fato é considerado um dos principais problemas no uso do SAR para o monitoramento e a detecção de manchas de óleo provocadas pela ação antrópica (Espedal, 1998b). As principais manifestações de similaridade em imagens SAR com camadas de óleo são causadas por fenômenos naturais como ventos, filmes naturais na superfície do mar, ondas, correntes, entre outros, e estão descritas a seguir.

2.3.3.1 Filmes Naturais

São geralmente produzidos por uma série de processos de interação entre a superfície ar-água a partir de substâncias expelidas por peixes e plâncton, as quais são deslocadas para a superfície por processos de convecção, difusão e ressurgência. Sob condições relativamente calmas, estes filmes podem ocupar extensas áreas, principalmente em locais onde a atividade biológica é alta como regiões costeiras, áreas de ressurgência e ao longo de fronteiras de correntes marítimas.

A propagação de ondas através de uma superfície coberta por um filme natural causa compressão e dilatação deste filme (Hühnerfuss et al., 1987). Surge então, um gradiente de tensão superficial, o qual por sua vez, provoca um aumento no gradiente vertical de velocidade dentro das camadas de superfície onde o filme está presente. Ocorre assim um aumento no amortecimento e portanto, as ondas de Bragg são atenuadas e o sinal

retroespalhado para o SAR é significativamente reduzido. Deve-se também considerar que a presença de ventos acima de 7 m/s tende a aumentar a quantidade de filmes naturais pré-existent, devido ao maior movimento das camadas superiores trazer à tona substâncias formadores destes filmes. Paradoxalmente o efeito de amortecimento por filmes naturais tende a desaparecer com as ondas mais fortes geradas por ventos acima de 10m/s (Espedal, 1998a).

2.3.3.2 Camadas de Gelo

A similaridade de resposta de camadas de gelo ao radar em relação às camadas de óleo se dá quando a concentração de cristais de gelo é alta, ou seja, quando há formação de gelo na superfície do mar, os cristais em suspensão apresentam pequena densidade e a resposta ao radar ainda é bastante influenciada pelo comportamento da água. Entretanto, quando a concentração dos cristais aumenta, a resposta ao radar diminui, uma vez que grandes camadas de gelo tendem a amortecer as ondas reduzindo o sinal de retorno.

2.3.3.3 Baixa Velocidade dos Ventos de Superfície

Feições de áreas escuras em mar aberto nas imagens SAR (banda C) podem, muitas vezes, estar associadas a ocorrências de ventos fracos na superfície. Em geral, velocidades da ordem de 3 m/s ou menos não ocasionam a formação das chamadas ondas capilares (Lichtenegger, 1994; Espedal, 1998a; Wu et al., 2000). Nestes casos, como a maior parte da reflexão que ocorre é da forma especular e não retroespalhada, as áreas onde a velocidade do vento na superfície é baixa o suficiente aparecem escuras, confundindo-se com a resposta de manchas de óleo na superfície.

2.3.3.4 Desvio de Correntes de Ar pelo Relevô

Um efeito sobre as imagens SAR semelhante àquele causado pela baixa velocidade dos ventos é o desvio das correntes de ar devido às feições topográficas nas áreas costeiras,

ou seja, morros, montanhas e formações análogas possibilitam o desvio das correntes de vento vindas do continente. Este desvio diminui a ocorrência de ondas capilares em áreas costeiras, diminuindo a resposta ao radar, como exemplificado na Figura 2.12.

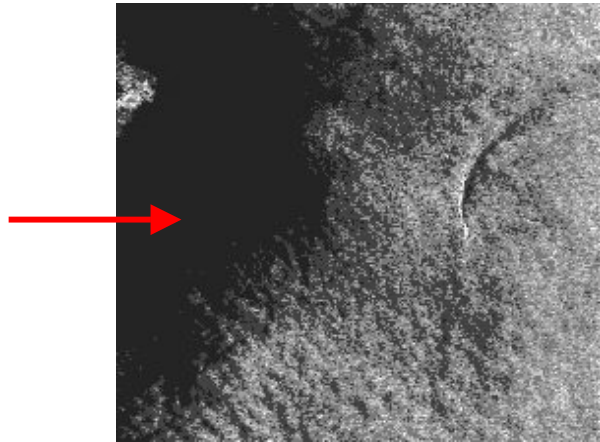


Fig. 2.12 – Ocorrência do desvio de ventos pelo relevo do continente.
FONTE: ESA (1998).

2.3.3.5 Zonas de Cisalhamento

Nas áreas de cisalhamento de correntes, o encontro entre as diferentes massas d'água pode tanto causar um aumento na amplitude das ondas fronteiriças como uma diminuição. Neste último caso, conforme a direção de visada do radar, o sinal de retorno diminui na faixa de encontro entre as ondas de diferentes direções, gerando áreas que podem ser confundidas com manchas de óleo não só pelo baixo sinal de retorno, mas também pela grande extensão e forma estreita e curva.

2.3.3.6 Células de Chuva

A ocorrência de chuvas fortes em transições de estações, em pequenas áreas, cria certa turbulência que pode amortecer as ondas responsáveis pelo espalhamento Bragg. O resultado é uma área com baixo sinal de retorno ao radar e um aumento no retorno das

áreas imediatamente vizinhas. Este tipo de chuva é particularmente comum em regiões subtropicais.

2.3.3.7 Ondas Internas

As assinaturas de ondas internas em imagens SAR são produzidas pela interação de ondas de superfície de curto comprimento, com correntes de superfície induzidas por ondas internas. Quando na presença de intensa atividade biológica, a ocorrência de ondas internas, portanto, pode desencadear um mecanismo de acumulação de filmes naturais, levando à similaridade na resposta ao radar com áreas de ocorrência de óleo.

2.3.3.8 Óleo Natural

Vazamentos de hidrocarbonetos do fundo oceânico e seu deslocamento até a superfície podem gerar camadas de óleo, como na Figura 2.13, que são confundidas em imagens SAR com aquelas geradas pelo homem. Esta confusão se dá principalmente quando os tipos de materiais são semelhantes, assim como as formas e configurações. Observações regulares de uma área podem revelar locais onde os vazamentos naturais ocorrem.

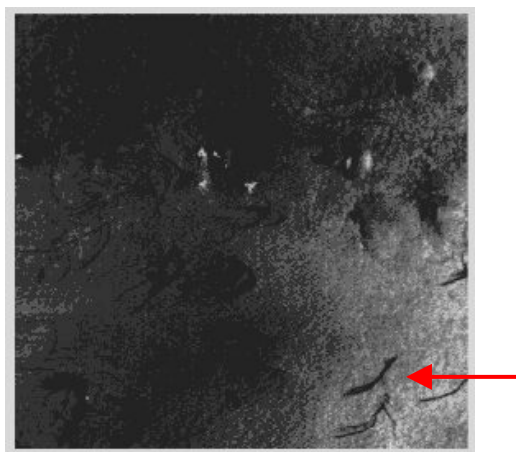


Fig. 2.13 – Ocorrência de vazamento de óleo natural do fundo oceânico.
FONTE: ESA (1998).

2.4 A Poluição por Óleo no Brasil

A indústria petrolífera passou a representar um papel significativo no Brasil por volta de 1940, com uso crescente do petróleo pelo desenvolvimento dos transportes no País, levando então, à instituição da Petrobrás. Com a utilização da Frota Nacional de Petróleo (FRONAPE) no transporte de petróleo, contaminações acidentais ou intencionais por óleo somaram-se às já existentes ocasionadas pelo lixo urbano e industrial. No Brasil, cerca de 1% dos acidentes são responsáveis por 61% do volume total de óleo derramado, enquanto que 76% dos derramamentos representam 7% do volume total (Petrobrás, 1996).

O marco inicial do combate organizado à poluição por óleo no Brasil deu-se com a implementação do projeto BRA/82/010 (Proteção das Costas Brasileiras Contra Poluição) do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) em 1982, com a participação do IBAMA, da CETESB e da Petrobrás. Novos programas surgiram e se espalharam por pontos estratégicos do País, mas eram baseados somente no treinamento de equipes de prontidão para agir em soluções reais (Petrobrás, 1996). Recentemente, foram introduzidas técnicas de sensoriamento remoto no monitoramento de óleo (Luporini, 1996). Entretanto, a legislação e os sistemas de fiscalização brasileiros ainda são considerados precários. Assim, se a quebra do monopólio da Petrobrás, por um lado, significa descentralização de poder, por outro pode trazer sérias consequências se o panorama das leis e fiscalizações vigentes não for aprimorado.

Recentemente, grupos ligados a universidades e instituições de pesquisa têm buscado a atualização das técnicas de monitoramento e detecção de óleo no Brasil. Entretanto, a oficialização por parte das instituições governamentais ainda se encontra em processo de desenvolvimento.

2.5 Histórico da Utilização de Sensores Remotos na Detecção de Manchas de Óleo

Em fevereiro de 1970, na baía de Chedabucto, Nova Escócia, Guinard & Purves (1970) utilizaram um SAR aerotransportado com diferentes polarizações para o imageamento de manchas de óleo cru, resultadas do naufrágio de um navio petroleiro. As condições de imageamento eram relativamente adequadas, com nuvens esparsas do tipo *cirrus*, vento médio de 3,0 m/s, com variações entre 1,0 e 4,6 m/s, e temperatura média da superfície do mar de aproximadamente 0,5 °C. Foram tomadas imagens com polarizações HH, VV, HV e VH, nas bandas P (0,225 – 0,39 GHz), L (0,39 – 1,55 GHz) e X (5,75 – 10,9 GHz). Devido a limitações na potência do radar, a altitude do radar e o intervalo de ângulos de incidência foram escolhidos de forma a obter uma potência do sinal apropriada para o imageamento.

Foi verificada a ausência de indicações de óleo no imageamento P_{HH} e em quase todos os demais imageamentos do tipo HH e com polarizações cruzadas. Este fato foi atribuído ao calmo estado do mar, ou seja, baixa rugosidade somada aos baixos ângulos de incidência utilizados. Nas imagens L_{VV} , as manchas de óleo apresentaram-se destacadas. Nas imagens L_{HH} algumas fracas feições de manchas de óleo no alcance próximo (*near range*), porém discerníveis, confirmaram que a ausência de resposta na polarização HH estava relacionada ao sinal de retorno insuficiente causado pela geometria do sistema utilizado. A imagem X_{VV} apresentou uma melhor definição se comparada à imagem L_{VV} , entretanto os autores consideraram o volume dos dados insuficientes para conclusões mais detalhadas. Apesar do radar utilizado permitir medições com a banda C (3,90 – 6,20 GHz), nenhuma imagem foi tomada nesta faixa, tanto pelas limitações de duração do experimento quanto pelo sinal de retorno ser considerado mais fraco em relação ao da banda X.

Hühnerfuss et al. (1986) avaliaram a aplicabilidade do uso de Radar de Abertura Real (RAR de 9,4 GHz, banda X) aerotransportado e de um sensor infravermelho (IR) na discriminação entre óleo e filmes monomoleculares na superfície oceânica. Os

resultados de vôos, quase simultâneos, sobre uma mancha de óleo e três diferentes camadas de filme mostraram que a vantagem do imageamento por radar está na sua habilidade de monitorar grandes áreas. O sensor IR mostrou-se útil na rápida determinação da região mais espessa da camada de óleo. Entretanto, nenhum dos dois sensores foi capaz de discriminar o óleo dos filmes monomoleculares.

Algumas experiências foram realizadas na detecção de camadas de óleo utilizando-se sensores óticos como o TM (*Thematic Mapper*)/Landsat-5 e HRV (*High Resolution Visible*)/Spot. Entretanto, apenas camadas muito espessas puderam ser detectadas, além da limitação operacional de constante cobertura de nuvens em regiões de mar aberto, tornando-se inviável o uso destes sensores (Corbley, 1994).

Lohnes (1994) investigou a possibilidade de se integrar técnicas de sensoriamento remoto às técnicas de coleta de amostras de óleo *in situ*. O trabalho inicial estabeleceu a potencialidade do uso de imagens ERS-1/SAR (*Synthetic Aperture Radar*) e SLAR (*Side Looking Airborne Radar*) aerotransportado. Avaliou-se também o uso de sensores na faixa do infravermelho e ultravioleta. Os critérios utilizados na avaliação dos sensores não foram apenas relativos ao sucesso na detecção do óleo, mas também às condições de mercado, custos envolvidos e necessidades dos clientes e usuários finais dos produtos gerados.

Apesar de não ter sido possível concluir que pelo menos um dos sensores avaliados oferecia as características adequadas para sua utilização, o ERS-1/SAR apresentou melhores resultados que os demais, significando um passo importante no processo de desenvolvimento das técnicas utilizadas. Hoje, os problemas e limitações ainda persistem; entretanto, os constantes aprimoramento e desenvolvimento de novos sensores e técnicas têm sido alvo de pesquisa por uma quantidade crescente de pesquisadores e suas instituições. São apresentados, a seguir, os sensores mais utilizados nas várias aplicações oceanográficas do sistema ERS (Tabela 2.3).

TABELA 2.3 - ESQUEMA DAS ÁREAS DE APLICAÇÕES DE ACORDO COM OS INSTRUMENTOS MAIS UTILIZADOS DO SISTEMA ERS

APLICAÇÕES	SENSORES DE MICROONDAS ATIVOS DO SISTEMA ERS (European Remote Sensing Satellite)			
	Altímetro	SAR – Modo imagem	SAR – Modo onda	Escaterômetro
Previsão do Tempo	✓	✓		✓
Previsão do estado mar	✓	✓	✓	✓
Modelagem de correntes	✓	✓		✓
Atividades ao longo da costa	✓	✓	✓	✓
Rotas de navios	✓	✓	✓	✓
Deteção de navios		✓		
Concentração de cardumes	✓	✓		✓
Poluição por óleo		✓		
Processos da zona costeira		✓		✓
Batimetria		✓		

FONTE : Johannessen (1998, p.4).

A Diretoria do Mar do Norte (NSD), um órgão ligado ao Ministério dos Transportes da Holanda, tem investido, desde 1983, em aplicações de sensoriamento remoto, em especial sensores SLAR e Infravermelho, no sentido de controlar e preservar os ecossistemas costeiros da região. A partir de 1993, iniciou-se a utilização do sistema ERS-1/SAR, obtendo-se então melhores resultados em relação à regularidade e rapidez dos dados. Alguns problemas na interpretação das imagens são comuns devido à ocorrência de filmes naturais e ventos de baixa velocidade. Apesar disso houve uma melhora de 50% na quantidade de manchas detectadas pelo SAR em relação ao SLAR. Em ambos os radares não houve, até então, possibilidade de se interpretar todas as feições similares à manchas de óleo, principalmente aquelas de dimensões muito pequenas comparadas à escala utilizada (Konings, 1996).

Na tentativa de melhorar as técnicas de interpretação de imagens SAR para identificação de manchas de óleo, Espedal et al. (1996), avaliaram a possibilidade de

detecção de filmes naturais na superfície oceânica por imagens SAR. Foram analisadas amostras coletadas *in situ* (sudoeste de Bergen, Noruega) na presença e ausência de filmes naturais, e os resultados comparados com imagens ERS-1/SAR da mesma data (setembro de 1994). Concluiu-se que áreas onde a camada de filme era fina foram diferenciadas de outras expressões análogas, como manchas de óleo. Entretanto, isso não foi observado nas áreas onde os filmes naturais apareciam mais espessos.

Com o intuito de se realizar uma simples análise da influência da polarização do sinal dos sistemas ERS (polarização VV) e RADARSAT-1 (polarização HH), Vachon e Olsen (1998) utilizaram um modelo de imageamento com polarização HH, comparando, portanto, os resultados com desempenho do sistema ERS. Os resultados mostraram que, apesar do ruído proveniente da superfície ser comparável nos dois sistemas, as imagens do sistema RADARSAT-1 apresentaram-se sempre com uma relação sinal-ruído menor em relação às imagens do sistema ERS nas mesmas condições de imageamento. Isto porque o ruído no sistema RADARSAT-1/SAR decresce rapidamente com o aumento do ângulo de incidência. Assim, deve-se considerar os parâmetros dos diferentes modos de imageamento do RADARSAT-1, conforme a aplicação desejada (Tabela 2.4).

TABELA 2.4 – RECOMENDAÇÕES DE USO DOS MODOS DE IMAGEAMENTO DO RADARSAT-1 PARA APLICAÇÕES OCEÂNICAS

APLICAÇÕES	MODOS DE IMAGEAMENTO	POSICÃO DO
Detecção de camadas de óleo na superfície oceânica	SCANSAR NARROW/ SCANSAR WIDE	S1-4, W1-2
Detecção de navios e suas	SCANSAR NARROW/ SCANSAR	W3, S4-7, F1-5
Feições oceânicas	SCANSAR NARROW/ SCANSAR	S1-4, W1-2
Feições atmosféricas	WIDE/SCANSAR WIDE	-
Ondas oceânicas	STANDARD/WIDE/ SCANSAR	-

FONTE : Vachon e Olsen (1998, p.15).

2.6 Histórico do Desenvolvimento de Algoritmos para Detecção de Manchas de Óleo

Solberg e Solberg (1996) avaliaram o desempenho de um método de detecção automática de manchas de óleo em imagens ERS/SAR. O algoritmo utilizado consiste

de três partes principais: detecção de pontos escuros, extração das características destes pontos e sua classificação. A detecção de pontos escuros é feita através de uma janela móvel, a qual estima o nível típico de retroespalhamento dentro da área amostrada, e determina a limiarização do pixel se este apresentar um valor k dB abaixo do nível médio de retroespalhamento. A extração das características leva em consideração a geometria e a estatística de cada mancha, a detecção de bordas, o contraste entre as regiões vizinhas e a suavidade do contraste local.

Para a classificação das manchas foi utilizado um classificador do tipo hierárquico chamado classificador de árvore, que utiliza-se de áreas de treinamento para determinação das classes. Utilizando um conjunto de áreas de treinamento de 42 manchas de óleo e de 2471 assemelhados, observou-se a correta classificação de todas as manchas de óleo e uma confusão de 3% dos assemelhados com manchas de óleo. Concluiu-se que, para um acerto mais próximo de 100% para os assemelhados, deve-se optar pela utilização de um classificador que possa sofrer interferência do usuário. Finalmente, confirmou-se a impossibilidade do uso de um algoritmo de classificação automático, ou seja, sem a interferência do usuário, na correta discriminação entre óleo e alguns tipos de assemelhados.

Solberg e Volden (1997) utilizaram um algoritmo semelhante ao desenvolvido por Solberg e Solberg (1996). Entretanto, consideraram conhecimentos *a priori* sobre condições do vento e influências meteorológicas externas. Além disso, houve a substituição do classificador de árvore por um classificador baseado numa função distribuição de probabilidade multivariada, em associação a um conjunto de regras e funções de perda que levam em consideração o número de manchas de óleo e assemelhados esperado pelo usuário dadas as condições de vento. Esta decisão foi tomada para proporcionar uma classificação mais robusta com respeito à extração das características das manchas e à capacidade de controle de como estas características são usadas.

Utilizando 64 imagens SAR, em um total de 71 manchas de óleo, 67 (94,4%) foram classificadas corretamente e 62 dos 6980 assemelhados foram classificados erroneamente (0,0088%). Analisando os 62 assemelhados, observou-se que a classificação como óleo de 34 deles foi razoável, em virtude do fato de que um operador também os classificaria, pelo menos à primeira vista, como manchas de óleo. Concluiu-se que a discriminação automática entre manchas de óleo e assemelhados, com pequenas margens de erro, é possível quando consideradas as informações meteorológicas.

“A motivação da maioria dos cientistas para enfrentar o desafio do estudo da Natureza vem de uma profunda fé na capacidade da razão humana de poder entender o mundo à sua volta.”
Marcelo Gleiser

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia de Campos se estende por todo o litoral norte do Estado do Rio de Janeiro e parte do litoral do Espírito Santo (Figura 3.1). A sua participação na história da exploração de óleo no Brasil iniciou-se em 1974, quando se deu a descoberta de petróleo na plataforma continental localizada dentro de seus limites. A partir daí, esta região tem sido, ao longo dos anos, alvo de intensas pesquisas com o intuito principal de exploração de petróleo e gás natural.

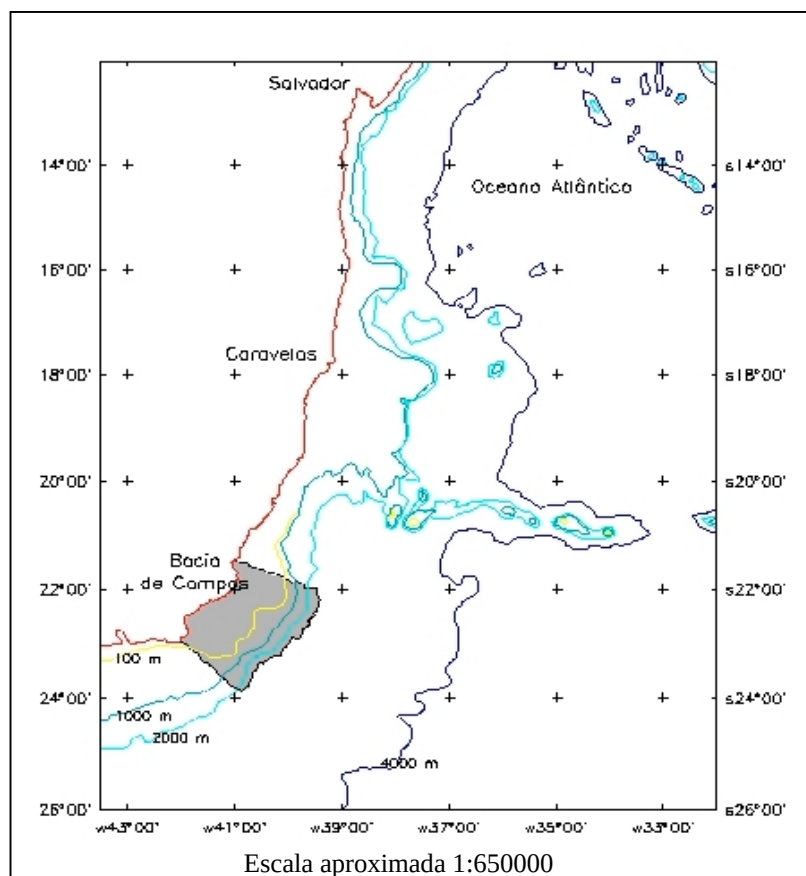


Fig. 3.1 – Localização da área de estudo.

A principal responsável pela exploração de óleo na Bacia de Campos, a Petrobrás, realizou sua primeira extração na região em 1977. Hoje, há mais de 20 anos, as reservas da Bacia representam 73% das reservas totais de petróleo e gás natural de todo o Brasil. As áreas de exploração da Petrobrás localizadas na região Sul estão esquematizadas na Figura 3.2 e a Figura 3.3 mostra em maior detalhe a região da Bacia de Campos.

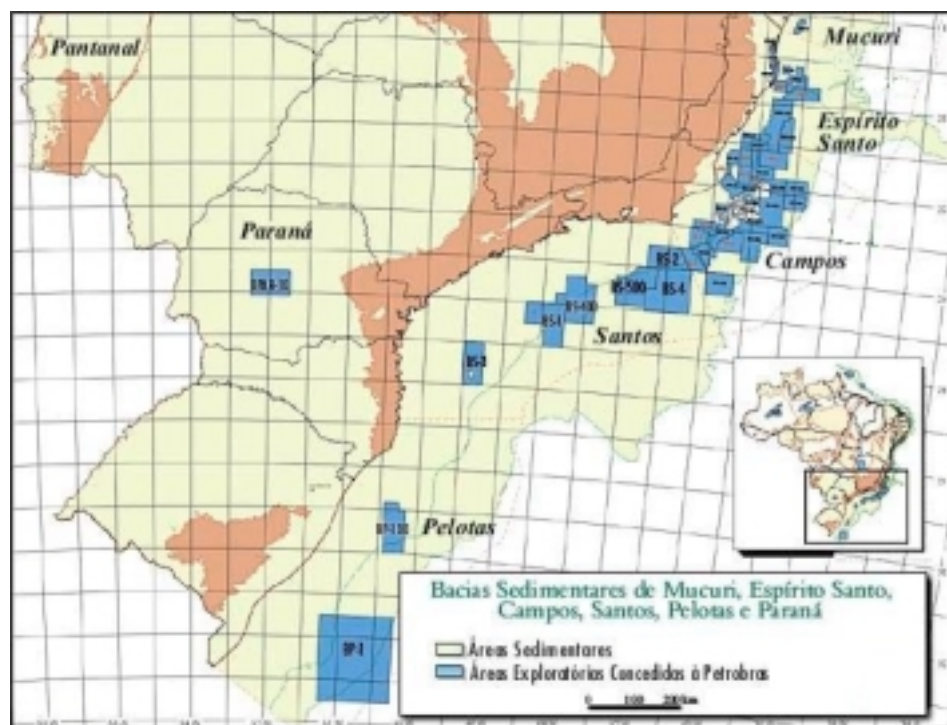


Fig. 3.2 – Áreas de exploração de óleo e gás natural na plataforma continental do sul do Brasil.
 FONTE: Adaptada de Petrobrás (1999).

A exploração de petróleo na Bacia de Campos tem se desenvolvido, ao longo dos anos, tanto em campos próximos da costa quanto em regiões do talude continental consideradas águas profundas (entre 400 e 1000 m) e ultraprofundas (superior a 1000 m). Alguns dos campos de exploração de maior potencial da Bacia localizam-se em águas profundas e ultraprofundas, como os campos de Albacora e Marlim. Estes campos encontram-se em profundidades superiores a 500 m, sob o domínio da Corrente do Brasil, a qual apresenta-se com fluxo médio em direção ao sul na área em questão.

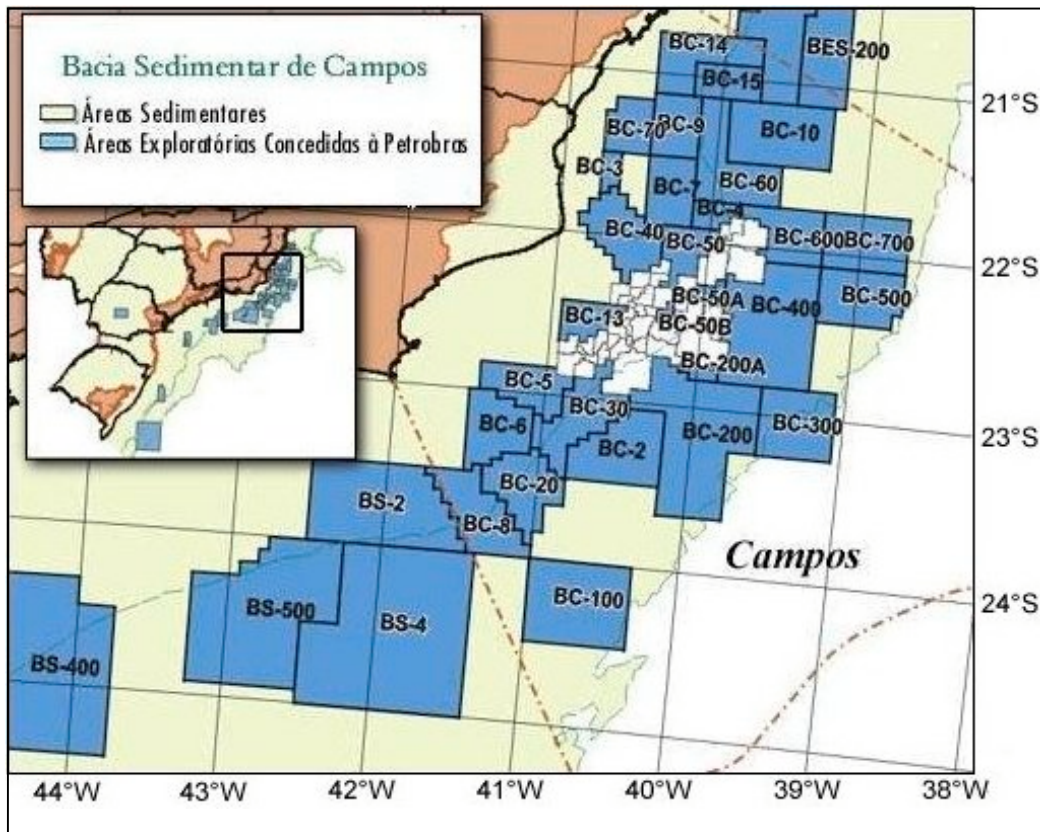


Fig. 3.3 – Detalhe das áreas de exploração de óleo e gás natural na região da Bacia de Campos – RJ.
 FONTE: Adaptada de Petrobrás (1999).

Uma característica peculiar desta região é a instabilidade de fluxo da Corrente do Brasil, causada pela presença da elevação submarina de Abrolhos, mais ao norte, e pela mudança de direção da borda do talude continental nas vizinhanças do Cabo de São Tomé e de Cabo Frio. As instabilidades de fluxo da Corrente do Brasil presentes na Bacia de Campos manifestam-se principalmente através de oscilações (meandros) do ramo principal, ocorrendo assim a formação de vórtices com diâmetros da ordem de 50 a 200 km e com duração de semanas. No caso dos campos de Marlin e Albacora, vórtices deste tipo podem acarretar em inversões na direção da corrente (assumindo direção norte) e com velocidade de fluxo várias vezes mais intensa em relação ao regime normal (Petrobrás, 1993).

As diferentes direções e velocidades que a Corrente do Brasil pode assumir, devem ser levadas em consideração nos processos de transporte e espalhamento de manchas de óleo, uma vez que tais processos são afetados, em grande parte, pelas correntes e ventos de superfície (Petrobrás, 1993).

Durante o processo de deriva de uma mancha, um número variável de compostos químicos sofre intensa evaporação, sendo esta maior em regiões tropicais, principalmente nas primeiras horas do derrame. Quando ocorrem grandes derramamentos de óleo, como o ocorrido em janeiro de 2000 na Baía de Guanabara, a evaporação é fator mais importante de depuração. Entretanto, a evaporação e dissolução de alguns componentes deixam resíduos com propriedades que diferem do composto original. Degradações químicas e biológicas podem resultar em resíduos semelhantes, enquanto emulsões de água-óleo resultam em resíduos com propriedades significativamente diferentes do óleo inicialmente derramado. Estas mudanças nas propriedades do óleo influenciam nos processos de transporte e espalhamento das manchas (Otto, 1973).

A Bacia de Campos hoje é a principal área de produção e extração de petróleo e seus derivados no Brasil, com trinta plataformas responsáveis por toda a produção da região, sendo 14 fixas e 16 flutuantes. Tais plataformas englobam 628 poços exploratórios e 537 poços de desenvolvimento que estão ligados a uma verdadeira teia de 1300 km de dutos submarinos e 2500 km de linhas flexíveis (Petrobrás, 1999). Apesar de todo este arsenal exploratório contribuir para o desenvolvimento do País, ele também representa uma fonte potencial de poluição, afetando a qualidade de vida da população local e a preservação dos ecossistemas da região, entre outros componentes.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

Este capítulo está estruturado da seguinte forma (Figura 4.1): inicialmente, tem-se um descrição dos materiais utilizados; em seguida, são detalhados os métodos para seleção dos dados, o processo de tratamento das imagens de radar e o cruzamento de dados; por fim, descreve-se o funcionamento dos classificadores utilizados e os métodos de análise dos resultados.

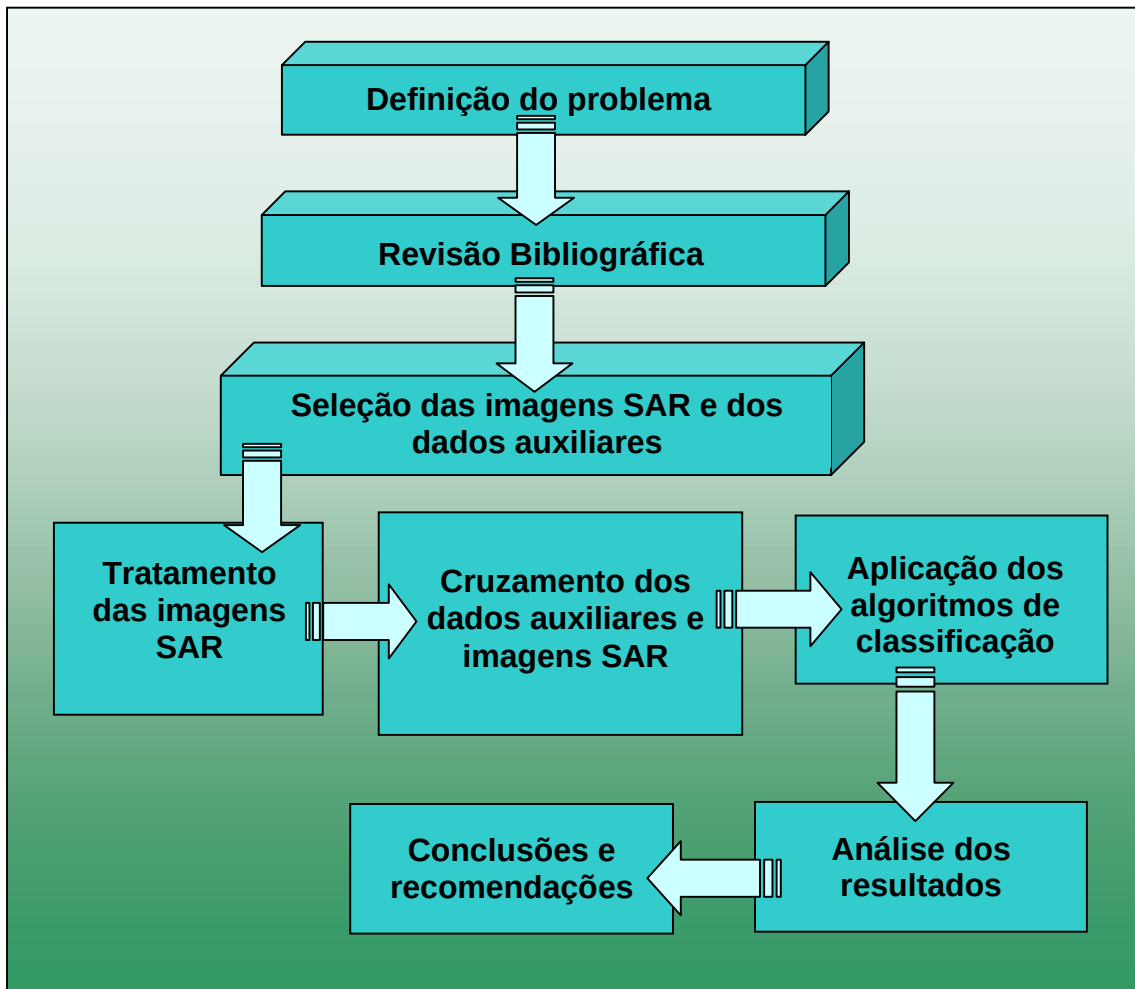


Fig. 4.1 – Fluxograma geral das atividades do trabalho.

4.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho foram:

- Quatorze imagens do sistema RADARSAT-1/SAR, consistindo em produtos RADARSAT do tipo Imagem Alinhada, no formato CEOS (*Committee on Earth Observation Satellite*) em CD ROM, sendo:
 - Duas imagens cedidas pela Petrobrás no modo *Wide* ascendentes, de 12/09/98 e 23/11/98, posição do feixe W1 e espaçamento de pixel 12.5 m;
 - Três imagens cedidas pelo projeto GlobeSAR 2 no modo *ScanSAR Wide*, sendo uma ascendente de 05/07/98 e duas descendentes de 15/07/97, com posição do feixe SW1 e espaçamento de pixel 50 m;
 - Nove imagens cedidas pela RADARSAT Internacional - THREETEK Ltda, sendo três descendentes no modo *Standard* de 09 e 16/09/96, duas com posições do feixe S2 e uma S3, e espaçamento de pixel 12.50 m; e seis no modo *Fine* nas seguintes datas: 04/06/96 (ascendente) e 06/09/96 (descendente) ambas F4; 11/09/96 (ascendente) 17/10/96 (descendente) ambas F1, com espaçamento de pixel 6.25 m;
- Três imagens AVHRR/NOAA de 06/09/96, 15/07/97 e 06/09/96 cedidas pelo INPE;
- Dados meteorológicos de altura de onda, direção e velocidade do vento de superfície, disponibilizados pelo Projeto Sistema de Previsão de Ondas, 1999;
- Imagem SeaWiFs (GAC) em formato HDF de 07/07/98, cedidas pelo INPE;
- *Software* PCIWorks 6.2, para sistema UNIX;
- *Software* ENVI 3.2, para sistema UNIX;
- *Software Texture*, desenvolvido no INPE (Rennó et al., 1998);
- *Software* SPRING (Vs. SPRING GISAM), para sistema UNIX;
- *Software* CAESAR 3.0;
- *Software* ERDAS Imagine 8.3.1;
- *Software* Seadas 4.0.

4.2 Métodos

4.2.1 Seleção das Imagens SAR

A análise das imagens SAR constituiu-se de três passos: 1) localização de áreas escuras nas imagens, caracterizando a ocorrência de manchas de óleo (ou seja, análise visual das características morfológicas, texturais e tonais destas regiões); 2) na presença de tais áreas, recorte e filtragem da imagem para uma melhor análise visual e posterior classificação; 3) avaliação das áreas escuras juntamente com dados de vento e temperatura de superfície para discriminação de manchas de óleo e seus assemelhados. Este procedimento foi efetuado utilizando o *software* PCIWorks 6.2.

É importante ressaltar que para a seleção de uma imagem, esta deveria apresentar pelo menos uma feição que indicasse a presença de óleo, não sendo necessária a presença de um ou mais assemelhados. Entretanto, na presença de uma feição semelhante ao óleo, esta era incluída no recorte da imagem para avaliação da capacidade dos classificadores em separar manchas de óleo de seus assemelhados.

Foram observados assemelhados na maioria das imagens analisadas, sendo as zonas de cisalhamento de correntes, desvio de correntes de ar pelo relevo, ondas internas e baixas de vento na superfície oceânica os de ocorrência mais freqüente.

Finalmente, após a análise das quatorze imagens SAR, foram selecionadas todas as 3 imagens *ScanSAR Wide* (15/07/97 e 05/07/98), e duas imagens *Fine* F4 (04 e 06/09/96). É importante salientar que as imagens de feixe F1 são as mais comumente utilizadas pela indústria petrolífera para detecção de exsudações, e não as de feixe F4 (Miranda, 2000). Apesar de algumas imagens não selecionadas possuírem pequenas áreas escuras, estas não foram consideradas relevantes em relação à escala da imagem avaliada.

4.2.2 Seleção das Imagens AVHRR/NOAA

Uma vez escolhidas as imagens de radar com ocorrência de óleo, foram selecionadas imagens AVHRR/NOAA para geração mapas de temperatura da superfície do mar obtidas nas seguintes datas: 06/09/96, 15/07/97 e 05/07/98. A escolha das imagens ficou determinada pela disponibilidade de dados e pela cobertura de nuvens. Assim, quando não foi possível obter as imagens AVHRR na mesma data de sua respectiva SAR, optou-se pela data mais próxima (anterior ou posterior). A seleção das imagens foi realizada no *software* ENVI 3.2.

Os dados AVHRR não foram utilizados somente para avaliação da temperatura da superfície oceânica, mas também para verificação de ocorrência de chuvas fortes com presença de nuvens convectivas. Normalmente, grandes tempestades com chuvas intensas estão associadas a células convectivas profundas, que atingem grandes altitudes e apresentam temperaturas de topo extremamente baixas.

Para a geração das cartas de TSM, utilizou-se uma faixa de valores de temperatura que englobasse o intervalo aceitável de temperaturas da superfície oceânica para a imagem considerada (20°C a no máximo 30°C, por exemplo). As áreas onde as temperaturas encontravam-se fora deste intervalo aparecem com valores nulos na imagem resultante. Para a obtenção da imagem com informações sobre temperatura do topo de nuvens (06/09/96), realizou-se um procedimento inverso, isto é, determinou-se uma faixa de valores aceitáveis para o topo de nuvens (-10° a -50°C). As nuvens convectivas são normalmente associadas a temperaturas de topo inferior a -50°C. Assim, as cartas, de temperaturas de topo de nuvens foram construídas, atribuindo valor nulo para regiões que se encontravam com temperaturas fora destes limites. Desta forma, analisando as imagens de radar em conjunto com produtos AVHRR, foi possível o cruzamento de informações, evitando interpretações errôneas e propiciando maior compreensão das feições da imagem. Esta metodologia tem sido utilizada por Lorenzzetti (1999). As cartas de TSM foram geradas no *software* ERDAS Imagine 8.3.1.

Os chamados filmes naturais podem ser considerados como micro camadas contendo substâncias orgânicas como proteínas, lipídios, ácidos orgânicos, sacarídeos, e metais associados com a matéria orgânica em suspensão. Tais micro camadas podem formar extensas áreas uniformes em regiões de alta atividade biológica e condições relativamente calmas do estado do mar (Johannessen et al., 1994). Segundo Espedal et al. (1996), os filmes naturais podem ocupar extensas áreas na superfície do mar em regiões onde ocorrem processos de convecção, difusão e ressurgência, desde que a atividade biológica seja intensa. Assim as imagens AVHRR também foram úteis na identificação de fenômenos de ressurgência, como ocorre na região de Cabo Frio – RJ.

4.2.3 Determinação dos Dados Meteorológicos

Segundo Lichtenegger (1994), a superfície oceânica geralmente aparece escura em imagens ERS-1 SAR se a velocidade do vento for inferior a 3 m/s. Em regiões de velocidades de vento mais altas, onde as imagens ainda se mantêm escuras, existe a possibilidade da ocorrência de algum tipo de filme de superfície. Entretanto, não tem sido observado o efeito de amortecimento de ondas por manchas de óleo ou filmes naturais nos eventos onde as velocidades do vento excedem 10 m/s. Portanto, o monitoramento de manchas de óleo se limita à faixa de 3 a 10 m/s para a velocidade do vento. Entretanto a experiência tem mostrado que, na prática, este intervalo é reduzido para 3 a 8 m/s (Miranda, 2000).

Em virtude disso e da necessidade de dados meteorológicos para uma análise mais detalhada das feições das imagens, foram utilizados dados meteorológicos disponibilizados pelo projeto Sistema de Previsões de Ondas, que é resultado de um projeto da FAPESP iniciado em 1997. Estes dados são originados a partir de modelos desenvolvidos pela Agência Meteorológica Japonesa (modelo atmosférico), pelo Instituto Max Plank (modelo de ondas de terceira geração), e por pesquisadores do INPE e UNESP (modelo de ondas de segunda geração), com colaboração de pesquisadores do IEAPM e do projeto SISPECA. Os modelos são alimentados com

dados meteorológicos do CPTEC e previsões dos satélites NOAA e disponibilizados na Internet pelo Projeto Sistema de Previsões de Ondas (1999).

Os produtos do projeto são alimentados com dados de vento a cada 3 horas, e a previsão de ondas e ventos pode ser efetuada por uma simulação a partir de modelos de previsão. Este procedimento foi utilizado para simular o provável estado do mar nas horas de passagem do satélite RADARSAT-1 (em hora GMT aproximadamente 8:00h para órbita descendente e 21:00h para a ascendente). O produto final utilizado foi construído da seguinte forma: foram utilizados os dados disponíveis nas datas de passagem do satélite (ou dados da véspera conforme a disponibilidade), e a partir daí o modelo foi executado informando-se o número de horas necessárias para se obter a simulação no momento da passagem.

Dessa forma foram utilizados dados das seguintes datas: 03/09/96 (+33h), 14/07/97 (+22h) e 05/07/98 (+18h), onde o acréscimo entre parêntesis corresponde ao número de horas solicitadas para ao sistema para a simulação em cada caso.

4.2.4 Seleção dos Dados SeaWiFs

Mudanças súbitas na cor do oceano podem indicar a ocorrência de diferentes abundâncias de fitoplâncton marinho devido à absorção da radiação em determinados comprimentos de onda pelos pigmentos fotossintetizantes destes seres. Componentes da água como substâncias orgânicas e inorgânicas, dissolvidas e particuladas, também interagem com a radiação, sendo também responsáveis pela “cor dos oceanos” (Mobley, 1994). Sabendo que o sensor SeaWiFs, lançado em 1^o de agosto de 1997, foi projetado para prover informações sobre a cor dos oceanos (NASA, 1999), foi utilizada uma imagem de 07/07/98, com processamento de nível 2, contendo portanto informações sobre concentração de clorofila. A imagem foi selecionada nesta data visto que as imagens disponíveis nas datas mais próximas de 05/07/98 se encontravam com presença de nuvens sobre a região de interesse. Esta avaliação foi realizada na tentativa de

identificar possível ocorrência de filmes naturais podendo estes ser confundidos com manchas de óleo pelos classificadores utilizados.

Esta imagem, utilizada como dado auxiliar para a interpretação da imagem SAR de 05/07/98, foi inicialmente processada no *software* Seadas 4.0, e posteriormente visualizada no ENVI 3.2. O objetivo deste procedimento foi avaliar as regiões da imagem onde a cor do oceano indicasse áreas de maior atividade biológica.

4.2.5 Tratamento das Imagens

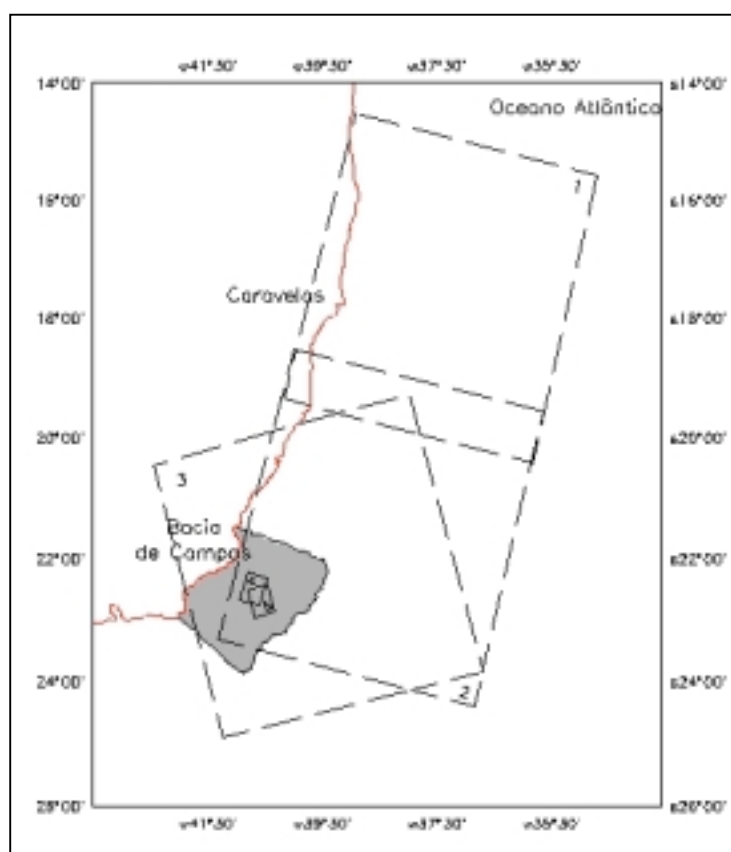


Fig. 4.2 – Esquema da área de abrangência das imagens SAR utilizadas, sendo 1 e 2 as imagens *ScanSAR Wide* de 15/07/97, 3 a imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98, 4 a imagem *Fine* de 06/09/96 e 5 a imagem *Fine* de 04/09/96. A área cinza representa a região da Bacia de Campos.

Inicialmente, as imagens SAR selecionadas foram analisadas individualmente, observando-se as regiões de ocorrência de pontos escuros, e avaliando a possibilidade de recorte da imagem analisada para minimização do tempo de processamento. As Figuras 4.2 e 4.3 esquematizam a área de abrangência das imagens selecionadas e os recortes realizados em cada uma delas, respectivamente.

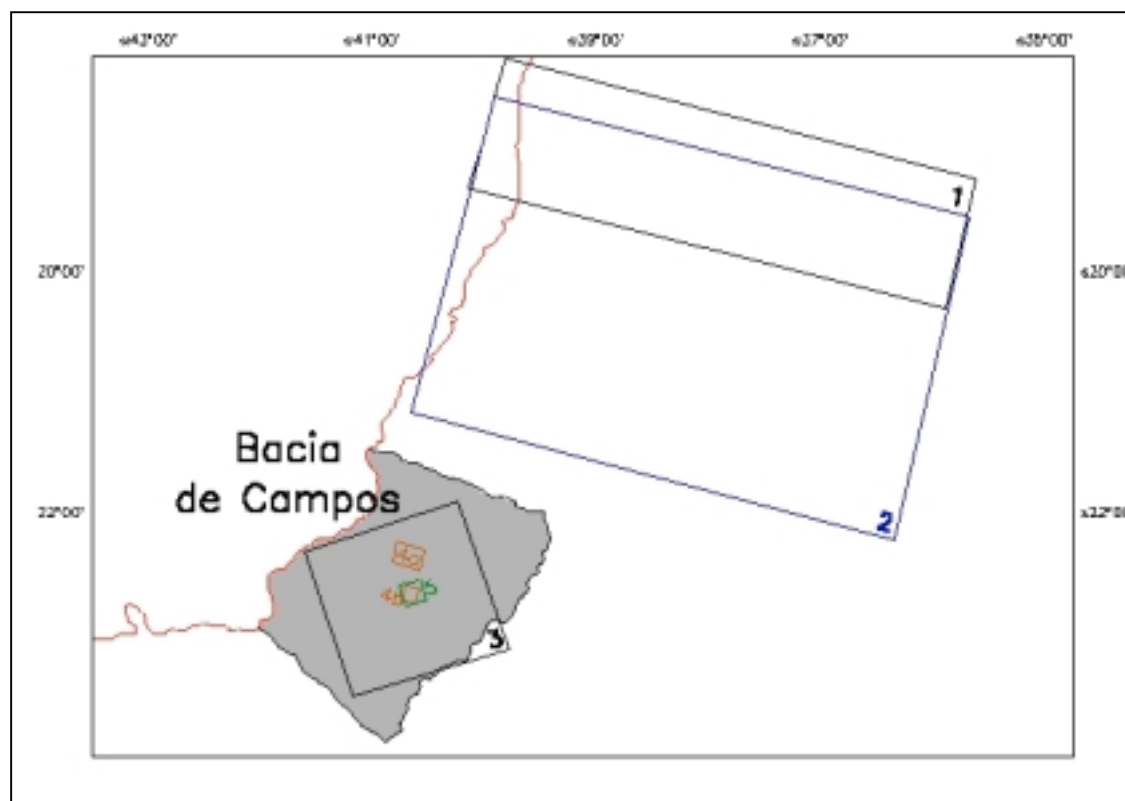


Fig. 4.3 – Esquema do recorte realizado nas imagens SAR utilizadas, sendo que imagem *Fine* (4) foi recortada em duas partes, 4a e 4b.

Uma das principais preocupações nesta fase foi preservar ao máximo os dados radiométricos das imagens, com a tomada de algumas decisões: 1) realização do registro das imagens somente após a sua classificação; 2) comparação dos valores dos *pixels* das imagens originais com as obtidas na minimização das distorções radiométricas: ruído *speckle* e efeito do padrão da antena, os quais são discutidos a seguir.

4.2.5.1 Padrão da Antena

O efeito de padrão da antena ocorre devido às variações de baixa frequência no brilho das imagens na direção de *range*, e estas são causadas pela perda de potência relacionada com a geometria de visada lateral. Entretanto, esta distorção é bastante significativa para SAR's aerotransportados e praticamente desprezível no caso de imagens orbitais, sendo que a perda de potência é corrigida no instante da aquisição de cada pulso. Apesar disso, os resíduos podem persistir em algumas imagens, tornando-se necessária a aplicação de um algoritmo de correção baseado na média das colunas da imagem. Considerando a possibilidade de resíduos decorrentes deste efeito, foi aplicado em uma imagem *ScanSAR Wide* o algoritmo de correção de efeito de padrão da antena contido no *software* PCIWorks 6.2.

4.2.5.2 Ruído *Speckle* e as Técnicas de Filtragem

Considerando a problemática da presença do ruído *speckle* nas imagens de radar descrita na seção 2.1.1, foi utilizada a técnica de filtragem espacial. Uma boa filtragem deve preservar os valores médios de retroespalhamento, além de manter bordas bem definidas entre campos adjacentes, e ainda preservar a variabilidade espacial (informação textural) relacionada à cena. Para aplicações com radar, é comum a utilização dos chamados filtros adaptativos, que são assim denominados pois reduzem o *speckle* e preservam a informação radiométrica e textural (Kux, 1998). Os filtros utilizados neste trabalho são descritos a seguir:

- Filtros de Mediana: é um filtro do tipo não-adaptativo. Seu princípio básico consiste em uma janela móvel que substitui o pixel central pelo valor de nível de cinza da Mediana do subconjunto considerado. Este filtro possui a tendência de melhor preservar as informações de textura, entretanto não preserva a assinatura de alvos pontuais;

- Filtro MAP (*Maximum a Posteriori*) Gama: é um filtro adaptativo. O filtro Gama é baseado em um modelo que utiliza as propriedades estatísticas da cena considerada. O princípio básico deste filtro é que se supõe que os valores de intensidade da cena provém de uma distribuição Gama se a imagem não fosse influenciada pelo ruído *speckle*. O filtro Gama minimiza a perda de informação textural de forma mais eficaz em relação aos filtros de Frost e Lee, desde que o retroespalhamento da cena siga uma distribuição Gama (Projeto GlobeSAR2, 1998). É apropriado para uma grande quantidade de aplicações como áreas de floresta, áreas de plantio e oceanos.
- Transformada de Fourier : Consiste na aplicação da transformada de Fourier sobre toda a imagem, para análise de uma das componentes resultantes – a componente de amplitude. A análise desta componente propicia a remoção de componentes de ruídos periódicos, uma vez que a amplitude tende a localizar informações sobre padrões anteriormente globalizadas na imagem (Schowengerdt, 1997). Estas informações então eliminadas ou reformuladas através da manipulação direta da componente de amplitude ou da aplicação de filtros em geral não-adaptativos, e realiza-se, por fim, a transformada inversa de Fourier utilizando a amplitude já modificada. Em geral, este procedimento tem se mostrado muito útil para remoção de ruídos expressivos da imagem.

Todos os filtros listados acima foram aplicados em imagens consideradas teste, ou seja, foram escolhidas para teste algumas imagens que melhor representassem o conjunto de imagens utilizado. Assim, as imagens utilizadas para teste foram: *Fine* de 04/09/96 e *ScanSAR* 05/07/98, nas quais foram aplicadas os filtros da Mediana com uma janela de amostragem 7x7 e Gama com janelas de amostragem 7x7 e 9x9. A utilização da transformada de Fourier foi direcionada somente às imagens *ScanSAR*, na tentativa de minimizar problemas de imageamento intrínsecos deste modo. Os melhores filtros conforme o modo de imageamento foram escolhidos através de uma análise visual dos resultados, então, estes foram aplicados nas demais imagens. Todos os procedimentos de aplicação de filtros foram realizados no *software* PCIWorks 6.2.

4.2.6 Cruzamento dos Dados

Após a fase de tratamento das imagens SAR, deu-se início à fase de cruzamento dos dados auxiliares (TSM, Meteorológicos e SeaWiFs) com as imagens SAR. Este cruzamento foi realizado com caráter qualitativo, ou seja, sem a degradação dos diferentes dados para alcançar uma escala comum. A partir da observação dos dados em coordenadas geográficas comuns às imagens SAR e aos dados auxiliares, foram delimitados os temas para cada imagem, definindo assim se áreas escuras correspondiam a manchas de óleo ou a assemelhados.

É importante salientar que, apesar de se trabalhar com diferentes resoluções, procurou-se respeitar limites nos quais a comparação qualitativa dos dados fosse coerente. Por exemplo, apesar das imagens *Fine* e *ScanSAR Wide* possuírem resoluções espaciais de 8 e 100 m, respectivamente, e os dados de TSM possuírem resolução espacial de mais de 1 km, as informações de interesse nos mapas de TSM ocorrem numa escala de média a grande, sendo esta comparação ainda coerente.

4.2.7 Algoritmos de Classificação

A determinação dos algoritmos de classificação foi baseada em dois fatores principais: disponibilidade de utilização do sistema, e direcionamento das ferramentas à classificação de imagens de radar de abertura sintética. Dessa forma, foram escolhidos os seguintes classificadores: Classificador Textural por Semivariograma (CTS), e o Classificador *Texture*. Ambos baseiam-se em medidas texturais, possuem aplicação comprovada para imagens SAR e estão disponibilizados pelo INPE (Freitas, 1999).

A classificação de imagens é o processo responsável por associar elementos de imagens (*pixels*) a classes, as quais seriam regiões formadas por *pixels* que tenham características semelhantes ou comuns. Os classificadores podem ser supervisionados ou não-supervisionados (Silva, 1992).

Os classificadores supervisionados são aqueles que, em determinado momento, necessitam da interferência do usuário, pois dependem de informações externas para que dêem continuidade ao processo de classificação. Os não-supervisionados, ao contrário, não necessitam desta interferência, e por isso, são muitas vezes chamados de automáticos. Dentre os supervisionados, existem os classificadores por *pixel* que baseiam-se na utilização da informação de cada *pixel* isoladamente para localizar regiões homogêneas. Dentre os mais comuns, tem-se o de máxima verossimilhança, distância mínima e método do paralelepípedo. Existem ainda os classificadores contextuais, que consideram não apenas as informações relativas ao *pixel* a classificar, mas também consideram as informações contidas nos *pixels* vizinhos. Neste trabalho ambos os classificadores utilizados são do tipo supervisionados e contextuais.

4.2.7.1 O Classificador Textural por Semivariograma (CTS)

O CTS é um classificador supervisionado, que emprega o critério do paralelepípedo (veja detalhes em Schowengerdt, 1997), que possibilita a combinação de informações radiométricas e texturais. A informação textural é obtida através da estrutura espacial das diferentes feições na imagem, que é traduzida pelo semivariograma (descrito adiante) . A informação radiométrica é proveniente do valor médio de níveis de cinza das diferentes feições na imagem que correspondem às classes consideradas (Miranda e Carr, 1994).

O classificador CTS é alimentado por um filtro da Mediana adaptativo (onde são definidos os parâmetros raio e nível de rejeição), bandas texturais, também chamadas de bandas variográficas e que dependem dos parâmetros do filtro, e por informações das amostras de treinamento. A Figura 4.4 esquematiza o funcionamento da classificador CTS.

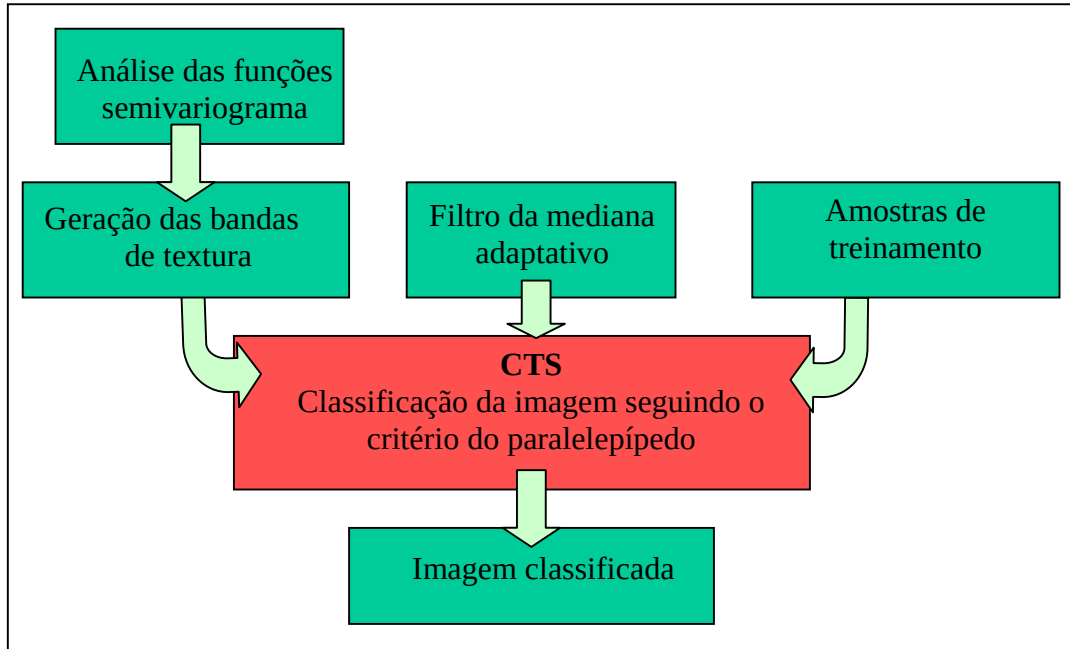


Fig. 4.4 – Esquema básico de funcionamento do CTS.
FONTE: INPE (1998).

A fase inicial envolve a escolha de amostras na imagem para geração da função semivariograma para cada classe. O estimador da função de semivariograma é definido pela seguinte equação:

$$\hat{\gamma}(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{N(|\mathbf{h}|)} \left[Z(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x}_{i+|\mathbf{h}|}) \right]^2 \quad (4.1)$$

onde $Z(\mathbf{x}_i)$ é o valor do nível de cinza do pixel localizado em $\mathbf{x}_i$, e $N(\mathbf{h})$ é o número de pares $Z(\mathbf{x}_i)$ e $Z(\mathbf{x}_{i+|\mathbf{h}|})$ separados pelo vetor distância $\mathbf{h}$ (ou *lag*). A utilização desta função para classificadores é apropriada quando se deseja considerar os valores de níveis de cinza dos pixels em conjunto com seus vizinhos mais próximos.

A forma do semivariograma está relacionada ao grau de correlação entre os níveis de cinza (Miranda e Carr, 1994). A Figura 4.5 apresenta um semivariograma com características próximas do ideal. Na origem ocorre uma descontinuidade denominada

efeito pepita. O efeito pepita pode ser explicado pela variabilidade de pequena escala não detectada na amostragem ou simplesmente pela aleatoriedade espacial do conjunto de dados. A curva então cresce suavemente e a partir de um dado valor de h se torna constante. O valor da variável h onde a curva se torna constante é denominado alcance, e o valor correspondente da função $\gamma(h)$ é chamado patamar. Considera-se que a partir do alcance não há mais dependência espacial entre os *pixels* da amostragem.

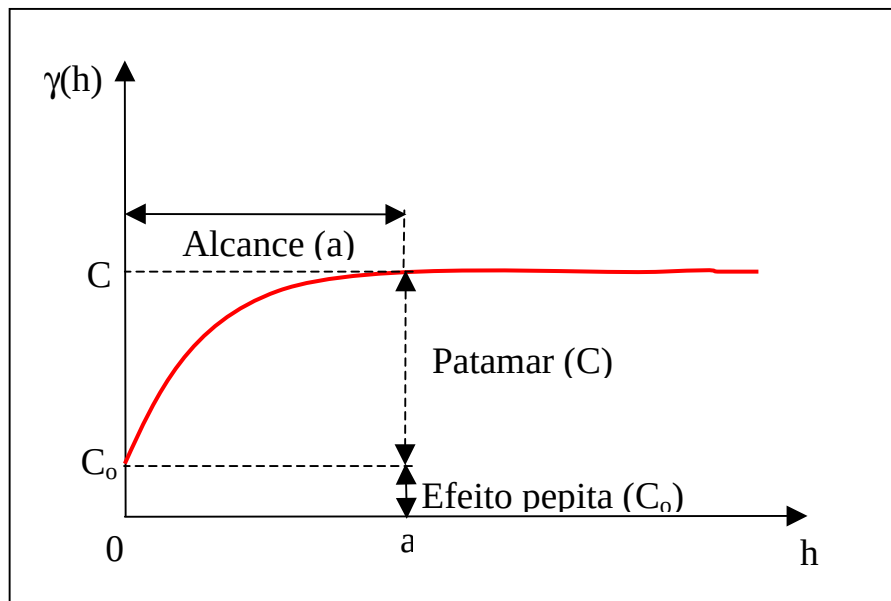


Figura 4.5 – Semivariograma experimental.

FONTE: Adaptada de Miranda e Carr (1996).

O processo de classificação engloba uma fase de treinamento e a classificação em si, sendo que são tomadas amostras de treinamento tanto para o cálculo do semivariograma quanto para a classificação. A janela de amostragem para o cálculo do semivariograma depende do **lag**, o qual pode ser determinado pelo usuário de forma que o tamanho da janela respeite os limites da classe na imagem. Além disso, para se obter o semivariograma para cada classe, deve-se definir a forma desejada do cálculo e os parâmetros em cada caso.

Para o classificador utilizado, dois tipo de procedimento para o cálculo do semivariograma são possíveis: circular e tradicional. No caso circular, os pares são formados em relação ao centro da amostra (Figura 4.6a). No caso tradicional, consideram-se todos os pares de pixels separados pelo vetor distância $\mathbf{h}$ dentro do círculo de raio $\mathbf{lag}$. A Figura 4.6b ilustra a organização de alguns pares para $\mathbf{h} = 2$.

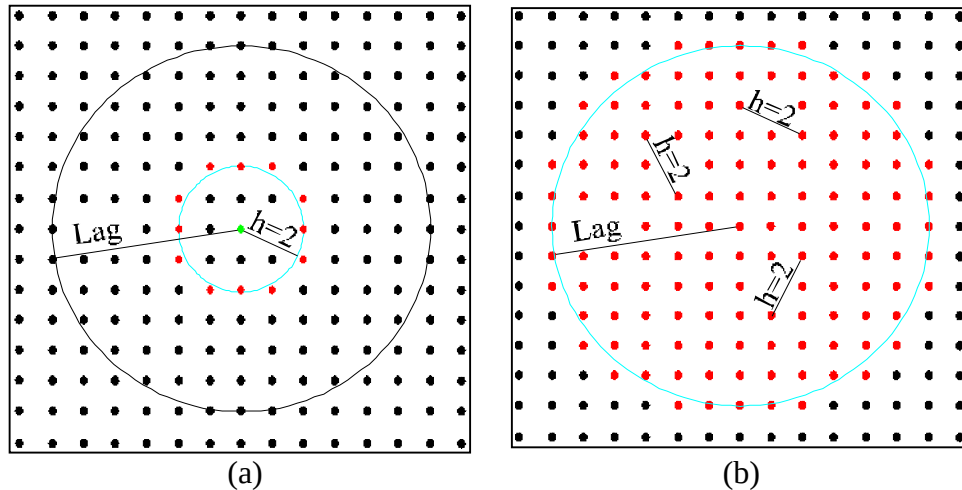


Fig. 4.6 – (a) Distribuição dos pares de pixels no caso circular para $\mathbf{h}=2$ e (b) Organização de pares de pixels no caso tradicional para $\mathbf{h}=2$.

FONTE: INPE (1998, p.8-9).

Além de se caracterizar em termos da forma, o cálculo do semivariograma pode ser definido em termos da direção. No caso de não haver uma direção preferencial, tem-se o cálculo omnidirecional, e quando existe uma direção preferencial, tem-se o cálculo direcional. No caso omnidirecional, considera-se todos os pares de *pixels* dentro do círculo de raio $\mathbf{lag}$ e, no caso direcional, somente os pixels situados sob o cone formado pela direção e abertura (INPE, 1998). As Figuras 4.6a e 4.6b ilustram os procedimentos de cálculo do semivariograma para os casos circular omnidirecional e tradicional omnidirecional, respectivamente.

Para o caso direcional, novos parâmetros são definidos: a direção e a abertura. As Figuras 4.7a e 4.7b ilustram os procedimentos de cálculo do semivariograma para os casos tradicional direcional e circular direcional, respectivamente.

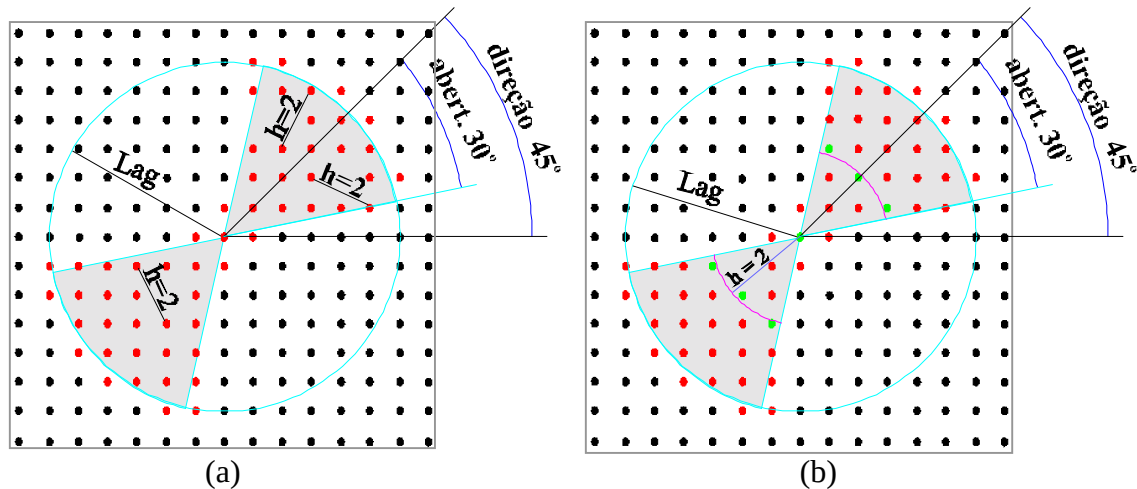


Fig. 4.7 – (a) Organização de pares de *pixels* considerando a direção e a abertura para o caso tradicional e (b) Organização de pares de *pixels* considerando a direção e abertura para o caso circular.
FONTE: INPE (1998, p.9).

Após a análise dos semivariogramas determina-se o parâmetro de **lag**, e aplica-se na imagem o filtro de Mediana adaptativo. Conforme o direcionamento das feições na imagem define-se a abertura e direção (no caso direcional). Para a geração das bandas variográficas são utilizados os parâmetros para aplicação do filtro, o **lag** definido na análise dos semivariogramas, e os parâmetros conforme o procedimento de cálculo escolhido. A partir da aplicação de uma janela de tamanho **lagxlag** na imagem original, são gerados um número de bandas correspondente ao número de **lag** escolhido (sendo a banda 1 relativa ao **lag=1** e assim por diante). Além disso, é gerada uma banda relativa à variância e outra relativa ao coeficiente de variação para amostragem realizada na imagem.

O próximo passo é a determinação das amostras de treinamento para a classificação. Neste trabalho, estas amostras foram escolhidas na mesma região das amostras para

geração dos semivariogramas, na tentativa de manter os padrões entre as duas fases de amostragem. Para a classificação informa-se todos os parâmetros definidos anteriormente (**lag**, parâmetros do filtro da Mediana e do tipo de cálculo), e escolhe-se visualmente as bandas variográficas que melhor representarem o conjunto para que estas sejam a base de informações para *pixels* que não foram possíveis de serem classificados pelo critério geral.

Em geral, a escolha dos parâmetros de **lag**, abertura, direção e parâmetros do filtro da Mediana adaptativo, é de caráter empírico. Deve-se portanto, avaliar o resultado dos semivariogramas e, se necessário, realizar novos testes até alcançar um padrão de comportamento aceitável para os semivariogramas (Camargo, 1999). Deve-se ainda dispensar especial atenção à fase de amostragem para evitar contaminações das amostras (Miranda e Carr, 1996).

Miranda et al. (1998) realizaram uma classificação textural por semivariograma (CTS) de imagens do radar JERS-1, na região da Floresta Amazônica, contendo áreas com vegetação densa, vegetação aberta, áreas alagadas e água. Os resultados encontrados foram comparados com a mesma imagem classificada por Máxima Verossimilhança (MV). A matriz de confusão, para a classificação por CTS, mostrou uma precisão total significativamente maior em relação ao classificador MV. Além disso, o classificador MV apresentou uma maior confusão para as classes separadamente, enquanto o CTS apresentou maior confusão apenas para as classes de vegetação, uma vez que os semivariogramas destas classes apresentaram-se bastante semelhantes. Concluiu-se que, para a região de estudo, de acordo com os dados utilizados, a classificação por CTS mostrou melhores resultados e, portanto, maior utilidade para o estudo em relação a classificação por MV.

Neste trabalho, a escolha dos parâmetros para o CTS foi feita utilizando-se o recorte da imagem *ScanSAR Wide* de 15/07/97 (imagem 1 – veja figura 4.3). Esta imagem foi classificada com um *lag* 5, o qual foi escolhido após a análise dos semivariogramas das

diferentes classes, e utilizando-se todos os procedimentos de cálculo (circular, tradicional, direcional e omnidirecional). Os resultados foram avaliados em termos visuais e da matriz de confusão (a qual avalia o grau de confusão entre as classes com base nas amostras de treinamento).

Após a escolha do melhor procedimento para o cálculo dos semivariogramas, este foi aplicado às demais imagens. O procedimento então escolhido foi aplicado às imagens *Fine*. Estabeleceu-se que todos os métodos seriam testados também para as imagens *Fine*, caso a matriz de confusão ou o valor do coeficiente de concordância kappa (o qual mede a eficiência da classificação, ver Seção 4.2.8) mostrassem resultados de qualidade inferior aos das classificações realizadas nas imagens *ScanSAR Wide*.

4.2.7.2 O Classificador *Texture*

Rennó et al. (1998) desenvolveram um sistema para classificação por regiões utilizando medidas de textura, denominado *Texture*. Este algoritmo de classificação possui uma interface de fácil acesso, desenvolvida em linguagem IDL, para extrair e analisar medidas texturais de imagens. O primeiro passo para efetuar a classificação é a tomada de amostras de treinamento a partir da imagem que se deseja classificar. A partir de então, o sistema calcula as medidas texturais das áreas de treinamento escolhidas, como: 1) medidas de primeira ordem, as quais são calculadas sem a consideração da distribuição espacial dos dados; 2) medidas distribucionais que são estimadores de parâmetros estatísticos de distribuições; 3) medidas de Haralick, que são baseadas na matriz de co-ocorrência; 4) medidas de autocorrelação espacial, que podem ser definidas por *lags* nas direções de linha e coluna; 5) medidas morfológicas, que relacionam os parâmetros área e perímetro das amostras. São descritas a seguir as medidas utilizadas neste trabalho.

As medidas de textura de primeira ordem não consideram a distribuição espacial dos níveis de cinza de uma região da imagem (Rennó, 1995). Considerando $P(i)$ a

frequência com que o nível de cinza i ocorre na amostra, M é a média e V a variância dos níveis de cinza na imagem (ver eq. 4.5 e 4.6), as medidas de primeira ordem utilizadas foram:

a) coeficiente de variação

$$CV = \frac{\sqrt{V}}{M} \quad (4.2)$$

b) Mediana

O valor da Mediana é aquele que separa ao meio o conjunto de *pixels* considerado, com 50% do pixels abaixo da Mediana e 50% acima (Schowengerdt, 1997).

c) assimetria

$$AS = \frac{\sum_i |(i - M)^3| P(i)}{V^{\frac{3}{2}}} \quad (4.3)$$

d) curtose

$$K = \frac{\sum_i (i - M)^4 P(i)}{V^2} \quad (4.4)$$

As medidas distribucionais utilizadas foram:

a) média

$$M = \sum_i iP(i) \quad (4.5)$$

b) variância

$$V = \sum_i [i - M]^2 P(i) \quad (4.6)$$

c) desvio padrão

$$DP = \sqrt{\sum_i (i - M)^2 P(i)} \quad (4.7)$$

d) média da distribuição log-normal

$$MLN = \sum_i P(i) \log i \quad (4.8)$$

e) desvio padrão da distribuição log-normal

$$DPLN = \sqrt{\sum_i (\log i - MLN)^2 P(i)} \quad (4.9)$$

As medidas de Haralick baseiam-se no uso de estatísticas derivadas a partir da matriz de co-ocorrência dos níveis de cinza de uma amostra. Cada elemento $P(i,j)_{\Delta x \Delta y}$ da matriz de co-ocorrência representa a frequência com que dois *pixels* vizinhos (separados por uma distância Δx colunas e Δy linhas) ocorrem na imagem, sendo um com o nível de cinza i e o outro com o nível de cinza j . Entretanto, o uso de medidas texturais baseadas na matriz de co-ocorrência exige grande quantidade de memória e tempo computacional. Como alternativa trabalha-se com vetores soma e diferença de níveis de cinza (Rennó, 1995). Os vetores soma e diferença são definidos da seguinte forma:

Vetor soma

$$P^S(k)_{\Delta x \Delta y} = \sum_i \sum_j P(i, j)_{\Delta x \Delta y} \quad \forall \quad i + j = k \quad (4.10)$$

Vetor diferença

$$P^D(k)_{\Delta x \Delta y} = \sum_i \sum_j P(i, j)_{\Delta x \Delta y} \quad \forall \quad |i - j| = k \quad (4.11)$$

Consideradas as definições dos vetores soma e diferença, as medidas de Haralick utilizadas foram:

a) energia

$$E_{\Delta x \Delta y} = \sum_i \sum_j P(i, j)_{\Delta x \Delta y}^2 \quad (4.12)$$

b) entropia

$$Ent_{\Delta x \Delta y} = - \sum_i \sum_j P(i, j)_{\Delta x \Delta y} \log P(i, j)_{\Delta x \Delta y} \quad (4.13)$$

c) homogeneidade

$$H_{\Delta x \Delta y} = \sum_i \sum_j \frac{P(i, j)_{\Delta x \Delta y}^2}{1 + (i - j)^2} \quad (4.14)$$

d) dissimilaridade

$$D_{\Delta x \Delta y} = \sum_i \sum_j |i - j| P(i, j)_{\Delta x \Delta y} \quad (4.15)$$

e) média do vetor soma

$$MS_{\Delta x \Delta y} = \sum_k k P^S(k)_{\Delta x \Delta y} \quad (4.16)$$

f) média do vetor diferença

$$MD_{\Delta x \Delta y} = \sum_k k P^D(k)_{\Delta x \Delta y} \quad (4.17)$$

g) variância do vetor diferença

$$VD_{\Delta x \Delta y} = \sum_k (k - MD_{\Delta x \Delta y})^2 P^D(k)_{\Delta x \Delta y} \quad (4.18)$$

h) contraste do vetor diferença

$$CD_{\Delta x \Delta y} = \sum_k k^2 P^D(k)_{\Delta x \Delta y} \quad (4.19)$$

i) entropia do vetor diferença

$$EntD_{\Delta x \Delta y} = - \sum_i \sum_j P^D(k)_{\Delta x \Delta y} \log P^D(k)_{\Delta x \Delta y} \quad (4.20)$$

j) *cluster shade*

$$CS_{\Delta x \Delta y} = \sum_i \sum_j (i + j - 2ML_i)^3 \cdot P(i, j)_{\Delta x \Delta y} \quad (4.21)$$

onde ML_i é a média da linha i dada por:

$$ML_i = \sum_j j \cdot P(i, j)_{\Delta x \Delta y} \quad (4.22)$$

k) *energia do vetor diferença*

$$ED_{\Delta x \Delta y} = \sum_k P^D(k)_{\Delta x \Delta y}^2 \quad (4.23)$$

Por fim, as medidas morfológicas utilizadas foram a área (A) das amostras e a complexidade dada por:

$$CP = \frac{P^2}{A} \quad (4.24)$$

onde P é o perímetro da área considerada. O cálculo de A representa a área correspondente a cada *pixel* dentro do polígono de amostragem. Apesar de não se considerar a área real do *pixel*, ambos os resultados são proporcionais, ou seja, não interferem na discriminação das classes. O procedimento para o cálculo do perímetro conta o numero de pixels que se encontram na borda do polígono amostrado (Rennó, 2000).

Após o cálculo da medidas de textura sobre as amostras de treinamento, é feita uma análise das melhores medidas, ou seja, avalia-se quais medidas apresentaram um melhor resultado na separação de duas ou mais classes. Esta análise permite eliminar valores

discrepantes (*outliers*). Para esta análise, o *Texture* oferece algumas ferramentas bastante eficientes. A Figura 4.8 ilustra a distribuição das diferentes classes para a medida de textura selecionada para análise (no caso selecionou-se a média).

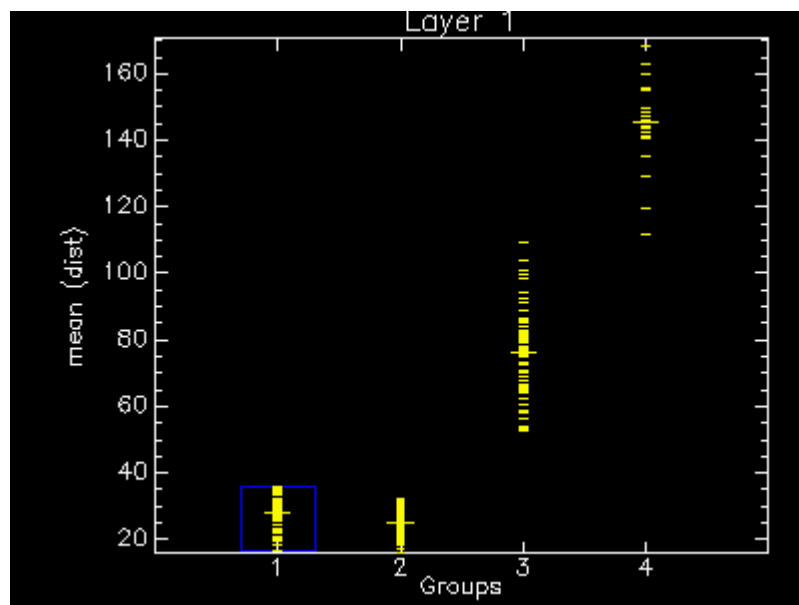


Fig. 4.8 – Gráfico de distribuição das classes 1 (óleo), 2 (baixa de vento), 3 (água) e 4 (embarcação) em relação à média.

A partir desta análise, é possível eliminar os pontos extremos de cada classe, quando necessário. Além desta ferramenta, é possível analisar juntamente os resultados de duas medidas de textura a partir de um gráfico em duas dimensões, conforme ilustra a Figura 4.9 para as medidas da média e da variância do vetor diferença.

A análise visual das medidas de textura é um processo importante, porém não imprescindível. Isto pode ser explicado porque o *Texture* permite dois tipos de classificação: padrão e árvore. Na classificação padrão, o usuário tem duas opções: 1) selecionar as medidas para classificação previamente avaliadas na etapa de análise visual, ou; 2) optar por um método disponível no sistema que informa quais as medidas que melhor separam cada par de classes. Este método é baseado em uma distância que considera as variações entre e intra-classes.

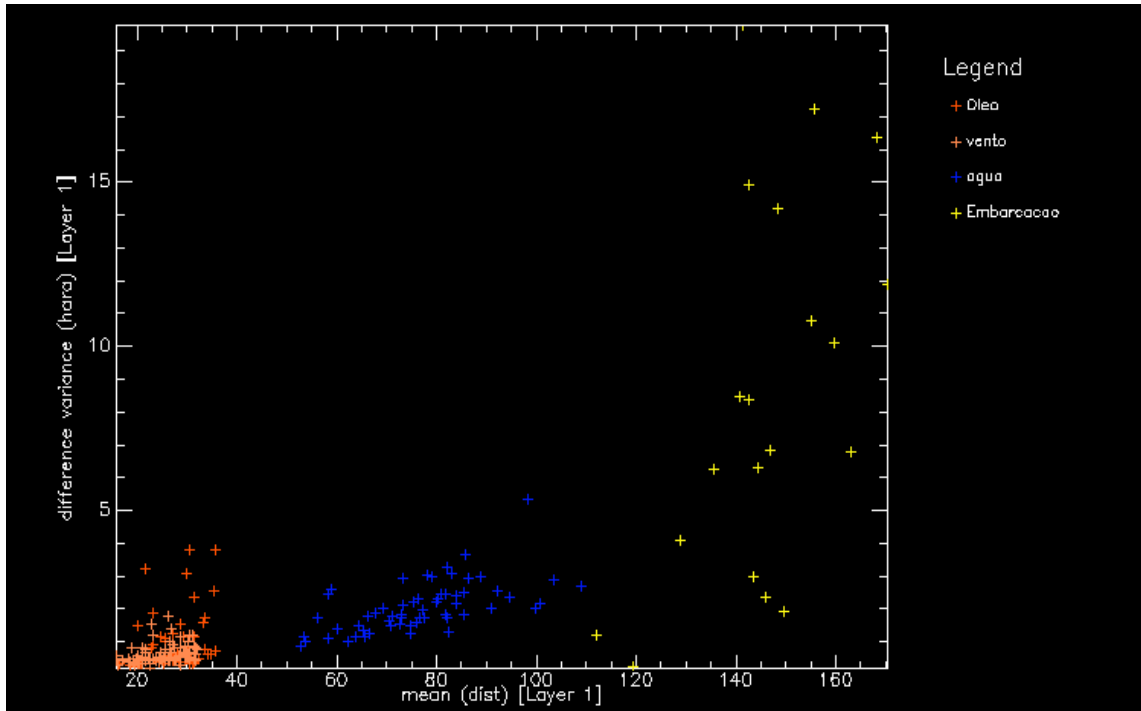


Fig. 4.9 – Gráfico de dispersão entre as medidas média e variância do vetor diferença para as classes óleo, baixa de vento, água e embarcação.

A análise visual das medidas de textura é um processo importante, porém não imprescindível. Isto pode ser explicado porque o *Texture* permite dois tipos de classificação: padrão e árvore. Na classificação padrão, o usuário tem duas opções: 1) selecionar as medidas para classificação previamente avaliadas na etapa de análise visual, ou; 2) optar por um método disponível no sistema que informa quais as medidas que melhor separam cada par de classes. Este método é baseado em uma distância que considera as variações entre e intra-classes.

Apesar do sistema possuir este método, o mesmo não é garantia de que o usuário obterá a melhor classificação possível, uma vez que o sistema classifica toda a imagem utilizando todas as medidas escolhidas. Assim, uma medida escolhida que maximiza a separação das classes A e B pode prejudicar a separação das classes A e C, e assim por diante. Dessa forma, neste trabalho foram adotadas tanto a análise visual uni e bidimensional, quanto o método de separação por cada par de classes, de forma que estes procedimentos se complementassem.

No classificador por árvore, é possível separar as classes em grupos, de forma que estes grupos sejam classificados individualmente pela(s) medida(s) que melhores separarem as classes neles contidas.

Após a escolha do classificador, é necessária a utilização de uma imagem segmentada a partir da imagem original, a qual deseja-se classificar. A segmentação de imagens consiste no processo de separação de regiões vizinhas que possuam características espaciais e/ou espectrais semelhantes entre si, sendo que estas regiões podem ser separadas de várias formas como detecção de bordas, crescimento de regiões, agrupamento, entre outros (detalhes veja Schowengerdt, 1997).

Por fim, as regiões da imagem segmentada são classificadas segundo as medidas de textura selecionadas, utilizando como critério de decisão a distância de Mahalanobis. O uso da distância de Mahalanobis como critério de decisão, normalmente oferece resultados melhores do que o método comumente utilizado, a distância Euclidiana. Isto se deve em virtude da distância de Mahalanobis considerar a distância euclidiana, a média, a variância e a covariância entre as variáveis envolvidas (Rennó, 1995).

A segmentação das imagens foi feita pelo *software* CAESAR 3.0 pelo fato deste ter sido desenvolvido especificamente para o processamento de imagem SAR. Dentre os três segmentadores contidos no CAESAR 3.0, foi selecionado o segmentador RWSEG.

A primeira etapa na segmentação pelo RWSEG consiste em um processo iterativo envolvendo os passos de detecção de bordas e crescimento de regiões, e a segunda etapa consiste no agrupamento de regiões semelhantes entre si (Lucca, 1999). Dentre os segmentadores contidos no CAESAR 3.0, o RWSEG é mais recomendável para detecção de pequenas feições na imagem (NASoftware, 1997).

No processamento de imagens SAR pelo RWSEG, são requeridos dois parâmetros: **j** e **e**. O parâmetro **e** permite especificar a probabilidade para detecção de bordas, e o parâmetro **j** permite especificar a probabilidade de agrupamento das regiões. A imagem final consiste em regiões com o nível de cinza médio dos *pixels* nelas contidos. Utilizando uma metodologia desenvolvida por Lucca (1999), foram realizados 9 testes em um recorte de 512 por 512 *pixels* da imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98 com diferentes valores para **e** e **j** esquematizados na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 – VALORES UTILIZADOS PARA OS PARÂMETROS DO SEGMENTADOR RWSEG NOS TESTES REALIZADOS

Parâmetros	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9
e	2.81	1.96	3.29	2.58	2.81	2.58	3.29	3.48	3.48
j	2	4	4	0	4	4	6	4	6

Após efetuar as 9 segmentações, realizou-se a classificação no *Texture* do recorte com cada uma das imagens rotuladas, utilizando-se as seguintes medidas de textura: Mediana, média, média do log-normal e média do vetor soma. Através de uma análise visual e dos kappas para cada classificação teste, avaliou-se qual a melhor classificação, e portanto a melhor segmentação.

4.2.8 Métodos de Análise das Classificações

Após o término de cada classificação, esta foi avaliada em termos visuais e estatísticos. Para a análise visual, observou-se a fidelidade das classes pela comparação com a imagem original através de recursos de junções de janela disponíveis no ENVI 3.2. Para a análise estatística, foram utilizadas as ferramentas matriz de confusão e coeficiente de concordância kappa, obtidos sobre as amostras de teste, tomadas em regiões diferentes das amostras de treinamento.

A matriz de confusão ou matriz de erro é construída através da informação de verdade das amostras. Supõe-se verdade que todos os *pixels* das amostras tomadas pertencem às classes a que foram atribuídos. Esta verdade é então comparada com as classes atribuídas aos demais *pixels* da imagem na etapa de classificação.

Cada elemento x_{ij} da matriz de confusão representa o número de amostras que, sendo de fato da classe i , foram atribuídas à classe j . Pode-se obter então o total marginal, sendo x_{i+} o número total de amostras da classe i e x_{+j} o total de amostras da classe j . A diagonal principal da matriz indica as amostras classificadas corretamente e N o número total de amostras.

TABELA 4.2 – MATRIZ DE CONFUSÃO

		Resultados da Classificação				
		1	2		n	Total
V	1	x_{11}	x_{12}		x_{1n}	x_{1+}
E	2	x_{21}	x_{22}		x_{2n}	x_{2+}
R	.	.	.	.	.	.
D	.	.	.	.	.	.
A	.	.	.	.	.	.
D	n	x_{n1}	x_{n2}		x_{nn}	x_{n+}
E	Total	x_{+1}	x_{+2}		x_{+n}	N

Para avaliar o resultado da classificação como um todo, utilizou-se o coeficiente de concordância kappa, o qual tem a vantagem de levar em consideração todos os elementos da matriz de confusão, e não somente aqueles da diagonal principal. Este coeficiente supõe que parte do acerto total poderia ser devido ao acaso e portanto o coeficiente kappa estima a porção de acerto que efetivamente ocorre (Foody, 1992; Rennó, 1995). O estimador do coeficiente de concordância kappa é dado por:

$$\hat{\kappa} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{1 - \theta_2} \quad (4.25)$$

onde:

$$\theta_1 = \sum_{i=1}^n X_{ii} / N \quad (4.26)$$

e

$$\theta_2 = \sum_{i=1}^n (x_{i+} x_{+i}) / N^2 \quad (4.27)$$

O coeficiente kappa pode assumir valores menores ou iguais a 1, e inclusive valores negativos. Se todas as amostras forem classificadas corretamente, então o valor de kappa será 1. Valores de kappa pequenos indicam que a classificação não foi satisfatória.

O estimador da variância de $\hat{\kappa}$ é dado por:

$$VAR_{\hat{\kappa}} = \frac{1}{N} \left[\frac{\theta_1(1-\theta_1)}{(1-\theta_2)^2} + \frac{2(1-\theta_1)(2\theta_1\theta_2 - \theta_3)}{(1-\theta_2)^3} + \frac{(1-\theta_1)^2(\theta_4 - 4\theta_2^2)}{(1-\theta_2)^4} \right] \quad (4.28)$$

onde:

$$\theta_3 = \sum_{i=0}^n x_{ii} (x_{i+} + x_{+i}) / N^2 \quad (4.29)$$

$$e \quad \theta_4 = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n x_{ij} (x_{j+} + x_{+i}) / N^2 \quad (4.30)$$

A partir de $\hat{\kappa}$ e de $VAR_{\hat{\kappa}}$, é possível realizar comparações entre diferentes kappas, através da suposição de normalidade de $\hat{\kappa}$ (Hudson e Ramm, 1987).

4.2.8.1 Teste de Hipótese

Para se realizar a comparação entre duas classificações com valores $\hat{\kappa}_1$ e $\hat{\kappa}_2$, realizou-se um teste bilateral de igualdade destes coeficientes. Este teste considera duas hipóteses H_0 e H_1 sendo que:

$$H_0: \kappa_1 = \kappa_2 \quad (4.31)$$

$$H_1: \kappa_1 \neq \kappa_2$$

O procedimento adotado para se decidir entre a aceitação de H_0 e H_1 é denominado procedimento do teste, ou simplesmente teste. Define-se então um procedimento do teste, que consiste em dividir o espaço amostral em dois subconjuntos: um deles consiste nos valores de $\hat{\kappa}_1$ e $\hat{\kappa}_2$ para os quais H_0 é aceita, e o outro consiste nos valores tais que H_0 é rejeitada. A região para a qual H_0 é rejeitada, denomina-se região crítica (Freitas, 1998).

Quando se estabelecem os procedimentos do teste, pode-se incorrer em dois tipos de erros:

- 1) Erros tipo I : ao se rejeitar H_0 quando ela é de fato verdadeira. A probabilidade α deste tipo de erro ocorrer pode ser controlada, e é denominada nível de significância do teste.
- 2) Erros tipo II: ao se aceitar H_0 quando H_1 é verdadeira. A probabilidade β deste erro ocorrer é denominada poder do teste.

Assim, quando se aceita ou rejeita H_0 , pode-se estar incorrendo em um dos dois tipos de erro acima descritos. Portanto, para efetuar o teste deve-se estabelecer o valor do nível de significância considerado. Por exemplo, considerando que H_0 foi rejeitada ao nível de significância de 0.05, equivale a dizer que existe 5% de probabilidade de se estar rejeitando H_0 , quando de fato ela é verdadeira (Spiegel, 1971).

Para se efetuar o teste de igualdade bilateral (eqs. 4.31), considera-se a estatística z , dada por:

$$Z = \frac{\hat{\kappa}_1 - \hat{\kappa}_2}{\sqrt{\text{VAR}_{\hat{\kappa}_1} + \text{VAR}_{\hat{\kappa}_2}}} \quad (4.32)$$

Supondo-se a normalidade de $\hat{\kappa}_1$ e $\hat{\kappa}_2$, a distribuição de z será uma normal padronizada, representada pela Figura 4.10.

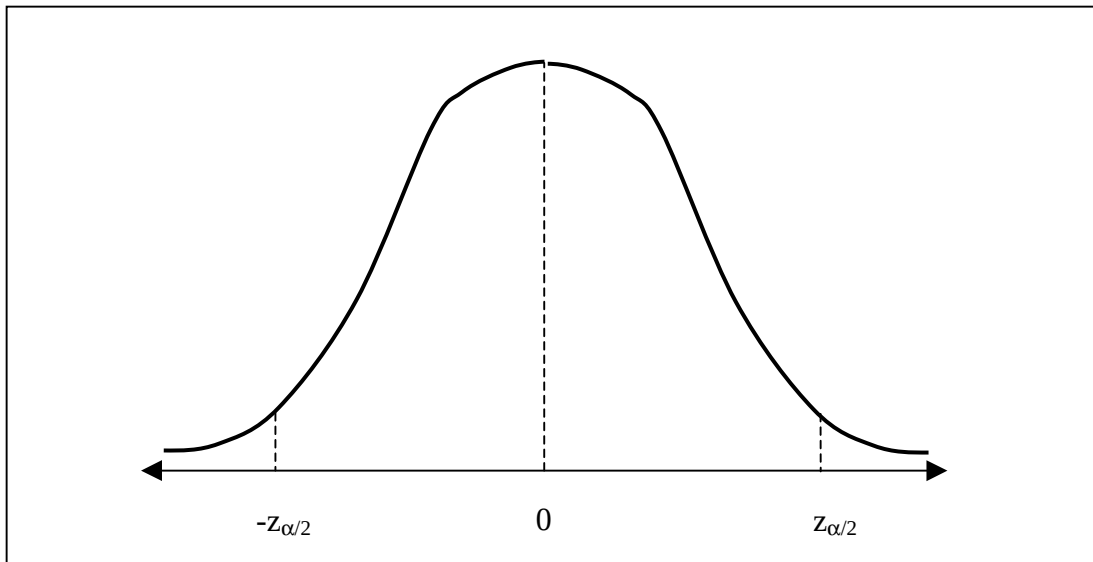


Fig. 4.10 – Distribuição normal da estatística z , onde a região crítica corresponde às extremidades da curva delimitadas, ou seja, menor que $-z_{\alpha/2}$ e maior que $z_{\alpha/2}$.

Observando a Figura 4.10, vê-se que H_0 é rejeitada ao nível de significância de α , quando $|z| > z_{\alpha/2}$. Neste caso, considera-se que os kappas são diferentes entre si; logo o kappa de maior valor equivale à melhor classificação. Neste trabalho, foi adotado o valor de significância de 0.05.

4.2.8.2 Cálculo do p-valor

Uma vez obtida a estatística z , pode-se calcular chamado p-valor correspondente, o qual é definido por:

$$p = 1 - \Phi(z) \quad (4.33)$$

onde $\Phi(z)$ é a área sob a curva de densidade Normal padrão de $-\infty$ até z , isto é $\Phi(z) = P(Z < z)$, sendo Z é uma variável aleatória com distribuição Normal padrão (Vieira, 1996).

O p-valor indica o máximo nível de significância para o qual a hipótese nula H_0 é aceita. Quanto maior for o p-valor, maior a segurança na aceitação da hipótese nula. Se o nível de significância α , para o teste unilateral, for previamente especificado, a hipótese nula H_0 será aceita se o p-valor obtido for superior a $\alpha/2$.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise e discussão dos resultados está estruturada da seguinte forma: resultados das etapas de correção radiométrica (efeito de padrão da antena e filtragem); resultados das etapas de cruzamentos dos dados AVHRR/NOAA, dados meteorológicos e SeaWiFs com as imagens SAR; resultados das aplicações dos classificadores, e por fim a comparação entre os resultados dos classificadores.

5.1 Resultados das Correções Radiométricas

5.1.1 Efeito do Padrão da Antena

Apesar das especificações dos produtos RADARSAT utilizados possuírem correção do efeito de padrão da antena, foi aplicado o algoritmo de correção de padrão da antena, do *software* PCIWorks 6.2, sobre o recorte da imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98. Esta imagem foi selecionada pois continha grandes feições de óleo e baixa de vento, e um número considerável de embarcações. Após a aplicação do algoritmo sobre a imagem, foi feita uma leitura dos valores dos *pixels* tanto na imagem original quanto na corrigida. Observou-se que a grande maioria dos *pixels* não sofreram modificação alguma no seu nível de cinza. Dessa forma, supôs-se que as demais imagens não continham resíduos significativos ao ponto de necessitarem de uma correção deste efeito.

5.1.2 Filtragem

A Figura 5.1 ilustra o recorte da imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98 original, na qual foram aplicados os filtros da Mediana 7x7, Gama 7x7 e 9x9 (Figuras 5.2, 5.3 e 5.4

respectivamente). Observou-se que ambos os filtros preservaram muito bem as bordas e contrastaram suavemente as regiões de possíveis manchas de óleo e baixas de vento, reduzindo portanto o *speckle* presente na imagem original.

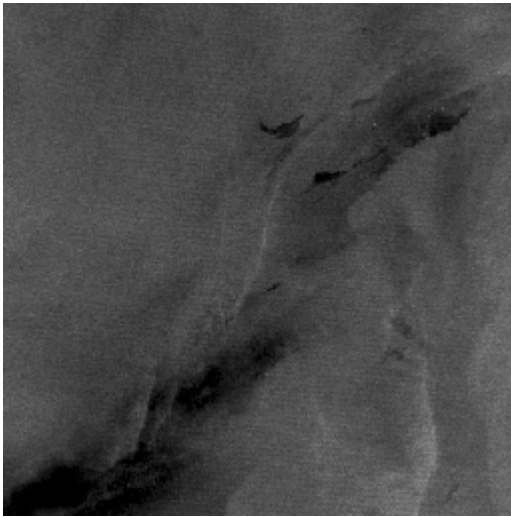


Fig. 5.1 – Imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98 original.

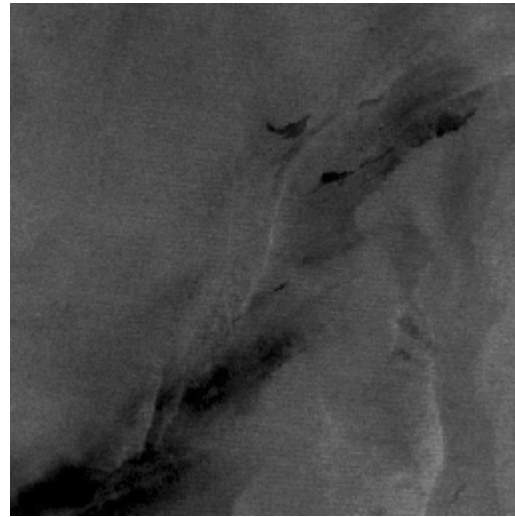


Fig 5.2 – Imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98 com o filtro da Mediana 7x7.

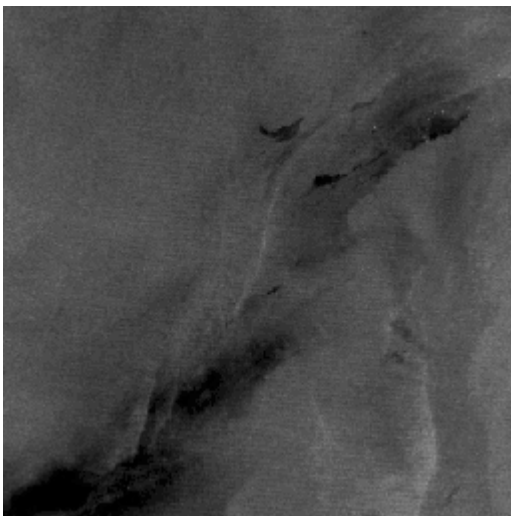


Fig. 5.3 – Imagem *ScanSAR Wide* de 15/07/98 com o filtro Gama 7x7.

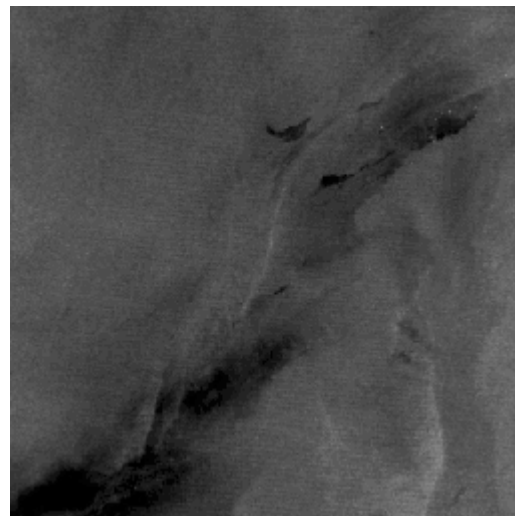


Fig. 5.4 – Imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98 com o filtro Gama 9x9.

Entretanto, na filtragem Gama 7x7 foi observado um melhor realce e separação de pontos brancos, o que indica uma melhor adequação para detecção de plataformas de extração de petróleo e embarcações. Decidiu-se, então, realizar a filtragem das demais imagens *ScanSAR Wide* com o filtro Gama 7x7.

Na filtragem da imagem *Fine* F4 de 04/09/96 (Figura 5.5), observou-se que todos os filtros apresentaram uma evidenciável redução do *speckle*. Entretanto, o filtro Gama 7x7 e 9x9 (Figuras 5.7 e 5.8) resultou no surgimento de alguns *pixels* brancos isolados, o que provavelmente não evidencia embarcações e sim uma característica deste filtro quando na presença de *speckle* alto, além de numa diminuição do contraste geral (melhor visualização das imagens no CD – Apêndice B).

Além disso, o filtro da Mediana (Figura 5.6) proporcionou uma melhor manutenção da textura da imagem em relação ao Gama, que ocasionou um efeito ‘borrado’ nas imagens. Dessa forma decidiu-se aplicar o filtro da Mediana 7x7 nas demais imagens *Fine*.

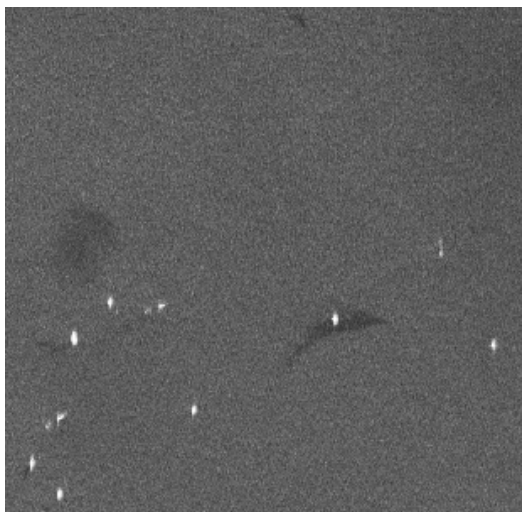


Fig. 5.5 – Imagem *Fine* de 04/09/96 original.

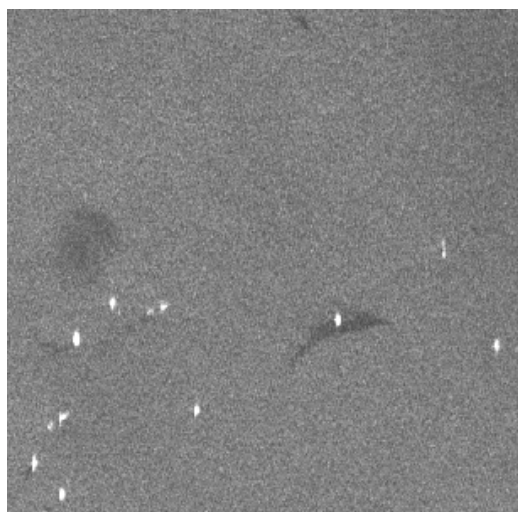


Fig. 5.6 – Imagem *Fine* de 04/09/96 com o filtro da Mediana 7x7.

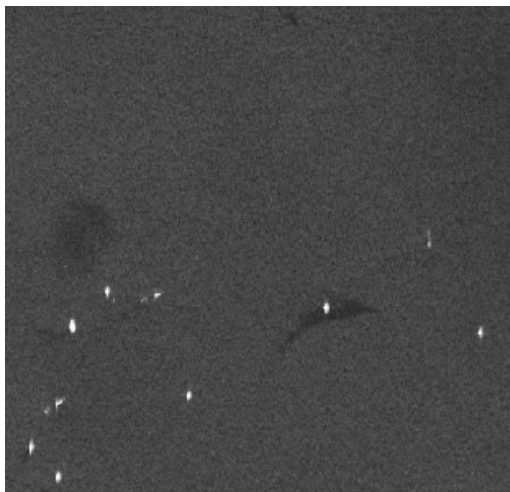


Fig. 5.7 – Imagem *Fine* de 04/09/96 com o filtro Gama 7x7.

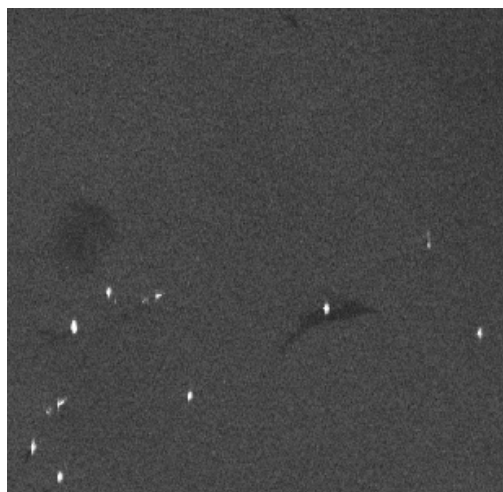


Fig. 5.8 – Imagem *Fine* de 04/09/96 com o filtro Gama 9x9.

A transformada de Fourier foi aplicada na imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98, pois algumas imagens de radar neste modo podem, ocasionalmente, apresentar um ruído denominado *scalloping*. Este ruído surge na formação da imagem *ScanSAR* que é constituída pela junção das imagens nos modos W1, W2, S5 e S6 cujos parâmetros de imageamento estão dispostos na Tabela 2.1, devida à incorreta estimação do chamado Centróide do efeito Doppler. Este ruído se repete ao longo da imagem com uma determinada fase, e pode ser retirado através de transformações espaciais como a Transformada de Fourier (Projeto GlobeSAR2, 1998).

A aplicação da Transformada de Fourier foi feita sobre a imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98, pois nesta imagem este ruído era mais expressivo em relação às demais imagens deste modo. O espectro de amplitude gerado foi então analisado para a identificação de *pixels* com altos valores de níveis de cinza, que se repetissem no espaço de forma regular, e que poderiam corresponder ao ruído. Tais harmônicos foram identificados e a eles atribuiu-se valores nulos. Com a aplicação da transformada inversa observou-se que a eliminação do ruído não foi significativa, sendo que apenas uma parte do ruído foi eliminado (ver imagem filtrada no CD - Apêndice B). Este resultado pode ser atribuído ao fato do ruído *scalloping* presente na imagem testada ser pequeno em comparação àquele presente em outros tipos de imagem, como as tomadas

em áreas de relevo acidentado em regiões continentais. Foram então efetuadas as classificações nesta imagem, sem a aplicação da Transformada de Fourier.

5.2 Cruzamentos dos Dados

Na etapa de cruzamento de dados, definiu-se os temas que seriam adotados para cada imagem. Através da observação das coordenadas geográficas em comum nos diferentes dados utilizados, foram definidas cinco classes: água, óleo, embarcação/plataforma, baixa de vento e célula de chuva como assemelhados. A ocorrência destas classes variou conforme a imagem. A determinação das classes foi feita da seguinte forma: quando um dado auxiliar indicava a presença de um assemelhado em áreas de ocorrência de feições escuras, estas feições eram interpretadas visualmente na imagem SAR, e, se houvesse concordância com as feições de assemelhados ou de óleo indicadas pela literatura (Espedal, 1998a; Espedal, 1998b; Johannessen et al., 1999), determinava-se a classe. Para a classe embarcação todos os pontos brilhantes com ocorrência de níveis de cinza acima de 180 (numa escala de 0 a 255), foram considerados embarcação. O restante da imagem foi considerado água.

Um dos principais problemas no estabelecimento de uma verdade terrestre com auxílio dos dados de vento, TSM e concentração de clorofila, foi a delimitação das fronteiras entre as classes. Foram então delimitadas visualmente fronteiras entre as classes onde os níveis de cinza caracterizassem uma transição. A seguir estão apresentadas todos os recortes das imagens, sendo que as do modo *Fine* correspondem às filtradas com a Mediana e as do modo *ScanSAR Wide* são originais. Esta separação foi feita pois as imagens *Fine* originais (disponíveis no CD – Apêndice B) apresentaram alto *speckle*, e, portanto, poucas feições são visíveis sem a filtragem. As Figuras 5.9 a 5.14 mostram setas com indicações das classes, sendo que as cores das setas estão relacionadas com os temas da seguinte forma: vermelho – óleo, verde – água, azul – célula de chuva, branco – baixa de vento e preto – embarcação. Os pontos brilhantes circundados em laranja

indicam plataformas de extração de petróleo, segundo dados de coordenadas geográficas da Petrobrás.

Um fato de grande importância no cruzamento da imagem de temperatura de topo de nuvem de 06/09/96 com a imagem *Fine* de 04/09/96 é a defasagem de 2 dias entre elas. Este fato impede a correta identificação da feição circular escura indicada pela seta azul na Fig. 5.9, como célula de chuva, pois para tal identificação torna-se necessária a utilização de uma imagem AVHRR na mesma data e horário de passagem da imagem SAR (Miranda, 2000). Dessa forma, esta feição escura foi considerada um assemelhado, entretanto sem confirmação precisa de que constituía-se de uma célula de chuva.

Apesar das imagens esquematizadas nas Figs. 5.9 a 5.11 constituírem-se de imagens com feixe F4 com ângulos de incidência altos para detecção de óleo, foi verificado que as camadas de óleo ainda são observáveis neste feixe. Nas Figs. 5.12 e 5.13, é possível observar próximo à costa uma expressiva feição indicativa da frente da Corrente do Brasil. Na Fig. 5.14 esta feição também ocorre na diagonal da imagem, entretanto não tão expressiva, mas podendo ser confirmada a partir da comparação entre a imagem SAR e o mapa de TSM representado pela Fig. 5.19. As grandes áreas escuras indicadas por setas brancas, ainda na Fig. 5.14, provavelmente são devidas a presença de nuvens do tipo *cumulu nimbus*, mas que não puderam ser confirmadas através na criação de uma mapa de temperatura de topo de nuvem para esta data pois não haviam dados disponíveis.

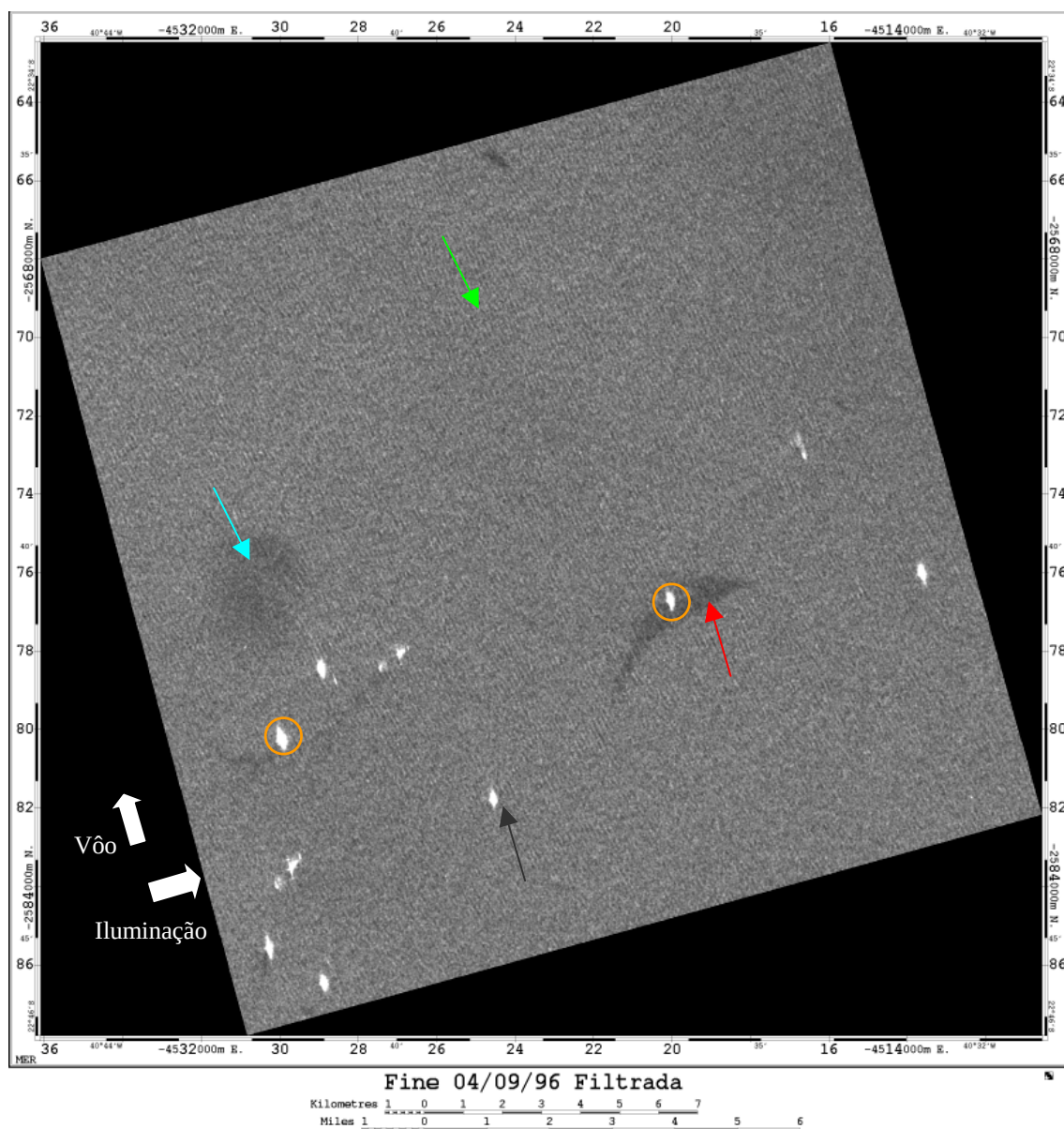


Fig. 5.9 – Recorte da imagem *Fine* de 04/09/96 com filtro da Mediana 7x7, onde as cores das setas estão relacionadas às seguintes classes: vermelho – óleo, verde – água, azul – célula de chuva e preto – embarcação/plataforma. Os pontos circundados em laranja indicam plataformas de extração de petróleo, segundo dados de coordenadas geográficas da Petrobrás.

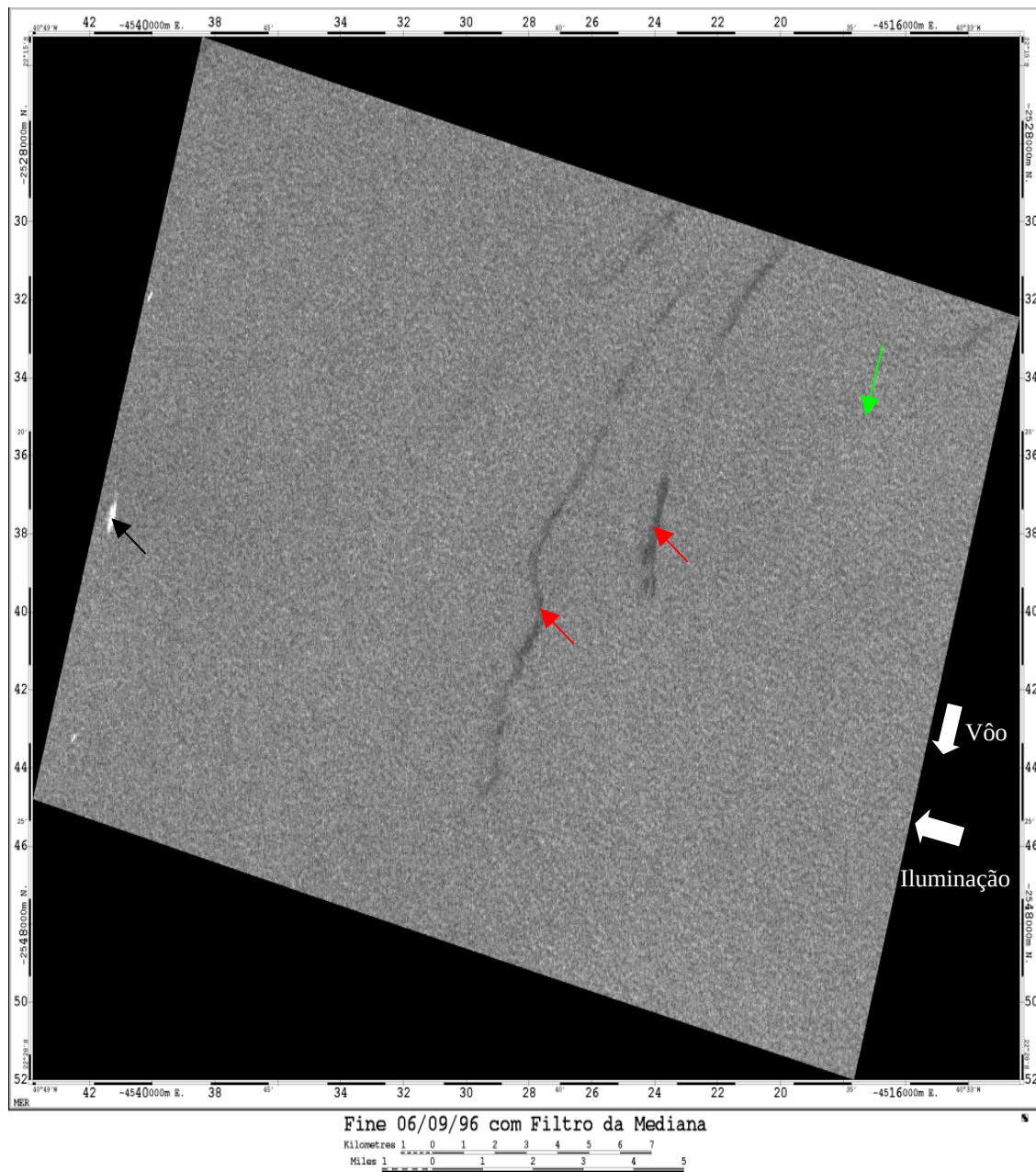


Fig. 5.10 – Imagem *Fine* de 06/09/96 com filtro da Mediana 7x7, recorte superior, onde as cores das setas estão relacionadas às seguintes classes: vermelho – óleo, verde – água e preto – embarcação/plataforma.

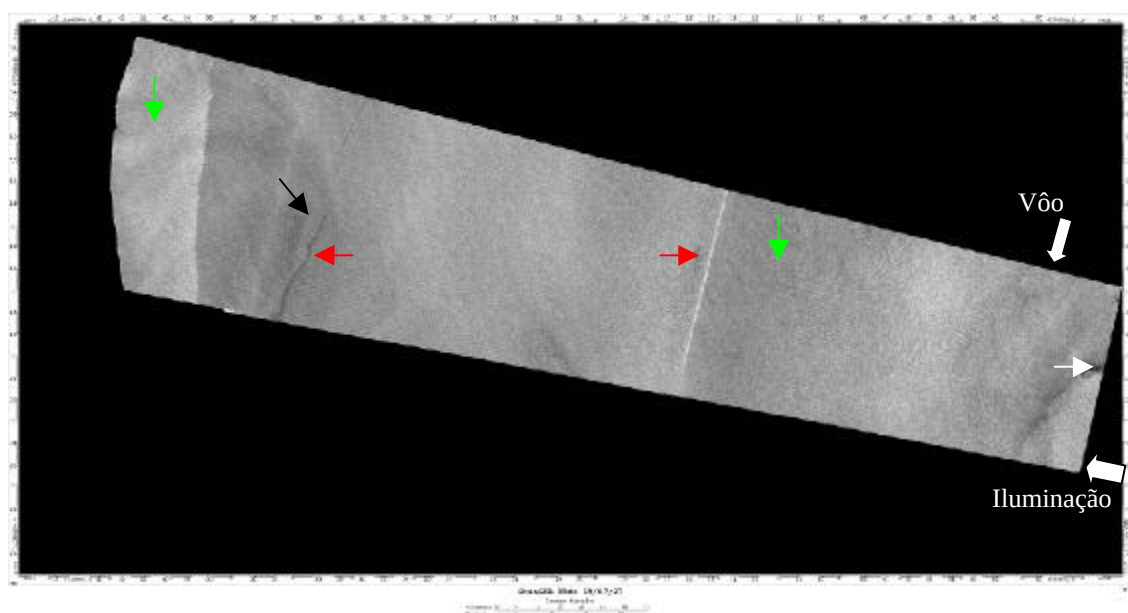


Fig. 5.12 – Recorte da imagem *ScanSAR Wide* de 15/07/97 original (superior), onde as cores das setas estão relacionadas às seguintes classes: vermelho – óleo, verde – água, branco – baixa de vento e preto – embarcação/plataforma.

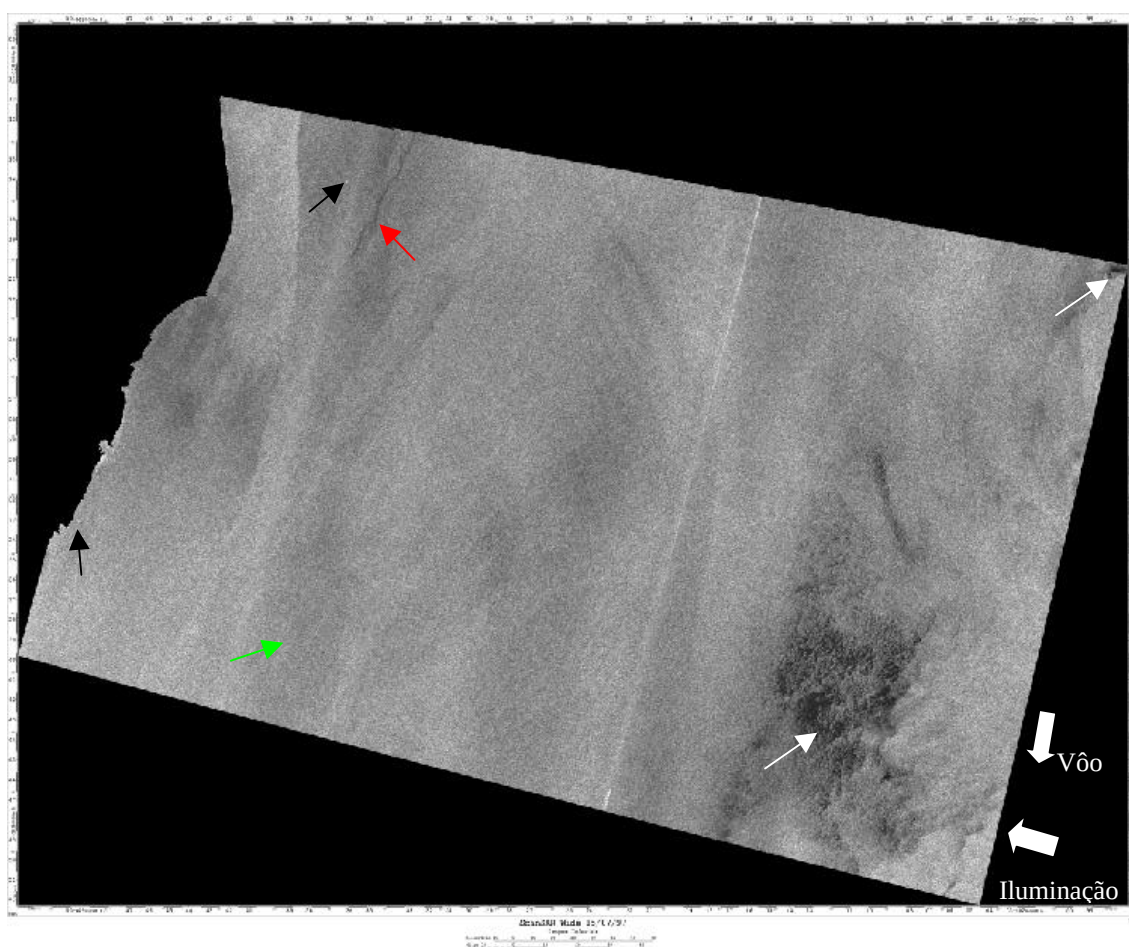


Fig. 5.13 – Recorte da imagem *ScanSAR Wide* de 15/07/97 original (inferior), onde as cores das setas estão relacionadas às seguintes classes: vermelho – óleo, verde – água, branco – baixa de vento e preto – embarcação/plataforma.

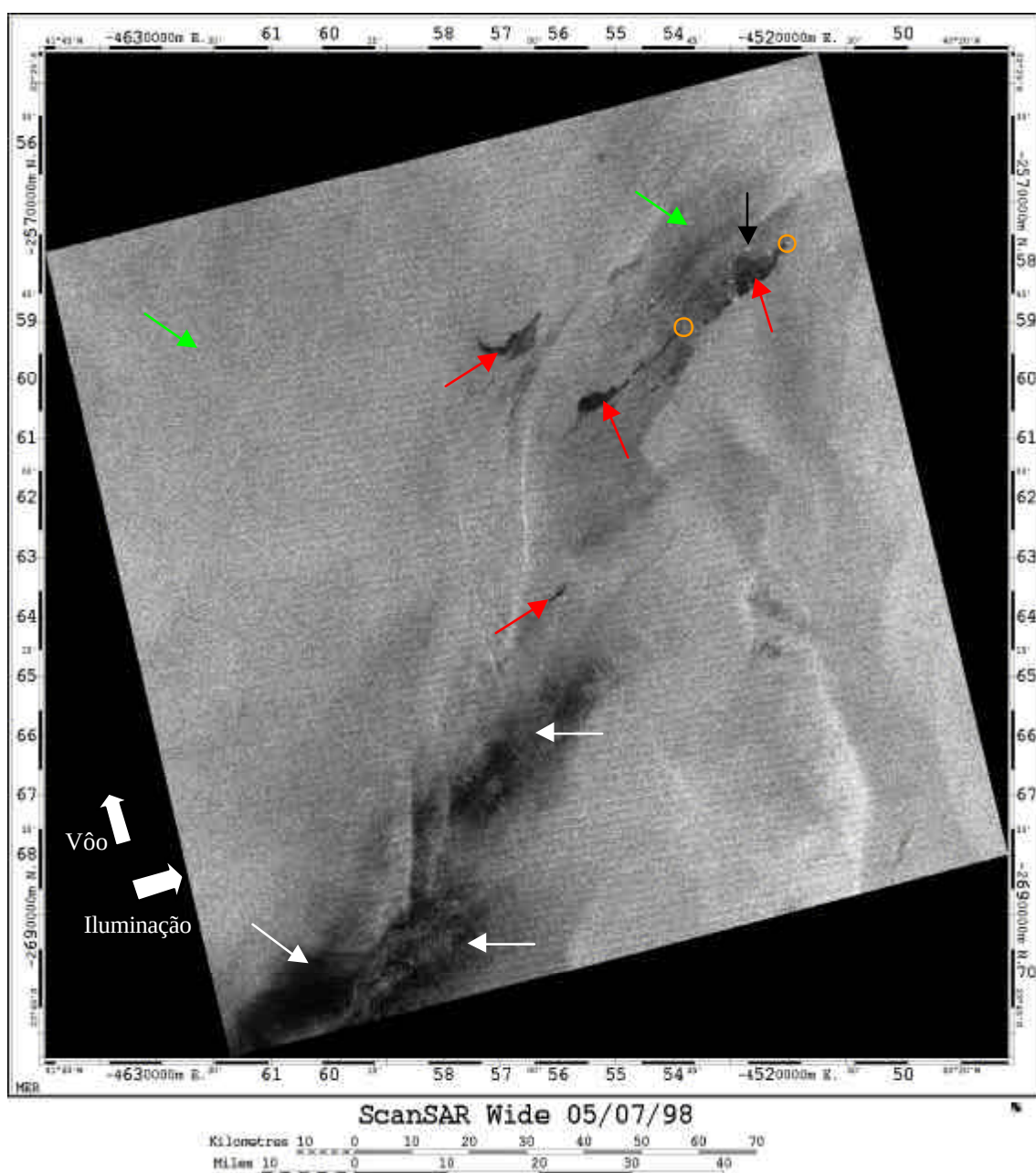


Fig. 5.14 – Recorte da imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98 original, onde as cores das setas estão relacionadas às seguintes classes: vermelho – óleo, verde – água, branco – baixa de vento e preto – embarcação/plataforma. Os pontos circundados em laranja indicam plataformas de extração de petróleo, segundo dados de coordenadas geográficas da Petrobrás.

Para a determinação destas classes, inicialmente foram comparadas as áreas em comum com os dados de altura e direção de onda e intensidade e direção do vento do vento esquematizados pelas Figuras 5.15 a 5.17.

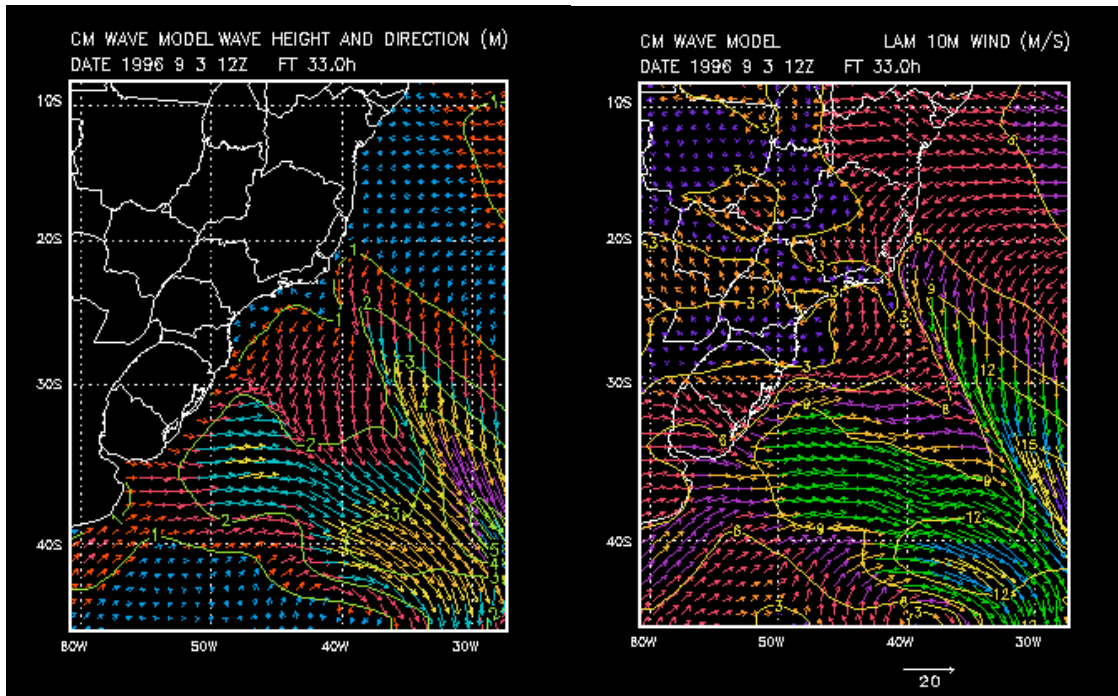


Fig. 5.15 – Resultados da modelagem de dados de altura e direção de onda (à esquerda) e intensidade e direção do vento (à direita) de 03/09/1996, com simulação de 33 horas para o dia 04/09/1996.

A partir da análise da figura 5.15, pode-se observar que na região da área de abrangência da imagem *Fine* de 04/09/96, ocorrem ondas entre 0 e 1 m de altura, e ventos entre 3 e 6 m/s, estando dentro de valores adequados para detecção de óleo no oceano (Lichtenegger, 1994; Scott, 1999). Portanto, foi descartada a ocorrência de áreas de baixa de vento na imagem *Fine* de 04/09/96. Para a imagem *Fine* de 06/09/96, como não haviam dados de vento disponíveis, considerou-se as manchas escuras como sendo óleo. Pela análise das Figuras 5.16 e 5.17, observa-se que em ambas ocorre um grande região com ventos entre 3 e 6 m/s nas áreas de abrangência das imagens, e com indicações de baixas de vento localizadas.

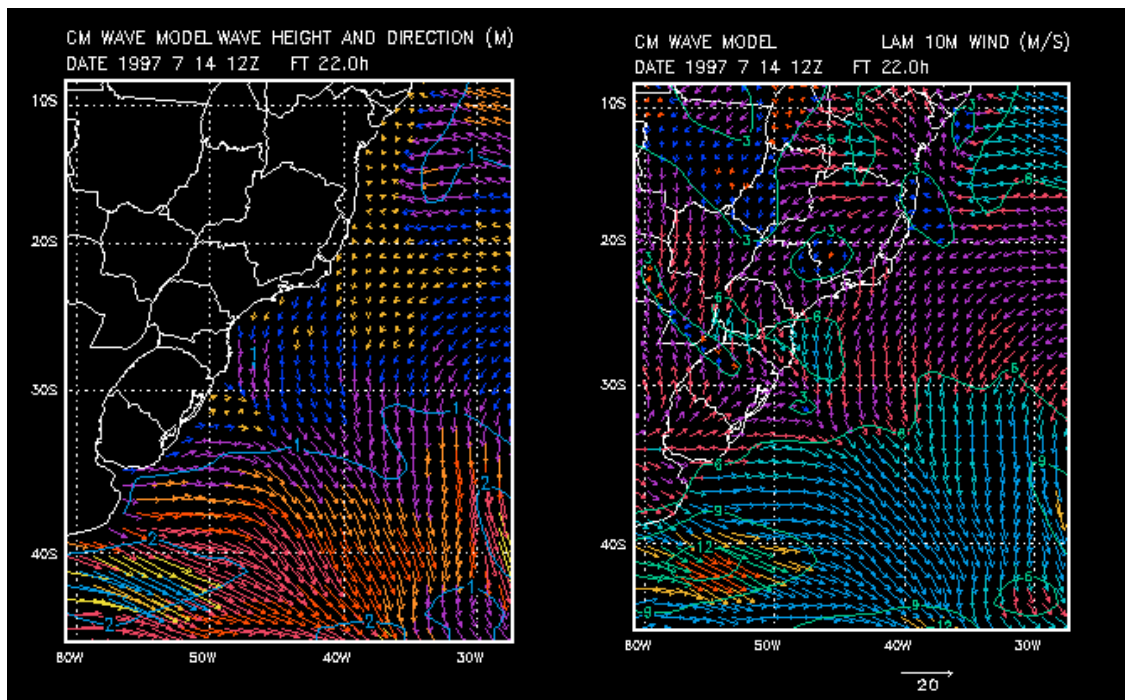


Fig. 5.16 – Resultados da modelagem de dados de altura e direção de onda (à esquerda) e intensidade e direção do vento (à direita) de 14/07/1997, com simulação de 22 horas para o dia 15/07/1997.

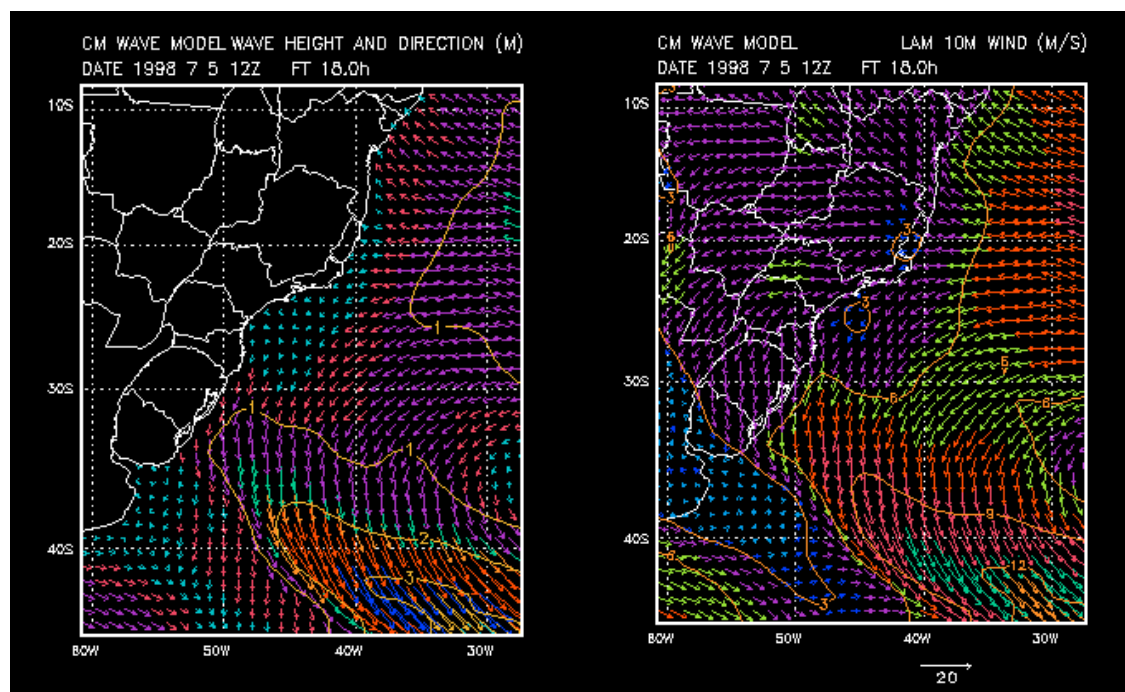


Fig. 5.17 – Resultados da modelagem de dados de altura e direção de onda (à esquerda) e intensidade e direção do vento (à direita) de 05/07/1998, com simulação de 18 horas para o momento de passagem do satélite.

Após o cruzamento dos dados meteorológicos, iniciou-se o cruzamento com os dados de TSM, derivados dos sistema AVHRR/NOAA. Da mesma forma, foi feita uma análise, a partir das coordenadas geográficas, de ocorrência de ressurgência nos mapas de TSM de 15/07/97 e 06/07/98 (Figuras 5.18 e 5.19, respectivamente), e a temperatura de topo de nuvem pelo mapa de TSM de 06/09/96 (Figura 5.20).

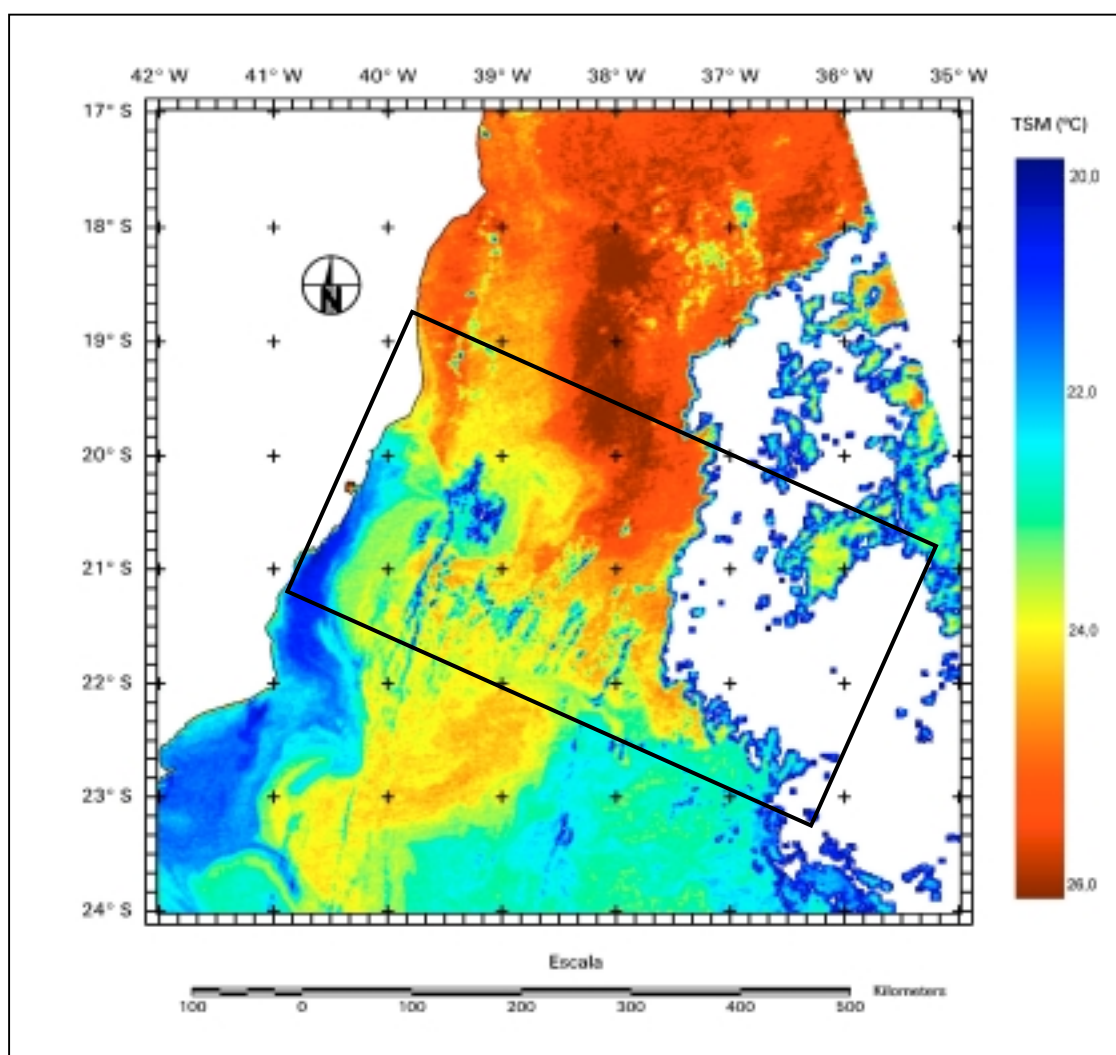


Fig. 5.18 – Mapa de TSM de 15/07/97, incluindo a região da Bacia de Campos – área relativa às imagens SAR de 15/07/97. O retângulo esquematiza a abrangência das imagens de 15/07/97.

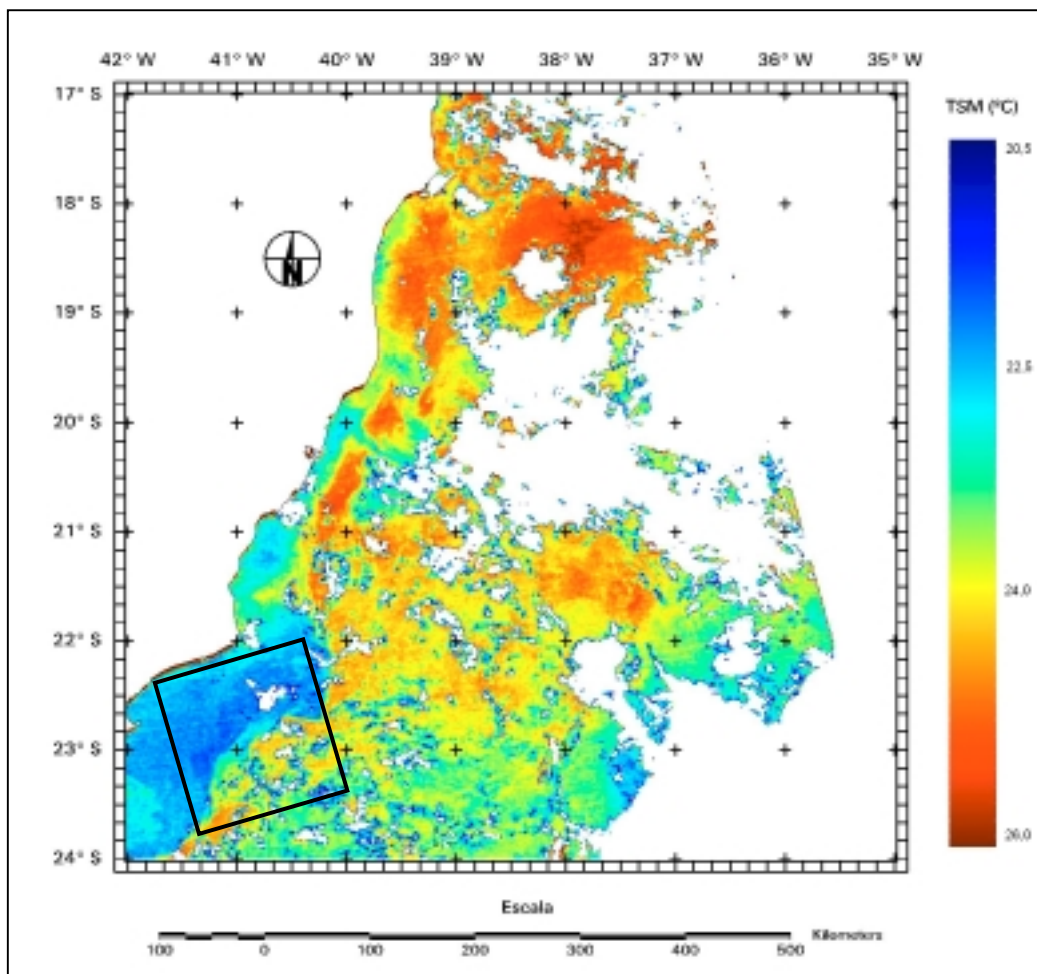


Fig. 5.19 – Mapa de TSM de 06/07/98, incluindo a região da Bacia de Campos – área relativa à imagem SAR de 05/07/98. O quadrado em preto esquema a abrangência da imagem de 05/07/98.

A partir da análise do mapa de TSM da Figura 5.19, é possível observar que na região de abrangência da imagem SAR de 05/07/98, as temperaturas são baixas em relação aos seus arredores. Este fato pode caracterizar uma região de ressurgência, o que propicia o surgimento de filmes naturais (Espedal et al., 1996). Entretanto, a partir de um conhecimento prévio das características comuns a filmes naturais e a manchas de óleo (Espedal, 1998a; Espedal, 1998b; Johannessen et al., 1999), as feições escuras na imagem SAR foram assim consideradas óleo.

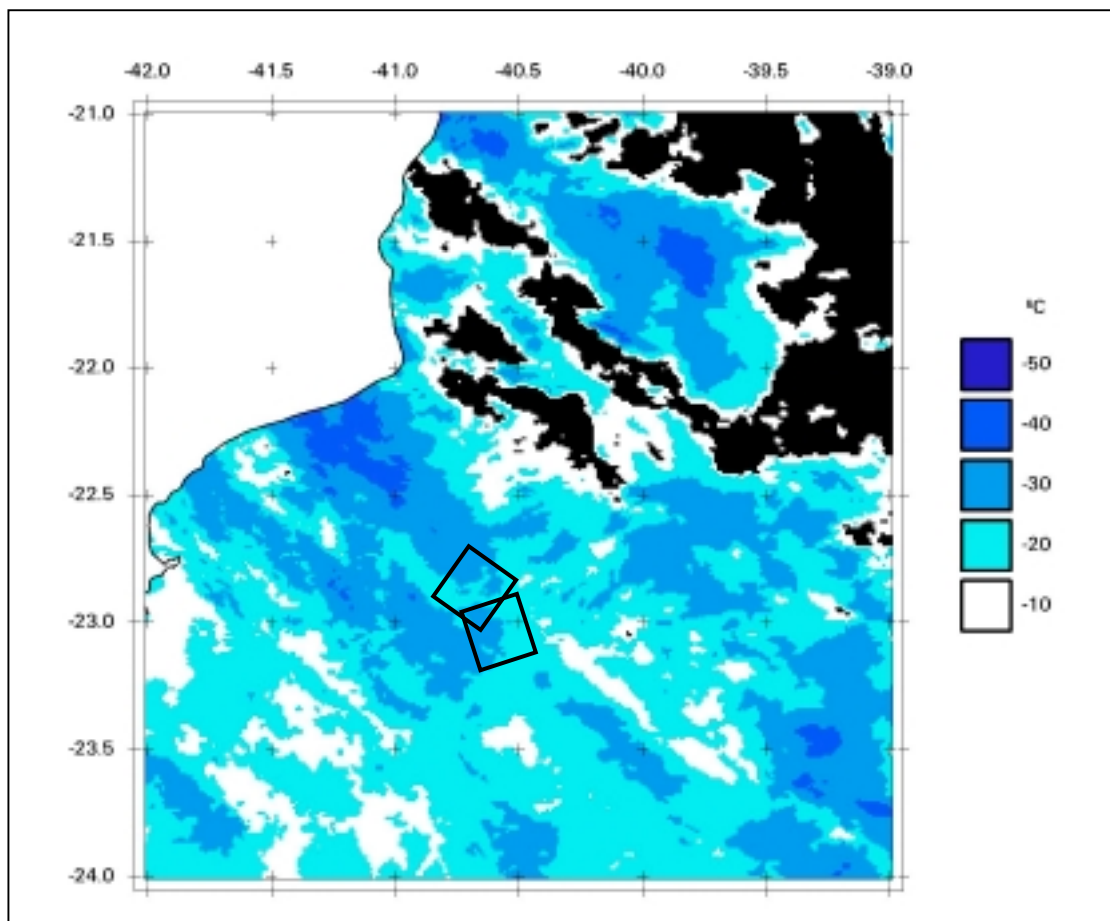


Fig. 5.20 – Mapa de temperatura de topo de nuvem, onde as áreas em preto significam temperaturas acima de -10°C , de 06/09/96 incluindo a região relativa às imagens SAR de 04 e 06/09/96. O quadrado esquematiza a área de abrangência da imagem de 04 e 06/09/96.

Apesar da Figura 5.20 indicar a presença de nuvens com temperatura de topo por volta de -40°C próximas às regiões de abrangência da imagem *Fine* de 04/09/96, a qual apresentava uma feição de célula de chuva, não foi possível confirmar esta observação devido à grande defasagem de tempo entre a imagem AVHRR e a imagem SAR. Dessa forma, considerou-se esta feição como sendo um assemelhado não identificado pelos dados auxiliares, podendo possível ser uma célula de chuva.

O último passo do cruzamento de dados, foi a análise da imagem SEAWiFs de 07/07/98, sendo esta data escolhida devido ao fato de ser única imagem com pouca presença de nuvens da época da imagem SAR de 05/07/98. Inicialmente esta imagem

foi processada no *software* Seadas 3.0, e então suas coordenadas geográficas foram comparadas com as da imagem SAR, da mesma data, quando na presença de feições escuras na imagem de radar. Entretanto, observou-se a impossibilidade desta comparação devido ao fato da resolução da imagem SeaWiFs utilizada (nível- 2) ser de 4 x 4 km, sendo que a maior feição escura na imagem SAR possuía uma dimensão de cerca de 10 km de comprimento e 5 km de largura máxima. Dessa forma, concluiu-se a inviabilidade da utilização do dado SeaWiFs, ao nível de processamento em que se encontrava. A Figura 5.21 ilustra a comparação entre a maior feição escura na imagem SAR e o tamanho da *pixel* na imagem SeaWiFs.

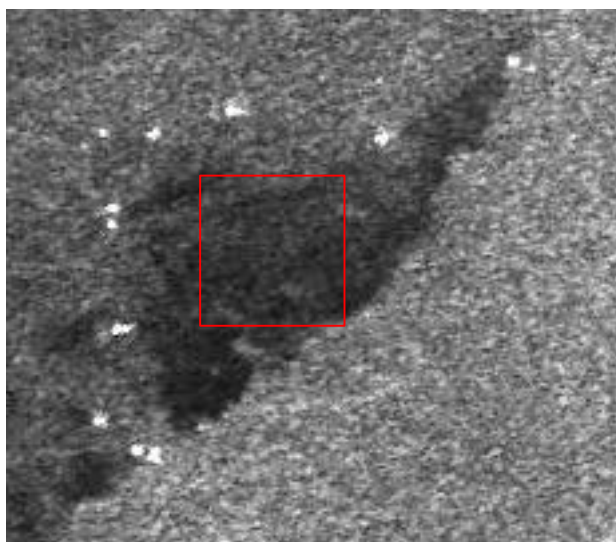


Fig. 5.21 – Esquema do tamanho do *pixel* da imagem SeaWiFs, em comparação ao tamanho da maior feição escura observada. Imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98.

É importante salientar que, apesar da resolução das imagens NOAA ser de mais de 1 km, uma resolução também não muito adequada se comparada às das imagens SAR utilizadas, o caráter da informação desejada requer a avaliação em grande escala. Entretanto, no caso da imagem SeaWiFs, a informação requerida era de caráter mais localizado, portanto avaliou-se ser coerente a não utilização de tal imagem neste trabalho. Após a finalização da etapa de cruzamento de dados, iniciaram-se as

classificações no CTS e no *Texture*, considerando as áreas de amostragem segundo as regiões delimitadas no cruzamento de dados.

5.3 Resultados do Classificador CTS

Para se determinar os parâmetros do classificador, inicialmente foram tomadas amostras na imagens *ScanSAR Wide* original de 15/07/97 (superior), com três diferentes **lags**: 20, 10 e 5. A partir da análise dos semivariogramas, observou-se que, para o **lag** 20, as amostras de óleo, baixa de vento e água apresentaram, em geral, semivariogramas indicando forte variabilidade espacial entre os *pixels*. Entretanto, a janela de amostragem se encontrava demasiadamente grande para as amostras de óleo, estando portanto contaminadas com *pixels* de água. Isto pode ser observado pelo comportamento dos semivariogramas das amostras de baixa de vento embarcação (Fig. 5.22), os quais indicam contaminação das amostras. As Figura 5.22, 5.23 e 5.24 ilustram as funções semivariograma para as amostras de óleo, água, baixa de vento e embarcação para os **lags** 20, 10 e 5, respectivamente. Alguns parâmetros estatísticos estão esquematizados na Tabela A.1 do Apêndice A.

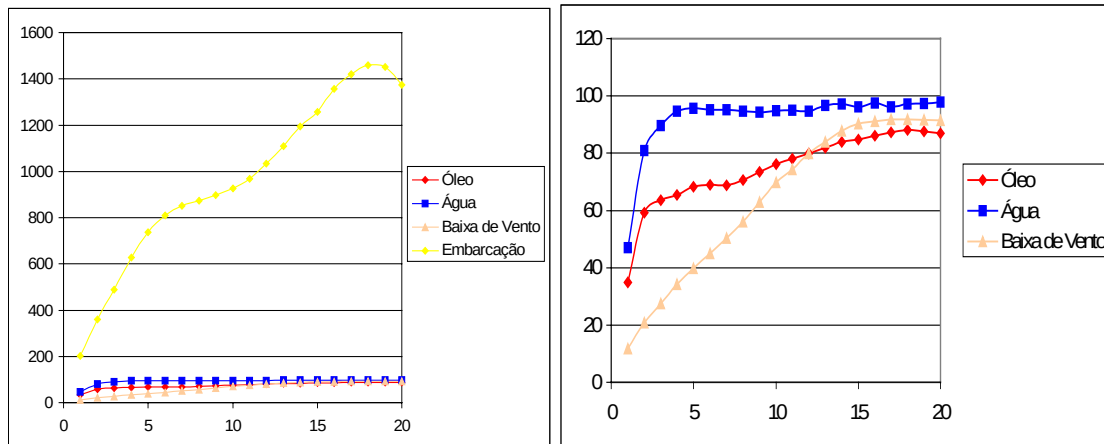


Fig. 5.22 – Semivariogramas das amostras de óleo, baixa de vento, água e embarcação tomadas na imagem *ScanSAR Wide* de 15/07/97 (superior), com **lag** 20 (à esquerda). No semivariograma à direita, excluiu-se as amostras de embarcações para uma melhor visualização do semivariograma da demais classes.

Foram tomadas, então, amostras com **lag** 10. Observou-se que, apesar da maioria das amostras de óleo apresentarem um semivariograma indicando forte variabilidade espacial, a janela de amostragem ainda se mostrava muito grande para as feições de manchas da maioria das imagens utilizadas, sendo que o comportamento do semivariograma da amostragem de embarcação ainda indicava contaminação. Dessa forma, optou-se por testar o **lag** 5, com o intuito de evitar contaminação das amostras. Para o **lag** 5, a forma dos semivariogramas das amostras ainda indicava boa variabilidade espacial, sem o risco de contaminação das mesmas.

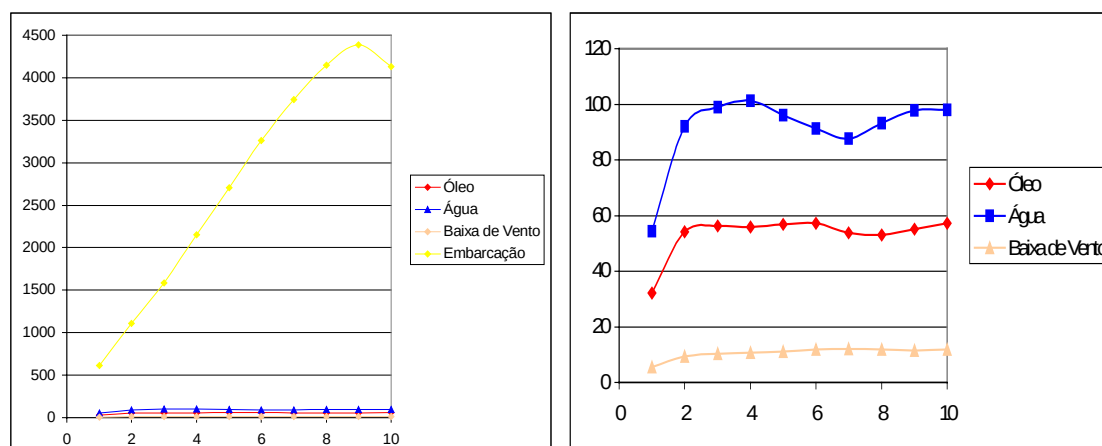


Fig. 5.23 – Semivariogramas das amostras de óleo, baixa de vento, água e embarcação tomadas na imagem *ScanSAR Wide* de 15/07/97 (superior), com **lag** 10. No semivariograma à direita, excluiu-se as amostras de embarcações para uma melhor visualização do semivariograma da demais classes.

Os semivariogramas da Fig. 5.24 apresentaram um comportamento muito semelhante ao de um semivariograma teórico. O efeito pepita associado ao *speckle*, embora presente, foi pouco pronunciado. A amostragem de baixa de vento apresentou um efeito pepita praticamente puro, o que pode ser atribuído à reflexão especular devido à ausência de ondas capilares. O semivariograma da amostragem da classe óleo apresentou-se com um alcance igual a 2, e, indicando alguma estrutura espacial entre os dados apesar da atenuação das ondas capilares pelo filme de óleo. A amostragem da água resultou num

semivariograma de alcance 3 e com patamar maior que o das classes óleo e baixa de vento, indicando a presença de um maior retroespalhamento para esta classe, provavelmente devido ao retroespalhamento de Bragg. O semivariograma da classe embarcação indicou a presença de contaminação para **lag** 5, por esta razão utilizou-se um **lag** 2 apenas para as amostras de embarcação nas imagens *ScanSAR Wide*.

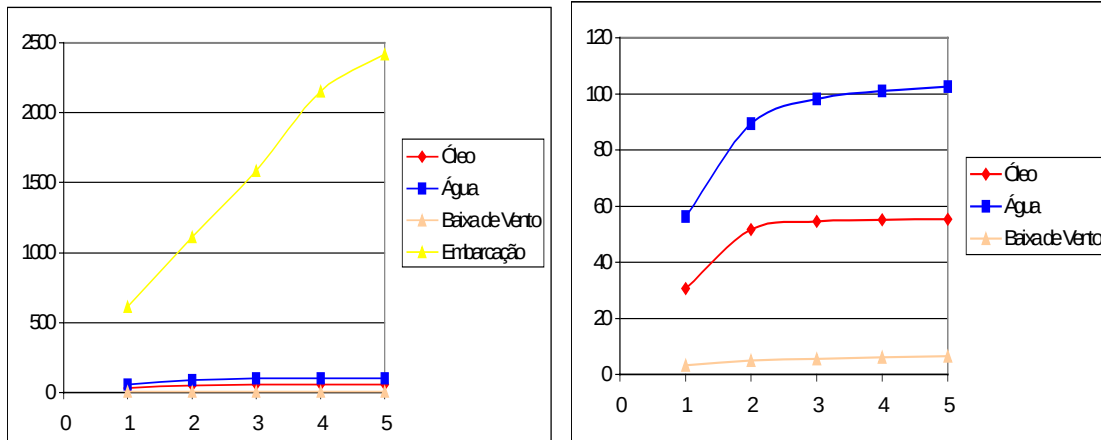


Fig. 5.24 – Semivariogramas das amostras de óleo, baixa de vento, água e embarcação tomadas na imagem *ScanSAR Wide* de 15/07/97 (superior), com **lag** 5. No semivariograma à direita, excluiu-se as amostras de embarcações para uma melhor visualização do semivariograma da demais classes.

Após a análise dos semivariogramas gerou-se o filtro de Mediana adaptativo, com valores dos parâmetros FMA_Raio 5 e nível de rejeição 2% (detalhes veja INPE, 1998). Estes parâmetros foram adotados como testes, uma vez que o sistema não fornece ferramentas para defini-los previamente. A imagem de teste foi então classificada para os quatro tipos de procedimento de cálculo: tradicional omnidirecional (TO), circular omnidirecional (CO), tradicional direcional (TD) e circular direcional (CD). Para o caso direcional, foram utilizados os valores 90° e 45° de direção e abertura, respectivamente. Além disso, foram utilizadas as mesmas amostras de treinamento para as 4 classificações.

A análise destas 4 classificações resultou na escolha do procedimento circular omnidirecional, como sendo o de melhor resultado. Esta escolha foi baseada nos valores dos coeficientes de concordância kappa (Tabela 5.1), na análise visual e na análise das matrizes de confusão (contidas no CD – Apêndice B).

TABELA 5.1 – COEFICIENTE KAPPA PARA AS CLASSIFICAÇÕES DA IMAGEM SCANSAR WIDE DE 15/07/97 PARA CADA TIPO DE CÁLCULO DO SEMIVARIOGRAMA

Classificação	Tradicional Omnidirecional	Circular Ominidirecional	Tradicional Direcional	Circular Direcional
Coeficiente kappa	0.637091	0.690701	0.637091	0.667071

Através da análise das matrizes de confusão de cada classificação, foi possível observar que as classificações TO e CO resultaram em melhores separações das classes óleo e água. A classificação CO apresentou, ainda, uma menor confusão entre as classes água e óleo. Visualmente, foi observado que todas as classificações apresentaram resultados bastante semelhantes para as classes óleo, água e embarcação. Entretanto, a classificação CO apresentou uma classificação mais eficaz para as áreas de baixa de vento. Para uma avaliação quantitativa, aplicou-se o teste de hipótese, o qual confirmou que o coeficiente de concordância kappa do procedimento CO foi estatisticamente superior aos demais. Assim, este procedimento foi adotado para a classificação das demais imagens.

Em todas as imagens, foram tomadas 4 amostras para cada classe na fase de amostragem para o cálculo das funções semivariograma. Foram definidas as classes, óleo, água, baixa de vento, embarcação/plataforma e célula de chuva, sendo que os semivariogramas para cada imagem com suas respectivas amostras estão ilustrados no Apêndice A. As amostras de treinamento foram tomadas a partir das imagens originais e, após a análise das amostras, aquelas que apresentavam uma maior confusão entre as classes, foram eliminadas. Os parâmetros utilizados na imagem teste para o filtro da Mediana adaptativo, foram adotados para as demais classificações. Para todas as

classificações foi selecionada como banda de informação radiométrica e textural a imagem original (ou sua respectiva filtrada) , além de todas as bandas variográficas e o filtro da Mediana. Para a classificação dos *pixels* ocasionalmente não classificados, apenas a imagem original não foi selecionada.

Dessa forma, foram classificadas as 12 imagens, sendo 6 originais e 6 filtradas, com os mesmos procedimentos e parâmetros. Os resultados das classificações estão dispostos na Tabela 5.2, através do coeficiente de concordância kappa, juntamente com o resultado do teste de hipótese que comparou as classificações realizadas na imagem original e sua respectiva filtrada.

TABELA 5.2 – RESULTADOS DOS COEFICIENTES DE CONCORDÂNCIA KAPPA DAS CLASSIFICAÇÕES NO CTS, E DO TESTE DE HIPÓTESE ENTRE AS CLASSIFICAÇÕES NAS IMAGENS ORIGINAIS E FILTRADAS

Imagem	Original - κ_1	Filtrada - κ_2	z	p
<i>Fine</i> 04/09/96	0.4960	0.8070	-57.1587	~ 0.0
<i>Fine</i> (superior) 06/09/96	0.3718	0.6539	-50.9300	~ 0.0
<i>Fine</i> (inferior) 06/09/96	0.6985	0.8688	-22.8312	~ 0.0
<i>ScanSAR Wide</i> (superior) 15/07/97	0.6907	0.7378	-3.2014	0.0007
<i>ScanSAR Wide</i> (inferior) 15/07/97	0.9831	0.9937	-15.2665	0.0001
<i>ScanSAR Wide</i> 05/07/98	0.9975	0.9970	1.3950	0.0823

Para as imagens no modo *Fine* o resultado de p-valor mostrou que as classificações das imagens filtradas foram superiores aos das classificações sobre as imagens originais, o que pode ser atribuído ao fato do número de *looks* destas imagens ser igual a 1, contendo, portanto, alto *speckle*.

Para as imagens *ScanSAR Wide*, esta mesma consideração pode ser feita, com exceção para a imagem de 05/07/98. O resultado de p-valor mostra que não houve diferença significativa entre as duas classificações, para o nível de significância considerado.

Portanto, as classificações desta imagem original e de sua filtrada foram consideradas semelhantes, ao nível de significância de 5%.

Em termos visuais, as classificações do modo *Fine* apresentaram desempenhos inferiores às do modo *ScanSAR Wide*, uma vez que os assemelhados foram melhor separados na classificações deste modo. Em geral, as classificações a partir das imagens filtradas apresentaram melhores resultados visuais, em relação às originais. Apesar do p-valor não indicar diferença significativa nas classificações da imagem *ScanSAR Wide* original e filtrada de 05/07/98, observou-se que visualmente a classificação sobre a original apresentou melhor eficácia na separação da classe óleo. A classificação sobre a filtrada, por sua vez, apresentou uma maior eficácia na separação da classe baixa de vento (todas as imagens classificadas se encontram no CD – Apêndice B).

5.4 Resultados do Classificador *Texture*

O primeiro passo para a classificação no *Texture* foi a tomada das amostras de treinamento. Este procedimento foi realizado após a segmentação das imagens, pois, para um bom desempenho do classificador, é de suma importância que as amostras sejam tomadas dentro dos limites dos segmentos. Isto se deve ao fato do classificador considerar um segmento por vez, e classificá-lo conforme as medidas selecionadas. Assim, se as amostras ultrapassarem os limites determinados pela imagem segmentada, a variância da amostragem pode ser alta, conforme a variação da média dos níveis de segmentos vizinhos.

Após a fase de amostragem, foi feito o cálculo das medidas de textura e deu-se início à fase de análise de medidas. Os métodos de análise gráfica visual e de separação entre e intra classes duas a duas, descritos no Capítulo 4, foram utilizados de modo complementar.

Foi observado que as melhores medidas para separação das classes nas imagens *ScanSAR Wide* foram as distribucionais e as de Haralick, sendo que as medidas eficazes para as imagens deste modo foram: média, média da distribuição log-normal, desvio padrão, média do vetor soma, contraste do vetor diferença e variância do vetor diferença. Dentre estas medidas, as que melhor separaram o óleo das regiões de baixa de vento foram: desvio padrão, variância do vetor diferença e contraste do vetor diferença.

Para as imagens *Fine*, as medidas mais eficazes foram: mediana, média, variância, média da distribuição log-normal, homogeneidade, média do vetor soma e *cluster shade*. Dentre estas medidas as que melhor separaram a classe óleo das feições de célula de chuva foram: média, variância e homogeneidade. A seguir, são descritos os resultados específicos para o classificador padrão e o por árvore.

5.4.1 O Classificador Padrão

No classificador padrão, uma medida escolhida é utilizada na separação de todas as classes, e não somente daquelas para as quais esta medida possui um melhor desempenho. Dessa forma, foram testadas várias combinações de medidas, e observou-se que, para as imagens *ScanSAR Wide*, as melhores combinações constituíram-se de uma medida distribucional associada a uma medida de Haralick. Entretanto, no caso da imagem de 15/07/97 superior, apenas uma medida distribucional (média para a original e média da distribuição log-normal para a filtrada) foi suficiente para um resultado satisfatório.

As medidas de primeira ordem testadas (mediana, curtose e assimetria), em geral, não apresentaram uma boa eficácia na separação da maioria das classes delimitadas. Para a imagem *ScanSAR Wide* de 15/07/97 superior, o método de separação entre e intra classes indicou as medidas de curtose e assimetria como as mais eficazes na separação de água e embarcação. Entretanto, o resultado visual não foi satisfatório e, além disso, estas medidas causaram uma forte confusão entre as classes óleo e baixa de vento.

Para as classificações das imagens *Fine*, a combinação de medidas variou de imagem para imagem. Por exemplo, para a imagem de 04/09/96 original, a melhor combinação foi a média e a homogeneidade, enquanto que, para sua respectiva filtrada, apenas a medida média da distribuição log-normal foi suficiente para um resultado satisfatório. Em contrapartida, para a imagem de 06/09/96 (ambos os recortes), a melhor combinação de medidas foi a mediana e a média da distribuição log-normal. Para todas as imagens *Fine*, a medida de homogeneidade apresentou-se bastante destacada, apesar de não ser considerada a melhor para algumas classificações.

TABELA 5.3 – MEDIDAS DE TEXTURA UTILIZADAS E RESULTADOS DOS COEFICIENTES DE CONCORDÂNCIA KAPPA DAS CLASSIFICAÇÕES NO *TEXTURE* - PADRÃO, E DO TESTE DE HIPÓTESE ENTRE AS CLASSIFICAÇÕES NAS IMAGENS ORIGINAIS E FILTRADAS

Imagem	Medidas de textura utilizadas	Original κ_1	Filtrada κ_2	z	p
<i>Fine</i> 04/09/96	média, homogeneidade e média da dist. log-normal	0.9869	0.4373	127.7665	~0.0
<i>Fine</i> (superior) 06/09/96	mediana e média da dist. Log-normal	0.9783	0.7496	34.9973	~0.0
<i>Fine</i> (inferior) 06/09/96	média e homogeneidade	0.9365	0.6737	32.7242	~0.0
<i>ScanSAR</i> Wide(superior) 15/07/97	média e média da dist. Log-normal	0.6985	0.8641	-18.8204	~0.0
<i>ScanSAR</i> Wide(inferior) 15/07/97	média e variância do vetor diferença	0.6875	0.6739	1.4731	0.0708
<i>ScanSAR</i> Wide 05/07/98	média e variância do vetor diferença	0.6981	0.6932	0.8231	0.2061

Após a realização de todas as classificações no modo padrão, foi feita a comparação das classificações sobre as imagens originais e filtradas, através do teste de hipótese. A Tabela 5.3 mostra os resultados dos testes, representados pelo p-valor em cada comparação.

Pode-se observar que, na comparação das imagens *Fine*, o p-valor indicou que as classificações sobre as originais apresentaram uma margem de acerto, significativamente maior em relação às classificações sobre as imagens filtradas. Este resultado pode ser explicado pela perda de parte da informação textural das imagens após a filtragem das mesmas, observando que medidas texturais que consideram a distribuição espacial dos *pixels* vizinhos, como as medidas de Haralick, são mais prejudicadas com a filtragem da imagem em relação a outros tipos de medida.

Para as imagens *ScanSAR Wide*, apenas a classificação sobre imagem de 15/07/97 superior filtrada mostrou-se melhor em relação à original. Nas demais imagens *ScanSAR*, o p-valor não indicou diferença significativa entre as duas classificações, ao nível de significância de 5%. Portanto, segundo o teste realizado, as classificações sobre as imagens *ScanSAR Wide* de 15/07/97 inferior e de 05/07/98 não apresentaram diferenças entre as originais e as suas respectivas filtradas.

Os resultados estatísticos da aplicação do classificador *Texture* padrão apresentaram-se em comum acordo com a análise visual, conforme pode ser verificado pelas imagens classificadas contidas no CD (Apêndice B). A única exceção deve ser feita às classificações sobre a imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98, onde a classificação sobre a imagem original apresentou melhores resultados visuais, uma vez que nesta houve uma pequena superestimação na classe embarcação, enquanto que na filtrada esta superestimação foi expressivamente mais alta.

5.4.2 O Classificador por Árvore

Todas as classificações no modo árvore foram feitas após a classificação no modo padrão. Isto foi feito para avaliar a eficiência do método de separação entre e intra classes. Assim, para as melhores medidas indicadas neste método, foram escolhidas aquelas que melhor separavam as classes onde a confusão era maior, segundo o método de análise visual. Por exemplo, quando o método de separação de classes indicava a

medida A como a melhor para separar óleo e vento, no classificador árvore foi criado um subgrupo com estas classes e a medida A selecionada para separá-las. Para a separação das demais classes, água e embarcação, selecionou-se também a melhor medida indicada pelo método de separação de classes.

Este procedimento, em geral, obteve êxito para a maioria das classificações. Entretanto, em alguns casos, tornou-se necessária a escolha das segundas ou até terceiras melhores, pois tanto visualmente como estatisticamente as classificações não foram satisfatórias. Isto pode ser explicado pelo fato de se escolher medidas com alto grau de variância entre si (Rennó, 2000).

Para as imagens *ScanSAR Wide*, o subgrupo com maior confusão e as respectivas medidas que melhor o separaram foram: óleo e baixa de vento – variância do vetor diferença, contraste do vetor diferença e desvio padrão. Para a separação das classes água e embarcação as melhores medidas foram: média e soma da média do vetor soma.

Para as imagens *Fine*, os subgrupos com maior confusão e as respectivas medidas que melhor os separaram foram: óleo e célula de chuva – média e variância, óleo e água – homogeneidade e média do vetor soma.

Após a realização de todas as classificações no modo árvore, foi feita uma comparação entre as classificações sobre as imagens originais e suas respectivas filtradas, através do teste de hipótese. Os resultados estão esquematizados na Tabela 5.4.

Pela análise da Tabela 5.4, é possível observar que, na comparação das imagens *Fine*, o p-valor indicou que as classificações sobre as originais apresentaram uma margem de acerto significativamente maior em relação às classificações sobre as imagens filtradas. Resultado semelhante ao demonstrado na Tabela 5.3, sendo este atribuído à perda de parte das informações texturais após a filtragem da imagem.

TABELA 5.4 – MEDIDAS DE TEXTURA UTILIZADAS E RESULTADOS DOS COEFICIENTES DE CONCORDÂNCIA KAPPA DAS CLASSIFICAÇÕES NO TEXTURE – ÁRVORE, E DO TESTE DE HIPÓTESE ENTRE AS CLASSIFICAÇÕES NAS IMAGENS ORIGINAIS E FILTRADAS

Imagem	Medidas de textura utilizadas	Original κ_1	Filtrada κ_2	z	p
<i>Fine</i> 04/09/96	variância, <i>cluster shade</i> , média do log-normal	0.7240	0.4375	27.2969	~0.0
<i>Fine</i> (superior) 06/09/96	Média, homogeneidade, média do vetor soma e média da dist. log-normal	0.8472	0.5723	30.2290	~0.0
<i>Fine</i> (inferior) 06/09/96	Média, homogeneidade, média do vetor soma	0.9361	0.6713	32.8680	~0.0
<i>ScanSAR Wide</i> (superior) 15/07/97	média, desvio padrão e contraste do vetor diferença	0.7142	0.7866	-8.2830	~0.0
<i>ScanSAR Wide</i> (inferior) 15/07/97	média, contraste do vetor diferença e desvio padrão	0.7287	0.7458	2.0204	0.0217
<i>ScanSAR Wide</i> 05/07/98	média, soma do vetor média, contraste do vetor diferença e variância do vetor diferença	0.7341	0.7745	7.1357	~0.0

Para as imagens *ScanSAR Wide*, este resultado foi inverso, sendo que o p-valor indicou uma diferença significativa indicando que as classificações sobre as filtradas foram melhores considerando $\alpha = 5\%$.

Visualmente, os resultados acima descritos são confirmados. A classificação das imagens *Fine* originais se mostrou melhor em relação às filtradas, também visualmente. A classificação sobre a imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98 filtrada, apesar de uma superestimação da classe embarcação, se mostrou mais eficaz na separação das classes óleo, água e vento em relação à original, conforme pode ser verificado pelas classificações disponíveis no CD (Apêndice B).

5.4.3 Comparação entre os Resultados do Classificador *Texture*

Com o término das classificações no *Texture*, deu-se início à etapa de comparação entre os resultados do classificador padrão e do classificador por árvore. Para se realizar esta comparação, foram tomados os coeficientes de concordância kappa das classificações consideradas superiores pelos testes de hipótese feitos anteriormente. Nos casos em que o p-valor não indicou uma diferença significativa entre as classificações comparadas, escolheu-se uma das classificações. Esta escolha foi feita da seguinte forma: considerou-se a classificação(1) com a qual iria se comparar uma das duas a escolher, e, se caso a (1) fosse referente à imagem filtrada, então a classificação escolhida também seria filtrada; de forma análoga no caso de (1) ser original. Este procedimento foi adotado com o intuito de minimizar o número de variáveis envolvidas na comparação. Os resultados das comparações estão dispostos na Tabela 5.5.

Os resultados encontrados até aqui, indicam que o classificador *Texture* possui um melhor desempenho com as imagens *Fine* originais ao invés das filtradas pelo filtro da Mediana 7x7. E, ainda, este classificador possui um melhor desempenho com as imagens *ScanSAR Wide* filtradas pelo Gama 7x7.

TABELA 5.5 – RESULTADOS DOS COEFICIENTES DE CONCORDÂNCIA KAPPA E DO TESTE DE HIPÓTESE ENTRE AS MELHORES CLASSIFICAÇÕES NO *TEXTURE*, PELOS MÉTODOS PADRÃO E ÁRVORE

Imagem	Padrão - κ_1	Árvore - κ_2	z	p
<i>Fine</i> 04/09/96	0.9869 (Orig)	0.7240 (Orig)	27.2475	~0.0
<i>Fine</i> (superior) 06/09/96	0.9783 (Orig)	0.8472 (Orig)	16.3883	~0.0
<i>Fine</i> (inferior) 06/09/96	0.9365 (Orig)	0.9361 (Orig)	0.0715	0.4721
<i>ScanSAR Wide</i> (superior) 15/07/97	0.8641 (Filt)	0.7866 (Filt)	10.4907	~0.0
<i>ScanSAR Wide</i> (inferior) 15/07/97	0.6739 (Filt)	0.7458 (Filt)	-9.8960	~0.0
<i>ScanSAR Wide</i> 05/07/98	0.6932 (Filt)	0.7745 (Filt)	-14.1285	~0.0

Onde (Orig) e (Filt) indicam se a imagem escolhida corresponde à classificação sobre a original ou sobre a filtrada, respectivamente.

Os resultados de p-valor da Tabela 5.5 mostram uma distribuição relativamente equilibrada dos resultados conforme os dois tipos de classificadores comparados. Enquanto duas classificações sobre as imagens *Fine* se mostraram melhores com uso do classificador padrão, da mesma forma, duas classificações sobre as imagens *ScanSAR Wide* se mostraram melhores com o uso do classificador por árvore. Se somada aos resultados, a indicação de p-valor de que a classificação sobre a imagem *ScanSAR Wide* de 15/07/97 filtrada foi superior pelo método padrão, então este classificador pode ser considerado de melhor desempenho em relação ao por árvore.

5.5 Comparação entre os Resultados dos Classificadores CTS e *Texture*

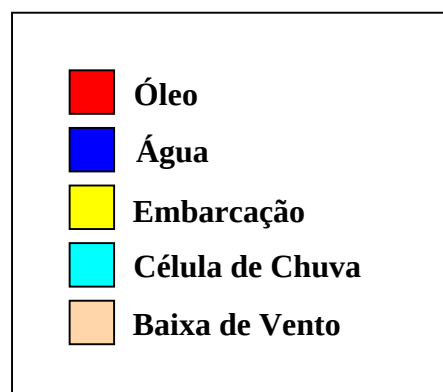
O último passo para a comparação entre as classificações realizadas foi o teste de hipótese entre as classificações consideradas melhores no CTS e no *Texture*. Para se realizar esta comparação, foram tomados os coeficientes de concordância kappa das classificações consideradas superiores pelos testes de hipótese feitos anteriormente para cada classificador. Nos casos em que o p-valor não indicou uma diferença significativa, foi adotado o mesmo procedimento da Seção 5.4.3. Entretanto, uma nova consideração foi feita para a imagem *Fine* (inferior) de 06/09/96, pois, na Tabela 5.5, o p-valor além de não indicar diferenças entre as classificações, ambas foram resultadas da imagem original. Dessa forma, escolheu-se a classificação de maior coeficiente kappa. Os resultados desta comparação estão dispostos na Tabela 5.6

TABELA 5.6 – RESULTADOS DOS COEFICIENTES DE CONCORDÂNCIA KAPPA E DO TESTE DE HIPÓTESE ENTRE AS MELHORES CLASSIFICAÇÕES NO CTS E NO *TEXTURE*

Imagem	CTS - κ_1	<i>Texture</i> - κ_2	z	p
<i>Fine</i> 04/09/96	0.8070 (Filt)	0.9869 (Orig-P)	-58.9827	~0.0
<i>Fine</i> (superior) 06/09/96	0.6539 (Filt)	0.9783 (Orig-P)	-51.7434	~0.0
<i>Fine</i> (inferior) 06/09/96	0.8688 (Filt)	0.9365 (Orig-P)	-12.0044	~0.0
<i>ScanSAR</i> Wide(superior) 15/07/97	0.7378 (Filt)	0.8641 (Filt-P)	-10.8017	~0.0
<i>ScanSAR</i> Wide(inferior) 15/07/97	0.9937 (Filt)	0.7458 (Filt-Ar)	48.8598	~0.0
<i>ScanSAR</i> Wide 05/07/98	0.9970 (Filt)	0.7745 (Filt-Ar)	55.6942	~0.0

Onde (Orig-P) = original classificada pelo método padrão, (Filt-P) = filtrada classificada pelo método padrão e (Filt-Ar) = filtrada classificada pelo método por árvore.

Os resultados de p-valor indicam que as classificações realizadas sobre as imagens *Fine* com o uso classificador *Texture* foram superiores em relação às classificações pelo CTS. Além disso, o teste indicou que a maioria das imagens *ScanSAR Wide* foram melhor classificadas pelo CTS. As imagens classificadas consideradas as melhores em relação a todo o conjunto estão ilustradas nas Figuras 5.25 a 5.30. A seguir, tem-se a legenda para as classificações apresentadas:



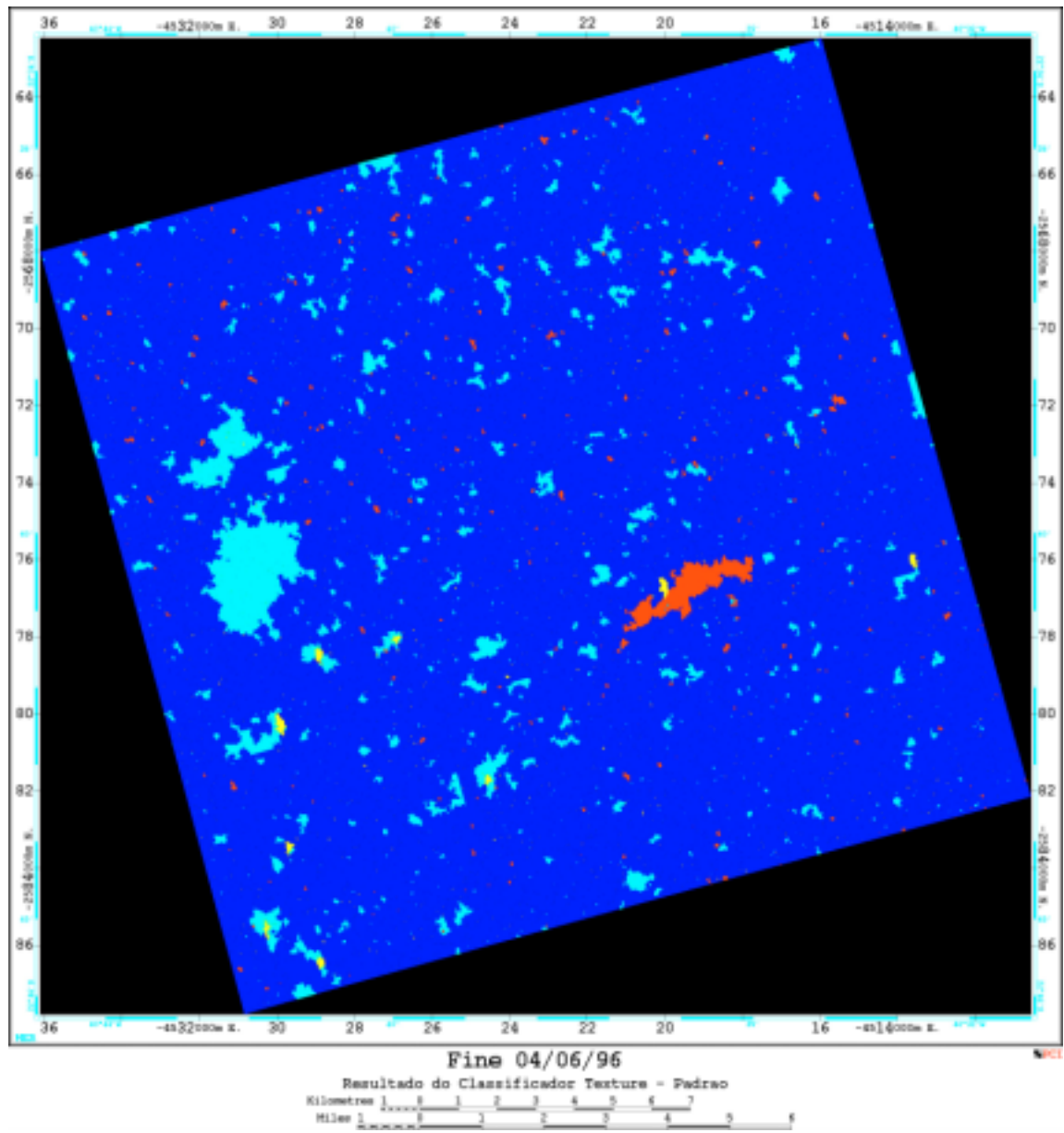


Fig. 5.25 – Classificação pelo *Texture*- padrão da imagem *Fine* de 04/09/96 original.

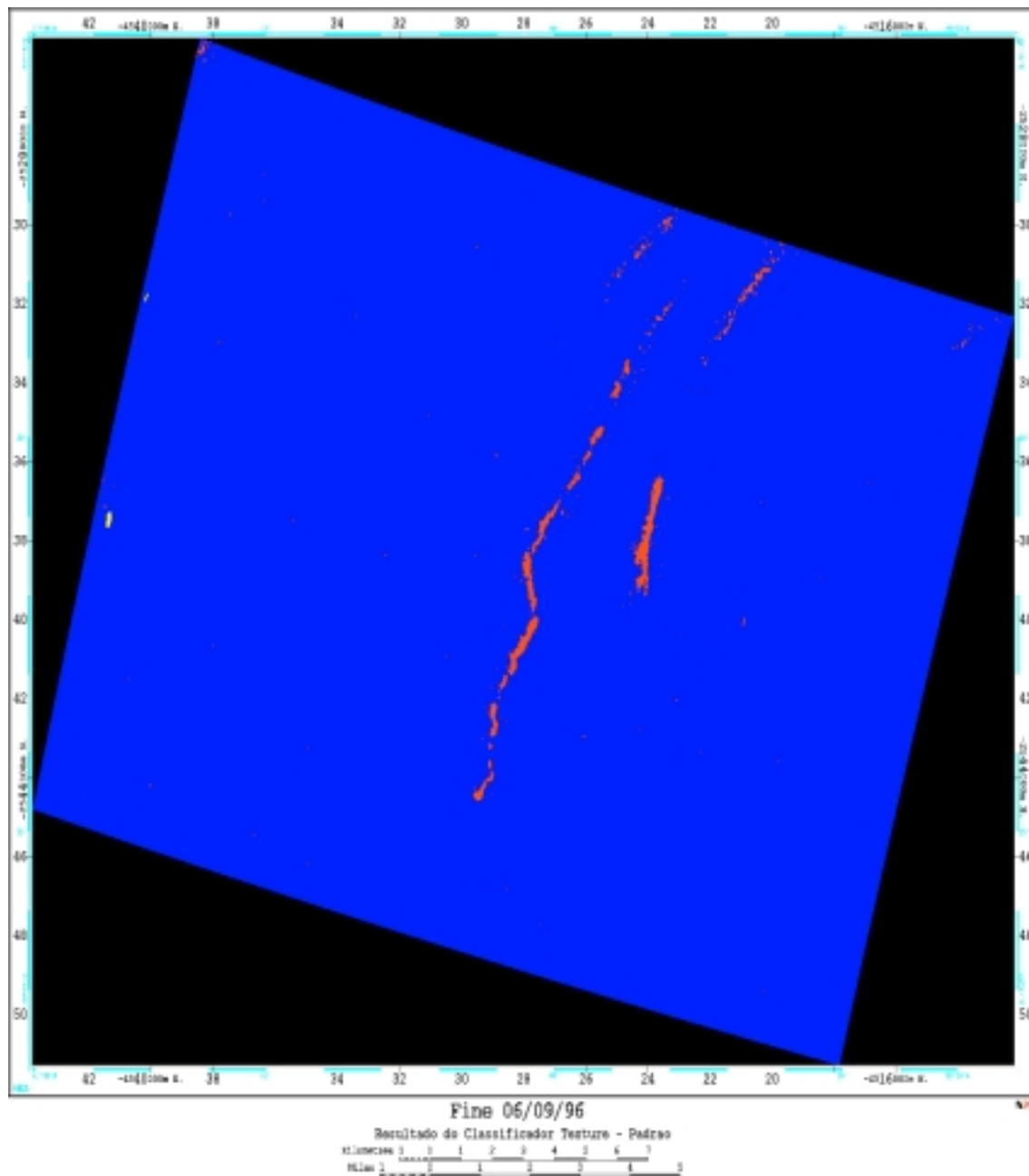


Fig. 5.26 – Classificação pelo *Texture*- padrão da imagem *Fine*, recorte superior, de 06/09/96 original.

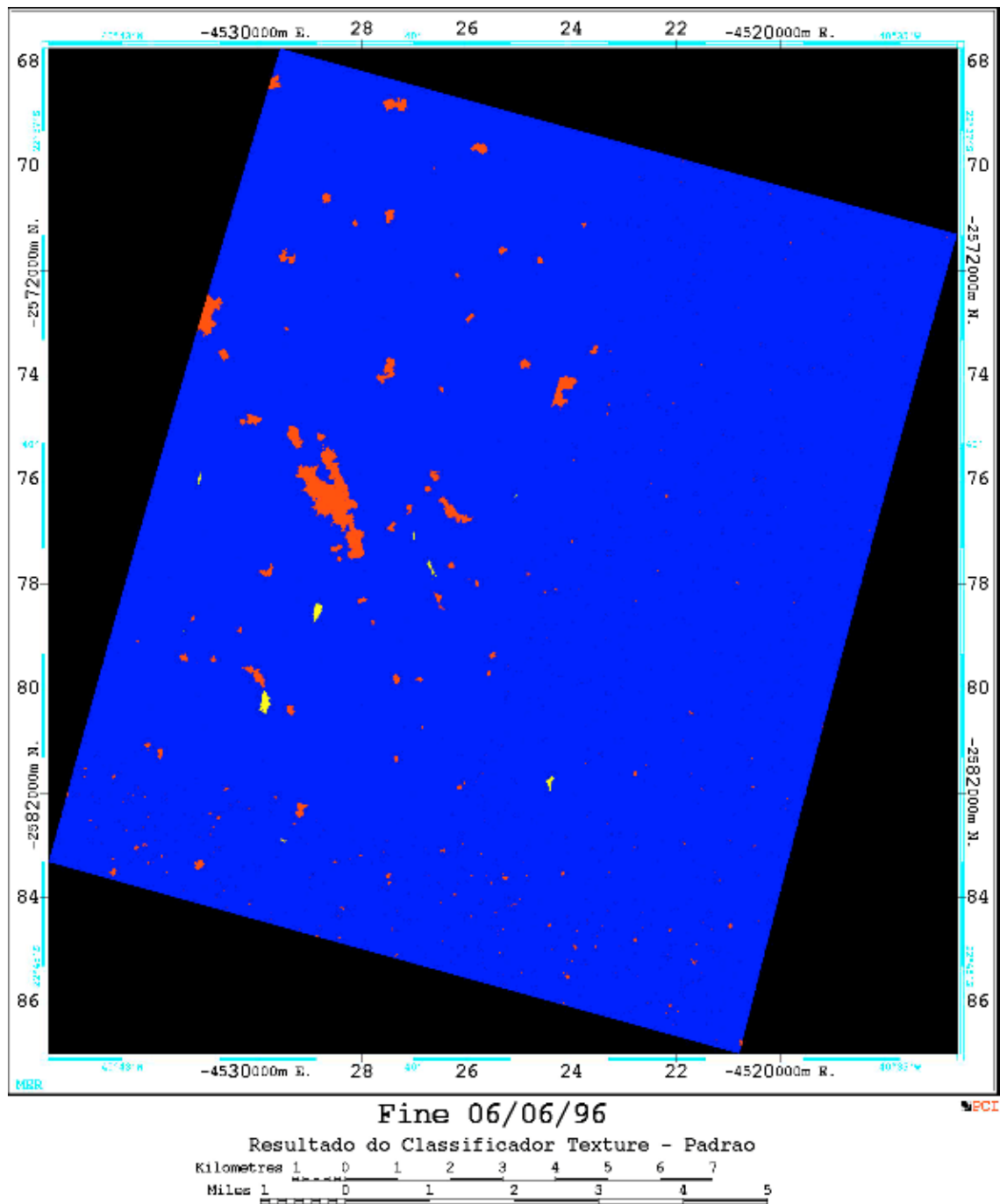


Fig. 5.27 – Classificação pelo *Texture*- padrão da imagem *Fine*, recorte inferior, de 06/09/96 original.

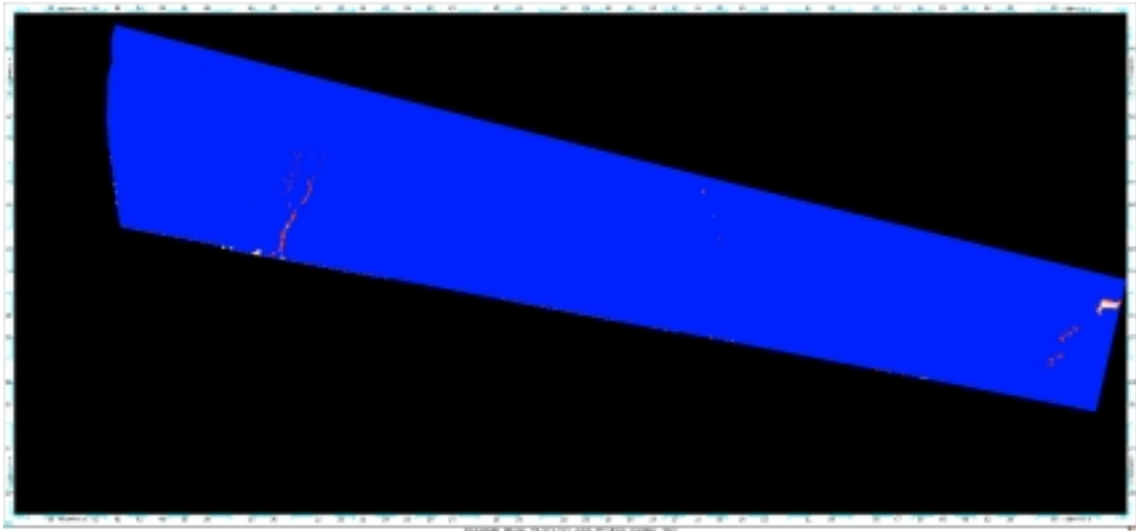


Fig. 5.28 – Classificação pelo *Texture*- padrão da imagem *ScanSAR Wide* superior de 15/07/97 filtrada.

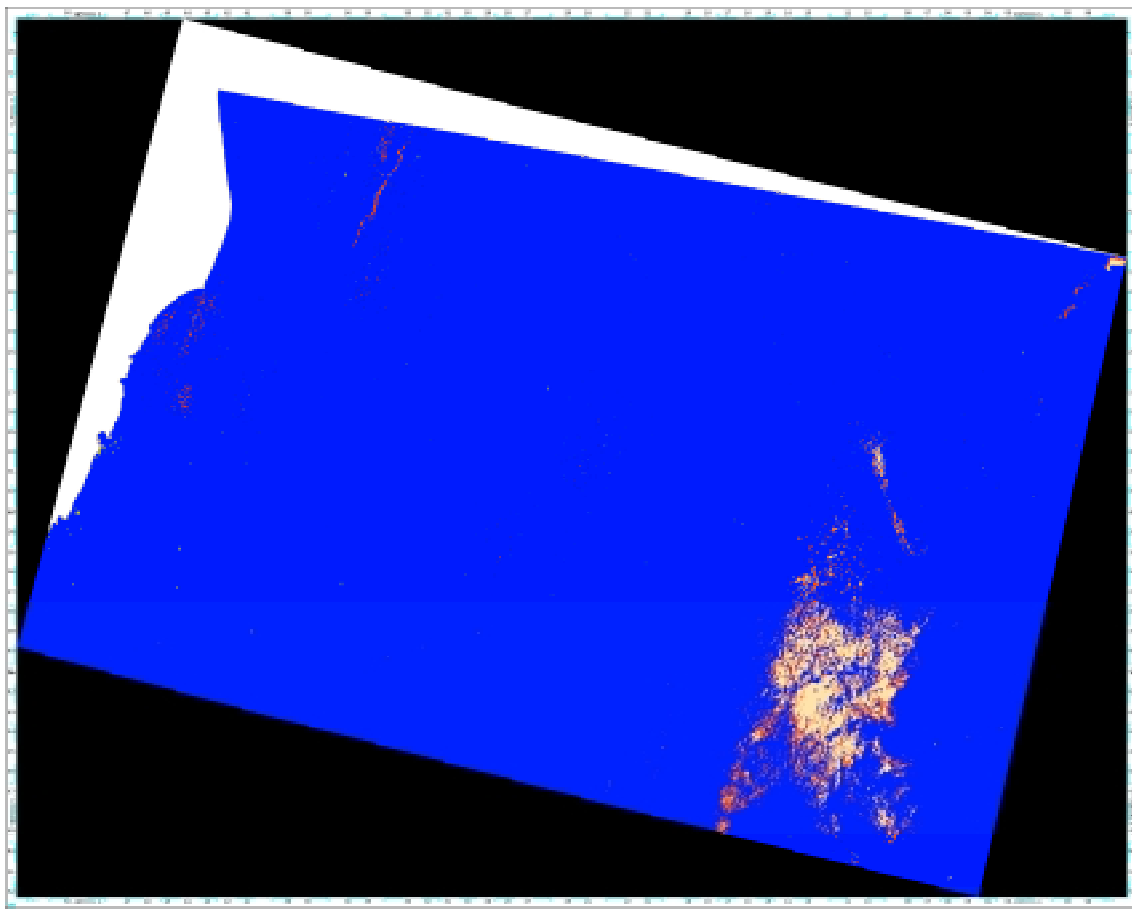


Fig. 5.29 – Classificação pelo CTS da imagem *ScanSAR Wide* inferior de 15/07/97 filtrada.

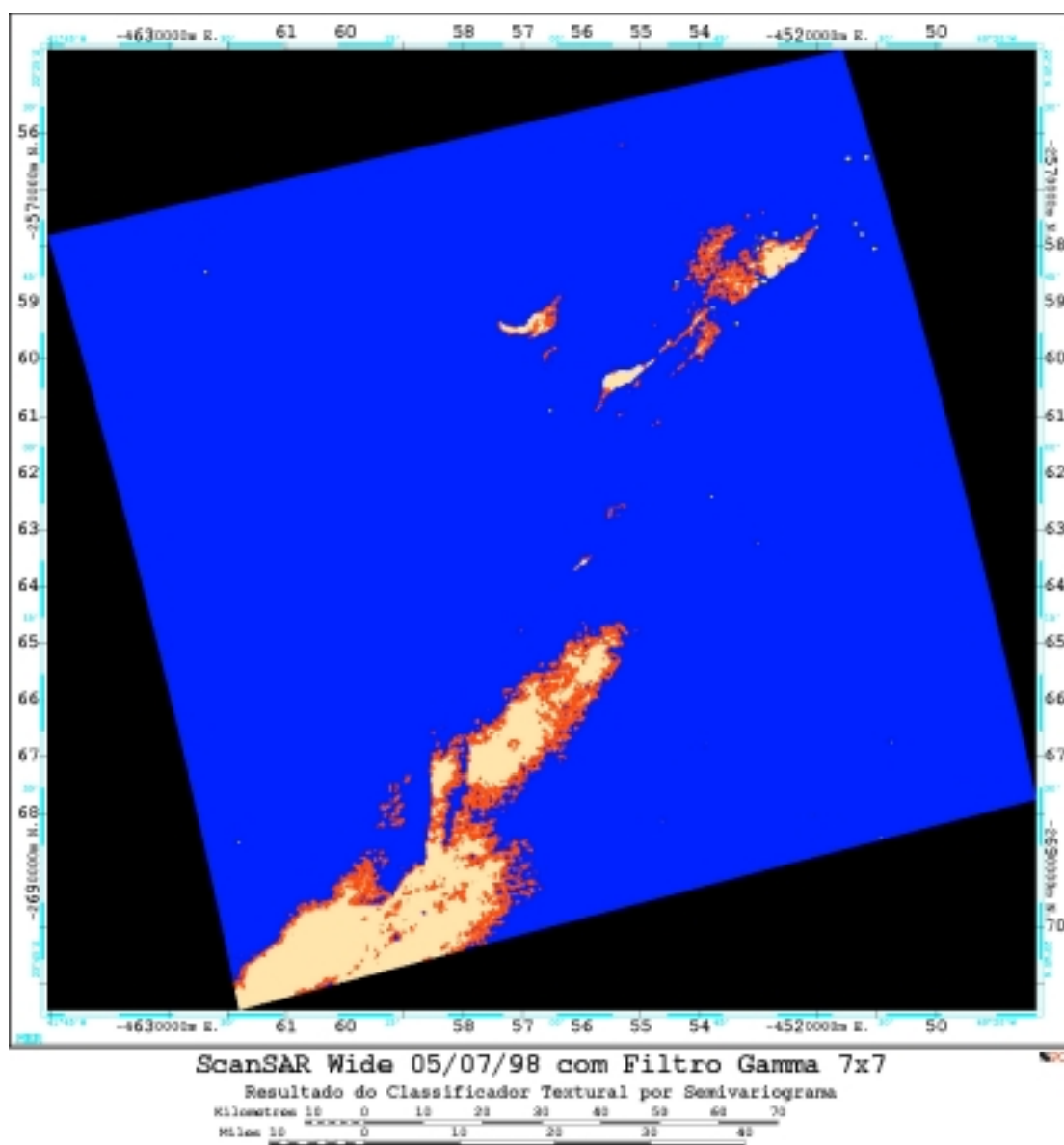


Fig. 5.30 – Classificação pelo CTS da imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98 filtrada.

Visualmente, é possível observar que as classificações, consideradas as melhores, sobre as imagens *Fine* apresentaram bons resultados na separabilidade do óleo das demais classes. A classificação da imagem de 06/09/96, recorte superior (Fig. 5.26), apresentou resultado ótimo na separação das três classes consideradas. A classificação da imagem de 06/09/96, recorte inferior (Fig. 5.27), apresentou uma ligeira confusão entre as classes óleo e água, e embarcação e água, como pode ser verificado comparando as Figs. 5.11 e 5.27.

Nas classificações, consideradas as melhores, sobre as imagens *ScanSAR Wide*, a classe baixa de vento apresentou boa separabilidade das demais. Entretanto, na imagem de 05/07/98, a classe óleo foi bastante confundida com a classe baixa de vento, como pode ser verificado pela comparação entre as Figs. 5.14 e 5.30.

5.6 Análises Complementares

Utilizando dados em termos de σ^0 , Espedal (1998a) avaliou a separabilidade de óleo e filmes naturais e concluiu que, em muitos casos, existe uma grande dificuldade de distinção destas feições pelo valor médio de retroespalhamento (uma vez os filmes naturais causam um amortecimento diferente nas ondas capilares em relação às manchas de óleo). Avaliando diagramas de dispersão dos valores de curtose e assimetria para separação de manchas de óleo e filmes naturais, observou-se que o valor da moda (o valor que ocorre mais frequentemente em uma amostra) seria uma medida mais adequada para separação de óleo e filmes naturais, nestes casos. Isto porque os valores de óleo apresentavam mais valores positivos de curtose e assimetria em relação aos filmes.

Baseando-se nesta análise, foram feitos diagramas de dispersão de curtose e assimetria para o óleo e seus assemelhados em algumas das imagens utilizadas (Figuras 5.31, 5.32 e 5.33).

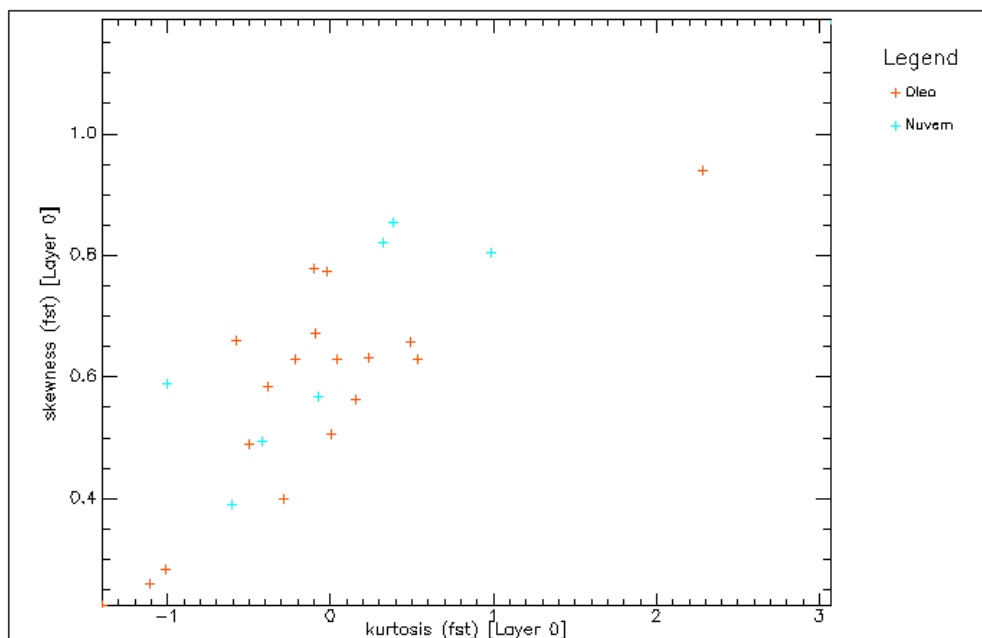


Fig. 5.31 – Gráfico de dispersão das medidas de curtose e assimetria para as amostras de óleo e célula de chuva da imagem *Fine* de 04/09/96.

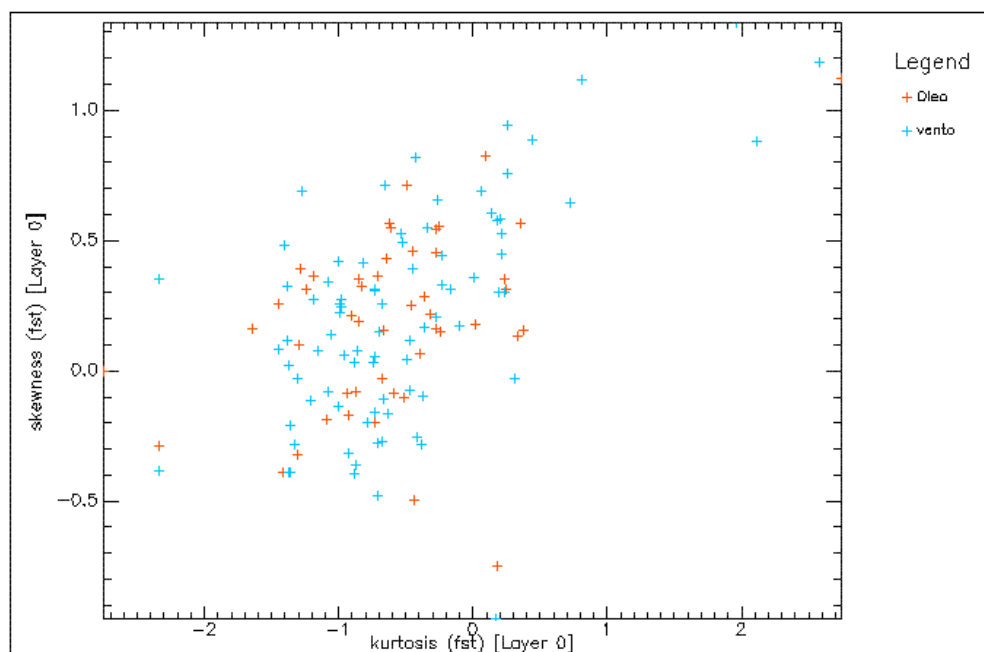


Fig. 5.32 – Gráfico de dispersão das medidas de curtose e assimetria para as amostras de óleo e baixa de vento da imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98.

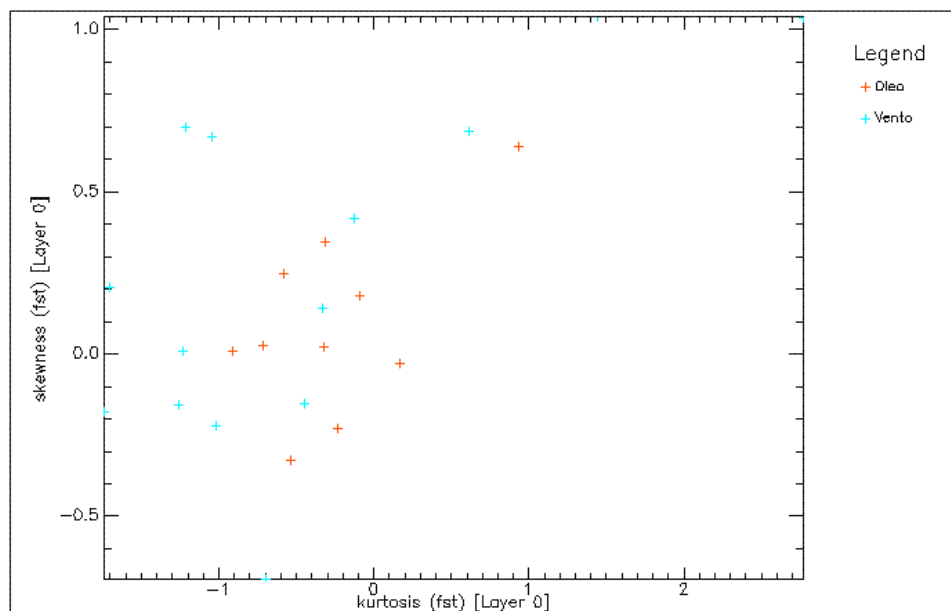


Fig. 5.33 – Gráfico de dispersão das medidas de curtose e assimetria para as amostras de óleo e baixa de vento da imagem *ScanSAR Wide* de 15/07/97.

Como pode ser observado, as medidas de textura de curtose e assimetria para as amostras das três imagens avaliadas não são adequadas à separabilidade aparentemente. Entretanto, é importante salientar que os dados aqui utilizados se encontram em termos de níveis de cinza, não representando diretamente o retroespalhamento do radar. Portanto, apesar dos gráficos acima não indicarem uma tendência das variáveis serem correlacionadas, devem ser testados em termos de σ^0 , para uma averiguação mais precisa.

Da mesma forma como se comparou diagramas de dispersão entre curtose e assimetria, foram também avaliados diagramas de dispersão entre área e complexidade, uma vez que estas medidas são usadas por alguns sistemas de detecção de manchas já existentes (Solberg e Solberg, 1996; Solberg e Volden, 1997). As Figuras 5.34 e 5.35 mostram os diagramas de dispersão de área e complexidade para as imagens *ScanSAR Wide* de 15/07/97 (inferior) e 05/07/98, as quais apresentavam grandes regiões de baixa de vento e algumas manchas.

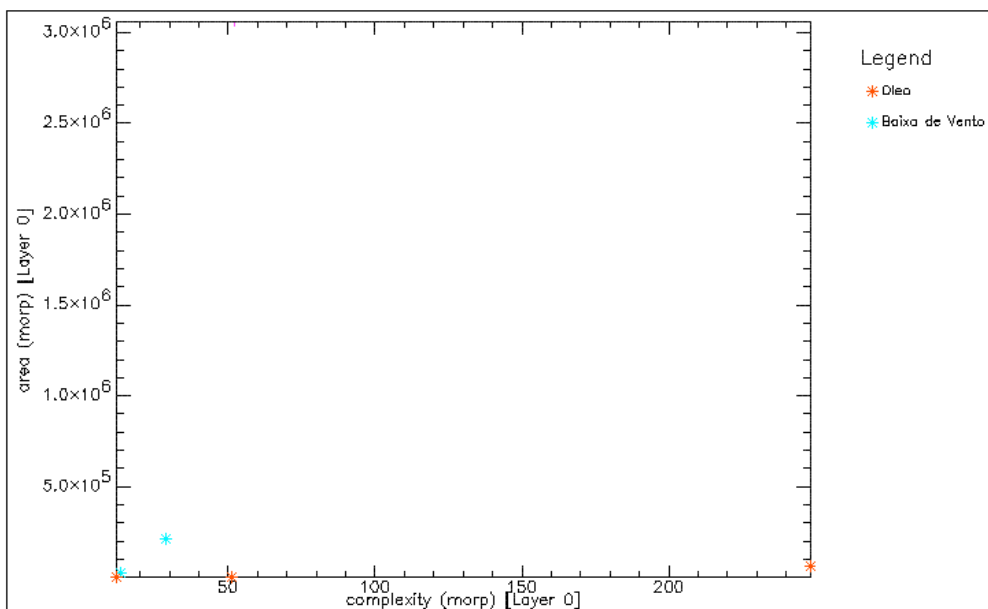


Fig. 5.34 – Gráfico de dispersão das medidas de área e complexidade para amostras de óleo e baixa de vento da imagem *ScanSAR Wide* de 15/07/97.

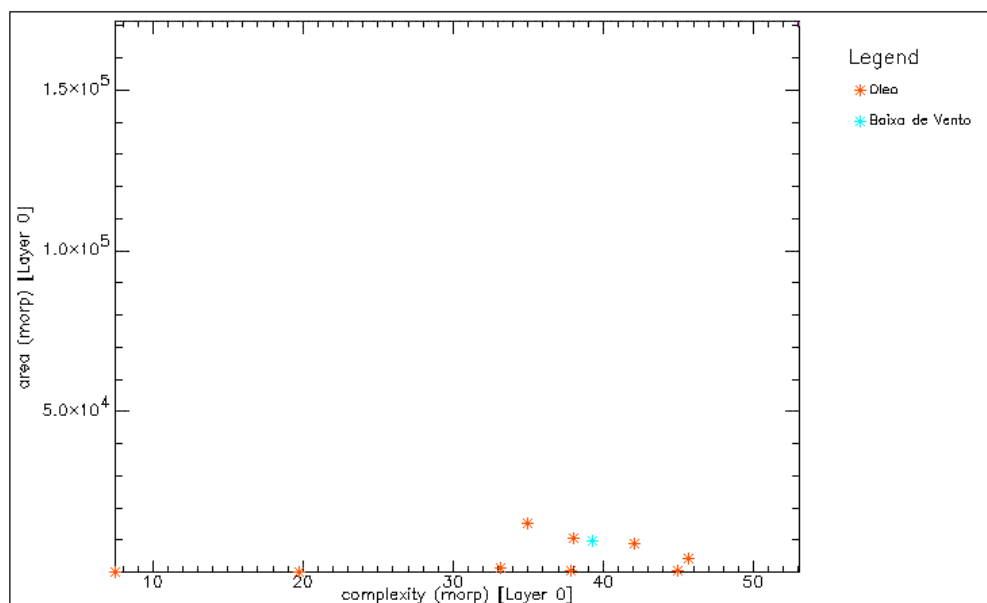


Fig. 5.35 – Gráfico de dispersão das medidas de área e complexidade para amostras de óleo e baixa de vento da imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98.

Para a construção destes gráficos, foram tomadas amostras cobrindo toda a área das manchas e das baixas de vento, daí a razão para o pequeno número de amostras. Apesar

do gráfico 5.35 não indicar uma separabilidade das classes, no gráfico 5.34 é possível perceber que a medida de área praticamente não varia para as manchas de óleo, enquanto a classe de baixa de vento apresenta um pequeno aumento entre uma amostra e outra. É evidente que cada caso deve ser considerado como singular, uma vez que os assemelhados podem abranger tanto grandes como pequenas áreas, e serem, algumas vezes, muito parecidos com feições de óleo em termos de sua morfologia. Deve-se, portanto avaliar um número maior de amostras para uma melhor visualização do comportamento do gráfico de dispersão.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As conclusões iniciais estão centradas nos resultados dos filtros utilizados. Assim, concluiu-se que, para o conjunto de imagens utilizado, o filtro Gama apresentou melhores resultados para as imagens *ScanSAR Wide*, preservando melhor as bordas e destacando melhor as feições de embarcações e plataformas. Da mesma forma, o filtro da Mediana apresentou melhores resultados para as imagens *Fine*, uma vez que promoveu uma melhor preservação da textura em relação aos demais filtros testados.

Os dados de vento e onda contribuíram em grande parte para a delimitação das classes de baixa de vento e óleo. Confirmou-se neste trabalho o intervalo de 3 a 10 m/s descrito pela literatura (Lichtenegger, 1994; Espedal, 1998a), onde é possível a detecção de óleo na superfície do mar.

Ainda em relação aos dados auxiliares, concluiu-se que os dados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) contribuíram em grande parte na determinação da classe óleo, e na verificação de áreas com ocorrência de ressurgência, evitando assim classificações errôneas de filmes naturais como sendo óleo. Entretanto, para a identificação de células de chuva torna-se necessária a utilização de dados de sensores no infravermelho (AVHRR, GOES, etc.) em horários de passagem muito próximos aos de aquisição das imagens SAR.

Para a utilização de dados SeaWiFs no cruzamento de dados, é necessária a utilização de um nível de processamento com resolução mais fina. Isto porque as feições escuras se apresentaram comparáveis às dimensões do *pixel* da imagem para o caso estudo (imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98).

Pôde-se concluir que, em geral, as classificações pelo Classificador Textural por Semivariograma (CTS) sobre as imagens filtradas apresentaram melhores resultados em relação às originais. Além disso, em termos visuais, as classificações no CTS sobre as imagens do modo *ScanSAR Wide* se mostraram superiores em relação às classificações sobre as do modo *Fine*, quanto à separação de óleo e seus assemelhados. Isto provavelmente se deve a uma melhor adequação do processo de amostragem do CTS, se adaptando melhor à variações de grande escala, como são as feições nas imagens *ScanSAR*, ou ainda devido ao baixo *speckle* presente nestas imagens.

Quanto às classificações no *Texture*, os métodos árvore e padrão apresentaram resultados bastante semelhantes entre si. Para os dois tipos de métodos, as classificações das imagens *Fine* originais apresentaram-se superiores em relação às respectivas filtradas. Isto pode ser explicado pelo fato das imagens *Fine* conterem expressivo ruído *speckle*, pois são de 1 *look*. Assim, com a aplicação de filtros para redução deste ruído, ocorre também uma perda das informações texturais. Concluiu-se não haver diferença significativa entre o desempenho dos dois métodos.

As imagens *Fine* com feixe F4 apresentaram bons resultados na detecção de óleo, apesar deste feixe não ser considerado pela indústria petrolífera o mais adequado para tal fim.

Na comparação entre o CTS e o *Texture*, concluiu-se que são algoritmos que podem ser utilizados de modo complementar, dado o conjunto de imagens utilizado. Isto porque o CTS mostrou melhores resultados nas classificações da maioria das imagens *ScanSAR Wide*, enquanto o *Texture* apresentou melhores resultados para as classificações nas imagens *Fine*.

As análises dos diagramas de dispersão de curtose e assimetria indicaram não haver tendências de separabilidade das classes nos dados avaliados. As análises dos diagramas de área e complexidade mostrou a necessidade de um número maior de amostras para uma avaliação mais adequada.

Ao final do processo de classificação foi efetuada uma análise qualitativa da influência da variação de visada do radar na detecção de óleo. Devido a não identificação de diferenças na classificação das imagens que pudessem estar relacionadas à variação do ângulo de visada, concluiu-se a necessidade de uma quantidade maior de imagens para uma melhor avaliação.

As variações ambientais de altura de onda e velocidade e direção do vento afetam a detecção de óleo, de forma que, dentro das áreas de baixas de vento se torna impraticável a diferenciação de óleo se aí existir, com as técnicas utilizadas neste trabalho.

Por fim, concluiu-se que o SAR se mostra como uma ferramenta útil e com grande potencial na detecção de feições oceânicas de manchas de óleo. Entretanto, para aprimorar as técnicas de detecção, torna-se necessária a utilização de dados complementares. Como recomendação, propõe-se a implementação de um classificador textural que utilize quantitativamente dados de vento, onda, TSM e cor do oceano, como mostra a literatura (Espedal, 1998a).

Em relação aos dados auxiliares recomenda-se a utilização de sensores como o *QuikSCAT* (JPL, 2000), como fonte de vento, e a complementação com dados de bóias oceanográficas nas áreas de estudo. Além disso, a realização de um trabalho de campo certamente auxiliaria no treinamento dos classificadores envolvidos.

É importante dispensar atenção ao tipo de dado utilizado. Assim, a partir do uso de imagens em termos de σ^0 , diferentes análises podem ser feitas como o estudo das taxas de amortecimento, avaliação dos diagramas de dispersão de curtose e assimetria em termos do retroespalhamento entre outros.

Recomenda-se que trabalhos sejam realizados com a utilização de outros tipos de filtros como o filtro de *wavelets* (ondaletas). Este filtro tem sido testado na detecção de óleo no mar através da distinção de altas e baixas temperaturas na superfície do mar em imagens NOAA/AVHRR e com resultados bastante satisfatórios (Liu et al., 1996). Assim, talvez este filtro possa contribuir numa melhor utilização dos dados de TSM e aprimorar o uso do SAR no monitoramento oceânico.

Os resultados da classificação no *Texture* são influenciados pelas imagens segmentadas, bem como pela medidas de textura. Assim, novos testes para determinação de segmentações e medidas mais adequadas poderiam resultar em melhores classificações.

Como recomendação final, sugere-se fortemente a realização de testes com novos métodos como principais componentes, redes neurais, *Wavelets* bidimensionais e fractais, com o intuito de aprimorar os resultados das classificações, bem como possibilitar a implantação de um sistema operacional de detecção e monitoramento de óleo no mar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alpers, W.; Hühnerfuss, H. The damping of ocean waves by surface films: a new look at an old problem. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. C5, p. 6251-6265, May 1989.
- Camargo, E.C.G. **Classificador Textural por Semivariograma**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000). Comunicação Pessoal.
- Canadian Space Agency (CSA) **RADARSAT website**. [on line]. <<http://radarsat.space.gc.ca/>>. Abr. 1999.
- Corbley, K.P. EarthSat, NASA develop ocean oil seep detection method. **Backscatter**, v.5, n.3, p.5, Oct. 1994.
- Curlander, J.C.; McDonough, R.N. **Synthetic aperture radar: systems and signal processing**. New York, NY: John Wiley & Sons, 1991.
- Dallemand, J.F.; Lichtenegger, J.; Raney, R.K.; Schumann, R. **Radar imagery: theory and interpretation: lecture notes**. Rome: FAO/ESA, 1993. (RSC Series 67).
- Espedal, H. A.; Johannessen, O. M.; Knulst, J. Satellite detection of natural films on the ocean surface. **Geophysical Research Letters**, v.23, n.22, p.3151-3154, Nov. 1996.
- Espedal, H.A. **Detection of oil spill and natural film in the marine environment by spaceborne Synthetic Aperture Radar**. Bergen. 200p. Thesis (Ph.D. in Radar Physics) – University of Bergen, 1998a.
- Espedal, H.A.; Johannessen, O.M.; Johannessen, J.A.; Dano, E.; Lyzenga, D.R.; Knulst, J.C. COASTWATCH'95: ERS 1/2 SAR detection of natural film on the ocean surface. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. C11, p. 24969-24982, Oct. 1998b.
- European Space Agency (ESA) **ERS and its marine applications**. Noordwijk, 1998.
- European Space Agency (ESA) **SAR ocean feature catalogue**. Noordwijk, 1994.
- Foody, G.M. On the compensation for change agreement in image classification accuracy assessment. **Photogram. Eng. Remote Sensing**. v.58, n.10, p. 1459-1460, Oct. 1992.
- Freitas, C.C. **Teste de Hipóteses**: notas de aulas dadas no curso Estatística: aplicação ao sensoriamento remoto no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2. Sem. de 1998.

- Freitas, C.C. **Algoritmos de classificação**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999). Comunicação pessoal.
- Gade, M.; Alpers, W.; Hühnerfuss, H.; Wismann, V.R.; Lange, P.A. On the reduction of the radar backscatter by oceanic surface films: scatterometer measurements and their theoretical interpretation. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, n. 1, p. 52-70, Oct. 1998a.
- Gade, M.; Alpers, W.; Hühnerfuss, H.; Lange, P.A. Wind wave tank measurements of wave damping and radar cross sections in the presence of monomolecular surface films. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. C2, p. 3167-3178, Feb. 1998b.
- Gade, M.; Alpers, W.; Hühnerfuss, H.; Masuko, H.; Kobayashi, T. Imaging of biogenic and anthropogenic ocean surface films by the multifrequency/multipolarization SIR-C/X-SAR. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. C9, p. 18851-18866, Aug. 1998c.
- Guinard, N.W.; Purves, C.G. **The remote sensing of oil slicks by radar**. Washington: Naval Research Laboratory. 1970.
- Hudson, W.D.; Ramm, C.W. Correct formulation of the kappa coefficient of agreement. **Photogr. Eng. Remote Sensing**, v.53, n.4, p. 421-422, Apr. 1987.
- Hühnerfuss, H.; Alpers, W.; Richter, K. Discrimination between crude-oil spills and monomolecular sea slicks by airborne radar and infrared radiometer – possibilities and limitations. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, n. 8, p. 1001-1013, Aug. 1986.
- Hühnerfuss, H.; Walter, W.; Lange, P.A.; Alpers, W. Attenuation of wind waves by monomolecular sea slicks and the Marangoni effect. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, n. C4, p. 3961-3963, Apr. 1987.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) **Apostila de curso – Spring 2.0: Spring básico**. São José dos Campos, 1997.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) **Manual do usuário - CTS**. São José dos Campos, 1998.
- Jenkins, A.D.; Jacobs, S.J. Wave damping by a thin layer of viscous fluid. **Physics of Fluids**, v. 9, n. 5, p.1256-1264, May 1997.
- Jet Propulsion Laboratory (JPL) **QuikSCAT science data product – user’s manual**. Pasadena, 2000.

- Johannessen, J.A.; Shuchman, R.A.; Johannessen, O.M. Mesoscale variability – synthetic aperture radar on ERS-1. In: Ikeda, M.; Dobson, F.W. ed. **Oceanography application of remote sensing**, Boca Raton: CRC Press Inc., 1994. P. 27-44.
- Johannessen, J.A.; Shuchman, R.A.; Wackerman, C. **SAR - synthetic aperture radar: fundamental principles, data processing and applications to oceanography**: apostila de curso ministrado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, dezembro, 1999.
- Johannessen, J.A. **Microwave remote sensing of the oceans: current status and future plans**. Santos, 1998. Palestra realizada no IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto em 16 set., 1998.
- Konings, H. Oil Pollution Monitoring on the North Sea by the Netherlands. In: ERS Thematic Workshop, Frascati, 1996. **Oil Pollution Monitoring in the Mediterranean**. Frascati: ESA-ESRIN, 1996.
- Kux, H. J. H. **Imágenes de radar**: teoría e interpretación. São José dos Campos: INPE, 1997.
- Kux, H. J. H. **Imagens de radar**: teoria e interpretação: notas de aulas dadas no curso de treinamento e interpretação de imagens SAR no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2. Sem. de 1998. 26 p.
- Lamb, H. **Hydrodynamics**. New York: Cambridge University Press, 1932. 738p.
- Lichtenegger, J. Using ERS-1 SAR images for oil spill surveillance. **Earth Observation Quarterly**, v. 44, p.7-10, 1994.
- Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. Madison: John Wiley & Sons, 1994.
- Liu, A.; Tseng, W.Y.; Chang, S.Y.S. Wavelet analysis of AVHRR images for feature tracking. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium'96, Lincoln, 1996. **Proceedings**. Piscataway: IEEE Publications, 1996. v.1, p. 85-87.
- Lohnes, M. Oil spill remote sensing. **Backscatter**, v.5, n.1, p.4, Feb. 1994.
- Lorenzetti, J.A. **Obtenção de produtos de temperatura da superfície oceânica através de imagens AVHRR**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999). Comunicação pessoal.
- Luporini, G. **Um sistema de vigilância marítima aplicado à poluição marinha por petróleo no Brasil**. São Paulo. 126 p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, 1996.

- Lucca, E. **Avaliação e comparação de algoritmos de segmentação de imagens de radar de abertura sintética**. São José dos Campos. 207 p. (INPE-7507-TDI/721). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.
- McLellan, H.J. **Elements of physical oceanography**. Pergamon Press, Oxford, 1965.
- Miranda, F.P.; Carr, J.R. Application of the Semivariogram Textural Classifier (STC) for vegetation discrimination using SIR-B data of the Guiana Shield, northwestern Brazil. **Remote Sensing Reviews**. v. 10, p. 155-168, 1994.
- Miranda, F.P.; Carr, J.R. Analysis of JERS-1 (Fuyo-1) SAR data for vegetation discrimination in northwestern Brazil using the semivariogram textural classifier (STC). **International Journal of Remote Sensing**. v.17, n.17, p 3523-3529, 1996.
- Miranda, F.P.; Fonseca, L.E.N.; Carr, J.R. Semivariogram textural classification of JERS-1 (Fuyo-1) SAR data obtained over a flooded area of the Amazon rainforest. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 3, p.549-556, Mar. 1998.
- Miranda, F.P. **Detecção e Classificação Digital de Manchas de Óleo**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000). Comunicação Pessoal.
- Mitsuyasu, H.; Honda, T. Wind-induced growth of water waves. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 123, p. 425-442, Oct. 1982.
- Mobley, C.Q. **Light and water**. New York: Academic Press, 1994. p.64-140.
- Mohanty, K.K. The wavelet transform for local image enhancement. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, n.1, p.213-219, 1997.
- NASA **SEAWIFS Project homepage**. [on line].
<<http://SeaWiFS.gsfc.nasa.gov/SEAWIFS.html>>. Abr. 1999.
- NASoftware **Caesar**:user guide. Version 2.1, Liverpool, 1994.
- Otto, L. Report on Marine Science Affairs: **Environmental factors in operations to combat oil spills**. Geneva: WMO 1973. (WMO n. 359).
- Pavakis, P.; Sieber, A.; Alexandry, S. Monitoring Oil-Spill Pollution in the Mediterranean with ERS SAR. [online]. **ESA EOQ52**, n.52, 5p, June 1996.
<<http://esapub.erin.esa.it/eoq/eoq52/pav52.htm>>. Mar. 1999.
- Petróleo Brasileiro S/A. **Programa ambiental da Bacia de Campos**. Rio de Janeiro: Petrobrás, 1993. 169 p.

Petróleo Brasileiro S/A. **Relatório das atividades desenvolvidas durante o ano de 1996**. Rio de Janeiro, 1996.

Petrobrás. [on line]. <<http://www.petrobras.com.br>>. Abr. 1999.

Plant, W.J. A relationship between wind stress and wave slope. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, n. C3, p. 1961-1967, Mar. 1982.

Projeto GlobeSAR **Radar Basics**: introduction to synthetic aperture radar remote sensing. Ottawa, 1997.

Projeto GlobeSAR **GlobeSAR2** : Radar image processing and information extration. Ottawa, 1998.

Projeto Sistema de Previsões de Ondas. [on line]. <<http://atlasul/>>. Abr. 1999.

RADARSAT International. **RADARSAT Iluminated**: your guide to products and services. Richmond, 1995. Preliminary version 07195.

Rennó, C. D. **Avaliação de medidas de texturais na discriminação de classes de uso utilizando imagens SIR-C/X-SAR do perímetro irrigado de bebedouro, Petrolina-PE**. São José dos Campos. 73p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1995.

Rennó, C.D. **Algoritmo Texture de classificação**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000). Comunicação pessoal.

Rennó, C.D.; Freitas, C.C.; Sant'Anna, S.J.S. A system for region image classification based on textural measures. [CD-ROM]. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 9; Jornada de Radar, 2. Santos, 1998. **Anais**. São Paulo: Imagem Multimídia, 1998. II Jornada de Radar.

Schowengerdt, R.A. **Models and methods for image processing**. San Diego: Academic Press, 1997.

Scott, J.C. Ocean surface slicks – pollution, productivity, climate and life-saving. [CD-ROM]. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium'99, Hamburg, 1999. **Proceedings**. Piscataway: IEEE Publications, 1996. Detection and Classification of Sea Slicks and Oil Spills by Remote Sensors Session.

Silva, A. J.F.M. **Classificação automática bayesian de imagens de satélite**. Rio de Janeiro: Centro científico Rio, IBM, 1992. 15p. (Relatório técnico CCR –151).

Simonett, P.S.; Davis, R.E. Image analysis – active microwave. In: America Society of Photogrammetry (ASP) **Manual of remote sensing**: theory, instruments and techniques. Falls Church, 1983. v.2, p. 1125-1179.

- Soares, J.V. Introdução aos Sensores Remotos: notas de aulas dadas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1^o Sem. de 1998.
- Solberg, A.H.S.; Solberg, R. A large-scale evaluation of features for automatic detection of oil spills in ERS SAR images. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium'96, Lincoln, 1996. **Proceedings**. Piscataway: IEEE Publications, 1996. v. 3, p.1484-1486.
- Solberg, A.H.S.; Volden, E. Incorporation of prior knowledge in automatic classification of oil spills in ERS SAR images. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium'97, Singapore, 1997. **Proceedings**. Piscataway: IEEE Publications, 1997. v. 1, p.157-159.
- Spiegel, M.R. **Estatística**. São Paulo: McGraw-Hill, 1971.
- Vachon, P.W.; Olsen, R.B. RADARSAT – Which mode should I use? **Backscatter**, v. 9, n. 4, p.14-20, Nov. 1998.
- Vieira, P. R. **Desenvolvimento de classificações de máxima verossimilhança e ICM para imagens SAR**. São José dos Campos. 251 p. (INPE-6124-TDI/585). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.
- Weber, J.E. Wave attenuation and wave drift in the marginal ice zone. **Journal of Physics Oceanography**, v. 17, n. 12, p.2351-2361, Dec. 1987.
- Wei, Y.; Wu, J. In situ measurements of surface tension, wave damping, and wind properties modified by natural films. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. C4, p. 5307-5313, Apr. 1992.
- Wright, J.W. Detection of ocean waves by microwave radar; the modulation of short gravity-capillary waves. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 13, p. 87-105, 1978.
- Wu, S.; Liu, A.; Leonard, G.; Pichel, W.G. Ocean feature monitoring with wide swath synthetic aperture radar. **John Hopkins Apl. Technical Digest**, v.21, n.1, p. 7-13, 2000.

APÊNDICE A – AMOSTRAGEM NO CTS

**TABELA A.1 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DOS SEMIVARIOGRAMAS
UTILIZADOS NAS CLASSIFICAÇÕES DE TESTE DA IMAGEM SCANSAR
WIDE DE 15/07/07 RECORTE SUPERIOR**

Número de <i>lag</i>	Classes	Média	Variância	Desvio Padrão
20	Óleo	41.027	90.045	9.489
	Embarcação	56.756	909.693	30.161
	Água	58.155	127.811	11.305
	Baixa de Vento	37.325	249.771	15.804
10	Óleo	38.039	55.824	7.472
	Embarcação	73.361	2800.503	52.920
	Água	57.492	107.298	10.358
	Baixa de Vento	24.451	133.127	11.538
5	Óleo	35.893	49.005	7.000
	Embarcação	114.983	7187.388	84.778
	Água	57.818	84.132	9.172
	Baixa de Vento	14.711	33.280	5.769

**TABELA A.2 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DOS SEMIVARIOGRAMAS
UTILIZADOS NAS CLASSIFICAÇÕES NO CTS COM LAG 5**

Imagem	Classe	Média	Variância	Desvio Padrão
<i>ScanSAR Wide</i> 15/07/97 original recorte inferior	Óleo	33.182	101.091	10.054
	Embarcação	129.455	7426.893	86.179
	Água	52.909	38.628	6.215
	Baixa de Vento	22.479	47.902	6.921
<i>ScanSAR Wide</i> 15/07/97 filtrada recorte inferior	Óleo	35.909	1.421	1.192
	Embarcação	124.243	6456.628	80.353
	Água	53.760	24.843	4.984
	Baixa de Vento	18.215	20.995	4.582
<i>ScanSAR Wide</i> 15/07/97 original recorte superior	Óleo	35.893	49.005	7.000
	Embarcação	114.983	7187.388	84.778
	Água	57.818	84.132	9.172
	Baixa de Vento	14.711	33.280	5.769
<i>ScanSAR Wide</i> 15/07/97 filtrada recorte superior	Óleo	34.521	4.514	2.125
	Embarcação	114.438	8019.883	89.554
	Água	54.926	13.424	3.664
	Baixa de Vento	15.570	26.576	5.155
<i>ScanSAR Wide</i> 05/07/98 original	Óleo	18.364	13.669	3.697
	Embarcação	81.851	3260.176	57.098
	Água	61.719	226.285	15.043
	Baixa de Vento	24.893	49.303	7.022
<i>ScanSAR Wide</i> 05/07/98 filtrada	Óleo	17.901	2.238	1.496
	Embarcação	102.826	2698.160	51.944
	Água	59.810	13.361	3.655
	Baixa de Vento	15.653	6.194	2.495
<i>Fine</i> 04/09/96 original	Óleo	6.908	49.757	9.756
	Embarcação	195.676	8954.987	94.765
	Água	7.987	154.987	9.167
	Célula de Chuva	8.364	187.876	9.003
<i>Fine</i> 04/09/96 filtrada	Óleo	6.446	14.660	3.829
	Embarcação	177.132	5549.007	74.492
	Água	7.430	19.435	4.409
	Célula de Chuva	7.851	19.201	4.382
<i>Fine</i> 06/09/96 original recorte superior	Óleo	5.479	12.018	3.467
	Embarcação	158.438	9415.238	97.032
	Água	8.694	22.642	4.758
<i>Fine</i> 06/09/96 filtrada recorte superior	Óleo	5.058	0.468	0.684
	Embarcação	153.752	6292.947	79.328
	Água	8.058	0.897	0.947
<i>Fine</i> 06/09/96 original recorte inferior	Óleo	6.661	11.844	3.441
	Embarcação	135.017	5400.082	73.485
	Água	9.835	39.427	6.279
<i>Fine</i> 06/09/96 filtrada recorte inferior	Óleo	6.099	1.230	1.109
	Embarcação	161.140	1568.336	39.602
	Água	7.273	1.488	1.220

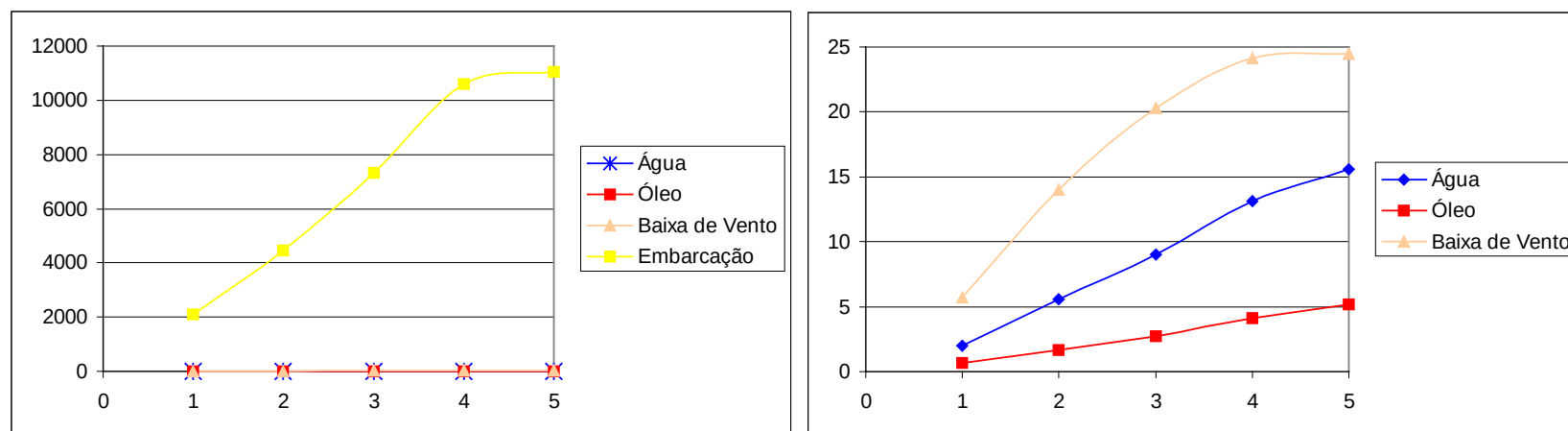


Fig.A.1 – Semivariogramas das amostras de óleo, baixa de vento, água e embarcação tomadas na imagem *ScanSAR Wide* de 15/07/97 filtrada (superior), com **lag** 5. No semivariograma à direita, excluiu-se as amostras de embarcações para uma melhor visualização do semivariograma da demais classes.

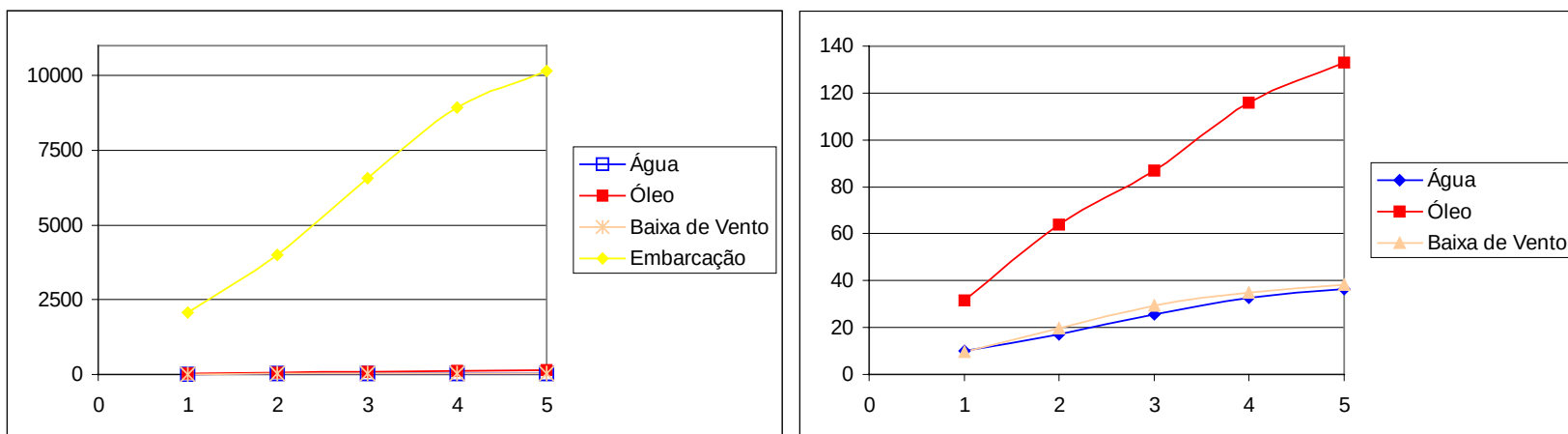


Fig.A.2 – Semivariogramas das amostras de óleo, baixa de vento, água e embarcação tomadas na imagem *ScanSAR Wide* de 15/07/97 original (inferior), com **lag** 5. No semivariograma à direita, excluiu-se as amostras de embarcações para uma melhor visualização do semivariograma da demais classes.

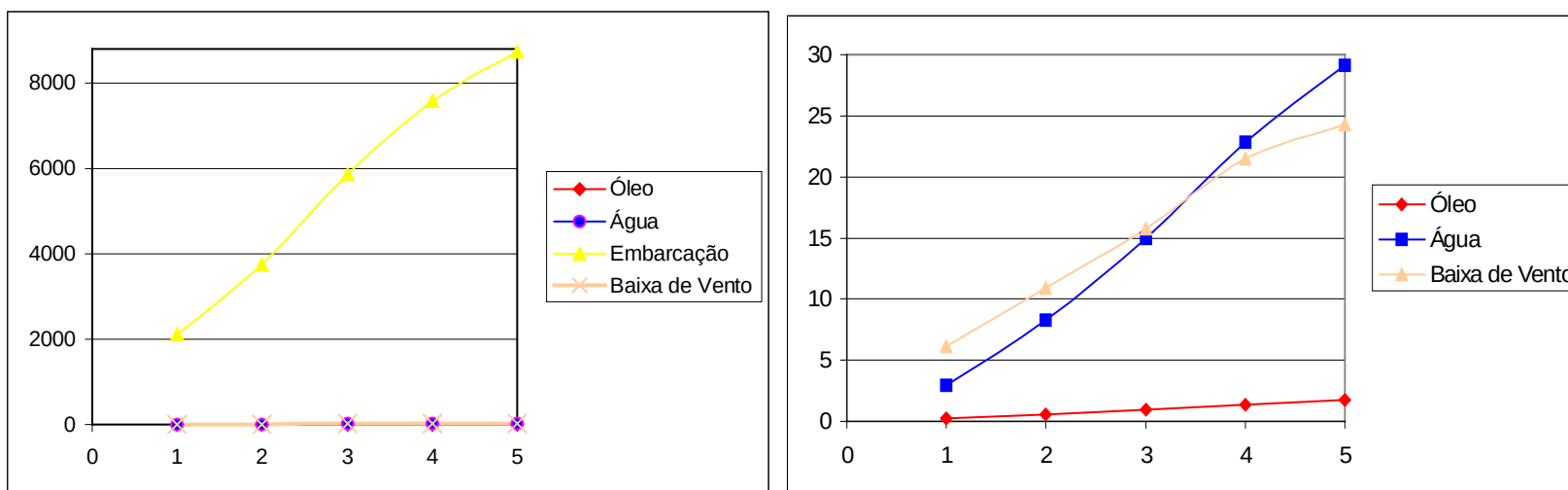


Fig.A.3 – Semivariogramas das amostras de óleo, baixa de vento, água e embarcação tomadas na imagem *ScanSAR Wide* de 15/07/97 filtrada (inferior), com *lag* 5. No semivariograma à direita, excluiu-se as amostras de embarcações para uma melhor visualização do semivariograma da demais classes.

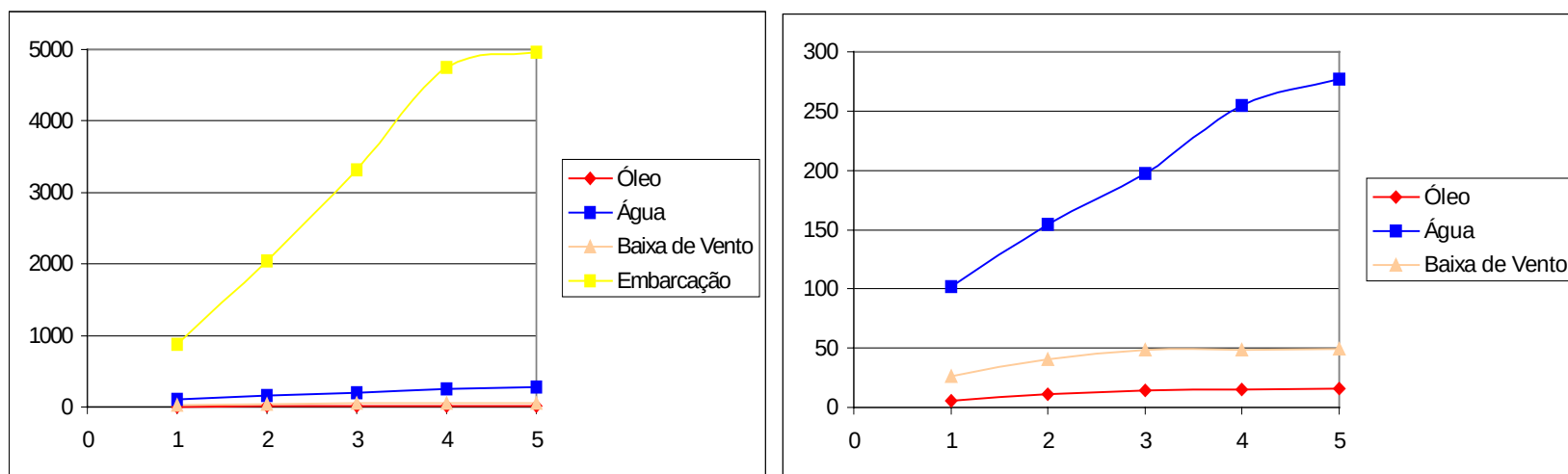


Fig.A.4 – Semivariogramas das amostras de óleo, baixa de vento, água e embarcação tomadas na imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98 original, com **lag** 5. No semivariograma à direita, excluiu-se as amostras de embarcações para uma melhor visualização do semivariograma da demais classes.

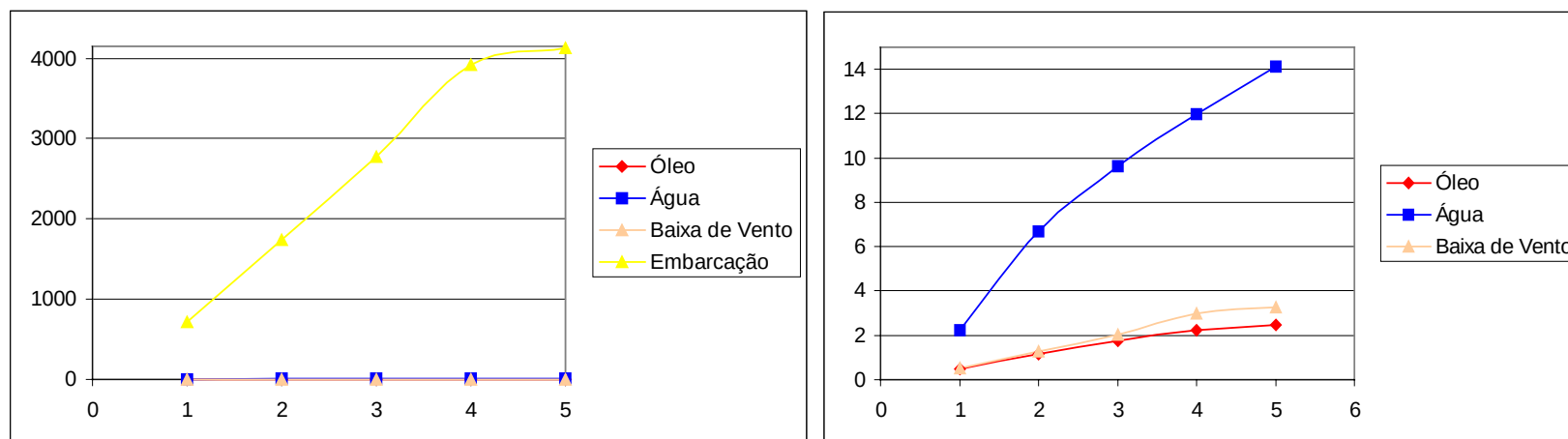


Fig.A.5 – Semivariogramas das amostras de óleo, baixa de vento, água e embarcação tomadas na imagem *ScanSAR Wide* de 05/07/98 filtrada, com *lag* 5. No semivariograma à direita, excluiu-se as amostras de embarcações para uma melhor visualização do semivariograma da demais classes.

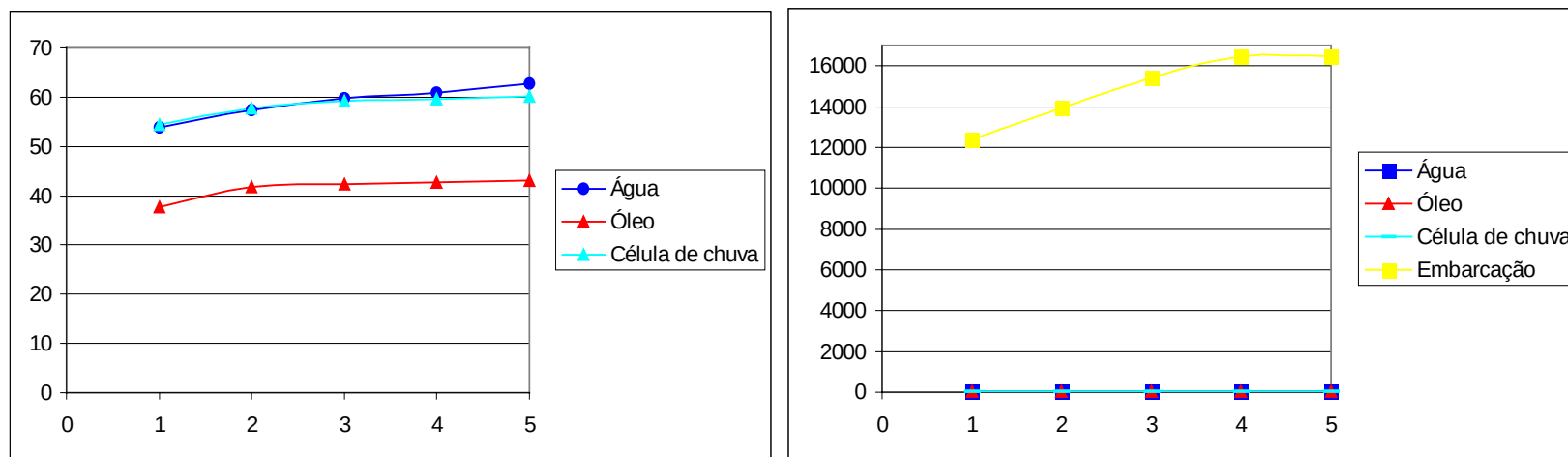


Fig.A.6 – Semivariogramas das amostras de óleo, célula de chuva, água e embarcação tomadas na imagem *Fine* de 04/09/96 original, com **lag** 5. No semivariograma à direita, excluiu-se as amostras de embarcações para uma melhor visualização do semivariograma da demais classes.

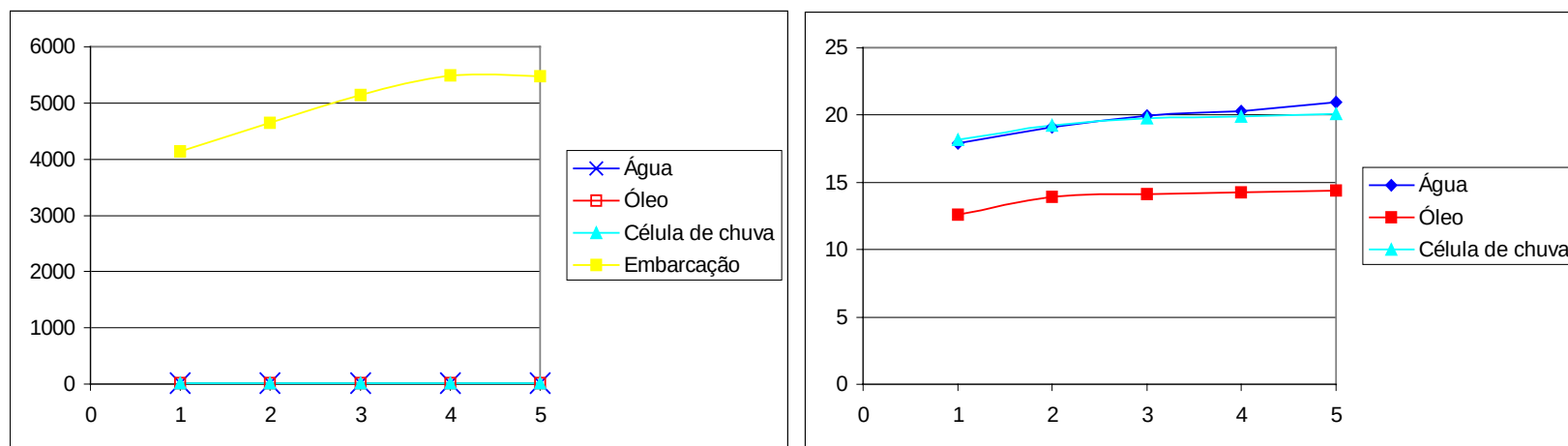


Fig.A.7 – Semivariogramas das amostras de óleo, célula de chuva, água e embarcação tomadas na imagem *Fine* de 04/09/96 filtrada, com **lag** 5. No semivariograma à direita, excluiu-se as amostras de embarcações para uma melhor visualização do semivariograma da demais classes.

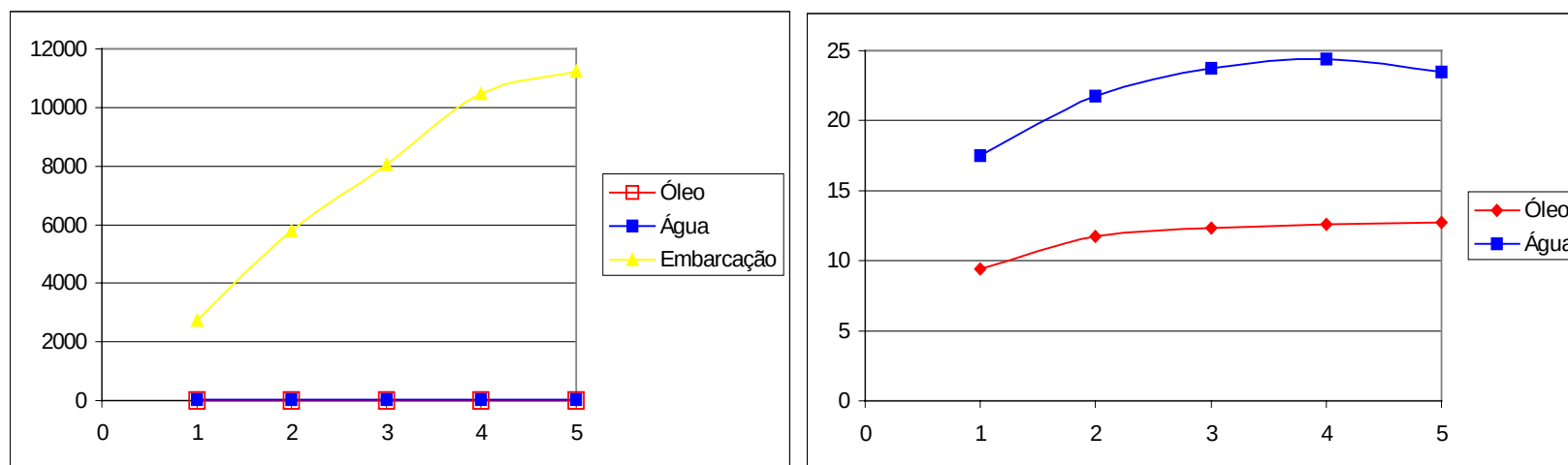


Fig.A.8 – Semivariogramas das amostras de óleo, água e embarcação tomadas na imagem *Fine* de 06/09/96 original (superior), com **lag** 5. No semivariograma à direita, excluiu-se as amostras de embarcações para uma melhor visualização do semivariograma da demais classes.

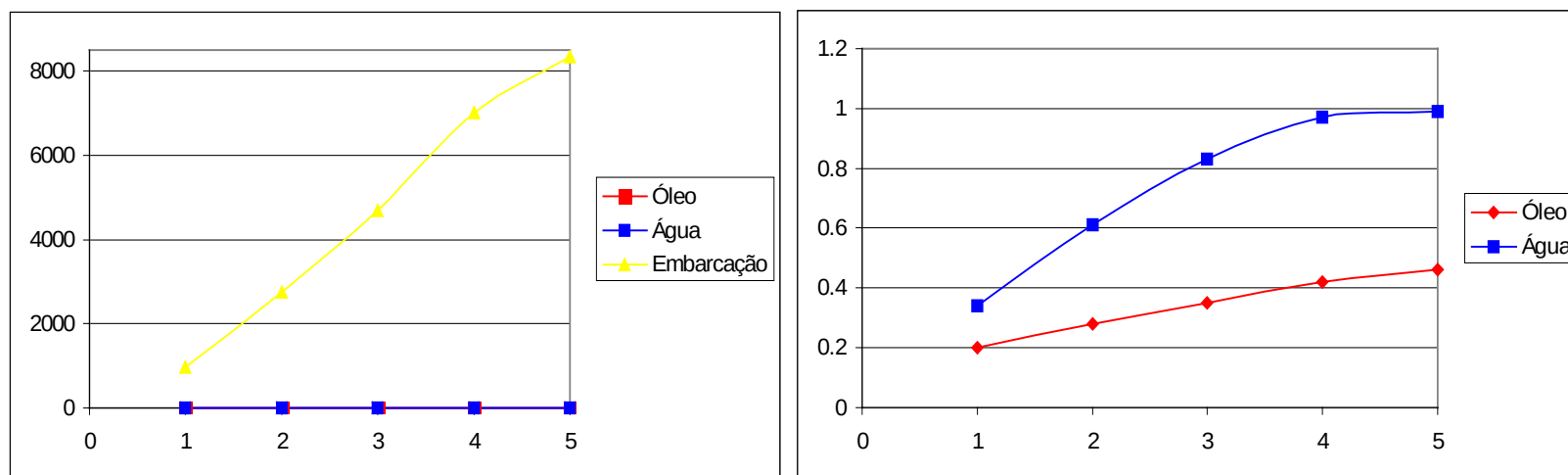


Fig.A.9 – Semivariogramas das amostras de óleo, água e embarcação tomadas na imagem *Fine* de 06/09/96 filtrada (superior), com **lag** 5. No semivariograma à direita, excluiu-se as amostras de embarcações para uma melhor visualização do semivariograma da demais classes.

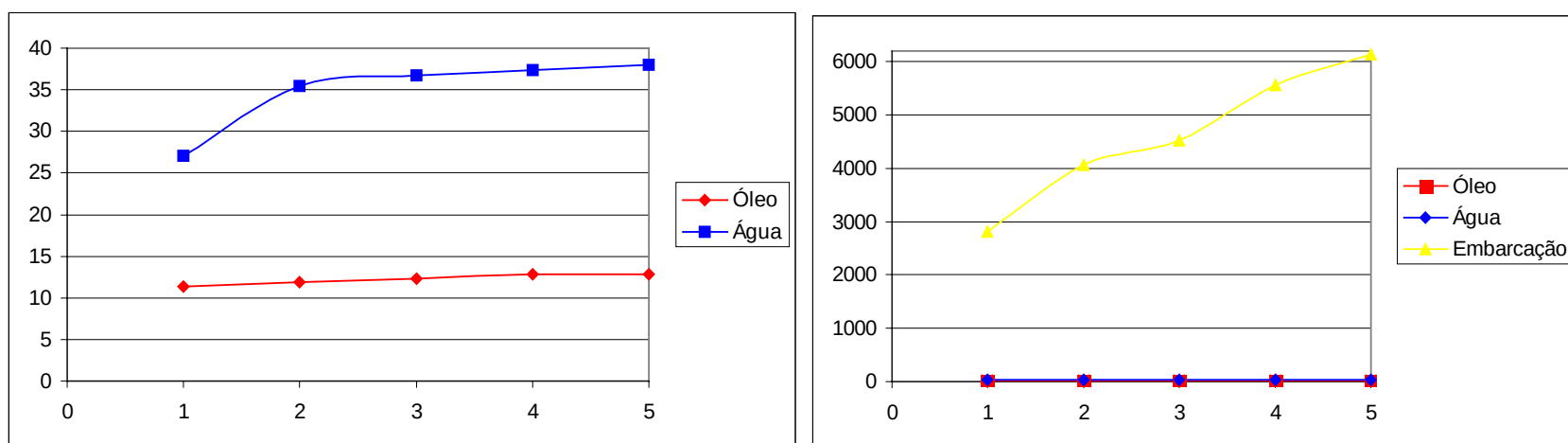


Fig.A.10 – Semivariogramas das amostras de óleo, água e embarcação tomadas na imagem *Fine* de 06/09/96 original (inferior), com **lag** 5. No semivariograma à direita, excluiu-se as amostras de embarcações para uma melhor visualização do semivariograma da demais classes.

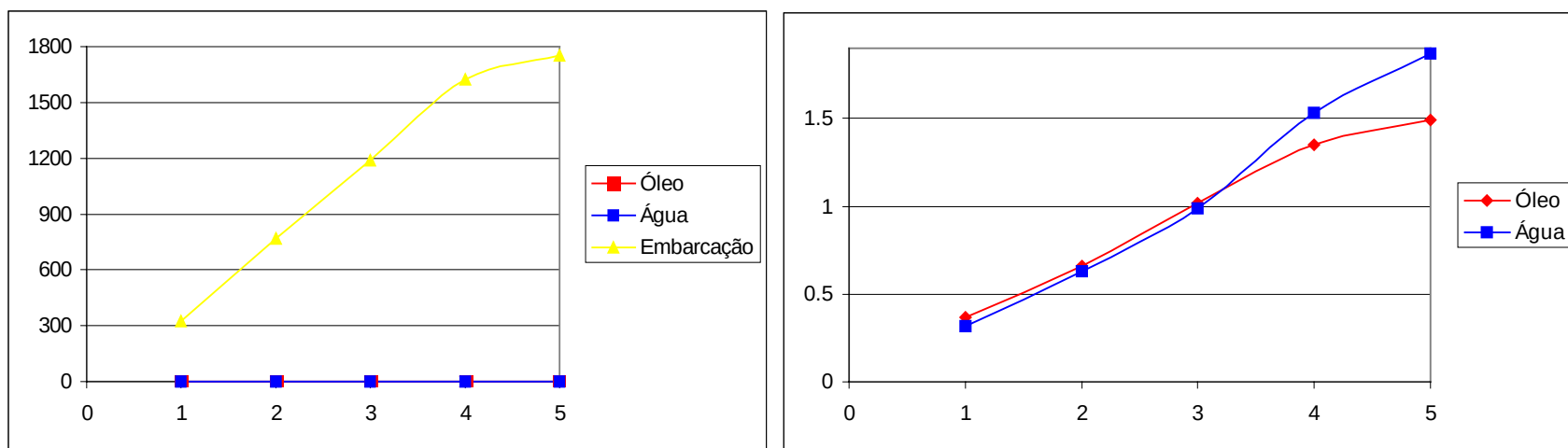


Fig.A.11 – Semivariogramas das amostras de óleo, água e embarcação tomadas na imagem *Fine* de 06/09/96 filtrada (inferior), com **lag** 5. No semivariograma à direita, excluiu-se as amostras de embarcações para uma melhor visualização do semivariograma da demais classes.

APÊNDICE B – DADOS EM FORMATO DIGITAL

Os dados do Apêndice B podem ser consultados em CD disponível na Biblioteca do INPE de São José dos Campos. Em caso de interesse em adquirir tais dados favor entrar em contato com a autora pelo endereço eletrônico: lsoler@dpi.inpe.br.