



COPPE/UFRJ

*RANKING DE EXSUDAÇÕES DE ÓLEO COMO SUPORTE À EXPLORAÇÃO
PETROLÍFERA EM ÁGUAS ULTRA-PROFUNDAS:
ESTUDO DE CASO NO GOLFO DO MÉXICO*

Enrico Campos Pedroso

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

Orientadores: Alexandre Gonçalves Evsukoff

Fernando Pellon de Miranda

Rio de Janeiro
Dezembro 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

RANKING DE EXSUDAÇÕES DE ÓLEO COMO SUPORTE À EXPLORAÇÃO
PETROLÍFERA EM ÁGUAS ULTRA-PROFUNDAS:
ESTUDO DE CASO NO GOLFO DO MÉXICO

Enrico Campos Pedroso

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

Examinada por:

Prof. Alexandre Gonçalves Evsukoff, Dr.

Prof. Fernando Pellon de Miranda, Ph.D.

Prof. Luiz Landau, D.Sc.

Dr. Raimundo Almeida-Filho, D.Sc.

Prof. José Carlos Sicoli Seoane, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
DEZEMBRO DE 2009

Pedroso, Enrico Campos

Ranking de exsudações de óleo como suporte à exploração petrolífera em águas ultra-profundas: estudo de caso no Golfo do México/ Enrico Campos Pedroso. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XIX, 238 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Alexandre Gonçalves Evsukoff

Fernando Pellon de Miranda

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 182-209.

1. Ranking. 2. Exsudações de Óleo. 3. Exploração Petrolífera 4. Conjuntos *Fuzzy*. 5. Radar de Abertura Sintética (SAR). 6. Fusão de Informações. I. Evsukoff, Alexandre Gonçalves *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*A minha esposa Flávia Villela,
a meu filho Matheus e a meus
pais Pedroso e Selma.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, apoiaram, incentivaram e colaboraram na realização deste trabalho. Dedico especial agradecimento:

- A Fernando Pellon de Miranda, pelos 10 anos de companheirismo, discussões, muitos projetos, amizade e incentivo dado durante a realização deste estudo;
- Aos amigos de todas as horas, Luiz Landau e Mônica Caruso;
- Ao colega Alexandre Evsukoff, pelo profissionalismo, amizade, e orientação;
- Ao amigo Carlos Henrique Beisl, pelo companheirismo;
- Ao amigo Fabio Moreira da Silva Roque, pelo companheirismo e indispensável apoio na execução deste trabalho;
- A Marcília Helena Humberto, pela atenção, apoio e presteza em todos os momentos;
- Aos colegas do LabSAR de todas as épocas, estagiários, alunos e funcionários.
- Aos amigos Arturo Mendoza Quintero-Mármol, Oscar Lopez, Miguel Herrera e Ricardo Gomez Cáceres pela amizade e profissionalismo.
- Às amigas Karen Bannerman, Pamela Welgan e Adriana Villegas

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

RANKING DE EXSUDAÇÕES DE ÓLEO COMO SUPORTE À EXPLORAÇÃO
PETROLÍFERA EM ÁGUAS ULTRA-PROFUNDAS:
ESTUDO DE CASO NO GOLFO DO MÉXICO

Enrico Campos Pedroso

Dezembro/2009

Orientadores: Alexandre Gonçalves Evsukoff
Fernando Pellon de Miranda

Programa: Engenharia Civil

Exsudações de óleo em ambiente marinho são indicativas da presença de sistemas petrolíferos ativos, marcados por processos de migração em tempo presente. A identificação de “*oil seeps*” a partir de sistemas de radar propicia: (i) a redução do risco exploratório para geração e migração de óleo em regiões de fronteira; (ii) a calibração de resultados oriundos da modelagem de bacias sedimentares; (iii) a geração de informações relevantes para o planejamento de aquisições de amostras e; (iv) a alimentação de modelos reversos de migração de hidrocarbonetos na coluna d’água a fim de se determinar as prováveis origens de escape. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um método semi-automático para o cálculo do *ranking* de exsudações de hidrocarbonetos (*seepage slicks*) em fronteiras exploratórias de águas ultra-profundas no Golfo do México, utilizando imagens RADARSAT-1, informações geológicas e geofísicas, além de dados oceanográficos e meteorológicos auxiliares. A metodologia proposta consiste na integração de dados, baseada na teoria dos conjuntos *fuzzy*, em um sistema de informações geográficas, para a geração de um *ranking* exploratório de exsudações de óleo. Este estudo reúne uma vasta base de dados e conhecimento adquirido após 10 anos de monitoramento das atividades petrolíferas por satélite da porção oceânica Mexicana do Golfo do México. Os resultados obtidos demonstraram o poder de granularidade e robustez do método para posteriores processos de tomada de decisão em etapas iniciais de projetos exploratórios.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

SEEPAGE SLICK RANKING TOWARDS OIL EXPLORATION IN ULTRA DEEP
WATERS: A CASE STUDY IN THE GULF OF MEXICO

Enrico Campos Pedroso

December/2009

Advisors: Alexandre Gonçalves Evsukoff
Fernando Pellon de Miranda

Department: Civil Engineering

Oil seeps indicate the presence of active petroleum generation and migration. The identification of seepage slicks through the above mentioned approach leads to the following: (i) the exploratory risk is reduced in these frontier areas considering oil generation and migration; (ii) mapped oil seeps can be further used to calibrate basin modeling results for present-day oil generation and migration; (iii) relevant information for piston-core sample acquisition can be produced; (iv) it is feasible to propose the assimilation of hydrocarbon migration reverse models in the water column to determine seepage provenance at the sea floor. This thesis proposes the creation of a multidisciplinary, semi-automated method for seepage slick ranking in the ultra-deep waters of the Gulf of Mexico using RADARSAT-1 images. In addition, geological, geophysical, and meteorological ancillary data aid in this scientific investigation. The implementation of such a unique integrated data analysis within the framework of a geographic information system and based on the fuzzy logic theory has the objective of elaborating an oil seep exploratory ranking system. This research encompasses a vast database obtained from a satellite-monitoring project that has been developed for ten years in the Gulf of Mexico. Achieved results are considered relevant for the Gulf of Mexico and could be applied in decision-making processes in early stages of petroleum exploration studies.

SUMÁRIO

	Pg.
RESUMO -----	vi
ABSTRACT -----	vii
ÍNDICE DE FIGURAS -----	x
ÍNDICE DE TABELAS -----	xviii
1. INTRODUÇÃO -----	1
1.1 Aspectos Gerais -----	1
1.2 Motivação e Justificativas -----	5
1.3 Contribuição -----	8
1.4 Objetivos -----	9
1.5 Visão geral da metodologia proposta -----	10
1.6 Estrutura do documento -----	12
2. ÁREA DE ESTUDO -----	13
2.1 Evolução tectônica e aspectos exploratórios -----	18
2.2 Tectônica salina (Halocinese) -----	35
3. SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO A AMBIENTES MARINHOS E COSTEIROS -----	37
3.1 Sensoriamento remoto por radar -----	39
3.1.1 Aspectos teóricos -----	39
3.1.2 Radar de Abertura Sintética em Oceanografia -----	46
3.1.3 Sistemas de Radar de Abertura Sintética (SAR) -----	54
4. ANÁLISE INTELIGENTE DE DADOS -----	66
4.1 Modelos baseados no conhecimento -----	67
4.2 Teoria de Conjuntos <i>Fuzzy</i> -----	69
5. METODOLOGIA ESPECÍFICA PARA O <i>RANKING</i> DE EXSUDAÇÕES DE ÓLEO -----	81
5.1 Ranking quantitativo para exsudações de óleo em ambiente marinho -----	84
5.2 Contextualização geológica -----	89
5.2.1 Domínios tectônicos -----	92
5.2.2 Halocinese -----	96
5.2.3 Limite crustal -----	104
5.3 Contextualização temporal -----	106
5.3.1 Análise de proximidade -----	107
5.3.2 Freqüência de imageamento -----	112
5.4 Contextualização ambiental -----	114

5.4.1	Análise de proximidade de embarcações -----	117
5.4.2	Campo de intensidade de vento superficial-----	119
5.4.3	Sistemas de células convectivas -----	124
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES -----	128
6.1	Construção e modelagem da base de dados-----	128
6.2	Análise exploratória dos dados-----	142
6.3	Cenários <i>Fuzzy</i> -----	147
6.3.1	Cenário I -----	150
6.3.2	Cenário II -----	156
6.3.3	Cenário III-----	162
6.3.4	Cenário IV -----	169
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES -----	175
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	182
	ANEXO I - Detecção de hidrocarbonetos por sensoriamento remoto de microondas-----	210
A1.1	Trabalhos anteriores-----	210
A1.2	Classificação textural por semivariograma utilizando o algoritmo USTC -----	218
A1.3	Sensoriamento remoto oceanográfico e meteorológico-----	221
A1.3.1	Temperatura da superfície do mar -----	224
A1.3.2	Células convectivas-----	226
A1.3.3	Campo superficial de ventos -----	229
A1.3.4	Altura significativa de ondas-----	232
A1.3.5	Sensoriamento remoto da cor do oceano-----	233
A1.3.6	Correntes marinhas-----	236

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pg.
Figura 1.1 - Fluxograma metodológico para o processamento digital de imagens e análise espacial de exsudações de óleo através de técnicas de sensoriamento remoto por radar. -----	10
Figura 1.2 - Fluxograma específico da metodologia científica proposta para o ranking de exsudações de óleo como suporte a exploração petrolífera. -----	11
Figura 2.1 - Mapa de localização da área de estudo (Fonte: Modificado de http://www.gulfbase.org/facts.php . -----	13
Figura 2.2 – Mapa de anomalia gravimétrica da Cratera de impacto por asteróide de Chicxulub. As cores vermelho e amarelo indicam altos gravimétricos; as cores verde e azul indicam baixos gravimétricos. A linha branca representa o limite costeiro da Península de Yucatán. Pontos brancos representam a localização de cenotes. Fonte: http://www.thunderbolts.info/tepod/2006/arch06/060130crater.htm . -----	15
Figura 2.3 - Laguna de Términos, Estado de Campeche, porção sul do Golfo do México. Fonte: www.ecosur.mx . -----	15
Figura 2.4 - Mapa de localização das regiões administrativas de atividades petrolíferas da PEMEX no Golfo do México. Fonte: www.pep.pemex.com . -----	16
Figura 2.5 - Área de estudo localizada na porção mexicana do Golfo do México sobreposta à batimetria sombreada e colorizada. Iluminação a partir de N45E; elevação solar de 55°. -----	17
Figura 2.6 - Seção geológica esquemática ilustrando a evolução da Bacia do Golfo do México: (A) Triássico Superior, (B) Jurássico Médio, (C) Jurássico Superior, e (D) Limite da sequência do Cretácio Médio (Modificado de Buffler 1991, <i>in</i> Weimer 1998). ---	19
Figura 2.7 – Modelo evolutivo para a formação de estruturas autóctones e alóctones no Golfo do México, com a deposição do Sal Louann em depocentros que foram separados ao final do Jurássico e interpretação de línguas de sal alóctones associadas à progradação sedimentar maciça do final do Mioceno. Fonte: Mohriak <i>et al.</i> , 2008. -----	20
Figura 2.8 - Coluna estratigráfica generalizada da Bacia Sedimentar do “Sureste” ilustrando as rochas reservatório (círculos) e rochas geradoras (retângulos azuis). Os círculos vermelhos representam acumulações de óleo e os círculos amarelos de gás. Fonte: Modificado de Guzmán-Vega e Mello, 1999 e Mohriak <i>et al.</i> , 2008). -----	21
Figura 2.9 - Limite crustal (<i>ocean-continent boundary</i>), representado em azul e estruturas profundas do embasamento interpretadas a partir de dados gravimétricos e	

refração sísmica, sendo TGLC (Cordilheira marginal Tamaulipas-Golden Lane-Chiapas); YP (Estrutura paralela Yucatán); KC (Estrutura Keathley Canyon) e área de estudo em vermelho. Fonte: Modificado de Bird <i>et al.</i> , 2005.-----	22
Figura 2.10 - Mapa das províncias de águas profundas do Golfo do México. Fonte: Modificado de Guzmán e Márquez-Domínguez, 2001.-----	23
Figura 2.11 - Mapa da profundidade do embasamento obtido a partir de dados aeromagnéticos. Fonte: Modificado de Miranda <i>et al.</i> , 2001a)-----	24
Figura 2.12 - Mapa com a localização espacial das famílias de óleos encontrados no Golfo do México segundo resultados de análises geoquímicas de óleos e rochas. Fonte: Modificado de Guzman-Vega e Mello, 1999.-----	27
Figura 2.13 - Distribuição espacial de estruturas diapíricas do Golfo do México. Fonte: Uchupi e Emery, 1968).-----	29
Figura 2.14 - Seção estrutural do Challenger Knoll e Planície Abissal. Fonte: Burk <i>et al.</i> , 1969.-----	30
Figura 2.15 - Aspecto visual da Chapopotera de Cantarell a partir de fotografia panorâmica obtida de helicóptero. Fonte: Quintero-Mármol, 2002.-----	33
Figura 2.16 - Paleogeografia do Jurássico Médio mostrando a distribuição atual dos corpos de sal depositados durante o Calloviano. Fonte: Modificado de Padilla e Sánchez, 2007).-----	36
Figura 3.1 - Espectro eletromagnético ilustrando as janelas de transmissão atmosférica nas faixa do visível, infravermelho próximo, médio e termal e das microondas. Fonte: Sabins, 1999.-----	37
Figura 3.2 - Nomograma da relação entre a frequência e o comprimento de onda de sistemas de radar. Fonte: Lewis e Henderson, 1998.-----	40
Figura 3.3 - Geometria de aquisição de uma imagem de radar de abertura sintética aerotransportado. Fonte: Material Educativo para Sensoriamento Remoto de Radar GlobeSAR2 – CD-ROM.-----	41
Figura 3.4 - Diagrama mostrando a relação entre ângulo de incidência, ângulo de depressão e declividade do terreno. Fonte: Sabins, 1999.-----	42
Figura 3.5 - Diagrama mostrando os mecanismos de reflexão e espalhamento do sinal em função da rugosidade do terreno. Fonte: Handerson e Lewis, 1998.-----	44
Figura 3.6 - Geometria simplificada de sistemas SAR e alvos em movimento. u_R e u_a representam respectivamente os componentes de velocidade de alvos nas direções de alcance e azimute. Fonte: Mouchot e Garello, 1998.-----	47
Figura 3.7 - Espalhamento do sinal de radar a partir da superfície do mar em (a) superfície rugosa sem a presença de óleo, (b) plataforma em superfície lisa com a presença de óleo e (c) superfície lisa com a presença de óleo.-----	48

Figura 3.8 - Ilustração do retroespalhamento <i>Bragg</i> , onde λ_r equivale ao comprimento de onda do radar, λ_B equivale ao comprimento de onda da superfície do mar e θ corresponde ao ângulo de incidência local. Fonte: Modificado de Martin, 2004. -----	50
Figura 3.9 - Retroespalhamento de um radar de banda C (5.3 GHz), polarização VV em diferentes intensidades médias de vento como uma função do ângulo de incidência. Cada símbolo representa um dado obtido em um dia específico de vôo. Fonte: Feindt <i>et al.</i> , 1986. -----	51
Figura 3.10 - Refletividade (σ^0) típica de sistemas de radar em função do ângulo de incidência. Fonte: Ikeda e Dobson, 1995.-----	51
Figura 3.11 - Variação azimutal do coeficiente de retroespalhamento da superfície do mar a uma frequência de 14 GHz, onde $\phi = 0^\circ$ e 180° correspondem às direções do vento (<i>upwind</i> e <i>downwind</i>) respectivamente. Fonte: Modificado de Ulaby <i>et al.</i> , 1982) --	52
Figura 3.12 - Refletividade (σ^0) típica de sistemas de radar em função da intensidade do vento. Fonte: Ikeda e Dobson, 1995. -----	53
Figura 3.13 - O sistema SAR, a bordo do satélite RADARSAT-1. Fonte: http://gs.mdacorporation.com .-----	60
Figura 3.14 – Direções de visada nas órbitas ascendentes e descendentes do satélite RADARSAT-1. Fonte: http://gs.mdacorporation.com . -----	61
Figura 3.15 – Flexibilidade de modos de imageamento do RADARSAT-1 (Radar de Abertura Sintética - SAR). Fonte: http://gs.mdacorporation.com .-----	61
Figura 3.16 – Flexibilidade de modos de imageamento do RADARSAT-2. Fonte: http://gs.mdacorporation.com .-----	64
Figura 4.1 - Representações das formas de incerteza e imprecisão por conjuntos <i>fuzzy</i> . Fonte: Burrough e Heuvelink, 1992. -----	70
Figura 4.2 - Diagrama de Venn ilustrando a diferença de fronteira entre conjuntos (A) <i>fuzzy</i> e (B) booleano (<i>crisp</i>). Fonte: Burrough, 1998. -----	72
Figura 4.3 - Representação gráfica das principais funções de pertinência. -----	73
Figura 4.4 - Representação gráfica da função de pertinência do conjunto <i>fuzzy</i> que representa o conceito “Aproximadamente 4”. Fonte: Nicoletti e Camargo, 2004. -----	74
Figura 4.5 - Representação geral de uma função de pertinência triangular simétrica. Fonte: Nicoletti e Camargo, 2004. -----	74
Figura 4.6 - Representação geral de uma função de pertinência trapezoidal. Fonte: Nicoletti e Camargo, 2004.-----	75
Figura 4.7 - Suporte, núcleo e altura de um conjunto <i>fuzzy</i> representado por uma função de pertinência trapezoidal. Fonte: Nicoletti e Camargo, 2004. -----	76

Figura 4.8 - Ilustração das principais t-normas e t-conormas. Fonte: Sandri e Correa, 1999.-----	79
Figura 4.9 - Distribuição da função <i>fuzzy gamma</i> para distintos valores de γ . Fonte: Bonham-Carter, 1994.-----	80
Figura 5.1 - Fluxograma simplificado do sistema <i>fuzzy</i> para caracterização qualitativa de exsudações de óleo em ambiente marinho.-----	83
Figura 5.2 - Domínios tectônicos da porção mexicana do Golfo do México. Fonte: Modificado de Guzmán e Márquez-Domínguez, 2001 -----	85
Figura 5.3 - Sumário das informações geológicas utilizadas na criação da contextualização geológica. -----	90
Figura 5.4 - Ilustração esquemática das etapas envolvidas na fuzzyficação dos domínios tectônicos, sendo a linha 1 representada pelas máscaras booleanas <i>raster</i> dos domínios e complementos, a linha 2 representada pelos mapas de distância (<i>buffer distances</i>) em relação aos contatos e a linha 3 representada pelos mapas <i>fuzzy</i> dos domínios tectônicos. -----	94
Figura 5.5 - Mapa <i>fuzzy</i> dos domínios tectônicos. -----	95
Figura 5.6 - Distribuição espacial dos domos e <i>knolls</i> relacionados aos depósitos salinos do Calloviano, mapeados durante o projeto DSDP (Modificado de Uchupi e Emery, 1968). -----	97
Figura 5.7 - Distribuição espacial dos domos e <i>knolls</i> e as exsudações de óleo detectadas a partir de imagens do satélite RADARSAT-1.-----	98
Figura 5.8 - Mapa de distâncias (<i>buffers</i>) dos domos e <i>knolls</i> .-----	99
Figura 5.9 - Representação <i>fuzzy</i> das funções de pertinência determinadas para os domos e <i>knolls</i> . -----	100
Figura 5.10 - Mapas de densidade de pontos nos formatos vetorial e <i>raster</i> obtidos a partir da localização dos domos e <i>knolls</i> mapeados pelo projeto DSDP (<i>Deep-sea Drilling Project</i>). -----	102
Figura 5.11 - Mapa <i>fuzzy</i> dos domos e <i>knolls</i> situados na Província <i>Sigsbee Deep</i> . ----	103
Figura 5.12 - Gráfico da função de pertinência definida para a fuzzyficação do limite crustal.-----	105
Figura 5.13 - Processamento dos dados referentes ao limite crustal. -----	105
Figura 5.14 - Gráfico da função de pertinência determinada para a contextualização temporal caracterizada pela análise de proximidade de polígonos.-----	107
Figura 5.15 - Mapa de distâncias Euclidianas calculado para as exsudações de óleo interpretadas na imagem RADARSAT-1 adquirida em 01/04/2003 e área de <i>zoom</i> selecionada (preto).-----	108

Figura 5.16 - Zoom do mapa de distâncias Euclidianas calculado para as exsudações de óleo interpretadas na imagem RADARSAT-1 adquirida em 01/04/2003.-----	108
Figura 5.17 – Desenho esquemático dos princípios utilizados no método da análise de vizinhança. -----	109
Figura 5.18 - Mapa de densidade de cobertura de imagens RADARSAT-1.-----	113
Figura 5.19 - Gráfico da função de pertinência determinada para a contextualização ambiental, caracterizada pela análise de proximidade de pontos (plataformas e/ou embarcações). -----	117
Figura 5.20 - Mapa da análise de proximidade entre exsudações de óleo e plataformas ou embarcações.-----	118
Figura 5.21 - Gráfico da função de pertinência determinada para a contextualização ambiental caracterizada pela análise do campo de superficial de intensidade de ventos QuikSCAT e SSM/I.-----	120
Figura 5.22 - A imagem RADARSAT-1 adquirida em 25/04/03 às 12:10:08 (UTC) no modo de imageamento ScanSAR Narrow 1 (SCN1) em órbita descendente.-----	121
Figura 5.23 - Fuzzyficação dos dados de intensidade de vento superficial do satélite QuikSCAT adquirido em 25/04/03. Os círculos vermelhos representam a totalidade das exsudações interpretadas neste estudo e os círculos verdes, as exsudações interpretadas na imagem RADARSAT-1 de 25/04/03.-----	122
Figura 5.24 - Fuzzyficação dos dados de intensidade de vento superficial do satélite SSM/I adquirido em 25/04/03. Os círculos vermelhos representam a totalidade das exsudações interpretadas neste estudo e os círculos verdes, as exsudações interpretadas na imagem RADARSAT-1 de 25/04/03.-----	123
Figura 5.25 - Gráfico da função de pertinência determinada para a contextualização ambiental caracterizada pela análise da temperatura de topo de nuvens. -----	125
Figura 5.26 - Processamento dos dados de temperatura de topo de nuvens do satélite AVHRR/NOAA-17 adquirido em 04/06/03 às 03:43 (UTC). Os círculos vermelhos representam a totalidade das exsudações interpretadas neste estudo e os círculos amarelos, as exsudações interpretadas na imagem RADARSAT-1 de 25/04/03.-----	126
Figura 5.27 - Fuzzyficação dos dados de temperatura de topo de nuvens do satélite AVHRR/NOAA-17 adquiridos em 04/06/03 às 03:43 (UTC). Os círculos vermelhos representam a totalidade das exsudações interpretadas neste estudo e os círculos amarelos, as exsudações interpretadas na imagem RADARSAT-1 de 25/04/03. -----	127
Figura 6.1 - Mapa de localização dos 20 <i>frames</i> das imagens RADARSAT-1 processadas neste trabalho. -----	129

Figura 6.2 - Ilustração dos principais produtos de sensoriamento remoto oceanográfico e meteorológico auxiliares utilizados na metodologia de detecção de óleo na superfície do mar.-----	130
Figura 6.3 - Zoom da imagem RADARSAT-1 adquirida em 08/03/03 às 12:10:50 (UTC).-----	132
Figura 6.4 - Exsudações de óleo interpretadas na imagem RADARSAT-1 adquirida em 08/03/03 às 12:10:50 (UTC).-----	132
Figura 6.5 - Mapa de temperatura da superfície do mar adquirido em 08/03/2003 às 12:50 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1 (satélite NOAA-15).-----	133
Figura 6.6 - Mapa da temperatura do topo de nuvens adquirido em 08/03/2003 às 12:50 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1 (satélite NOAA-15).-----	133
Figura 6.7 - Mapa da concentração de Clorofila tipo "A"(mg/m ³) adquirido em 08/03/2003 às 19:20 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1 (satélite MODIS). --	133
Figura 6.8 - Mapa do campo superficial de vento a partir do dado <i>along-track</i> do satélite QuikSCAT adquirido em 08/03/2003 às 12:36 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1.-----	133
Figura 6.9 - Mapa do campo superficial de vento adquirido em 08/03/2003 às 13:00 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1(satélite DMSP F-13). -----	133
Figura 6.10 - Zoom da imagem RADARSAT-1 adquirida em 28/02/03 às 0:20:08 (UTC). -----	134
Figura 6.11 - Exsudações de óleo interpretadas na imagem RADARSAT-1 adquirida em 28/02/03 às 0:20:08 (UTC). -----	134
Figura 6.12 - Mapa de temperatura da superfície do mar adquirido em 28/02/2003 às 00:21 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1 (satélite NOAA-15).-----	135
Figura 6.13 - Mapa da temperatura do topo de nuvens adquirido em 28/02/2003 às 00:21 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1 (satélite NOAA-15).-----	135
Figura 6.14 - Mapa da concentração de Clorofila tipo "A" (mg/m ³) adquirido em 27/02/2003 às 19:25 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1 (satélite MODIS). --	135
Figura 6.15 - Mapa do campo superficial de vento a partir do dado <i>along-track</i> do satélite QuikSCAT adquirido em 27/02/2003 às 23:54 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1.-----	135
Figura 6.16 - Mapa do campo superficial de vento adquirido em 28/02/2003 às 0:42 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1(satélite DMSP F-13). -----	135
Figura 6.17 - Mapa de localização dos centróides das exsudações de óleo interpretadas a partir das imagens RADARSAT-1. -----	138

Figura 6.18 - Estatística dos atributos área, profundidade, volume (Fator PEP), volume (<i>Bonn Agreement</i>), eixo maior e razão (comprimento/largura) das exsudações interpretadas nas imagens RADARSAT-1. -----	141
Figura 6.19 - Mapa das 247 exsudações de óleo interpretadas na área de estudo e compartimentação proposta. -----	145
Figura 6.20 - Mapa das exsudações de óleo interpretadas para o “ <i>Tile 4</i> ” (quadrante sudoeste da área de estudo). -----	146
Figura 6.21 - Desenho esquemático dos planos de informação utilizados na composição das contextualizações geológicas, temporais e ambientais utilizadas no cálculo do ranking de exsudações. -----	148
Figura 6.22 - Mapa de domínios tectônicos <i>fuzzy</i> da porção de águas ultra-profundas do Golfo do México. -----	149
Figura 6.23 - Plano de informações (evidências), destacados em verde, utilizados na composição do cenário I. -----	150
Figura 6.24 - <i>Ranking</i> das exsudações (centróides) obtido a partir do Cenário I sobreposto ao mapa <i>fuzzy</i> da contextualização geológica. -----	154
Figura 6.25 - <i>Ranking</i> das exsudações (centróides) obtido a partir do Cenário I, localizadas no <i>tile 4</i> da área de estudo. -----	155
Figura 6.26 - Plano de informações (evidências), destacados em verde, utilizados na composição do cenário II. -----	156
Figura 6.27 - Mapa <i>fuzzy</i> representativo do mínimo entre os domínios tectônicos ponderados, a densidade de domos e <i>knolls</i> e o limite crustal. -----	157
Figura 6.28 - <i>Ranking</i> das exsudações (centróides) obtido a partir do Cenário II sobreposto ao mapa <i>fuzzy</i> da contextualização geológica (Mínimo entre domínios tectônicos ponderados, densidade de domos e <i>knolls</i> e limite crustal). -----	160
Figura 6.29 - <i>Ranking</i> das exsudações (centróides) obtido a partir do Cenário II, localizadas no <i>tile 4</i> da área de estudo. -----	161
Figura 6.30 - Plano de informações (evidências), destacados em verde, utilizados na composição do cenário III. -----	162
Figura 6.31 - Mapa <i>fuzzy</i> representativo do produto algébrico entre os domínios tectônicos ponderados, a densidade de domos e <i>knolls</i> e o limite crustal. -----	164
Figura 6.32 - <i>Ranking</i> das exsudações (centróides) obtido a partir do Cenário III sobreposto ao mapa <i>fuzzy</i> da contextualização geológica (Produto algébrico entre os domínios tectônicos ponderados, a densidade de domos e <i>knolls</i> e o limite crustal). ----	167
Figura 6.33 - <i>Ranking</i> das exsudações (centróides) obtido a partir do Cenário III, localizadas no <i>tile 4</i> da área de estudo. -----	168

Figura 6.34 - Plano de informações (evidências), destacados em verde, utilizados na composição do cenário IV. -----	169
Figura 6.35 - <i>Ranking</i> das exsudações (centróides) obtido a partir do Cenário IV sobreposto ao mapa <i>fuzzy</i> da contextualização geológica (Mínimo entre domínios tectônicos ponderados, densidade de domos e <i>knolls</i> e limite crustal). -----	173
Figura 6.36 - <i>Ranking</i> das exsudações (centróides) obtido a partir do Cenário IV, localizadas no <i>tile</i> 4 da área de estudo. -----	174
Figura 7.1 - Mapa da densidade de centróides das exsudações de óleo interpretadas em imagens RADARSAT-1, sobreposta à superfície <i>fuzzy</i> [0,1] da contextualização geológica ilustrada nos Cenários II e IV, gerado a partir do operador <i>Fuzzy AND</i> entre os domínios tectônicos ponderados, a densidade de domos e <i>knolls</i> e o limite crustal. Os domínios tectônicos estão em vermelho e o domínio sob influência da presença de sal está em verde. -----	176
Figura 7.2 - <i>Ranking</i> das exsudações (centróides) obtido a partir do Cenário I. Os domínios tectônicos estão em vermelho, o domínio sob influência da presença de sal está em verde e o limite crustal está em azul. -----	179

ÍNDICE DE TABELAS

	Pg.
TABELA 2.1 - Coordenadas dos vértices da área de estudo (ver localização na Figura 2.5).-----	16
TABELA 3.1 - Características do Sistema de Radar de Abertura Sintética (SAR) lançados entre 1978 e 1991. Fonte: Raney,1998.-----	55
TABELA 3.2 - Características do Radar de Abertura Sintética (SAR) entre 1991 e 1993. Fonte: Raney,1998. -----	56
TABELA 3.3 - Características do Sistema de Radar de Abertura Sintética (SAR) entre 1994 e 1999. Fonte: Raney,1998. -----	57
TABELA 3.4 - Satélites em operação e com lançamentos previstos. Fonte: Ioannidis e Vassilaki, 2008. -----	58
TABELA 3.5 - Características dos Satélites RADARSAT-1 e RADARSAT-2. Fonte: http://gs.mdacorporation.com .-----	58
TABELA 3.6 - Modos operacionais de iluminação do satélite RADARSAT-1. Fonte: http://gs.mdacorporation.com .-----	62
TABELA 3.7 - Características do Satélite ENVISAT-ASAR -----	64
TABELA 3.8 - Modos operacionais de iluminação do satélite RADARSAT-2. Modos equivalentes ao RADARSAT-1 com polarização paralela e cruzada (transmite H ou V; recebe H ou V ou H e V). Fonte: http://gs.mdacorporation.com -	65
TABELA 3.9 - Polarização paralela seletiva (transmite H ou V; recebe H ou V). Fonte: http://gs.mdacorporation.com .-----	65
TABELA 3.10 - Modos operacionais de iluminação em modo multipolarimétrico (transmite H e V em pulsos alternados; recebe H e V em cada pulso). Fonte: http://gs.mdacorporation.com . -----	65
TABELA 4.1 - Principais t-normas e t-conormas duais. -----	78
TABELA 5.1 - Níveis de confiabilidade para o <i>ranking</i> de exsudações de óleo em ambiente marinho, na porção mexicana do Golfo do México (GOM). O cenário tectônico toma por base o trabalho de Guzmán e Márquez-Domínguez, 2001. -----	87
TABELA 5.2 - Ranking das exsudações naturais mapeadas na porção mexicana do Golfo do México. -----	88
TABELA 5.3 - Exemplo dos graus de pertinência de dez exsudações aos domínios tectônicos A, B, C e D.-----	93
TABELA 5.4 - Exemplo da matriz com o cálculo de todas as distâncias medidas em metros entre as exsudações interpretadas.-----	110

TABELA 5.5 - Exemplo do cálculo do grau de pertinência (μ_{AV}) da análise de vizinhança. -----	111
TABELA 5.6 - Sumário dos graus de pertinência das exsudações de óleo referentes à contextualização geológica, contextualização temporal (análise de proximidade de polígonos, pontos e frequência de imageamento e; contextualização ambiental (análise de proximidade de embarcações, campo de intensidade de vento superficial (QuikSCAT e SSM/I) e sistemas de células convectivas). -----	116
TABELA 6.1 - Seleção de Imagens RADARSAT-1 ScanSAR Narrow 1. -----	128
TABELA 6.2 - Resumo das informações oceanográficas e meteorológicas auxiliares relacionadas aos horários de aquisição das imagens RADARSAT-1 utilizadas na interpretação de exsudações de óleo. -----	137
TABELA 6.3 - Análise quantitativa da área de polígonos interpretados na imagem RADARSAT-1 de 01/05/2003 para definição da célula de resolução dos dados <i>raster</i> . -----	143
TABELA 6.4 - Escala de cores das dez (10) primeiras posições do <i>ranking</i> de exsudações de óleo. -----	149
TABELA 6.5 - Seleção das quarenta (40) exsudações melhores posicionadas no <i>ranking</i> do Cenário I. -----	152
TABELA 6.6 - Seleção das dez (10) exsudações melhores posicionadas no <i>ranking</i> do Cenário IA. -----	153
TABELA 6.7 - Seleção das quarenta (40) exsudações melhores posicionadas no <i>ranking</i> do Cenário II. -----	158
TABELA 6.8 - Seleção das dez (10) exsudações melhores posicionadas no <i>ranking</i> do Cenário IIA. -----	159
TABELA 6.9 - Seleção das quarenta (40) exsudações melhores posicionadas no <i>ranking</i> do Cenário III. -----	165
TABELA 6.10 - Seleção das dez (10) exsudações melhores posicionadas no <i>ranking</i> do Cenário IIIA. -----	166
TABELA 6.11 - Seleção das quarenta (40) exsudações melhores posicionadas no <i>ranking</i> do Cenário IV. -----	171
TABELA 6.12 - Seleção das dez (10) exsudações melhores posicionadas no <i>ranking</i> do Cenário IVA. -----	172
TABELA 7.1 - Seleção das exsudações de óleo com os dez melhores posicionamentos no ranking calculado pelos Cenários I, II, III e IV. -----	178

1 INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos gerais

Investigações históricas apontam que a utilização prática de petróleo no México pré-hispânico data aproximadamente de 600 a.C. Foram inúmeros os usos que os antigos mexicanos deram ao betume, encontrado na superfície da terra, tendo este sido denominado de *chapopotli*, em alusão à cor escura de um inseto comum nesta região. O *chapopotli*, palavra de origem *nahua*, posteriormente traduzida ao idioma dos colonizadores para o termo *chapopote*, foi principalmente utilizado como produto medicinal, em combinação com outros ingredientes, além de ser usado como impermeabilizante para barcos e pigmento para pintura facial (García e Blaine, 2004).

Nos primeiros anos do século XX, a exploração petrolífera no hemisfério ocidental, sem incluir os Estados Unidos, estava concentrada sobretudo no México. Desde então, este país tem se firmado como uma importante província petrolífera mundial (Yergin, 1991). A companhia estatal mexicana de petróleo (*Pemex - Petróleos Mexicanos*) é considerada líder na produção em ambiente marinho, tendo alcançado uma média diária aproximada, no ano de 2004, de 3,383 milhões de barris de óleo e 4,573 bilhões de pés cúbicos de gás natural.

A prospecção geoquímica de petróleo na superfície terrestre consiste na caracterização de áreas com concentrações anômalas de gases ou na identificação de amostras de óleo indicadoras da presença de processos de geração e migração. Historicamente, grande parte das primeiras províncias petrolíferas mundiais tem sua descoberta relacionada à identificação de exsudações de óleo e gás em superfície. A mera presença de exsudações em uma determinada região indica a existência de um sistema petrolífero ativo, onde processos de geração e/ou migração estão atuando no presente. Frequentemente, exsudações de óleo e gás estão próximas de acumulações comerciais; porém, a ausência de tal fenômeno não denota a inexistência de acumulações, pois as propriedades das rochas capeadoras podem evitar o escape de hidrocarbonetos. Desta forma, há três fatores indispensáveis que determinam o sucesso em campanhas exploratórias petrolíferas: os métodos de investigação utilizados, a interpretação geológica e a qualidade de interpretação dos dados (Hegberg, 1981).

O conceito de que hidrocarbonetos migram a partir de acumulações ou rochas geradoras maduras em subsuperfície para sedimentos próximos à superfície é bem documentado (Kennicutt e Brooks, 1988). Se voltarmos ao histórico exploratório das principais províncias petrolíferas mundiais, veremos que a ocorrência de exsudações de óleo e gás figuram como primeiros indícios na descoberta de muitas regiões produtoras de petróleo (Link, 1952). O conhecimento da distribuição espacial de exsudações de hidrocarbonetos constitui-se em uma importante evidência na redução do risco exploratório para a presença de geração e migração a partir de sistemas petrolíferos ativos. A relação direta entre a presença de exsudações de hidrocarbonetos e acumulações em subsuperfície de óleo e gás existe desde o fim do século XIX, muito bem documentada em exemplos na Pennsylvana, EUA, e Azerbaijão, no ano de 1860. Posteriormente, exemplos de exsudações de hidrocarbonetos, associadas a descobertas de acumulações, foram descritos em Sumatra (1985), Texas (1901), Oklahoma (1905), Persia (1908), México (1910), Venezuela (1922), Iraque (1927), Leste do Texas (1930), Bahrain (1932) e Kuwait (1938). Em ambientes marinhos, o fenômeno da exsudação de hidrocarbonetos (óleo e gás) é mais facilmente detectável, já que o óleo e/ou gás migra a partir dos pontos de escape pela coluna d'água sob a forma de bolhas. Quando atingem a superfície, o gás se dissipa na atmosfera, enquanto o óleo permanece na superfície sob a forma de filmes de espessuras variáveis. Tais feições podem ser detectadas a partir de sensores a bordo de aeronaves ou até mesmo satélites. Em atividades exploratórias em ambientes *offshore*, sistemas de radar consistem em uma técnica eficiente, confiável e de baixo custo que, definitivamente, reduz o risco para a geração e migração em regiões onde atividades exploratórias possuem custos altíssimos, como é o caso das bacias sedimentares localizadas em fronteiras exploratórias de águas profundas e ultra-profundas.

Atividades mexicanas de exploração *offshore* no Golfo do México iniciaram em 1976, a partir da descoberta de exsudações de óleo na Baía de Campeche por um pescador denominado Cantarell. A província Sonda de Campeche, posteriormente descoberta, abrange uma área aproximada de 15.000 km² e possui 24 campos de óleo, sendo que somente o campo de Cantarell produziu 11.674 Gb (bilhões de barris) desde o ano de 1979; a produção acumulada do México é de 34 Gb. O volume óleo estimado para as reservas atuais (*volume of oil in place*) é de aproximadamente 33.7 Gb (Foucher, 2007).

A Baía de Campeche está situada nas proximidades da *Ciudad del Carmen*, localizada em uma ilha adjacente à Laguna de Término. Trata-se de um ecossistema bastante delicado, representado basicamente por mangues. Nesta região, as atividades pesqueiras são bem desenvolvidas; logo, este ambiente se faz bastante sensível à presença de óleo. Desta forma, o entendimento da dinâmica temporal e a distribuição espacial do fenômeno de exsudação natural de óleo (chapopoterias) são fundamentais para se determinar estratégias de monitoramento ambiental e a consequente gestão dos recursos naturais ali presentes.

O sensoriamento remoto orbital constitui uma importante ferramenta na obtenção de informações sobre recursos naturais que produz imagens sinópticas de vastas áreas, onde se pode investigar as características espectrais e texturais da superfície imageada. A região tropical da Baía de Campeche se apresenta, frequentemente, coberta por nuvens. Com isso, os sistemas de radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar – SAR*) são ideais para a obtenção de informações nesta região, por se tratarem de sistemas ativos que operam na faixa das microondas do espectro eletromagnético, o que lhes permite a obtenção de imagens em regiões com condições atmosféricas adversas.

Este estudo desenvolve bases técnico-científicas para estudos aplicados à indústria do petróleo em fronteiras exploratórias, objetivando maior potencial de sucesso em investimentos prospectivos. Elabora-se uma metodologia para a caracterização qualitativa de regiões favoráveis à exploração de petróleo, utilizando-se fundamentalmente da análise de imagens de sensoriamento remoto de microondas, dados geológicos, além de dados meteorológicos e oceanográficos. Serão empregadas técnicas de fusão de informações e conjuntos fuzzy na análise integrada de dados baseadas na disponibilidade de dados temáticos (*data-driven*) e no conhecimento técnico específico (*knowledge-driven*) através de uma modelagem exploratória dirigida pelos dados. A análise de trabalhos anteriores é fundamental para o sucesso do modelo exploratório. Neste modelo, a associação espacial entre os prospectos e o conjunto de dados estudados é utilizada para determinar a favorabilidade que certa camada de informação tem em discriminar áreas prospectáveis. O método dirigido pelo conhecimento (KDD - *Knowledge Discovery in Databases*) utiliza pesos subjetivos e um modelo aditivo, além de empregar ferramentas sofisticadas como por exemplo os conjuntos fuzzy. A principal característica destas técnicas de mineração de dados (*Data Mining*) é sua capacidade de lidar com a imprecisão, incerteza e subjetividade dos conceitos.

1.2 Motivação e justificativas

A caracterização qualitativa e quantitativa dos fenômenos de exsudações de hidrocarbonetos freqüentes na área de estudo é de fundamental importância para a definição de estratégias em campanhas exploratórias em regiões de fronteira e para dar subsídios a programas de monitoramento ambiental.

O “Projeto PEMEX” foi criado em 2000, sob a forma de projeto piloto. Este projeto foi intitulado *“Diseño de un sistema local de detección de emanaciones naturales y accidentales de hidrocarburos empleando imágenes de radar del satélite RADARSAT-1, en la Región Marina Noreste”*. Neste ano, o “Centro Brasileiro de Recursos Radarsat”, pertencente ao Programa de Engenharia Civil da COPPE (PEC/COPPE/UFRJ) iniciou um projeto em conjunto com a empresa canadense “RADARSAT International Inc.” e com a companhia mexicana estatal de petróleo “PEMEX”, a fim de demonstrar sua metodologia de detecção de óleo na superfície do mar. No ano de 2001, agora com um caráter de projeto pré-operacional, este projeto foi intitulado *“Programa regional para la detección de emanaciones naturales y derrames de petroleo utilizando imágenes del satélite RADARSAT-1 en el Golfo de México”*. Esta fase foi importante para a adequação da tecnologia às demandas operacionais desta empresa. Após o êxito nas duas etapas supracitadas, iniciou-se um contrato com vigência para os anos de 2002 a 2006. Este projeto intitula-se *“Monitoreo de emanaciones naturales y derrames de petroleo a través de imágenes del satélite RADARSAT-1 en el Golfo do México”*. Neste período, tal projeto foi subdividido em dois módulos, sendo o primeiro destinado ao monitoramento de derrames e exsudações de óleo e o segundo destinado ao aprofundamento técnico-científico de áreas correlatas ao objetivo deste projeto.

As etapas especiais de calibração progressiva foram realizadas nos anos de 2002, 2003, 2004 e 2006, abordando, respectivamente, os seguintes assuntos: (i) Otimização e calibração de dados meteorológicos e oceanográficos; (ii) Caracterização geoquímica de hidrocarbonetos associados às exsudações de óleo (chapotera de Cantarell); (iii) Caracterização geoquímica de hidrocarbonetos associados a exsudações naturais e experimentos controlados de derramamento de óleo e; (iv) Caracterização geoquímica de hidrocarbonetos e modelagem da dispersão de exsudações de óleo na superfície do mar. A partir de 2007, estabeleceu-se o método denominado DHGV (*Direct Hydrocarbon Geochemical Validation*), que consiste na caracterização geoquímica de óleos amostrados em plataformas de

produção da região da Sonda de Campeche, além de amostras de água oleosa da superfície do mar coletadas a partir da identificação de exsudações ou derrames de óleo durante o processamento das imagens SAR. Este projeto está em vigência no período de 2007 a 2011.

O foco da exploração de petróleo em ambiente *offshore* migrará inexoravelmente para as águas ultra-profundas, visto que as atividades de E&P nas regiões de plataforma continental no mundo estão atingindo seu estágio maduro. O padrão atual da indústria de petróleo encontra-se no desenvolvimento de prospectos em lâminas d'água de aproximadamente 1000 metros, mas já existem projeções para que, em 10 anos, a indústria atinja um patamar de atividades petrolíferas em lâmina d'água superior a 2500 metros. Sabe-se que o incremento da profundidade é diretamente proporcional aos custos de atividades petrolíferas. Entretanto, a detecção de exsudações de óleo em ambientes *offshore* pode reduzir os custos exploratórios em regiões de fronteira através da identificação de sistemas petrolíferos ativos (Willians e Lawrence, 2002).

O Golfo do México possui sessenta e um campos gigantes de petróleo, distribuídos nas porções Norte Americana e Mexicana. Esta região se torna extremamente atrativa à medida que a grande maioria das áreas de águas profundas e ultra-profundas não possui estudos mais detalhados ou descobertas significativas. Sabe-se que a margem passiva de Campeche foi palco de deformações tectônicas ocorridas entre o Mioceno Inferior e o Plioceno, como resultado da movimentação das placas Caribenha e Norte Americana (Mann *et al.*, 2003). Estudos geoquímicos realizados em óleos associados ao Thitoniano estão presentes em regiões *onshore* e *offshore* em reservatórios do Kimmeridiano ao Pleistoceno (Guzman-Vega e Mello, 1999). A presença de reservatórios múltiplos, dispostos verticalmente, contendo o mesmo tipo de óleo, indica um sistema petrolífero eminentemente Thitoniano com alimentação vertical ao longo da estratigrafia. A área de estudo contemplada neste projeto é considerada fronteira exploratória, pois atinge lâminas d'água de aproximadamente 4010 metros.

A tecnologia de sensoriamento remoto aqui empregada já dispõe de uma base de dados obtidos ao longo de 09 anos, tendo sido adquiridas uma média de 180 imagens por ano a partir do ano 2002. A metodologia utilizada no Golfo do México, apresentada no artigo intitulado "*Analysis of RADARSAT-1 data for offshore monitoring activities in the Cantarell Complex, Gulf of Mexico, using the unsupervised semivariogram textural classifier (USTC)*", foi premiada como melhor trabalho da sétima Conferência

internacional de sensoriamento remoto aplicado a ambientes marinhos e costeiros, realizada, em 2002, na cidade de Miami-FL, Estados Unidos da América.

A análise de dados em projetos operacionais tem por objetivo atender diretamente às demandas da indústria e, ao mesmo tempo, estabelecer um protocolo técnico-científico de *ranking* de exsudações a partir de técnicas de conjuntos *fuzzy*. Fatores que influenciam a dispersão de óleo no mar, tais como as correntes marinhas de sub-superfície e superfície e a ação do vento em águas superficiais, serão considerados.

1.3 Contribuição

- Determinação de um método eficaz de análise de dados multi-sensores para o cálculo do *ranking* de exsudações de óleo no Golfo do México. O fluxograma da Figura 1.2 ilustra a metodologia de detecção de exsudações de óleo por sensoriamento remoto e todos os processos envolvidos desde a aquisição de dados SAR até a etapa final de obtenção do ranking das exsudações. É importante notar a ênfase dada a versatilidade do método para aplicações em meio ambiente ou exploração e sugestões sobre a utilização dos resultados em fases posteriores das atividades exploratórias.
- Aplicação de técnicas de Lógica *Fuzzy* para a discretização espacial de fatores de confiabilidade relacionados ao *ranking* de exsudações de óleo: (i) fuzificação espacial de domínios tectônicos; (ii) fuzificação espaço-temporal de persistência de feições; (iii) fuzificação dos pesos atribuídos aos fatores de confiabilidade.
- Desenvolvimento de um sistema de detecção, caracterização, monitoramento e gerenciamento de informações relacionadas a fenômenos de exsudação de óleo (*seepage slicks*) em ambiente marinho e à ocorrência de derramamentos de óleo observados em regiões com atividades petrolíferas intensas.
- Caracterização de fenômenos diretamente relacionados à dispersão de manchas de óleo na coluna d'água e superfície do mar (ação de correntes na coluna d'água e superfície do mar e ação dos ventos na superfície do mar).

1.4 Objetivos

Em linhas gerais, esta tese visa extrair informações a partir de técnicas de KDD (*Knowledge Discovery in Database*) aplicadas em produtos obtidos da análise integrada de imagens de sensoriamento remoto de microondas, dados geológicos, além de dados meteorológicos e oceanográficos.

Ela tem como objetivo específico o desenvolvimento de um método semi-automático para o cálculo do *ranking* de exsudações de hidrocarbonetos (*seepage slicks*), que são observadas com frequência na superfície do mar do Golfo do México. Esta análise se utilizará de técnicas de processamento digital de imagens RADARSAT-1, análise espacial e fusão de dados em um sistema geográfico de informações e análise inteligente de dados através de técnicas de Lógica *Fuzzy*. Pretende-se obter, ao final deste estudo, um protocolo técnico-científico de *ranking fuzzy* de exsudações de hidrocarbonetos detectadas através de dados de múltiplas fontes como sistemas de radar de abertura sintética, dados geológicos e geofísicos, além de dados oceanográficos e meteorológicos auxiliares.

1.5 Visão geral da metodologia proposta

O fluxograma metodológico apresentado abaixo (Figura 1.1) apresenta o método ora proposto para a caracterização quantitativa e qualitativa por sensoriamento remoto de feições relacionadas à presença de óleo na superfície do mar. A caixa destacada em amarelo, intitulada “*Ranking de exsudações de óleo utilizando a teoria dos conjuntos fuzzy*” expandida na Figura 1.2, ilustra a metodologia de pesquisa proposta para este trabalho.

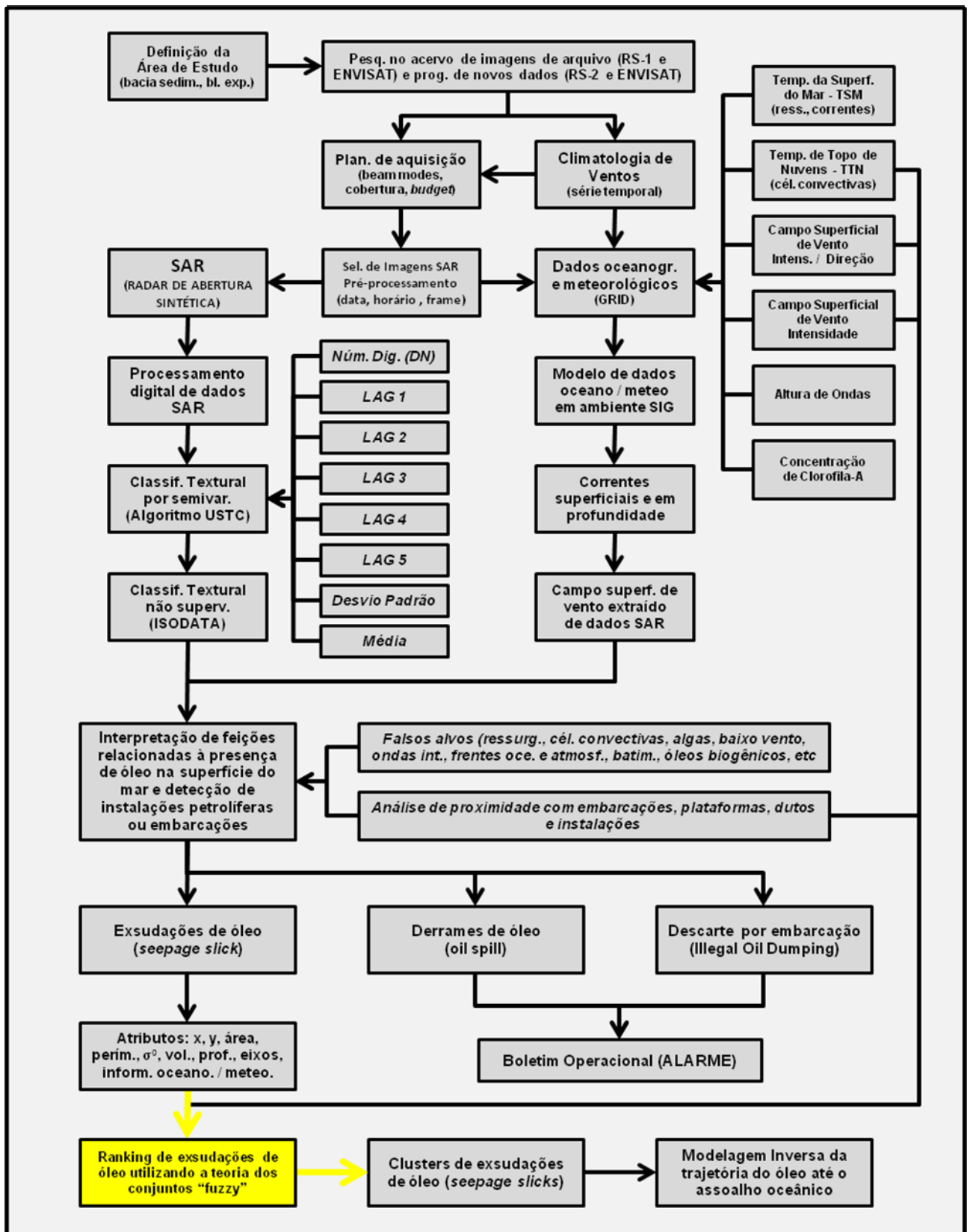


Figura 1.1 - Fluxograma metodológico para o processamento digital de imagens e análise espacial de exsudações de óleo através de técnicas de sensoriamento remoto por radar.

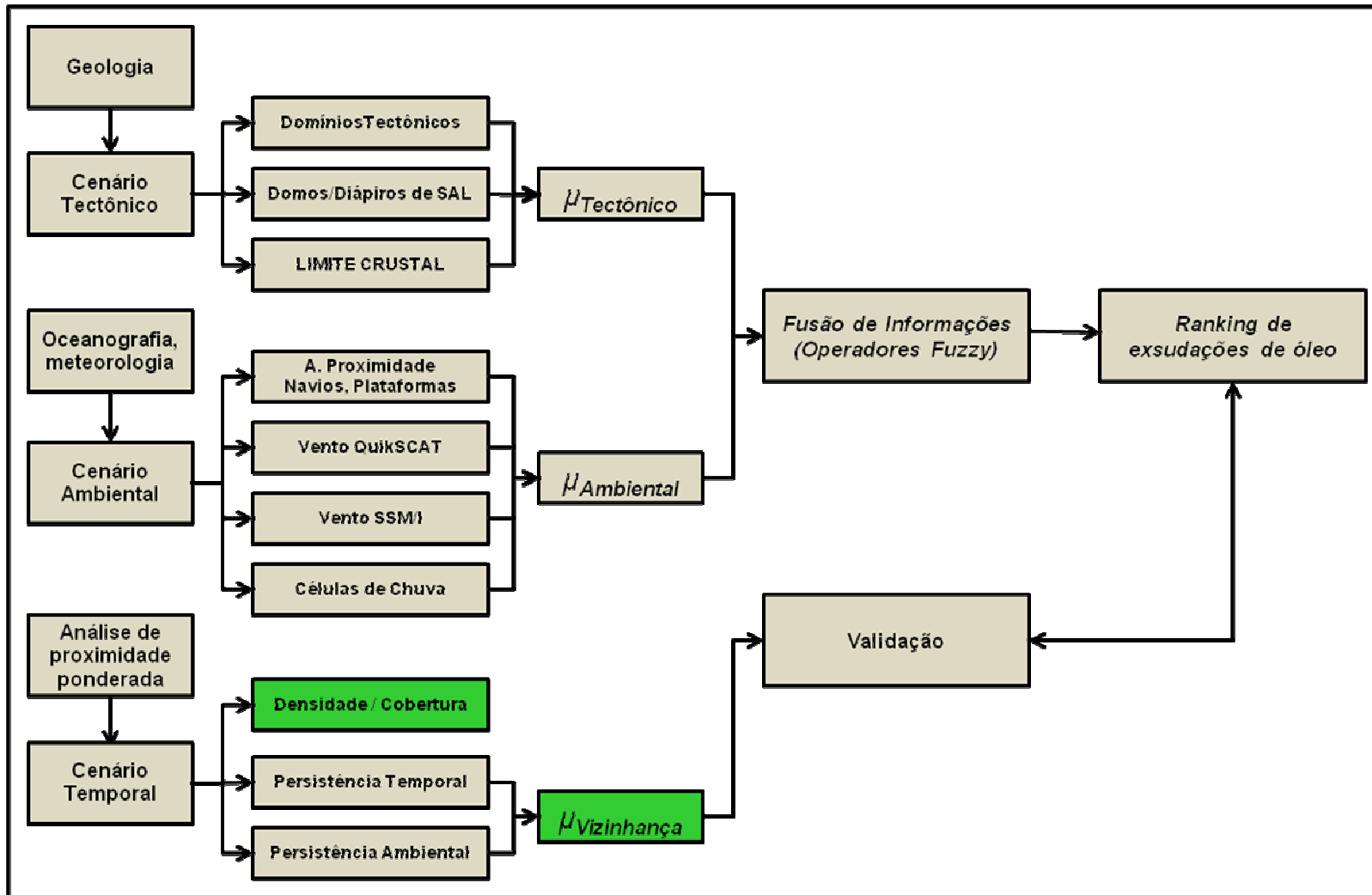


Figura 1.2 – Fluxograma específico da metodologia científica proposta para o ranking de exsudações de óleo como suporte a exploração petrolífera.

1.6 Estrutura do documento

O presente trabalho está estruturado em sete capítulos, referências bibliográficas e anexos. O capítulo 1 aborda o tema através dos aspectos gerais, motivação e justificativas para a realização do trabalho, contribuições, objetivos, visão geral da metodologia proposta e estrutura do documento. O capítulo 2 reúne as características fisiográficas da área de estudo, sua evolução tectônica e aspectos exploratórios e por fim algumas considerações sobre tectônica salina (halocinese) na indústria do petróleo. O capítulo 3 contempla os temas relacionados ao sensoriamento remoto aplicado a ambientes marinhos e costeiros, que contém o item (i) sensoriamento remoto por radar (Aspectos teóricos, Radar de Abertura Sintética em Oceanografia, Sistemas de radar de abertura sintética) O capítulo 4 trata da análise inteligente de dados e inclui os sub-itens (i) modelos baseados no conhecimento e (ii) teoria de conjuntos *fuzzy*. O capítulo 5 aborda a metodologia específica para o *ranking* de exsudações de óleo, sendo este subdividido nos itens (i) ranking quantitativo para exsudações de óleo em ambiente marinho; (ii) contextualização geológica (domínios tectônicos, halocinese e limite crustal); (iii) contextualização temporal (análise de proximidade e frequência de imageamento) e; (iv) contextualização ambiental (análise de proximidade de embarcações, campo de intensidade de vento superficial e sistemas de células convectivas). O capítulo 6 apresenta os resultados e discussões a respeito dos métodos de agregação utilizados para os diferentes cenários de obtenção do *ranking* das exsudações. O mesmo está dividido em construção e modelagem da base de dados, análise exploratória dos dados e cenários *fuzzy*. Este último se subdivide nos cenários I, II, III e IV. Posteriormente, o capítulo 7 traz as conclusões e recomendações. Finalmente, são apresentadas as referências bibliográficas e anexo. O anexo I (Detecção de hidrocarbonetos por sensoriamento remoto de microondas) faz um apanhado bibliográfico do assunto e está organizado da seguinte forma: (i) trabalhos anteriores; (ii) Classificação textural por semivariograma utilizando o algoritmo USTC e; (iii) sensoriamento remoto oceanográfico e meteorológico (temperatura da superfície do mar, células convectivas, campo superficial de ventos, altura significativa de ondas, sensoriamento remoto da cor do oceano e, correntes marinhas).

2 ÁREA DE ESTUDO

O Golfo do México ocupa grande parte da porção sudeste dos Estados Unidos. Sua porção mexicana faz fronteira a norte com as águas territoriais dos Estados Unidos em um paralelo localizado aproximadamente na foz do Rio Grande. As porções costeiras a leste, norte e noroeste do Golfo do México pertencem aos Estados Unidos da América, especificamente os estados da Flórida, Alabama, Mississippi, Louisiana e Texas; suas porções costeiras a sul e sudoeste, ao território Mexicano, especificamente os estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche e Yucatán; a sudeste, o mesmo faz fronteira com Cuba. O Golfo do México se conecta ao Oceano Atlântico através do estreito da Flórida e ao Mar do Caribe através do Canal de Yucatán (Figura 2.1).

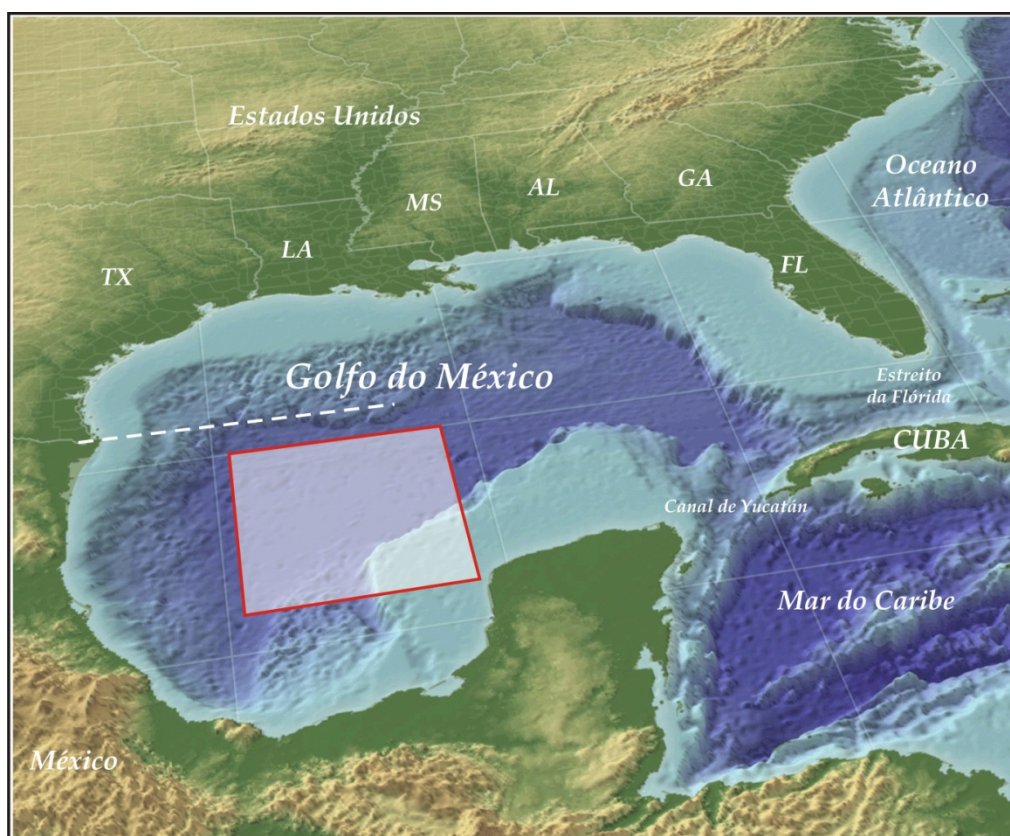


Figura 2.1 - Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Modificado de <http://www.gulfbase.org/facts.php>

O Golfo do México mede aproximadamente 1.600 km de leste a oeste e 900 km de norte a sul, com uma área aproximada de 1.5 milhões de km². A porção mais a sul do território norte-americano, o Cabo Sable, localizado no estado da Flórida, dista aproximadamente 5.700 km da Península do Yucatán, ou 380 km da costa cubana. As zonas litorâneas e entremarés representam 38% (< 20 m de profundidade). As áreas

da plataforma continental (< 180 m) e zona de talude (180 m a 3000 m) representam 22% e 20% respectivamente e, as regiões abissais, com lâminas d'água superiores a 3000 m, equivalem aos últimos 20%. A província batimétrica “*Sigsbee Deep*”, localizada no quadrante sudoeste, consiste na região mais profunda do Golfo, com profundidades que variam de 3.750 a 4.384 metros.

Devido à sua estrutura física, o Golfo e o Mar do Caribe são às vezes combinados e conhecidos como o Mar Mediterrâneo da América (Gore, 1992). Uchupi e Emeri (1968) dividiram o golfo em duas províncias geográficas distintas (plataformas terrígena e carbonática), enquanto que Antoine (1972) reconhece sete províncias: Bacia do Golfo do México (GOM), Nordeste do GOM, Plataforma Continental e Talude do Sul da Flórida, Banco de Campeche, Baía de Campeche, Plataforma Continental e Talude do Leste Mexicano, Norte do GOM.

Devido às altas temperaturas de suas águas, o Golfo do México é alvo de intensos furacões atlânticos, como, por exemplo, o Katrina, de categoria 5 SSHS (*Saffir-Simpson Hurricane Scale*), ocorrido em 2005. Outra área de notório interesse no Golfo do México é a cratera de impacto por asteróide de Chicxulub, gerada há 65 milhões de anos na Península de Yucatán. O seu centro está localizado no paralelo de 21°20'N e no meridiano de 89°30'W, com um diâmetro de 170 km. Os mapas em perspectiva do local, ilustrados na Figura 2.2, mostram as variações de campos magnéticos formando uma estrutura de múltiplos anéis chamada de Chicxulub, cujo nome herdou de uma aldeia localizada perto de seu centro. A bacia de impacto é soterrada por várias centenas de metros de sedimentos. Esta imagem mostra a bacia vista obliquamente de aproximadamente 60° sobre a superfície que aparece ao norte, com iluminação artificial do sul. A imagem cobre 88° a 90.5° de longitude Oeste e 19.5° a 22.5° de latitude Norte. Cientistas de NASA acreditam que um asteróide 10 a 20 quilômetros (6 a 12 milhas) de diâmetro produziu esta bacia de impacto. O asteróide colidiu em uma região rica em enxofre da Península de Yucatán e, após o choque, foram produzidas um bilhão de toneladas de detritos. A escuridão prevaleceu por aproximadamente um ano e meio depois da colisão. Isto fez com que as temperaturas globais mergulhassem em uma nova idade do gelo. Acredita-se que metade das espécies da Terra foi extinta, inclusive os dinossauros. Estudos estratigráficos e mineralógicos em sequências rochosas localizadas no limite entre o Cretáceo e Terciário, pertencentes ao campo de Canterall, relacionam a formação destas unidades à estrutura de impacto de Chicxulub (Grajales-Nishimura *et al.*, 2000).

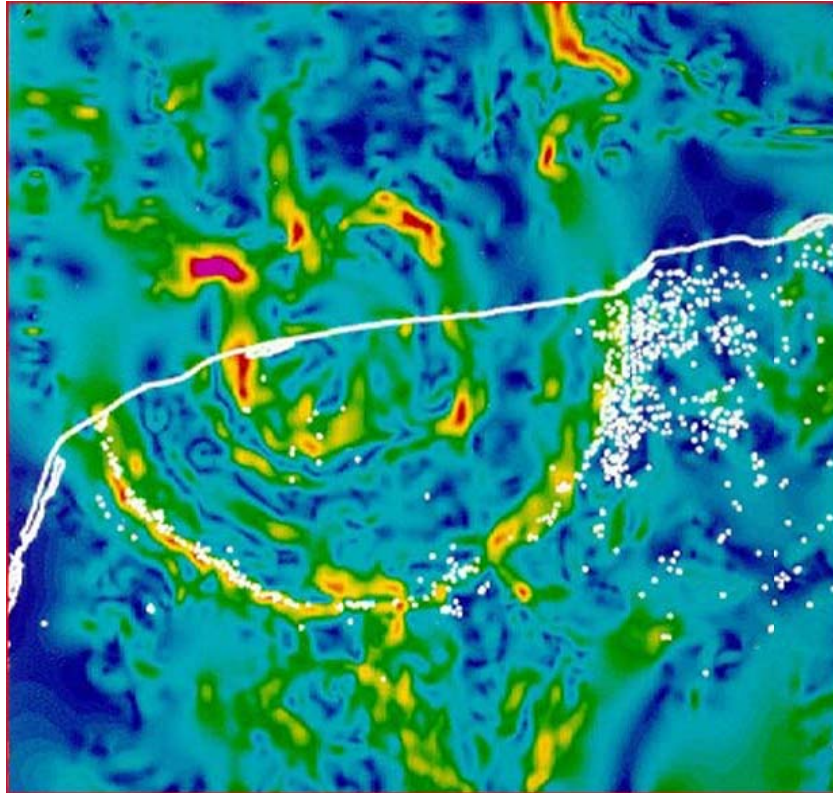


Figura 2.2 - Mapa de anomalia gravimétrica da Cratera de impacto por asteróide de Chicxulub. As cores vermelho e amarelo indicam altos gravimétricos; as cores verde e azul indicam baixos gravimétricos. A linha branca representa o limite costeiro da Península de Yucatán. Pontos brancos representam a localização de cenotes. Fonte: <http://www.thunderbolts.info/tpod/2006/arch06/060130crater.htm>

Outra feição fisiográfica de destaque localizada na porção sul do Golfo do México é a Laguna de Términos, que está conectada às águas do Golfo pelas extremidades da *Isla del Carmen*. A Laguna de Términos, que é a maior do México, ocupa uma área aproximada de 112,5 km² (Figura 2.3).



Figura 2.3 - Laguna de Términos, Estado de Campeche, porção sul do Golfo do México. Fonte: www.ecosur.mx

A área de estudo desta pesquisa se concentra na porção norte da “Región Marina Noreste (RMNE)” e “Región Marina Suroeste (RMSO)”, porção centro-sul do Golfo do México, região limítrofe com as águas territoriais norte-americanas (Figura 2.4). A RMNE abriga os campos de Cantarell, Ku-Maloob-Zaap e EK-Balam, sendo que somente o campo de Cantarell responde por 60% da produção mexicana de petróleo, com uma média de 2,0 milhões de barris ao dia.



Figura 2.4 - Mapa de localização das regiões administrativas de atividades petrolíferas da PEMEX no Golfo do México. Fonte: www.pep.pemex.com

A análise integrada dos dados foi realizada nos sistemas de coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*) e geográfica (*Geographic Coordinate System*), ambos com o *Datum* WGS-1984. Os dados batimétricos foram gridados e processados a partir dos arquivos de domínio público gerados pelo ETOPO 2 (Sandwell e Smith, 1992 e Sandwell *et al.*, 2001). Este processamento objetivou o realce de feições de fundo marinho (Figura 2.5). A área de estudo propriamente dita limita-se pelas coordenadas ilustradas na Tabela 2.1, ocupando uma área de aproximadamente 196.230 km² e profundidades que chegam a 4010 m de lâmina d’água.

Tabela 2.1 - Coordenadas dos vértices da área de estudo (ver localização na Figura 2.5).

Vértice	Longitude (grau decimal)	Latitude (grau decimal)	Longitude (geográfica)	Latitude (geográfica)
1	-94,74571	20,83711	94° 44' 45" W	20° 50' 14" N
2	-94,74571	25,04321	94° 44' 45" W	25° 02' 36" N
3	-90,56050	25,04321	90° 33' 38" W	25° 02' 36" N
4	-90,56050	20,83711	90° 33' 38" W	20° 50' 14" N

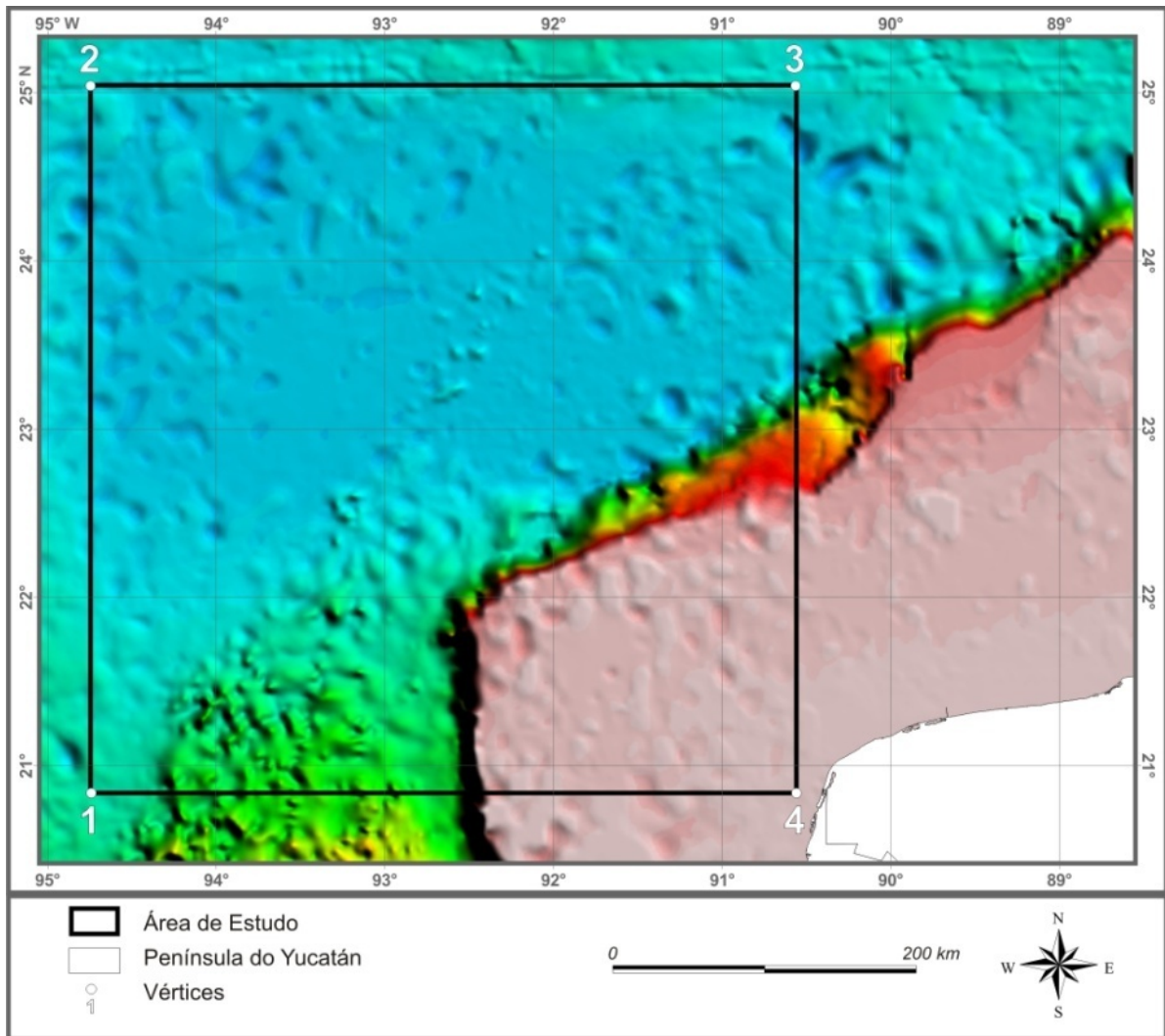


Figura 2.5 - Área de estudo localizada na porção mexicana do Golfo do México sobreposta à batimetria sombreada e colorizada. Iluminação a partir de N45E; elevação solar de 55°.

2.1 Evolução tectônica e aspectos exploratórios

A evolução tectono-sedimentar da Bacia do Golfo do México, ilustrada na Figura 2.6, teve seu início marcado por um episódio de rifteamento do Triássico Superior ao Jurássico Médio. Trabalhos correlatos podem ser encontrados em Bartolini *et al.* (2001); Harry e Londono (2004) e Morán-Zenteno (1994). A deposição de espessas camadas de sal durante a atenuação do processo de rifteamento ocorreu em grande parte da bacia, sendo que este, após sofrer contínuas remobilizações, constitui o principal agente na migração de hidrocarbonetos da região. A abertura do oceano ocorreu durante o Jurássico Superior (Figura 2.6C). Os processos iniciais de sedimentação pós-*rift*, ocorridos entre o Jurássico Médio e o Cretáceo Inferior, consistiram basicamente em uma plataforma carbonática de ambiente marinho raso na porção norte da Bacia, estando esta posicionada acima de uma crosta continental espessa, com fluxos periódicos de sedimentos siliciclásticos (Figura 2.6C, 2.6D). Esta característica é responsável pela presença de importantes reservatórios na porção *onshore* da bacia. Na porção de águas profundas da Bacia do Golfo do México, a subsidência termal pós-*rift* causou uma taxa de subsidência mais elevada que as regiões plataformais a norte. Por esta razão, no Cretáceo Médio a porção de águas profundas do Golfo permaneceu com lâminas d'água superiores a 1000 metros. A compartimentação estratigráfica da porção de águas profundas do golfo, no período do Jurássico Médio ao Cretáceo Inferior, compreende folhelhos e calcários de águas profundas, que constituem as rochas geradoras da província de águas profundas do Golfo do México. Durante o Cenozóico Inferior, grandes extensões de depocentros de águas rasas a siliciclásticos continentais se estabeleceram na porção noroeste da Bacia do Golfo do México, refletindo a movimentação sedimentar ocorrida durante a orogenia laramideana nos Estados Unidos da América e México (Martin, 1978). Estes depósitos constituem importantes reservatórios nas porções *onshore* e *offshore* da Bacia do Golfo do México. Durante o Mioceno, estes depocentros migraram para leste, fazendo com que a carga sedimentar da porção central da América do Norte fosse transportada para a região da Louisiana (porção centro-norte da Bacia do Golfo do México). Os sedimentos marinhos batiais consistem em sistemas turbidíticos depositados em uma série de mini-bacias localizadas no topo e intercaladas entre os corpos salinos alóctones. Estes turbiditos são os principais reservatórios da subprovíncia de águas profundas da porção norte do Golfo do México. A intensa carga de sedimentos Cenozóicos na bacia resultou na deformação dos corpos salinos autóctones originais em um ou mais níveis alóctones de geometrias variadas ao longo da bacia.

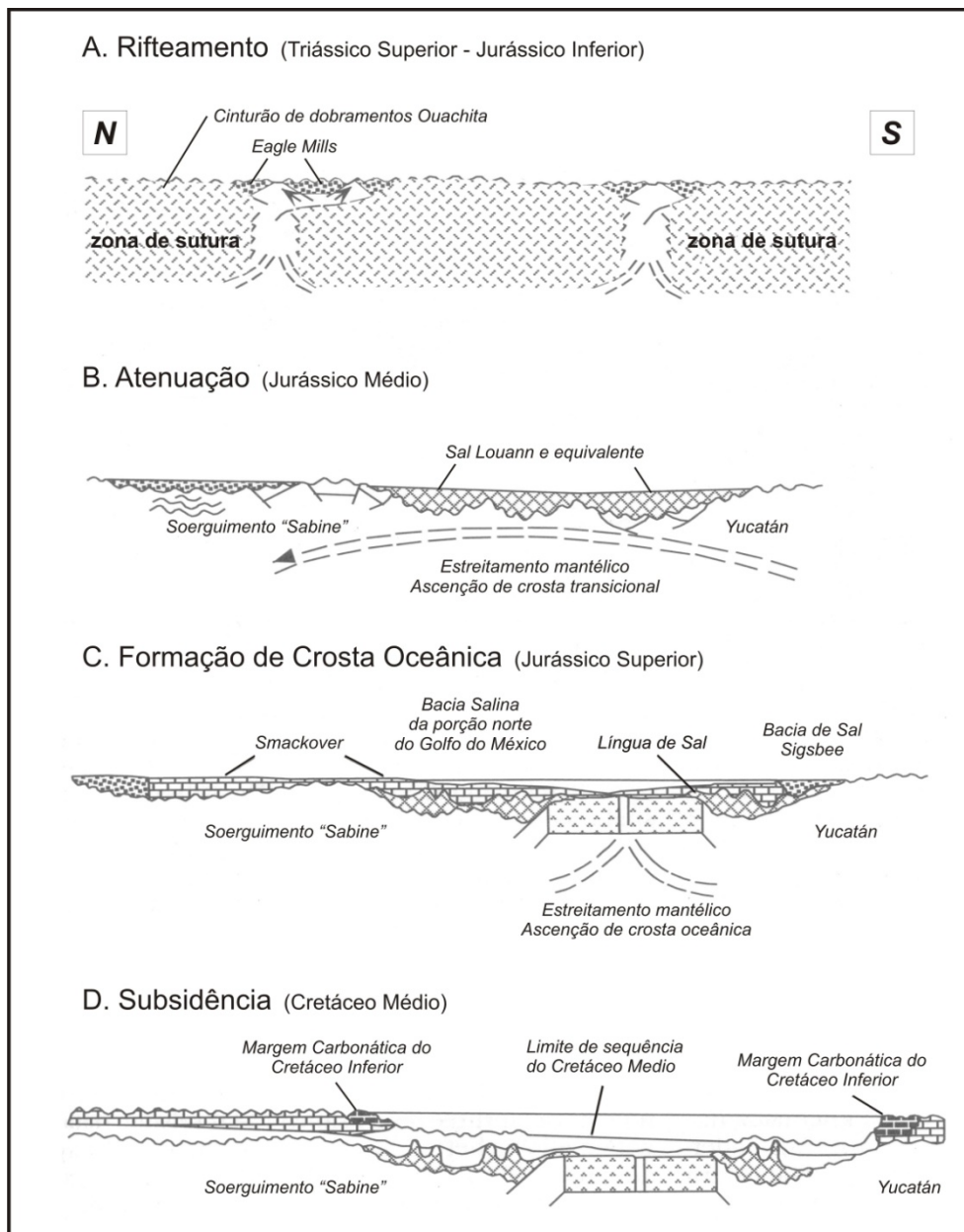


Figura 2.6 - Seção geológica esquemática ilustrando a evolução da Bacia do Golfo do México entre o Triássico Superior e o Jurássico Médio: (A) Triássico Superior – Jurássico Inferior, (B) Jurássico Médio, (C) Jurássico Superior, e (D) Cretáceo Médio. Fonte: Modificado de Buffler 1991, in Weimer 1998.

A distribuição original dos depósitos de sal no Golfo do México está provavelmente relacionada à distribuição areal da crosta continental. Segundo Angeles-Aquino *et al.*, (1994) a Bacia Salina de Campeche foi depositada no Calloviano (164-159 Ma) e remobilizada durante o Oligoceno (33.9 Ma), sendo que o período deformacional se estendeu até o Mioceno Inferior (23.0 Ma), Figura 2.7.

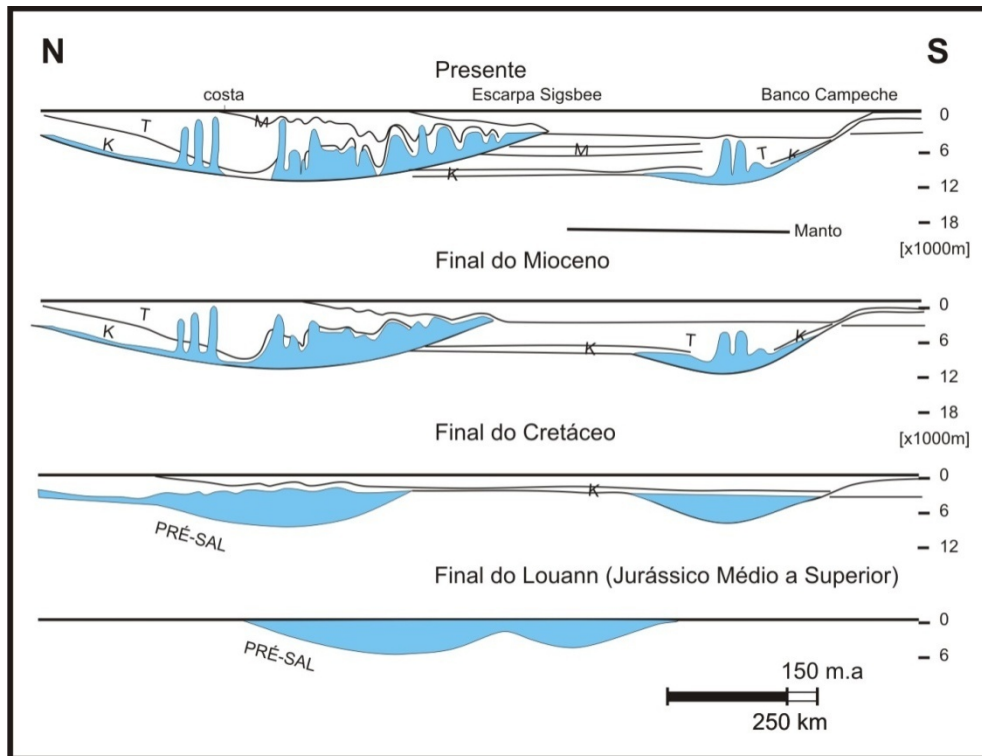


Figura 2.7 - Modelo evolutivo para a formação de estruturas autóctones e alóctones no Golfo do México, com a deposição do Sal Louann em depocentros que foram separados ao final do Jurássico, e interpretação de línguas de sal alóctones associadas a progradação sedimentar maciça do final do Mioceno. Fonte: Mohriak *et al.*, 2008.

O entendimento dos eventos tectônicos que contribuíram para a evolução do Golfo do México baseia-se na precisão da definição do tamanho, forma e extensão de estruturas regionais situadas na bacia e em sua margem. A integração de dados de gravimetria e sísmica de refração têm sido utilizadas desde os anos 60, a fim de se interpretar a compartimentação tectono-estratigráfica da bacia sedimentar do Golfo do México. A partir da forma atual do GOM, presume-se que pelo menos um limite crustal estaria ativo durante a fase de abertura da bacia (Bird *et al.*, 2005), Figura 2.8.

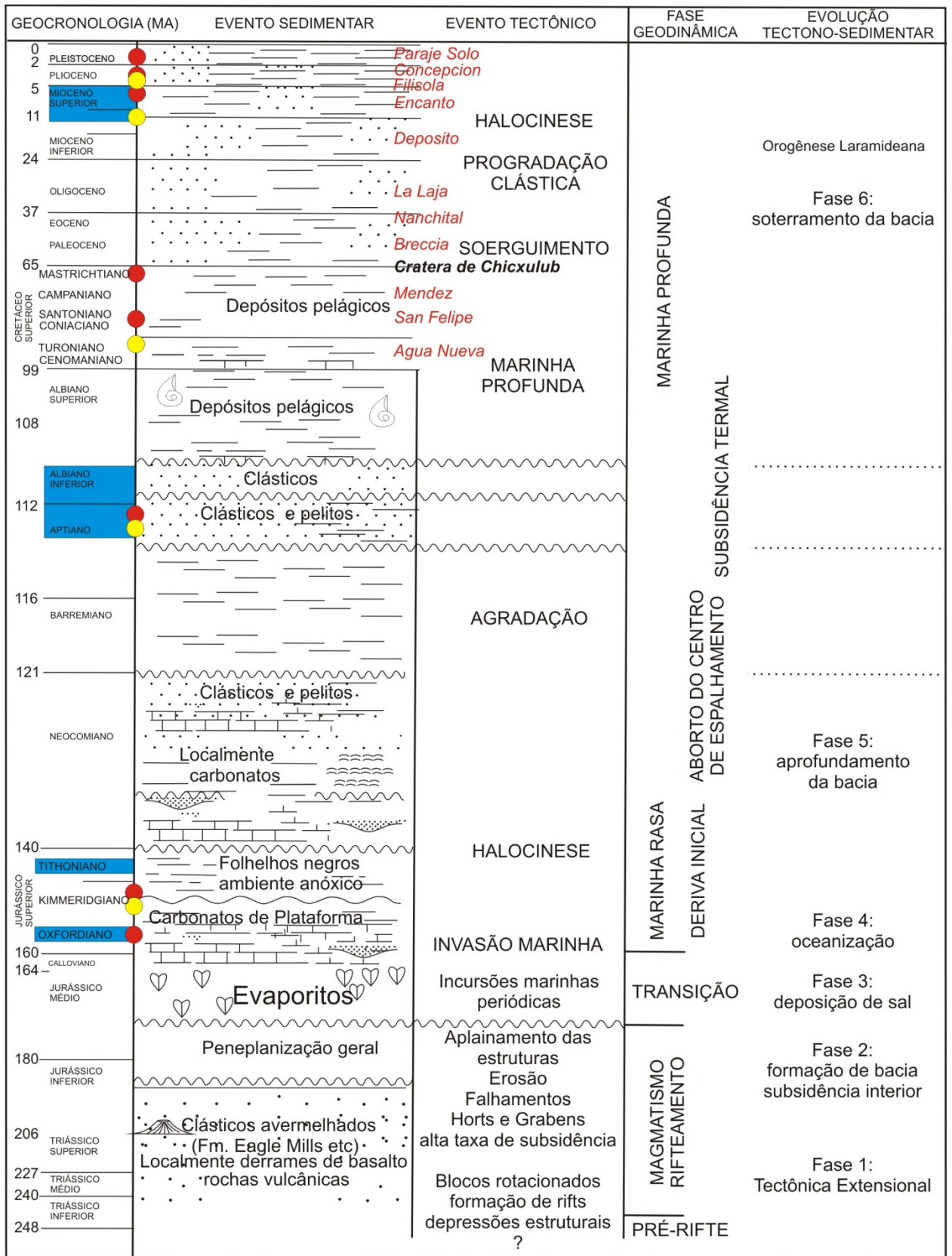


Figura 2.8 - Coluna estratigráfica generalizada da Bacia Sedimentar do “Sureste” ilustrando as rochas reservatório (círculos) e rochas geradoras (retângulos azuis). Os círculos vermelhos representam acumulações de óleo e os círculos amarelos de gás. Fonte: Modificado de Guzman-Vega e Mello, 1999 e Mohriak *et al.*, 2008.

O limite crustal no Golfo do México tem sido interpretado de formas distintas por inúmeros autores, a partir de sísmica de reflexão, gravimetria e magnetometria, além de técnicas de reconstrução cinemática. Este limite é coincidente com a isóbata de 3000 m de lâmina d'água exceto quando o mesmo intercepta de forma subjacente a *Nappe* de Sal *Sigsbee*. Bird *et al.*, 2005 descreveram a presença de três anomalias gravimétricas positivas na porção oeste do Golfo do México, denominadas *Keathley Canyon* (KC), *Yucatán Parallel* (YP) e Tamaulipas-Golden Lane-Chiapas (TGLC) (Pindell, 1985 *in* Bird *et al.*, 2005), Figura 2.9.

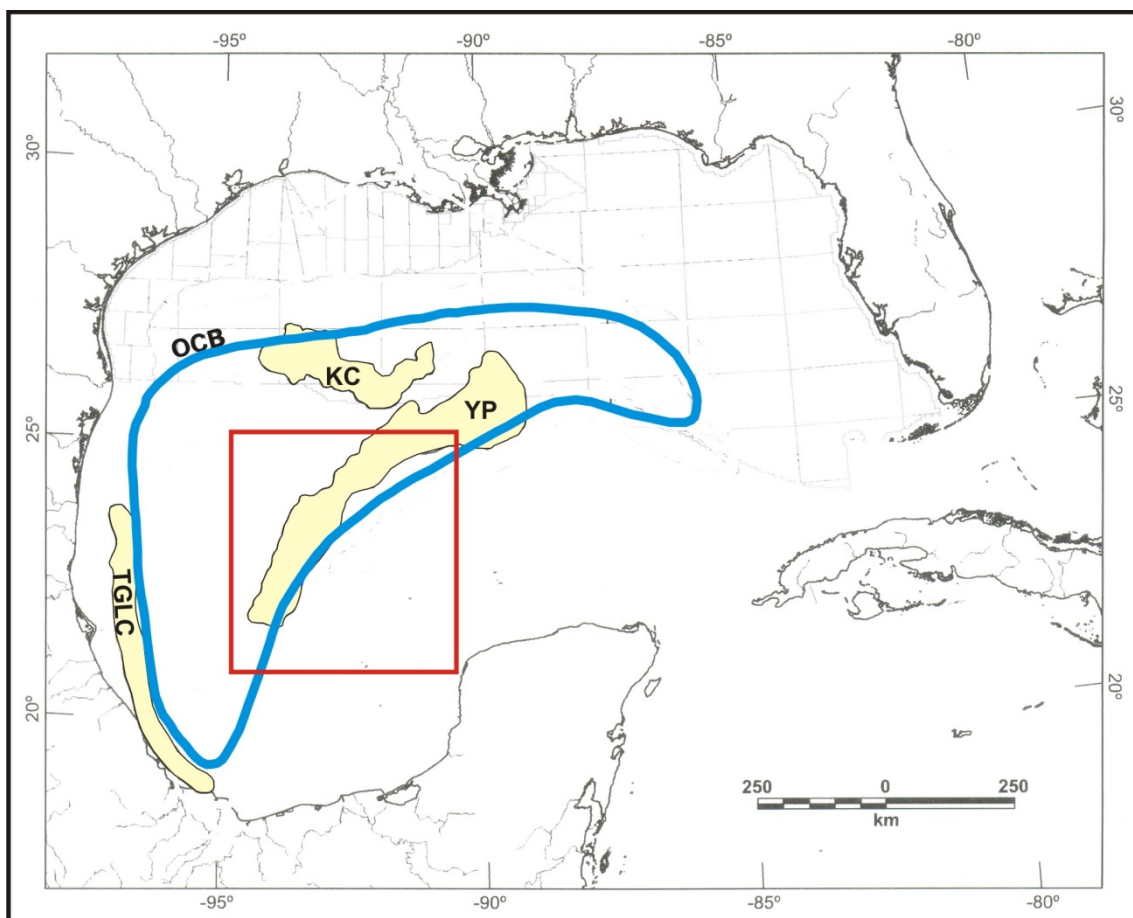


Figura 2.9 - Limite crustal (*ocean-continent boundary*) representado em azul e estruturas profundas do embasamento interpretadas a partir de dados gravimétricos e refração sísmica, sendo TGLC (Cordilheira marginal Tamaulipas-Golden Lane-Chiapas); YP (Estrutura paralela Yucatán); KC (Estrutura Keathley Canyon) e área de estudo em vermelho. Fonte: Modificado de Bird *et al.*, 2005.

Falhas de crescimento são estruturas onipresentes em diferentes bacias sedimentares do mundo, especialmente em bacias onde há processos de halocinese envolvidos ou em bacias preenchidas com sedimentos clásticos cenozóicos depositados próximos à

foz de grandes sistemas de drenagem, tais como o Rio Nilo, Amazonas, Gangee Mississippi (Watkins *et al.*, 1996).

As províncias sedimentares situadas na porção mexicana do Golfo do México (*Cuenca del Golfo de Mexico*) abrangem inúmeras bacias sedimentares produtoras de hidrocarbonetos (Figura 2.10). Estas bacias possuem características geológicas e exploratórias distintas que serão sumariadas adiante. São elas as Bacias de Burgos, Tampico-Misantla, Vera Cruz e Sureste (*Salina del Istmo*, Comalcalco-Chiapas-Tabasco, Macuspana, Sonda de Campeche, além das províncias da região litorânea de Tabasco). A Plataforma do Yucatán está localizada a Leste. A região de águas profundas e ultra-profundas do Golfo do México pode ser subdividida nas seguintes províncias: Franja Distensiva, Delta do Rio Bravo, Franja de Sal Alóctone, Cinturão de Perdido, Cordilheiras Mexicanas, Canyon de Vera Cruz, Salina do Golfo Profundo e Planície Abissal (Guzmán e Marquez-Dominguez, 2001).

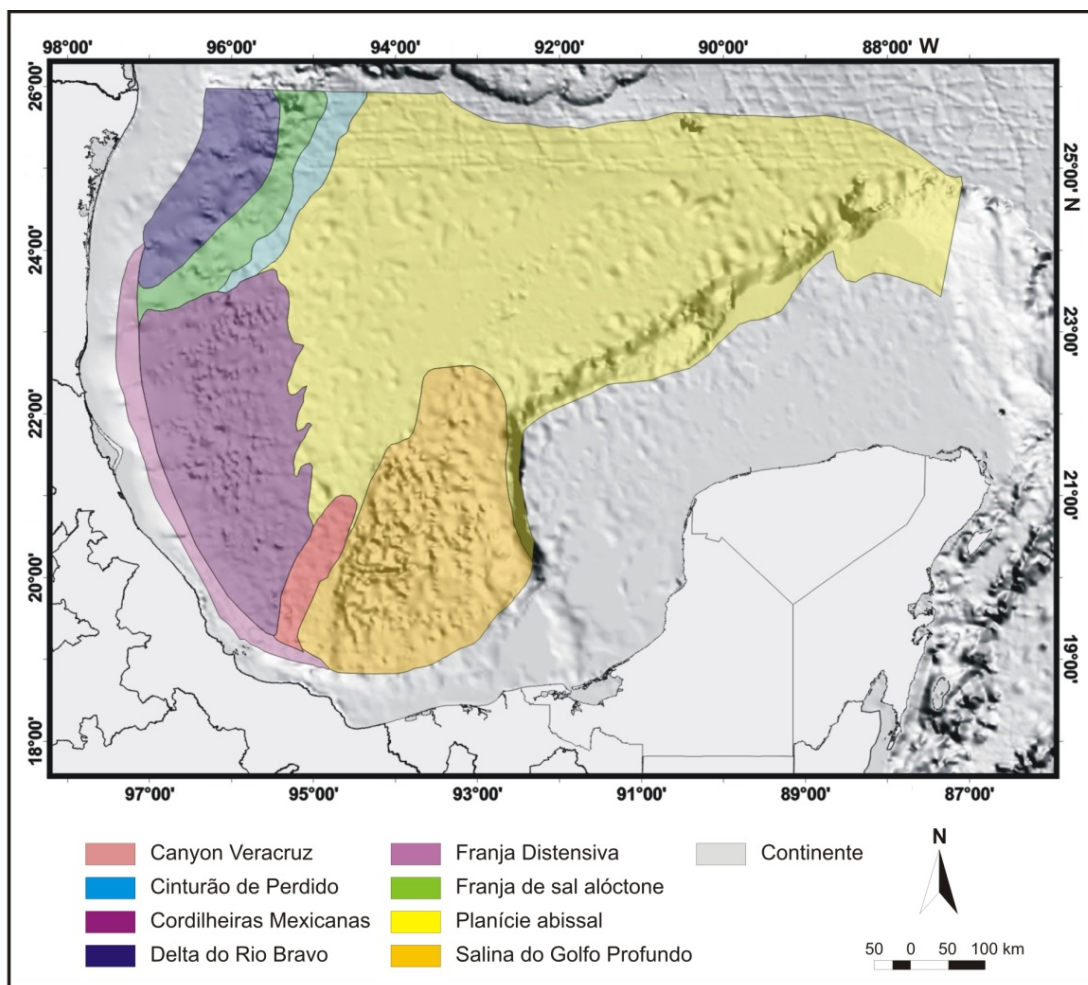


Figura 2.10 - Mapa das províncias de águas profundas do Golfo do México. Fonte: Modificado de Guzmán e Marquez-Dominguez, 2001.

A profundidade do embasamento extraída de dados magnéticos foi compilada para as regiões da Sonda de Campeche e Plataforma do Yucatán. É importante chamarmos atenção para feições estruturais representativas de baixos do embasamento localizados dentro dos limites da Península do Yucatán, entre os paralelos de 21° e 23° de Latitude Norte e meridianos de 88° e 88°30' de Longitude Oeste. Informação relevante para estas feições consiste na estimativa de profundidades do embasamento superiores a 6000 metros (Figura 2.11).

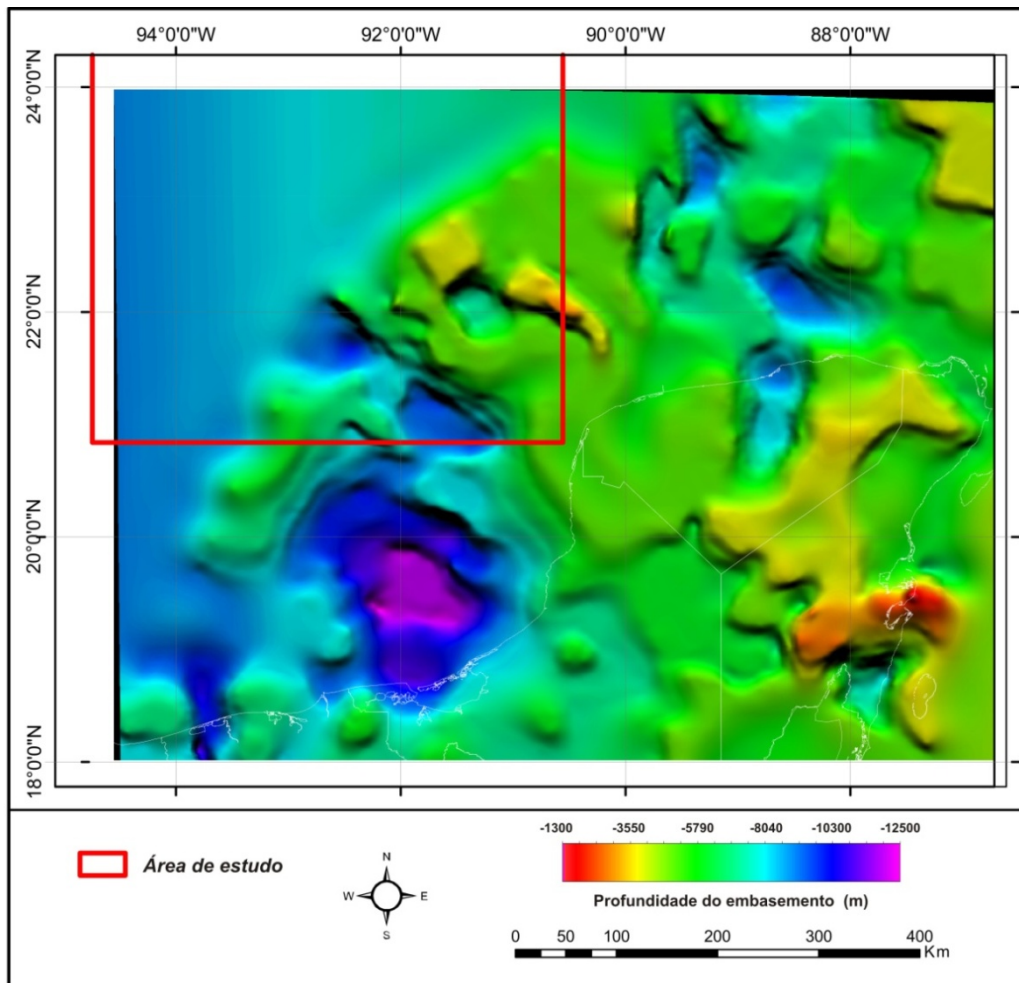


Figura 2.11 - Mapa da profundidade do embasamento obtido a partir de dados aeromagnéticos. Fonte: Modificado de Miranda *et al.*, 2001a.

Registros demonstram que aproximadamente 45% das bacias sedimentares mundiais produtoras de petróleo apresentam fenômenos relacionados à presença de exsudação de hidrocarbonetos que, de alguma forma, atingem a superfície. Entretanto, sabe-se que somente em tempos mais recentes, pesquisadores têm prestado maior atenção em exsudações de hidrocarbonetos. As exsudações de hidrocarbonetos são, antes de tudo, o final dos caminhos de migração e o único meio de se estimar taxas de fluxo e composição dos hidrocarbonetos. Link (1952) realizou uma importante revisão

bibliográfica sobre exsudações, onde reconhece cinco classes: (i) exsudações originadas a partir de estruturas homoclinais inclinadas; (ii) petróleo advindo de afloramentos expostos de rochas geradoras maduras; (iii) escape de petróleo a partir do intemperismo ou denudação de armadilhas; (iv) exsudações e impregnações associadas a descontinuidades e; (v) exsudações associadas a corpos intrusivos e diápiros.

Clarke e Cleverly (1991) agruparam as exsudações de petróleo em três classes: (i) exsudações inertes ou inalteradas, (ii) exsudações alteradas por processos de dispersão superficial e, (iii) exsudações alteradas por processos em sub-superfície. Para eles, o fenômeno "exsudação" é possível de ocorrer em apenas um espectro restrito de cenários geológicos.

Segundo Abrams (1996), as exsudações podem ser ativas ou passivas. As exsudações ativas acontecem em tempo presente e são indicativas da presença de sistemas petrolíferos ativos evidenciados pela migração de hidrocarbonetos a partir de rochas geradoras e/ou rochas reservatório. Neste caso, há presença de excelentes condições para a existência de processos de migração e/ou péssimas condições (eficiência) para o selo. Por outro lado, as exsudações passivas consistem em ocorrências incipientes de relictos de exsudações em áreas com a presença de processos passivos de geração de hidrocarbonetos em regiões marcadas por péssimas condições para processos de migração e/ou excelentes condições para a existência de uma rocha selante eficaz.

Uma vez que se possam estabelecer os fatores geológicos que governam a presença de exsudações de petróleo, as recompensas exploratórias e científicas serão consideráveis. O entendimento do comportamento das exsudações é fundamentalmente um problema geológico. Entretanto, a literatura recente tem enfatizado a importância da geoquímica das exsudações de petróleo. Tópicos relacionados à (i) geologia e ambientação superficial da ocorrência de exsudações; (ii) taxas de fluxo de exsudações e suas variações; (iii) fatores que afetam as variações do fluxo das exsudações (perturbações sísmicas, clima, etc.); (iv) composição química das exsudações e suas variações; (v) biologia das exsudações; (vi) mineralogia dos caminhos de migração. Outros trabalhos podem ser encontrados em Kornacki *et al.*, 1994; MacDonald *et al.*, 1996; Reilly *et al.*, 1996; Scantland e Biegert, 1996; Schumacher e Abrams, 1996; Thrasher *et al.*, 1996; Rostirolla, 1997; Sassen, 1998; Cameron *et al.*, 2000; Nikraves, e Aminzadeh, 2001; Orange *et al.*,

2001; Hood *et al.*, 2002; MacDonald *et al.*, 2002; Peters e Fowler, 2002; Williams *et al.*, 2002; De-Beukelaer *et al.*, 2003; MacDonald *et al.*, 2003; MacDonald *et al.*, 2004; Leifer *et al.*, 2006; Zatyagalova *et al.*, 2007; Ansari *et al.*, 2009.

A Sonda de Campeche está localizada na plataforma continental dos estados de Campeche e Tabasco, entre 20 e 200 metros de lâmina d'água, e constitui a maior província petrolífera do hemisfério ocidental (Villalón, 1998). A Sonda de Campeche consiste em parte da porção oceânica da Bacia do Sureste, responsável por mais de 80% das reservas mexicanas de petróleo. A presença de uma proeminente exsudação de óleo, localizada 70 km a norte da cidade "*Ciudad del Carmen*", levou à companhia estatal de petróleo mexicana PEMEX a definir a locação do primeiro poço exploratório desta região, denominado CHAC-1. Segundo Carmalt e St. John (1986), a estrutura perfurada em CHAC-1 se tornou posteriormente o Complexo de Cantarell, o campo mais prolífico das Américas e o oitavo do Mundo.

O Golfo do México consiste em uma das grandes províncias petrolíferas mundiais com uma história de produção de petróleo de mais de 100 anos. Mais de 230 bilhões de barris de óleo equivalente (Bboe) foram descobertos no Golfo em meados da década de 90. A seqüência sedimentar cenozóica tem se mostrado como principal reservatório, tendo gerado 130 Bboe. Em seguida, as unidades do Cretáceo, com volumes superiores a 85 Bboe. Por fim, as seções Jurássicas, com reservas descobertas que somam 15 Bboe. Estimativas atuais apontam a existência de 100 Bboe a serem descobertos.

A análise geoquímica de óleos e rochas obtidas na região sudeste do México levou à identificação de quatro famílias de petróleo relacionadas a idades e sistemas deposicionais distintos: Oxfordiano (Jurássico Superior), Tithoniano (Jurássico Superior), Cretáceo Inferior e Terciário (Guzman-Vega e Mello, 1999). Rochas geradoras associadas ao Jurássico (Oxfordiano e Tithoniano) e Cretáceo Inferior estão associadas a ambientes marinhos carbonáticos. Por outro lado, rochas geradoras relacionadas a óleos terciários correspondem a sistemas deposicionais siliciclásticos marinhos e deltaicos (Figura 2.12).

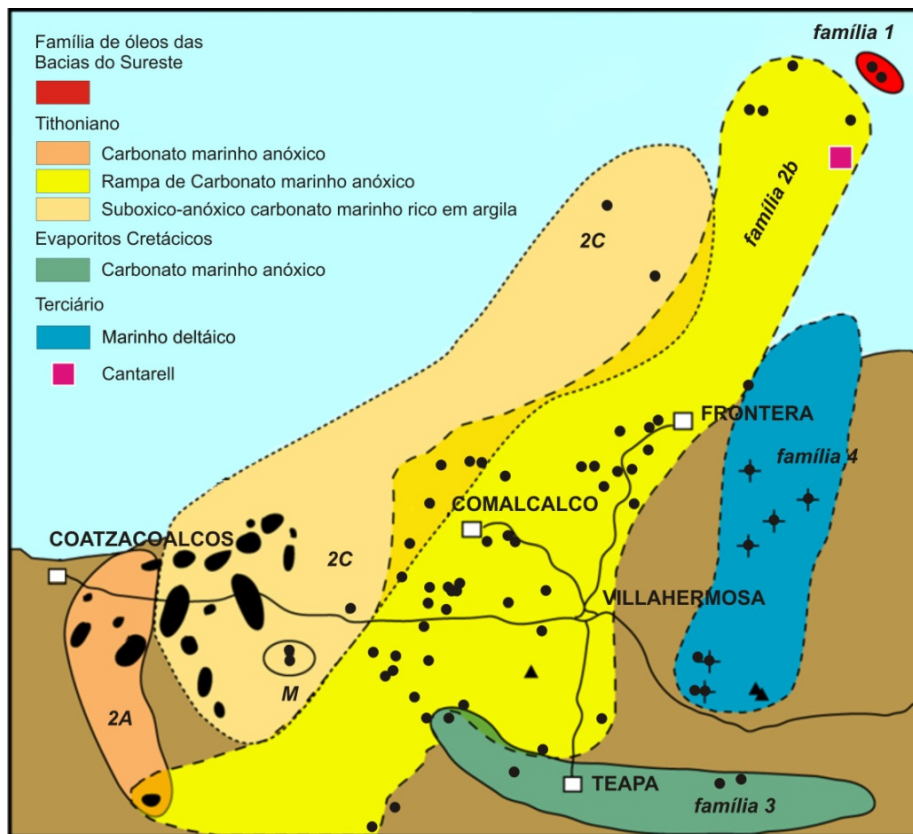


Figura 2.12 - Mapa com a localização espacial das famílias de óleos encontrados no Golfo do México, segundo resultados de análises geoquímicas de óleos e rochas. Fonte: Modificado de Guzman-Vega e Mello, 1999.

Os óleos relacionados ao Tithoniano ocorrem nas porções *onshore* e *offshore*, em diferentes níveis da compartimentação estratigráfica do Golfo (Kimmeridiano ao Pleistoceno), em reservatórios marinhos siliciclásticos e carbonáticos. Estas rochas geradoras constituem a principal fonte de hidrocarbonetos da Sonda de Campeche (Medrano, 1996, e Zumberge *et al.*, 1998).

Muitos poços foram perfurados na plataforma carbonática da Península do Yucatán, sendo que nenhum deles resultou em poço produtor (Viniegra-O, 1981). Rochas Jurássicas, incluindo a sequência do Tithoniano, podem não estar presentes na Península do Yucatán, que supostamente era uma região emersa durante o Mesozóico. Assim, a ausência de óleo, pode ser atribuída, dentre inúmeras razões, à ausência de rochas geradoras carbonáticas do Tithoniano na Península. No entanto, a interpretação de dados de magnetometria sugere a existência de embasamento com profundidade superior a 6000 metros nos limites da Península de Yucatán (Figura 2.11), que poderiam corresponder a depocentros com rochas geradoras do Jurássico. Os depósitos salinos Callovianos do Golfo do México estão localizados no limite oeste da Península do Yucatán. A tectônica salina desempenha papel fundamental nos

processos de migração e acumulação de hidrocarbonetos na Sonda de Campeche. O regime compressional do Mioceno Médio intensificou os processos de fluidização de corpos salinos, gerando desta forma, inúmeras estruturas (falhas e anticlinais) nesta região. Segundo Angeles-Aquino *et al.* (1994), a camada espessa de sal formou uma superfície de descolamento (*décollement zone*). Ao longo destas estruturas complexas, como por exemplo, Cantarell, o sal foi submetido a esforços compressionais, resultando na formação de corpos diapíricos (Cserna, 1989). O período extensional do Mioceno Médio ao Mioceno Superior na Sonda de Campeche está relacionado a uma intensa tectônica salina e à inversão de falhas, sendo que a superfície de descolamento está situada no Mioceno Médio.

Existem ainda depósitos sedimentares erodidos e dolomitizados, formados a partir dos detritos originados da borda do banco carbonático de Yucatán. O sistema de finas micro-fraturas localizadas na borda do banco carbonático do Yucatán, mais propriamente na zona de tálus sedimentar, é responsável pela formação dos espessos e interconectados reservatórios da maioria dos campos petrolíferos da Sonda de Campeche (Viniestra-O, 1981). A permeabilidade e porosidade dos reservatórios carbonáticos são originados a partir dos seguintes fatores: presença de sequências detritais não dolomitizadas, originadas a partir da borda do banco carbonático; presença de processos de dissolução carbonática a partir da ação de águas meteóricas; dolomitização dos carbonatos originais a partir da ação de águas meteóricas; intenso fraturamento causados por falhamentos, principalmente pela ação da tectônica salina (diapirismo dos corpos Callovianos).

A Figura 2.13 ilustra a distribuição espacial de estruturas diapíricas no Golfo do México, sendo que, na porção central do Golfo, estas feições se restringem à margem leste da Planície Abissal Sigsbee (Uchupi e Emery, 1968). O prisma sedimentar foi intensamente remodelado a partir das estruturas diapíricas que chegam a atingir poucas centenas de metros no assoalho oceânico.

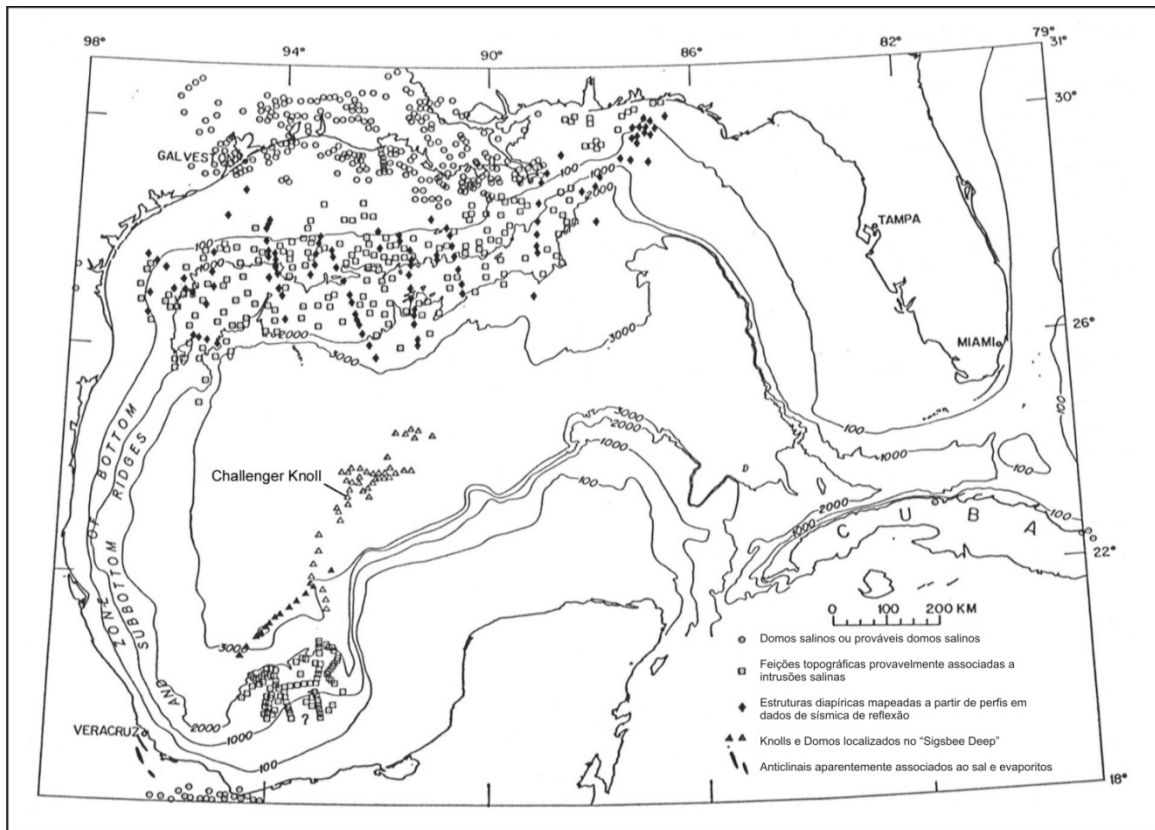


Figure 2.13 - Distribuição espacial de estruturas diapíricas do Golfo do México. Fonte: Uchupi e Emery, 1968.

Durante um cruzeiro oceanográfico do Projeto “*Deep Sea Drilling*”, inúmeras amostras de testemunho foram obtidas nas águas profundas e ultra-profundas do Golfo do México e na porção oeste do Atlântico Norte. Um dos poços (*DSDP Site 2*), localizado no *Challenger Knoll* da Planície Abissal Sigsbee, encontrou um diápiro de sal saturado de hidrocarbonetos e enxofre (Edgar e Clayton, 1992), como mostram as Figuras 2.13 e 2.14. Resultados da perfuração realizada no *Challenger Knoll*, situado a uma lâmina d’água de 3.572 metros, indicou que a presença de feições batimétricas similares e domos adjacentes soterrados pertencem aos depósitos salinos Callovianos (Burk *et al.*, 1969). Dados de geofísica marinha comprovam que estes diápiros fazem parte de um cinturão que se estende a sudoeste em direção às bacias salinas do Istmo e da Sonda de Campeche. Os fatos supracitados sugerem que a probabilidade de se encontrar grandes acumulações de hidrocarbonetos na área de influência de rochas geradoras do Tithoniano e das regiões contendo tectônica salina é muito alta.

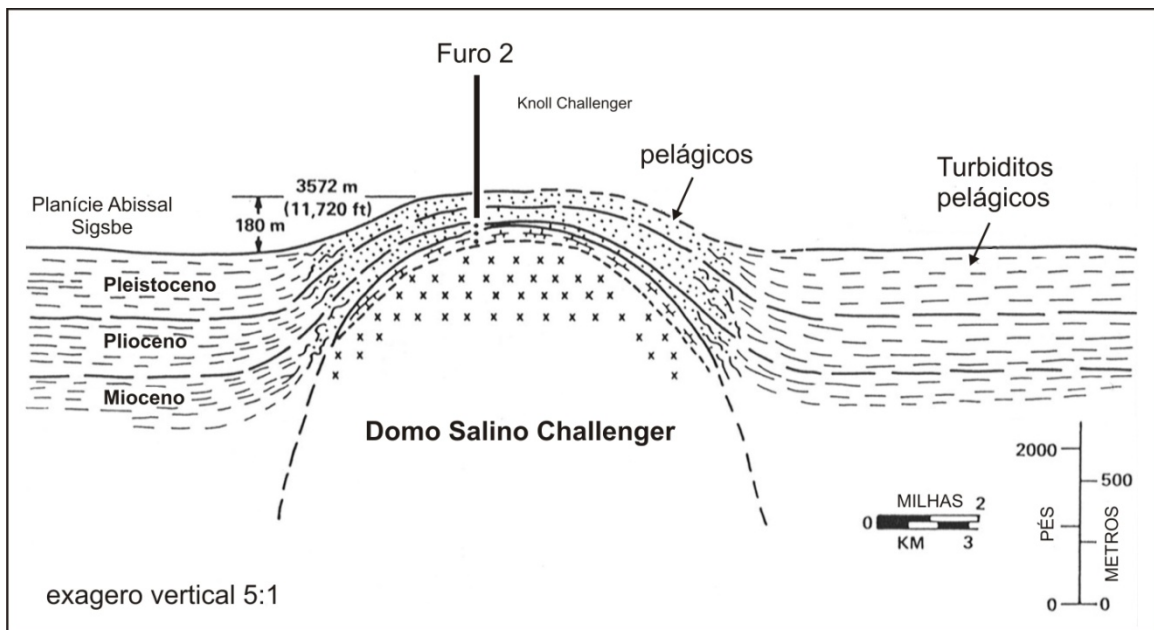


Figura 2.14 - Seção estrutural do Challenger Knoll e Planície Abissal. Fonte: Burk *et al.*, 1969.

Os domínios tectônicos da porção mexicana do Golfo do México foram compilados a partir de trabalhos de domínio público (Figura 5.2). A seguir, descrevem-se, de maneira sucinta, as características geológicas das principais províncias produtoras de hidrocarbonetos na porção mexicana do Golfo do México, a saber: (i) Burgos; (ii) Tampico-Misantla; (iii) Veracruz; (iv) Sureste (*Salina del Istmo*, Chiapas-Tabasco e Comacalco, Macuspana, Sonda de Campeche e Litoral de Tabasco); (v) Plataforma de Yucatán; (vi) Águas Profundas (Franja Distensiva, Delta do Rio Bravo, Franja de Sal Alóctone, Cinturão de Perdido, Cordilheiras Mexicanas, Canyon de Veracruz, Salina do Golfo Profundo e Planície Abissal) (Guzmán e Márquez-Domínguez, 2001; Aquino-López, 2004).

A Bacia de Burgos apresenta uma extensão de aproximadamente 70.000 km² e se localiza na porção noroeste do Golfo do México. Esta bacia é formada por uma cunha espessa (>10 km) de rochas silicásticas do Paleoceno ao Mioceno, depositadas em uma margem passiva em condições extensionais, e apresenta tendência para a produção de gás.

A Bacia de Tampico-Misantla possui extensão aproximada de 50.000 km² e, como a Bacia de Burgos, se concentra essencialmente na porção continental e em parte da plataforma até 200 m de lâmina d'água. Nesta bacia, destacam-se: (a) campo de Arenque (reservatório de fácies oolítico do Kimmeridiano Superior); (b) Distrito de Ebano-Panuco (reservatórios em carbonatos basinais fraturados do Cretáceo

Superior); (c) a Faixa Dourada (*The Golden Lane*), que se representa por um atol do Cretáceo Médio com reservatórios em fácies recifal (campo de Poza Rica), (d) Paleocanyon de Chicontepec, que se estende por 3.000 km² na porção oeste da Faixa Dourada (reservatórios em rochas siliciclásticas de águas profundas do Paleoceno ao Eoceno Médio).

A Bacia de Veracruz possui área aproximada de 24.000 km², incluindo parte da plataforma continental rasa. As regiões produtoras de destaque são a Plataforma de Córdoba e o Estreito Terciário. A Plataforma de Córdoba corresponde à porção soterrada do cinturão de empurrão dobrado de Sierra Madre Oriental (Calcáreos do Cretáceo Médio a Superior). O Estreito Terciário consiste em um depocentro preenchido por conglomerados sintectônicos, areias e argilas depositados durante o soerguimento e erosão da Sierra Madre Oriental e posteriormente deformado pela colocação de corpos neovulcânicos.

As bacias sedimentares do “Sureste” abrangem aproximadamente 60.000 km² e abrigam as regiões produtoras mais importantes do Hemisfério Ocidental. As províncias da “*Salina del Istmo*”, Comalcalco e Macuspana são depocentros do Terciário, sendo que Comalcalco apresenta características similares à província Mesozóica de Chiapas-Tabasco, produtora de óleos leves. A norte, as Bacias do “Sureste” apresentam duas províncias distintas localizadas em ambiente *offshore*, estando a nordeste a Sonda de Campeche (produtora de óleos pesados) e a sudoeste a província Litoral de Tabasco (produtora de óleos super leves, condensado e gás), conforme Guzmán e Marquez-Domingues (2001).

A Província “*Salina del Istmo*” possui uma extensão de aproximadamente 15.000 km², sendo metade localizada na porção marinha. Trata-se de um depocentro salino representado por rochas siliciclásticas terciárias depositadas em um ambiente de água rasa. Esta província produz óleos com densidade variando de leve a média em *plays* localizados estratigraficamente abaixo das camadas de sal do Jurássico, sendo o campo de Cinco Presidentes o seu principal representante.

As Províncias de Chiapas-Tabasco e Comalcalco possuem uma extensão aproximada de 13.000 km² e correspondem à porção continental central das Bacias do Sureste. Sua extensão *offshore* se representa pela província Litoral de Tabasco e Sonda de Campeche. Sua produção se origina fundamentalmente de carbonatos do Jurássico

Superior a Cretáceo Médio perturbados pela tectônica do sal. Dentre os principais produtores, destacam-se o Complexo Bermudez e Jujo-Tecominoacán.

A Província Terciária de Macuspana abrange aproximadamente 11.000 km², sendo um quarto desta localizado em sua porção *offshore*. As rochas reservatório de Macuspana, representadas por areias flúvio-deltaicas e plataformais, são consideradas de maior qualidade que as de Burgos e Veracruz, por serem mais recentes, menos compactadas e mais limpas.

A Província Litoral de Tabasco compreende aproximadamente 7.000 km² e suas rochas reservatório, a leste, são representadas por brechas do Cretáceo ao Paleoceno e rochas de fácies plataformais Jurássicas e, a oeste, por rochas basinais Jurássicas a Carbonatos Cretácicos.

A Província Sonda de Campeche possui uma extensão aproximada de 15.000 km² e foi descoberta em 1976, em águas mais rasas que 100 m. A maioria de suas rochas reservatório estão localizadas em brechas de talus do Cretáceo Superior ao Paleoceno Inferior e sedimentos oolíticos do Jurássico Superior, além de areias eólicas do Oxfordiano. Trata-se da província mais prolífica do Golfo do México, sendo seus principais representantes os campos gigantes de “Cantarell” e “Sihil”, o Complexo “Ku-Maloob-Zaap”, além dos campos “Abkatun”, “Pol”, “Chuc” e “Caan”. Como será visto neste trabalho, o Campo de Cantarell apresenta um fenômeno homônimo de exsudação ininterrupto de grandes proporções (*Chapoptera de Cantarell*), facilmente identificável por imagens de satélite, como mostra a Figura 2.15 (Aquino *et al.*, 2003).



Figura 2.15 - Aspecto visual da Chapopotera de Cantarell a partir de fotografia panorâmica obtida de helicóptero. Fonte: Quintero-Mármol, 2002.

A Província do Yucatán consiste em uma plataforma bastante estável, de aproximadamente 305.650 km², desenvolvida durante o Cretáceo. O início da história exploratória na Pensínsula foi marcado pela perfuração do poço exploratório Chicxulub-1. A região está basicamente dividida em dois projetos principais denominados “Progreso” e “Yucatán”. Por sua vez, o projeto Progreso se divide em cinco áreas, a saber: (i) Cabo Catoche, (ii) Chicxulub, (iii) Sisal, (iv) Arcas e, (v) Champotón, sendo as áreas de Chicxulub e Arcas as mais interessantes do ponto de vista exploratório. Os potenciais prospectos considerados para estas áreas são as areias do Jurássico Superior (Oxfordiano), assim como os bancos oolíticos carbonatados do Kimmeridgiano, além dos prospectos encontrados no Cretáceo Médio. O projeto Yucatán se subdivide em seis áreas, sendo que as áreas de Mérida e Escárcega se destacam. Os prospectos potenciais são as rochas do Jurássico

Superior indiferenciado, similares às mesmas da Sonda de Campeche, além do Cretáceo Inferior e Médio. Entretanto, há dúvidas ainda hoje sobre a existência de rochas geradoras Jurássicas na região.

A Província de águas profundas do Golfo do México compreende as regiões localizadas a lâminas d'água superiores a 200 m e compreendem aproximadamente uma área de 530.000 km². Apesar de ser uma área muito pouco estudada, identificou-se a presença de oito províncias petrolíferas a partir de dados de sísmica 2D (Figura 2.10), sendo estas: (1) Franja Distensiva (domínio caracterizado por falhas lítricas e estruturas *roll overs*; rochas reservatórios representadas por siliciclásticos deltaicos e plataformais, talus e turbiditos basinais); (2) Delta do Rio Bravo (depocentro do Mioceno ao Plioceno, representado por areias deltaicas distais e plataformais); (3) Franja de Sal Alóctone (representada por corpos salinos de diferentes formas e dimensões); (4) Cinturón Plegado Perdido (cinturão de rochas carbonáticas e turbiditos siliciclásticos do Mesozóico deformado por eventos compressivos e tectônica salina); (5) Cordilheiras Mexicanas (ambiente dominado por uma tectônica compressiva; rochas reservatórios representadas por areias turbidíticas de água profunda); (6) Canyon de Veracruz (feição fisiográfica de um *canyon* que separa as províncias Cordilheiras Mexicanas a oeste da Salina *del Golfo Profundo* a leste), (7) Salina *del Golfo Profundo* (corresponde à extensão a sul no sentido do mergulho da Província *Salina del Istmo*); (8) Planície Abissal (porção abissal da Bacia do Golfo do México com lâmina d'água superior a 3.500 m e extensão de aproximadamente 100.000 km²).

2.2 Tectônica salina (Halocinese)

O sal é uma substância mineral com propriedades tão distintas dos minerais presentes na crosta terrestre que seus estudos físicos, químicos, biológicos, engenheiros, inclusive os geólogos, que pesquisam os mecanismos de formação do sal e a evolução dos seus grandes depósitos. A tectônica salina ou halocinese ocorre quando uma camada depositada em uma bacia sedimentar se deforma.

Essas mudanças em sua estrutura interna, criando domos e diápiros de sal de grandes dimensões, podem ser observadas a partir da sísmica de reflexão, pois formam estruturas geológicas e controlam os sedimentos adjacentes. A sua deficiência de porosidade, propriedade que o torna um selante perfeito, resulta na associação muito próxima entre ocorrência de sal numa bacia e o sucesso na exploração de hidrocarbonetos. A ciência moderna registra um notável avanço nos conhecimentos da geologia do sal nas últimas décadas, particularmente em função do incremento da exploração de petróleo em águas profundas das margens continentais.

As bacias evaporíticas são identificadas desde o Proterozóico até o Recente. Entretanto, as maiores ocorrências de evaporitos na terra são observadas apenas no passado geológico, não havendo exemplos atuais de deposição de evaporitos formando amplas e espessas acumulações de sal em ambientes continentais ou marinhos. O estudo da evolução geológica e da deposição de evaporitos em bacias sedimentares apresenta aplicação direta na geologia do petróleo. Exemplos de bacias evaporíticas no registro geológico vão do Recente (Norte da África, margem leste do Mar Cáspio, Golfo Pérsico, Bolívia), Mioceno Superior (Mar Mediterrâneo, Mar Morto e Mar Vermelho); Permiano (Alemanha e Mar do Norte); Jurássicos (Golfo do México) e Aptianos (Atlântico Sul).

O rifteamento intra-continental entre o Yucatán e a América do Norte foi iniciado no período entre o Triássico Médio ao Triássico Superior (230 Ma) e acredita-se ter continuado até aproximadamente 160 Ma, com altas taxas de deposição de sal nas bacias do tipo rifte antes mesmo do início da abertura do assoalho oceânico (*sea-floor spreading*). O término da abertura corresponde à idade de aproximadamente 138 Ma. Estudos estratigráficos demonstram que a Bacia do Golfo do México foi completamente formada por volta de 140 Ma. Em linhas gerais, a presença do sal no Golfo do México está dividida em duas grandes regiões, a Bacia Salina da porção norte do Golfo do México e a Bacia Salífera de Campeche.

A importância da halocinese para o entendimento dos sistemas petrolíferos do Golfo do México é notória. Estudos recentes de monitoramento de exsudações por sensoriamento remoto fornecem indícios da alta correlação espacial existente entre os corpos salinos e as exsudações de óleo. A título de ilustração, a Figura 2.16 representa a paleogeografia do Jurássico Médio no Golfo do México com a distribuição dos corpos de sal depositados durante o Calloviano (164 - 159 Ma). Observa-se nesta figura que o sal aflora no fundo marinho em duas massas, uma setentrional e outra meridional, separadas por uma franja sem sal (Padilla y Sánchez, 2007; Stover, *et al.*, 2001).

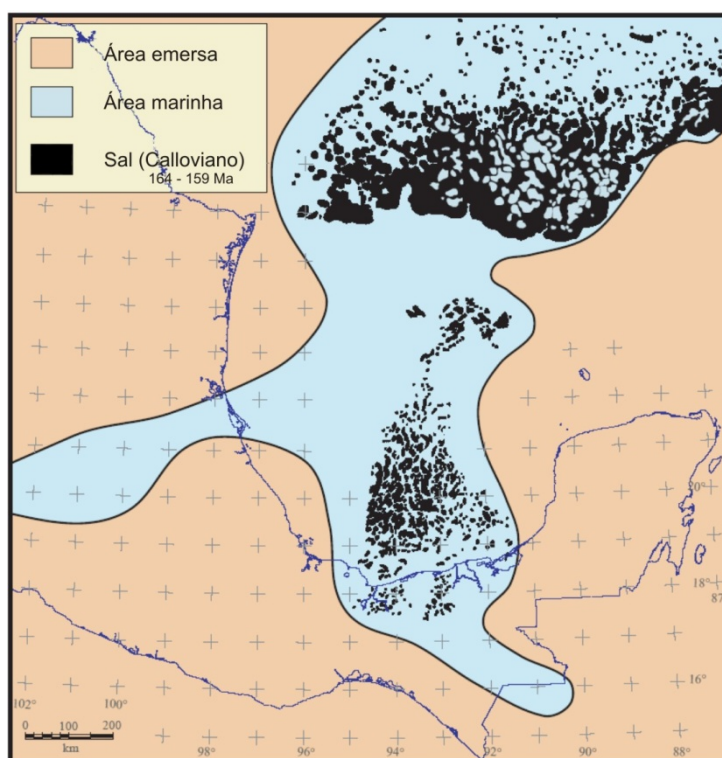


Figura 2.16 - Paleogeografia do Jurássico Médio mostrando a distribuição atual dos corpos de sal depositados durante o Calloviano. Fonte: Modificado de Padilla e Sánchez, 2007.

A importância econômica do Golfo do México tem propiciado a aquisição de vasta quantidade de dados geofísicos e este dado tem sido objeto de extensivos estudos geológicos. Entretanto, as complexas estruturas de sal têm obliterado informações fundamentais sobre a espessa camada sedimentar desta bacia. É ainda mais alarmante que esta grande disponibilidade de dados não consiga explicar de forma completa os parâmetros fundamentais para o entendimento dos sistemas petrolíferos da bacia sedimentar do Golfo do México, tais quais a profundidade do embasamento, distribuição das rochas geradoras, detalhes de estruturas profundas relacionadas a movimentação do sal e desenvolvimento da plataforma carbonática, além da evolução tectônica da bacia (Bird *et al.*, 2005).

3 SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO A AMBIENTES MARINHOS E COSTEIROS

Os radares operam na faixa das microondas do espectro eletromagnético. Radares imageadores geralmente estão localizados em intervalos de comprimento de onda de 1 milímetro a 1 metro. Comprimentos de onda ainda mais longos (valores inferiores de frequência) são usualmente relacionados a sistemas de comunicação e navegação (ondas de rádio). A operação de sensores na faixa das microondas aumenta a penetração do sinal, reduzindo a sua atenuação, especialmente na atmosfera. A relação entre a faixa das microondas com os comprimentos de onda mais curtos de sistemas de sensoriamento remoto operantes nas faixas do termal, infravermelho médio, infravermelho próximo, assim como as regiões do espectro visível e ultravioleta, pode ser observada na Figura 3.1.

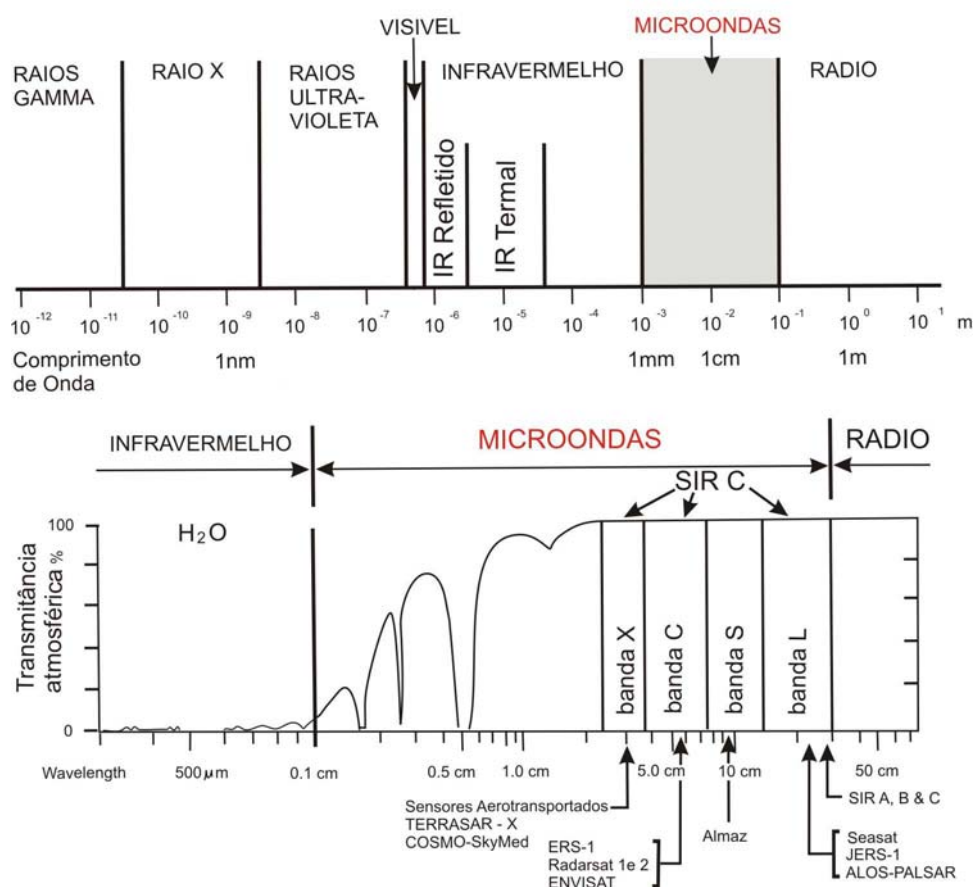


Figura 3.1 - Espectro eletromagnético ilustrando as janelas de transmissão atmosférica nas faixas do visível, infravermelho próximo, médio e termal e das microondas. Fonte: Sabins,1999.

Os sistemas de sensoriamento remoto por microondas dividem-se em passivos e ativos. Os sistemas passivos registram a energia eletromagnética refletida ou emitida pela superfície terrestre. Já os sistemas ativos não dependem da energia eletromagnética do sol ou das propriedades térmicas da superfície terrestre e são geralmente pouco afetados pela atmosfera. Os sistemas de sensoriamento remoto ativos geram sua própria energia eletromagnética, que é transmitida do sensor para o terreno, onde há processos de interação que resultam no retroespalhamento da energia. Finalmente, ocorre o registro da energia que retorna ao receptor do sensor remoto (Elachi, 1988; Henderson e Lewis, 1998 e Sabins, 1999).

Dentre os sistemas de sensoriamento remoto ativos mais utilizados, destacam-se: (1) sistemas de microondas ativos (radares), baseados na transmissão de energia eletromagnética na faixa das microondas com comprimentos de onda entre 3 - 25 cm (bandas X, C, e L) através da atmosfera e na detecção da energia retroespalhada pela superfície terrestre; (2) sistemas LIDAR, baseados na transmissão de energia de comprimentos de onda relativamente curtos (1040 nm) através da atmosfera e na detecção da energia retroespalhada pela superfície terrestre; (c) sistemas SONAR, baseados na transmissão de ondas sonoras através da coluna d'água e na detecção da energia retroespalhada pelo fundo ou por objetos no interior da coluna d'água.

As imagens de radar obtidas a partir de aeronaves ou satélites como hoje conhecidos não eram disponíveis durante a II Guerra Mundial. A capacidade de mapeamento em faixas contínuas do radar aerotransportado de visada lateral SLAR (*"Side-looking airborne Radar"*) só foi desenvolvida a partir do ano de 1950. Uma das principais vantagens do sistema SLAR é a sua habilidade para obter imagens de reconhecimento cobrindo uma ampla região à esquerda ou à direita da aeronave. Por volta de 1960, alguns sistemas SLAR deixaram de ter uso restrito militar. Há dois tipos primários de SLAR, o radar de abertura real RAR (*"Real Aperture Radar"*) e o radar de abertura sintética SAR (*"Synthetic Aperture Radar"*), sendo o termo abertura diretamente relacionado à antena. Os radares de abertura real e sintética utilizam antenas de dimensões variáveis entre 1 e 2 metros. No entanto, os radares de abertura sintética são capazes de simular antenas infinitamente maiores, influenciando diretamente em sua capacidade de resolução (Richards e Jia, 1999).

3.1 Sensoriamento remoto por radar

3.1.1 Aspectos Teóricos

Os sistemas de radar são sensores ativos, pois possuem fonte própria de energia, transmitindo sinais de energia eletromagnética, iluminando a superfície imageada e gravando ou medindo o sinal que retorna à antena a partir de determinado alvo ou superfície. Por serem sensores ativos, os radares não dependem da energia solar e podem operar tanto no período noturno quanto diurno. Os sistemas de radar possuem uma série de vantagens para a aplicação na área de geociências, onde se destacam a sua independência de condições atmosféricas adversas e a possibilidade de operação nas 24 horas de um dia (período diurno e noturno). Radares imageadores, portanto, não são afetados pela presença de nuvens, neblina ou fumaça, ao contrário dos satélites óticos. A presença de sistemas Cumulus Nimbus (Cb) podem afetar significativamente radares operantes em comprimentos de onda inferiores a 2 cm e o efeito de chuvas é imperceptível em comprimentos de onda acima de 4 cm (e.g., RADARSAT-1, RADARSAT-2, ENVISAT).

Os sistemas de radar observam a cena dentro dos limites estabelecidos fundamentalmente pela frequência, polarização e geometria de iluminação dos sinais emitidos. Após o recebimento dos sinais emitidos pela antena de determinados alvos e níveis de processamento de sinais suplementares, os parâmetros observáveis estão intimamente relacionados à posição, reflectividade, polarização e fase. Os diversos tipos de sistemas sensores de radar são diferenciáveis na especificação do *design*, no que diz respeito aos fatores supracitados, guiados pela aplicação proposta para o sensor. O conhecimento dos componentes do sistema ativo de microondas e sobre como a energia eletromagnética é enviada, recebida e registrada é fundamental para que uma imagem de radar possa ser propriamente analisada (Henderson e Lewis, 1998).

O pulso de radiação eletromagnética enviada pelo transmissor através da antena tem uma duração e comprimento de onda específicos (*i.e.* duração do pulso medida em microssegundos, μseg). Os comprimentos de onda mais comumente usados em radares imageadores estão resumidos na Figura 3.2. Os comprimentos de onda são muito maiores do que os do visível, do infravermelho próximo, do infravermelho médio ou do infravermelho termal utilizados em outros sistemas sensores. Assim, a energia das microondas é medida muito mais em centímetros do que em micrômetros. Os menores comprimentos de onda de radar são denominados de banda K, Neste

comprimento de onda a energia é parcialmente absorvida pelo vapor d'água e a penetração em nuvens pode ser limitada. A banda X, utilizada pelo sistema TerraSAR-X, inclui os menores comprimentos de onda frequentemente utilizados por radares imageadores. Outros sistemas de radar funcionam usando mais de uma frequência e são denominados de radares multifrequência.

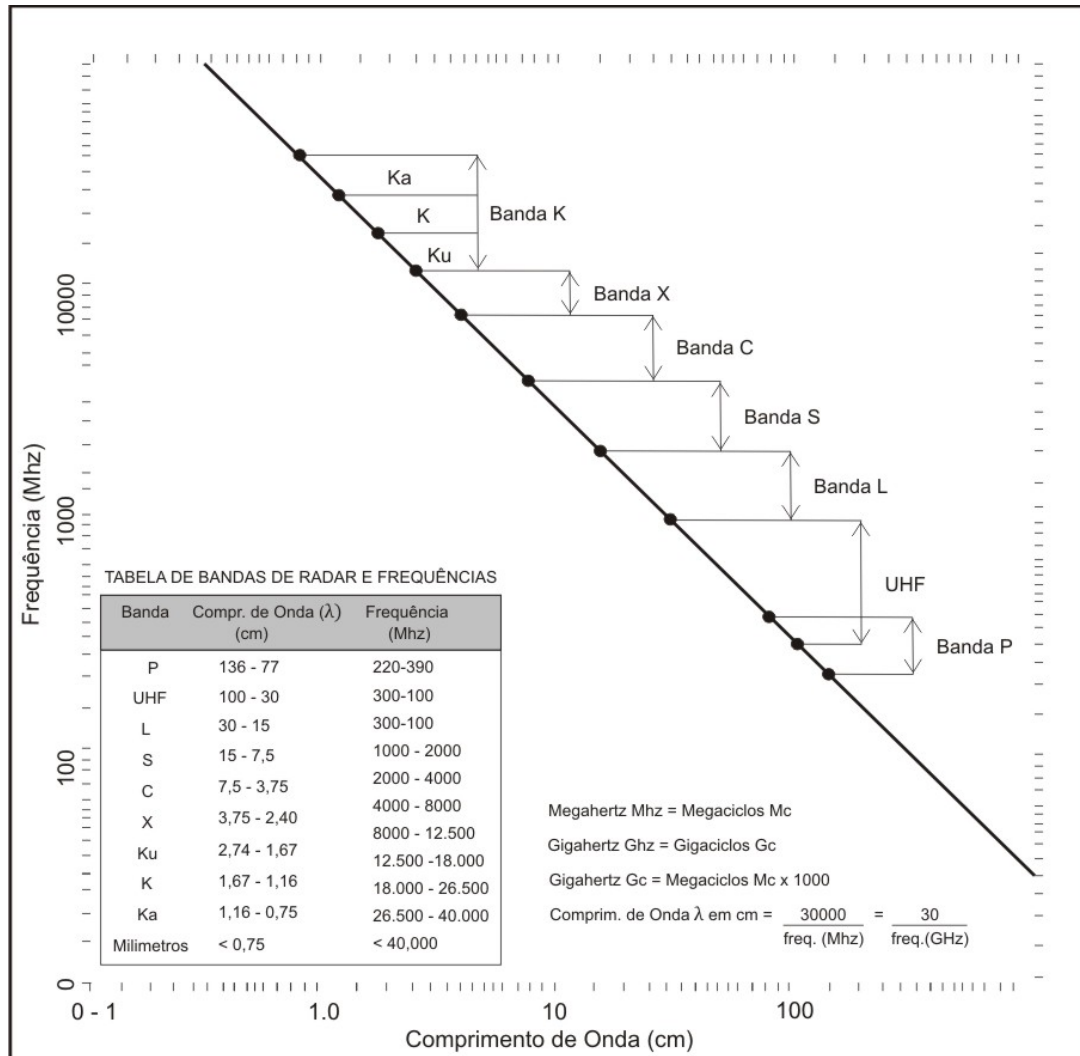


Figura 3.2 - Nomograma da relação entre a frequência e o comprimento de onda de sistemas de radar. Fonte: Lewis e Henderson, 1998.

Outro fator que difere os sistemas de radar de outros sistemas de sensoriamento remoto é que este grava a energia eletromagnética que retorna à antena em função do tempo e não a partir da distância angular. O tempo pode ser medido e gravado de forma mais precisa do que a distância angular entre a antena e a superfície imageada. O conhecimento do sensoriamento remoto por radar remete à familiarização necessária de assuntos inerentes aos: (i) princípios dos sistemas de radar, (ii) características das imagens, (iii) retroespalhamento e assinaturas das imagens, (iv)

polarização e (v) interferometria. Para se obter o entendimento dos assuntos supracitados, faz-se necessária a definição das propriedades a seguir: (a) intensidade e comportamento dos pulsos de energia eletromagnética; (b) faixas de comprimento de onda e frequência de sistemas de radar; (c) ângulos de incidência e depressão; (d) direção de visada ou iluminação de sistemas de radar; (d) resolução espacial em alcance e azimute; (e) radares de abertura real ou sintética; (f) distorções inerentes às imagens de radar (*shadows, layovers, foreshortening, topographic inversions*); (g) propriedades da constante dielétrica e conteúdo de água; (h) rugosidade da superfície; (i) polarizações paralelas e cruzadas; (j) imagens polarimétricas; (l) interferometria; (m) coeficiente de retroespalhamento; dentre outros (Sabins, 1999).

Serão aqui brevemente definidos alguns dos principais fatores que influenciam no entendimento dos sistemas SAR. A direção de azimute é aquela percorrida pelo satélite ou aeronave. Pulsos ativos de energia de microondas iluminam faixas do terreno, formando ângulos ortogonais com a direção de vôo do satélite, que é denominada de direção de alcance (*range*) ou de visada. O terreno iluminado mais próximo do satélite, ao longo da linha de visada, é denominado de alcance próximo (*near range*). O ponto mais distante iluminado pelo pulso de energia é chamado de alcance distante (*far range*) (Figura 3.3).

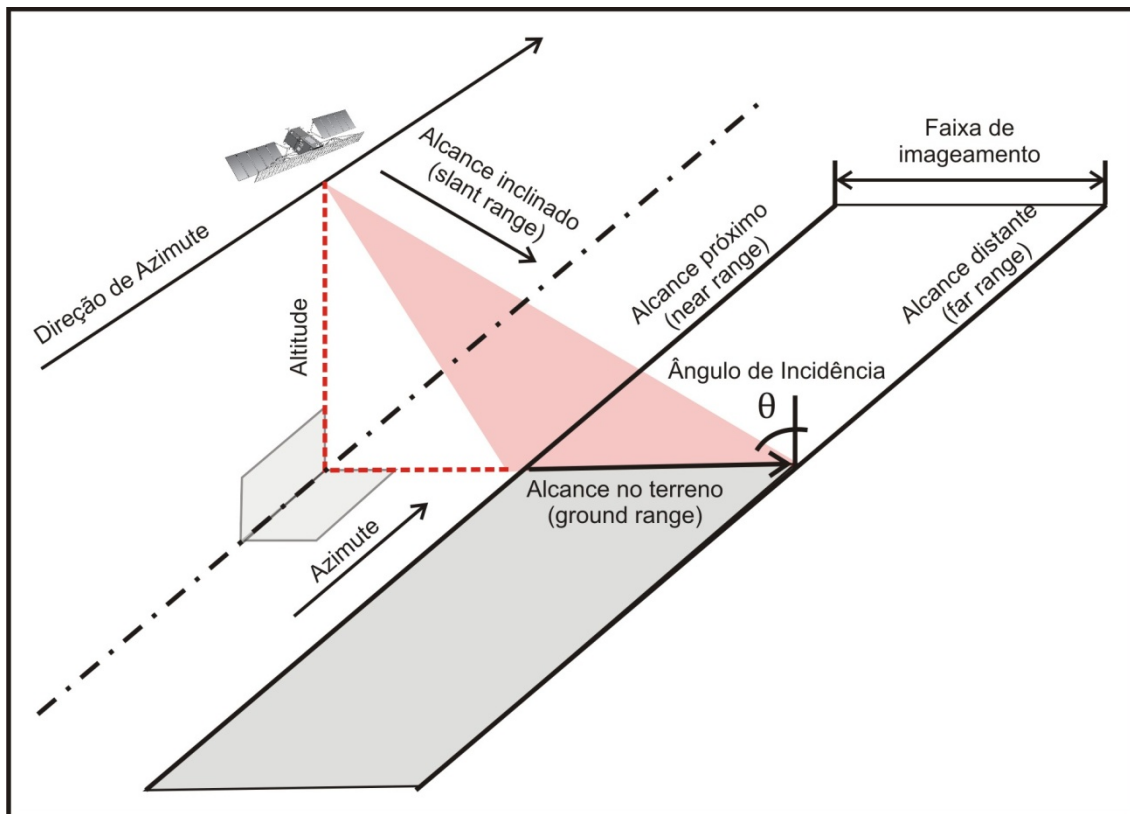


Figura 3.3 - Geometria de aquisição de uma imagem de radar de abertura sintética. Fonte: Material Educativo para Sensoriamento Remoto de Radar GlobeSAR2 – CD-ROM.

O ângulo de depressão (γ) é medido entre o plano horizontal e o pulso de energia da antena ao longo da linha de visada do radar, em um ponto específico no terreno. O ângulo de depressão, dentro de uma faixa iluminada pelo radar, varia do *near range* para o *far range*. O ângulo de visada (Φ) é medido entre a vertical da antena à superfície do terreno e a linha de visada do radar, tratando-se do complemento do ângulo de depressão. O ângulo de incidência (θ) é formado entre o pulso de energia de radar e a linha perpendicular à superfície da terra, no ponto onde o pulso faz contato. Quando o terreno é plano, o ângulo de incidência (θ) é o complemento ($\theta=90-\gamma$) do ângulo de depressão (γ). Entretanto, se o terreno apresenta declividade, não há relação entre o ângulo de depressão e o ângulo de incidência (Figura 3.4).

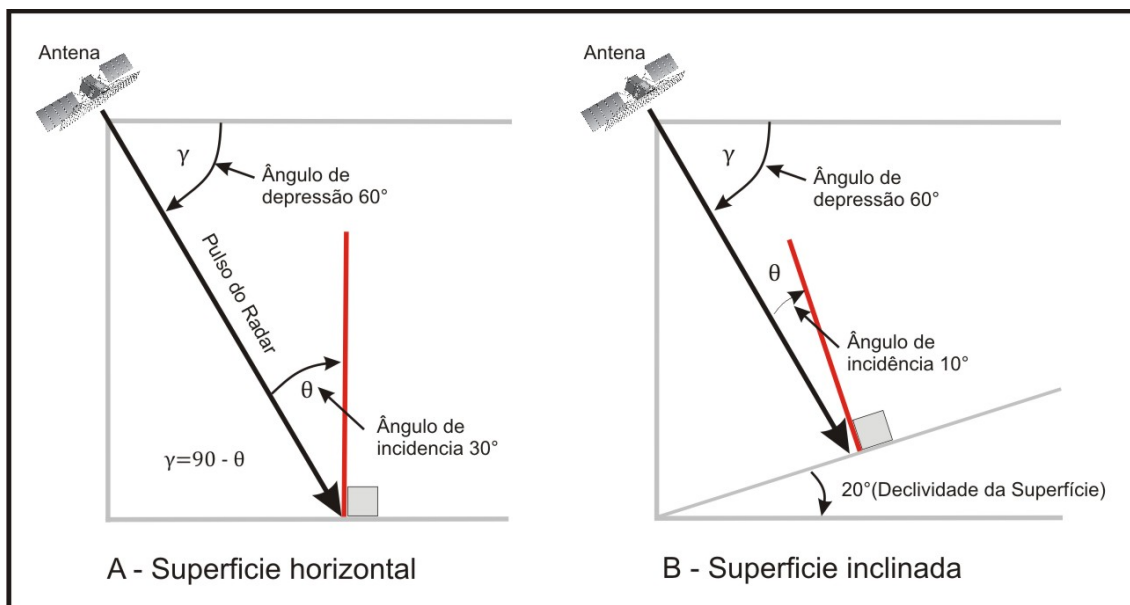


Figura 3.4 - Diagrama mostrando a relação entre ângulo de incidência, ângulo de depressão e declividade do terreno. Fonte: Sabins, 1999.

As antenas de radar enviam e recebem energia polarizada. Isto significa que o pulso de energia é filtrado para que as vibrações do campo elétrico da onda ocorram somente em um único plano, perpendicular à direção de propagação. Há vários tipos de energia polarizada retroespalhada que podem ser registradas pelo radar. O sistema pode enviar energia polarizada verticalmente e receber somente energia polarizada verticalmente (designada VV); enviar e receber energia polarizada horizontalmente (HH); enviar energia polarizada horizontalmente e receber verticalmente (HV); ou enviar energia polarizada verticalmente e receber horizontalmente (VH). As configurações HH e VV produzem imageamento de radar com polarização paralela ou co-polarização. As configurações HV e VH produzem imageamento com polarização cruzada (Henderson e Lewis, 1998).

A resolução espacial de uma imagem de radar pode ser definida a partir do cálculo da resolução em alcance (*range resolution*) e resolução em azimute (*azimuth resolution*). A resolução em alcance é medida ao longo da direção de iluminação do radar e é proporcional ao comprimento do pulso de microondas, isto é, quanto menor for o comprimento do pulso, mais detalhada é a resolução.

O comprimento do pulso é uma função da velocidade da luz (c) multiplicada pela duração da transmissão (t), sendo que o intervalo de tempo que a energia de microondas é transmitida é médio em microssegundos (10^{-6} seg).

Para se conhecer as dimensões do elemento de resolução, é necessário, também, calcular a largura da faixa medida na direção do voo da plataforma orbital, denominada resolução em azimute.

Radares de microondas de abertura real (RAR) produzem pulsos na forma de lóbulos, estreitos no *near-range* e alargador no *far range*. A largura angular do lóbulo é diretamente proporcional ao comprimento de onda do pulso de energia transmitida. Logo, em sistemas RAR, pulsos com comprimentos de ondas menores resultarão na melhoria da resolução em azimute. Além disso, a largura do lóbulo é inversamente proporcional ao comprimento da antena, ou seja, quanto maior a antena, menor a largura do lóbulo e melhor a resolução em azimute.

A diferença fundamental entre sistemas de radar de abertura real (RAR) e sistemas de radar de abertura sintética é que o último tem a capacidade de sintetizar eletronicamente o comprimento da antena, a fim de obter uma melhor resolução em azimute em sistema SAR.

A resolução em azimute é independente da distância (*near range* ou *far range*) ou altitude do sensor. A resolução espacial na direção azimute de um sistema SAR é a mesma, tanto para a aeronave, quanto para um satélite.

Outra importante característica inerente às imagens de radar é rugosidade superficial (Figura 3.5). A quantidade de energia de microondas retroespalhada para o sensor, relacionada aos componentes de micro-escala, é uma função da relação entre o comprimento de onda da energia de microondas incidente (λ), o ângulo de incidência (θ) e a variação de altura (h) em escala centimétrica que se encontram na célula de

resolução que está sendo iluminada. Segundo o critério de Rayleigh modificado, espera-se que uma região de rugosidade superficial lisa apresente baixo retorno de energia para a antena, agindo como uma superfície com reflexão especular. Neste caso, a maior parte da energia é refletida na direção oposta à da antena e a região iluminada apresenta baixo retorno e aparece como uma área escura na imagem de radar, conforme equação abaixo. Já um alto sinal de retorno (tons claros), segundo o critério de Rayleigh modificado, pode ser representado pela equação abaixo (Peake e Oliver, 1971). Assim, é importante realçar que um mesmo terreno aparecerá diferentemente em uma imagem de radar em função do valor dos parâmetros comprimento de onda e ângulo de incidência (Jensen, 2009).

$$h < \frac{\lambda}{25 \text{sen}\lambda} \text{ (critério liso)}$$

$$h > \frac{\lambda}{4,4 \text{sen}\lambda} \text{ (critério rugoso)}$$

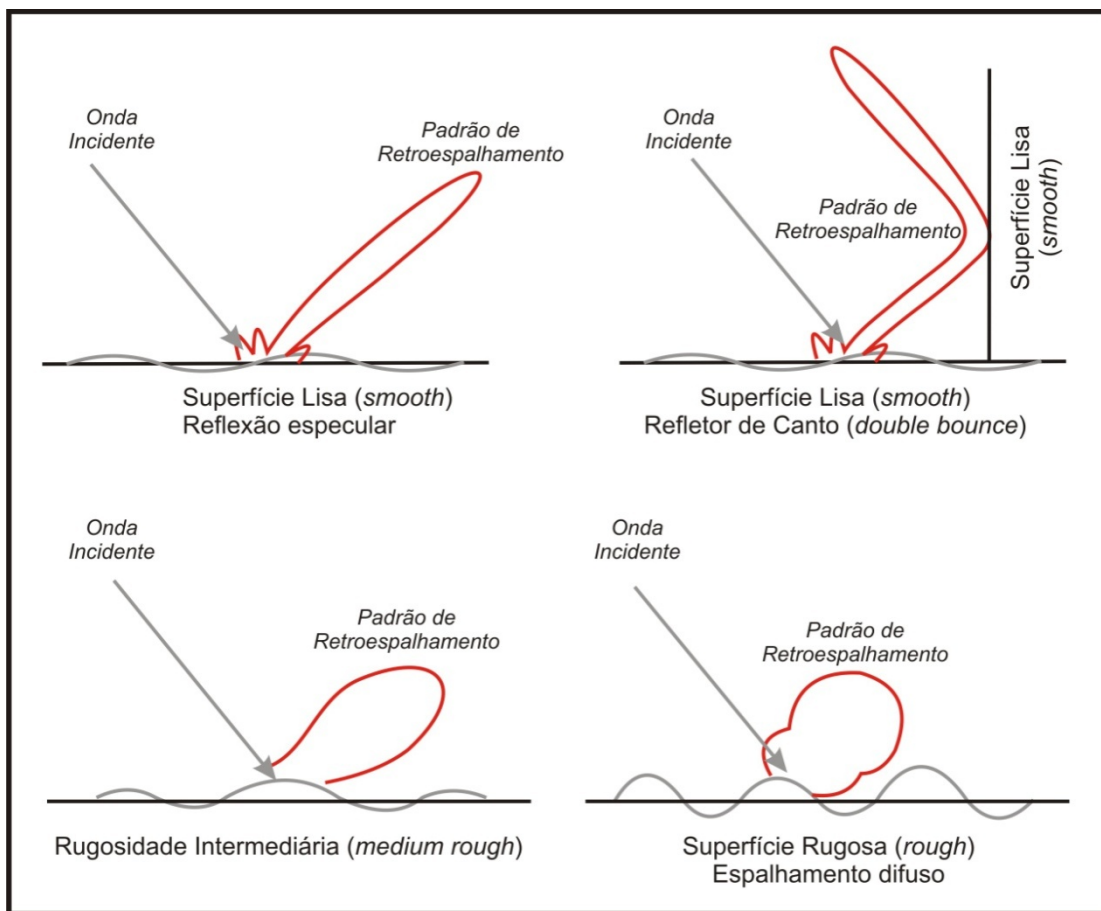


Figura 3.5 - Diagrama mostrando os mecanismos de reflexão e espalhamento do sinal em função da rugosidade do terreno. Fonte: Henderson e Lewis, 1998.

Alguns tipos de terreno conduzem melhor a eletricidade do que outros. Este fator está diretamente relacionado ao teor de umidade do alvo imageado, que é medido através da constante dielétrica complexa. Materiais superficiais secos, como solo e rocha, têm constantes dielétricas que variam de 3 a 8. Por outro lado, a água tem uma constante dielétrica de 80. As superfícies dos oceanos têm portanto uma constante dielétrica muito alta, causando desta forma a reflexão da maior parte da energia de radar incidente.

3.1.2. Radar de Abertura Sintética em Oceanografia

A oceanografia convencional se baseia na coleta de dados *in situ* no mar para o estudo dos fenômenos, processos e variáveis de interesse. No entanto, este método apresenta sérias limitações, tais como a obtenção de dados com resolução espacial restrita, além da escassez e altos custos dos cruzeiros oceanográficos. A partir daí, fica claro para a comunidade científica que a caracterização de feições e fenômenos oceanográficos só seria possível através de instrumentos que permitissem uma visão sinóptica dos oceanos. Em 1973, a missão SkyLab marca o início de estudos sistemáticos da superfície terrestre em faixas distintas do espectro eletromagnético. Em 1978, a missão Seasat foi concebida para demonstrar a utilidade do monitoramento global por satélite de fenômenos oceanográficos. O satélite Seasat da NASA teve como objetivos específicos a coleta de dados na superfície dos oceanos de de vento, temperatura, altura relativa de ondas, topografia, ondas internas, fenômenos atmosféricos e gelo (Robinson, 1985).

Segundo Mouchot e Garello (1998), o impulso do sensoriamento remoto para aplicações marinhas e costeiras se deu a partir dos anos 70, com os seguintes fatos: (i) criação do Programa EODAP (*Earth and Oceans Dynamics Applications Program*) da NASA; (ii) criação do grupo de trabalho SEASAT-A em 1972 (Giberson, 1991 *in* Henderson e Lewis, 1998); (iii) participação da NASA do acordo de cooperação denominado *SEASAT Commercial Demonstration Program* (Montgomery, 1985), objetivando a identificação de feições oceanográficas com aplicações para a indústria em um sistema sensor orbital; (iv) lançamento do satélite SEASAT, em 1978, marcando o início da oceanografia física a partir do espaço; (v) Campanhas do SIR-A, em 1981, e SIR-B, em 1984; (vi) Lançamento do satélite ALMAZ, em 1991; (vii) Lançamento do satélite ERS-1 pela Agência Espacial Européia (ESA), em 1991; (viii) Lançamento do satélite Japonês JERS-1 (*Japan Earth Resource Satellite*).

Sistemas SAR transmitem sinais de radar e recebem o sinal de retorno retroespalhado, sendo que o retroespalhamento está diretamente relacionado à rugosidade da superfície do mar. Para as aplicações de sistemas SAR em oceanografia, as velocidades observadas na superfície do mar são de fundamental importância para o entendimento de feições específicas identificadas nas imagens. A Figura 3.6 ilustra de forma simplificada a geometria de sistemas SAR associada a alvos em movimento. Um fenômeno constantemente observado em imagens SAR é o desvio em azimute (*azimuthal image shift*), ocorrido em consequência do movimento de

alvos na direção de alcance. A movimentação de ondas na direção de azimute também gera a degradação das imagens de radar (*azimuth defocusing*). Estes desvios ocorrem devido ao efeito doppler observado no retorno de sinais retroespalhados por sistemas SAR em movimento (Mouchot e Garello, 1998).

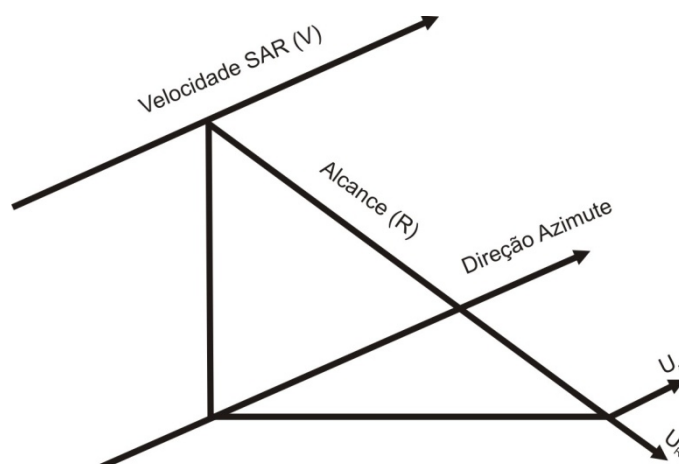


Figura 3.6 - Geometria simplificada de sistemas SAR e alvos em movimento. Os parâmetros u_R e u_a representam, respectivamente, os componentes de velocidade de alvos nas direções de alcance e azimute. Fonte: Mouchot e Garello, 1998.

O retorno de sinais de radar é obtido de uma interação complexa do sinal transmitido com o meio, sendo que suas características são determinadas pela frequência utilizada, polarização, geometria de iluminação e superfície iluminada, esta última dependente das características de rugosidade, propriedades elétricas e composição do material iluminado. No oceano, o retorno de sistemas de radar é originado a partir de componentes de rugosidade de comprimentos de onda similares aos dos sinais transmitidos. Os componentes de rugosidade são ondas de comprimento centimétrico geradas a partir do vento que variam de ondas capilares a ondas de gravidades curtas. Ondas de gravidade mais longas e correntes modulam o campo de ondas curtas produzindo padrões em imagens SAR que revelam a presença feições características. Para se obter o entendimento destes padrões observados em imagens SAR e a consequente extração de informações úteis destes dados se faz necessária a compreensão de interações oceânicas, além das interações entre as ondas de radar e o oceano em movimento.

As feições oceânicas mais comumente observadas em imagens de radar são ondas superficiais, estruturas de meso-escala de circulação oceânica, como, por exemplo, vórtices, correntes, presença de petróleo, além de manifestações em superfície da dinâmica oceânica de subsuperfície, como, por exemplo, ondas internas, zonas de

ressurgência, batimetria, dentre outras. Os sistemas SAR são bastante sensíveis à interação dos ventos com a superfície do mar, fazendo com que padrões e estruturas observadas na camada limite atmosférica produzam feições identificáveis em imagens de radar. Logo, a extração e interpretação de informações de imagens SAR depende fundamentalmente das condições atmosféricas reinantes na hora de aquisição da imagem, sobretudo o campo de intensidade e direção dos ventos superficiais.

A superfície do mar consiste na interface onde todas as trocas de calor, momento, luz, água e gases entre o oceano e a atmosfera acontecem. A maioria dos sensores remotos utilizados em aplicações oceanográficas somente detectam informações da superfície do mar, como, por exemplo, os radares altímetros, radares escaterômetros e os radares de abertura sintética (SAR), além dos radiômetros de infravermelho e de microondas. A única exceção são os ditos sensores de coloração do mar (*ocean color-type instruments*), que detectam radiância espectral na região do visível do espectro eletromagnético. Uma imagem de radar no oceano se define por um mapa bidimensional de alta resolução do retroespalhamento da rugosidade da superfície do mar. Segundo Holt (2004), este retroespalhamento é controlado pela constante dielétrica, rugosidade da superfície do mar, interação com as ondas de diferentes escalas, interações com ondas e correntes e a presença de óleos na superfície (Figura 3.7).

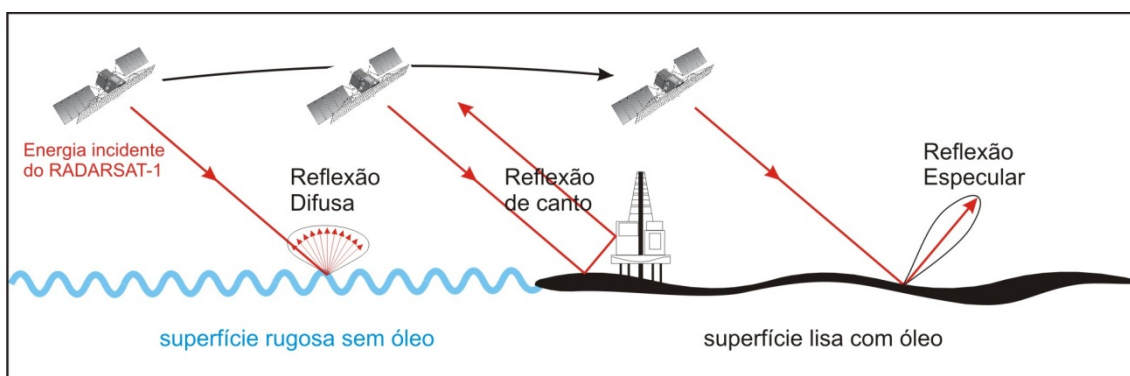


Figura 3.7 - Espalhamento do sinal de radar a partir da superfície do mar em (a) superfície rugosa sem a presença de óleo, (b) plataforma em superfície lisa com a presença de óleo e (c) superfície lisa com a presença de óleo.

As interações entre sistemas de radar de abertura sintética e o oceano podem ser descritas por modelos regidos pelo comportamento do coeficiente de retroespalhamento normalizado (*normalized radar cross-section*). Este coeficiente é medido pela intensidade de retorno do sinal à antena de radar e representa-se na unidade de decibéis (dB). Os sistemas de radar são sensíveis a pequenas

perturbações na superfície do mar (*wave ripples*) na faixa de frequência das microondas do espectro eletromagnético. Assim, o retroespalhamento de sinais de radar está intimamente relacionado às condições de rugosidade da superfície do mar, que são, em sua maioria, condicionadas pelas características locais do vento na superfície (Tucker, 1983 e Robinson, 1985).

O coeficiente de retroespalhamento (σ^0 ou *sigma naught*) consiste na média do nível de energia incidente, σ (sigma), que retorna à antena a partir de uma área A (m^2) específica em uma superfície horizontal. *Sigma naught* é função da configuração do sensor e dos parâmetros geofísicos; uma grandeza adimensional medida em decibéis e expressa pela equação abaixo. Além das propriedades geofísicas e elétricas do meio iluminado (rugosidade da superfície, condutividade, fatores ambientais), o valor de σ^0 depende das características do sistema de radar utilizado, incluindo sua polarização, comprimento de onda, frequência e geometria de iluminação.

$$\sigma^0 = 10 \log_{10}(\sigma/A)$$

O retroespalhamento de sistemas SAR a partir do oceano, levando-se em consideração ângulos de incidência entre 15° e 70° e ausência de ondas de comprimento de onda longo, é eminentemente causado pelo mecanismo *Bragg* ou espalhamento de ressonância (Valenzuela, 1978). Ângulos inferiores a 15° apresentam espalhamento através da reflexão especular (superfícies lisas orientadas perpendicularmente à direção de iluminação da antena), enquanto que, em ângulos superiores 70° , o espalhamento a partir das bordas das ondas (*wedge scattering*) prevalece (Holt, 2004). Esta forma de espalhamento também é observada em massas continentais e corpos de gelo. Segundo o espalhamento *Bragg* (Figura 3.8), as ondas incidentes de radar são retroespalhadas pelos componentes das ondas capilares, λ_B , produzidas e propagadas pelo vento, cujos comprimentos de onda se relacionam aos do radar, λ_r , através da seguinte equação:

$$\lambda_B = \frac{\lambda_r}{2 \sin \theta_i} \quad , \quad \text{Equação 3.4}$$

onde θ equivale ao ângulo de incidência no terreno. Estes resultados em uma adição coerente (ressonância) de retornos a partir de ondas adjacentes, que estão em fase, são mais intensos quando as ondas *Bragg* estão sendo propagadas na mesma direção da iluminação do radar (Plant, 1990).

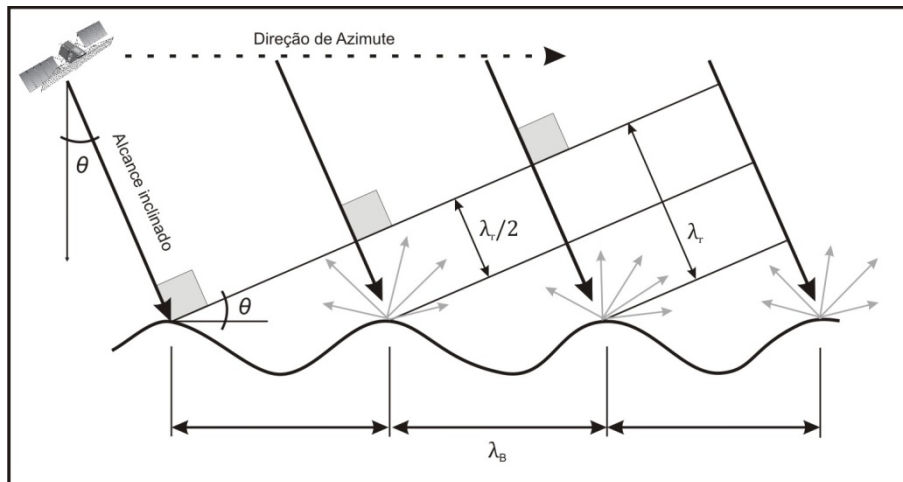


Figura 3.8 - Ilustração do retroespalhamento *Bragg*, onde λ_r equivale ao comprimento de onda do radar, λ_B equivale ao comprimento de onda da superfície do mar e θ corresponde ao ângulo de incidência local. Fonte: Modificado de Martin, 2004.

Considerando os valores típicos de comprimento de onda e ângulo de incidência utilizados nos principais sistemas de sensoriamento remoto por microondas, a ressonância *Bragg* irá variar desde as ondas longas capilares centimétricas (~2 cm) até as ondas gravitacionais curtas (~50 cm). Para valores específicos de ângulos de incidência utilizados em sistemas SAR entre 20° a 26° , as ondas *Bragg* apresentam os seguintes valores de frequência: (1) Banda X (3 cm), $3,9 \pm 0,5$ cm; (2) Banda C (5,5 cm), $7 \pm 1,0$ cm; e (3) Banda L (23 cm), $30 \pm 4,0$ cm. Observe, na Equação 3.4, que λ_B é inversamente proporcional ao ângulo de incidência. Sob condições de baixos ventos, um limite mínimo de velocidade de ventos precisa ser atingido para que as ondas *Bragg* possam ser produzidas em uma escala apropriada para que o seu retorno possa ser medido pela antena SAR. As velocidades de vento limites para sistemas operantes nas bandas X, C e L, com um ângulo de incidência de 20° são, aproximadamente, 2,5, 2,2 e 2,0 m.s⁻¹.

Deve se considerar também o retroespalhamento da superfície dos oceanos em relação à velocidade dos ventos superficiais e aos parâmetros utilizados em sistemas SAR, como, por exemplo, a frequência, polarização e ângulo de incidência (Figura 3.9).

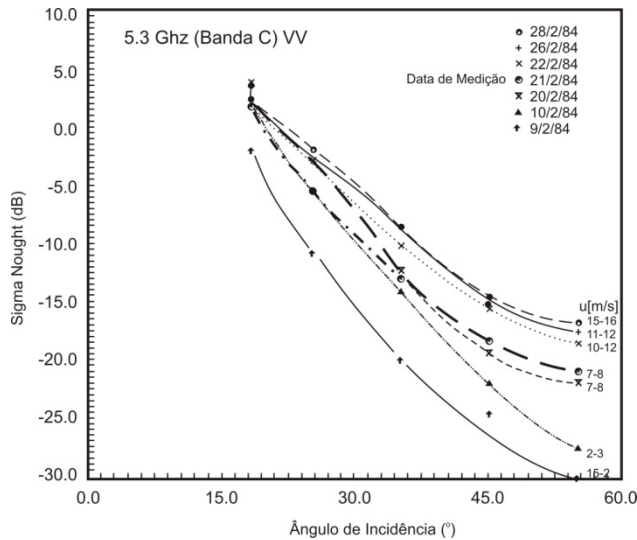


Figura 3.9 - Retroespalhamento de um radar de banda C (5.3 GHz), polarização VV em diferentes intensidades médias de vento como uma função do ângulo de incidência. Cada símbolo representa um dado obtido em um dia específico de voo. Fonte: Feindt *et al.*, 1986.

Na grande maioria das frequências utilizadas pelos sistemas SAR, os índices de retroespalhamento ou refletividade dos oceanos decrescem abruptamente com o aumento dos ângulos de incidência na faixa de 20° a 50°. Estes são geralmente maiores para imagens adquiridas em polarização VV do que as adquiridas em polarização HH (Figura 3.10). Como exemplo, temos que σ_{VV}^0 é maior que σ_{HH}^0 em até 2,5 dB a 30° e na Banda C (5,3 GHz). O componente de polarização cruzada σ_{VH}^0 é mais fraco em quase 10dB.

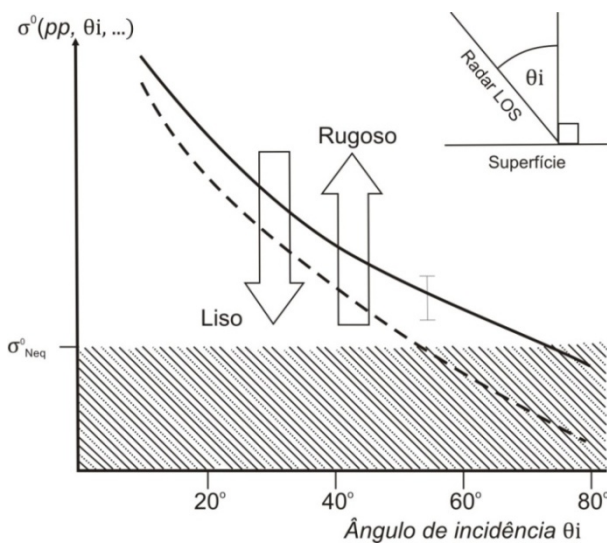


Figura 3.10 - Refletividade (σ^0) típica de sistemas de radar em função do ângulo de incidência. Fonte: Ikeda e Dobson, 1995.

Um parâmetro interessante observado entre imagens SAR e as velocidades de vento é que estas variam em função da orientação da direção de visada da antena ou ângulo de azimute com relação à direção dos ventos. Ventos soprando na direção de visada antena apresentam valores de retorno superiores que os ventos deslocados da direção de antena (Figura 3.11). Tal fato está diretamente relacionado à inclinação e orientação das ondas *Bragg* em relação à antena SAR. Os radares escaterômetros se utilizam desta característica na derivação da direção absoluta dos ventos, através do uso de múltiplas antenas ou de uma antena rotacional combinada a um ângulo de incidência constante. A direção fixa do azimute de sistemas SAR significa que o sentido dos ventos não pode ser calculado diretamente utilizando-se somente dos sinais de retroespalhamento, fazendo-se necessária a utilização de técnicas auxiliares, tais como a utilização de dados complementares (Ulaby *et al.*, 1986).

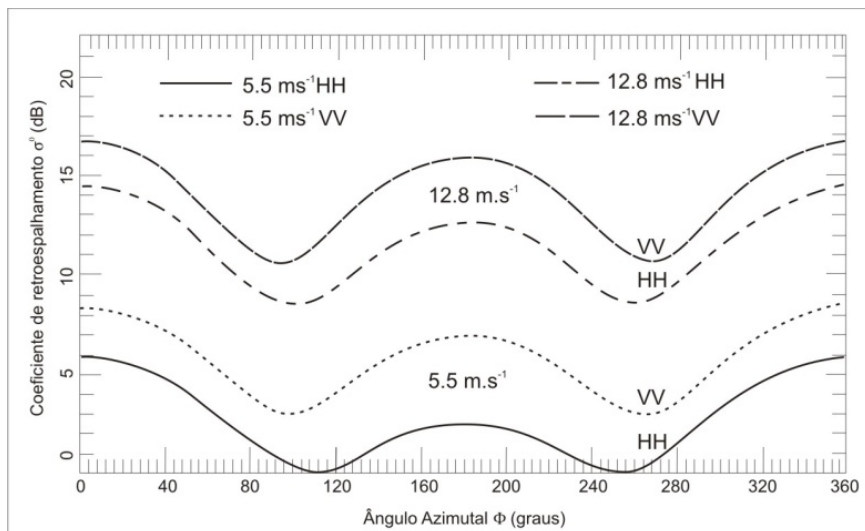


Figura 3.11 - Variação azimutal do coeficiente de retroespalhamento da superfície do mar a uma frequência de 14 GHz, onde $\Phi = 0^\circ$ e 180° correspondem às direções do vento (*upwind* e *downwind*) respectivamente. Fonte: Modificado de Ulaby *et al.*, 1982.

A rugosidade superficial dos oceanos em comprimentos de onda *Bragg* é controlada por ventos superficiais. Para um determinado ângulo de incidência e comprimento de onda, há uma lei de primeira ordem de dependência entre a refletividade do radar e a intensidade do vento, como sugerido na Figura 3.12, onde o expoente γ é uma função do comprimento de onda, dentre outros parâmetros. Para o ERS-1 que apresenta $\lambda = 5,7$ cm, polarização VV e $\gamma_{\theta_i} = 23^\circ$, o expoente é $\gamma = 1,1 \pm 0,1$. Por outro lado, utilizando o mesmo ângulo de incidência, para o Seasat ($\lambda = 23$ cm, em polarização HH), $\gamma = 0,5 \pm 0,1$.

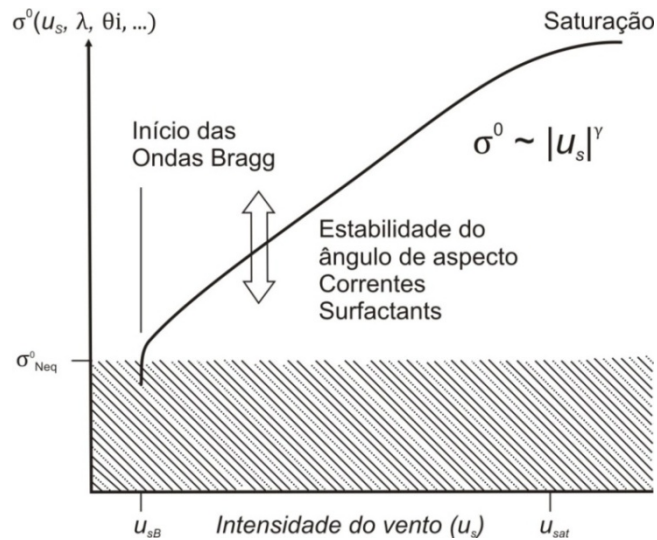


Figura 3.12 - Refletividade (σ^0) típica de sistemas de radar em função da intensidade do vento. Fonte: Ikeda e Dobson, 1995.

O retroespalhamento do radar (σ^0) possui uma dependência angular sistemática que pode ser utilizada para se obter valores estimados da intensidade e direção do vento. O limite superior de corte é atingido a medida que os índices de refletividade do radar tendem a saturar com o aumento da intensidade do vento (u_s). A saturação da intensidade do vento u_{SAT} é superior a 25 m.s^{-1} para o satélite ERS-1. Já o limite inferior é mais abrupto, onde a formação de ondas *Bragg* ocorre somente para intensidades de vento acima do limite de corte inferior u_{SB} , no valor aproximado de $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ para dados ERS-1. Tanto as condições para a existência de ondas *Bragg* quanto os valores de σ^0 são funções das condições ambientais, tais como os gradientes de temperatura na interface oceano-atmosfera, correntes superficiais e os óleos biogênicos (*surfactants*), Ikeda e Dobson (1995).

3.1.3 Sistemas de Radar de Abertura Sintética (SAR)

O primeiro sistema SAR utilizado no Brasil foi desenvolvido pela Goodyear Aerospace Inc. e pela divisão de serviço aéreo da *Western Geophysical Inc.*, em 1970, objetivando a realização de levantamentos civis. O projeto então denominado RADAM (Radar da Amazônia) foi concebido para realizar o mapeamento da Bacia Amazônica no Brasil e Venezuela, em uma área de aproximadamente 4 milhões de km², cerca de metade do tamanho dos Estados Unidos. Neste projeto, a atenção especial foi dada aos sistemas ativos de sensoriamento remoto de microondas, que são os principais sensores utilizados para a detecção da presença de óleo na superfície do mar. Subordinadamente, dados auxiliares meteorológicos e oceanográficos, obtidos a partir de satélites passivos, desempenham importante papel na interpretação integrada de imagens obtidas por sistemas de sensoriamento remoto de microondas.

Apesar de permanecer apenas três meses em operação, a NASA desempenhou um importante papel no desenvolvimento da indústria dos sistemas SAR. O SEASAT impressionou a comunidade científica em razão da geração de dados de alta qualidade. Os principais parâmetros responsáveis pela qualidade das imagens, especialmente a resolução e número de visadas (*looks*), foram estabelecidos pelo SEASAT. Sabe-se hoje da importância dos padrões e performance do sistema de radar de abertura sintética do SEASAT para os satélites subsequentes. Posteriormente, inicia-se uma série de experimentos com o ônibus espacial (*Space Shuttle*), a começar pelo experimento "A" do "*Shuttle Imaging Radar*" (SIR-A), operando na banda L e resolução espacial de 40 x 40 m, lançado em 1981. O experimento "B" (SIR-B) foi lançado em 1984, com resolução espacial de 17 x 25 m. Seguiu-se então a corrida tecnológica dos sistemas SAR com o lançamento do ALMAZ-1 da antiga União Soviética, em 1991, um radar de banda S e resolução espacial de 15 x 30 m. A Tabela 3.1 ilustra as principais características dos satélites lançados entre os anos de 1978 e 1991.

Tabela 3.1 - Características do Sistema de Radar de Abertura Sintética (SAR) lançados entre 1978 e 1991. Fonte: Raney,1998.

	Seasat	SIR-A	SIR-B	Kosmos 1870	ALMAZ
Aspectos Gerais					
País	EUA	EUA	EUA	URSS	URSS/Rússia
Agência	NASA	NASA	NASA	Glavkosmos	Glavkosmos
Veículo	Seasat	S. Shuttle	S. Shuttle	Salyut	Salyut
Lançamento	26/06/78	12/11/81	05/10/84	25/07/87	31/03/91
Vida útil / período	3 meses	2.5 dias	8 dias	2 anos	1.5 anos
RADAR					
Sensor	SAR	SAR	SAR	SAR	SAR
Banda	L [23.5]	L [23.5]	L [23.5]	S [10]	S [10]
Frequência	1.275	1.278	1.282	3.0	3.0
Antena	Flat	flat	flat	waveguide	Waveguide
Comprimento x altura (m)	10.7x2.16	9.4x2.16	10.7x2.16	1.5x15 (2)	1.5x15 (1)
Polarização	HH	HH	HH	HH	HH
Ângulo de incidência (graus)	23	50	15 - 64	30 - 60	30 - 60
Resolução em alcance (m)	25	40	25	(~30)	15 - 30
Resolução em azimute (m)	25	40	58 - 17	(~30)	15
Visadas	4	6	4	(4)	> 4
Faixa imageada (km)	100	50	10 - 60	20 - 45	20 - 45
Gravador a bordo	N	Y	Y	Y	Y
Processamento (ótico digital)	O,D	O	O,D	O	D
Ruído equivalente σ^0 (dB)	-24	-32	(-28)	-	-
MISSÃO					
Altitude nominal (km)	800	260	350,225	250-280	300
Inclinação (graus)	108	38	57	71.5	73
Síncrona ao Sol?	N	N	N	N	N
Taxa de transferência (MB/seg)	110	(none)	30	analog	-
Ciclo (dias)	17,3	nil	nil	variável	Nil
Operação por /orbita (min.)	10	-	-	3 min/tape	3 min/tape

A agência espacial europeia (ESA) lançou o ERS-1 (*“European Remote Sensing Satellite”*), em 1991, com um radar imageador na banda C. Em 1992, o Japão inicia seu programa com o satélite JERS-1, operando na banda L. Entre 1988 e 1991, o sistema Lacrosse destacou-se principalmente pela sua resolução e possibilidade de ajuste da antena (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Características do Radar de Abertura Sintética (SAR) entre 1991 e 1993. Fonte: Raney, 1998.

	Lacrosse	ERS-1	JERS-1
Aspectos Gerais			
País	EUA	Europa	Japão
Agência	USAF	ESA	MITI/NASDA
Veículo	(Atlantis)	ERS-1	J-ERS-1
Lançamento	1988/1991/1997/2000/2005	16/07/91	11/02/92
Vida útil / período	-	2-3 anos	2 anos
RADAR			
Sensor	SAR	SAR	SAR
Banda	X [3.0]	C [5.7]	L [23.5]
Frequência	9.5	5.25	1.275
Antena	Array	waveguide	Flat
Comprimento x altura (m)	(~8x2)	10x1	11.9x2.4
Polarização	-	VV	HH
Ângulo de incidência (graus)	ajustável	23	39
Resolução em alcance (m)	~1	26	18
Resolução em azimute (m)	~1	28	18
Visadas	variável	6	3
Faixa imageada (km)	variável	100	75
Gravador a bordo	-	N	Y
Processamento (ótico digital)	D	D	D
Ruído equivalente σ^0 (dB)	-	-24	-14.5
MISSÃO			
Altitude nominal (km)	~275	~780	568
Inclinação (graus)	57	98.5	97.7
Síncrona ao Sol?	Não	Sim	Sim
Taxa de transferência (MB/seg)	-	105	30 (x2)
Ciclo (dias)	-	3, 35, 176	44
Operação por /órbita (min.)	-	10	20

Em 1994, a NASA lançou o SIR-C com capacidade de multifrequência e multipolarização. Em 1995, a ESA lançou o ERS-2, mesmo ano em que o governo canadense colocou em órbita o satélite RADARSAT-1. Em 2000, a NASA inicia o programa SRTM (*“Shuttle Radar Topography Mission”*), para realizar o mapeamento topográfico da superfície da Terra por interferometria, utilizando radares nas bandas C e X. Em 2002, a ESA lança o ENVISAT-1 (*“Environmental Satellite 1”*) como sucessor dos satélites ERS-1 e ERS-2, com dez sensores a bordo, dentre eles o ASAR (*“Advanced Synthetic Aperture Radar”*), operando na banda C (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Características do Sistema de Radar de Abertura Sintética (SAR) entre 1994 e 1999. . Fonte: Raney,1998.

	SIR-C/X-SAR	ERS-2	RADARSAT	SRTM	ENVISAT
Aspectos Gerais					
País	EUA, Alemanha e Itália	Europa	Canadá	EUA / Alemanha	Europa
Agência	NASA/DLR/DAA	ESA	CSA/EUA	NASA	ESA
Veículo	Space Shuttle	ERS-2	McD.D.Delta II	S. Shuttle	(Envisat)
Lançamento	Abr./94, Out./94	1995	Nov./95	Fev./2000	2002
Vida útil / período	10 dias	2-3 anos	5 anos	11 dias	5 anos
RADAR					
Sensor	SAR	SAR	SAR	InSARInterf.	SAR
Banda	L,C,X	C [5.7]	C [5.7]	C / X	C [5.7]
Frequência	1.25, 5.3, 9.6	5.3	5.3	5.3 / 9.6	5.3
Antena	Arrays + WG(X)	WaveGuide	WG array	-	-
Comprimento x altura (m)	12x(3, 0.75, 0.4)	10x1	15x1.5	-	-
Polarização	Q.POL L+C; VVX	VV	HH	VV, HH /HH	VV + HH
Ângulo de incidência (graus)	15 – 55	23	< 20 - > 50	-	20 – 50
Resolução em alcance (m)	10 – 30	26	10 - 100	30 / 30	~ 25
Resolução em azimute (m)	30	28	9 - 100	30 / 30	~ 25
Visadas	~ 4	6	1 - 8	-	~4
Faixa imageada (km)	15 – 60	100	10 - 500	225 / 50	100 (500)
Gravador a bordo	Y (+D/L)	N	Y	-	Y
Processamento (ótico digital)	D	D	D	-	D
Ruído equivalente σ^0 (dB)	-40 < -28	-24	-23	-	-
MISSÃO					
Altitude nominal (km)	225	~780	~800	~225	~700
Inclinação (graus)	57	98.5	98.6	-	98.5
Síncrona ao Sol?	N	Y	Y	60°N - 56°S	Y
Taxa de transferência MB/seg)	45 (TDRS)	105	74 - 105	-	~105
Ciclo (dias)	Nil	TBD	24	-	-
Operação por /órbita (min.)	(60 h, total)	10	20	-	10 +

Mais recentemente, tivemos os lançamentos do satélite japonês ALOS com o radar PALSAR, em 2005. A constelação de cinco satélites, denominada SAR-Lupe (Alemanha), teve seus lançamentos no período de 2006 a 2008. O sistema TerraSAR-X foi lançado pela Alemanha em 2007, operando na banda X, mesmo ano em que canadense RADARSAT-2 operando na banda C. A constelação de quatro satélites com sistemas SAR de alta resolução denominado COSMO-SkyMed iniciou seus lançamentos em 2007, 2008 e terminará em 2010 com o lançamento do quarto satélite. O SAOCOM (“**S**atélite **A**rgentino de **O**bservación **C**On **M**icroondas”), composto por dois satélites operando na banda L, tem seu lançamento previsto para 2012 e 2013. Com o advento da tecnologia e o lançamento de novos radares de abertura sintética, espera-se sistemas capazes de produzir imagens com resolução espacial superior, polarimetria combinada a técnicas avançadas de aquisição e processamento de dados, expandindo, desta forma, as possibilidades de aplicações para usuários tradicionais de sistemas SAR. Estará também configurado um espaço para a criação de novas comunidades de usuários. A Tabela 3.4 ilustra os principais satélites em operação, além dos previstos para lançamentos futuros.

Tabela 3.4 - Satélites em operação e com lançamentos previstos. Fonte: Ioannidis e Vassilaki, 2008.

	LANÇAMENTO	PAÍS	BANDA				RESOLUÇÃO		
			L	S	C	X	BAIXA	MÉDIA	ALTA
ALOS	2006	Japão	x					10 m	
TERRASAR-X	2007	Alemanha				x			1 m
TANDEM-X	2008	Alemanha				x			1 m
RADARSAT-2	2007	Canadá			x			3 m	
COSMO-SKYMED									
COSMO-1 & 2	2007	Itália				x			1 m
COSMO-3	2008	Itália				x			1 m
COSMO-4	indefinido	Itália				x			1 m
RISAT	2008	Índia			x			3 m	
TecSAR/TechSAR	2008	Israel				x			1 m
SAR-LUPE									
SAR-LUPE-1	2006	Alemanha				x			< 1 m
SAR-LUPE-2 & 3	2007	Alemanha				x			< 1 m
SAR-LUPE-4 & 5	2009	Alemanha				x			< 1 m
HJ-1C (sarsat)	2008	China		x					
SAOCOM									
SAOCOM 1A & 1B	indefinido	Argentina	x					7 m	
SAOCOM 2A & 2B	indefinido	Argentina						Indefinido	
SENTINEL-1	2011	Europa (ESA)			x			5 m	
SSR-2 (MAPSAR)	2011	Brasil Alemanha	x					3 m	
SURVEYOR SAR									
SURVEYOR-1 a 5	indefinido	China			x			10 m	
TerraSAR-L	indefinido	ESA	x					5 m	

O presente projeto utilizará dados obtidos a partir dos satélites RADARSAT-1 e RADARSAT-2. O RADARSAT-1 consiste em um moderno sistema orbital de observação da terra, lançado em Novembro de 1995, em uma órbita quase-polar, síncrona com o Sol, a 798 km acima da superfície da Terra (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 - Características dos Satélites RADARSAT-1 e RADARSAT-2. Fonte:

<http://gs.mdacorporation.com>.

Geometria	Circular, síncrona ao Sol (RADARSAT-2 possui aproximadamente 30 minutos de diferença (<i>offset</i>))
Altitude	~798 (792 - 821) km
Inclinação	98.6°
Período	100.7 minutos
Ciclo de Revisita	24 dias
Orbitas por dia	14
Frequência	5.3 GHz (RADARSAT-1) 5.405 GHz (RADARSAT-2)
Comprimento de onda	~5,6 cm (banda C)
Polarização	HH (RADARSAT-1) HH, HV, VH, VV (RADARSAT-2)

Desenvolvido sob coordenação da Agência Espacial Canadense (“*Canadian Space Agency*” – CSA) em cooperação com a NASA/NOAA, governos de províncias canadenses e o setor privado, o satélite RADARSAT-1 provê imagens da Terra em caráter operacional para aplicações científicas e comerciais. O RADARSAT foi

inicialmente concebido como solução parcial para a demanda energética do Canadá durante a crise do petróleo ocorrida no fim de 1970, onde um radar de abertura sintética (SAR) foi então configurado para auxiliar na exploração de petróleo desenvolvida no Mar Beaufort. O SAR foi bastante utilizado, pois podia adquirir informações independentemente da luz solar (longos períodos de escuridão nos meses do inverno) ou condição atmosférica (presença frequente de nuvens e neblina nos meses do verão).

O sucesso na extração de informações úteis a partir de sistemas imageadores de radar relaciona-se ao nível de detalhe intrínscico ao dado analisado. O sistema RADARSAT-1 oferece a vantagem de disponibilizar até sete modos de imageamento de características distintas. Para se determinar o modo ideal, faz-se necessário levar em consideração as dimensões da área de estudo, a aplicação pretendida e a escala que se pretende obter para os resultados.

O sistema SAR, a bordo do satélite RADARSAT-1, pode inclinar sua antena para obter imagens com diferentes faixas imageadas e ângulos de incidência, fornecendo aos usuários em geral uma extensa flexibilidade de geometrias de aquisição que irão influenciar diretamente na aplicação desejada (Raney *et al.*, 1991; Radarsat International, 1995). (Figura 3.13).

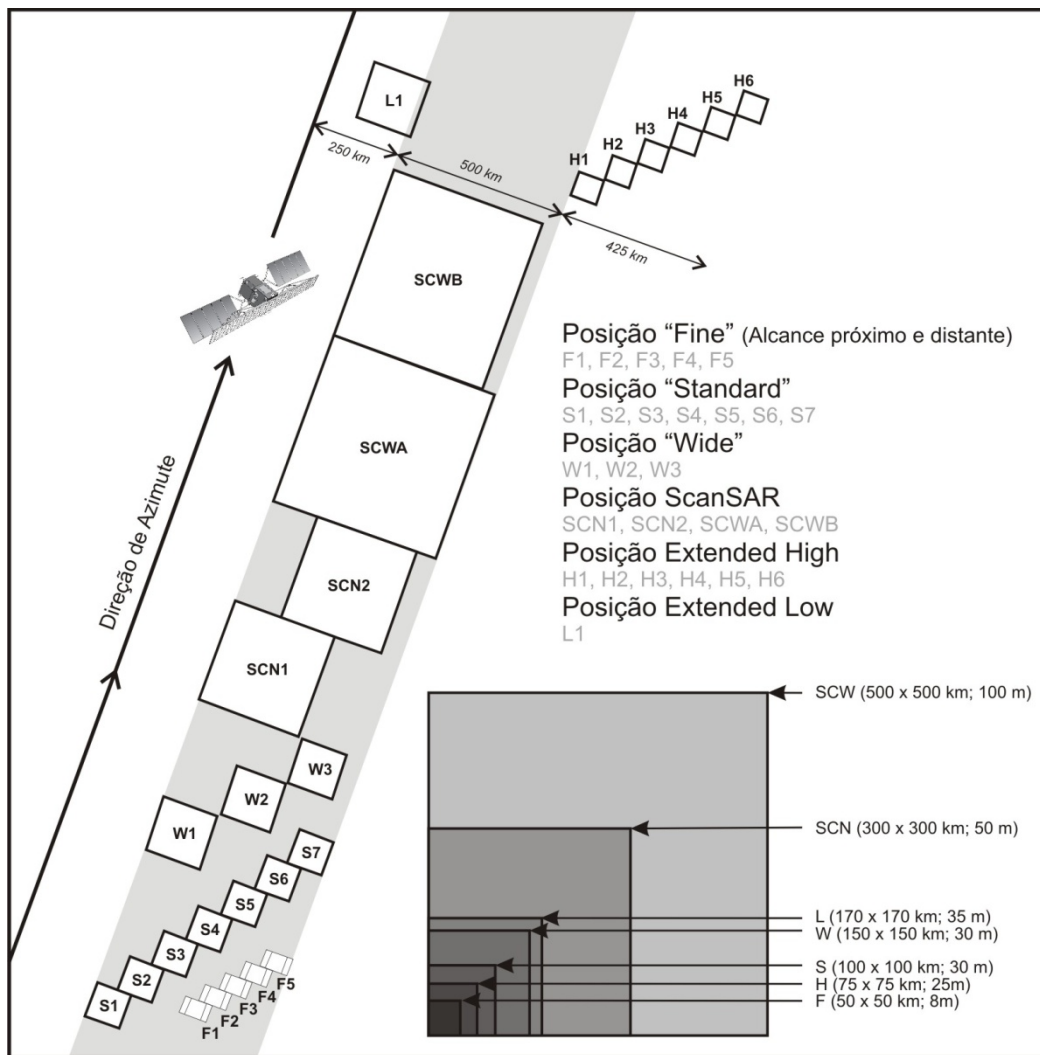


Figura 3.13 - O sistema SAR, a bordo do satélite RADARSAT-1. Fonte: <http://gs.mdacorporation.com>.

O RADARSAT-1 oferece um intervalo de ângulos de incidência que varia desde os inclinados 20° (*steep angles*) até aproximadamente os rasos 60° (*shallow angle*) e ilumina somente o seu lado direito. No entanto, é possível obter imagens da superfície terrestre com visadas para leste ou oeste quando o mesmo se encontra em órbita ascendente e descendente, respectivamente (Figura 3.14).

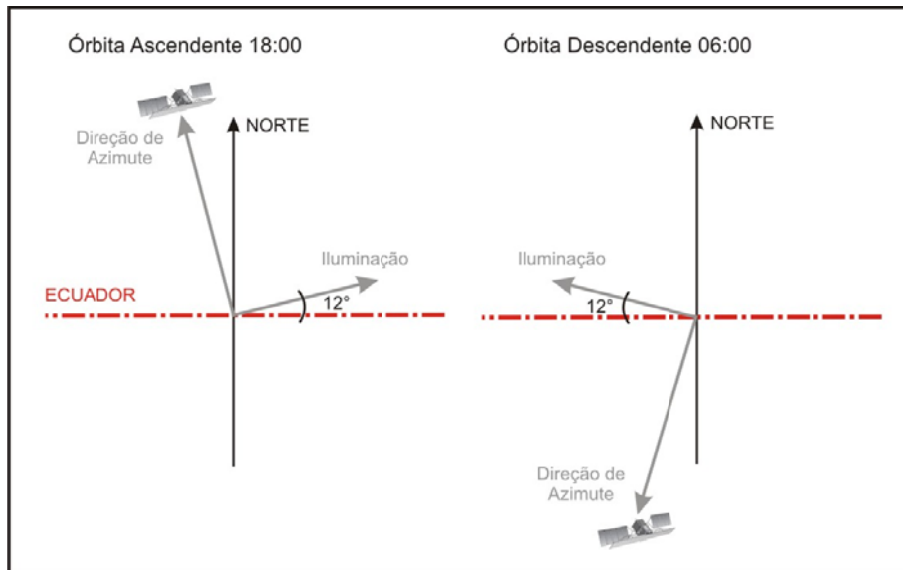


Figura 3.14 - Direções de visada nas órbitas ascendentes e descendentes do satélite RADARSAT - 1. Fonte: <http://gs.mdacorporation.com>

O RADARSAT-1 (Figura 3.15) está equipado com um radar de abertura sintética que opera na faixa das microondas, com comprimento de onda de 5,6 cm (banda C), frequência de 5,3 GHz e polarização HH (transmitida e recebida horizontalmente).

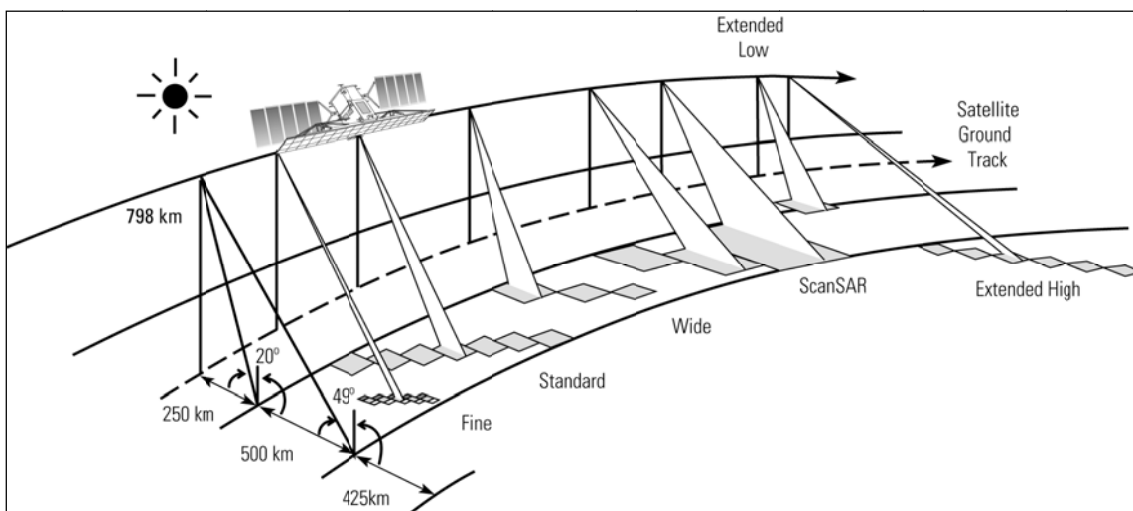


Figura 3.15 - Flexibilidade de modos de imageamento do RADARSAT-1 (Radar de Abertura Sintética - SAR). Fonte: <http://gs.mdacorporation.com>.

Cada um dos sete modos de imageamento disponíveis apresenta resolução, ângulo de incidência e faixa imageada diferentes (Tabela 3.6). Dentre os modos de imageamento existentes, destacam-se: o modo “*Fine*”, que cobre uma área de 50 x 50 km (2500 km²), com uma resolução de 8 m; o modo “*Standard*”, que cobre uma área de 100 x 100 km (10.000 km²), com uma resolução de 30 m; o modo “*ScanSAR Wide*”, que cobre uma área de 500 x 500 km (250.000 km²), com uma resolução de 100 m.

Tabela 3.6: Modos operacionais de iluminação do satélite RADARSAT-1. Fonte: <http://gs.mdacorporation.com>.

Modos operacionais de iluminação	Área nominal (km ²)	Ângulo de incidência (graus)	Resolução nominal (m)
<i>Fine F1 near</i>	50 X 50	36,4-39,6	8
F1		36,8-39,9	
<i>F1 far</i>		37,2-40,3	
<i>F2 near</i>		38,8-41,8	
F2		39,2-42,1	
<i>F2 far</i>		39,6-42,5	
<i>F3 near</i>		41,1-43,7	
F3		41,5-44,0	
<i>F3 far</i>		41,8-44,3	
<i>F4 near</i>		43,1-45,5	
F4		43,5-45,8	
<i>F4 far</i>		43,8-46,1	
<i>F5 near</i>		45,0-47,2	
F5		45,3-47,5	
<i>F5 far</i>		45,6-47,8	
<i>Standard S1</i>	100 X 100	20-27	30
S2		24-31	
S3		30-37	
S4		34-40	
S5		36-42	
S6		41-46	
S7		45-49	
<i>Wide W1</i>	165 X 165	20-31	30
W2	150 X 150	31-39	
W3	150 X 150	39-45	
<i>ScanSAR Narrow SCNA</i>	300 X 300	20-40	50
SCNB		31-46	
<i>Scan SAR Wide SW1</i>	500 X 500	20-49	100
<i>Extended High H1</i>	75 X 75	49-52	25
H2		50-53	
H3		52-55	
H4		54-57	
H5		56-58	
H6		57-59	
<i>Extended Low L1</i>	170 X 170	10-23	35

Fonte: RADARSAT International (1996).

No modo de operação ScanSAR, combinações de dois, três e quatro modos de imageamento simples são utilizadas durante a aquisição das imagens. Cada modo é selecionado sequencialmente. Desta forma, os modos são coletados em uma faixa mais ampla do que seria normalmente utilizada para os modos simples propriamente ditos. A configuração do modo *ScanSAR Narrow* (SCN) possui faixa de imageamento de 300 km, resolução nominal de 50 m e divide-se em *ScanSAR Narrow A* (SNA), para imagens oriundas da combinação entre os modos *Wide 1* (W1) e *Wide 2* (W2) e ângulos de incidência entre 20° e 39°, ou *ScanSAR Narrow B* (SNB), para imagens oriundas da combinação entre os modos *Wide 2* (W2), *Standard 5* (S5) e *Standard 6* (S6) e ângulos de incidência entre 31° e 46°. A configuração do modo *ScanSAR Wide* (SCW) divide-se em *ScanSAR Wide A* (SWA), que possui faixa de imageamento de 500 km, e em *ScanSAR Wide B* (SWB), com faixa imageada de 450 km. Ambos os modos possuem resolução nominal de 100 m. O modo SWA caracteriza-se pela combinação dos modos simples *Wide 1* (W1), *Wide 2* (W2), *Wide 3* (W3) e *Standard 7* (S7) e ângulos de incidência entre 20° e 49°. O modo SWB caracteriza-se pela combinação entre os modos *Wide 1* (W1), *Wide 2* (W2), *Standard 5* (S5) e *Standard 6* (S6) e ângulos de incidência entre 31° e 46°.

O satélite ENVISAT foi desenvolvido por um consórcio de países Europeus e lançado em março de 2002 pela Agência Espacial Européia. Sua missão consiste em fornecer, através dos 10 instrumentos sensores a bordo, medidas da atmosfera, oceano, superfície terrestre e coberturas de gelo, visando o monitoramento do aquecimento global, grau de contaminação atmosférica e riscos de desastres naturais. Seus principais sensores são o sensor ótico MERIS e o radar ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*). O instrumento sensor ASAR opera na faixa das microondas do espectro eletromagnético (Banda C / Frequência de 5,3 GHz e Comprimento de Onda de 5,8 cm). Objetivando a continuidade dos sistemas ERS-1 e ERS-2, o ENVISAT-ASAR foi desenhado para adquirir dados em pares de quatro combinações polarimétricas, além de operar no modo dito *wide swath* (>400 km). Apesar de conter possibilidades de adquirir dados em polarimetrias distintas, o ENVISAT não é capaz de obter dados em polarimetria de quadratura, ao contrário dos satélites Canadense RADARSAT-2 e Japonês PALSAR (Tabela 3.7).

Tabela 3.7 - Características do Satélite ENVISAT-ASAR.

Geometria	Heliosíncrona
Altitude	796 km
Inclinação	98.5°
Período	100 minutos
Período de Revisita	35 Dias
Órbitas por dia	14
Frequência	5,3 GHz
Comprimento de Onda	5,8 cm (Banda C)
Polarização	VV, HH, HV/HH ou VH/VV

O satélite RADARSAT-2, lançado em dezembro de 2007, traz em sua configuração muitas características do predecessor RADARSAT-1, apresentado adicionalmente melhoramentos significativos (Figura 3.16). Constitui a continuação do programa RADARSAT, principalmente por apresentar a mesma altitude, órbita e modos de imageamento existentes no primeiro satélite da série.

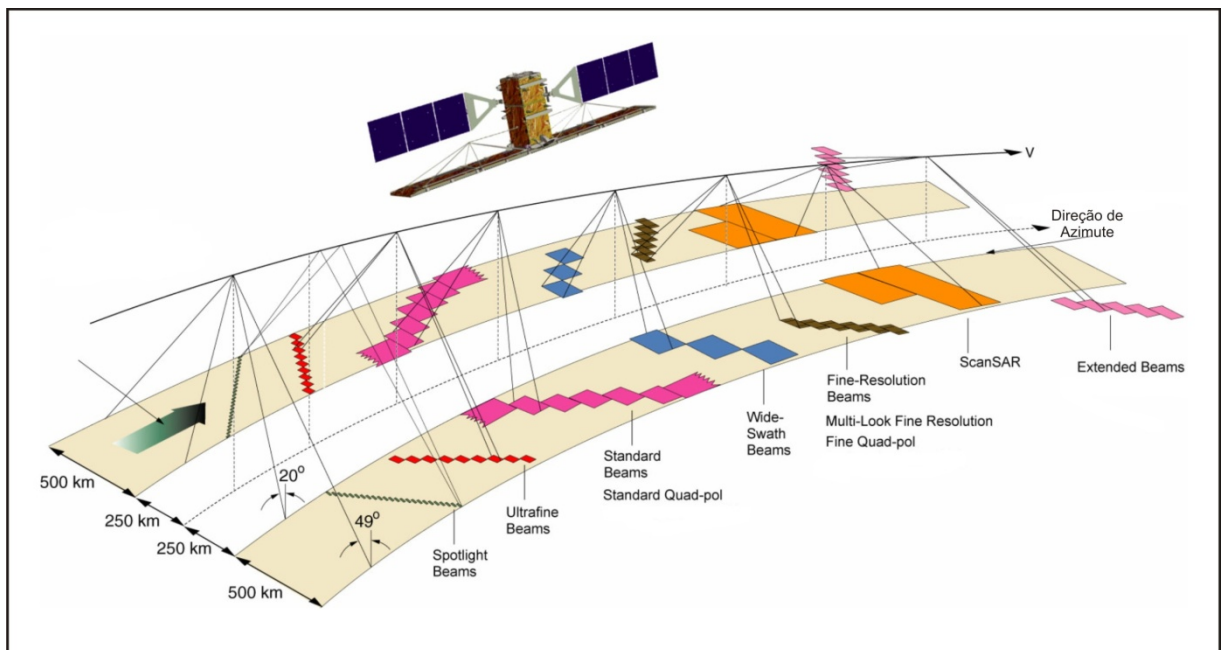


Figura 3.16 - Flexibilidade de modos de imageamento do RADARSAT-2. Fonte: <http://gs.mdacorporation.com>

Dentre as inovações do sistema RADARSAT-2, destacam-se a redução para tempo inferior a 1 segundo na mudança entre modos de imageamento e a presença de todas as polarizações HH, VV, VH e HV, assim como a capacidade de utilizar uma faixa de cobertura a leste ou oeste da direção de azimute (Tabela 3.8).

Tabela 3.8 - Modos operacionais de iluminação do satélite RADARSAT-2. Modos equivalentes ao RADARSAT-1 com polarização paralela e cruzada (transmite H ou V; recebe H ou V ou H e V). Fonte: <http://gs.mdacorporation.com>.

Modos Operacionais de iluminação	Área Nominal (km)	Ângulo de incidência (graus)	Faixa de cobertura a leste ou oeste da direção de azimute (km)	Resolução nominal (alcance x azimute) (m)
<i>Standard</i>	100 x 100	20 – 49	250-750	25 x 26
<i>Wide</i>	150 x 150	20 – 45	250-650	30 x 26
<i>Extended Low*</i>	170 x 170	10 – 23	125-300	40 x 26
<i>Extended High*</i>	70 x 70	49 – 60	750-1000	18 x 26
<i>Fine</i>	50 x 50	30 – 50	400-750	8.0 x 8.0
<i>ScanSAR wide</i>	500 x 500	20 – 49	250-750	100 x 100
<i>ScanSAR narrow</i>	300 x 300	20 – 46	250-720	50 x 50

*Dados obtidos somente em polarização paralela (HH ou VV)

Além disso, o RADARSAT-2 disponibiliza os novos modos de imageamento “*ultrafine beam mode*” e “*multilook fine beam mode*” (Tabela 3.9). A presença de receptores GPS a bordo melhora em muito a capacidade de controle da posição da órbita.

Tabela 3.9 - Polarização paralela seletiva (transmite H ou V; recebe H ou V). Fonte: <http://gs.mdacorporation.com>.

Modos operacionais de iluminação	Área nominal (km)	Ângulo de incidência (°)	Faixa de cobertura a leste ou a oeste da direção de azimute (km)	Resolução nominal (alcance x azimute) (m)
Multilook Fine	50 x 50	30 -40	400-750	7,9 x 7,4 – 9,1
Ultrafine	20 x 20	30-50	400-550	3,0 x 2,4 – 3,4

O RADARSAT-2 é o primeiro satélite comercial com sensor SAR a oferecer dados polarimétricos (“*quadrature-polarimetry – quad-pol*”), que fornece informações em amplitude e fase (Tabela 3.10).

Tabela 3.10 - Modos operacionais de iluminação em modo multipolarimétrico (transmite H e V em pulsos alternados; recebe H e V em cada pulso). Fonte: <http://gs.mdacorporation.com>.

Modos operacionais de iluminação	Área nominal (km)	Ângulo de incidência (°)	Faixa de cobertura a leste ou oeste da direção de azimute (km)	Resolução nominal (alcance x azimute) (m)
<i>Standard Quad-Pol</i>	25 x 25	20 – 41	250-600	25 x 8,0
<i>Fine Quad-Pol</i>	25 x 25	20 – 41	400-600	9,0 x 8,0

Referências detalhadas sobre princípios dos sistemas de radar e suas aplicações podem ser encontradas principalmente em Ulaby *et al.* (1986); Elachi *et al.* (1982); Tomiyasu (1978); Elachi (1988); Sabins (1999); Henderson e Lewis (1998); Jackson e Apel (2004), Desnos *et al.* (2001), Van der Sanden e Ross (2001) ou nos respectivos endereços eletrônicos: <http://envisat.esa.int>, <http://gs.mdacorporation.com> ou <http://www.radarsat2.info>.

4 ANÁLISE INTELIGENTE DE DADOS

A exploração de recursos naturais é considerada uma atividade multidisciplinar desenvolvida em estágios e normalmente inicia em pequena escala e progride para grandes escalas, culminando com a determinação de prospectos exploratórios. Em pequenas escalas, determina-se a delimitação de regiões onde possa haver potencialidade para a exploração do bem mineral desejado, utilizando informações baseadas na ambientação tectônica e geologia regional. Em escalas médias, partes destas regiões são selecionadas para investigações mais detalhadas através de técnicas de prospecção geofísica, geoquímica, mapeamento geológico. Tendo sido identificadas estas áreas mais específicas e favoráveis, mapas em grandes escalas serão produzidos e prospectos poderão então ser identificados ou então se inicia uma investigação ainda mais detalhada. Nesta etapa, aspectos logísticos, econômicos e ambientais deverão ser considerados, além de muitos outros, onde os processos de tomada de decisão se baseiam em uma gama variada de dados temáticos advindos de um Sistema de Informações Geográficas.

A utilização de sistemas de informações geográficas na modelagem de dados espaciais é uma tecnologia indispensável para a análise de informações oriundas de fontes múltiplas, com o propósito de auxiliar usuários em processos de tomada de decisões. A capacidade de análise integrada de informações tem como objetivo freqüente a obtenção de predições, que pode ser ultimamente traduzida pela geração de mapas de favorabilidade (Hong *et al.*, 1999; Howard *et al.*, 2009; Moreira, *et al.*, 2003; Moreira *et al.*, 2002).

A maior parte dos projetos que envolvem sistemas de informações geográficas aplicados à exploração de recursos naturais pode ser dividida em três estágios principais, sendo estes (i) Criação de bases de dados espaciais, (ii) Processamento de dados e, (iii) Análise integrada de dados.

4.1 Modelos baseados em conhecimento

A criação de uma base de dados espaciais é considerada uma das fases mais importantes, pois o critério na ingestão de dados multidisciplinares garantirá o sucesso dos estágios consecutivos. O processamento de dados atuará na produção de evidências ou resultados preliminares. Por fim, a análise integrada se utilizará de modelos empíricos a fim de produzir evidências conclusivas.

Modelos baseados nas relações estatísticas ou heurísticas são considerados empíricos. Nestes modelos, a dependência espacial entre as variáveis regionalizadas pode ser estimada por critérios estatísticos ou geostatísticos a partir de amostras ou de um conjunto de classes com limiares pré-definidos por um especialista. Modelos utilizados na predição da potencialidade mineral de uma determinada região são considerados exemplos de modelos empíricos.

Os modelos empíricos se dividem em dois tipos: os modelos baseados no conhecimento e os modelos baseados em dados. Nos modelos baseados em dados, os dados disponíveis são considerados satisfatórios como entrada para modelos que possam estimar ou gerar previsões baseadas única e exclusivamente nos dados, como por exemplo, a inferência bayesiana (Teorema de Bayes). Este trabalho abordará especificamente os modelos baseados no conhecimento, tal qual a simultaneidade Booleana (*Boolean Logic*), Possibilidade *Fuzzy* (*Fuzzy Logic*) e Média Ponderada (*Index Overlay Models*).

Estes modelos utilizam conjuntos de informações de entrada onde serão utilizadas metodologias que nos permitirão descobrir localizações ou zonas que satisfarão um conjunto de regras e critérios ponderados. A principal vantagem desta técnica é sua habilidade na geração de graus de potencialidade calculados a partir da combinação de evidências ponderadas multi-fonte.

A simultaneidade booleana foi proposta inicialmente por George Boole em 1854 e consiste na base atual da aritmética computacional. Nesta álgebra, as variáveis denominadas binárias podem assumir somente dois valores distintos: um (1) ou zero (0), verdadeiro ou falso, e se utilizam das operações através dos operadores de adição lógica “OU” (OR) representada pelos símbolos “+”, “V” ou “U”; multiplicação lógica “E” (AND) representada pelos símbolos “.”, “ \wedge ” ou “ \cap ” e; inversão lógica ou

complementação “NÃO” (*NOT*) representada pelos símbolos \neg , \sim ou — , bem como das operações da teoria de conjuntos “SOMA”, “PRODUTO” e “COMPLEMENTO”

Em termos práticos, a modelagem booleana consiste na combinação lógica de mapas binários resultantes da aplicação de operadores condicionais. Neste processo, cada mapa binário utilizado representa uma camada (*layer*) de evidência. A combinação de distintos *layers* de evidência propicia a formulação de hipóteses ou proposições, sendo que a hipótese analisada neste estudo é: “Esta localização é a mais favorável para indicar a presença de um sistema petrolífero ativo”.

A simultaneidade booleana é uma técnica simples, de fácil implementação e prática. Entretanto, não é usual atribuir graus de importância equivalentes às evidências e critérios que serão combinados. As evidências são normalmente ponderadas de acordo com sua significância relativa. Dentre as técnicas mais utilizadas na ponderação de evidências, destaca-se a média ponderada. No caso de as evidências ou mapas serem binários, cada mapa deverá ser multiplicado por um peso específico, somado a todos os mapas envolvidos no modelo e normalizado pela soma dos pesos utilizados. O resultado é constituído de valores que variam de 0 a 1, que podem ser posteriormente classificados em intervalos distintos apropriados para o mapeamento de classes. Os valores ponderados *S* (*score*) atribuídos a cada unidade fundamental das evidências combinadas é definido pela seguinte equação:

$$S = \frac{\sum_i^n W_i \text{class} (MAP_i)}{\sum_i^n W_i}$$

onde W_i é o peso da evidência i e $\text{class} (MAP_i)$ poderá assumir o valor de 1 quando denotar presença ou 0 quando denotar ausência da condição binária prevista. O mapa resultante desta operação se traduz em domínios contendo valores hierárquicos baseados nos pesos utilizados que serão extremamente desfavoráveis para valores próximos de 0 e altamente favoráveis para valores próximos de 1. Este método oferece mais recursos que a álgebra booleana e é capaz de representar o sentimento do especialista para os domínios investigados. A única desvantagem deste método consiste em sua natureza linear aditiva (Bonham-Carter, 1994).

4.2 Teoria de conjuntos *Fuzzy*

Os principais aspectos que caracterizam a imperfeição da informação são a imprecisão e a incerteza. Os mesmos podem ser caracterizados a partir de métodos de investigação qualitativos (indicados em casos de ausência de conhecimento) e quantitativos (indicados para a análise de incerteza e imprecisão). Incerteza é a falta de conhecimento *a priori* referente ao resultado de uma ação ou ao efeito de uma condição. Ela se aplica à dificuldade em prever eventos futuros ou a eventuais erros em medidas físicas já realizadas. Precisão é o grau de variação de resultados de uma medição. O estudo das ciências naturais convive freqüentemente com os termos supracitados que estão intimamente associados ao conhecimento da gênese e disposição dos recursos naturais. As teorias mais conhecidas e utilizadas no estudo da imprecisão e da incerteza são respectivamente a teoria clássica dos conjuntos e a teoria de probabilidades. Entretanto, nem sempre estas técnicas conseguem assimilar a riqueza da informação e conhecimento disponibilizados pelo especialista (Zadeh e Yager, 1991; Heuvelink e Burrough, 2002; Guo, 2009; Hagen, 2003; Heuvelink e Burrough, 2002; Hwang *et al.*, 1998).

A teoria dos conjuntos denominados *fuzzy* (*fuzzy sets*) foi inicialmente proposta por Zadeh (1965) com o propósito de se traduzir o aspecto vago, incerto ou impreciso da informação em valores numéricos. Desta forma, a representação de conhecimento através de sentenças do raciocínio aproximado é útil para aplicação em problemas do mundo real e adaptada à compreensão humana, favorecendo a aquisição de conhecimento e a interpretação lingüística dos resultados.

É importante ressaltarmos a diferença existente entre as definições de probabilidade e possibilidade. Ambas lidam com graus de incerteza e são definidas no intervalo $[0,1]$, porém, na teoria de probabilidades a incerteza está relacionada ao caráter aleatório dos acontecimentos, enquanto que em teoria de possibilidades a incerteza é uma característica do modo vago como é definida a ocorrência. A Figura 4.1 ilustra o comportamento da incerteza e imprecisão da informação.

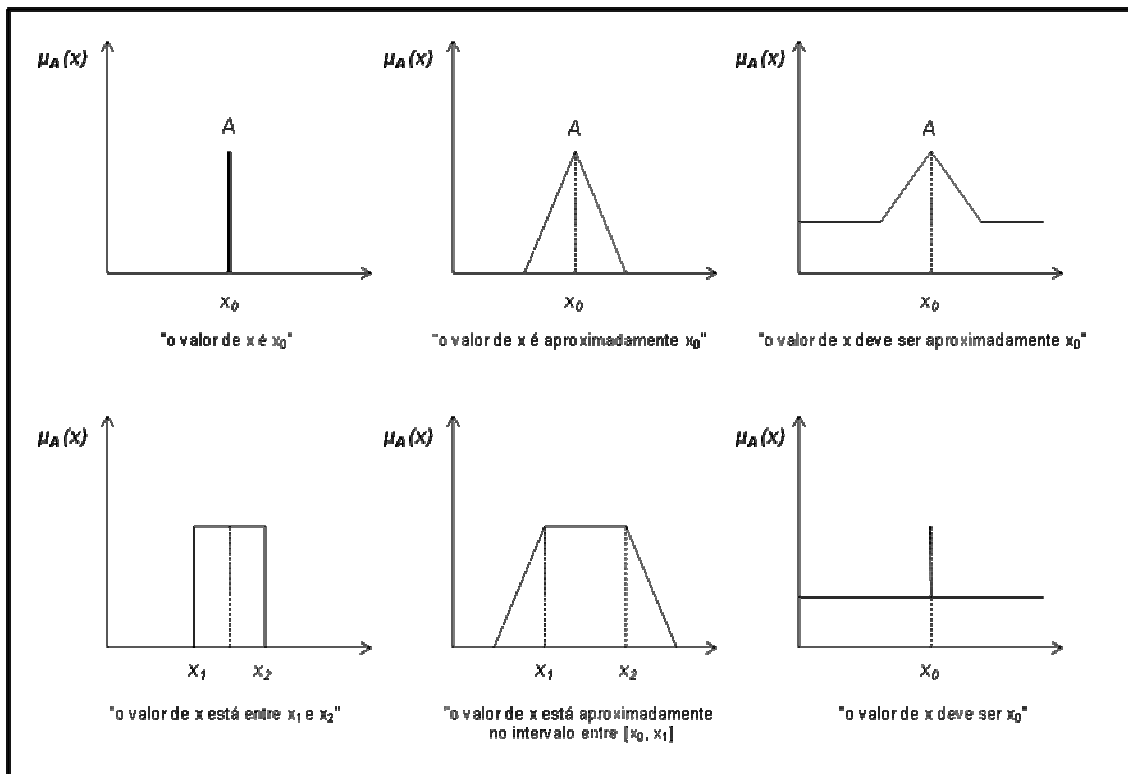


Figura 4.1 - Representações das formas de incerteza e imprecisão por conjuntos *fuzzy*. Fonte: Burrough e Heuvelink, 1992.

Os sistemas especialistas baseados em conhecimento são capazes de realizar inferências sobre informações imperfeitas a partir de conhecimento especializado e não formalizado, visando-se obter diagnósticos, previsões, monitoramentos, análises, planejamentos, etc. A Inteligência Artificial Simbólica (IAS) se fundamenta na hipótese de que a inteligência é consequência da manipulação formal de símbolos através do uso da lógica para representar o mundo. A abordagem simbólica é voltada para o tratamento da incerteza e permite a reconstituição do raciocínio a partir das fontes de informação até as conclusões finais. A metodologia de extração de conhecimento (*Knowledge Data Discovery*) utilizada neste estudo se apropriará da técnica de lógica *fuzzy*.

O conceito de conjuntos *fuzzy* (*fuzzy sets*) foi sintetizado com o objetivo de generalizar a idéia representada pelos conjuntos ordinários descritos pela teoria clássica dos conjuntos (*crisp sets*) proposta inicialmente por Georg Cantor em 1874.

Os conjuntos são denotados por letras maiúsculas e seus elementos por letras minúsculas. A letra “U” denota o universo do discurso ou o conjunto universo, o qual possui todos os possíveis elementos de determinada aplicação, a partir dos quais,

conjuntos podem ser formados. Para indicar que determinado elemento x não é elemento de \mathcal{A} , escreve-se $x \notin \mathcal{A}$. Dado um conjunto universo \mathcal{U} , há três métodos básicos de representação de conjuntos em \mathcal{U} :

1. Por meio da enumeração de seus elementos. Este método é utilizado apenas para conjuntos finitos. Um conjunto \mathcal{A} cujos elementos são a_1, a_2, \dots, a_n é usualmente escrito como $\mathcal{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$.
2. Por meio de uma proposição P que é satisfeita por seus elementos. A notação comum para esse método de representação é: $\mathcal{A} = \{x \mid P(x)\}$. \mathcal{A} é o conjunto de todos os elementos de \mathcal{U} para os quais a proposição $P(x)$ é verdadeira. Nesse tipo de representação é necessário que, para qualquer $x \in \mathcal{U}$, a proposição $P(x)$ seja verdadeira ou falsa.
3. Por meio de uma função característica, que discrimina quais elementos de \mathcal{U} são elementos do conjunto e quais não são. A representação do conjunto \mathcal{A} por uma função característica é escrita como:

$$X_{\mathcal{A}}(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in \mathcal{A} \\ 0 & \text{se } x \notin \mathcal{A} \end{cases}$$

Isto é, a função característica associa elementos do conjunto \mathcal{U} a elementos do conjunto $\{0,1\}$, o que é formalmente expresso por:

$$X_{\mathcal{A}}: \mathcal{U} \rightarrow \{0,1\}$$

Para cada $x \in \mathcal{U}$, se a $X_{\mathcal{A}}(x) = 1$, x é elemento de \mathcal{A} ; se $X_{\mathcal{A}}(x) = 0$, x não é elemento de \mathcal{A} .

Particularmente, a representação de conjuntos por meio de sua função característica é bastante importante dado que pode ser generalizada para conjuntos *fuzzy*.

A teoria dos conjuntos *fuzzy* (*fuzzy sets*) está fundamentada na generalização da teoria clássica de conjuntos (*crisp sets*) com o objetivo de representar conjuntos cujas fronteiras não estão claras. Esta generalização resolve os paradoxos gerados a partir da classificação em “VERDADEIRO ou FALSO” da lógica clássica. Tradicionalmente, uma proposição lógica tem dois extremos: ou “completamente verdadeiro” ou “completamente falso”. Entretanto, na lógica *fuzzy*, uma premissa varia em grau de verdade de 0 a 1, o que leva a ser parcialmente verdadeira e parcialmente falsa (Figura 4.2). Formalmente, um conjunto *fuzzy* A do universo de discurso U define-se por:

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in U\}$$

onde a função $\mu_A : U \rightarrow [0,1]$ é denominada função de pertinência e associa a cada elemento x de U o grau $\mu_A(x)$, com o qual x pertence a \mathcal{A} . A função de pertinência $\mu_A(x)$ indica o grau de compatibilidade entre x e o conceito expresso por \mathcal{A} .

$\mu_A(x) = 1$ indica que x é completamente compatível (pertinente) com \mathcal{A} ;

$\mu_A(x) = 0$ indica que x é completamente incompatível com \mathcal{A} ;

$0 < \mu_A(x) < 1$ indica que x é parcialmente compatível com \mathcal{A} , com grau $\mu_A(x)$.

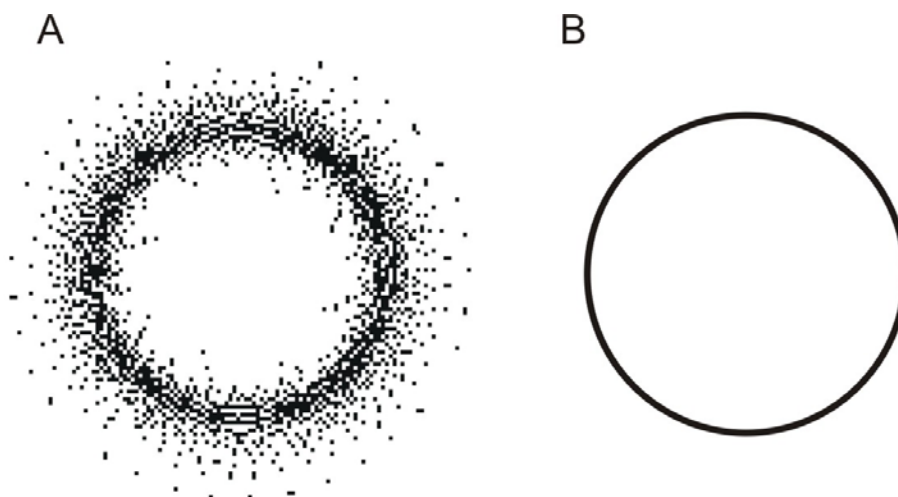


Figura 4.2 - Diagrama de Venn ilustrando a diferença de fronteira entre conjuntos (A) *fuzzy* e (B) booleano (*crisp*). Fonte: Burrough, 1998.

Os conjuntos *fuzzy* podem ser definidos considerando um conjunto universo finito ou infinito, e as funções de pertinência que definem esses conjuntos são normalmente representadas de forma gráfica (Figura 4.3), tabular ou analítica. Geralmente, quando o conjunto *fuzzy* é definido em um universo infinito, utiliza-se a representação analítica, ou seja, por meio de funções parametrizáveis como as ilustradas a seguir (Figura 4.4).

- Funções Triangulares:

$$f_{\text{triangular}}(x; a, b, c) = \text{Max}\left(\text{Min}\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right)$$

- Funções Trapezoidais:

$$f_{\text{trapezoidal}}(x; a, b, c, d) = \text{Max}\left(\text{Min}\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right)$$

- Funções Gaussianas:

$$f_{\text{gaussiana}}(x; a, b, c) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}$$

- Funções Sino Generalizadas

$$f_{\text{sino}}(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-c}{b}\right|^{2b}}$$

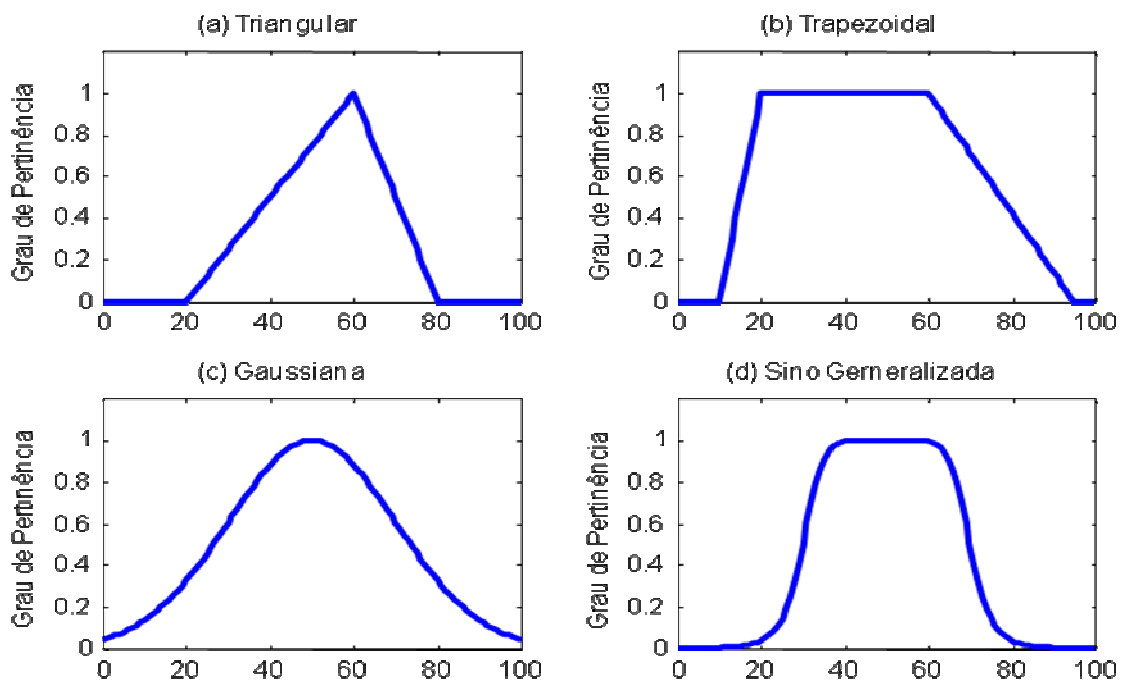


Figura 4.3 - Representação gráfica das principais funções de pertinência.

$$\begin{cases} x - 3, & \text{se } 3 \leq x \leq 4 \\ 5 - x, & \text{se } 4 \leq x \leq 5 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

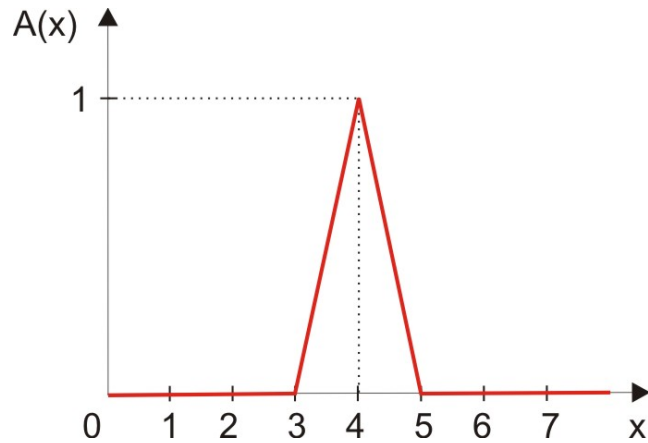


Figura 4.4 - Representação gráfica da função de pertinência do conjunto *fuzzy* que representa o conceito "Aproximadamente 4". Fonte: Nicoletti e Camargo, 2004.

As funções triangulares simétricas (Figura 4.5) são caracterizadas por três parâmetros: a , b e s , através da expressão:

$$A(x) = \begin{cases} b \left(1 - \frac{|x - a|}{s} \right), & \text{se } (a - s) \leq x \leq (a + s) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

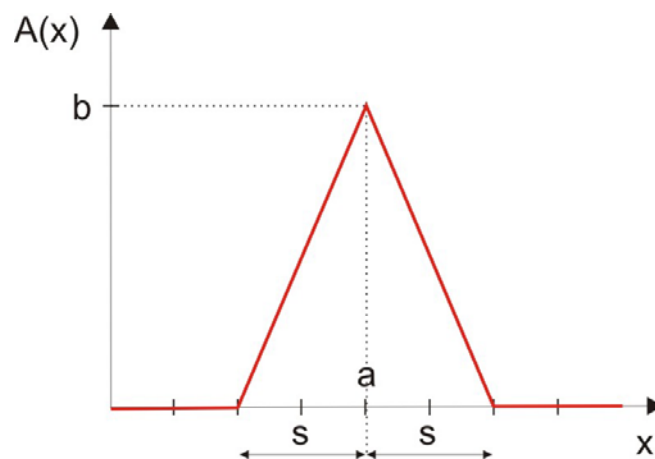


Figura 4.5 - Representação geral de uma função de pertinência triangular simétrica. Fonte: Nicoletti e Camargo, 2004.

As funções trapezoidais possuem a expressão analítica geral e representação gráfica ilustrados a seguir (Figura 4.6).

$$\begin{cases} \frac{(a-x)e}{a-b}, & \text{se } a \leq x \leq b \\ e, & \text{se } b \leq x \leq c \\ \frac{(d-x)e}{d-c}, & \text{se } c \leq x \leq d \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

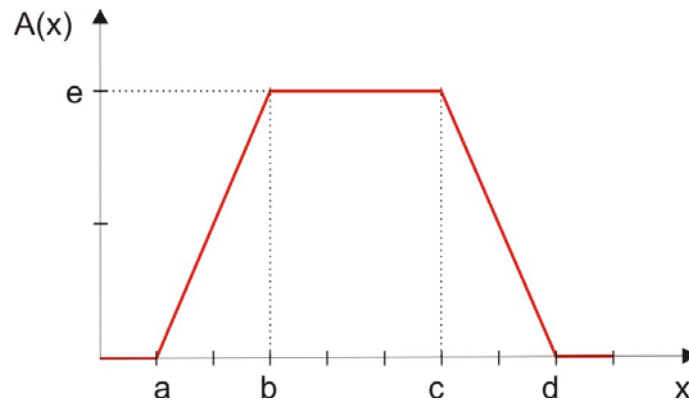


Figura 4.6 - Representação geral de uma função de pertinência trapezoidal. Fonte: Nicoletti e Camargo, 2004.

A cardinalidade de um conjunto *fuzzy* \mathcal{A} é expressa como:

$$|A| = \sum_{x \in U} \mu_A(x), \quad \text{para } U \text{ discreto}$$

$$|A| = \int_U \mu_A(x), \quad \text{para } U \text{ contínuo}$$

Pode-se obter a representação aproximada de um conjunto *fuzzy* \mathcal{A} em U através de conjuntos *crisp* em U . Estes subconjuntos, denotados por \mathcal{A}_α e denominados cortes- α (*α -cut*) são definidos como:

$$\mathcal{A}_\alpha = \{x \in U \mid \mu_A(x) \geq \alpha\}$$

Os casos extremos destes conjuntos são o suporte de \mathcal{A} , denotado como Suporte (\mathcal{A}), que agrupa elementos de U que são de, alguma forma, compatíveis com o conceito expresso por \mathcal{A} , e o núcleo de \mathcal{A} , denotado por Núcleo (\mathcal{A}), que agrupa

elementos de \mathcal{A} que são completamente compatíveis com o conceito expresso por \mathcal{A} .

$$\text{Suporte}(A) = \{x \in U \mid \mu_A(x) \geq 0\} = \lim_{\alpha \rightarrow 0} A_\alpha$$

$$\text{Núcleo}(A) = \{x \in U \mid \mu_A(x) = 1\} = A_1$$

A altura de \mathcal{A} representa o maior grau de pertinência dos elementos de \mathcal{U} em relação ao conceito expresso por \mathcal{A} , ou seja, a altura de A pode ser vista como o supremo dos α s para os quais $A_\alpha \neq \emptyset$. Um conjunto *fuzzy* é chamado normal quando a altura $(A) = 1$ e chamado subnormal quando a altura $(A) < 1$. A Figura 4.7 ilustra os conceitos de suporte, núcleo, altura para um conjunto *fuzzy* \mathcal{A} representado por uma função de pertinência trapezoidal definida em um intervalo real $[x, y]$.

$$\text{Altura}(A) = \text{Sup}_{x \in U} \mu_A(x)$$

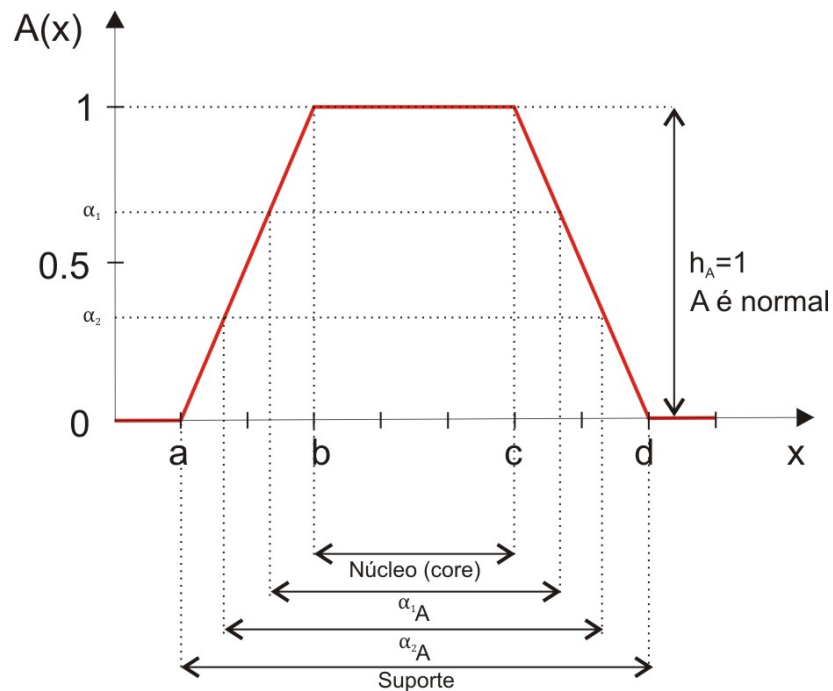


Figura 4.7 - Suporte, núcleo e altura de um conjunto *fuzzy* representado por uma função de pertinência trapezoidal. Fonte: Nicoletti e Camargo, 2004.

As operações entre conjuntos *fuzzy* são definidas por operadores *fuzzy* padrão (*standard*) que agem sobre funções de pertinência e traduzem respectivamente o complemento padrão, união padrão e interseção padrão definidas para todo $x \in \mathcal{X}$ como:

Complemento: $\bar{A}(x) = 1 - A(x)$

Interseção: $C = A \cap B \Leftrightarrow \mu_C(x) = \text{Min}(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$

União: $C = A \cup B \Leftrightarrow \mu_C(x) = \text{Max}(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$

Essas operações “standard” não são as únicas generalizações das correspondentes clássicas. Para cada operação padrão, há uma vasta classe de funções cujos elementos também se qualificam como generalizações *fuzzy* das generalizações clássicas. Na teoria dos conjuntos *fuzzy*, a interseção é implementada por uma família de operadores denominados t-normas e a união é implementada por uma família de operadores denominados t-conormas ou S-normas.

Uma função $X: [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$, é dita ser comutativa, associativa e monotônica se A satisfaz as seguintes propriedades, respectivamente para $\forall a, b \in [0,1]$:

Comutatividade: $X(a,b) = X(b,a)$;

Associatividade: $X(a, X(b,c)) = X(X(a,b), c)$;

Monotonicidade: $X(a,b) \leq X(c,d)$ se $a \leq c$ e $b \leq d$.

Um operador $T: [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ é denominado de t-norma se T é comutativo, associativo e monotônico e verifica a seguinte propriedade, para $\forall a, b \in [0,1]$:

Elemento neutro = 1 : $T(a,1) = a$

Da mesma maneira, uma t-conorma \perp é uma função $\perp: [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ que é comutativa, associativa e monotônica e verifica a propriedade, para , para $\forall a, b \in [0,1]$:

Elemento neutro = 0 : $\perp(a,0) = a$

Uma t-norma T e uma t-conorma \perp são duais em relação a uma operação de negação $\neg: [0,1] \rightarrow [0,1]$ se elas satisfazem as relações de *De Morgan*, dadas por, para $\forall a, b \in [0,1]$:

Leis de *De Morgan*:

$$\neg(T(a,b)) = \perp(\neg a, \neg b);$$

$$\neg(\perp(a,b)) = T(\neg a, \neg b).$$

O principal operador de negação é dado por $\neg a = 1 - a$, mas outros operadores podem ser encontrados na literatura.

É importante notar que as t-normas e t-conormas se reduzem aos operadores clássicos de união e interseção quando os conjuntos são abruptos (*crisp*).

A Tabela 4.1 indica as t-normas e t-conormas mais utilizadas. A Figura 4.8 ilustra alguns destes operadores, em relação a dois conjuntos nebulosos A e B. Estes operadores satisfazem as leis de *De Morgan*, sendo que os mais utilizados são os operadores de Zadeh e probabilistas.

Tabela 4.1 - Principais t-normas e t-conormas duais.

t-norma	t-conorma	Nome
$Min(a,b)$	$Max(a,b)$	Zadeh
$a.b$	$a + b - ab$	probabilista
$Max(a + b - 1, 0)$	$Min(a + b, 1)$	Lukasiewicz
$\begin{cases} a, & \text{se } b = 1 \\ b, & \text{se } a = 1 \\ 0, & \text{senão} \end{cases}$	$\begin{cases} a, & \text{se } b = 0 \\ b, & \text{se } a = 0 \\ 0, & \text{senão} \end{cases}$	Weber

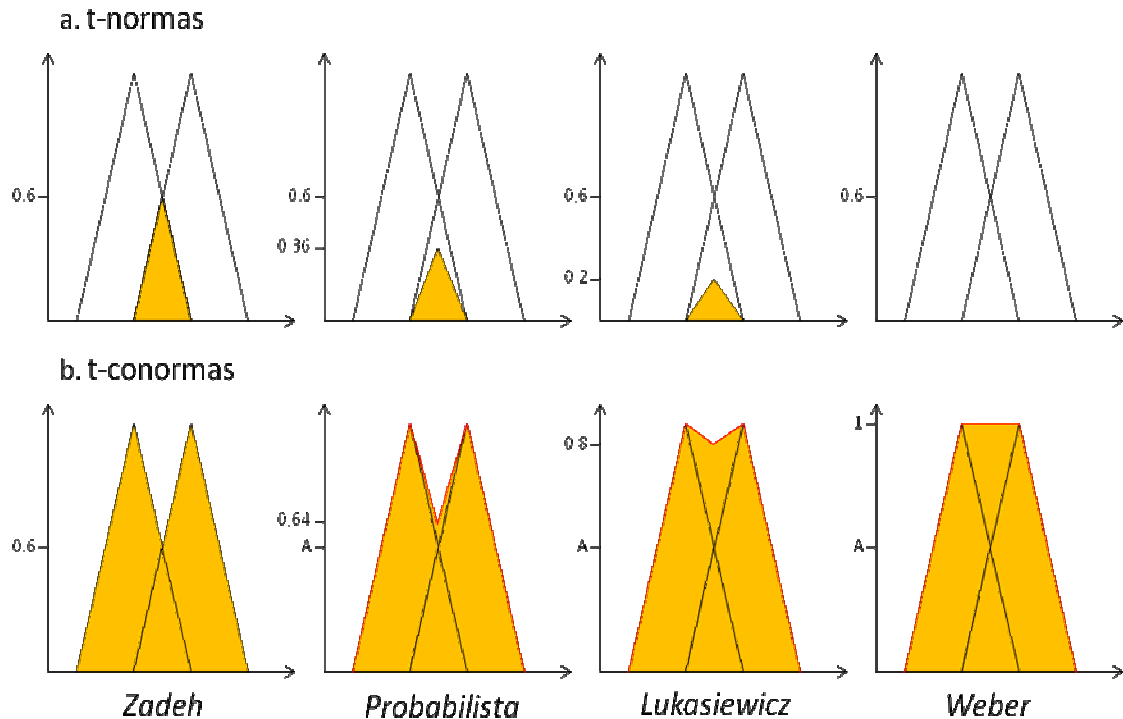


Figura 4.8 - Ilustração das principais t-normas e t-conormas. Fonte: Sandri e Correa, 1999.

Além dos operadores supracitados, An *et al.* 1991 descrevem outros operadores *fuzzy* utilizados com sucesso na integração de dados exploratórios, denominados produto algébrico (*Fuzzy algebraic product*), soma algébrica (*Fuzzy algebraic sum*) e operação gamma (*Gamma operation*). O produto algébrico se define pela seguinte equação:

$$\mu = \prod_{i=1}^n (\mu_i)$$

onde μ_i representa a função de pertinência *fuzzy* do mapa analisado e $i=1,2,3,\dots,n$; o número de mapas a ser combinado. Os valores de pertinência *fuzzy* para este operador apresentam valores pequenos devido à combinação de valores inferiores a 1. O valor final atribuído é sempre inferior ou igual ao menor valor de pertinência utilizado na combinação. Todavia, ao contrário dos operadores “*Fuzzy AND*” e “*Fuzzy OR*”, no produto algébrico todos os valores de pertinência envolvidos exercem influência sobre o resultado final.

A soma algébrica é complementar ao produto algébrico. O resultado final sempre apresenta valores superiores ou iguais ao maior valor de pertinência envolvido na combinação. É importante notar que apesar de o produto algébrico *fuzzy* ser um produto algébrico, a soma algébrica *fuzzy* não consiste em uma soma algébrica.

$$\mu = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)$$

O operador gamma define-se pelo produto entre a soma algébrica *fuzzy* e o produto algébrico *fuzzy*:

$$\mu = (1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i))^\gamma \cdot (\prod_{i=1}^n \mu_i)^{1-\gamma}$$

onde gamma (γ) é uma constante escolhida no intervalo [0,1]. Se $\gamma=0$, o operador gamma se reduz ao produto algébrico, e se $\gamma=1$, esta se reduz à soma algébrica. Segundo Bonham-Carter (1994) valores entre $0 < \gamma < 0,35$ possuem caráter diminutivo; valores entre $0,8 < \gamma < 1,0$ possuem caráter aumentativo; e os valores entre $0,35 < \gamma < 0,80$ gerarão resultados com valores de pertinência entre os valores de entrada menor e maior (Figura 4.9).

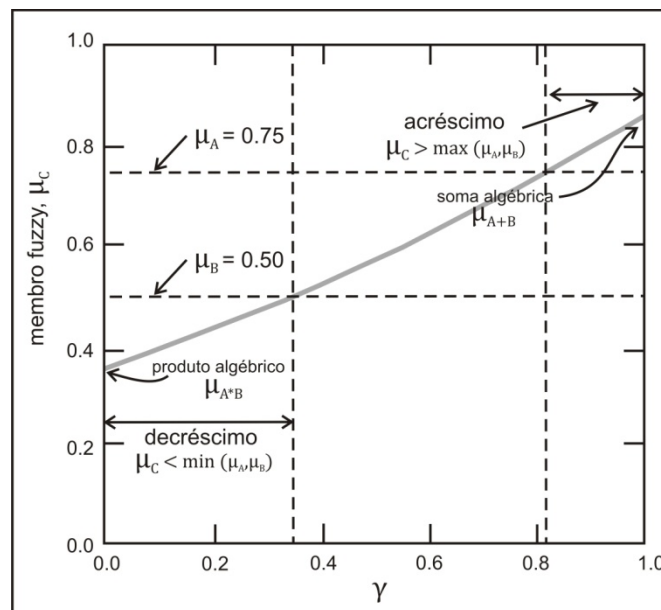


Figura 4.9 - Distribuição da função *fuzzy* gamma para distintos valores de γ . Fonte: Bonham-Carter, 1994.

Artigos que versem sobre a modelagem *fuzzy* de informações multidisciplinares são encontrados em Freitas, 1964; Blonda *et al.*, 1989; Wang, 1989; Moon e Chung, 1990; Bárdossy e Duckstein, 1995; Glagowski, 1996; Pedrycz e Gomide, 1998; Jiang e Eastman, 2000; Lee, 2000; Chen *et al.*, 2002; Tran e Duckstein, 2002; Dubois *et al.*, 2003; Luo e Dimitrakopoulos, 2003; Nicoletti e Camargo, 2004; Icaga, 2007; Boroushak e Malczewski, 2008; Genske e Heinrich 2009; Reshmidevi *et al.*, 2009; Stroppiana *et al.*, 2009 e; Zarghami e Szidarovsky, 2009.

5 METODOLOGIA ESPECÍFICA PARA O RANKING DE EXSUDAÇÕES DE ÓLEO

O conceito de fusão de informações é bastante utilizado em diversas áreas e relativamente simples de se entender, onde as palavras união, combinação, sinergia e integração, aparecem constantemente nas diversas definições existentes para o conceito. Dentre as definições mais comuns, destacamos algumas, a seguir: (a) fusão de imagens é a combinação de duas ou mais imagens diferentes através de um determinado algoritmo para se formar uma nova imagem; (b) fusão é um conjunto de métodos, ferramentas e meios utilizando dados de naturezas diversas a fim de se melhorar a qualidade da informação investigada; (c) técnicas de fusão de dados combinam dados de múltiplos sensores e informações relacionadas de bases de dados associadas objetivando-se atingir melhor acurácia e inferências mais específicas do que se poderia obter utilizando apenas um sensor; (d) fusão de dados é um processo multinível, multifacetado que lida com a detecção automática, associação, correlação, estimação, e combinação de dados e informações de fontes diversas e; (e) fusão de dados consiste em uma estrutura formal onde ferramentas e se expressam para a integração de dados de fontes distintas a fim de se obter informação de qualidade superior. Note que esta última definição enfatiza a estrutura e os fundamentos da fusão de dados dentro do sensoriamento remoto ao invés dos métodos e meios utilizados (Wald, 1999; Fortin e Dale, 2005).

As atividades preliminares de um processo exploratório em bacias sedimentares marítimas são baseadas em técnicas de extração de informações obtidas em escalas pequenas, de âmbito regional. Esta fase tem como principal objetivo o mapeamento geológico regional da bacia onde se pretende obter, dentre outras atividades, a caracterização dos sistemas petrolíferos presentes, através de feições estruturais, estratigrafia, evidências geoquímicas. O processo de tomada de decisão está presente em todo o ciclo exploratório, logo, técnicas de sensoriamento remoto desempenham papel indispensável na avaliação inicial de aspectos exploratórios da área de estudo.

Neste trabalho, serão utilizados dados oriundos de múltiplas fontes obtidos a partir de plataformas diversas objetivando a redução do risco exploratório para processos de geração e migração de hidrocarbonetos em fronteiras exploratórias de águas profundas e ultra-profundas. A modelagem da base de dados será analisada de forma integrada a partir de técnicas de lógica *fuzzy* customizadas em um sistema de informações geográficas (*Geographic Information System – GIS*).

O mapeamento da potencialidade mineral de uma determinada região é um exemplo prático e freqüente da aplicação de sistemas de informação geográfica em geologia. A metodologia de pesquisa compreende: (a) criação de uma base de dados espaço-temporal de exsudações marinhas de petróleo composta basicamente por produtos de sensoriamento remoto, dados geológicos, geofísicos, ambientais, meteorológicos e oceanográficos; (b) processamento integrado dos dados utilizando lógica *fuzzy* com o objetivo de se obter a extração de informações relevantes para confecção do modelo exploratório proposto e geração de evidências e; (c) modelagem integrada dos mapas gerados onde serão definidas as regras e funções de pertinência, ponderação de evidências; agregação de informações, geração de resultados preliminares, análise integrada de resultados utilizando operadores *fuzzy* e geração de mapas finais de favorabilidade mineral (Figura 5.1).

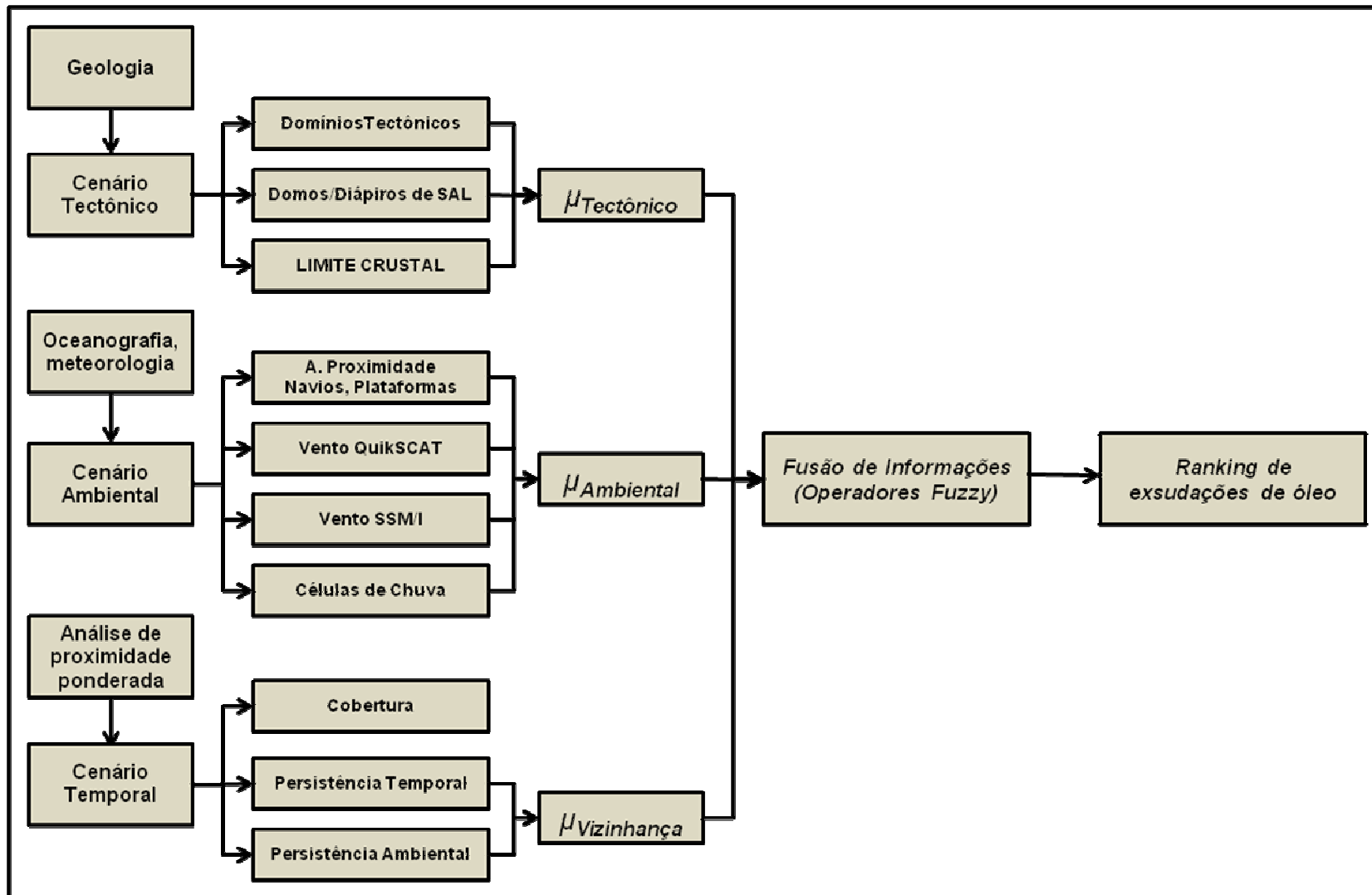


Figura 5.1 - Fluxograma simplificado do sistema *fuzzy* para caracterização qualitativa de exsudações de óleo em ambiente marinho.

5.1 *Ranking* quantitativo para exsudações de óleo em ambiente marinho

A utilização de informações sobre exsudações de óleo em atividades de prospecção é útil à medida que se almeja a redução do risco geológico para geração e migração de óleo em regiões *offshore* de fronteira exploratória. A identificação precisa da presença de sistemas petrolíferos ativos e o planejamento de campanhas de amostragem geoquímica são outros benefícios extraídos a partir das exsudações identificadas através de produtos de sensoriamento remoto por radar. Trabalhos correlatos são encontrados em Beisl *et al.*(2004).

Para se quantificar o fator geral de confiabilidade (FC geral) para cada exsudação de óleo interpretada nas imagens RADARSAT-1. Miranda *et al.*, (1998a, b, c e d) estabeleceram um *ranking* baseado em critérios tectônicos, temporais e ambientais, onde são pré-determinados quatro fatores de ponderação para cada critério supracitado, a saber: fator “1,00” referente ao nível de confiabilidade ótimo (ideal); fator “0,75” referente ao nível de confiabilidade alto, fator “0,50” referente ao nível de confiabilidade intermediário e fator “0,25” referente ao nível de confiabilidade baixo.

Nesta técnica, cada região investigada apresentará critérios tectônicos particulares de acordo com a compartimentação tectônica subjacente. Para tanto, as informações obtidas para cada bacia sedimentar são processadas e interpretadas em um sistema de informações geográficas para que se determinem os fatores de ponderação para cada domínio geológico de acordo com a favorabilidade ou possibilidade de ocorrência de exsudações de óleo.

No caso específico da porção mexicana do Golfo do México, o cenário tectônico ideal descreve a ocorrência de exsudações de óleo na presença de tectônica salina (halocinese) e em regiões com rochas geradoras do Jurássico Superior (Tithoniano). Desta forma, falhas e/ou diápiros salinos penetram os sedimentos sobrejacentes, criando caminhos de migração que conectam rochas reservatório e/ou rochas geradoras ao assoalho marinho, fazendo com que haja escape de óleo para a coluna d'água e posterior detecção. Os domínios tectônicos compilados e interpretados a partir da literatura de domínio público estão ilustrados na Figura 5.2.

O critério temporal consiste na análise de proximidade de exsudações de óleo interpretadas em imagens RADARSAT-1 adquiridas em momentos distintos. O padrão de repetibilidade observado em mapas com análise espaço-temporal confere às

exsudações uma maior credibilidade, reduzindo sobremaneira a incerteza da veracidade da informação. Os critérios de proximidade foram estabelecidos em intervalos com valores inferiores a 5 km, valores de 5 a 10 km, valores de 10 a 50 km e valores superiores a 50 km, este último referente à não repetibilidade de eventos.

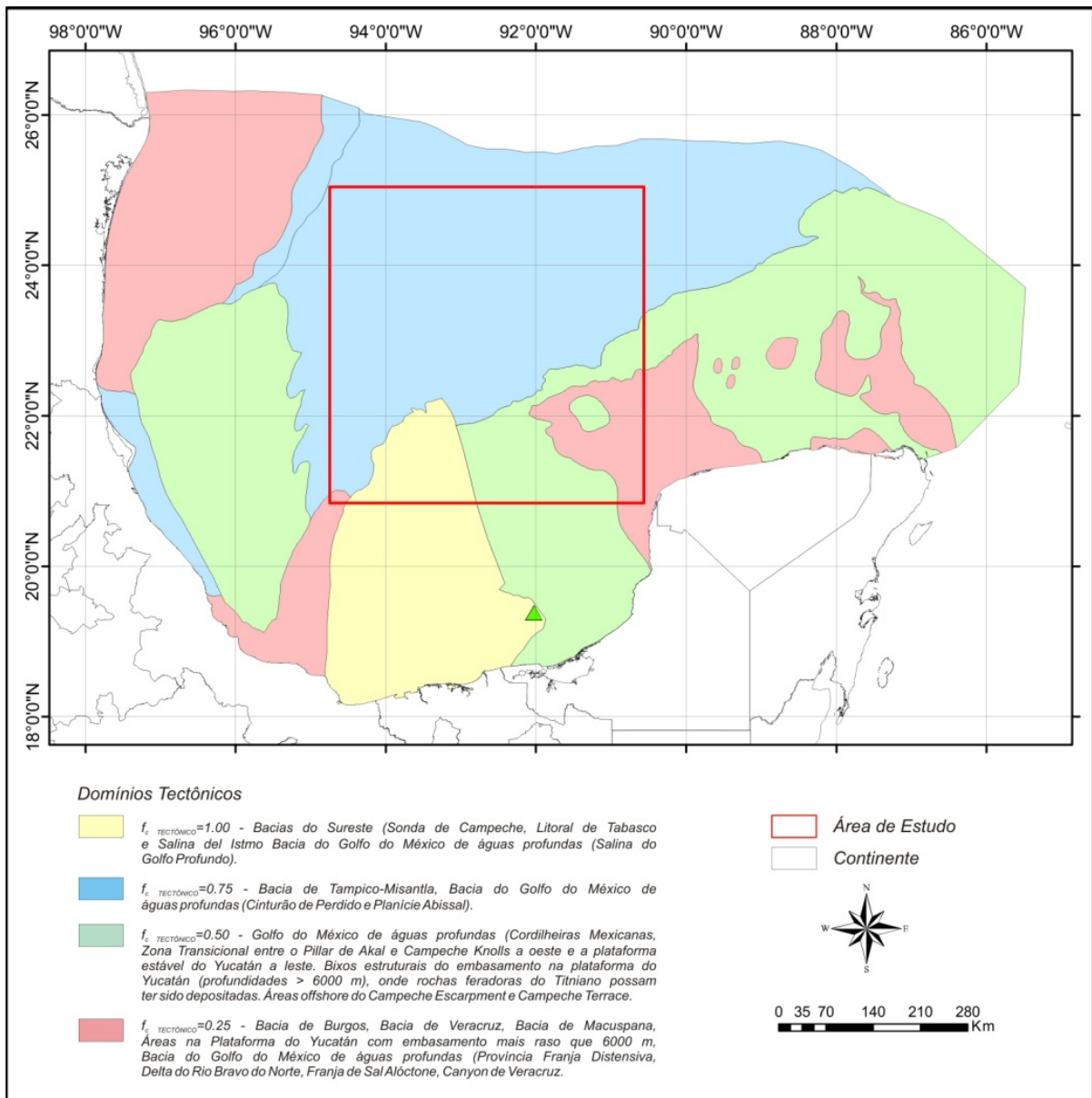


Figura 5.2 - Domínios tectônicos da porção mexicana do Golfo do México. Fonte: Modificado de Guzmán e Márquez-Domínguez, 2001.

O critério ambiental analisa as condições meteorológicas e oceanográficas no horário de aquisição dos dados SAR, onde se esperam limites adequados para que o processo de análise e interpretação de exsudações não seja prejudicado. Através da análise integrada de produtos de sensoriamento remoto oceanográfico e meteorológico com imagens SAR, podem-se identificar fenômenos e processos

naturais responsáveis pela redução do retroespalhamento em regiões específicas dos dados SAR. Tais fenômenos podem gerar assinaturas nas imagens SAR de falsos alvos (*look-alikes*), não relacionados à presença de óleo. Esta etapa é de fundamental importância na redução da incerteza dos resultados. Os fenômenos ambientais supracitados recebem então fatores de ponderação relacionados ao risco potencial da presença de interpretações falsas. Como exemplo, imaginemos que uma feição interpretada como exsudação de óleo encontra-se próxima de navios ou plataformas. Existe algum risco de que tal interpretação corresponda a um provável vazamento? Nestes casos, o critério de ponderação para este polígono será de “0,25”, pois é perfeitamente possível que tal polígono, de fato, não corresponda a uma exsudação de óleo, conforme interpretado.

O fator de confiabilidade da exsudação ($F_{C\ SEEP}$) quantifica o grau de associação da exsudação aos valores identificados nos cenários tectônicos, temporais e ambientais. Este fator é calculado a partir da multiplicação dos valores atribuídos aos diferentes cenários a fim de se determinar a posição da feição analisada no *ranking* final. Seu valor pode ser calculado pela expressão abaixo:

$$F_{C\ SEEP} = (f_{c\ TECTÔNICO}) \cdot (f_{c\ TEMPORAL}) \cdot (f_{c\ AMBIENTAL})$$

No caso hipotético de uma exsudação de óleo apresentar $f_{c\ TECTÔNICO} = 1,00$, $f_{c\ TEMPORAL} = 1,00$ e $f_{c\ AMBIENTAL} = 1,00$, o fator de confiabilidade da exsudação ($F_{C\ SEEP}$) resultante terá valor máximo (1,00). No caso de a exsudação apresentar $f_{c\ TECTÔNICO} = 0,25$, $f_{c\ TEMPORAL} = 0,25$ e $f_{c\ AMBIENTAL} = 0,25$, o fator de confiabilidade da exsudação ($F_{C\ SEEP}$) assumirá o valor mínimo possível de 0.02. Este *ranking* assumirá valores variáveis entre 0.02 e 1.00. Valores iguais do fator de confiabilidade poderão ser diferenciados através da hierarquização do cenário tectônico sobre o cenário temporal e do cenário temporal sobre o cenário ambiental respectivamente.

A Tabela 5.1 define os critérios utilizados para a porção mexicana em águas ultra-profundas do Golfo do México onde foram identificadas em 2003, 247 exsudações de óleo, sendo 138 caracterizadas com *ranking* máximo (*i.e.*, $F_{C\ SEEP} = 1.00$). Nesta análise, concluiu-se que *trends* regionais indicativos da presença de sistemas petrolíferos ativos podem ser identificados a partir de técnicas de detecção de exsudações de óleo por sensoriamento remoto. A Tabela 5.2 ilustra o posicionamento no *ranking* (*#RNK*) das mesmas exsudações que estão sendo estudadas neste trabalho. Para efeito de comparação, o código identificador das exsudações ($SEEP_{ID}$)

foi mantido. Este *ranking* apresentou 138 exsudações com ranking #1, 74 exsudações com ranking #2, 8 na posição #3, 5 na posição #4, 15 em #5, 1 em #6, 1 em #7, 3 em #8 e 2 exsudações na posição #13.

Tabela 5.1 - Níveis de confiabilidade para o *ranking* de exsudações de óleo em ambiente marinho, na porção mexicana do Golfo do México (GOM). O cenário tectônico toma por base o trabalho de Guzmán e Márquez-Domínguez, 2001.

F _c	Cenário tectônico	Cenário temporal ou repetibilidade (separação entre <i>seepage slicks</i> em datas distintas)	Cenário ambiental
1.00	Bacias do Sureste (Sonda de Campeche, Litoral de Tabasco e Salina del Istmo)	< 5 km	Não há associação espacial com feições meteo-oceanográficas causadoras de baixo retroespalhamento do radar
	Bacia de águas profundas do GOM e Salina do golfo profundo		
0.75	Tampico-Misantla	entre 5 e 10 km	Associação espacial com zonas de baixo vento (<3m/s) ou células de chuva
	Bacia de águas profundas do GOM, Cinturão de Perdido		
	Bacia de águas profundas do GOM, Planície abissal		
0.50	Bacia de águas profundas do GOM, Província "Cordilheiras Mexicanas"	entre 10 e 50 km	Associação espacial com efluentes, zonas costeiras, áreas protegidas
	Zona transicional entre o "Pillar de Akal" e "Campeche Knolls" a oeste e a Plataforma de Yucatán a leste		
	Regiões de baixos estruturais do embasamento (> 6000 m) localizados na Plataforma do Yucatán onde possa haver rochas geradoras do Tithoniano		
	"Campeche Escarpment" e "Campeche Terrace"		
0.25	Bacia de Burgos	> 50 km	Associação espacial com poluição por navios, dutos ou plataformas
	Bacia de Veracruz		
	Bacia de Macuspana		
	Áreas na Plataforma do Yucatán com embasamento (< 6000 m)		
	Bacia de águas profundas do GOM, Província "Franja Distensiva"		
	Bacia de águas profundas do GOM, Delta do Rio Bravo		
	Bacia de águas profundas do GOM, "Franja de sal alóctone"		
	Bacia de águas profundas do GOM, "Canyon de Veracruz"		

Tabela 5.2 - Ranking das exsudações naturais mapeadas na porção mexicana do Golfo do México.

#RNK	SEEP_ID	F _{C SEEP}	#RNK	SEEP_ID	F _{C SEEP}	#RNK	SEEP_ID	F _{C SEEP}	#RNK	SEEP_ID	F _{C SEEP}	#RNK	SEEP_ID	F _{C SEEP}	#RNK	SEEP_ID	F _{C SEEP}
1	029E	1.00	1	184E	1.00	1	465E	1.00	1	578E	1.00	2	291E	0.75	2	572E	0.75
1	031E	1.00	1	206E	1.00	1	466E	1.00	1	579E	1.00	2	318E	0.75	2	580E	0.75
1	032E	1.00	1	274E	1.00	1	467E	1.00	1	581E	1.00	2	332E	0.75	3	153E	0.56
1	033E	1.00	1	275E	1.00	1	468E	1.00	1	582E	1.00	2	335E	0.75	3	169E	0.56
1	034E	1.00	1	279E	1.00	1	469E	1.00	1	584E	1.00	2	350E	0.75	3	190E	0.56
1	035E	1.00	1	280E	1.00	1	470E	1.00	1	585E	1.00	2	354E	0.75	3	201E	0.56
1	037E	1.00	1	281E	1.00	1	472E	1.00	1	586E	1.00	2	355E	0.75	3	202E	0.56
1	067E	1.00	1	282E	1.00	1	473E	1.00	1	587E	1.00	2	356E	0.75	3	209E	0.56
1	068E	1.00	1	283E	1.00	1	474E	1.00	1	588E	1.00	2	357E	0.75	3	351E	0.56
1	069E	1.00	1	292E	1.00	1	475E	1.00	1	589E	1.00	2	360E	0.75	3	352E	0.56
1	070E	1.00	1	293E	1.00	1	476E	1.00	1	590E	1.00	2	361E	0.75	4	304E	0.50
1	071E	1.00	1	294E	1.00	1	477E	1.00	1	591E	1.00	2	362E	0.75	4	330E	0.50
1	072E	1.00	1	296E	1.00	1	478E	1.00	2	036E	0.75	2	363E	0.75	4	516E	0.50
1	073E	1.00	1	297E	1.00	1	479E	1.00	2	065E	0.75	2	364E	0.75	4	518E	0.50
1	078E	1.00	1	298E	1.00	1	480E	1.00	2	074E	0.75	2	365E	0.75	4	519E	0.50
1	079E	1.00	1	299E	1.00	1	481E	1.00	2	083E	0.75	2	366E	0.75	5	075E	0.38
1	080E	1.00	1	300E	1.00	1	482E	1.00	2	165E	0.75	2	367E	0.75	5	076E	0.38
1	081E	1.00	1	303E	1.00	1	483E	1.00	2	167E	0.75	2	368E	0.75	5	207E	0.38
1	082E	1.00	1	320E	1.00	1	484E	1.00	2	168E	0.75	2	369E	0.75	5	210E	0.38
1	085E	1.00	1	321E	1.00	1	488E	1.00	2	170E	0.75	2	370E	0.75	5	211E	0.38
1	086E	1.00	1	323E	1.00	1	489E	1.00	2	171E	0.75	2	371E	0.75	5	317E	0.38
1	150E	1.00	1	324E	1.00	1	517E	1.00	2	172E	0.75	2	372E	0.75	5	319E	0.38
1	151E	1.00	1	325E	1.00	1	524E	1.00	2	177E	0.75	2	373E	0.75	5	322E	0.38
1	152E	1.00	1	326E	1.00	1	528E	1.00	2	186E	0.75	2	374E	0.75	5	334E	0.38
1	154E	1.00	1	327E	1.00	1	529E	1.00	2	187E	0.75	2	375E	0.75	5	514E	0.38
1	155E	1.00	1	328E	1.00	1	530E	1.00	2	188E	0.75	2	376E	0.75	5	515E	0.38
1	156E	1.00	1	329E	1.00	1	531E	1.00	2	189E	0.75	2	457E	0.75	5	523E	0.38
1	157E	1.00	1	331E	1.00	1	532E	1.00	2	195E	0.75	2	471E	0.75	5	525E	0.38
1	158E	1.00	1	333E	1.00	1	533E	1.00	2	196E	0.75	2	490E	0.75	5	526E	0.38
1	159E	1.00	1	411E	1.00	1	534E	1.00	2	197E	0.75	2	521E	0.75	5	543E	0.38
1	160E	1.00	1	412E	1.00	1	535E	1.00	2	198E	0.75	2	522E	0.75	6	353E	0.28
1	161E	1.00	1	413E	1.00	1	537E	1.00	2	199E	0.75	2	527E	0.75	7	295E	0.25
1	163E	1.00	1	414E	1.00	1	544E	1.00	2	200E	0.75	2	536E	0.75	8	185E	0.19
1	164E	1.00	1	415E	1.00	1	546E	1.00	2	203E	0.75	2	538E	0.75	8	194E	0.19
1	166E	1.00	1	456E	1.00	1	550E	1.00	2	204E	0.75	2	539E	0.75	8	593E	0.19
1	173E	1.00	1	458E	1.00	1	569E	1.00	2	208E	0.75	2	540E	0.75	9	179E	0.05
1	174E	1.00	1	459E	1.00	1	571E	1.00	2	272E	0.75	2	541E	0.75	9	180E	0.05
1	175E	1.00	1	460E	1.00	1	573E	1.00	2	273E	0.75	2	542E	0.75			
1	176E	1.00	1	461E	1.00	1	574E	1.00	2	276E	0.75	2	545E	0.75			
1	181E	1.00	1	462E	1.00	1	575E	1.00	2	277E	0.75	2	547E	0.75			
1	182E	1.00	1	463E	1.00	1	576E	1.00	2	278E	0.75	2	548E	0.75			
1	183E	1.00	1	464E	1.00	1	577E	1.00	2	284E	0.75	2	549E	0.75			

5.2 Contextualização geológica

Dentre as características inerentes aos sistemas de informações geográficas, destacam-se suas características multidimensionais que podem abranger grandes volumes de dados, a possibilidade de projeção em superfícies planas ou diferentes sistemas de projeção e a necessidade da utilização de métodos de análise. A análise integrada de informações multiplataforma nestes sistemas é complexa e demorada e, apesar do caráter estático das informações geográficas, a freqüente atualização de informações não é tarefa trivial. A sua principal vantagem está no poder de análise de grande volume de informações de diferentes origens e na capacidade de geração de mapas para utilização em processos de tomada de decisões.

Um dos grandes problemas inerentes à representação de dados geográficos em mapas temáticos reside na dificuldade em lidar adequadamente com a incerteza de limites ou fronteiras geográficas. Entende-se por mapa temático como um conjunto de entidades espaciais denominadas pontos, linhas e polígonos, ambos definidos por sua localização no espaço e atributos referentes a um determinado tema. Os limites dos polígonos são convencionalmente representados por linhas que caracterizam o limite de domínios que encerram características distintas. A representação geográfica de domínios com limites abruptos de diferenciem áreas com diferentes características é precisa quando se considera dados cadastrais ou limites administrativos. Por outro lado, o limite de domínios que possuam características com variação contínua, como por exemplo, as características faciológicas de uma seqüência sedimentar ou teor de hidrocarbonetos no solo, é raramente abrupto e definitivamente não deveria ser representado através de linhas (Burrough, 1986; Wang e Hall, 1996).

A Figura 5.3 ilustra as principais informações de domínio público utilizadas na composição da contextualização geológica. Todas as informações foram submetidas a processamentos direcionados a processos subseqüentes de inferência *fuzzy*. Foram utilizados algoritmos específicos para a análise espacial de dados nos formatos de pontos, retas, polígonos e *grids (raster)*. As informações foram posteriormente integradas através de operadores *fuzzy* e algébricos que comporam os diferentes cenários propostos para o *ranking* de exsudações de óleo.

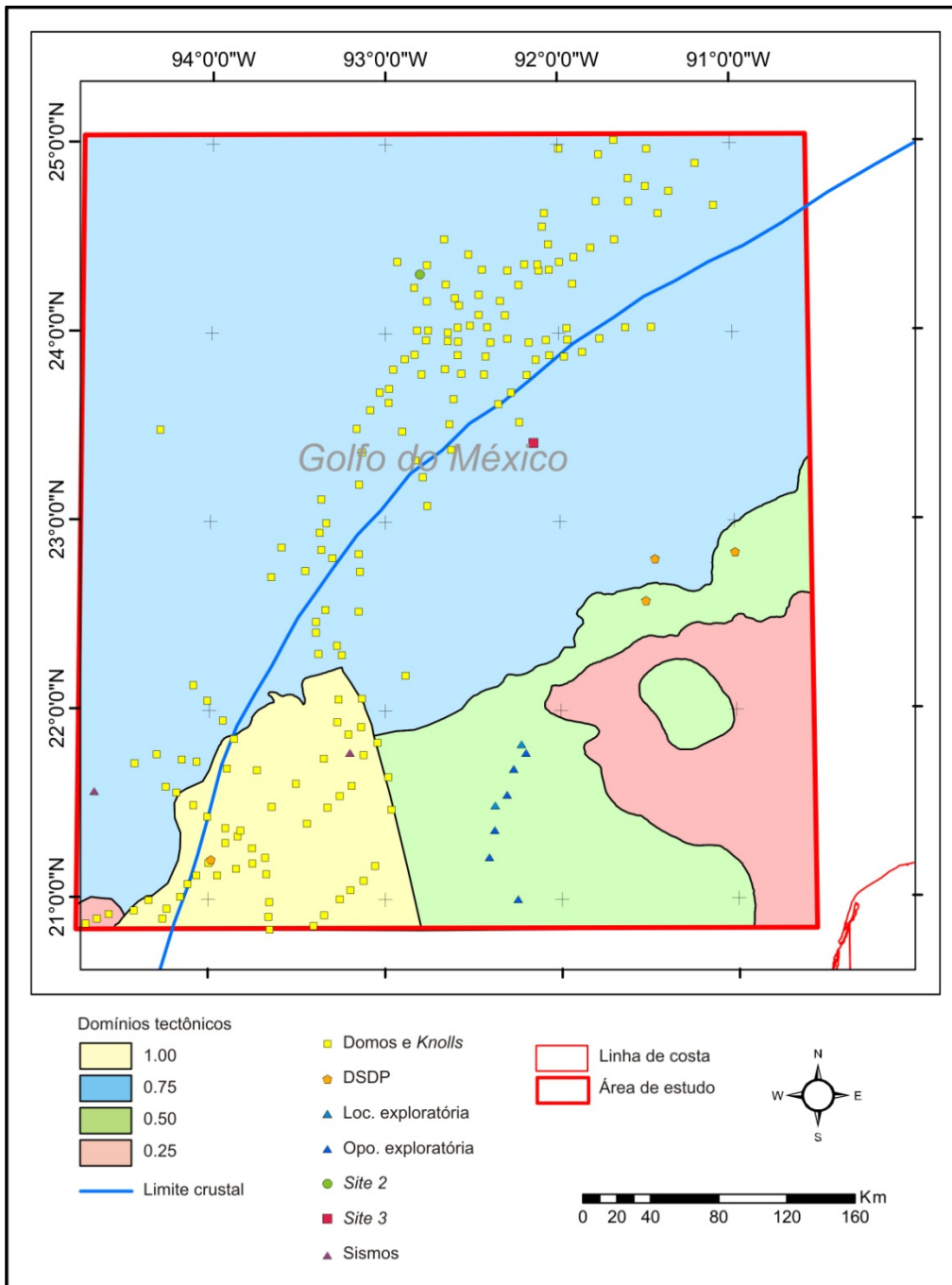


Figura 5.3 - Sumário das informações geológicas utilizadas na criação da contextualização geológica.

Nesta etapa serão descritos os sistemas *fuzzy* desenhados para os dados incluídos na contextualização geológica, temporal e ambiental. As funções de pertinência aqui definidas servirão para os procedimentos de fuzzyficação dos dados e posterior implementação das respectivas bases de regras, a fim de caracterizar o aspecto qualitativo das informações que servirão como evidência para o processo de *ranking* das exsudações de óleo.

Normalmente, os resultados da fuzzyficação dos dados serão apresentados em escala de níveis de cinza, em intervalos contínuos de $[0,1]$ onde o “0” (zero), representado pela cor preto, equivale ao valor nulo de pertinência para a classe avaliada e “1” (um), representado pela cor branco, equivale ao valor de pertinência máxima para a mesma.

5.2.1 Domínios tectônicos

Os domínios tectônicos inicialmente apresentados na Figura 5.3 servirão de base para a realização de técnicas de inferência *fuzzy*. Estes domínios possuem quatro classes mapeadas a partir de dados geológicos e geofísicos que apresentam características particulares relacionadas a potencial presença de exsudações de óleo em ambiente *offshore*. Os procedimentos de preparação dos dados incluíram a geração dos polígonos referentes aos domínios “A”, “B”, “C” e “D” e seus respectivos complementos e dos mapas de distância a partir dos contatos entre os domínios individuais e seus complementos. Em seguida, as informações foram convertidas para o formato *raster* utilizando a célula de resolução adotada de 250 metros. O valor de 20 km para área de transição entre os domínios baseou-se na estatística dos valores de eixo maior das exsudações de óleo que apresentaram valor mínimo de 491 m, valor máximo de 28.9 km e valor médio de 7.6 km. A função de pertinência abaixo ilustrada foi implementada a fim de se mapear os graus de pertinência (μ) que refletem de forma numérica no intervalo [0,1], o quanto cada exsudação interpretada se enquadra aos diferentes domínios tectônicos (Figura 5.4). A base de regras desenvolvida a partir de uma estrutura “IF-THEN-ELSE” objetivou a geração de graus de pertinência para as exsudações localizadas nas proximidades dos contatos entre domínios tectônicos, fazendo com que os limites anteriormente abruptos (*crisp*), agora apresentam um comportamento contínuo e gradacional (*fuzzy*), (Figura 5.5). A variável de suporte x equivale à distância medida em quilômetros (km).

$$\begin{cases} 0.025x + 0.5 & \text{se } a = 1 \text{ e } b < 20 \\ 0.5 - 0.025x & \text{se } \bar{a} = 0 \text{ e } b < 20 \\ 1 & \text{se } a = 1 \text{ e } b \geq 20 \\ 0 & \text{se } \bar{a} = 0 \text{ e } b \geq 20 \end{cases}$$

A Tabela 5.3 ilustra uma porção dos graus de pertinência de 10 exsudações escolhidas aleatoriamente aos domínios tectônicos supracitados. Note que a soma de todas as pertinências para cada exsudação será necessariamente igual a 1.

Tabela 5.3 - Exemplo dos graus de pertinência de dez exsudações aos domínios tectônicos A, B, C e D.

ID SEEP	DATA	A	B	C	D
161E	08-03-03	1,00	0,00	0,00	0,00
210E	15-03-03	0,00	1,00	0,00	0,00
295E	01-04-03	0,00	0,00	0,90	0,10
322E	25-04-03	0,00	1,00	0,00	0,00
330E	25-04-03	0,00	0,25	0,75	0,00
464E	28-06-03	0,49	0,33	0,00	0,18
519E	25-05-03	0,00	0,00	1,00	0,00
543E	25-05-03	0,00	1,00	0,00	0,00
548E	25-05-03	0,08	0,93	0,00	0,00
593E	06-04-03	0,00	1,00	0,00	0,00

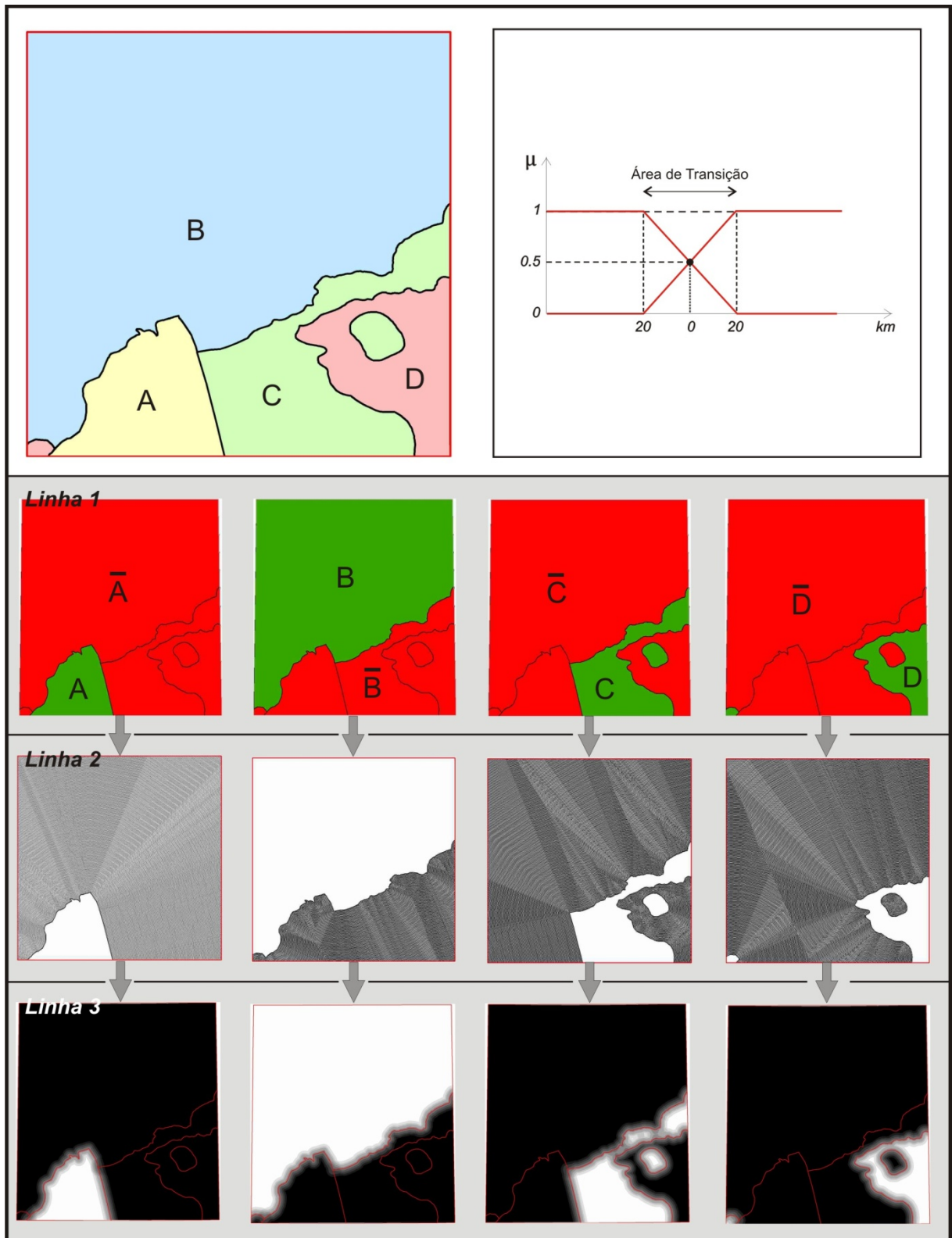


Figura 5.4 - Ilustração esquemática das etapas envolvidas na fuzzyficação dos domínios tectônicos, sendo a linha 1 representada pelas máscaras booleanas *raster* dos domínios e complementos, a linha 2 representada pelos mapas de distância (*buffer distances*) em relação aos contatos e a linha 3 representada pelos mapas *fuzzy* dos domínios tectônicos.

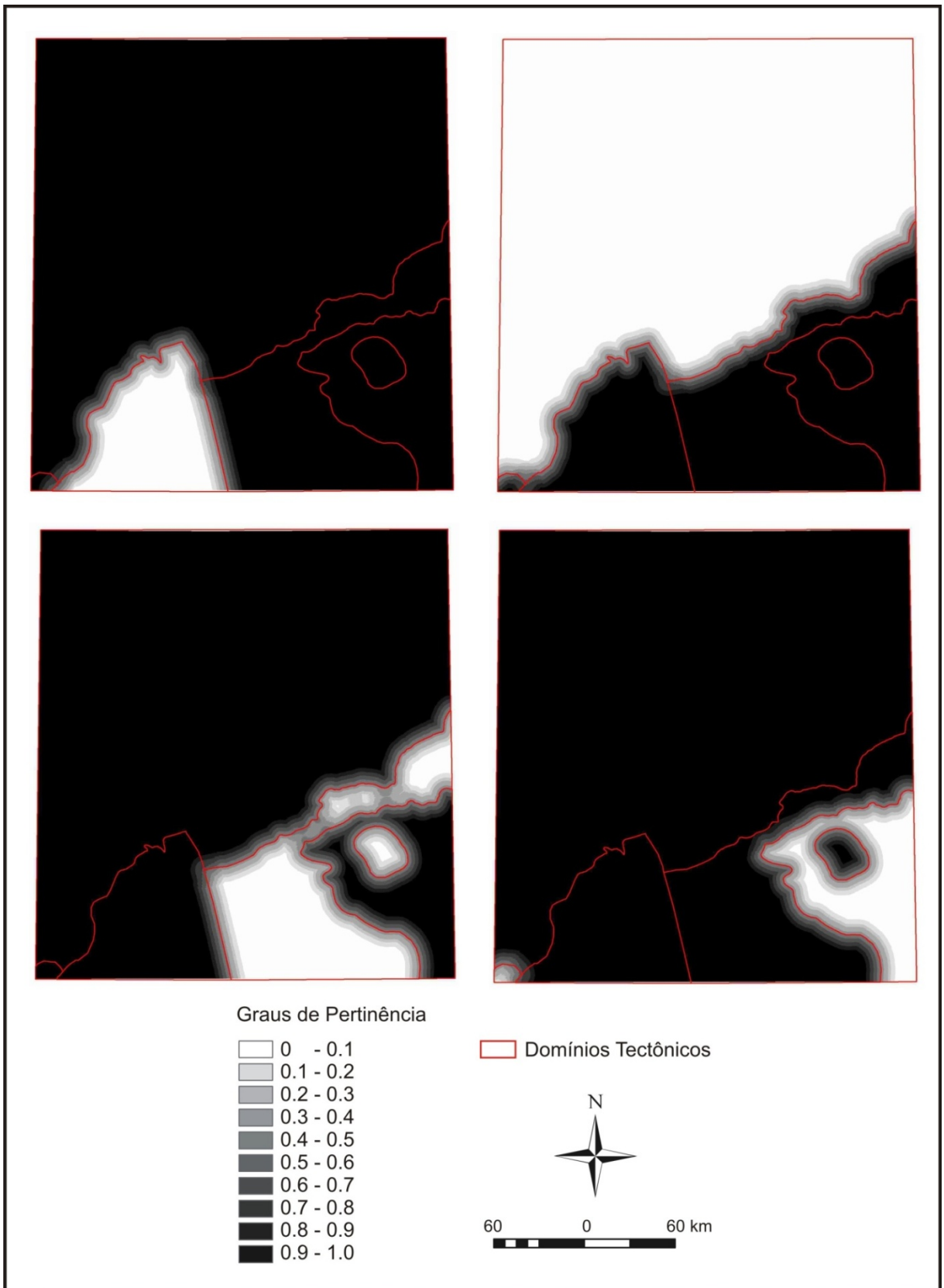


Figura 5.5 - Mapa *fuzzy* dos domínios tectônicos.

5.2.2 Halocinese

Conforme descrito em Uchupi e Emery (1968) e Burk *et al.* (1969), o Projeto DSDP (*Deep-Sea Drilling Project*) mapeou a ocorrência de inúmeras feições batimétricas potencialmente relacionadas à presença de domos e diápiros de sal relacionados aos depósitos salinos do Calloviano. Chamamos a atenção para a amostragem denominada “*Site 2*” que consiste em um domo de sal onde as rochas imediatamente sobrepostas estão saturadas de hidrocarbonetos e enxofre (Figura 5.6). A área de estudo possui 168 (cento e sessenta e oito) feições pontuais correspondentes aos domos e *knolls* localizados na Província *Sigsbee Deep* (Figura 5.7). Sabe-se da importância dos domos salinos para a focalização de exsudações de óleo em ambiente marinho. A Figura 5.6 ilustra a correlação espacial entre os domos e as exsudações de óleo. Desta forma, especial atenção foi dada ao processamento e manipulação desta informação.

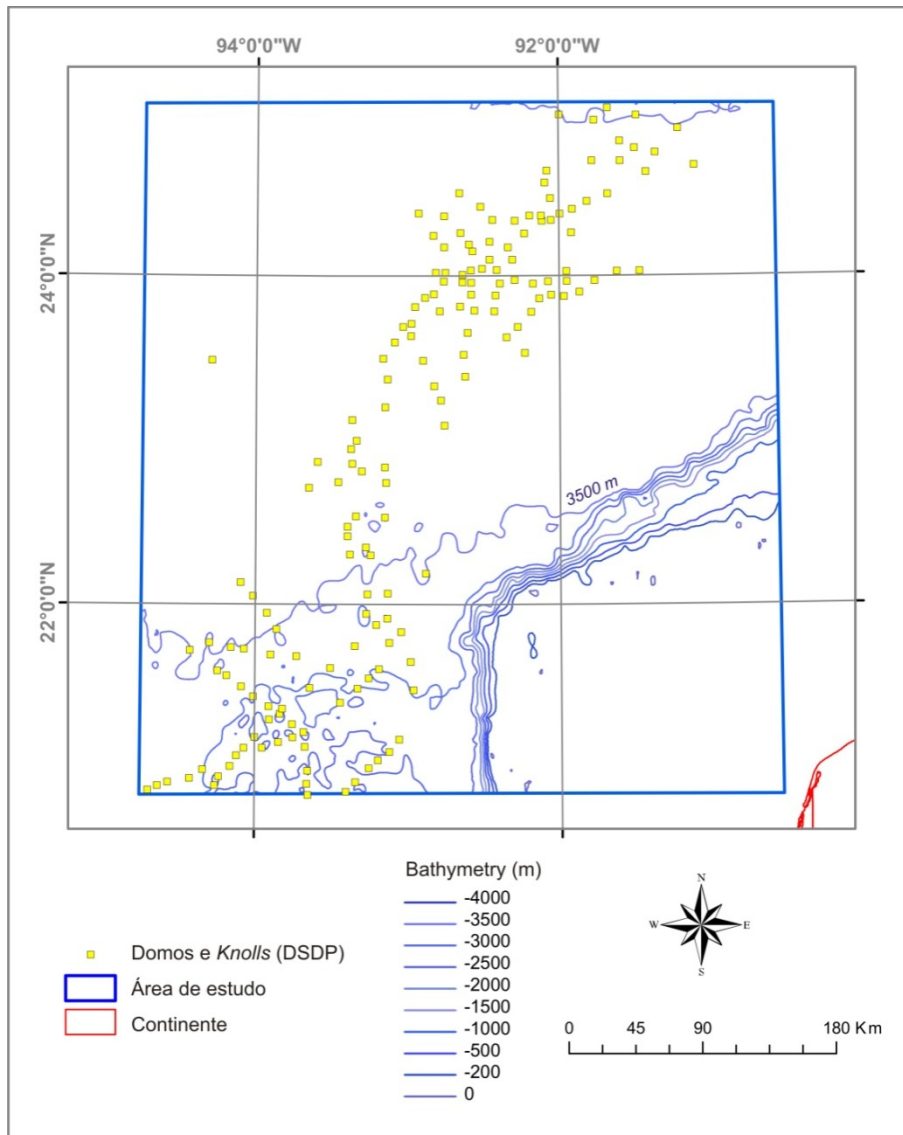


Figura 5.6 - Distribuição espacial dos domos e *knolls* relacionados aos depósitos salinos do Calloviano, mapeados durante o projeto DSDP (Modificado de Uchupi e Emery, 1968).

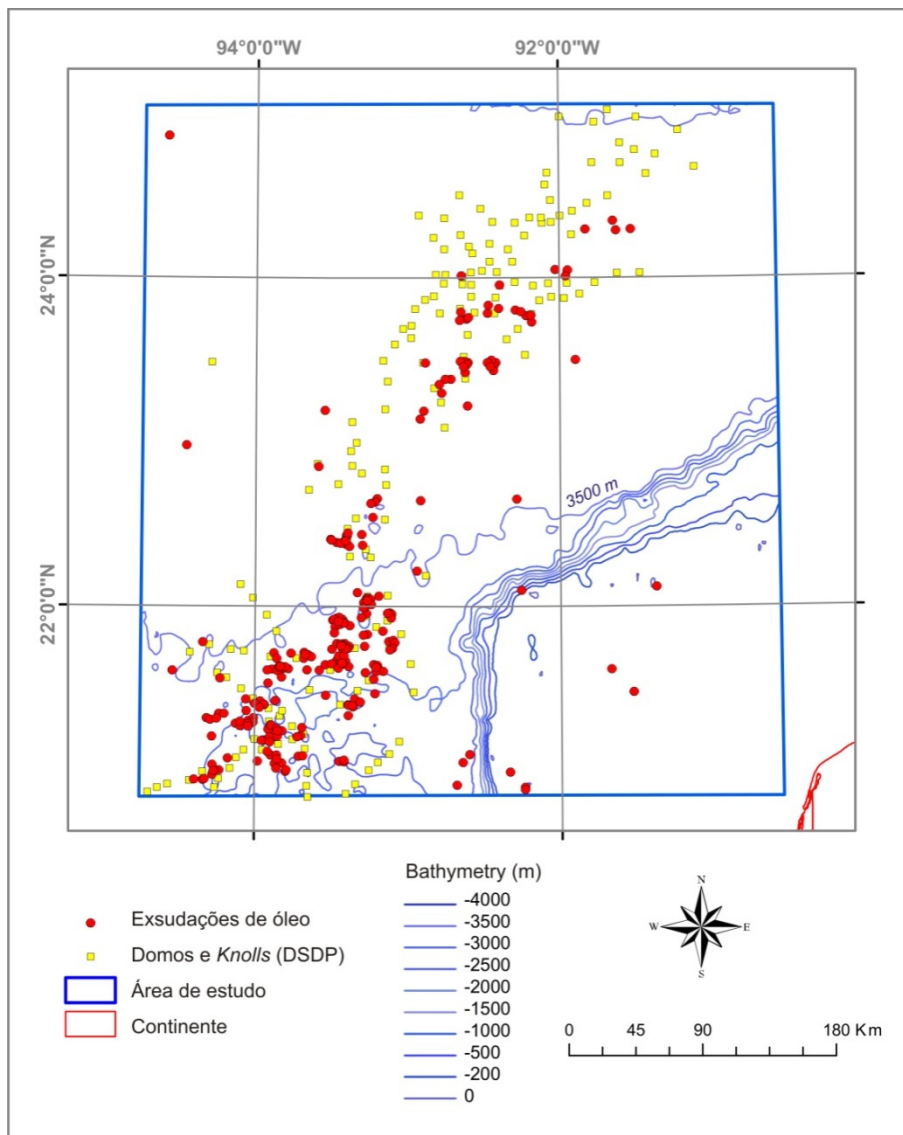


Figura 5.7 - Distribuição espacial dos domos e *knolls* e as exsudações de óleo detectadas a partir de imagens do satélite RADARSAT-1.

Inicialmente foram experimentadas duas técnicas para se pudesse chegar a um resultado que expressasse o sentimento do especialista com relação à área de influência dos domos de sal supracitados. As técnicas em questão foram: (i) geração de mapa de distâncias a partir do arquivo de pontos referente a localização dos domos e *knolls* e, (ii) geração de mapa de densidade de pontos calculado a partir dos mesmos dados.

O mapa de distâncias (*buffer distances map*) foi construído a partir da geração de *buffers* ou linhas eqüidistantes com 1 km de intervalo (Figura 5.8).

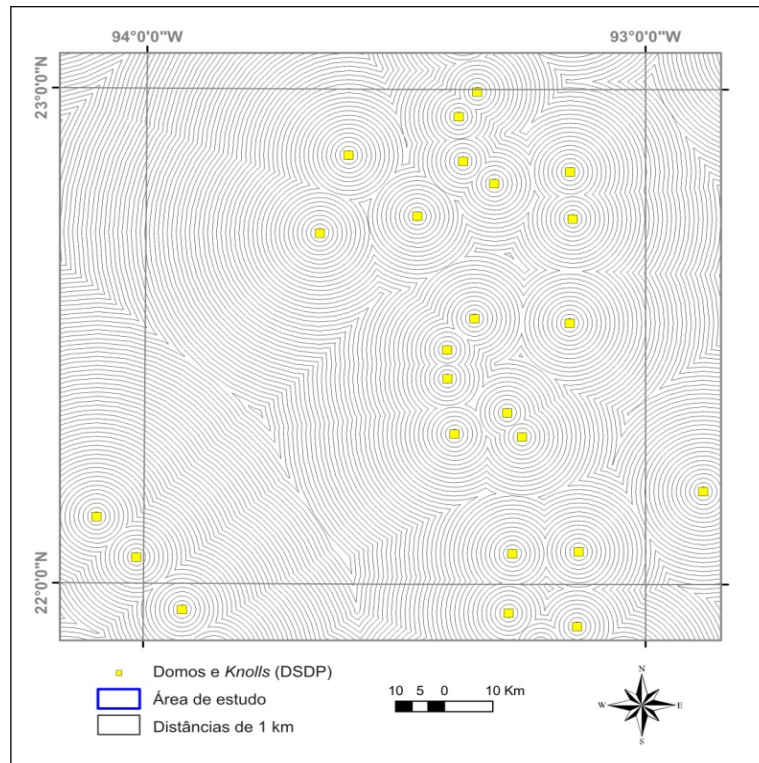


Figura 5.8 - Mapa de distâncias (*buffers*) dos domos e *knolls*.

Em seguida os mapas de distâncias foram rasterizados para as fases posteriores de fuzzificação a partir das funções de pertinência pré-definidas (Figura 5.9). Considerando que a variável de suporte x desta evidência é a distância medida em quilômetros (km), procurou-se fundamentar uma relação de dependência espacial que resultasse em um mapa *fuzzy* com a área de influência dos domos e *knolls*. Desta forma, foram definidas três funções de pertinência conforme ilustrado abaixo:

$$\text{Função de Pertinência A} \begin{cases} -0.05x + 1.5 & \text{se } 10 \leq a \leq 30 \\ 1 & \text{se } a < 10 \\ 0 & \text{se } a > 30 \end{cases}$$

$$\text{Função de Pertinência B} \begin{cases} -0.04x + 1.2 & \text{se } 5 \leq a \leq 30 \\ 1 & \text{se } a < 5 \\ 0 & \text{se } a > 30 \end{cases}$$

$$\text{Função de Pertinência C} \begin{cases} -0.2x + 3.0 & \text{se } 10 \leq a \leq 15 \\ 1 & \text{se } a < 10 \\ 0 & \text{se } a > 15 \end{cases}$$

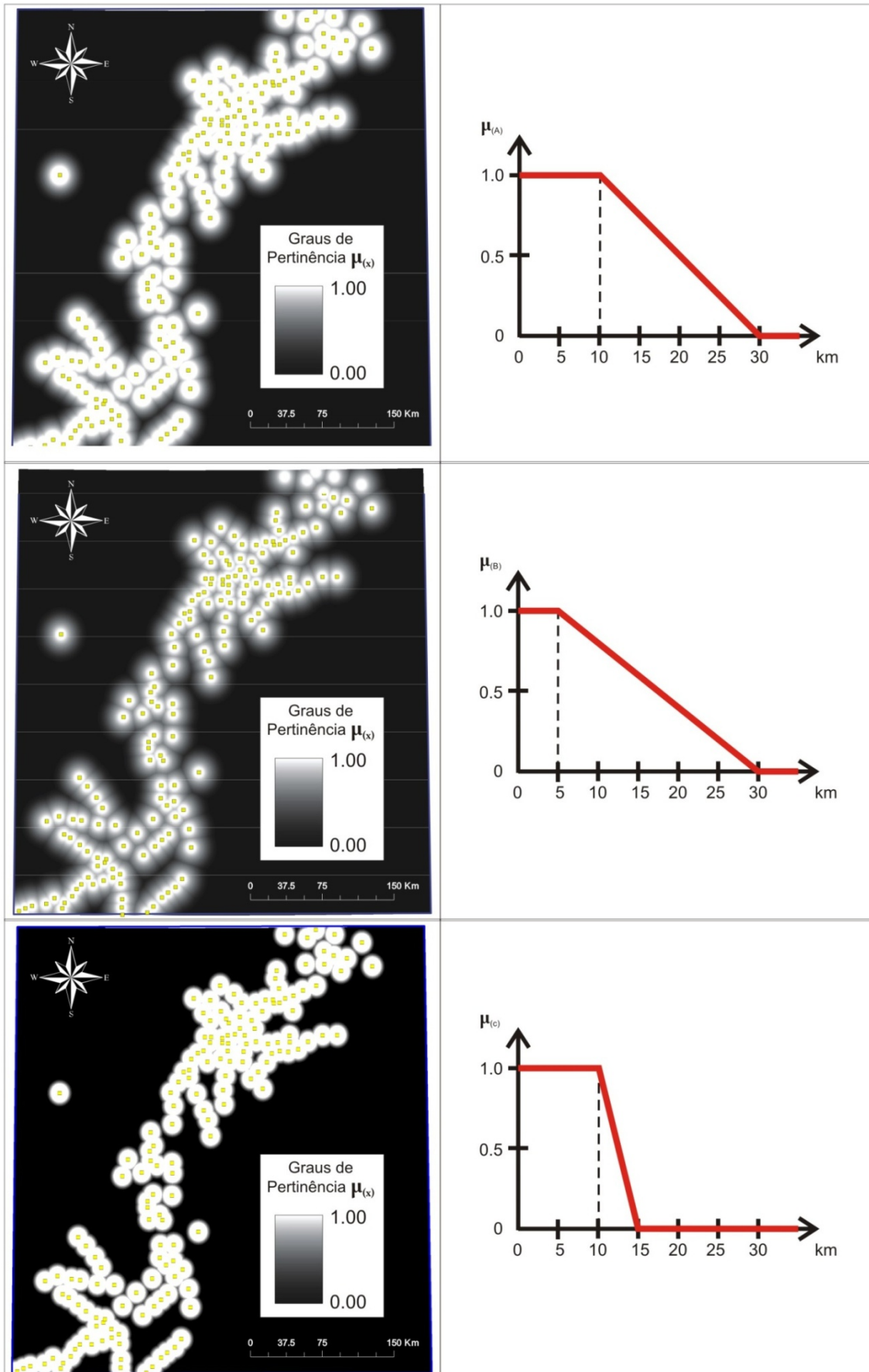


Figura 5.9 - Representação fuzzy das funções de pertinência determinadas para os domos e knolls.

O mapa de densidade de pontos tem como objetivo a criação de um modelo digital da superfície onde a variável Z não corresponde ao valor temático do atributo do ponto, mas sim à densidade do ponto ou quantidade de pontos por unidade de área. Um simples método de geração de um modelo superficial consiste na superposição de um *grid* sobre e posterior contagem dos pontos por célula. O resultado tende a ser grosseiro (*blocky*) a não ser que haja um grande número de pontos. A obtenção de resultados suavizados pode ser alcançada através da utilização de técnicas que envolvam janela móvel com uma área definida pelo raio de busca, no caso de uma janela circular. Neste método, a densidade de pontos é calculada pela contagem de pontos presentes na janela amostrada, dividida pela área da janela, sendo que, neste caso, o grau de suavização dos resultados dependerá do raio de busca utilizado. (Bonham-Carter, 1994).

A utilização deste método objetivou a criação de uma superfície que representasse a área de influência de objetos pontuais. Este plano de informações foi então combinado com os outros dados geológicos (domínios tectônicos e limite crustal) a fim de se gerar um modelo exploratório que melhor defina ambientes favoráveis e não favoráveis à ocorrência de exsudações de óleo.

O mapa de densidade foi classificado em dez classes e convertido para o formato *raster* com uma célula de resolução de 250 metros. A Figura 5.10 ilustra o padrão de suavização obtido através do método da densidade de pontos. Além disso, a correlação observada entre a área de influência dos domos e *knolls* e os centróides das exsudações é notória. A Figura 5.11 representa o resultado da fuzzyficação do mapa de densidade de pontos com valores de célula variando no intervalo de [0,1]. Conforme definido anteriormente, os menores valores (preto) representam baixas pertinências para a associação espacial entre a tectônica salina e as exsudações de óleo. Os valores altos, representados pela cor branca, denotam uma alta pertinência para a associação entre as exsudações de óleo e os domos e *knolls*. Em termos práticos, os valores de alta densidade de domos e *knolls* podem representar uma maior focalização de exsudações de hidrocarbonetos, já que a configuração estrutural desta feição favorece sobremaneira os processos de migração.

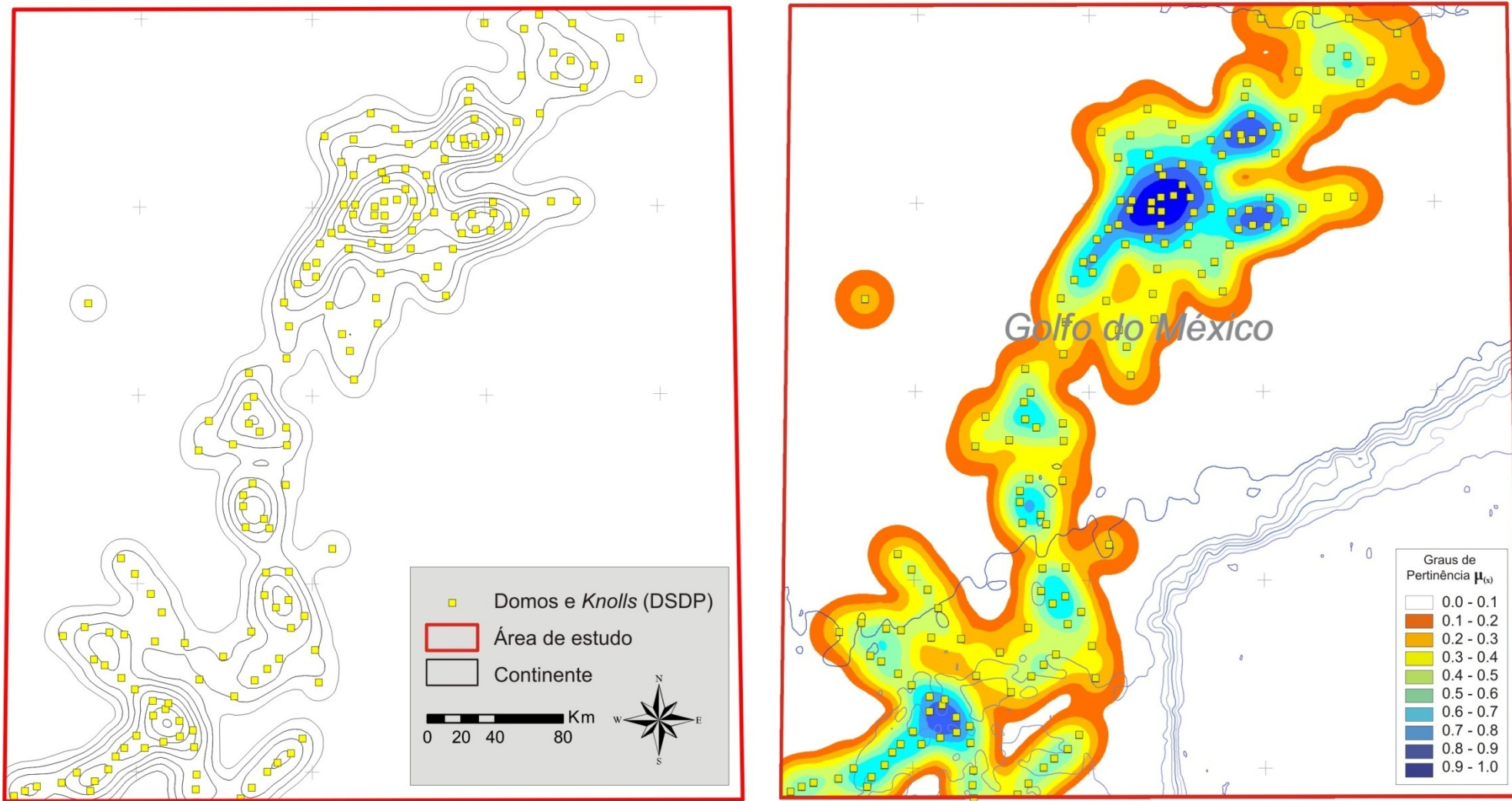


Figura 5.10 - Mapas de densidade de pontos nos formatos vetorial e raster obtidos a partir da localização dos domos e *knolls* (Fonte: Modificado de Uchupi e Emery, 1968).

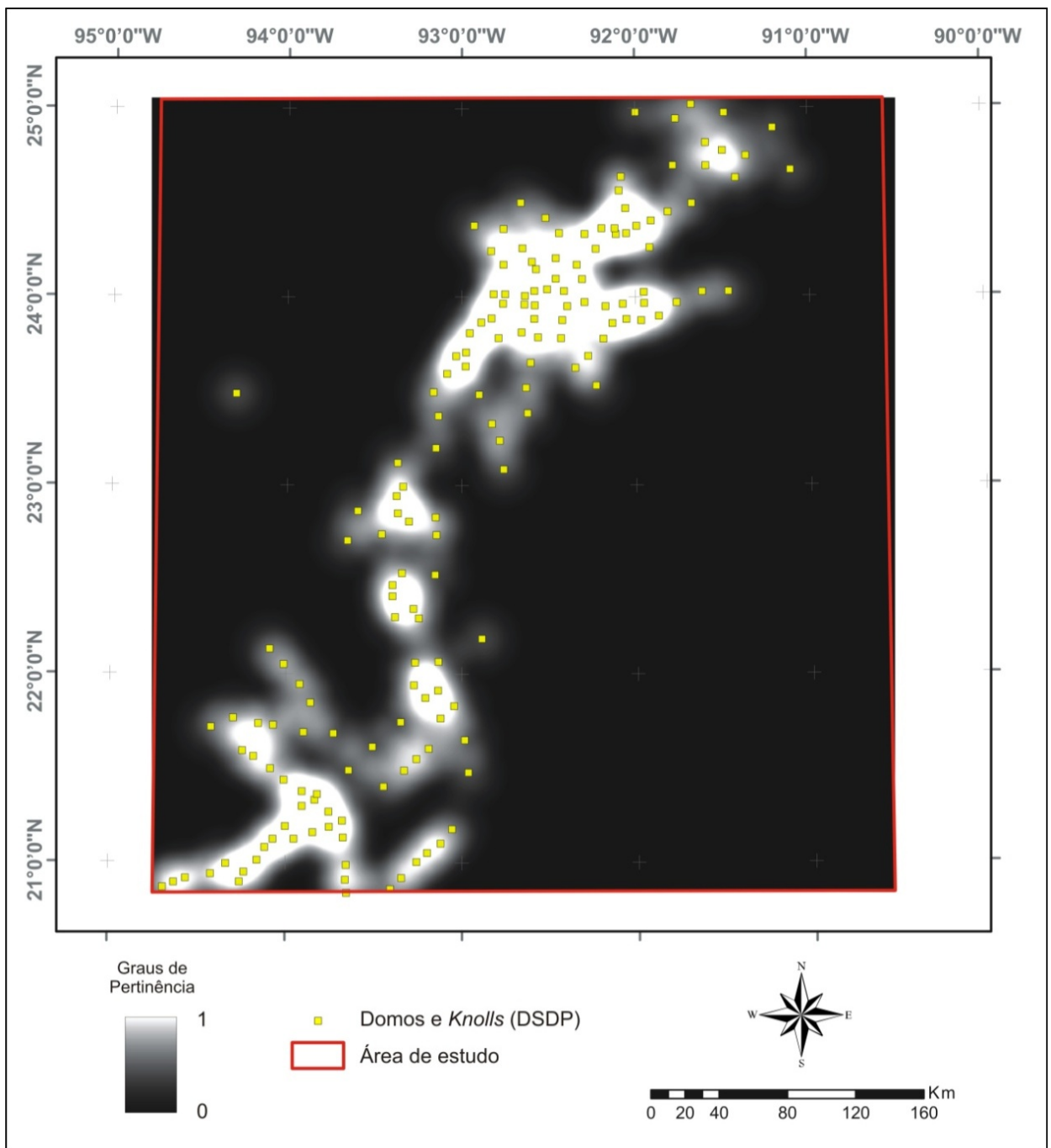


Figura 5.11 - Mapa *fuzzy* dos domos e *knolls* situados na Província *Sigsbee Deep*.

5.2.3 Limite Crustal

O limite que separa a crosta continental e oceânica consiste em uma feição estrutural de fundamental importância para o entendimento da compartimentação tectônica da bacia sedimentar e conseqüentemente os seus potenciais sistemas petrolíferos. Este estudo utilizou o limite crustal (Figura 5.13) proposto em Bird *et al.* (2005). A definição dos parâmetros utilizados para a definição da função de pertinência se baseou na incerteza máxima encontrada entre as fronteiras crustais de 200 km publicadas na literatura específica supracitada. Portanto, utilizou-se uma área de transição de 100 km a partir do contato. A feição linear que representa o limite crustal (*ocean-continent boundary*) foi convertida para polígono, utilizando os limites da área de estudo como extensão máxima. Em seguida, os dados foram rasterizados, sendo que se atribuiu o valor 1 para as células pertencentes ao domínio “crosta continental” e o valor 0 (zero). Ao domínio intitulado “crosta oceânica”. Obteve-se então o mapa de distâncias com intervalos de 1 km e rasterização dos mesmos para as posteriores análises espaciais (fuzzificação do contato).

Utilizaram-se mais uma vez a base de regras baseada na estrutura IF-THEN-ELSE para se calcular uma superfície com valores contínuos de pertinência de [0,1] que traduzem a pertinência mínima (regiões de crosta oceânica com distâncias em relação ao contato superiores a 100 km), ou máxima (regiões de crosta continental com distâncias em relação ao contato superiores a 100 km) para a ocorrência de exsudações. A função de pertinência determinada e o seu respectivo gráfico estão ilustrados a seguir (Figura 5.12 e 5.13). A variável de suporte x equivale à distância medida em quilômetros (km).

A função de pertinência definida para esta informação foi:

$$\begin{cases} 0.005x + 0.5 & \text{se } a = 1 \text{ e } b < 100 \\ 0.5 - 0.005x & \text{se } a = 0 \text{ e } b < 100 \\ 1 & \text{se } a = 1 \text{ e } b \geq 100 \\ 0 & \text{se } a = 0 \text{ e } b \geq 100 \end{cases}$$

onde “a” = crosta [0,1]; “b” = distância (km) a partir do contato

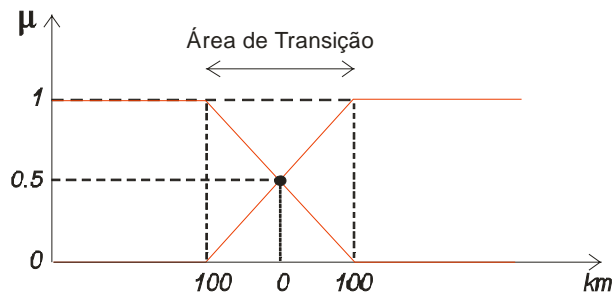


Figura 5.12 - Gráfico da função de pertinência definida para a fuzzyficação do limite crustal.

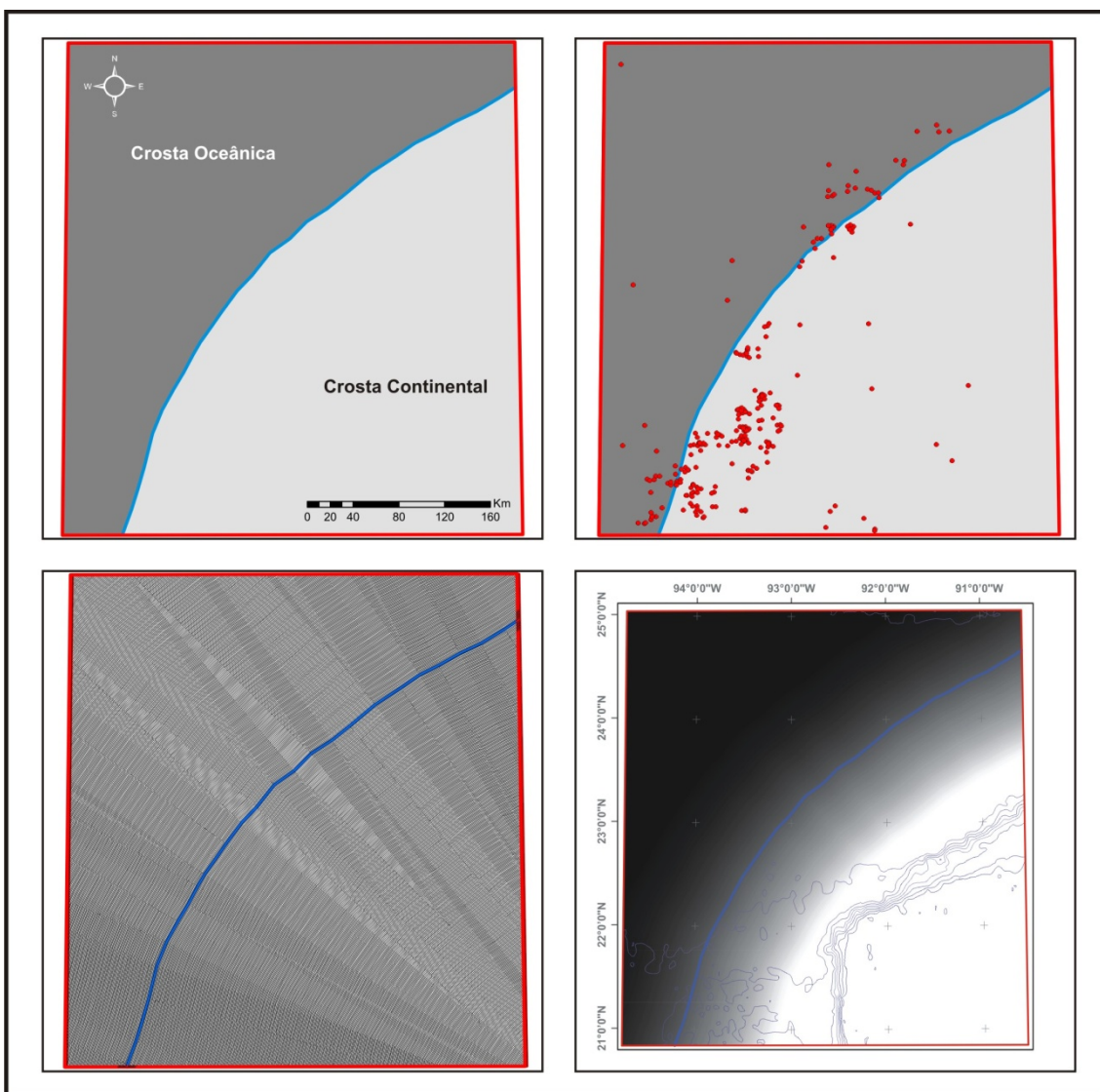


Figura 5.13 - Processamento dos dados referentes ao limite crustal.

5.3 Contextualização Temporal

O padrão de repetibilidade espaço-temporal de exsudações de óleo em ambientes marinhos pode ser considerado como a característica mais importante a ser considerada em um processo de análise qualitativa. A incerteza inerente ao caráter indireto do sensoriamento remoto, somada aos altos custos de campanhas de geoquímica marinha colocam a análise temporal em lugar de destaque como fator principal para a redução da incerteza na detecção e hierarquização de exsudações.

Independente de condições oceanográficas ou meteorológicas, a presença de exsudações de óleo localizadas em coordenadas coincidentes e interpretadas a partir de imagens adquiridas em datas distintas consiste em um fator indispensável para a validação de sua autenticidade.

Neste trabalho foram utilizadas duas técnicas semi-automáticas distintas de análise de proximidade para a caracterização do contexto temporal das exsudações de óleo interpretadas. A primeira, denominada (i) Distância mínima, considera a menor distância entre dois polígonos referentes a exsudações interpretadas em datas distintas. A segunda técnica, aqui denominada (ii) Análise de vizinhança, considerada mais apropriada, calcula as distâncias de entre todos os centróides (pontos) das exsudações interpretadas. Posteriormente, as distâncias mais curtas são ponderadas pelo fator ambiental de cada exsudação considerada para que se determine o grau de pertinência da exsudação considerada.

O grau de pertinência obtido caracteriza quantitativamente em valores contínuos de [0,1] o quanto uma determinada exsudação pertence à classe proximidade definida acima. O valor 1 representa uma exsudação com pertinência máxima para a classe proximidade que se traduz pela presença de outra exsudação com distância zero ou sobreposta à exsudação avaliada.

Outro fator utilizado na caracterização da contextualização temporal foi a cobertura de imagens RADARSAT-1. Este cálculo se baseou na ponderação inversa das exsudações de acordo com a frequência de imageamento, ou seja, valores contínuos pré-definidos de acordo com a função de pertinência estipulada são atribuídos às exsudações de acordo com a frequência de cobertura areal dos frames RADARSAT-1.

5.3.1 Análise de proximidade

O método que considera a distância mínima entre polígonos de datas distintas apresenta desvantagens que podem levar a interpretações equivocadas, pois a distância mínima entre dois polígonos não significa que está se medindo o vetor entre os vértices que correspondem à origem da exsudação na imagem de radar. As distâncias são obtidas a partir do cálculo de superfícies *raster* da distância euclidiana entre todas as exsudações, com exceção das exsudações contidas na imagem onde se obterá os cálculos de proximidade (Figuras 5.15 e 5.16). Extraem-se posteriormente os valores mínimos de distância contidos no interior dos polígonos e atribui-se este valor como distância mínima entre esta exsudação e outra interpretada em uma imagem RADARSAT-1 de data distinta. A função de pertinência determinada e o seu respectivo gráfico estão ilustrados a seguir (Figura 5.14). A função de pertinência definida para esta informação está ilustrada abaixo. A variável de suporte x equivale à distância medida em quilômetros (km).

$$\begin{cases} 50 - 0.02x & \text{se } 0 < a < 50 \\ 1 & \text{se } a = 0 \\ 0 & \text{se } a \geq 50 \end{cases}$$

onde “a” equivale à distância mínima do da exsudação de óleo (polígono) considerada.

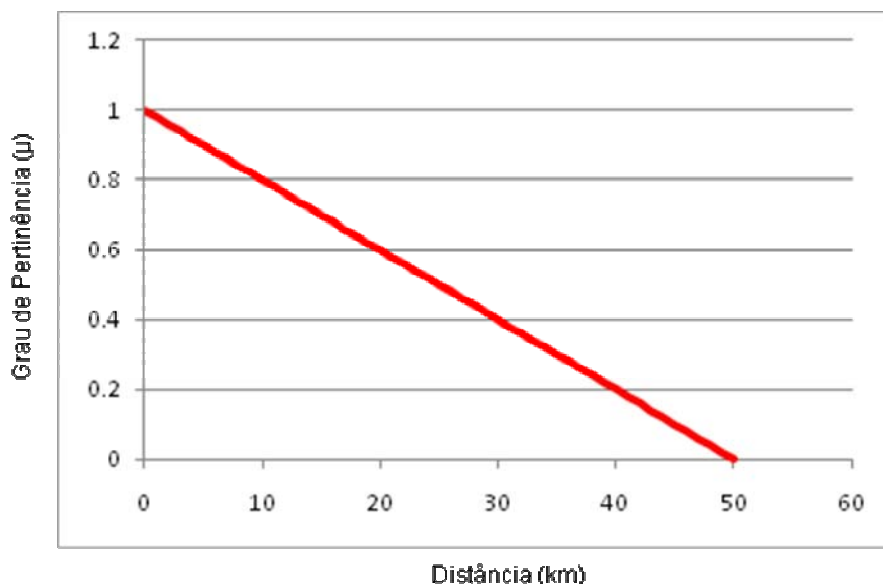


Figura 5.14 - Gráfico da função de pertinência determinada para a contextualização temporal caracterizada pela análise de proximidade de polígonos.

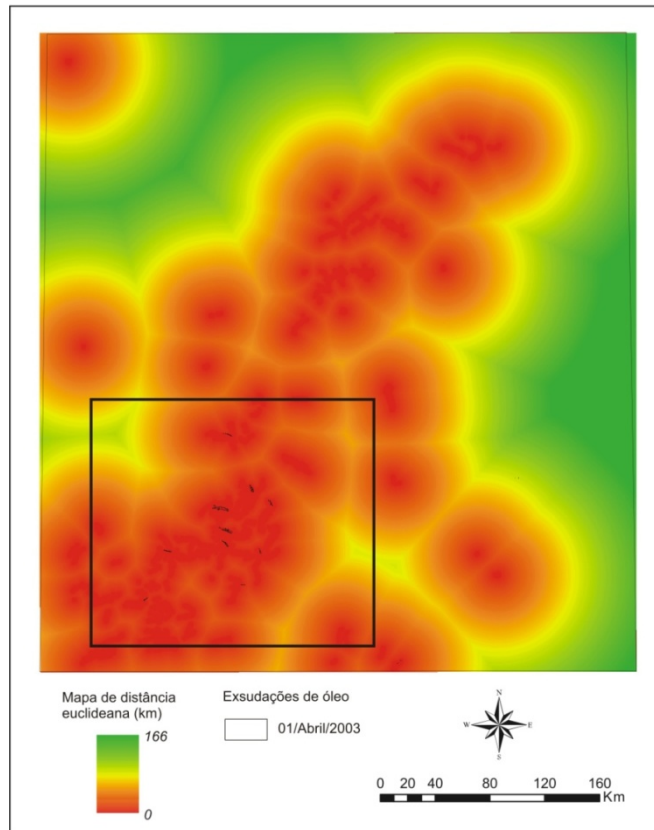


Figura 5.15 - Mapa de distâncias Euclidianas calculado para as exsudações de óleo interpretadas na imagem RADARSAT-1 adquirida em 01/04/2003 e área de zoom selecionada (preto).

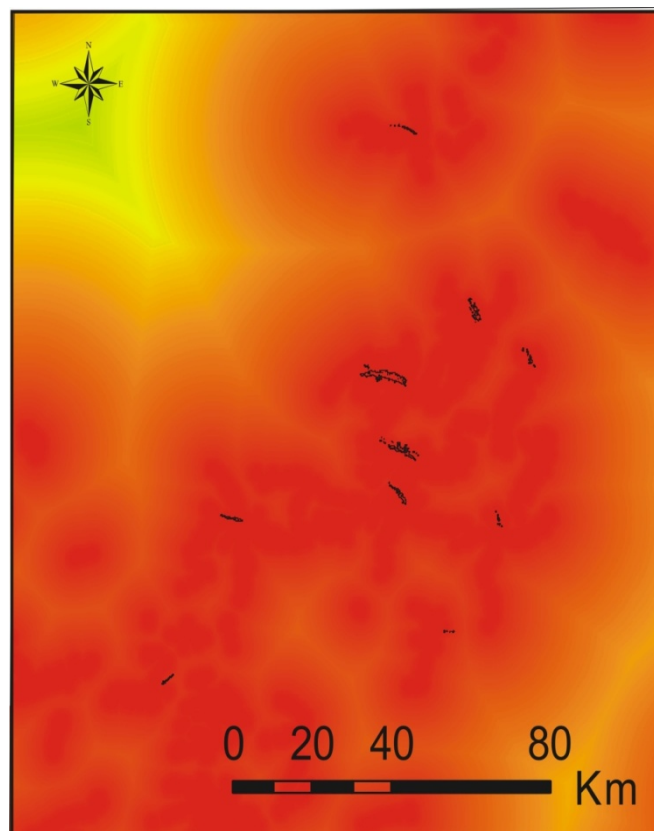


Figura 5.16 - Zoom do mapa de distâncias Euclidianas calculado para as exsudações de óleo interpretadas na imagem RADARSAT-1 adquirida em 01/04/2003.

O método da análise (μ_{AV}) de vizinhança analisa todas as distâncias entre os centróides das exsudações de óleo interpretadas. Posteriormente, os cinco polígonos mais próximos da exsudação a ser analisada são computados com os seus atributos de distância e fator ambiental. Este método pondera a menor distância a partir das características ambientais individuais de cada polígono definidas pelo operador “mínimo”. A fórmula que define o método está ilustrada abaixo. O exemplo ilustrado na Figura 5.17 ilustra o conceito da análise de vizinhança. A distância “a” é menor que a distância “b” e a distância “b” é menor que a distância “c”. Ao analisarmos a exsudação #1 (28/Abr), não podemos considerar a exsudação #02, pois ambas pertencem a mesma imagem, restando apenas as exsudações #33 e #47. O grau de pertinência temporal da exsudação #33 é 0.8 (i.e. ela está mais próxima), porém, o seu grau de pertinência ambiental equivale a 0.5 (i.e. as condições para presença de falsos alvos são grandes). Logo, o grau de pertinência da exsudação #1 analisada será 0.6, conforme fórmula abaixo.

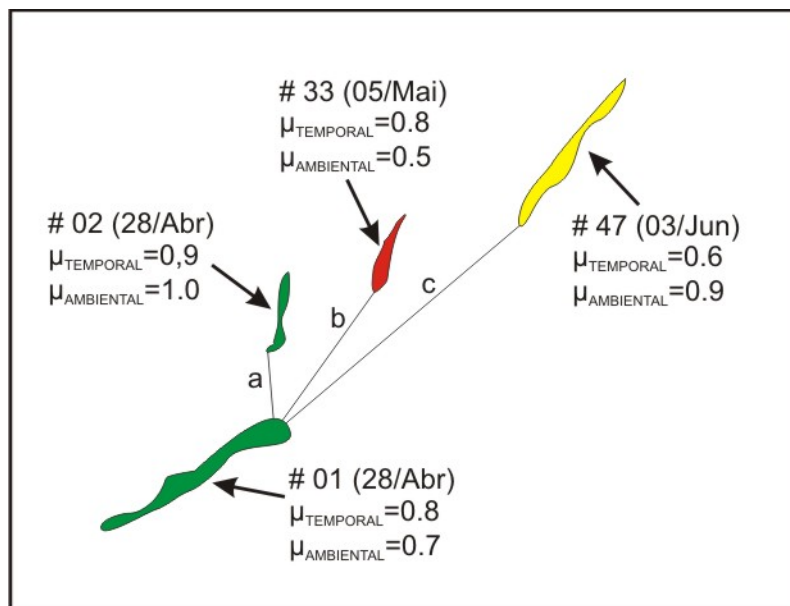


Figura 5.17 - Desenho esquemático dos princípios utilizados no método da análise de vizinhança.

As Tabelas 5.4 e 5.5 exemplificam uma pequena parte do cálculo de distâncias entre as exsudações bem como o cálculo final do grau de pertinência da análise de vizinhança.

$$\mu_{AV}(S,i) = \text{MIN}(\mu_{DIS}, \mu_{AMB})$$

$$\mu_{AV}(S) = \text{MAX}_{i=1...n}(\mu_{AV}(S,i))$$

Tabela 5.4 - Exemplo da matriz com o cálculo de todas as distâncias medidas em metros entre as exsudações interpretadas.

DATA		4-02-03	4-02-03	4-02-03	4-02-03	4-02-03	4-02-03	4-02-03	...
	ID SEEP	29E	31E	32E	33E	34E	35E	36E	...
4-02-03	29E	0	0	0	0	0	0	0	...
4-02-03	31E	0	0	0	0	0	0	0	...
4-02-03	32E	0	0	0	0	0	0	0	...
4-02-03	33E	0	0	0	0	0	0	0	...
4-02-03	34E	0	0	0	0	0	0	0	...
4-02-03	35E	0	0	0	0	0	0	0	...
4-02-03	36E	0	0	0	0	0	0	0	...
4-02-03	37E	0	0	0	0	0	0	0	...
28-02-03	65E	12784.07	50229.11	65731.75	78654.61	98045.09	55197.88	45978.27	...
28-02-03	67E	37826.15	33935.39	43202.36	54298.13	74426.75	18754.67	50665.11	...
28-02-03	68E	36172.28	27824.18	37273.26	48675.35	68996.56	13200.73	45000.10	...
28-02-03	69E	35591.62	16465.80	26571.51	38738.04	59372.75	6884.05	34774.61	...
28-02-03	70E	59814.66	36853.75	35899.26	41601.57	58464.37	19542.97	57328.49	...
28-02-03	71E	43001.31	14669.11	19836.70	31150.06	51617.68	4975.13	35030.76	...
28-02-03	72E	33359.88	8640.90	22464.41	34934.89	54122.95	25719.81	13320.92	...
28-02-03	73E	46270.16	15373.49	17486.44	28118.35	48438.40	7441.69	35839.31	...
28-02-03	74E	36253.01	28132.59	37942.36	47678.12	63116.46	45622.98	8701.46	...
28-02-03	75E	97522.22	68240.39	59306.21	55845.72	60898.94	55541.84	87474.27	...
28-02-03	76E	61955.79	34420.11	31279.80	32762.91	40344.95	52268.04	23742.06	...
28-02-03	78E	74204.51	61362.02	62798.43	65242.49	69688.85	80250.66	42625.70	...
28-02-03	79E	118662.49	85548.00	73560.60	66062.38	63073.98	76241.35	102805.33	...
28-02-03	80E	76869.79	38295.61	22907.47	9801.40	10945.01	44928.25	46732.13	...
28-02-03	81E	100796.99	64140.51	50099.71	40332.03	35251.28	59888.64	78903.56	...
28-02-03	82E	92454.94	53799.51	38233.65	25305.49	11420.54	57032.22	63394.33	...
28-02-03	83E	111316.71	74053.50	59446.26	48529.44	38962.21	70858.86	87607.54	...
28-02-03	85E	126868.61	88574.55	73213.95	60816.58	45312.50	88116.28	99336.10	...
28-02-03	86E	149276.09	111445.03	96325.68	84303.28	69361.13	109157.31	123112.57	...
...

Tabela 5.5 - Exemplo do cálculo do grau de pertinência (μ_{AV}) da análise de vizinhança.

29E	150E	571E	151E	459E	153E	
DISTÂNCIA	0.939	0.921	0.890	0.882	0.801	
AMBIENTAL	0.870	1.000	0.870	0.800	0.840	
MÍNIMO	0.870	0.921	0.870	0.800	0.801	
MÁXIMO						0.92
31E	466E	318E	576E	161E	158E	
DISTÂNCIA	0.954	0.932	0.926	0.885	0.869	
AMBIENTAL	0.980	0.870	0.990	0.500	0.800	
MÍNIMO	0.954	0.870	0.926	0.500	0.800	
MÁXIMO						0.95
32E	476E	319E	300E	165E	579E	
DISTÂNCIA	0.934	0.928	0.920	0.918	0.914	
AMBIENTAL	0.980	0.540	0.960	0.540	0.980	
MÍNIMO	0.934	0.540	0.920	0.540	0.914	
MÁXIMO						0.93
33E	168E	80E	526E	412E	524E	
DISTÂNCIA	0.826	0.804	0.803	0.791	0.745	
AMBIENTAL	0.920	1.000	0.270	1.000	0.980	
MÍNIMO	0.826	0.804	0.270	0.791	0.745	
MÁXIMO						0.83
34E	272E	569E	467E	582E	80E	
DISTÂNCIA	0.917	0.808	0.799	0.798	0.781	
AMBIENTAL	1.000	1.000	0.340	0.960	1.000	
MÍNIMO	0.917	0.808	0.340	0.798	0.781	
MÁXIMO						0.92

5.3.2 Frequência de imageamento

Ainda como parte da contextualização temporal realizou-se a normalização das exsudações pela frequência de imageamento. Em razão da cobertura não homogênea dos frames RADARSAT-1, a persistência temporal das exsudações interpretadas foi ponderada a partir da densidade de frames. A Figura 5.18 ilustra o mapa de densidade de cobertura de imagens RADARSAT-1 para as vinte imagens em questão. Nota-se que a frequência de imageamento varia de 0 a 16, o que significa que a área de estudo não foi completamente coberta pela base de dados e que existem áreas ou células do *grid* com superposições de até 16 imagens RADARSAT-1. Desta forma, a função de pertinência determinada visa valorizar as exsudações situadas em regiões com baixa densidade de cobertura e penalizar as exsudações situadas em domínios com alta densidade de imageamento RADARSAT-1. A função de pertinência definida para o processamento dos dados de frequência de imageamento está ilustrada abaixo. A variável de suporte x equivale ao número de frames RADARSAT-1 que cobrem a exsudação investigada [1,16].

$$\begin{cases} 0.10656 - 0.00666x & \text{se } 1 < a < 16 \\ 0.1 & \text{se } a = 1 \\ 0 & \text{se } a = 16 \end{cases}$$

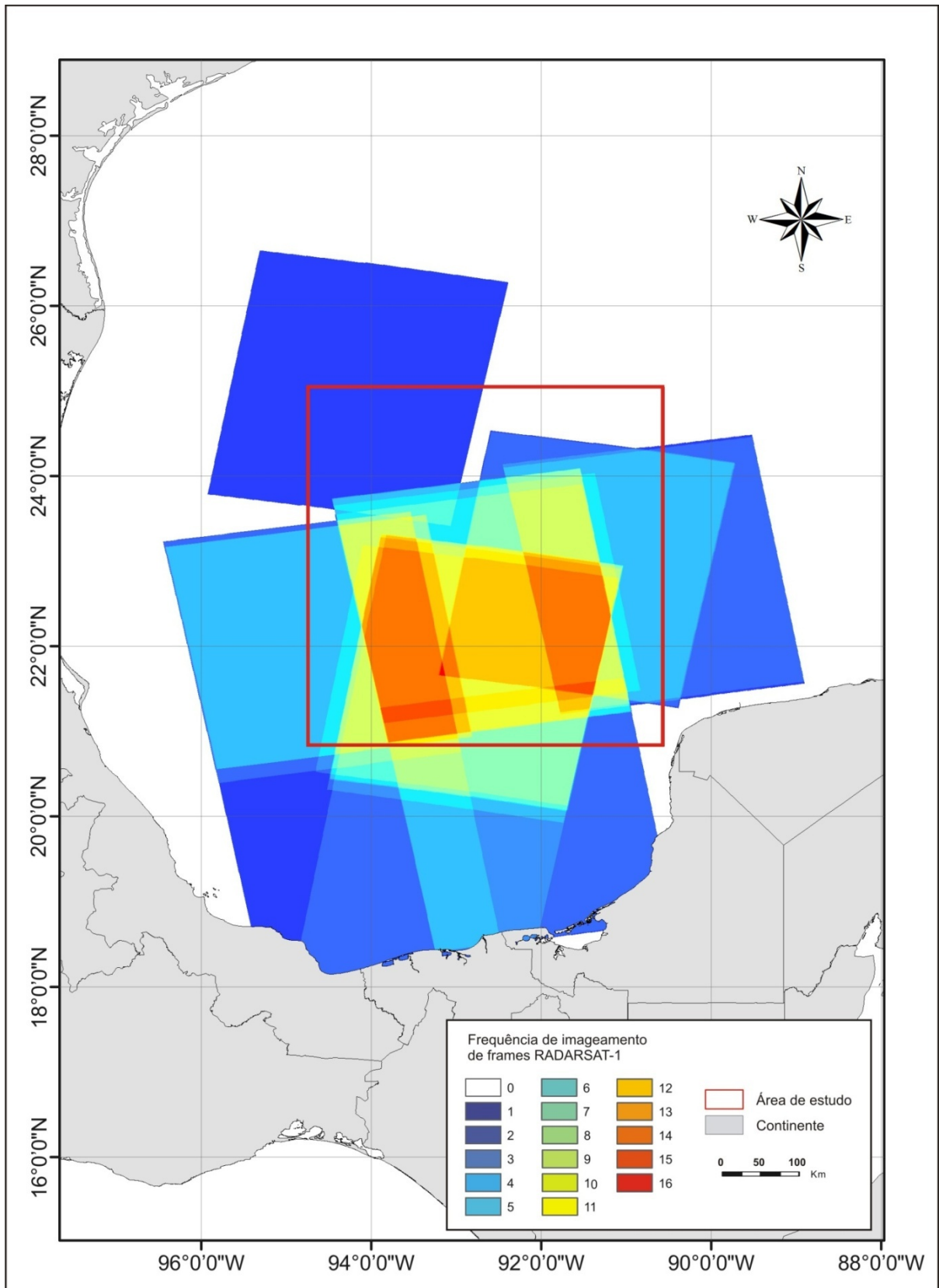


Figura 5.18 - Mapa de densidade de cobertura de imagens RADARSAT-1.

5.4 Contextualização Ambiental

A utilização de dados ambientais auxiliares como suporte à interpretação de imagens SAR é indispensável. Sabemos da importância das condições oceanográficas e meteorológicas reinantes no horário de aquisição de dados SAR no que diz respeito à geração de feições oceânicas superficiais. Muitas destas feições, denominadas “*look-alikes*” ou assemelhados, podem interferir de maneira substancial na interpretação de feições relacionadas à presença de óleo. Além disso, a presença de instalações petrolíferas (plataformas, dutos) ou embarcações nas proximidades de feições superficiais relacionadas a óleo desqualifica tal feição nos processos de interpretação e hierarquização de exsudações.

Nesta seção, as principais informações ambientais extraídas a partir de imagens SAR, dados oceanográficos e meteorológicos são analisadas do ponto de vista dos sistemas *fuzzy* a fim de se gerar um critério semi-automático que reduza a incerteza na interpretação de exsudações e ao mesmo tempo retire a responsabilidade do intérprete em processos de análise e interpretação. Pretende-se com isso estabelecer um protocolo de processamento e análise espacial de dados multi-sensores para a caracterização qualitativa de alvos de interesse. A contextualização ambiental das exsudações de óleo interpretadas na área de estudo tenderá a ser bastante restritiva, pois o menor indício ambiental que coloque em dúvida a interpretação de uma exsudação deverá figurar como informação suficiente para a desqualificação de tal feição, fazendo com que esta análise tenha um caráter essencialmente restritivo.

Os dados ambientais utilizados na determinação da contextualização ambiental são: (i) Análise de proximidade de embarcações e navios; (ii) Campo superficial de intensidade de vento QuikSCAT; (iii) Campo superficial de intensidade de vento SSM/I e (iv) Temperatura de topo de nuvens. A análise espacial pormenorizada destes dados objetivou caracterizar a presença de fenômenos potencialmente prejudiciais à interpretação de imagens RADARSAT-1 SAR. Estes fenômenos como a presença de domínios de baixos ventos (inferiores a 3 m.s^{-1}), altos ventos (superiores a 15 m.s^{-1}), células convectivas representadas por nuvens com temperaturas de topo inferiores a -40°C , além da proximidade entre exsudações e embarcações foram analisados individualmente e posteriormente agregados utilizando operadores restritivos para se gerar o grau de pertinência ambiental para as exsudações interpretadas neste estudo.

A Tabela 5.6 apresenta um exemplo com as informações obtidas a partir da fuzificação dos dados utilizados, onde são relacionadas às informações de vinte e duas (22) exsudações de óleo. A totalidade dos graus de pertinência obtida para as duzentas e quarenta e sete (247) exsudações de óleo está apresentada no Anexo IV.

A seguir, os itens relacionados explicam o conteúdo da Tabela 5.6, sendo: (i) O código identificador da exsudação de óleo interpretada; (ii) A data da imagem RADARSAT-1 a qual a exsudação foi extraída; (iii) Os graus de pertinência da contextualização geológica baseados nos domínios tectônicos ponderados (G1); (iv) As informações utilizadas na obtenção dos graus de pertinência da contextualização temporal (T1 = Distância mínima entre os polígonos das exsudações, T2 = Grau de pertinência de T1, T3 = Análise de vizinhança ponderada pela contextualização ambiental e T4 = Fator de ponderação da cobertura de frames RADARSAT-1) e; (v) As informações utilizadas na obtenção dos graus de pertinência da contextualização ambiental (A1 = Análise de proximidade de embarcações, A2 = Grau de pertinência de A1, A3 = Grau de pertinência do campo de intensidade de vento superficial do satélite QuikSCAT, A4 = Grau de pertinência do campo de intensidade de vento superficial do satélite DMSP F-15 e A5 = Grau de pertinência da temperatura de topo de nuvens do satélite NOAA-17).

Tabela 5.6 - Sumário dos graus de pertinência das exsudações de óleo referentes à contextualização geológica, contextualização temporal (análise de proximidade de polígonos, pontos e frequência de imageamento e; contextualização ambiental (análise de proximidade de embarcações, campo de intensidade de vento superficial (QuikSCAT e SSM/I) e sistemas de células convectivas).

ID SEEP	DATA	CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA	CONTEXTUALIZAÇÃO TEMPORAL				CONTEXTUALIZAÇÃO AMBIENTAL				
		G1	T1	T2	T3	T4	A1	A2	A3	A4	A5
029E	4-02-03	0.925	0.750	0.985	0.921		22.000	0.440	1.000	1.000	1.000
031E	4-02-03	0.963	1.250	0.975	0.954		29.000	0.580	1.000	1.000	1.000
032E	4-02-03	1.000	2.151	0.957	0.934		43.000	0.860	1.000	1.000	1.000
033E	4-02-03	0.988	1.031	0.979	0.826		53.000	1.000	1.000	1.000	1.000
034E	4-02-03	0.950	0.250	0.995	0.917		35.000	0.700	1.000	1.000	1.000
035E	4-02-03	1.000	0.000	1.000	0.927		24.000	0.480	1.000	1.000	1.000
036E	4-02-03	0.825	0.500	0.990	0.923		25.000	0.500	1.000	1.000	1.000
037E	4-02-03	0.963	0.000	1.000	0.949		21.000	0.420	1.000	1.000	1.000
065E	28-02-03	0.878	0.000	1.000	0.975		89.000	1.000	1.000	1.000	1.000
067E	28-02-03	0.769	1.000	0.980	0.948		98.000	1.000	1.000	1.000	1.000
068E	28-02-03	0.906	0.000	1.000	0.899		80.000	1.000	1.000	1.000	1.000
069E	28-02-03	1.000	0.000	1.000	0.902		60.000	1.000	1.000	1.000	1.000
070E	28-02-03	1.000	0.354	0.993	0.903		61.000	1.000	1.000	1.000	1.000
071E	28-02-03	1.000	0.000	1.000	0.867		59.000	1.000	1.000	1.000	1.000
072E	28-02-03	1.000	0.000	1.000	0.834		48.000	0.960	1.000	1.000	1.000
073E	28-02-03	1.000	0.000	1.000	0.872		44.000	0.880	1.000	1.000	1.000
074E	28-02-03	1.000	1.000	0.980	0.948		43.000	0.860	1.000	1.000	1.000
075E	28-02-03	0.750	16.617	0.668	0.987		136.000	1.000	1.000	1.000	1.000
076E	28-02-03	0.837	20.872	0.583	0.540		108.000	1.000	1.000	1.000	1.000
078E	28-02-03	0.969	0.000	1.000	0.437		84.000	1.000	1.000	1.000	1.000
079E	28-02-03	1.000	0.000	1.000	0.860		79.000	1.000	1.000	1.000	1.000
080E	28-02-03	1.000	0.000	1.000	0.923		57.000	1.000	1.000	1.000	1.000

5.4.1 Análise de proximidade de embarcações

Uma das fases do processamento das imagens RADARSAT-1 foi a extração de feições com índices elevados de retroespalhamento, indicativas da presença de instalações petrolíferas ou embarcações (Figura 1.1). Posteriormente, calculou-se o mapa de distâncias (*buffer distances map*) a partir da geração de *buffers* ou linhas eqüidistantes em 1 km de intervalo (Figura 5.20). Em seguida os mapas de distâncias foram rasterizados para as fases posteriores de fuzzificação a partir da função de pertinência pré-definida. A definição da função de pertinência para a proximidade de embarcações obedeceu a critérios empíricos pré-definidos como intervalos padrão para a determinação de zonas de influência que determinassem a provável origem ou fonte para derrames de óleo. A função de pertinência para a análise de proximidade de embarcações está ilustrada na Figura 5.19. A variável de suporte x equivale à distância medida em quilômetros (km).

$$\left\{ \begin{array}{ll} 0.02x & \text{se } 0 < a < 50 \\ 0 & \text{se } a = 0 \\ 1 & \text{se } a \geq 50 \end{array} \right.$$

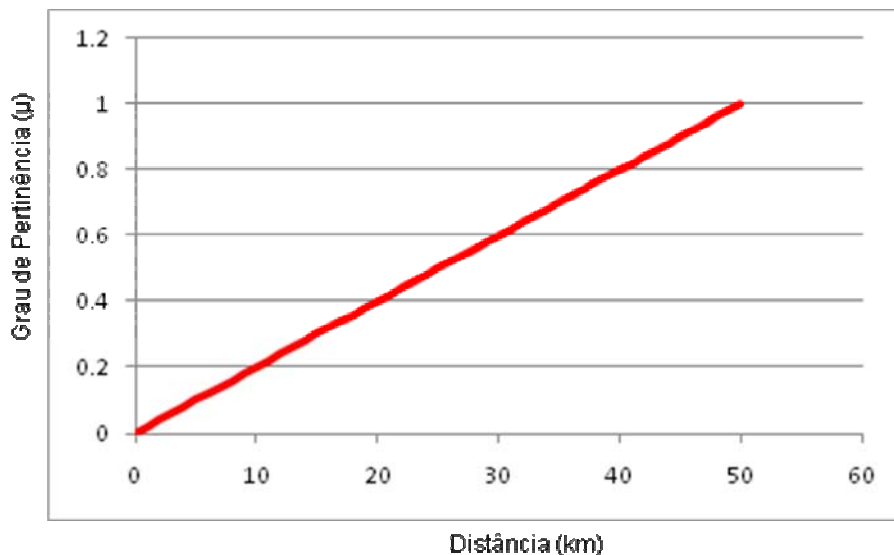


Figura 5.19 - Gráfico da função de pertinência determinada para a contextualização ambiental caracterizada pela análise de proximidade de pontos (plataformas e/ou embarcações).

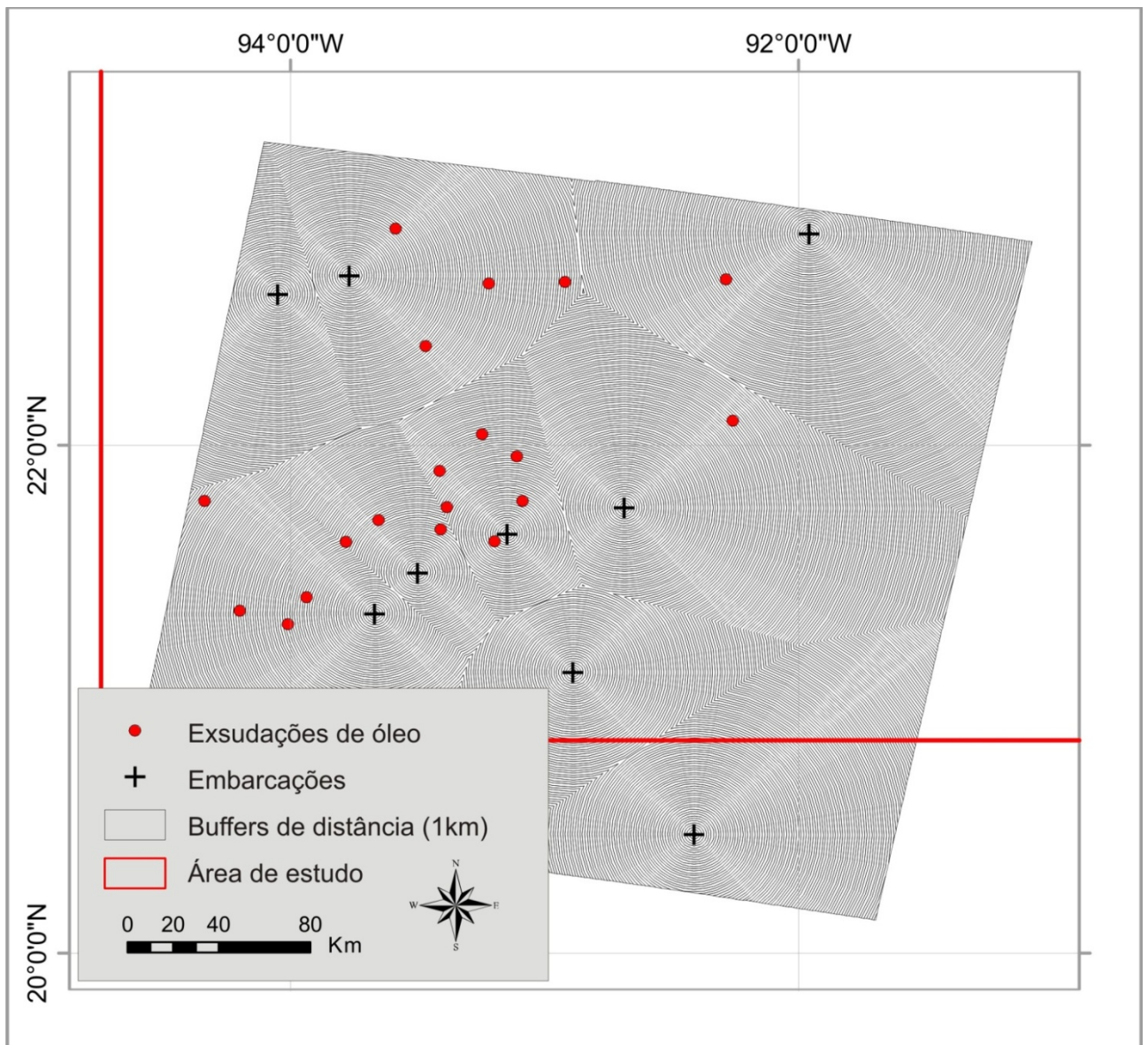


Figura 5.20 - Mapa da análise de proximidade entre exsudações de óleo e plataformas ou embarcações.

5.4.2 Campo de intensidade de vento superficial

A coleta de dados de ventos na superfície dos oceanos é indispensável para a aplicação em previsão do tempo e estudos climáticos. Além disso, os campos superficiais de intensidade e direção de ventos podem ser bastante úteis para a indústria do petróleo, através de sua assimilação em modelos de dispersão de óleo, planejamento de instalações oceânicas, geração de energia, entre outros.

Como já visto anteriormente, os dados de vento podem ser obtidos por meio de sensores de microondas passivos ou ativos. No primeiro caso, os radiômetros passivos são limitados a obter a intensidade dos ventos, já os sensores ativos, denominados escaterômetros, estimam dados de intensidade e direção do vento. O campo superficial de vento exerce um papel fundamental na interpretação de feições oceânicas de superfície em imagens de radar de abertura sintética. Diferentes intensidades de vento podem gerar falsos alvos em imagens de radar, logo a análise e interpretação integradas aos dados de vento são decisivas para se obter resultados conservativos, como por exemplo, na detecção de exsudações de óleo. Ventos equivalentes a 0 m.s^{-1} provocam a ausência de retroespalhamento em imagens SAR (reflexão especular), impossibilitando a detecção de feições relacionadas a óleo (*oil slicks*). Ventos equivalentes a 3 m.s^{-1} não impactam a presença de oil slicks e nestes casos a presença de falsos alvos (*look-alikes*) é mais freqüente devido às variações locais de ventos considerados baixos. Domínios com intensidades de vento entre 3 e 10 m.s^{-1} apresentam um número menor de falsos alarmes e feições superficiais relacionadas a óleo são bastante perceptíveis a medida que o retroespalhamento das regiões adjacentes é homogêneo. Em intervalos superiores a 10 m.s^{-1} , apenas feições de óleo mais espessas são visíveis em imagens SAR (Brekke e Solberg, 2005).

Neste estudo utilizaram-se os dados do escaterômetro SeaWinds a bordo do satélite QuikSCAT e do radiômetro SSM/I a bordo dos satélites F-13 e F-14 da série DMSP. Ambos os dados foram considerados visando à cobertura total de dados de intensidade de vento nas vinte imagens RADARSAT-1 interpretadas. De acordo com a literatura específica citada no capítulo 3, utilizou-se a função trapezoidal de pertinência para os processos de inferência *fuzzy* dos dados de vento, conforme ilustrado abaixo (Figura 5.21). É importante salientar que os valores de “a”, “b”, “c” e “d” são variáveis.

$$\mu_A(x) \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ 1 & \text{se } b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{se } c < x \leq d \\ 0 & \text{se } x \geq d \end{cases}$$

onde “a” equivale ao vento nulo, “b” ao vento mínimo para a possibilidade de criação de feições denominadas *oil slicks*, o intervalo de “b” a “c” ao intervalo ótimo de intensidade de vento para a detecção de exsudações de óleo, o intervalo de “c” a “d” que caracteriza uma variação crescente de intensidade de vento onde as feições de óleo deverão ser cada vez mais espessas para serem diferenciadas do *background* e “d” como o limite máximo de intensidade de vento para a possibilidade de detecção de *oil slicks*. A variável de suporte x equivale à intensidade do vento medida em m.s^{-1} .

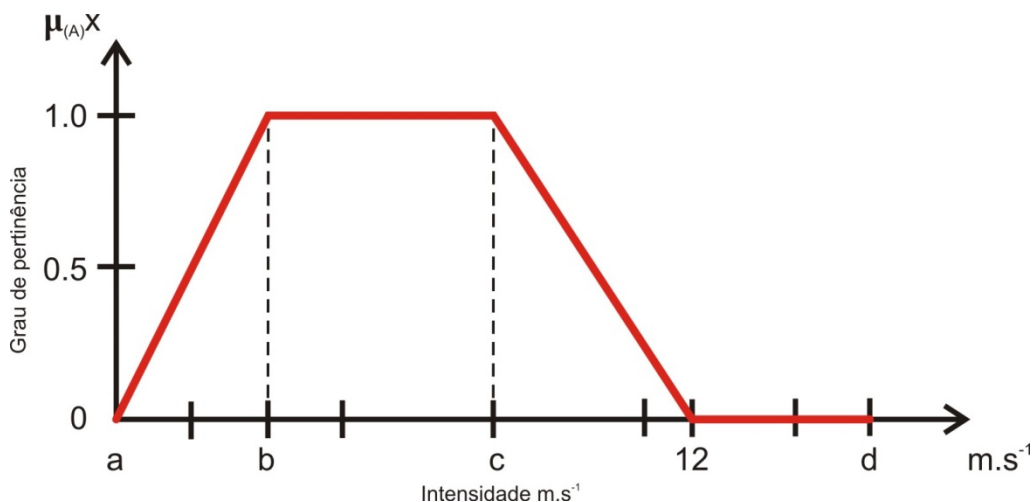


Figura 5.21 - Gráfico da função de pertinência determinada para a contextualização ambiental caracterizada pela análise do campo de superficial de intensidade de ventos QuikSCAT e SSM/I.

A imagem RADARSAT-1 foi adquirida em 25/04/03 às 12:10:08 (UTC) no modo de imageamento ScanSAR Narrow 1 (SCN1) em órbita descendente. Esta imagem ocupa, portanto uma área de 300 x 300 km e apresenta resolução nominal da ordem de 50 m (*pixel size*), Figura 5.22. Os dados de intensidade e direção de vento superficial do QuikSCAT e intensidade de vento superficial do SSM/I foram adquiridos respectivamente em 25/04/03 às 12:00 (UTC) e 25/04/03 às 14:42 (UTC), Figuras 5.23A e 5.24A.

A Figura 5.23 demonstra os processos de fuzzyficação dos dados de intensidade de vento superficial obtidos a partir do satélite QuikSCAT, em 25/04/03. Nesta data, o frame da imagem RADARSAT-1 adquirida não é totalmente coberto pelos dados do escaterômetro. Desta forma, os dados de intensidade de vento superficial obtidos a partir do radiômetro SSM/I complementam as informações de vento ausentes no QuikSCAT (Figura 5.24). As Figuras 5.23 B e 5.24 B ilustram os dados QuikSCAT e SSM/I fuzzificados com os graus de pertinência para as exsudações de óleo interpretadas em verde. A Tabela 5.4 sumaria os graus de pertinência para as informações utilizadas na caracterização da contextualização ambiental.

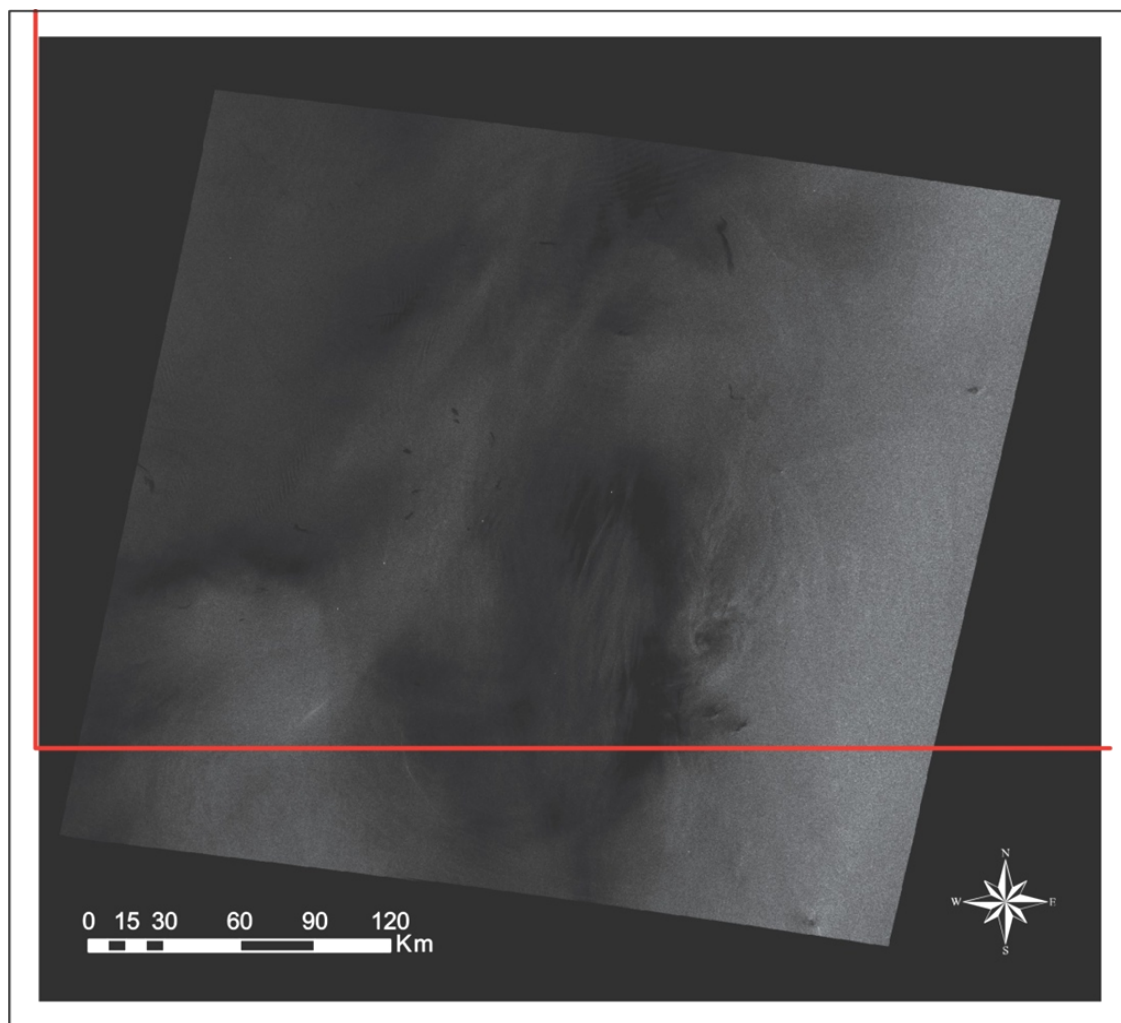


Figura 5.22 - A imagem RADARSAT-1 adquirida em 25/04/03 às 12:10:08 (UTC) no modo de imageamento ScanSAR Narrow 1 (SCN1) em órbita descendente.

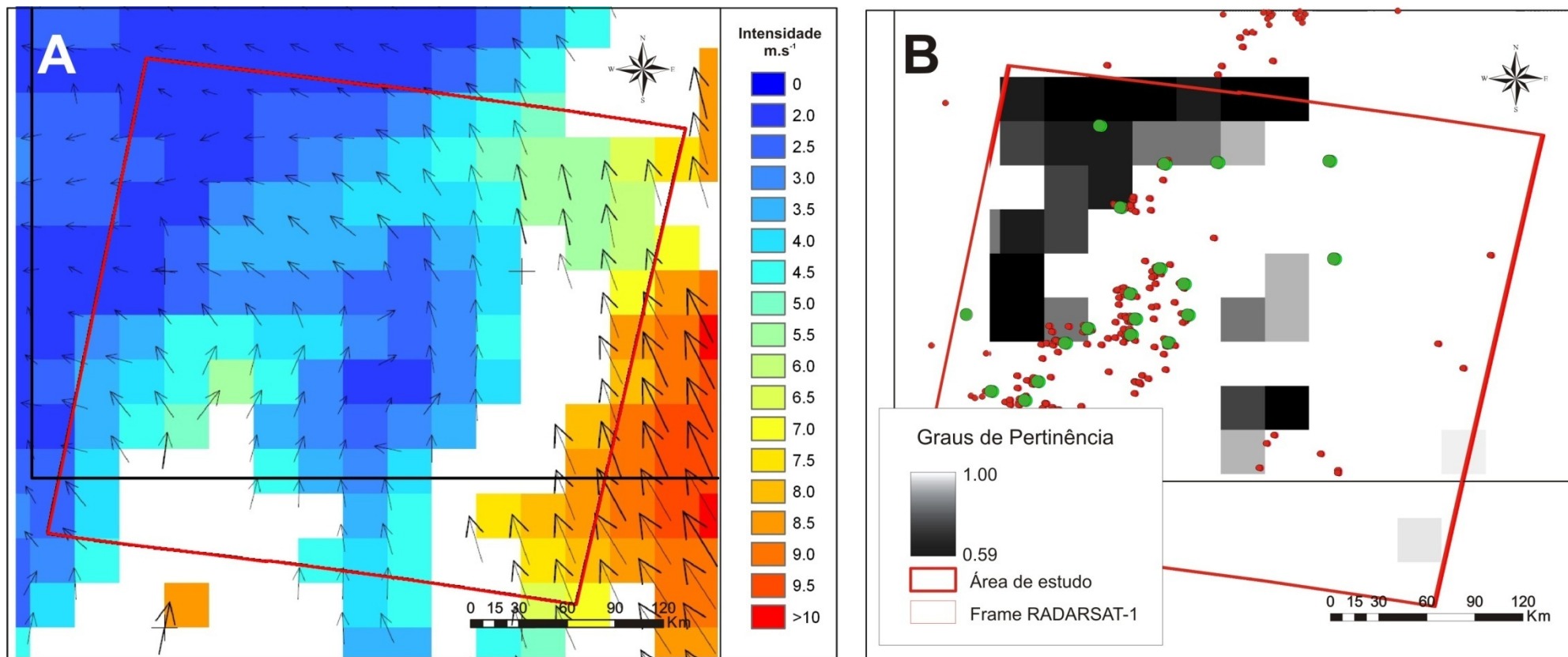


Figura 5.23 - Fuzzyficação dos dados de intensidade de vento superficial do satélite QuikSCAT adquirido em 25/04/03. Os círculos vermelhos representam a totalidade das exsudações interpretadas neste estudo e os círculos verdes, as exsudações interpretadas na imagem RADARSAT-1 de 25/04/03.

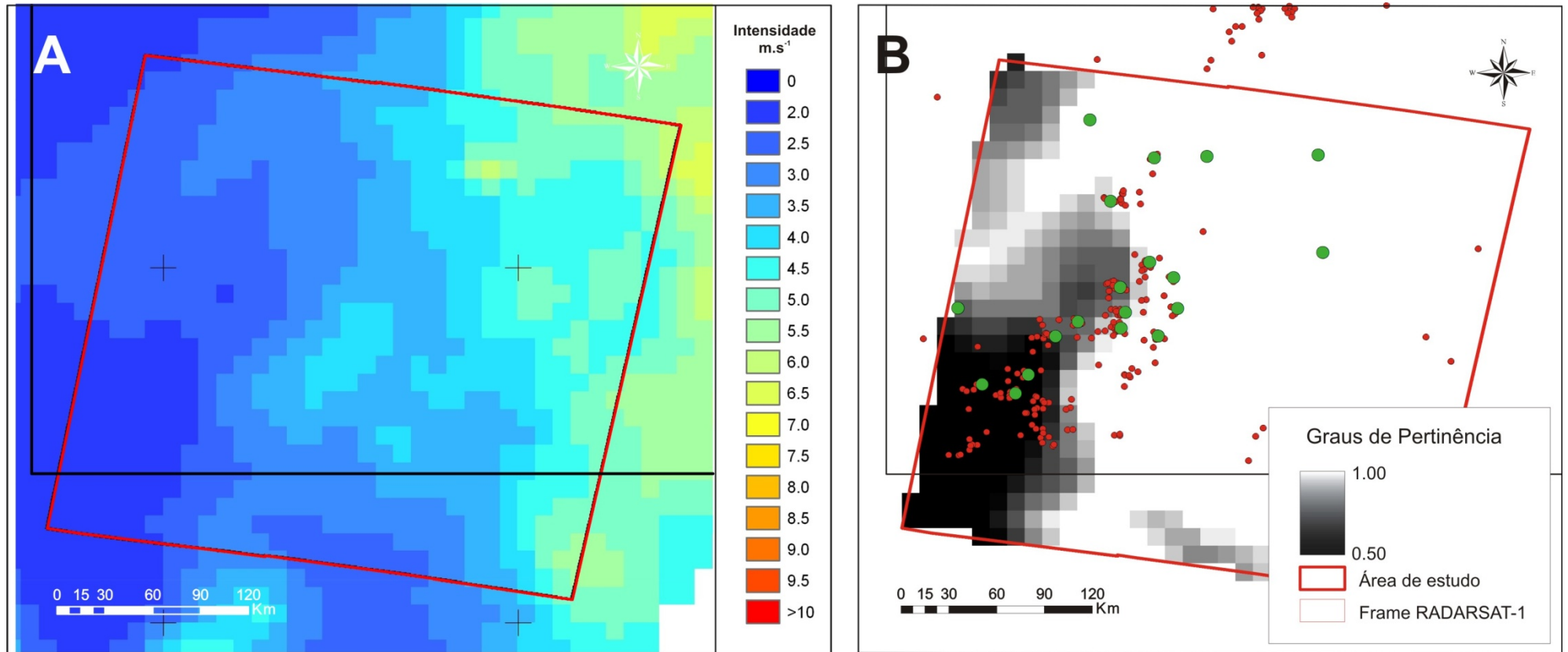


Figura 5.24 - Fuzzyficação dos dados de intensidade de vento superficial do satélite SSM/I adquirido em 25/04/03. Os círculos vermelhos representam a totalidade das exsudações interpretadas neste estudo e os círculos verdes, as exsudações interpretadas na imagem RADARSAT-1 de 25/04/03.

5.4.3 Sistemas de células convectivas

A ocorrência de chuvas fortes na superfície dos oceanos provoca fenômenos de turbulência que podem suavizar as ondas capilares (*espalhamento Bragg*), resultando em regiões com baixo retorno de sinal para a antena nas áreas afetadas pela chuva e alto sinal de retorno nas regiões adjacentes. Estes fenômenos são frequentemente observados em regiões tropicais e sub-tropicais (Fu e Holt, 1982). Dados de temperatura de topo de nuvens fornecem informações a respeito de células convectivas responsáveis pela presença de chuvas fortes ou sistemas Cúmulo Nimbus (Cb).

Na regiões tropicais da Terra, como na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) a maior parte da precipitação (chuva) provem de sistemas Cúmulo Nimbus (Cb). Eles também apresentam um papel importante no ciclo energético e na circulação global da atmosfera uma vez que são muito eficientes no transporte de vapor, temperatura potencial equivalente e poluentes entre diferentes níveis da troposfera, e mesmo da baixa estratosfera. São facilmente encontrados na região tropical sobre os continentes, na faixa equatorial na ZCIT, e internamente na faixa de nuvens das frentes-frias, e em sua retaguarda.

O processamento dos dados de temperatura de topo de nuvens objetivou a delimitação de intervalos de temperatura onde a probabilidade de presença de células convectivas é maior. Esta faixa foi então utilizada como critério para a definição da função de pertinência de exsudações de óleo em áreas com a presença de células convectivas. Este dado encerra o conjunto de informações utilizadas na definição da contextualização ambiental que será utilizada nos processos subsequentes de *ranking* de exsudações de óleo. A função de pertinência definida para os dados de temperatura de topo de nuvens está ilustrada abaixo (Figura 5.25). A variável de suporte x equivale à temperatura de topo de nuvens medida em graus Celcius ($^{\circ}\text{C}$).

$$\begin{cases} 1 & \text{se } x \geq -30 \\ \frac{b-x}{b-a} & \text{se } x < -30 \end{cases}$$

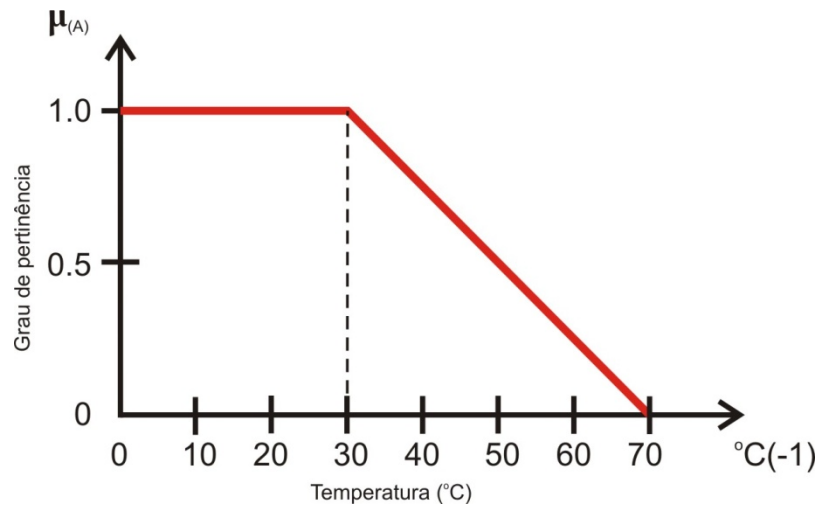


Figura 5.25 - Gráfico da função de pertinência determinada para a contextualização ambiental caracterizada pela análise da temperatura de topo de nuvens.

A Figura 5.26 demonstra os processos de fuzzyficação dos dados de temperatura de topo de nuvens obtidos a partir do satélite NOAA-17, em 04/06/03. Neste processo os dados em *grid* são clipados segundo o frame da imagem RADARSAT-1. Em seguida, o dado *grid* clipado é submetido ao processo de inferência *fuzzy* para a determinação da pertinência do dado para a ocorrência de exsudações de óleo. A Figura 5.27 apresenta o resultado da fuzzyficação dos dados de temperatura de topo de nuvens com os graus de pertinência para as exsudações de óleo interpretadas em amarelo. A Tabela 5.6 sumaria os graus de pertinência para as informações utilizadas na caracterização da contextualização ambiental.

Os graus de pertinência obtidos a partir das informações que compõem a contextualização ambiental são extraídos a partir das superfícies *raster* mediante os centróides das exsudações. Posteriormente, os planos de informação ambiental utilizados são combinados mediante operadores de agregação que melhor expressem a importância dos mesmos para o entendimento dos fatores que pretendem valorizar feições individuais em processos de tomada de decisão.

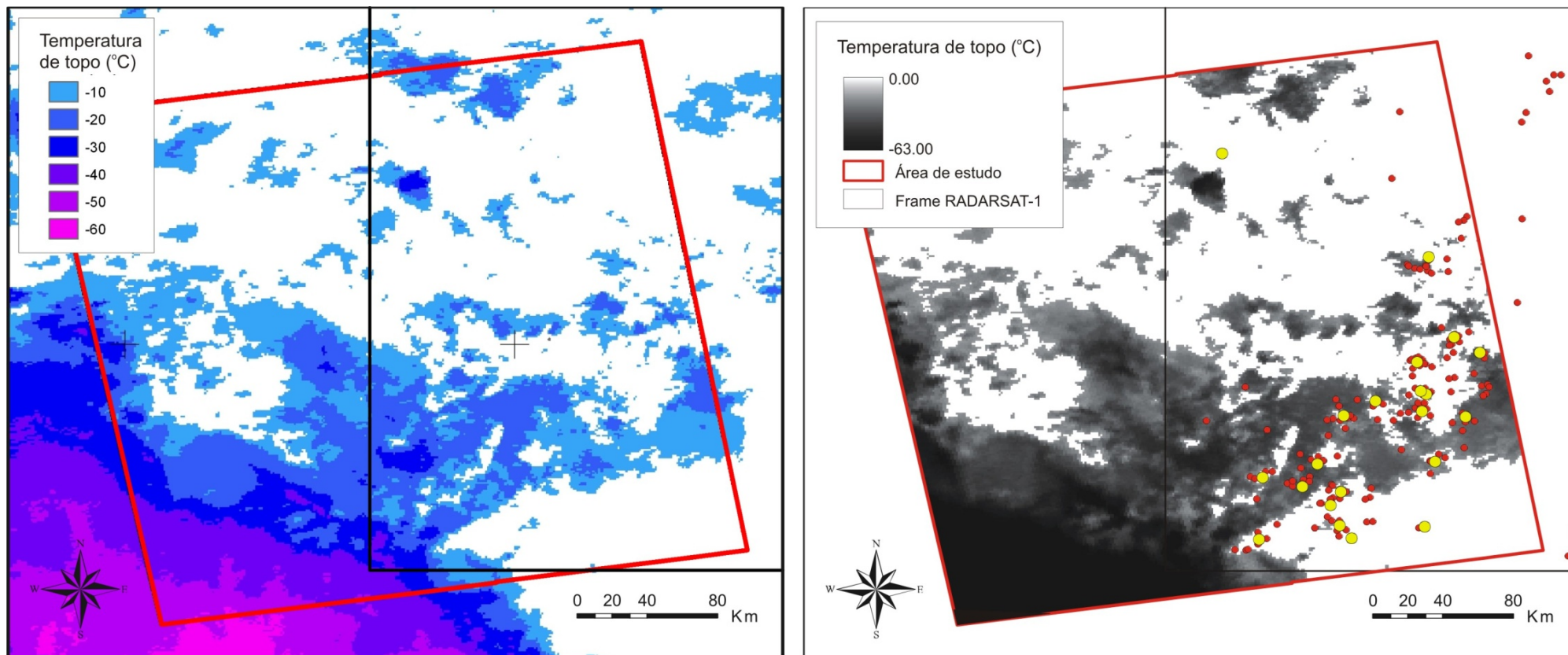


Figura 5.26 - Processamento dos dados de temperatura de topo de nuvens do satélite AVHRR/NOAA-17 adquirido em 04/06/03 às 03:43 (UTC). Os círculos vermelhos representam a totalidade das exudações interpretadas neste estudo e os círculos amarelos, as exudações interpretadas na imagem RADARSAT-1 de 25/04/03.

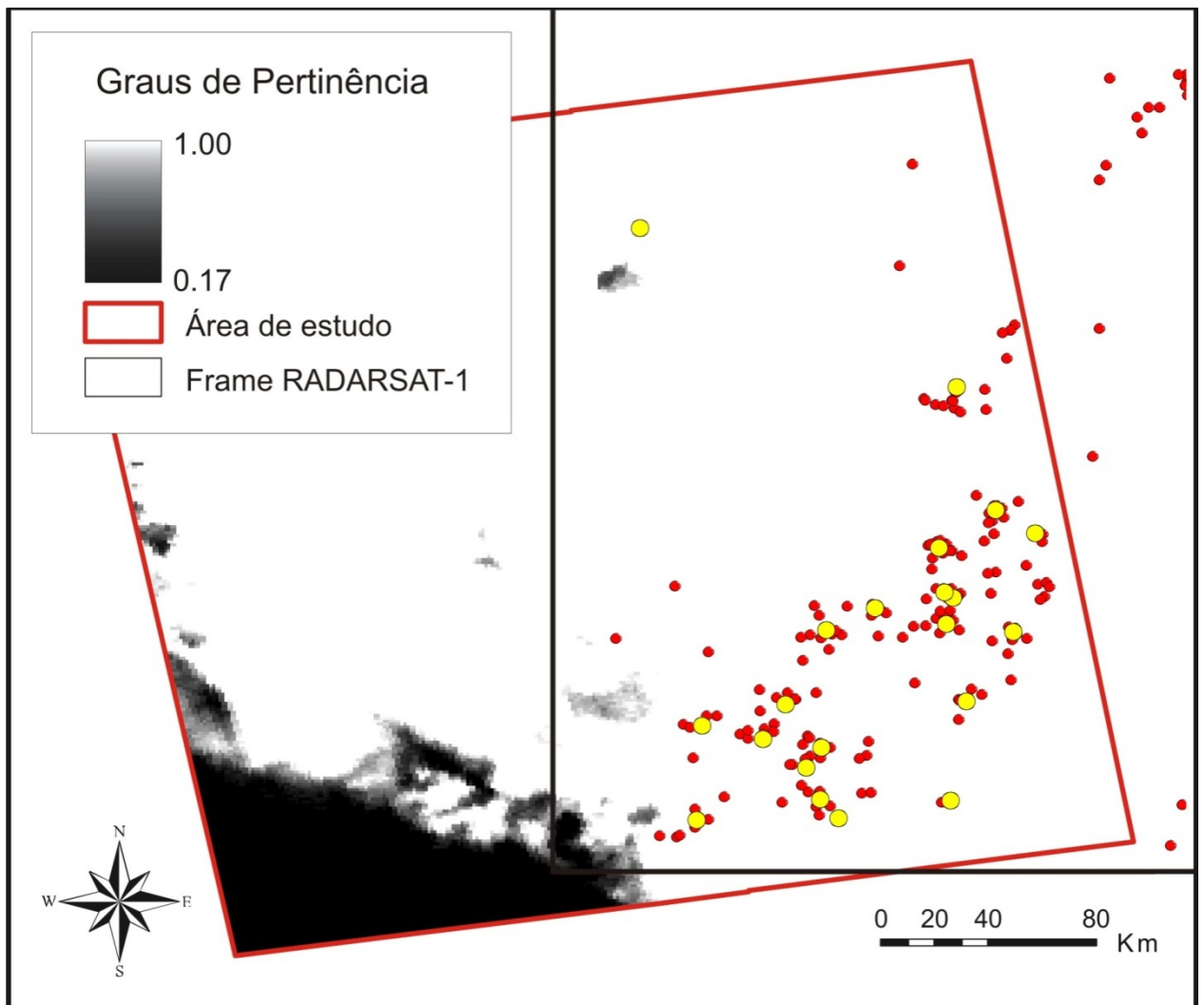


Figura 5.27 - Fuzzyficação dos dados de temperatura de topo de nuvens do satélite AVHRR/NOAA-17 adquiridos em 04/06/03 às 03:43 (UTC). Os círculos vermelhos representam a totalidade das exsudações interpretadas neste estudo e os círculos amarelos, as exsudações interpretadas na imagem RADARSAT-1 de 25/04/03.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Construção e modelagem da base de dados

Neste trabalho foram utilizados os resultados obtidos a partir do processamento digital das 20 imagens do satélite RADARSAT-1, adquiridas no período de Fevereiro a Junho de 2003, conforme Tabela 6.1 As imagens selecionadas pertencem ao modo operacional de imageamento ScanSAR Narrow 1 (SCN1).

Tabela 6.1 - Seleção de Imagens RADARSAT-1 ScanSAR Narrow 1.

Número	Data (UTC) (dd/mm/aa)	Horário (hh:mm:ss)	Modo de operação	Órbita
1	04/02/03	0:19:27	SCN1	Ascendente
2	08/02/03	0:03:35	SCN1	Ascendente
3	12/02/03	12:10:50	SCN1	Descendente
4	18/02/03	0:11:53	SCN1	Ascendente
5	28/02/03	0:20:08	SCN1	Ascendente
6	04/03/03	0:03:35	SCN1	Ascendente
7	08/03/03	12:10:50	SCN1	Descendente
8	14/03/03	0:11:53	SCN1	Ascendente
9	15/03/03	12:05:36	SCN1	Descendente
10	18/03/03	12:17:36	SCN1	Descendente
11	01/04/03	12:10:08	SCN1	Descendente
12	25/04/03	12:10:08	SCN1	Descendente
13	01/05/03	0:11:52	SCN1	Ascendente
14	02/05/03	12:05:36	SCN1	Descendente
15	19/05/03	12:10:08	SCN1	Descendente
16	25/05/03	0:11:52	SCN1	Ascendente
17	25/05/03	0:11:11	SCN1	Ascendente
18	04/06/03	0:19:26	SCN1	Ascendente
19	18/06/03	0:11:52	SCN1	Ascendente
20	28/06/03	0:20:08	SCN1	Ascendente

A Figura 6.1 ilustra a disposição espacial dos *frames* RADARSAT-1 sobre a área de estudo, dando uma idéia do padrão de cobertura realizado.

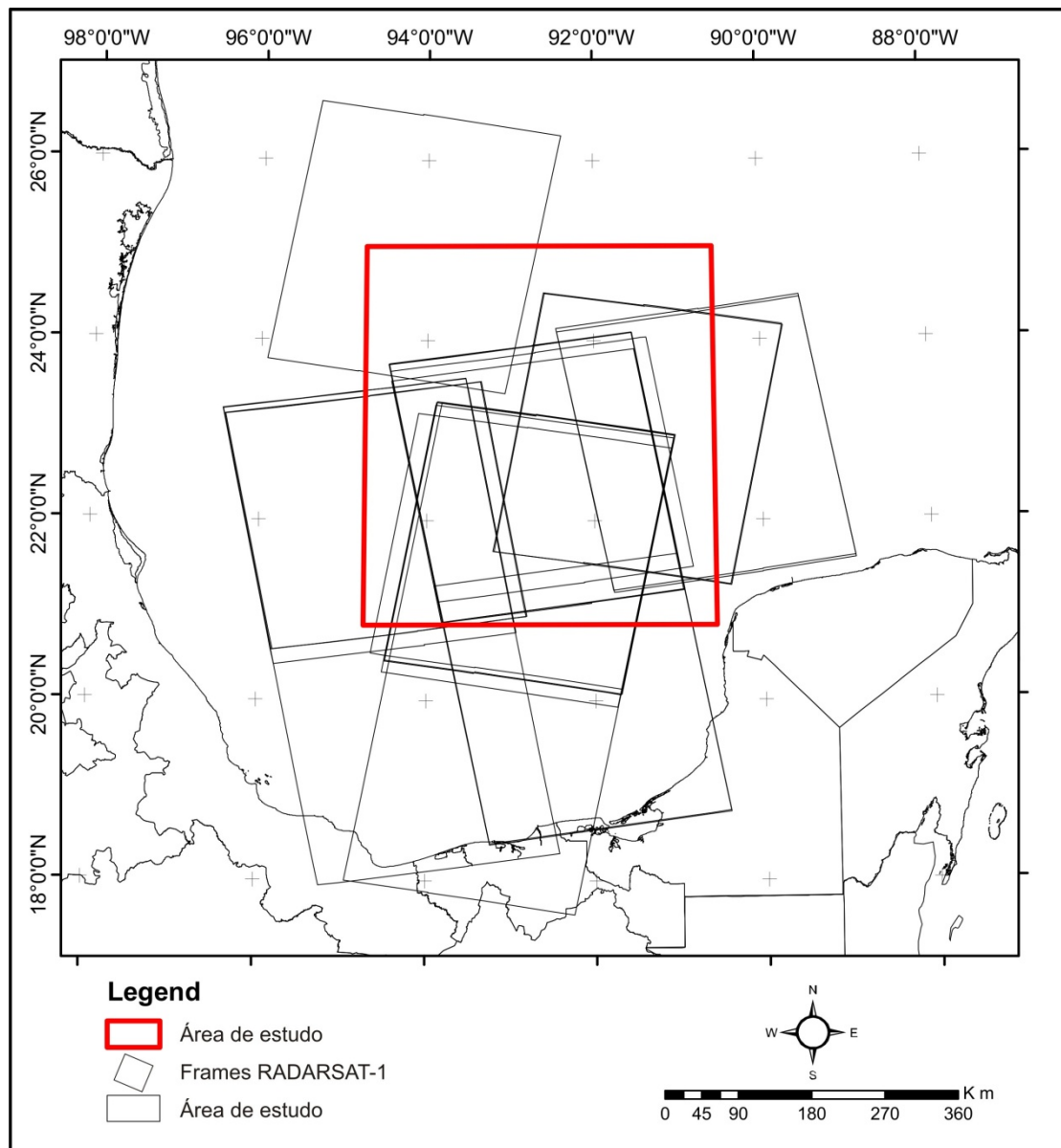


Figura 6.1 - Mapa de localização dos 20 frames das imagens RADARSAT-1 processadas neste trabalho.

Conforme discutido anteriormente, sabe-se da importância dos dados oceanográficos e meteorológicos para o processo de análise e interpretação de feições indicativas de baixo retroespalhamento em imagens SAR. De acordo com a Figura 1.2, normalmente utiliza-se um conjunto de produtos de sensoriamento remoto multi-plataforma composto pelos (i) mapa de temperatura da superfície do mar, (ii) mapa de temperatura de topo de nuvens, (iii) mapa do campo superficial de ventos, (iv) mapa da altura significativa de ondas e, (v) mapa da concentração de clorofila A. Este conjunto de dados auxiliares oceanográficos e meteorológicos estão ilustrados na Figura 6.2.

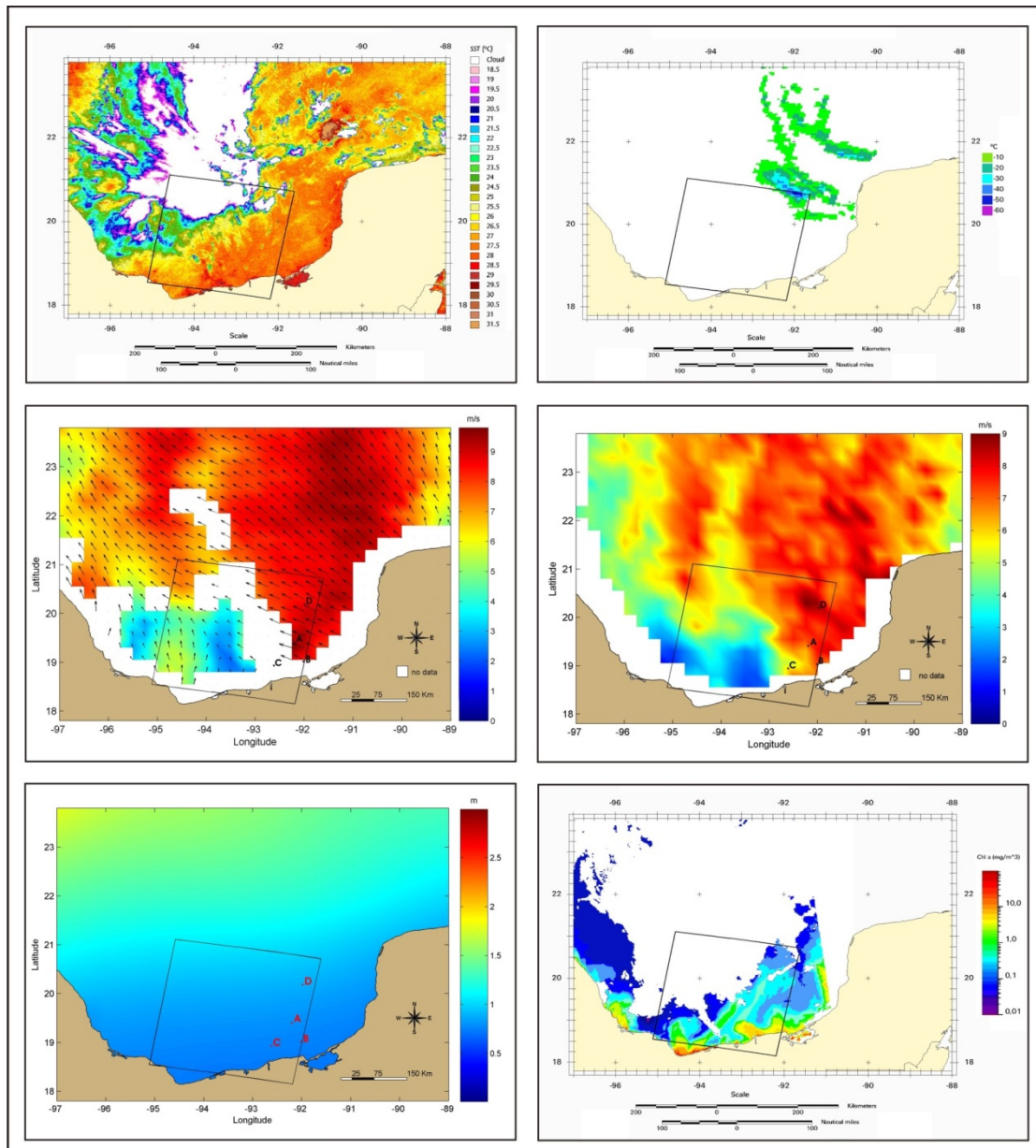


Figura 6.2 - Ilustração dos principais produtos de sensoriamento remoto oceanográfico e meteorológico auxiliares utilizados na metodologia de detecção de óleo na superfície do mar.

A análise integrada dos dados ambientais será realizada por métodos automáticos baseados na teoria de conjuntos *fuzzy*. A demonstração do método aqui proposto somente utilizará dados que comprovadamente possam dificultar a interpretação das imagens SAR. Neste caso, esta seleção se baseou na análise de uma extensa base de dados da área de estudo. Os dados ambientais considerados para o processo de cálculo de *ranking* de exsudações *fuzzy* foram os (i) mapas do campo superficial de vento oriundos dos satélites QuikSCAT (intensidade e direção) e SSM/I (intensidade), (ii) mapas de temperatura do topo de nuvens obtidos a partir do satélite da série NOAA (sensor AVHRR) e, ainda como critério para definição do cenário ambiental de análise, utilizou-se (iii) técnicas de análise de proximidade de potenciais origens para os polígonos interpretados como exsudações de óleo. Tais origens correspondem a alvos pontuais representados por altos valores de retroespalhamento, principalmente representados

pelos mecanismos denominados “reflexão de canto” (*double bounce*), indicativos da presença de navios ou plataformas.

A seguir foram selecionados dois conjuntos de imagens RADARSAT-1 e dados oceanográficos e meteorológicos auxiliares. As Figuras 6.3 a 6.16 ilustram os resultados obtidos a partir do processamento das imagens SAR com as exsudações de óleo interpretadas e os respectivos dados oceanográficos e meteorológicos adquiridos em horários próximos aos das imagens SAR.

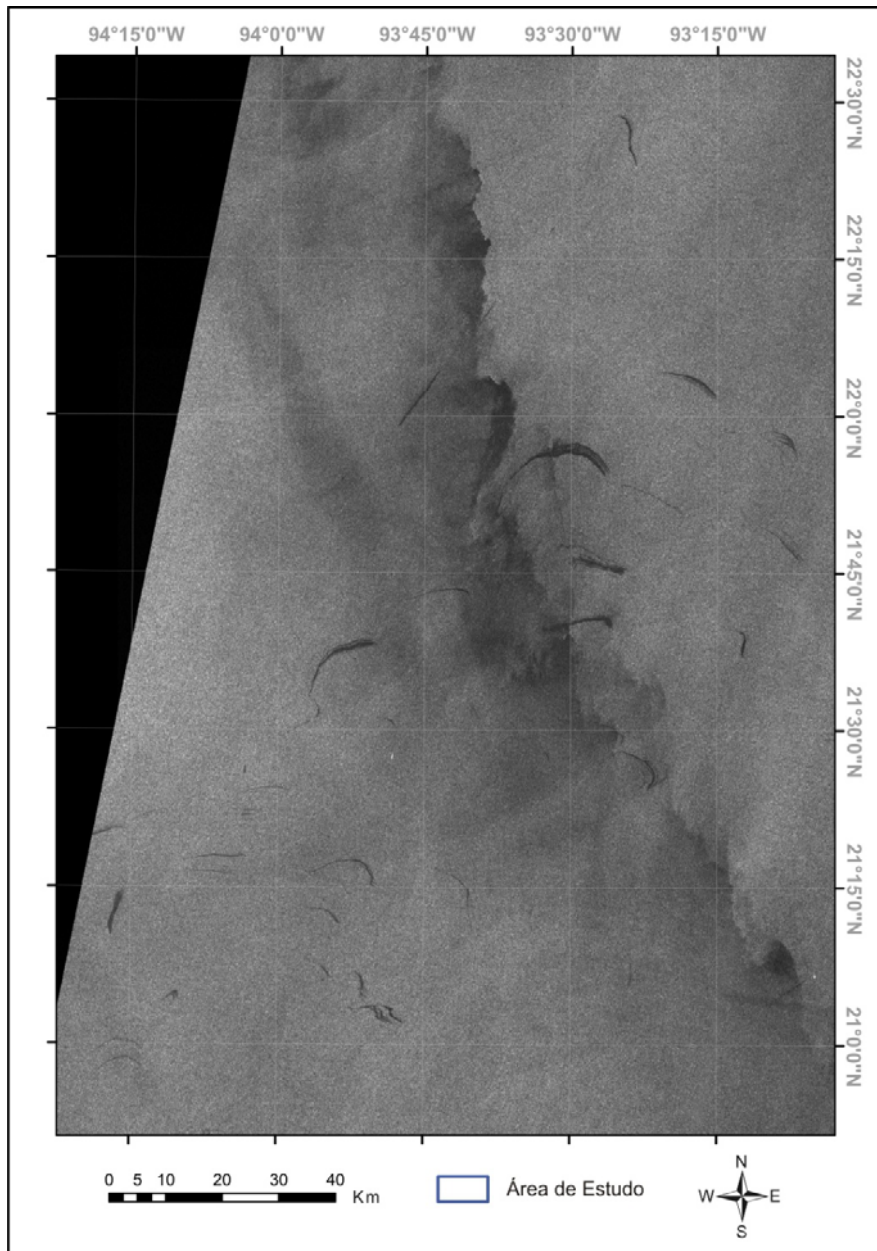


Figura 6.3 - Zoom da imagem RADARSAT-1 adquirida em 08/03/03 às 12:10:50 (UTC).

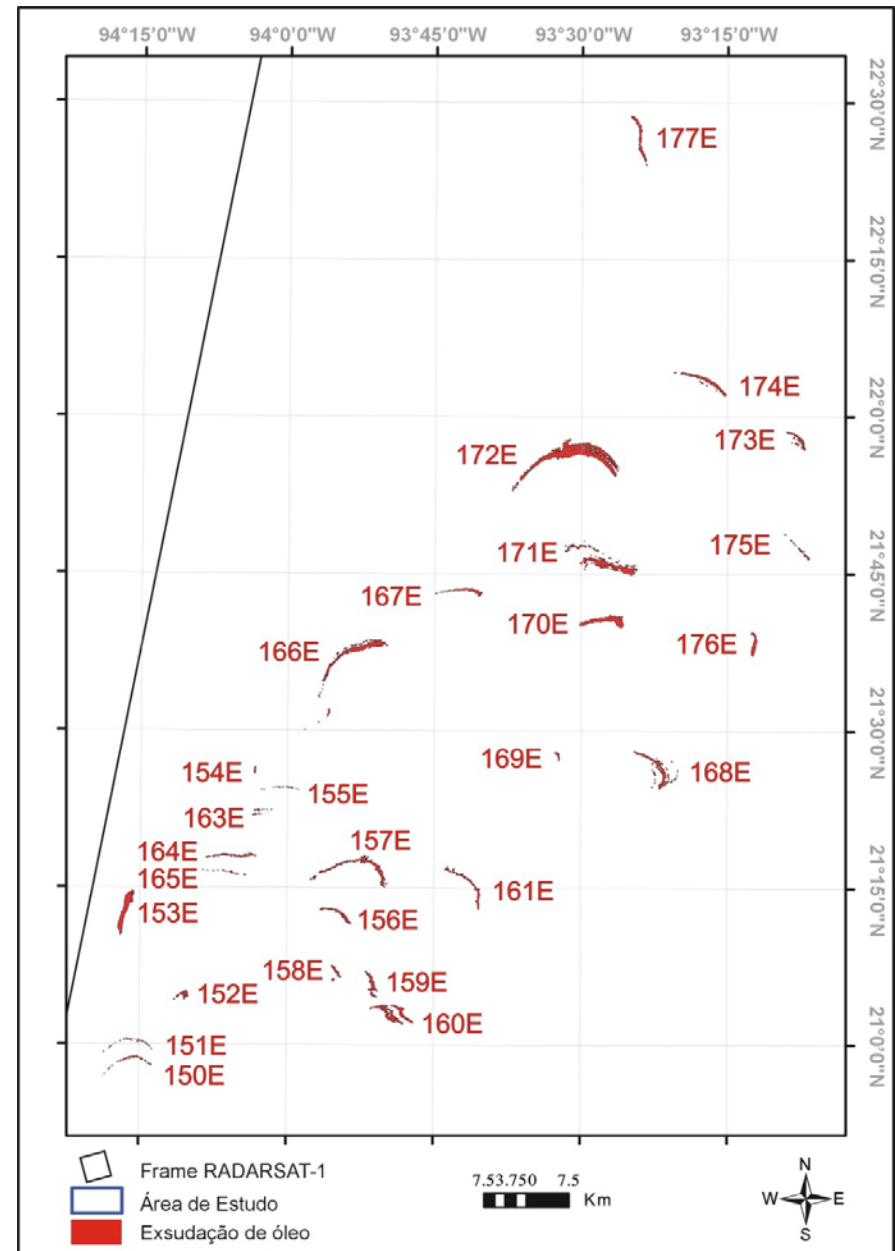


Figura 6.4 - Exsudações de óleo interpretadas na imagem RADARSAT-1 adquirida em 08/03/03 às 12:10:50 (UTC).

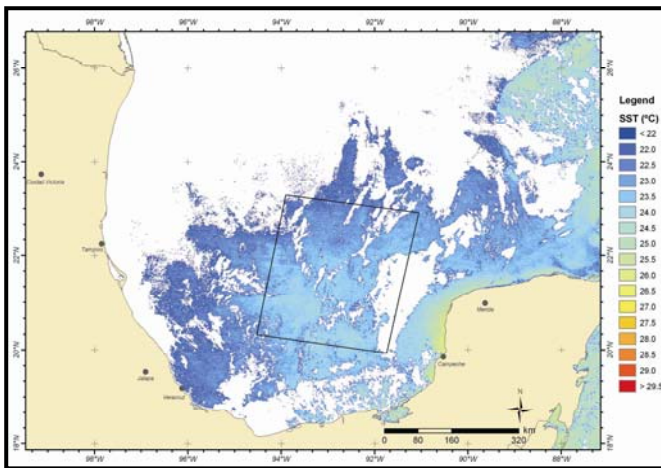


Figure 6.5 – Mapa de temperatura da superfície do mar adquirido em 08/03/2003 às 12:50 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1 (satélite NOAA-15).

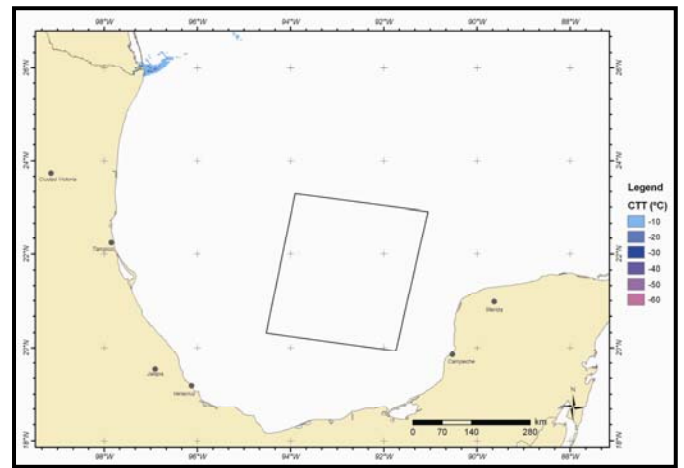


Figure 6.6 – Mapa da temperatura do topo de nuvens adquirido em 08/03/2003 às 12:50 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1 (satélite NOAA-15).

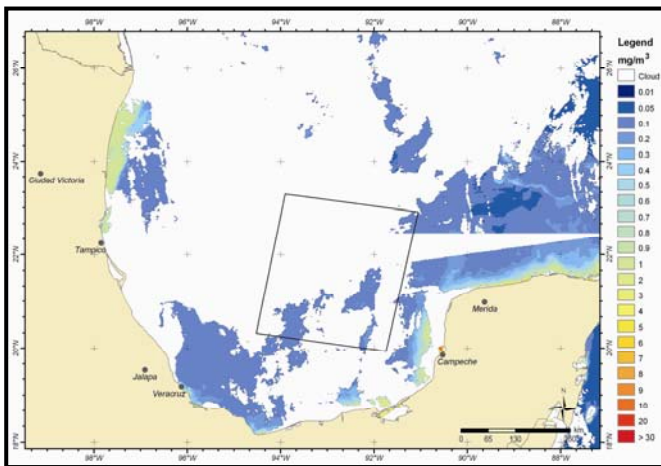


Figure 6.7 – Mapa da concentração de Clorofila tipo “A” (mg/m^3) adquirido em 08/03/2003 às 19:20 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1 (satélite MODIS).

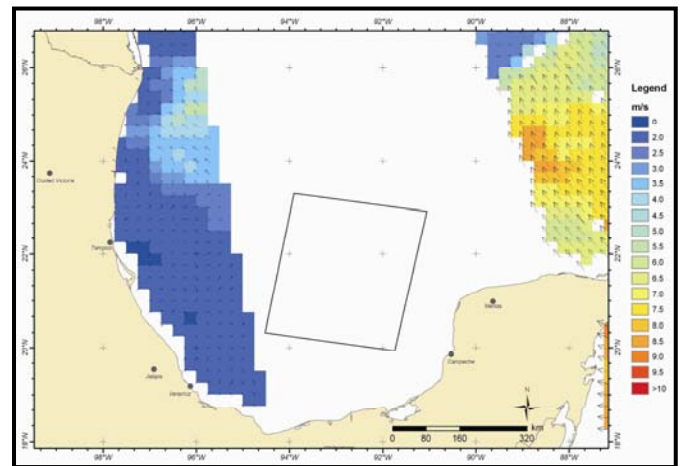


Figure 6.8 – Mapa do campo superficial de vento a partir do dado *along-track* do satélite QuikSCAT adquirido em 08/03/2003 às 12:36 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1.

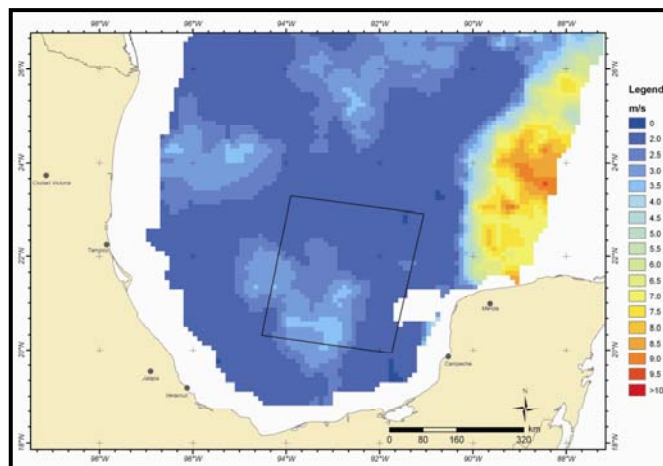


Figure 6.9 – Mapa do campo superficial de vento adquirido em 08/03/2003 às 13:00 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1 (satélite DMSP F-13).

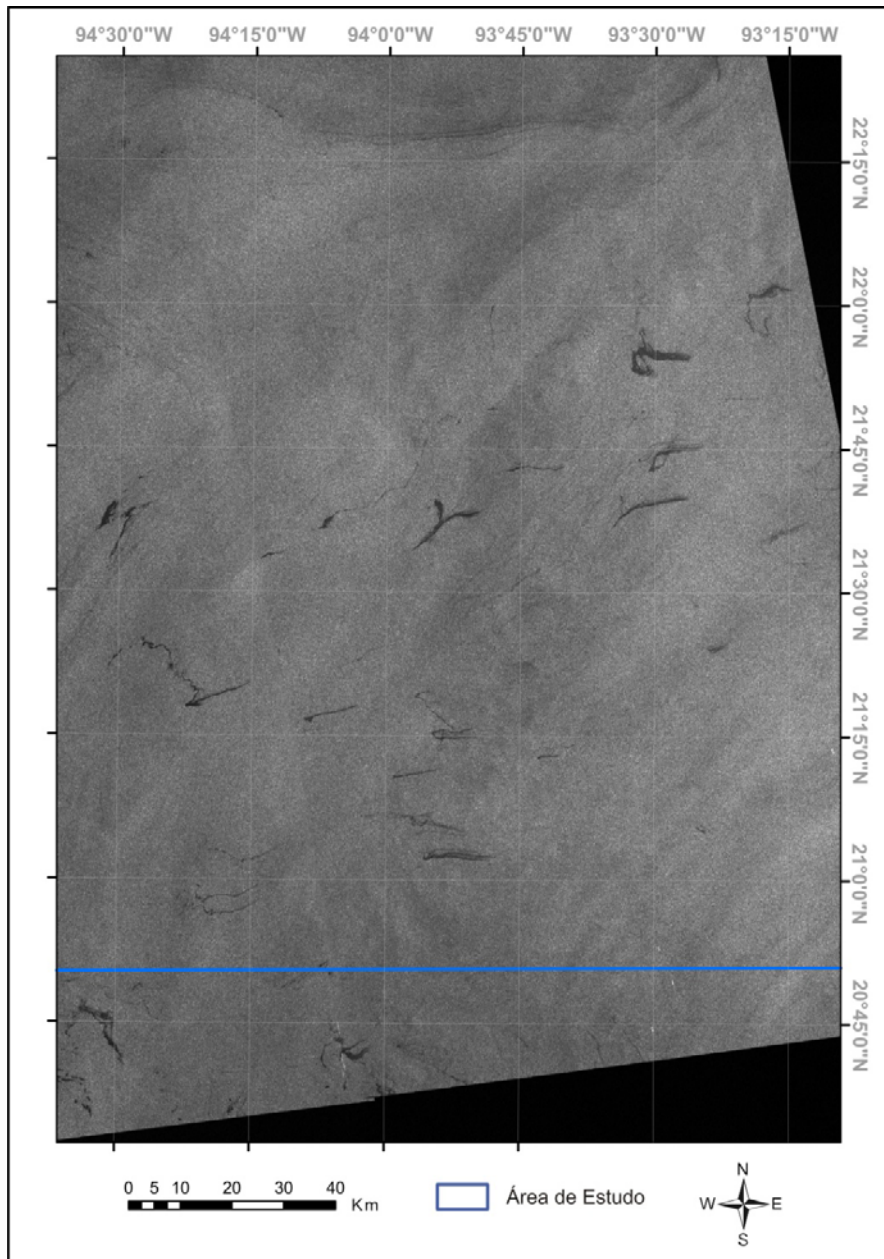


Figura 6.10 - Zoom da imagem RADARSAT-1 adquirida em 28/02/03 às 0:20:08 (UTC).

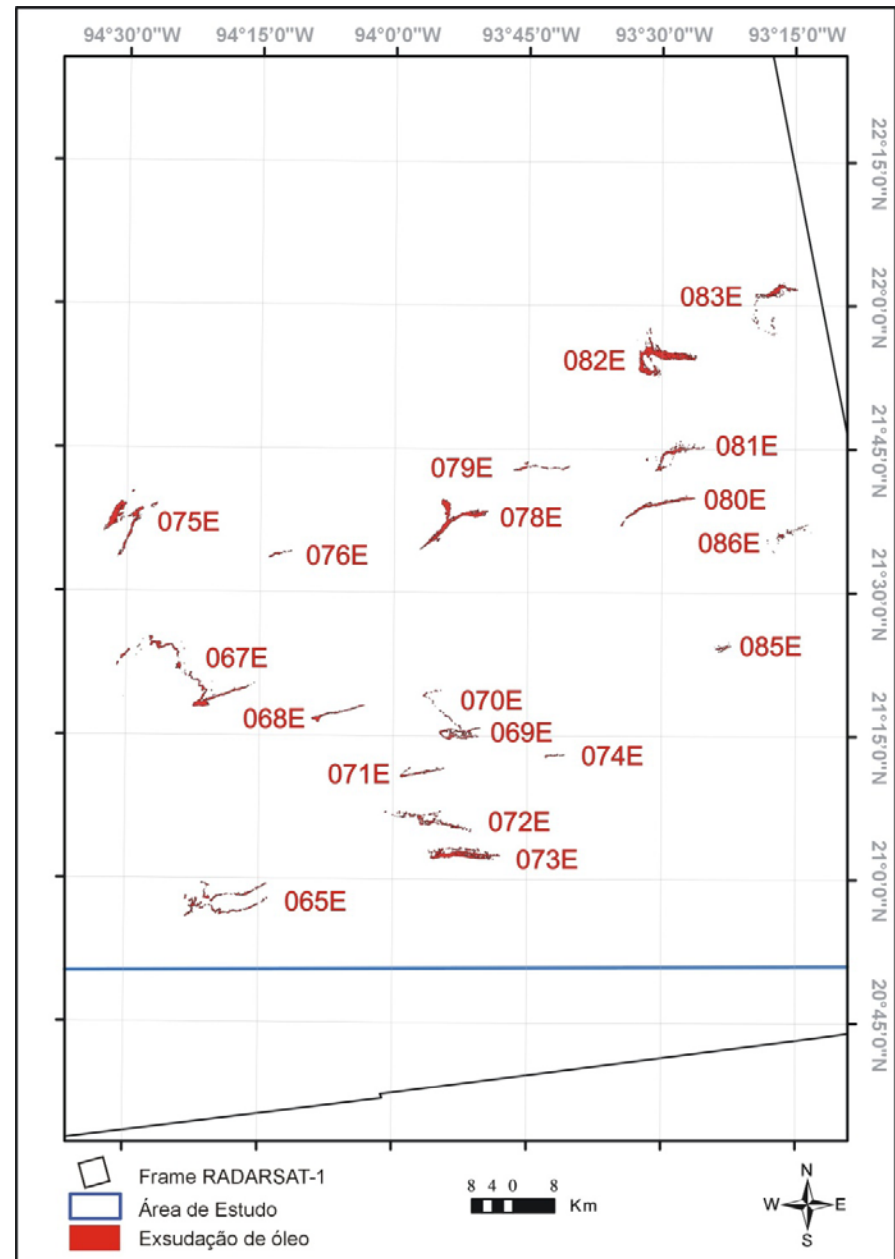


Figura 6.11 - Exsudações de óleo interpretadas na imagem RADARSAT-1 adquirida em 28/02/03 às 0:20:08 (UTC).

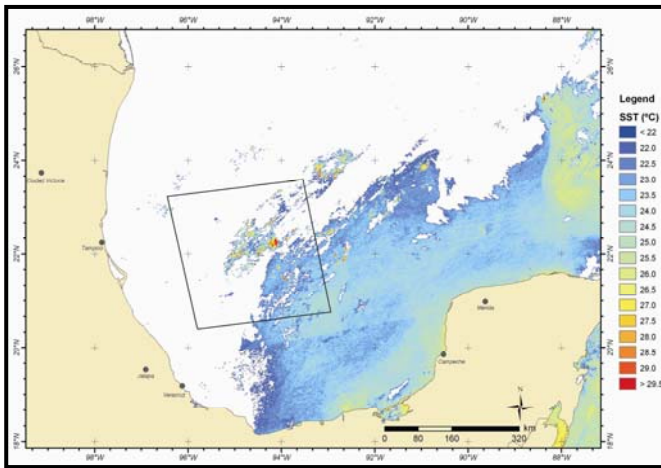


Figure 6.12 – Mapa de temperatura da superfície do mar adquirido em 28/02/2003 às 0:21 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1 (satélite NOAA-15).

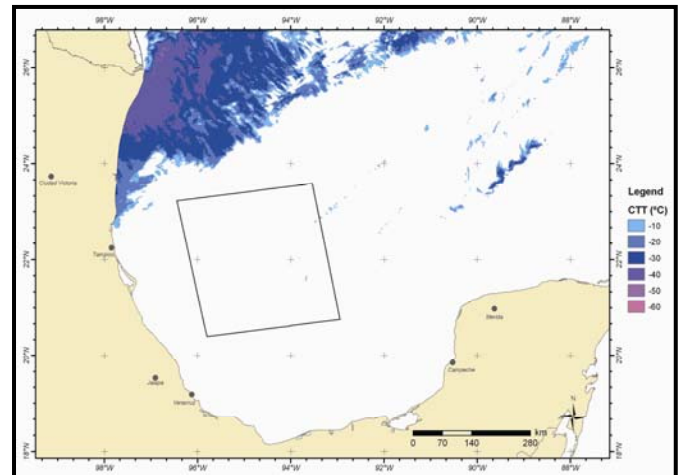


Figure 6.13 – Mapa da temperatura do topo de nuvens adquirido em 28/02/2003 às 0:21 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1 (satélite NOAA-15).

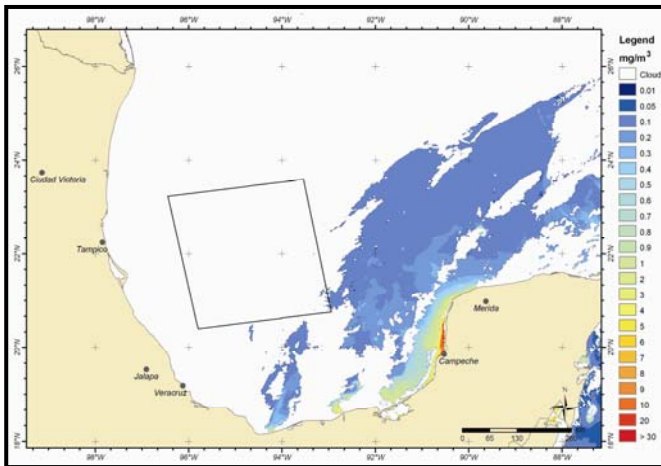


Figure 6.14 – Mapa da concentração de Clorofila tipo “A” (mg/m^3) adquirido em 27/02/2003 às 19:25 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1 (satélite MODIS).

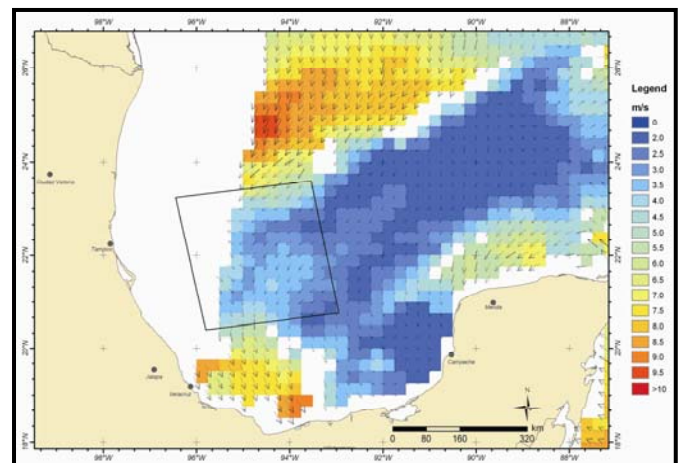


Figure 6.15 – Mapa do campo superficial de vento a partir do dado *along-track* do satélite QuikSCAT adquirido em 27/02/2003 às 23:54 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1.

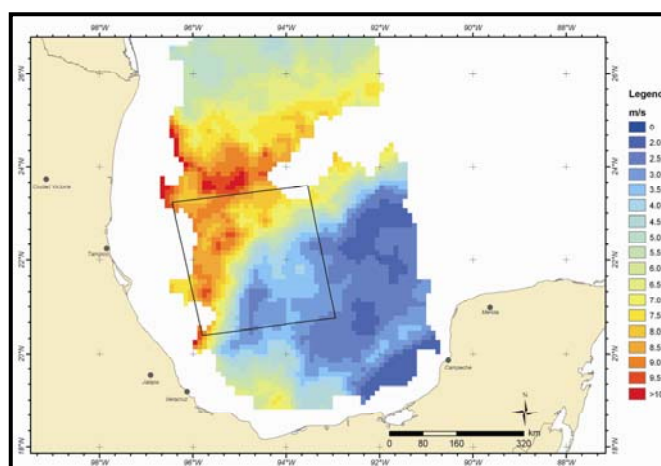


Figure 6.16 – Mapa do campo superficial de vento adquirido em 28/02/2003 às 0:42 (UTC), incluindo o frame RADARSAT-1 SCN1 (satélite DMSP F-13).

A Tabela 6.2 resume as condições ambientais medidas nos produtos oceanográficos e meteorológicos obtidos para a análise das imagens RADARSAT-1. Devido ao carácter multi-plataforma da metodologia, nem sempre os horários de aquisição dos dados ambientais estão próximos dos horários de aquisição do dado SAR. A coincidência destes horários é considerada ideal, pois a mesma refletirá o estado do mar no exato momento em que a imagem de radar for adquirida. Os valores mínimos e máximos dos dados ambientais foram extraídos somente nas regiões de intersecção com os frames RADARSAT-1.

Tabela 6.2 - Resumo das informações oceanográficas e meteorológicas auxiliares relacionadas aos horários de aquisição das imagens RADARSAT-1 utilizadas na interpretação de exsudações de óleo.

Data (dd/mm/aa)	Horário (hh:mm:ss)	Modo de operação	Órbita	TSM (mín.)	TSM (máx.)	TTN (mín.)	TTN (máx.)	Clor. A (mín.)	Clor. A (máx.)	Vento QuikSCAT (mín.)	Vento QuikSCAT (máx.)	Vento DMSP-SSM/I (mín.)	Vento DMSP-SSM/I (máx.)
04/02/03	0:19:27	SCN1	Ascendente	0	24.67	0	0	0	0.31	1.40	7.00	0.56	5.40
08/02/03	0:03:35	SCN1	Ascendente	0	23.73	-23.30	0	0	0.00	12.20	12.60	8.28	14.56
12/02/03	12:10:50	SCN1	Descendente	0	23.959	0	0	0	23.86	5.20	8.80	3.04	7.52
18/02/03	0:11:53	SCN1	Ascendente	0	30.10	-59.49	0	0	13.08	4.20	6.60	-9999	-9999
28/02/03	0:20:08	SCN1	Ascendente	0	30.94	-18.48	0	0	0.20	2.40	6.60	2.72	9.76
04/03/03	0:03:35	SCN1	Ascendente	0	30.632	0	0	0	0.66	1.20	6.00	1.2	5.2
08/03/03	12:10:50	SCN1	Descendente	0	24.86	0	0	0	0.47	-9999	-9999	0.08	3.96
14/03/03	0:11:53	SCN1	Ascendente	0	24.63	-39.90	0	0	0.65	2.80	8.40	2.60	5.72
15/03/03	12:05:36	SCN1	Descendente	0	30.68	-36.13	0	0	0.65	2.00	9.00	2.68	6.56
18/03/03	12:17:36	SCN1	Descendente	0	0	0	0	0	0.54	4.60	9.80	3.6	5.32
01/04/03	12:10:08	SCN1	Descendente	0	23.37	-34.40	0	0	1.10	3.80	8.20	4.44	9.36
25/04/03	12:10:08	SCN1	Descendente	0	28.70	0	0	0	0.46	1.80	8.40	1.52	6.04
01/05/03	0:11:52	SCN1	Ascendente	0	26.12	0	0	0	0.00	0.80	10.00	3.40	10.28
02/05/03	12:05:36	SCN1	Descendente	0	29.73	-20.06	0	0	0.14	2.40	6.20	2.68	6.04
19/05/03	12:10:08	SCN1	Descendente	0	26.73	0	0	0	0.28	3.40	9.80	3.60	9.32
25/05/03	0:11:11	SCN1	Ascendente	0	29.68	0	0	0	59.60	-9999	-9999	4.20	7.12
25/05/03	0:11:52	SCN1	Ascendente	0	26.50	0	0	0	0.41	-9999	-9999	4.00	6.72
04/06/03	0:19:26	SCN1	Ascendente	0	30.87	-63.01	0	0	0.33	2.20	4.40	-9999	-9999
18/06/03	0:11:52	SCN1	Ascendente	0	30.95	-59.03	0	0	0.60	5.80	9.40	4.00	13.24
28/06/03	0:20:08	SCN1	Ascendente	0	29.32	-41.85	0	0	0.19	-9999	-9999	4.68	8.20

Este trabalho considerou apenas as exsudações de óleo situadas completamente no interior da área de estudo (Figura 6.17). Foram interpretadas 247 (duzentas e quarenta e sete) exsudações a partir das 20 (vinte) imagens selecionadas. O sumário de atributos relevantes a cada exsudação está apresentado no Anexo III. Além dos números identificadores dos polígonos interpretados, data e horário de aquisição das imagens e, coordenadas de latitude Norte e longitude Oeste dos centros de gravidade dos polígonos, os atributos considerados foram: (i) área, (ii) perímetro, (iii) volume (PEP), (iv) volume (*Bonn Agreement*), (v) profundidade, (vi) eixo maior, (vii) eixo menor, (viii) razão (comprimento/largura), (ix) temperatura da superfície do mar, (x) temperatura de topo de nuvens, (xi) concentração de clorofila-A, (xii) campo superficial de intensidade do vento (QuikScat) e (xiii) campo superficial de intensidade do vento (SSM/I).

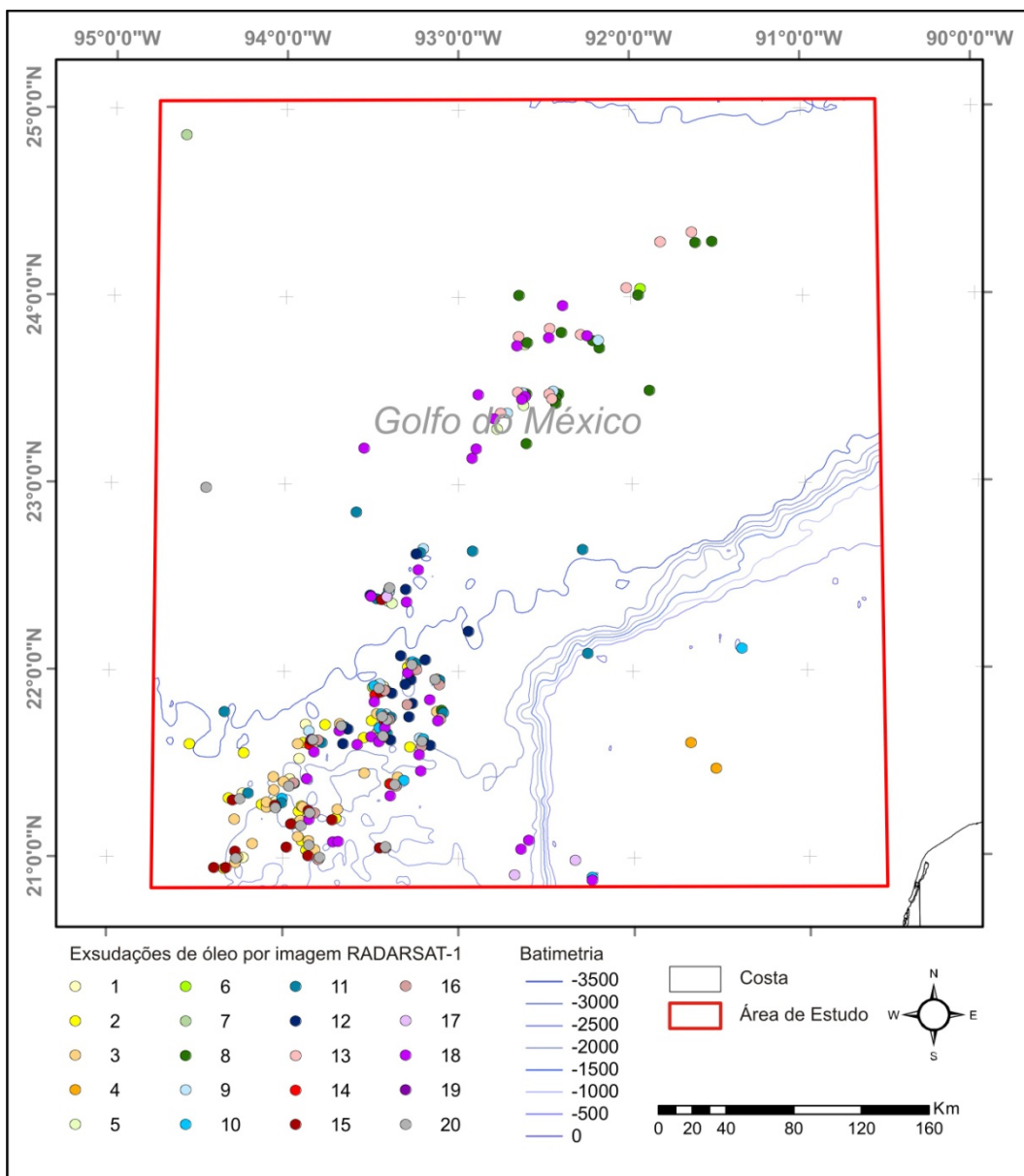


Figura 6.17 - Mapa de localização dos centróides das exsudações de óleo interpretadas a partir das imagens RADARSAT-1.

Como relatado em Miranda *et al.* (2004), o volume de óleo presente nas exsudações interpretadas a partir de dados SAR foi estimado através da escala de cores descrita em *Bonn Agreement*, (1999). No presente trabalho foi considerada apenas a classe denominada *silvery* que equivale a uma espessura de $0,02 \text{ m}^3/\text{km}^2$. Tal classe corresponde à espessura mínima da tabela e conseqüentemente refletirá nos mínimos volumes possíveis das exsudações interpretadas. Outras técnicas podem ser encontradas em Goodman e Fingas, 1988; Fingas *et al.*, 1999; Fingas e Brown, 2000 e Goodman, 1988. Este último autor realizou experimentos para a medição da espessura do óleo de exsudação de Cantarell, chegando a um fator de equivalência que relaciona $0,5 \text{ km}^2$ (área do polígono) a barril (158.99 litros).

As feições relacionadas à presença de óleo na superfície do mar estão sujeitas às propriedades físicas, geométricas e texturais observadas. Dentre as propriedades físicas, destacam-se os valores de retroespalhamento dos objetos e suas adjacências e análises de proximidade. As propriedades geométricas incluem as medições padrão de área, perímetro, comprimento do eixo maior, comprimento do eixo menor, além das razões tais qual a assimetria (excentricidade), índice de forma (*shape index*), dispersão, espalhamento, dentre outras. As propriedades ou descritores texturais consistem em cálculos estatísticos obtidos a partir da análise dos sub-objetos interpretados no dado SAR (Brekke e Solberg, 2005; Karathanassi *et al.*, 2006; Keramitsoglou *et al.*, 2006).

A análise pormenorizada dos atributos que melhor caracterizam as exsudações de uma região específica é fundamental para que se possa definir um padrão que caracterize a área de investigação, pois em sua grande maioria, as exsudações são, por natureza, consideradas fenômenos cíclicos. Dentre os inúmeros parâmetros ou atributos extraídos de exsudações de óleo a partir de imagens SAR (Espedal, 1998; Solberg *et al.*, 1999; Gade e Alpers, 1999; Brekke e Solberg, 2005; Karathanassi, *et al.*, 2006, Keramitsoglou *et al.*, 2006), utilizou-se neste estudo os atributos área medida em km^2 , perímetro em km, volume calculado em barris a partir de dois métodos distintos, comprimento dos eixos (maior e menor) e forma. Este último define-se pela razão entre os eixos (assimetria ou excentricidade).

Aproximadamente 33% das exsudações interpretadas apresentam áreas entre 1,0 e 5,0 km^2 , 29% apresentam áreas entre 10,0 e 20,0 km^2 e 17% dos polígonos apresentam áreas superiores a 20,0 km^2 . De acordo com os cálculos de volume utilizados pela PEMEX, feições oceânicas de superfície indicativas da presença de óleo que contenham 5 km^2 equivalem a volumes que podem variar desde 0,1 barris (*Bonn Agreement*) a 10,0 barris (Fator PEMEX). Outra característica que merece atenção é a profundidade em que as exsudações foram detectadas. Dentro de uma área de estudo que abriga como principais províncias geológicas a Plataforma de Yucatán e a Província Sigsbee Deep, 50% das exsudações se encontram em profundidades superiores a 3000 m e 45%, entre 2500 e 3000 m. A forma das exsudações pode ser caracterizada, dentre outras maneiras, pelas medidas de seus eixos e pela razão

entre os mesmos. O padrão de comportamento de forma das exsudações interpretadas na área de estudo apresenta os seguintes números: 40% das exsudações possuem eixos maiores entre 6,0 e 13,0 km e 39%, superiores a 20 km. A razão entre eixos demonstra que 79% dos polígonos são considerados alongados, pois apresentam razões superiores a quatro. A Figura 6.18 ilustra o comportamento estatístico dos atributos mais relevantes extraídos das exsudações de óleo interpretadas.

Segundo Clarke e Cleverly, (1991), estimativas da taxa fluxo de exsudações de óleo podem variar de 6 a 120.000 barris ao ano, e valor mediano de 300 barris ao ano. Estes valores são considerados significativos à medida que um número restrito de jazimentos de petróleo possui reservas suficientes para sustentar tal atividade ao longo do tempo geológico, mesmo com valores baixos de densidade de exsudações por unidade de área.

O monitoramento da exsudação de Cantarell e regiões adjacentes compreendem uma base de dados de 8 anos com uma média de uma imagem RADARSAT-1, RADARSAT-2 ou ENVISAT por semana (60 imagens ao ano). Baseando-se nos dados supracitados e nas técnicas atualmente utilizadas na região, a exsudação de Cantarell é potencialmente responsável por uma taxa de fluxo anual mínima de 175 barris (espessura equivalente à coloração *silvery* de $0.02 \text{ m}^3/\text{km}^2$, *Bonn Agreement*, 1999) ou 2783 BARRIS (Fator PEMEX onde 0.5 km^2 equivalem a 1 barril, Quintero-Mármol *et al.*, 2004 e Goodman *et al.*, 2005).

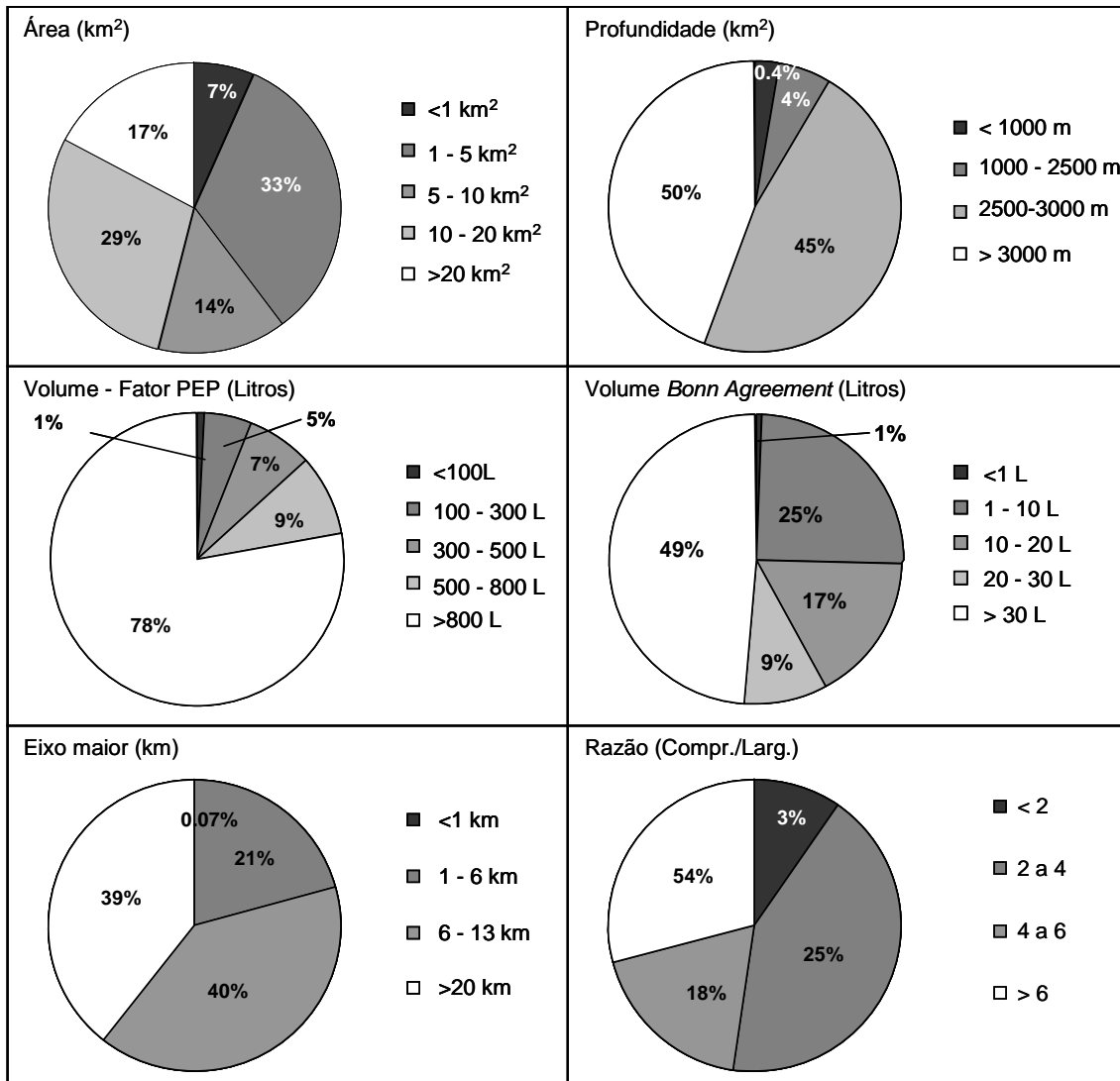


Figura 6.18 - Estatística dos atributos área, profundidade, volume (Fator PEP), volume (*Bonn Agreement*), eixo maior e razão (comprimento/largura) das exsudações interpretadas nas imagens RADARSAT-1.

6.2 Análise exploratória dos dados

A célula de um *grid*, popularmente conhecida como *pixel* consiste na entidade espacial fundamental em um sistema de informações geográficas baseado em dados no formato *raster*. O que torna a estrutura *raster* especialmente atrativa é que a grande maioria das características técnicas do dado é controlada por uma única medida que é a resolução do *grid*, normalmente expressa na resolução nominal do terreno em metros. Apesar da existência dos inúmeros artigos científicos sobre o efeito da resolução em *grids* na precisão de modelos espaciais de dados, a definição das dimensões da célula de um *grid* raramente se baseia na variabilidade espacial do dado. No pacote de programas ARCGIS/ESRI, por exemplo, a resolução *default* da célula do *grid* em arquivos de saída é calculada automaticamente pelo sistema, sendo a menor distância da área de estudo dividida por uma constante (ESRI, 2002). Neste trabalho, utilizamos uma resolução intermediária que respeita a escala de trabalho, precisão de posicionamento, tamanho dos objetos e complexidade do fenômeno (Hengl, 2006).

As exsudações interpretadas na imagem RADARSAT-1 adquirida em 01/05/2003 foram utilizadas no processo de determinação da célula de resolução dos *grids* para os processos de análise espacial pretendidos para este trabalho. Levando em consideração a resolução nominal do modo operacional de imageamento “*Scansar Narrow 1*” de 50 x 50 metros (0.0025 km²) e os valores médios do atributo área, medidos para as exsudações interpretadas, foram realizados ensaios com células de resolução para *grids* hipotéticos de 50, 100, 250 e 500 metros, respectivamente (Tabela 6.3). A partir daí, concluiu-se que a resolução de 250 metros apresentou as melhores características para se otimizar o processamento dos dados sem interferir na qualidade da informação.

Tabela 6.3 - Análise quantitativa da área de polígonos interpretados na imagem RADARSAT-1 de 01/05/2003 para definição da célula de resolução dos dados *raster*.

Dado	Resolução (m)	Área (km ²)	Perímetro (km)
Imagem 01/05/2003	Original	191.7032	912.4040
	50	194.2350	861.3000
	100	193.9300	841.0000
	250	195.6875	717.5000
	500	193.7500	586.0000
Polígono 364E	Original	24.6655	151.9095
	50	25.2425	141.2000
	100	25.2800	138.0000
	250	24.8750	110.0000
	500	23.5000	86.0000
Polígono 362E	Original	24.1080	123.7079
	50	24.7550	110.2000
	100	24.7200	109.0000
	250	24.4375	90.0000
	500	23.7500	76.0000

Os polígonos referentes às exsudações de óleo interpretadas a partir das imagens RADARSAT-1 apresentam características topológicas individuais e atributos diversos, conforme ilustrado no Anexo III. Estes polígonos foram então carregados em um sistema de informações geográficas para que os métodos de análise espacial propostos pudessem ser realizados. Posteriormente, realizou-se a extração dos centróides¹ dos polígonos para a utilização em modelos de cálculo de feições ou parâmetros que serviram como arquivo de entrada na determinação do ranking das exsudações de óleo.

Conforme ilustrado nas Figuras 6.19 e 6.20, a área de estudo foi compartimentada em quatro quadrantes de dimensões aproximadas de 49.000 km², denominadas “*Tiles*”, a fim de possibilitar a apresentação de resultados em escalas mais adequadas. Especialmente neste capítulo e no capítulo seguinte, onde serão apresentados os resultados, a utilização dos *tiles* será importante para a melhor visualização das exsudações posicionadas nas primeiras posições do *ranking*.

Os sistemas *fuzzy* possuem grande habilidade na caracterização da informação vaga, expressa essencialmente por dados ou conhecimento com altos índices de variabilidade e incerteza e características lingüísticas. A base de conhecimento é explorada através de regras baseadas nas condições “*IF-THEN-ELSE*” e operadores do tipo “*AND*”, “*OR*” e “*NOT*”. As são

¹ O centróide, o centro de gravidade e o centro de massa podem, sob certas circunstâncias, coincidir entre si. O centróide é um conceito puramente geométrico enquanto que os outros dois se relacionam com as propriedades físicas de um corpo. O centróide de um objeto *x* em um espaço *n*-dimensional consiste na intersecção de todos os hiperplanos que dividem *x* em duas partes de momento equivalente. O centróide de objetos convexos obrigatoriamente estará no interior do objeto, enquanto que para objetos côncavos o centróide poderá estar localizado fora do mesmo.

desenvolvidas baseando-se no conhecimento das variáveis e nos objetivos do problema ao qual se propõem como resolução.

Em linhas gerais, os sistemas *fuzzy* são normalmente divididos em quatro etapas, sendo estas (i) a fuzzyficação dos dados, (ii) aplicação das bases de regras nos dados *fuzzy*, (iii) inferência de resultados *fuzzy* e, (iv) de fuzzyficação dos resultados *fuzzy*. A fuzzyficação é o processo que transforma o dado observado (real) para a forma *fuzzy* [0,1] através de funções de pertinência previamente definidas objetivando a caracterização qualitativa do aspecto vago da variável; a base de regras estabelece a relação entre as funções de pertinência e a forma dos resultados obtidos a partir das funções.

A seguir, pretende-se desenvolver as etapas iniciais de um sistema *fuzzy* para os dados multiplataforma considerados neste trabalho. Serão selecionadas e apresentadas as informações definidas para os procedimentos de fuzzyficação nos contextos geológicos, temporais e ambientais a fim de parametrizar as escalas de medição dos dados para graus de pertinência.

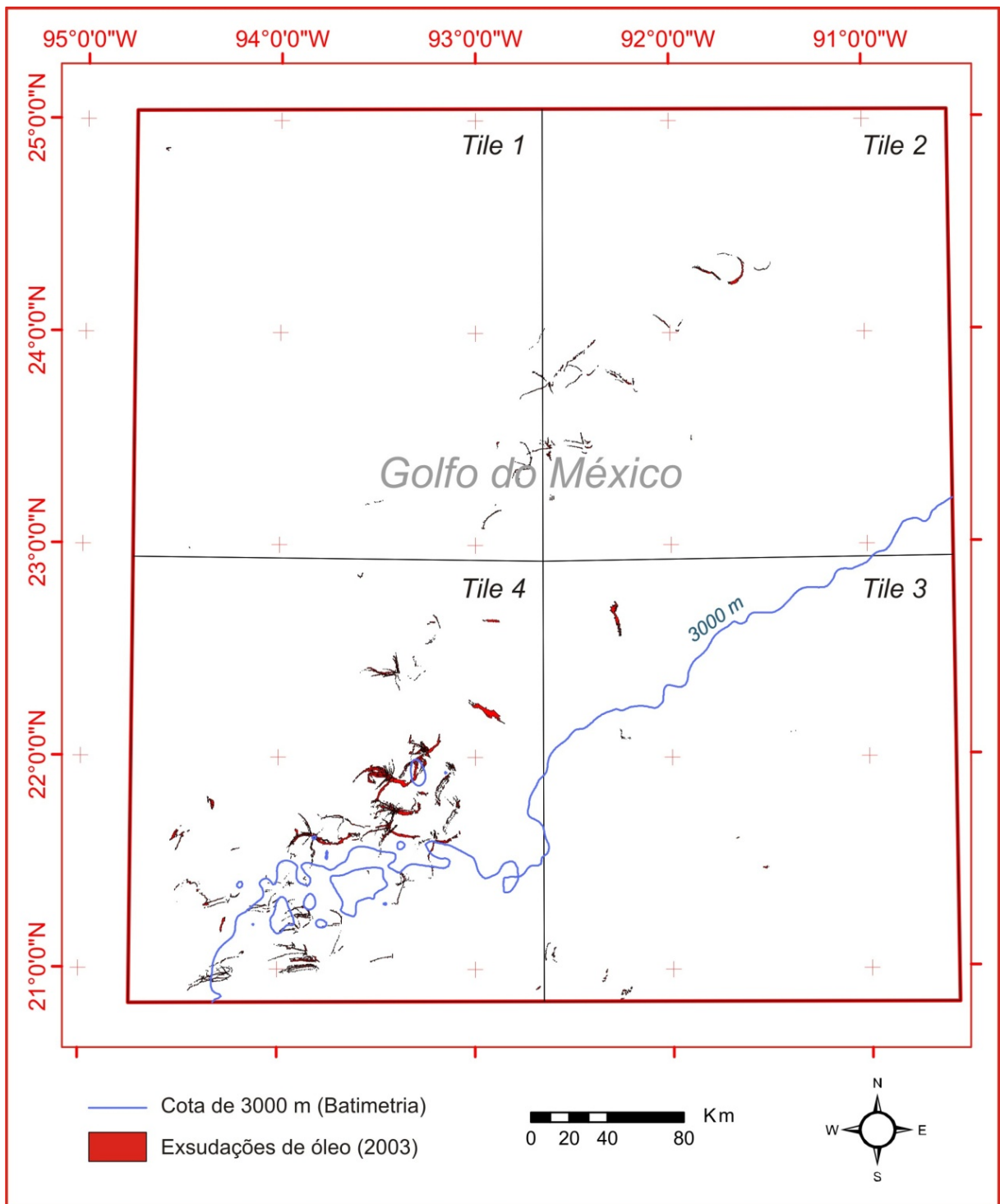


Figura 6.19 - Mapa das 247 exsudações de óleo interpretadas na área de estudo e compartimentação proposta.

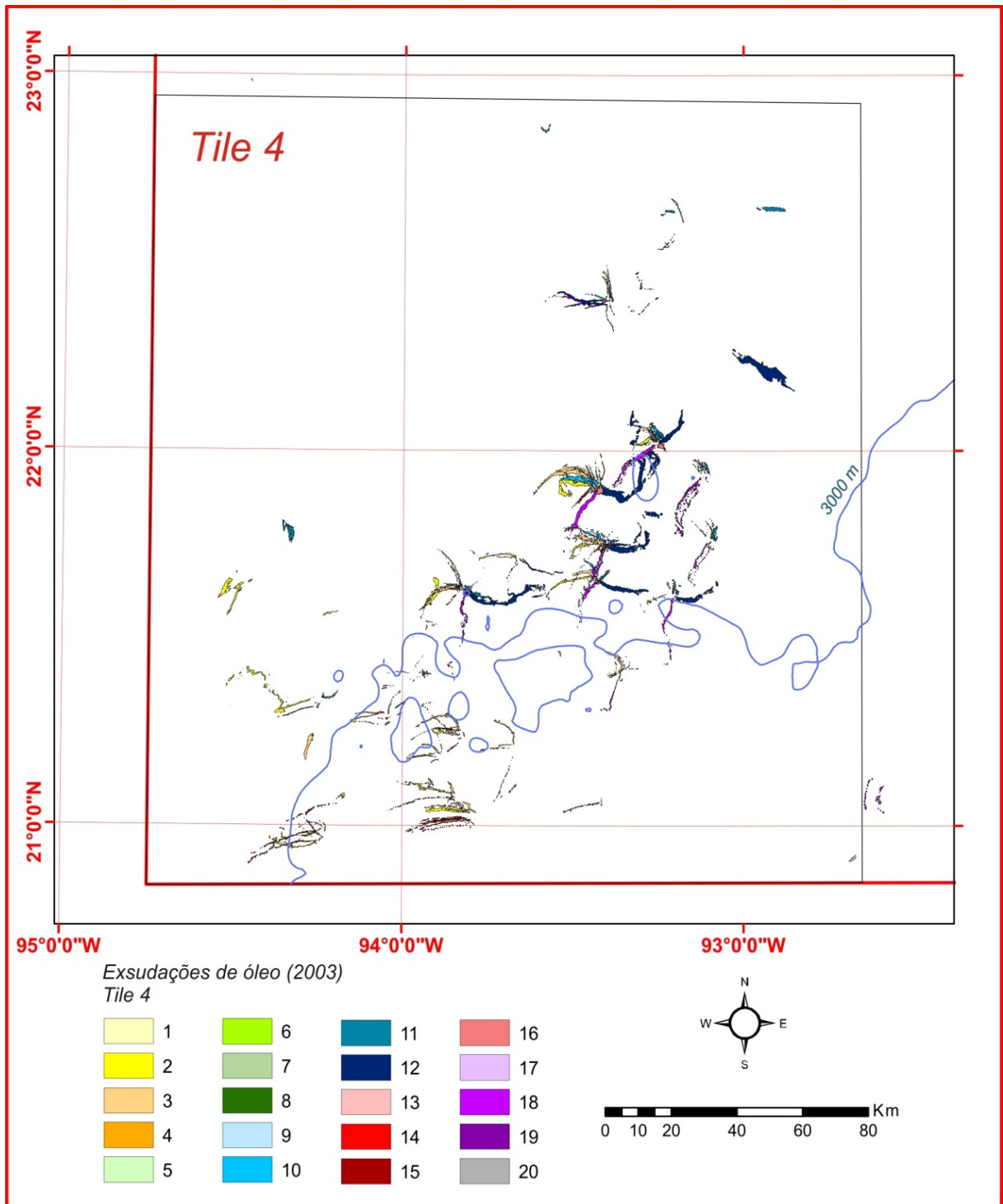


Figura 6.20 - Mapa das exsudações de óleo interpretadas para o "Tile 4" (quadrante sudoeste da área de estudo).

6.3 Cenários *fuzzy*

Este capítulo apresenta os produtos finais obtidos a partir da combinação entre as informações multidisciplinares que compõe a contextualização geológica, temporal e ambiental da área de estudo. Os resultados obtidos se destinam a processos de tomada de decisão em projetos exploratórios que demandem (i) planejamento de campanhas de geoquímica de superfície através da amostragem de sedimentos do assoalho oceânico (*piston core*) e exsudações na superfície do mar; (ii) planejamento de campanhas sísmicas e; realização de modelos reversos da trajetória do óleo na coluna d' água.

Os resultados finais estão dispostos sob a forma de ranking de exsudações construída a partir de diferentes combinações realizadas entre as informações disponíveis. As informações contidas nas famílias denominadas (i) contextualização geológica, (ii) contextualização temporal e, (iii) contextualização ambiental foram combinadas individualmente através de operadores de agregação, sendo que posteriormente, realizou-se a integração entre as famílias por intermédio de operadores algébricos.

Conforme ilustrado na Figura 6.19, a geração de *tiles* para a área de estudo irá favorecer a visualização dos dados pontuais hierarquizados, já que a mesma possui dimensões consideráveis (~196.000 km²). Além disso, as exsudações ranqueadas serão distribuídas em 10 classes com intervalos equivalentes variando de [0,1] para fins de visualização. Esta etapa avaliará os graus de pertinência obtidos a partir da fuzzyficação dos diferentes planos de informação utilizados para a análise quantitativa e qualitativa das 247 exsudações de óleo interpretadas nos dados RADARSAT-1.

Neste trabalho foram gerados quatro resultados finais de exsudações de óleo em ambiente marinho ("*marine seepage slick ranking*") a partir dos dados multidisciplinares e multiplataforma analisados. Para efeito didático, os resultados foram denominados "Cenários", sendo que os mesmos serão posteriormente analisados e discutidos a fim de se caracterizar a robustez de cada método utilizado.

O método semi-automático de análise ora proposto tende a reduzir o caráter subjetivo inerente à interpretação das exsudações e gerar resultados precisos e úteis para o exploracionista que almeja determinar áreas com potencial diferenciado para investigações pormenorizadas em regiões sinópticas de fronteira exploratória.

Os planos de informação ou evidências ilustrados no capítulo 5 foram integrados a partir de uma combinação conjunta entre técnicas que envolvem a ponderação de índices e métodos de lógica *fuzzy*. A combinação entre os graus de pertinência das evidências consideradas utilizou os operadores *fuzzy* “AND” e “algebraic product” (An *et al.* 1991).

Os domínios tectônicos descritos por Guzmán e Marquez-Domingues (2001) e respectivos fatores de ponderação estabelecidos para se caracterizar os domínios mais prováveis à ocorrência de exsudações de óleo através de critérios geológicos e estruturais (Miranda *et al.* 2001) foram utilizados como um dos planos de informação para a análise da contextualização geológica como parte do processo de ranking das exsudações (ver Figura 5.2 e Tabela 5.1). Os domínios tectônicos foram submetidos a processos de fuzzificação para se determinar sua importância para a ocorrência de exsudações de óleo. A fuzzificação dos contatos permitiu a redução da incerteza existente entre os contatos abruptos, favorecendo a classificação das exsudações a partir dos graus de pertinência aos domínios em questão. A figura 6.22 ilustra o resultado final obtido a partir da fuzzificação e normalização dos domínios tectônicos analisados.

Os cenários propostos empregaram combinações de evidências distintas para a obtenção do ranking de exsudações de óleo, sendo que a não utilização da totalidade de evidências foi considerada. A seguir são apresentados individualmente os cenários propostos seguidos dos mapas com o *ranking* das exsudações de óleo melhor posicionadas, além das planilhas e atributos utilizados (Figura 6.21).

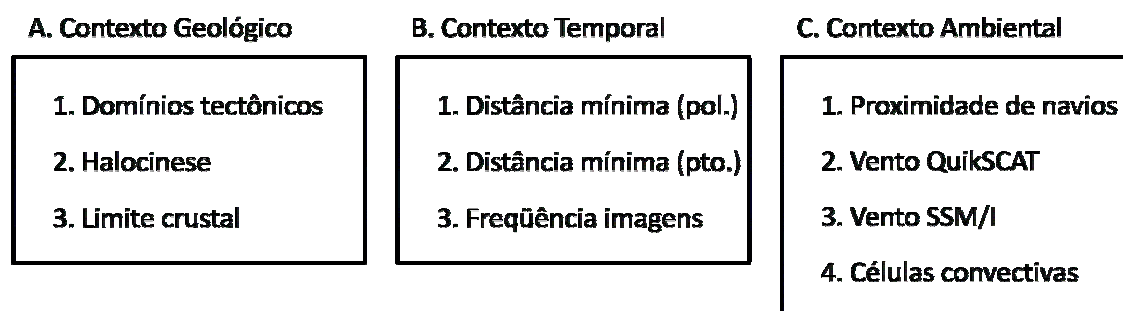


Figura 6.21 – Desenho esquemático dos planos de informação utilizados na composição das contextualizações geológicas, temporais e ambientais utilizadas no cálculo do ranking de exsudações.

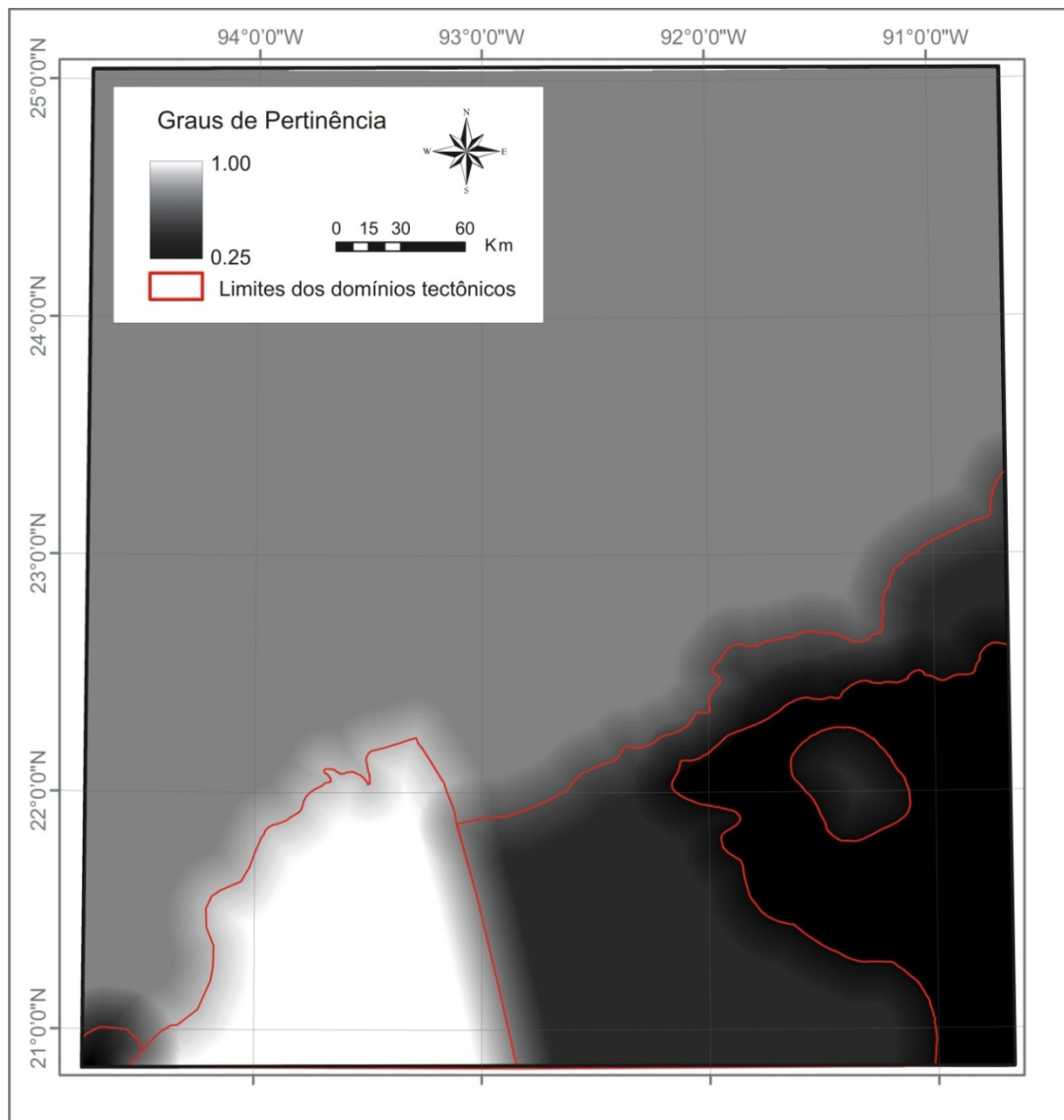


Figura 6.22 – Mapa de domínios tectônicos *fuzzy* da porção de águas ultra-profundas do Golfo do México.

O ranking de exsudações de óleo foi calculado para quatro cenários distintos. Cada cenário foi subdividido em dois produtos finais, ou seja, o Cenário I equivale ao cenário propriamente dito conforme especificado abaixo e o Cenário IA ao Cenário I com a normalização por frequência de imageamento, e assim por diante. As dez primeiras posições do ranking para os oito resultados gerados estão evidenciadas nas cores do ranking #1 ao ranking #10 conforme a escala de cores abaixo (Tabela 6.4)

Tabela 6.4 – Escala de cores das dez (10) primeiras posições do *ranking* de exsudações de óleo.

RANKING #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
COR										

6.3.1 Cenário I

O cenário I consiste basicamente na fuzzyficação e automatização do método de hierarquização de exsudações descrito no capítulo 3.3.3 para o cálculo do ranking ($R_{\text{CENÁRIO I}}$). Os planos de informação utilizados estão destacados em verde na Figura 6.23.

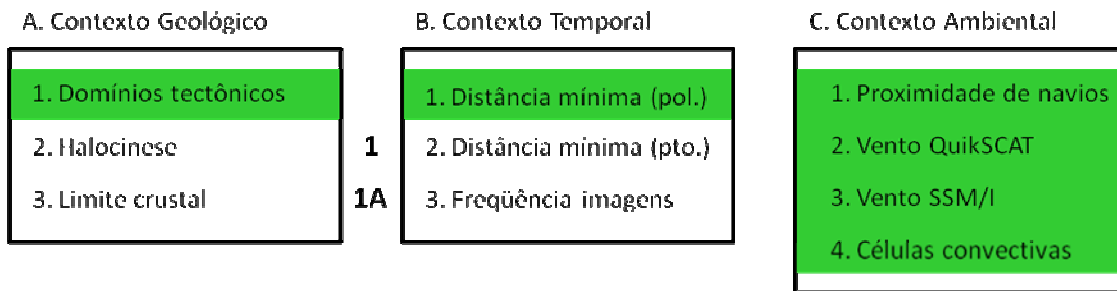


Figura 6.23 – Plano de informações (evidências), destacados em verde, utilizados na composição do cenário I.

Neste cenário, o contexto geológico utilizou apenas os domínios tectônicos. Eles foram ponderados e fuzzyficados e os seus limites ou contatos migraram de abruptos para transicionais, sendo que sua zona de transição entre os domínios foi definida para 40 km (Figura 5.3). O contexto temporal utilizou o grau de pertinência obtido pela distância mínima entre exsudações de óleo interpretadas em imagens RADARSAT-1 adquiridas em datas distintas e o contexto ambiental o mínimo entre os graus de pertinência obtidos individualmente para (1) proximidade de navios, (2) vento QuikSCAT, (3) vento SSM/I e (4) Células convectivas. Os resultados finais do cenário I estão apresentados na Tabela 6.5, Figuras 6.24 e 6.25, conforme equação abaixo:

$$R_{\text{Cenário I}} = \mu_{\text{(Tectônico)}} * \mu_{\text{(Temporal)}} * \text{MIN} \mu_{\text{(Ambiental)}}$$

onde:

$\mu_{\text{(Tectônico)}}$ equivale aos quatro domínios tectônicos ponderados e fuzzyficados, com contatos transicionais;

$\mu_{\text{(Temporal)}}$ equivale ao grau de pertinência atribuído às distâncias mínimas entre polígonos interpretados em imagens RADARSAT-1 de datas distintas;

$\text{MIN} \mu_{\text{(Ambiental)}}$ equivale ao mínimo entre os graus de pertinência obtidos a partir das informações pertencentes à contextualização ambiental.

A Tabela 6.5 apresenta as quarenta (40) exsudações de óleo melhor posicionadas no ranking de exsudações do Cenário I, sendo que apenas as exsudações que ocupam a primeira posição no ranking possuem o código identificador (ID SEEP) destacado em negrito.

A Figura 6.24 apresenta a totalidade das exsudações de óleo ranqueadas segundo o método descrito no Cenário I. Nota-se que como os valores do ranking são contínuos dentro do intervalo [0,1], decidiu-se classificar o ranking em dez classes com intervalos equivalentes de 0 a 1 para efeito de visualização. A Figura 6.25 ilustra as exsudações sob a forma de polígono mapeadas no *tile 4*.

O Cenário I apresentou 24 exsudações de óleo com ranking #1 (590E, 586E, 585E, 575E, 574E, 573E, 529E, 481E, 480E, 479E, 475E, 474E, 468E, 364E, 297E, 296E, 184E, 183E, 181E, 081E, 080E, 079E, 071E e 069E); 7 exsudações com ranking #2 (587E, 584E, 578E, 484E, 482E, 415E e 411E); 4 exsudações com ranking #3 (569E, 528E, 456E e 299E); 1 exsudação com ranking #4 (070E); 1 exsudação com ranking #5 (576E); 1 exsudação com ranking #6 (591E); 1 exsudação com ranking #7 (412E) e; 1 exsudação com ranking #8 (476E).

A contextualização temporal do Cenário I foi corrigida pela frequência de cobertura das imagens RADARSAT-1, conforme descrito no capítulo 5.3.2. Criou-se então o Cenário IA que age no intuito de aumentar a discretização entre as exsudações, valorizando as mesmas que são cobertas por poucas imagens e desvalorizando exsudações localizadas em regiões com alta frequência de imageamento RADARSAT-1. A Tabela 6.6 ilustra as dez exsudações melhor posicionadas no ranking do Cenário IA que apresentou 2 exsudações de óleo com ranking #1 (071E e 069E); 1 exsudação com ranking #2 (482E); 1 exsudação com ranking #3 (577E); 1 exsudação com ranking #4 (576E) e 23 exsudações com ranking #5 (590E, 586E, 585E, 575E, 574E, 573E, 529E, 481E, 480E, 479E, 475E, 474E, 468E, 364E, 297E, 296E, 184E, 183E, 181E, 081E, 080E, 079E e 070E).

Tabela 6.5 - Seleção das quarenta (40) exsudações melhores posicionadas no ranking do Cenário I.

RANKING #	ID SEEP	DATA	CONTEXTO GEOLÓGICO	CONTEXTO TEMPORAL	CONTEXTO AMBIENTAL	RANKING CENÁRIO I
1	590E	4-Jun-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	586E	4-Jun-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	585E	4-Jun-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	575E	4-Jun-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	574E	4-Jun-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	573E	4-Jun-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	529E	25-May-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	481E	19-May-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	480E	19-May-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	479E	19-May-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	475E	19-May-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	474E	19-May-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	468E	28-Jun-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	364E	1-May-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	297E	1-Apr-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	296E	1-Apr-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	184E	18-Feb-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	183E	18-Feb-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	181E	18-Feb-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	081E	28-Feb-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	080E	28-Feb-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	079E	28-Feb-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	071E	28-Feb-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
1	069E	28-Feb-03	1.000	1.000	1.000	1.0000
2	587E	4-Jun-03	1.000	0.995	1.000	0.9950
2	584E	4-Jun-03	1.000	0.995	1.000	0.9950
2	578E	4-Jun-03	1.000	0.995	1.000	0.9950
2	484E	19-May-03	1.000	0.995	1.000	0.9950
2	482E	19-May-03	1.000	0.995	1.000	0.9950
2	415E	18-Jun-03	1.000	0.995	1.000	0.9950
2	411E	18-Jun-03	1.000	0.995	1.000	0.9950
3	569E	12-Feb-03	0.994	1.000	1.000	0.9938
3	528E	25-May-03	0.994	1.000	1.000	0.9938
3	456E	28-Jun-03	0.994	1.000	1.000	0.9938
3	299E	1-Apr-03	0.994	1.000	1.000	0.9938
4	070E	28-Feb-03	1.000	0.993	1.000	0.9929
5	576E	4-Jun-03	1.000	0.989	1.000	0.9888
6	591E	4-Jun-03	1.000	0.985	1.000	0.9850
7	412E	18-Jun-03	0.988	0.995	1.000	0.9826
8	476E	19-May-03	1.000	0.982	1.000	0.9820

Tabela 6.6 - Seleção das dez (10) exsudações melhores posicionadas no *ranking* do Cenário IA.

RANKING #	ID SEEP	DATA	CONTEXTO GEOLÓGICO	CONTEXTO TEMPORAL	CONTEXTO AMBIENTAL	RANKING CENÁRIO IA
1	071E	28-Feb-03	1.000	0.957	1.000	0.957
1	069E	28-Feb-03	1.000	0.957	1.000	0.957
2	482E	19-May-03	1.000	0.953	1.000	0.953
3	577E	4-Jun-03	1.000	0.934	1.000	0.934
4	576E	4-Jun-03	1.000	0.929	1.000	0.929
5	590E	4-Jun-03	1.000	0.927	1.000	0.927
5	586E	4-Jun-03	1.000	0.927	1.000	0.927
5	585E	4-Jun-03	1.000	0.927	1.000	0.927
5	575E	4-Jun-03	1.000	0.927	1.000	0.927
5	574E	4-Jun-03	1.000	0.927	1.000	0.927

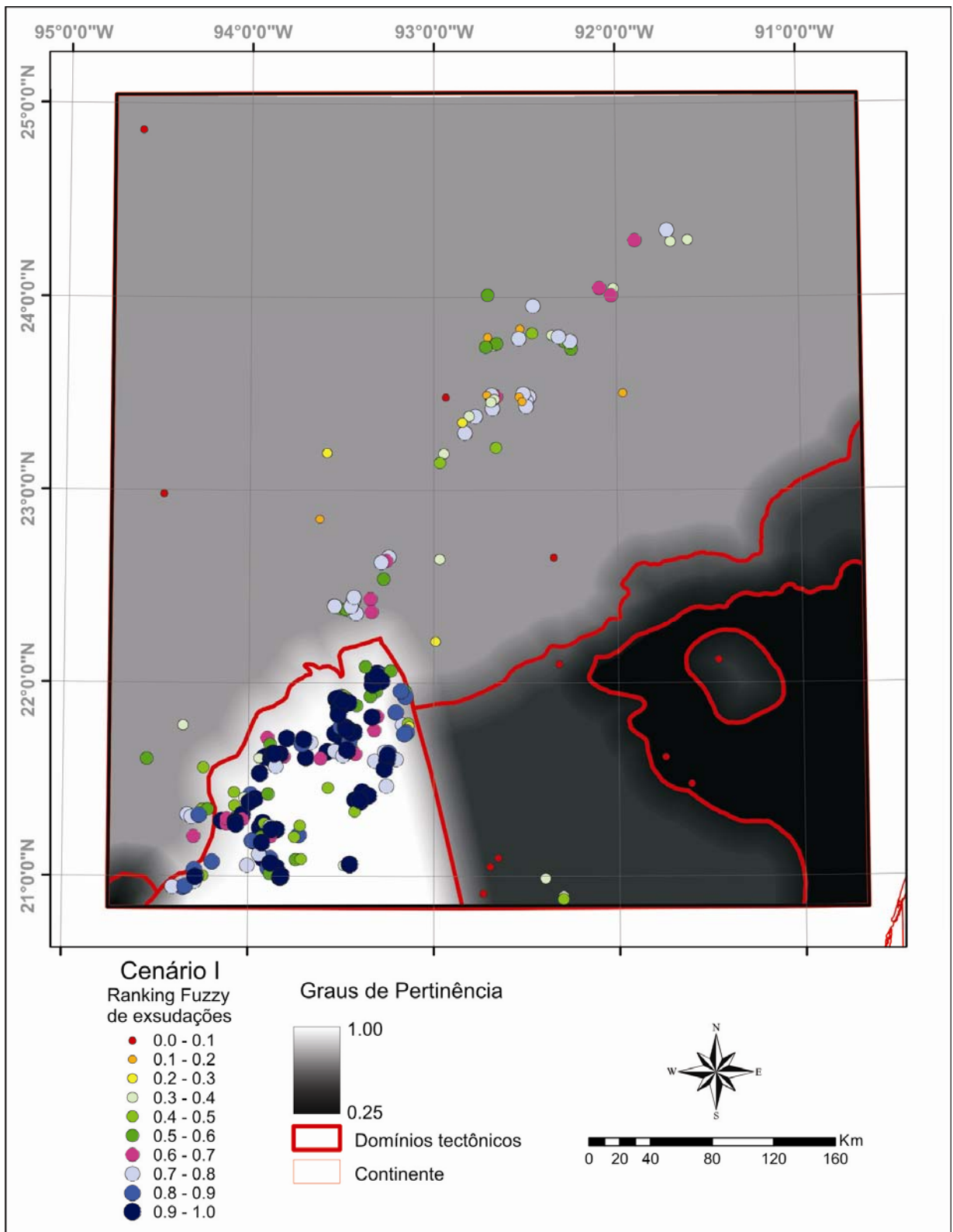


Figura 6.24 – *Ranking* das exudações (centróides) obtido a partir do Cenário I sobreposto ao mapa *fuzzy* da contextualização geológica.

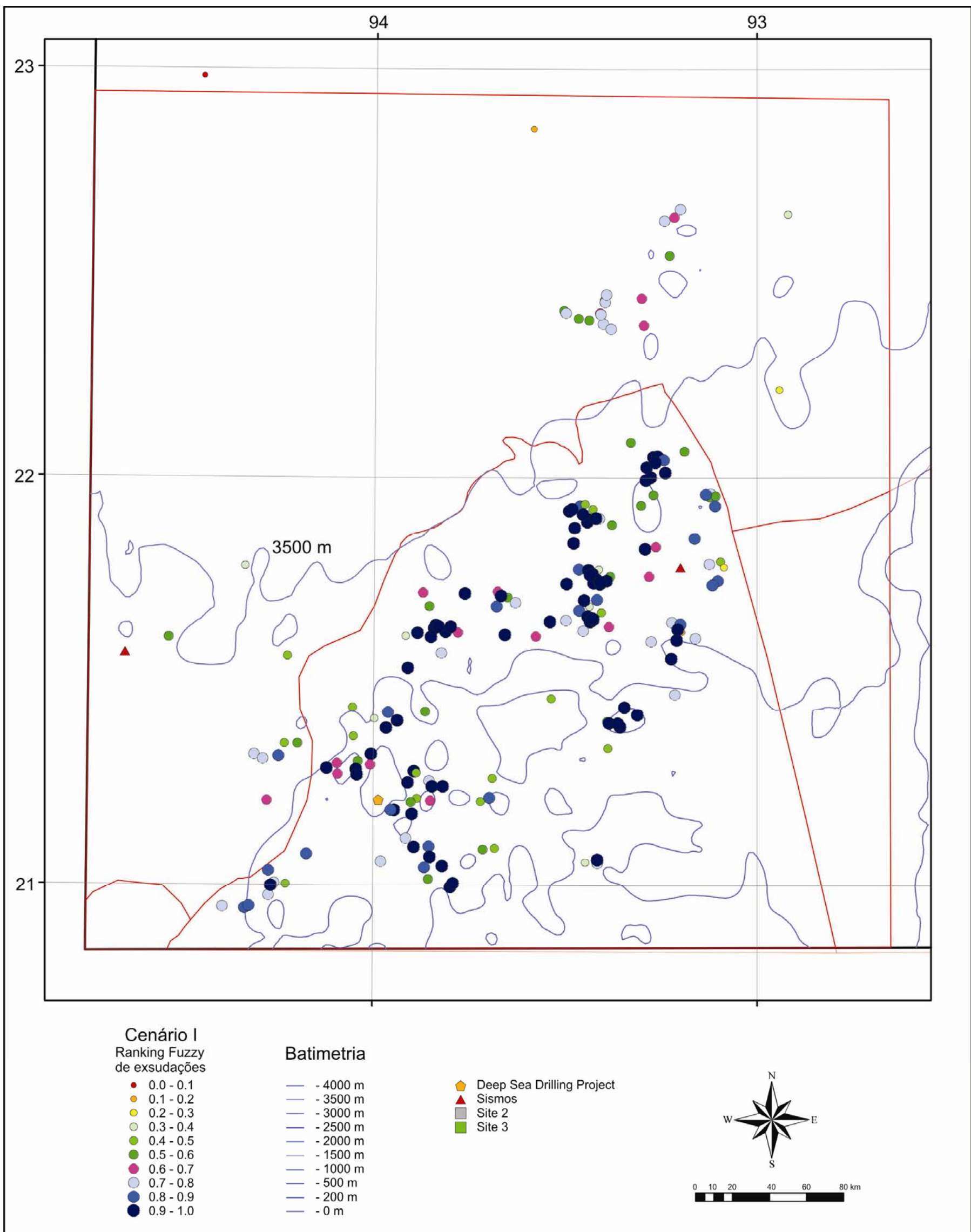


Figura 6.25 – Ranking das exsudações (centróides) obtido a partir do Cenário I, localizadas no *tile* 4 da área de estudo.

6.3.2 Cenário II

O cenário I utilizou o operador fuzzy “AND” para o cálculo do ranking ($R_{\text{CENÁRIO II}}$) a partir dos planos de informação selecionados em verde na Figura 6.26.

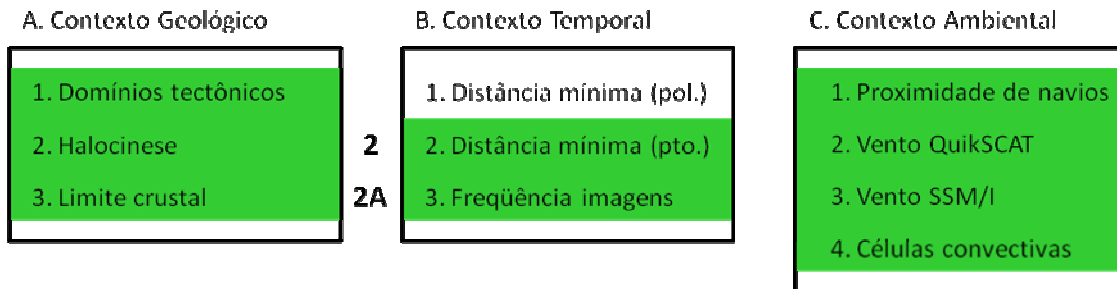


Figura 6.26 – Plano de informações (evidências), destacados em verde, utilizados na composição do cenário II.

Neste cenário, o contexto geológico utilizou os domínios tectônicos ponderados, o mapa de densidade de domos e *knolls* (halocinese) e o limite crustal. O contexto temporal utilizou a análise de vizinhança e o contexto ambiental o mínimo entre os graus de pertinência obtidos individualmente para: (1) proximidade de navios; (2) vento QuikSCAT; (3) vento SSM/I e; (4) Células convectivas. Os resultados finais do Cenário II estão apresentados na Tabela 6.7, Figuras 6.28 e 6.29, conforme equação abaixo:

$$R_{\text{Cenário II}} = \text{MIN}(\text{MIN}\mu_{(\text{Geológico})}; \mu_{(\text{Análise de Vizinhança})}; \text{MIN}\mu_{(\text{Ambiental})})$$

onde:

$\text{MIN}\mu_{(\text{Geológico})}$ equivale ao grau de pertinência mínimo obtido entre os quatro domínios tectônicos ponderados e fuzzyficados, os domos e knolls de sal e o limite crustal (Figura 6.27);

$\mu_{(\text{Temporal})}$ equivale ao grau de pertinência obtido a partir da análise de vizinhança entre as exsudações;

$\text{MIN}\mu_{(\text{Ambiental})}$ equivale ao mínimo entre os graus de pertinência obtidos a partir das informações pertencentes à contextualização ambiental.

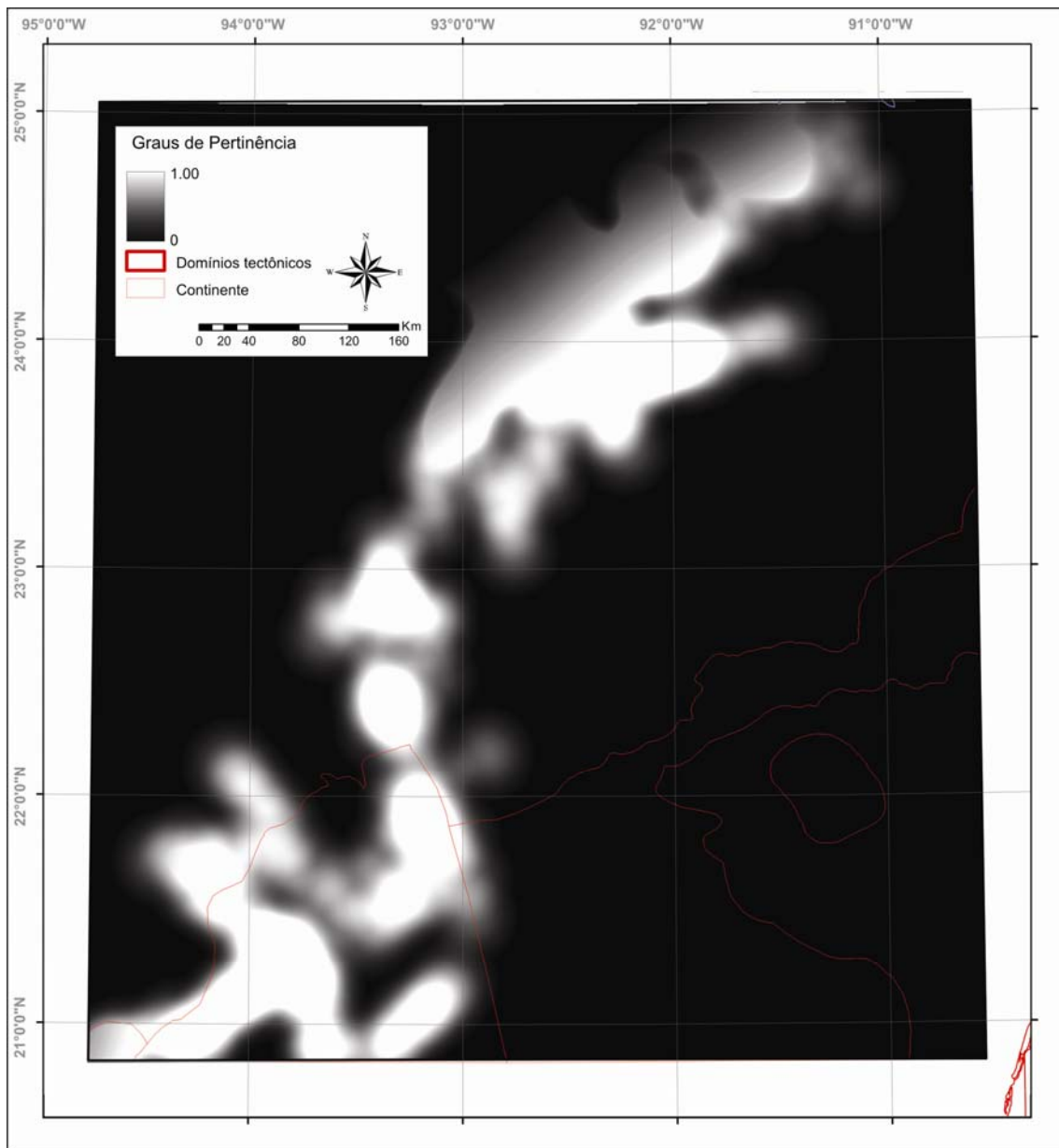


Figura 6.27 – Mapa *fuzzy* representativo do mínimo entre os domínios tectônicos ponderados, a densidade de domos e *knolls* e o limite crustal.

A Tabela 6.7 apresenta as quarenta (40) exsudações de óleo melhor posicionadas no ranking de exsudações do Cenário II, sendo que apenas as exsudações que ocupam a primeira posição no ranking possuem o código identificador (ID SEEP) destacado em **negrito**.

Tabela 6.7 - Seleção das quarenta (40) exsudações melhores posicionadas no ranking do Cenário II.

RANKING #	SEEP ID	DATA	CONTEXTO GEOLÓGICO	CONTEXTO TEMPORAL	CONTEXTO AMBIENTAL	RANKING CENÁRIO II
1	483E	19-May-03	0.625	0.92	1.00	0.625
2	578E	4-Jun-03	0.610	0.97	1.00	0.610
2	517E	25-May-03	0.610	0.89	0.64	0.610
3	458E	28-Jun-03	0.605	0.90	0.72	0.605
4	074E	28-Feb-03	0.598	0.95	0.86	0.598
5	577E	4-Jun-03	0.595	0.92	1.00	0.595
6	159E	8-Mar-03	0.590	0.90	0.60	0.590
7	070E	28-Feb-03	0.580	0.90	1.00	0.580
8	069E	28-Feb-03	0.575	0.90	1.00	0.575
9	071E	28-Feb-03	0.570	0.87	1.00	0.570
10	459E	28-Jun-03	0.565	0.92	0.80	0.565
11	329E	25-Apr-03	0.540	0.96	0.60	0.540
12	482E	19-May-03	0.535	0.90	1.00	0.535
13	548E	25-May-03	0.533	0.74	1.00	0.533
14	351E	1-May-03	0.525	0.85	0.93	0.525
15	189E	18-Feb-03	0.524	0.90	1.00	0.524
16	582E	4-Jun-03	0.517	0.98	1.00	0.517
17	524E	25-May-03	0.516	0.84	1.00	0.516
18	272E	14-Mar-03	0.503	0.93	1.00	0.503
19	161E	8-Mar-03	0.552	0.89	0.50	0.500
20	188E	18-Feb-03	0.495	0.95	1.00	0.495
21	177E	8-Mar-03	0.494	0.97	0.60	0.494
22	291E	1-Apr-03	0.488	0.99	0.84	0.488
22	490E	19-May-03	0.488	0.95	1.00	0.488
23	545E	25-May-03	0.486	0.92	0.64	0.486
24	572E	4-Jun-03	0.485	0.89	1.00	0.485
25	035E	4-Feb-03	0.595	0.93	0.48	0.480
26	032E	4-Feb-03	0.477	0.93	0.86	0.477
27	589E	4-Jun-03	0.474	0.96	1.00	0.474
28	294E	1-Apr-03	0.465	0.98	0.66	0.465
29	477E	19-May-03	0.461	0.94	1.00	0.461
30	158E	8-Mar-03	0.460	0.93	0.80	0.460
30	160E	8-Mar-03	0.585	0.93	0.46	0.460
31	196E	15-Mar-03	0.455	0.57	0.87	0.455
32	472E	19-May-03	0.452	0.98	1.00	0.452
33	173E	8-Mar-03	0.449	0.98	0.93	0.449
34	546E	25-May-03	0.447	0.94	0.60	0.447
35	152E	8-Mar-03	0.445	0.92	0.96	0.445
36	460E	28-Jun-03	0.643	0.80	0.44	0.440
37	151E	8-Mar-03	0.440	0.94	0.87	0.440

A Figura 6.28 apresenta a totalidade das exsudações de óleo ranqueadas segundo o método descrito no Cenário II. Nota-se que como os valores do ranking são contínuos dentro do intervalo [0,1], decidiu-se classificar o ranking em dez classes com intervalos equivalentes de 0 a 1 para efeito de visualização. A Figura 6.29 ilustra as exsudações sob a forma de polígono mapeadas no *tile 4*.

O Cenário II apresentou 1 exsudação de óleo com ranking #1 (483E); 2 exsudações com ranking #2 (578E e 517E); 1 exsudação com ranking #3 (458E); 1 exsudação com ranking #4 (074E); 1 exsudação com ranking #5 (577E); 1 exsudação com ranking #6 (159E); 1 exsudação com ranking #7 (070E); 1 exsudação com ranking #8 (069E) e; 1 exsudação com ranking #9 (071E).

Conforme explicado no Cenário I, a criação do Cenário IIA está apresentada a seguir na Tabela 6.8 que ilustra as dez exsudações melhor posicionadas no ranking do Cenário IIA. Este último apresentou resultados idênticos aos obtidos no Cenário II.

Tabela 6.8 - Seleção das dez (10) exsudações melhores posicionadas no *ranking* do Cenário IIA.

RANKING #	SEEP ID	DATA	CONTEXTO GEOLÓGICO	CONTEXTO TEMPORAL	CONTEXTO AMBIENTAL	RANKING CENÁRIO II
1	483E	19-May-03	0.625	0.87	1.00	0.625
2	578E	4-Jun-03	0.610	0.91	1.00	0.610
2	517E	25-May-03	0.610	0.84	0.64	0.610
3	458E	28-Jun-03	0.605	0.85	0.72	0.605
4	074E	28-Feb-03	0.598	0.90	0.86	0.598
5	577E	4-Jun-03	0.595	0.91	1.00	0.595
6	159E	8-Mar-03	0.590	0.89	0.60	0.590
7	070E	28-Feb-03	0.580	0.86	1.00	0.580
8	069E	28-Feb-03	0.575	0.89	1.00	0.575
9	071E	28-Feb-03	0.570	0.86	1.00	0.570

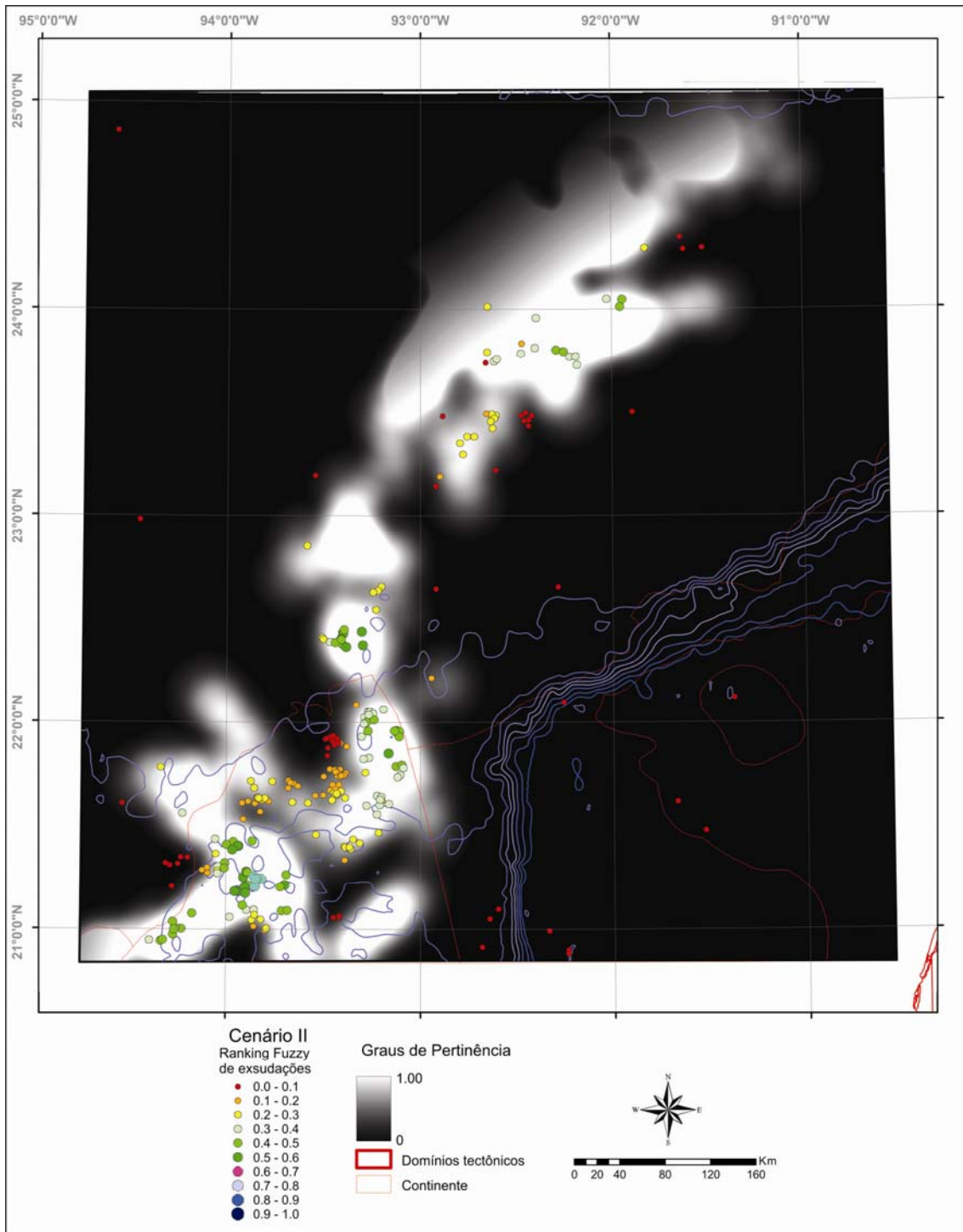


Figura 6.28 - *Ranking* das exsudações (centróides) obtido a partir do Cenário II sobreposto ao mapa *fuzzy* da contextualização geológica (Mínimo entre domínios tectônicos ponderados, densidade de domos e *knolls* e limite crustal).

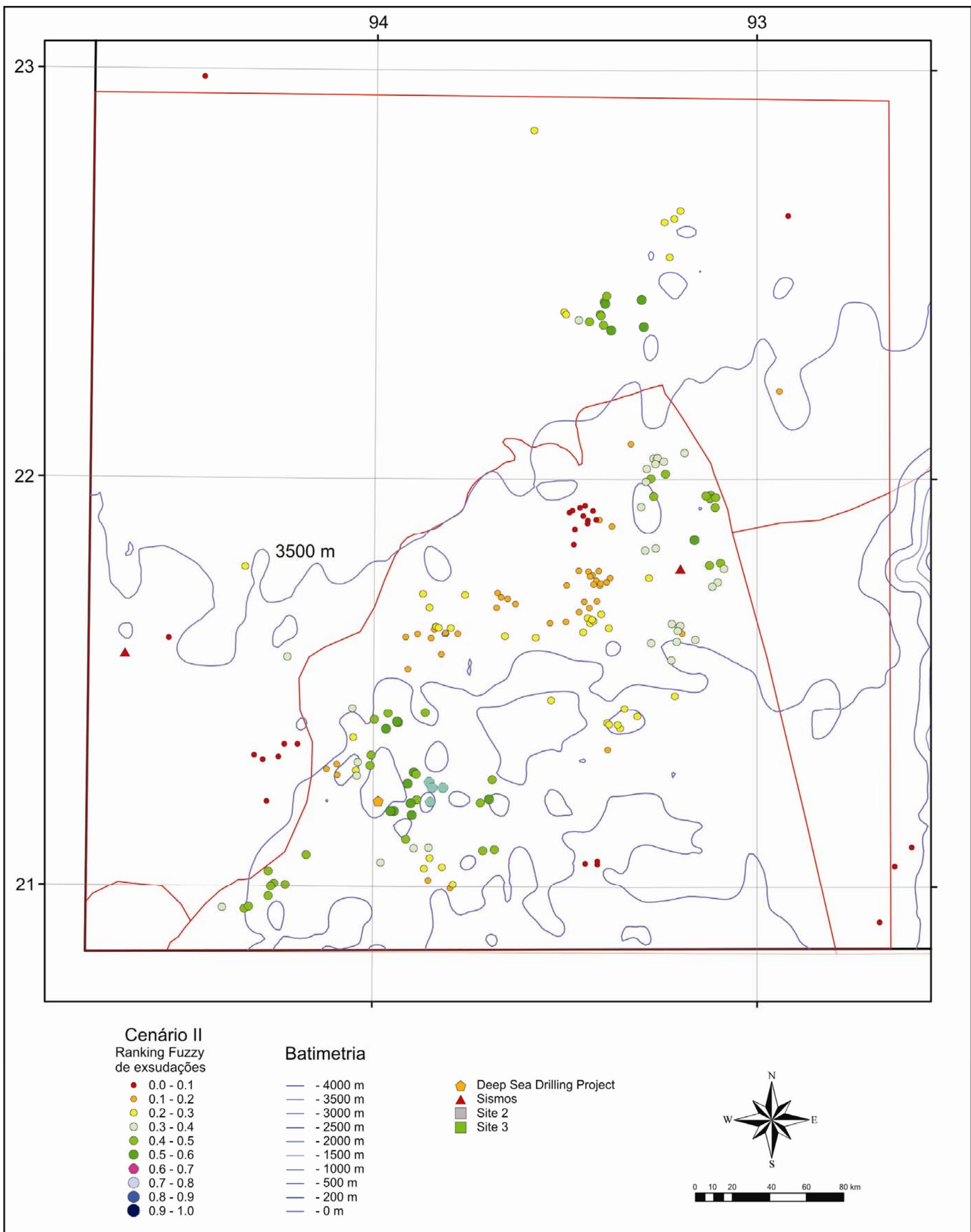


Figura 6.29 - Ranking das exsudações (centróides) obtido a partir do Cenário II, localizadas no tile 4 da área de estudo.

6.3.3 Cenário III

O cenário III utilizou a média ponderada e o operador fuzzy “produto algébrico” (Algebraic Product) para o cálculo do ranking ($R_{\text{CENÁRIO III}}$) a partir dos planos de informação selecionados em verde na Figura 6.30.

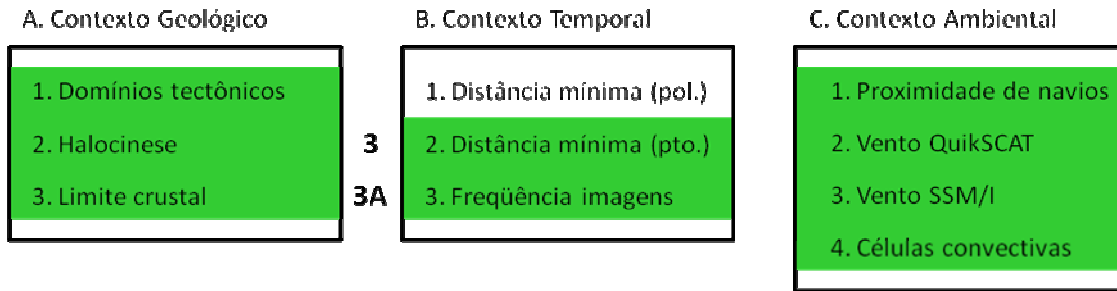


Figura 6.30 – Plano de informações (evidências), destacados em verde, utilizados na composição do cenário III.

Neste cenário, foram atribuídos pesos aos planos de informação baseando-se principalmente na importância individual de cada evidência para a ocorrência de exsudações de óleo em ambiente marinho. Com resultados práticos similares ao método AHP (*Analytical Hierarchy Process*) proposto por Saaty e Vargas (1991), julgou-se de forma empírica que o plano de informação (1) “domínios tectônicos” é menos importante que o plano de informação (2) “domos e *knolls* (halocinese)”, e estes últimos (1) e (2) são mais importantes que o plano de informação (3) “limite crustal”. Foram então atribuídos os valores de intensidade de importância 9, 5 e 3 para os planos (1), (2) e (3) respectivamente. O mapa final fuzzy do contexto geológico está ilustrado na Figura 6.31.

O contexto temporal utilizou a análise de vizinhança e o contexto ambiental o mínimo entre os graus de pertinência obtidos individualmente para: (1) proximidade de navios; (2) vento QuikSCAT; (3) vento SSM/I e; (4) Células convectivas. Os resultados finais do Cenário III estão apresentados na Tabela 6.9, Figuras 6.32 e 6.33, conforme equação abaixo:

$$\mu_{\text{GEOLOGICO}} = (\mu_{\text{Tectônico}})0.294 \cdot (\mu_{\text{Sal}})0.529 \cdot (\mu_{\text{Limite Crustal}})0.176$$

$$R_{\text{Cenário III}} = \mu_{\text{(Geológico)}} \cdot \mu_{\text{(Análise de Vizinhança)}} \cdot \text{MIN} \mu_{\text{(Ambiental)}}$$

onde:

$\mu_{(\text{Geológico})}$ equivale ao produto algébrico entre os planos de informação pertencentes ao contexto geológico ponderados. (Figura 6.31);

$\mu_{(\text{Temporal})}$ equivale ao grau de pertinência obtido a partir da análise de vizinhança entre as exsudações;

$\text{MIN}\mu_{(\text{Ambiental})}$ equivale ao mínimo entre os graus de pertinência obtidos a partir das informações pertencentes à contextualização ambiental.

A Tabela 6.9 apresenta as quarenta (40) exsudações de óleo melhor posicionadas no ranking de exsudações do Cenário III, sendo que apenas as exsudações que ocupam a primeira posição no ranking possuem o código identificador (ID SEEP) destacado em negrito.

A Figura 6.32 apresenta a totalidade das exsudações de óleo ranqueadas segundo o método descrito no Cenário III. Nota-se que como os valores do ranking são contínuos dentro do intervalo [0,1], decidiu-se classificar o ranking em dez classes com intervalos equivalentes de 0 a 1 para efeito de visualização. A Figura 6.33 ilustra as exsudações sob a forma de polígono mapeadas no *tile 4*.

O Cenário III apresentou 1 exsudação de óleo com ranking #1 (578E); 1 exsudação com ranking #2 (483E); 1 exsudação com ranking #3 (070E); 1 exsudação com ranking #4 (069E); 1 exsudação com ranking #5 (074E); 1 exsudação com ranking #6 (577E); 1 exsudação com ranking #7 (472E); 1 exsudação com ranking #8 (524E); 1 exsudação com ranking #9 (589E) e; 1 exsudação com ranking #10 (458E).

Conforme explicado no Cenário I, a criação do Cenário IIIA está apresentada a seguir na Tabela 6.10 que ilustra as dez exsudações melhor posicionadas no ranking do Cenário IIIA, que apresentou 1 exsudação de óleo com ranking #1 (578E); 1 exsudação com ranking #2 (483E); 1 exsudação com ranking #3 (070E); 1 exsudação com ranking #4 (069E); 1 exsudação com ranking #5 (577E); 1 exsudação com ranking #6 (074E); 1 exsudação com ranking #7 (524E); 1 exsudação com ranking #8 (472E); 1 exsudação com ranking #9 (589E) e; 1 exsudação com ranking #10 (458E).

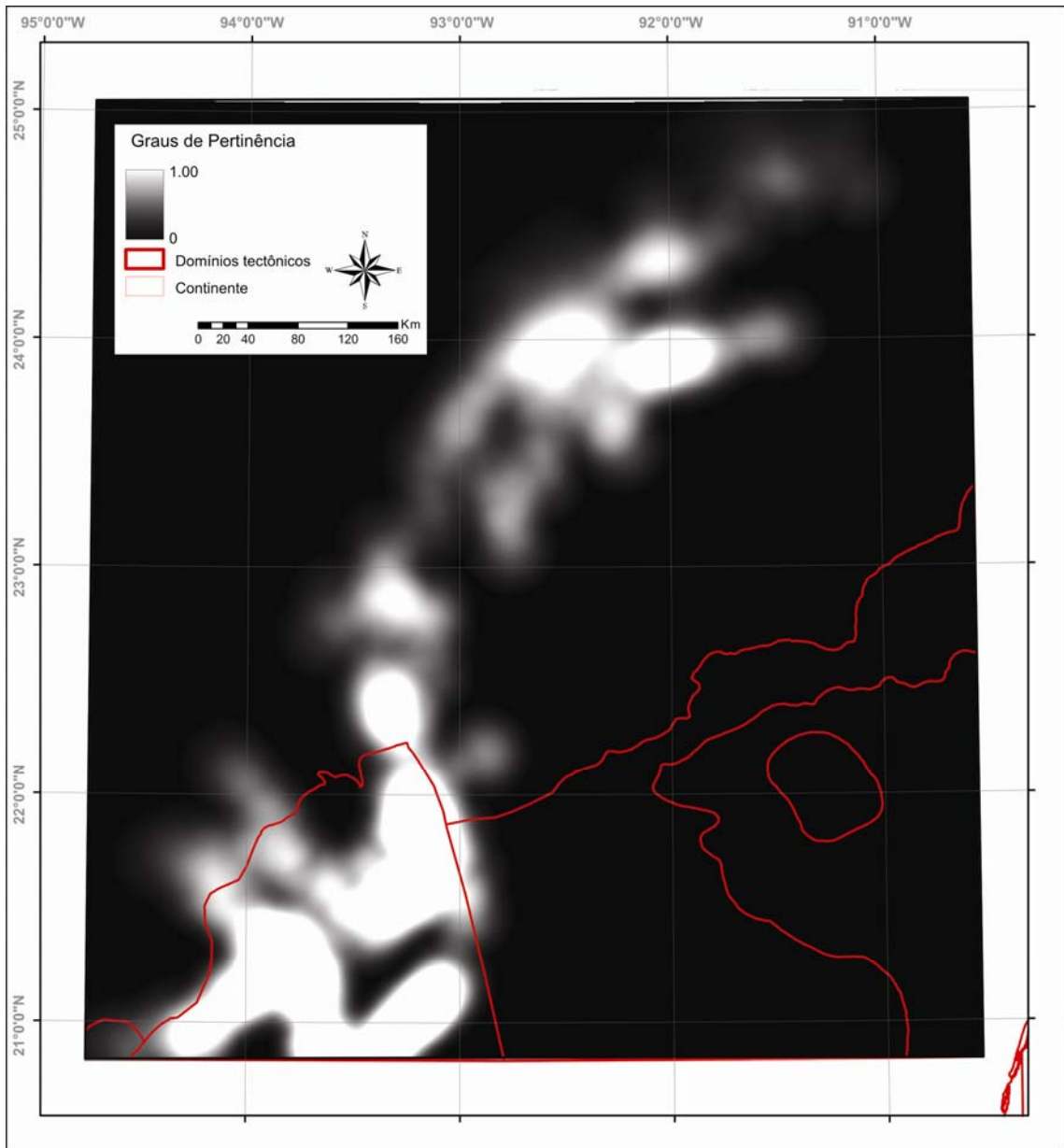


Figura 6.31 – Mapa *fuzzy* representativo do produto algébrico entre os domínios tectônicos ponderados, a densidade de domos e *knolls* e o limite crustal.

Tabela 6.9 - Seleção das quarenta (40) exsudações melhores posicionadas no ranking do Cenário III.

RANKING #	ID SEEP	DATA	CONTEXTO GEOLÓGICO	CONTEXTO TEMPORAL	CONTEXTO AMBIENTAL	RANKING CENÁRIO III
1	578E	06-Apr-03	0.957	1.000	0.966	0.924
2	483E	19-May-03	0.992	1.000	0.920	0.912
3	070E	28-Feb-03	0.844	1.000	0.903	0.762
4	069E	28-Feb-03	0.796	1.000	0.902	0.718
5	074E	28-Feb-03	0.808	0.860	0.948	0.659
6	577E	06-Apr-03	0.705	1.000	0.920	0.649
7	472E	19-May-03	0.635	1.000	0.975	0.619
8	524E	25-May-03	0.734	1.000	0.841	0.617
9	589E	06-Apr-03	0.641	1.000	0.956	0.613
10	458E	28-Jun-03	0.948	0.720	0.896	0.611
11	477E	19-May-03	0.614	1.000	0.941	0.578
12	175E	08-Mar-03	0.631	0.933	0.974	0.574
13	479E	19-May-03	0.580	1.000	0.989	0.573
14	071E	28-Feb-03	0.648	1.000	0.867	0.562
15	413E	18-Jun-03	0.569	1.000	0.974	0.554
16	173E	08-Mar-03	0.606	0.933	0.977	0.553
17	478E	19-May-03	0.569	1.000	0.962	0.548
18	585E	06-Apr-03	0.567	1.000	0.941	0.533
19	582E	06-Apr-03	0.541	1.000	0.984	0.532
20	176E	08-Mar-03	0.558	0.960	0.979	0.525
21	534E	25-May-03	0.562	1.000	0.916	0.514
22	482E	19-May-03	0.570	1.000	0.899	0.513
23	528E	25-May-03	0.540	1.000	0.938	0.507
24	517E	25-May-03	0.881	0.640	0.893	0.504
25	588E	06-Apr-03	0.515	1.000	0.973	0.502
26	298E	01-Apr-03	0.554	0.900	0.970	0.484
27	476E	19-May-03	0.519	1.000	0.928	0.482
28	535E	25-May-03	0.610	0.920	0.856	0.481
29	292E	01-Apr-03	0.477	1.000	0.990	0.472
30	459E	28-Jun-03	0.635	0.800	0.917	0.466
31	320E	25-Apr-03	0.537	0.900	0.950	0.459
32	174E	08-Mar-03	0.462	1.000	0.983	0.454
33	083E	28-Feb-03	0.485	1.000	0.890	0.431
34	086E	28-Feb-03	0.598	0.760	0.947	0.430
35	189E	18-Feb-03	0.461	1.000	0.903	0.417
36	159E	08-Mar-03	0.770	0.600	0.900	0.416
37	281E	14-Mar-03	0.559	0.820	0.900	0.412
38	158E	08-Mar-03	0.540	0.800	0.934	0.403
39	294E	01-Apr-03	0.623	0.660	0.978	0.402
40	188E	18-Feb-03	0.421	1.000	0.946	0.399

Tabela 6.10 - Seleção das dez (10) exsudações melhores posicionadas no *ranking* do Cenário IIIA.

RANKING #	ID SEEP	DATA	CONTEXTO GEOLÓGICO	CONTEXTO TEMPORAL	CONTEXTO AMBIENTAL	RANKING CENÁRIO III
1	578E	06-Apr-03	0.957	0.921	0.966	0.851
2	483E	19-May-03	0.992	0.921	0.920	0.841
3	070E	28-Feb-03	0.844	0.933	0.903	0.711
4	069E	28-Feb-03	0.796	0.958	0.902	0.688
5	577E	06-Apr-03	0.705	0.958	0.920	0.621
6	074E	28-Feb-03	0.808	0.793	0.948	0.607
7	524E	25-May-03	0.734	0.933	0.841	0.576
8	472E	19-May-03	0.635	0.927	0.975	0.574
9	589E	06-Apr-03	0.641	0.927	0.956	0.568
10	458E	28-Jun-03	0.948	0.665	0.896	0.565

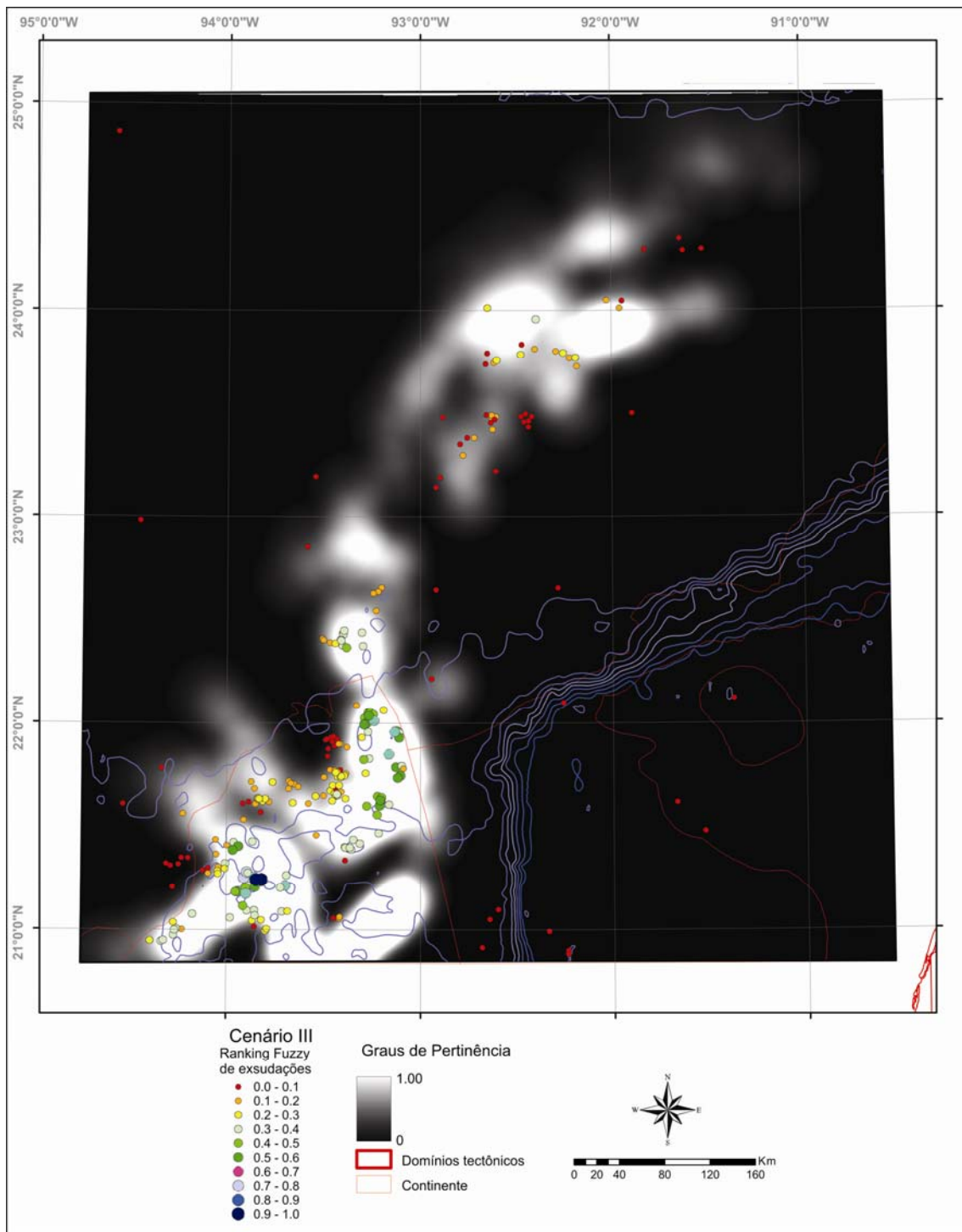


Figura 6.32 - *Ranking* das exsudações (centróides) obtido a partir do Cenário III sobreposto ao mapa *fuzzy* da contextualização geológica (Produto algébrico entre os domínios tectônicos ponderados, a densidade de domos e *knolls* e o limite crustal).

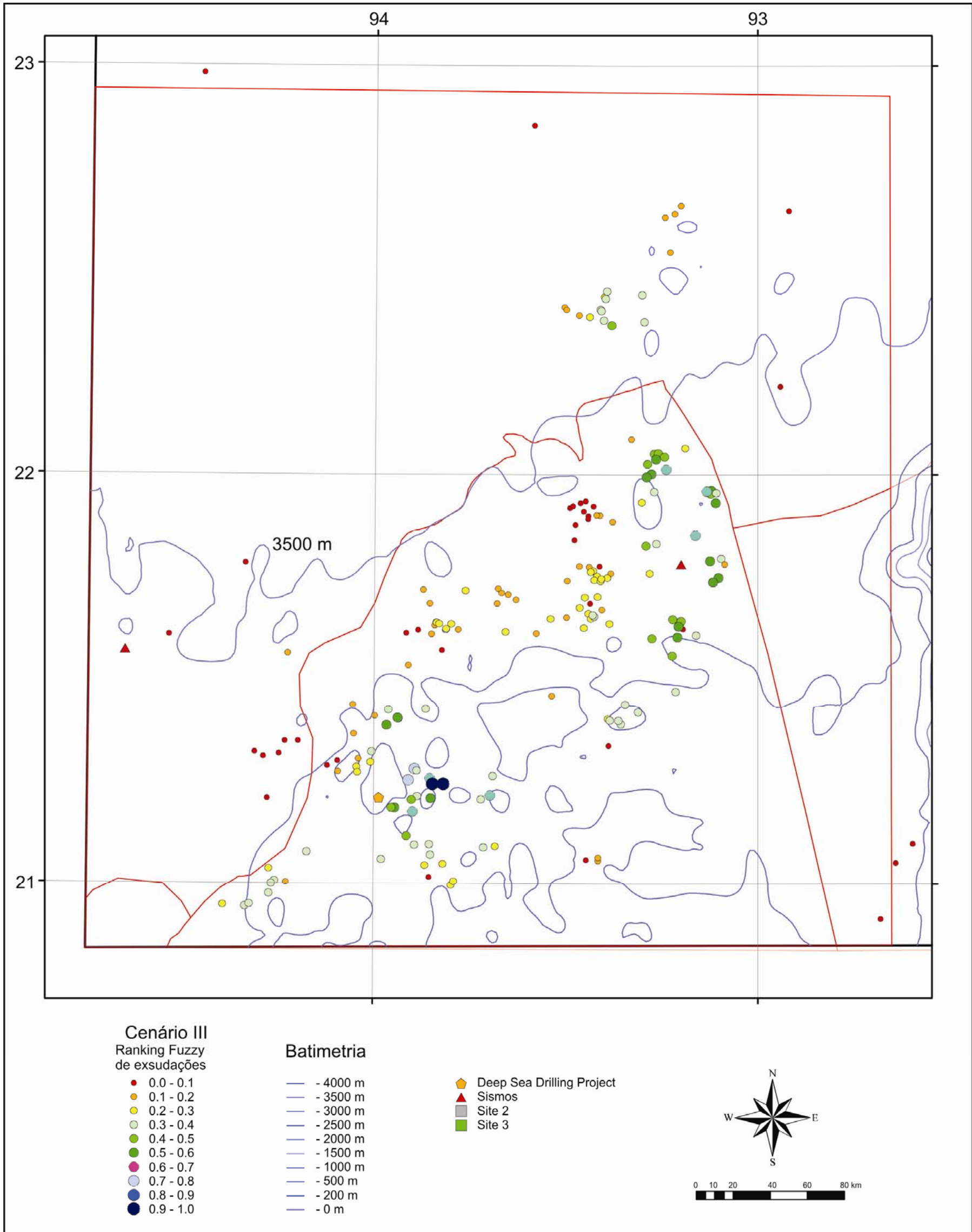


Figura 6.33 - Ranking das exsudações (centróides) obtido a partir do Cenário III, localizadas no *tile* 4 da área de estudo.

6.3.4 Cenário IV

O cenário IV utilizou o operador fuzzy “AND” e o operador fuzzy “produto algébrico” (Algebraic Product) para o cálculo do ranking ($R_{\text{CENÁRIO IV}}$) a partir dos planos de informação selecionados em verde na Figura 6.34.

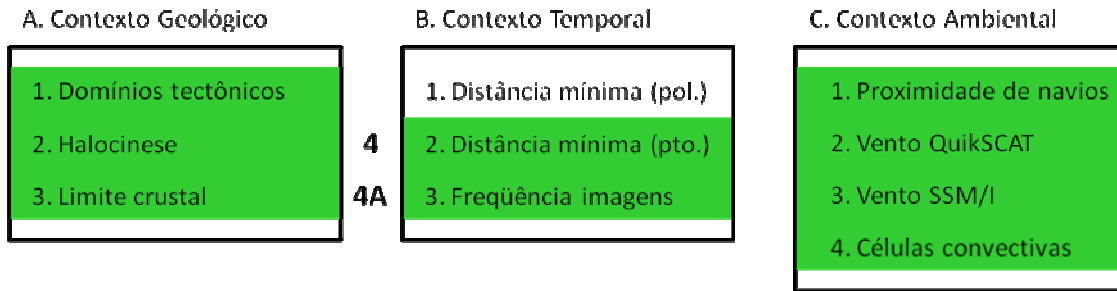


Figura 6.34 – Plano de informações (evidências), destacados em verde, utilizados na composição do cenário IV.

Neste cenário, o contexto geológico utilizou os domínios tectônicos ponderados, o mapa de densidade de domos e *knolls* (halocinese) e o limite crustal. O contexto temporal utilizou a análise de vizinhança e o contexto ambiental o mínimo entre os graus de pertinência obtidos individualmente para (1) proximidade de navios, (2) vento QuikSCAT, (3) vento SSM/I e (4) Células convectivas. Os resultados finais do Cenário IV estão apresentados na Tabela 6.11, Figuras 6.35 e 6.36, conforme equação abaixo:

$$\mu_{\text{GEOLOGICO}} = \text{MIN}(\mu_{\text{Tectônico}}); (\mu_{\text{Sal}}); (\mu_{\text{Limite Crustal}})$$

$$R_{\text{Cenário IV}} = \mu_{\text{Geológico}} * \mu_{\text{Análise de Vizinhança}} * \text{MIN} \mu_{\text{Ambiental}}$$

onde:

$\mu_{\text{(Geológico)}}$ equivale ao grau de pertinência mínimo obtido entre os quatro domínios tectônicos ponderados e fuzzyficados, os domos e *knolls* (sal) e o limite crustal;

$\mu_{\text{(Temporal)}}$ equivale ao grau de pertinência obtido a partir da análise de vizinhança entre as exsudações;

$\text{MIN} \mu_{\text{(Ambiental)}}$ equivale ao mínimo entre os graus de pertinência obtidos a partir das informações pertencentes à contextualização ambiental.

A Tabela 6.11 apresenta as quarenta (40) exsudações de óleo melhor posicionadas no ranking de exsudações do Cenário II, sendo que apenas as exsudações que ocupam a primeira posição no ranking possuem o código identificador (ID SEEP) destacado em negrito.

A Figura 6.35 apresenta a totalidade das exsudações de óleo ranqueadas segundo o método descrito no Cenário IV. Nota-se que como os valores do ranking são contínuos dentro do intervalo [0,1], decidiu-se classificar o ranking em dez classes com intervalos equivalentes de 0 a 1 para efeito de visualização. A Figura 6.36 ilustra as exsudações sob a forma de polígono mapeadas no *tile 4*.

O Cenário IV apresentou 1 exsudação de óleo com ranking #1 (578E); 1 exsudação com ranking #2 (483E); 1 exsudação com ranking #3 (577E); 1 exsudação com ranking #4 (070E); 1 exsudação com ranking #5 (069E); 1 exsudação com ranking #6 (582E); 1 exsudação com ranking #7 (071E); 1 exsudação com ranking #8 (074E); 1 exsudação com ranking #9 (482E) e; 1 exsudação com ranking #10 (189E).

Conforme explicado no Cenário I, a criação do Cenário IVA está apresentada a seguir na Tabela 6.12 que ilustra as dez exsudações melhor posicionadas no ranking do Cenário IVA, que apresentou 1 exsudação de óleo com ranking #1 (578E); 1 exsudação com ranking #2 (483E); 1 exsudação com ranking #3 (577E); 1 exsudação com ranking #4 (069E); 1 exsudação com ranking #5 (070E); 1 exsudação com ranking #6 (582E); 1 exsudação com ranking #7 (071E); 1 exsudação com ranking #8 (482E); 1 exsudação com ranking #9 (074E) e; 1 exsudação com ranking #10 (189E). Note que no Cenário IVA as exsudações de óleo 069E, 070E, 482E e 074E alteraram suas posições no ranking se comparadas ao Cenário IV.

Tabela 6.11 - Seleção das quarenta (40) exsudações melhores posicionadas no ranking do Cenário IV.

RANKING #	SEEP ID	DATA	CONTEXTO GEOLÓGICO	CONTEXTO TEMPORAL	CONTEXTO AMBIENTAL	RANKING CENÁRIO IV
1	578E	4-Jun-03	0.610	0.97	1.00	0.589
2	483E	19-May-03	0.625	0.92	1.00	0.575
3	577E	4-Jun-03	0.595	0.92	1.00	0.547
4	070E	28-Feb-03	0.580	0.90	1.00	0.524
5	069E	28-Feb-03	0.575	0.90	1.00	0.519
6	582E	4-Jun-03	0.517	0.98	1.00	0.509
7	071E	28-Feb-03	0.570	0.87	1.00	0.494
8	074E	28-Feb-03	0.598	0.95	0.86	0.488
9	482E	19-May-03	0.535	0.90	1.00	0.481
10	189E	18-Feb-03	0.524	0.90	1.00	0.473
11	188E	18-Feb-03	0.495	0.95	1.00	0.469
12	272E	14-Mar-03	0.503	0.93	1.00	0.468
13	490E	19-May-03	0.488	0.95	1.00	0.461
14	589E	4-Jun-03	0.474	0.96	1.00	0.453
15	472E	19-May-03	0.452	0.98	1.00	0.441
16	477E	19-May-03	0.461	0.94	1.00	0.434
17	524E	25-May-03	0.516	0.84	1.00	0.433
18	572E	4-Jun-03	0.485	0.89	1.00	0.432
19	351E	1-May-03	0.525	0.85	0.93	0.418
20	459E	28-Jun-03	0.565	0.92	0.80	0.415
21	173E	8-Mar-03	0.449	0.98	0.93	0.409
22	291E	1-Apr-03	0.488	0.99	0.84	0.407
23	065E	28-Feb-03	0.415	0.98	1.00	0.405
24	465E	28-Jun-03	0.420	0.95	1.00	0.398
25	175E	8-Mar-03	0.436	0.97	0.93	0.396
26	548E	25-May-03	0.533	0.74	1.00	0.393
27	581E	4-Jun-03	0.435	0.90	1.00	0.392
28	152E	8-Mar-03	0.445	0.92	0.96	0.391
29	458E	28-Jun-03	0.605	0.90	0.72	0.390
30	413E	18-Jun-03	0.400	0.97	1.00	0.389
31	032E	4-Feb-03	0.477	0.93	0.86	0.383
32	478E	19-May-03	0.389	0.96	1.00	0.374
33	150E	8-Mar-03	0.440	0.98	0.87	0.372
34	464E	28-Jun-03	0.385	0.97	1.00	0.372
35	300E	1-Apr-03	0.419	0.88	1.00	0.370
36	463E	28-Jun-03	0.425	0.86	1.00	0.366
37	588E	4-Jun-03	0.372	0.97	1.00	0.362
38	151E	8-Mar-03	0.440	0.94	0.87	0.360
39	522E	25-May-03	0.385	0.92	1.00	0.355
40	528E	25-May-03	0.378	0.94	1.00	0.354

Tabela 6.12 - Seleção das dez (10) exsudações melhores posicionadas no *ranking* do Cenário IVA.

RANKING #	SEEP ID	DATA	CONTEXTO GEOLÓGICO	CONTEXTO TEMPORAL	CONTEXTO AMBIENTAL	RANKING CENÁRIO IV
1	578E	4-Jun-03	0.610	0.91	1.00	0.556
2	483E	19-May-03	0.625	0.87	1.00	0.543
3	577E	4-Jun-03	0.595	0.91	1.00	0.539
4	069E	28-Feb-03	0.575	0.89	1.00	0.511
5	070E	28-Feb-03	0.580	0.86	1.00	0.502
6	582E	4-Jun-03	0.517	0.97	1.00	0.500
7	071E	28-Feb-03	0.570	0.86	1.00	0.488
8	482E	19-May-03	0.535	0.89	1.00	0.475
9	074E	28-Feb-03	0.598	0.90	0.86	0.460
10	189E	18-Feb-03	0.524	0.86	1.00	0.450

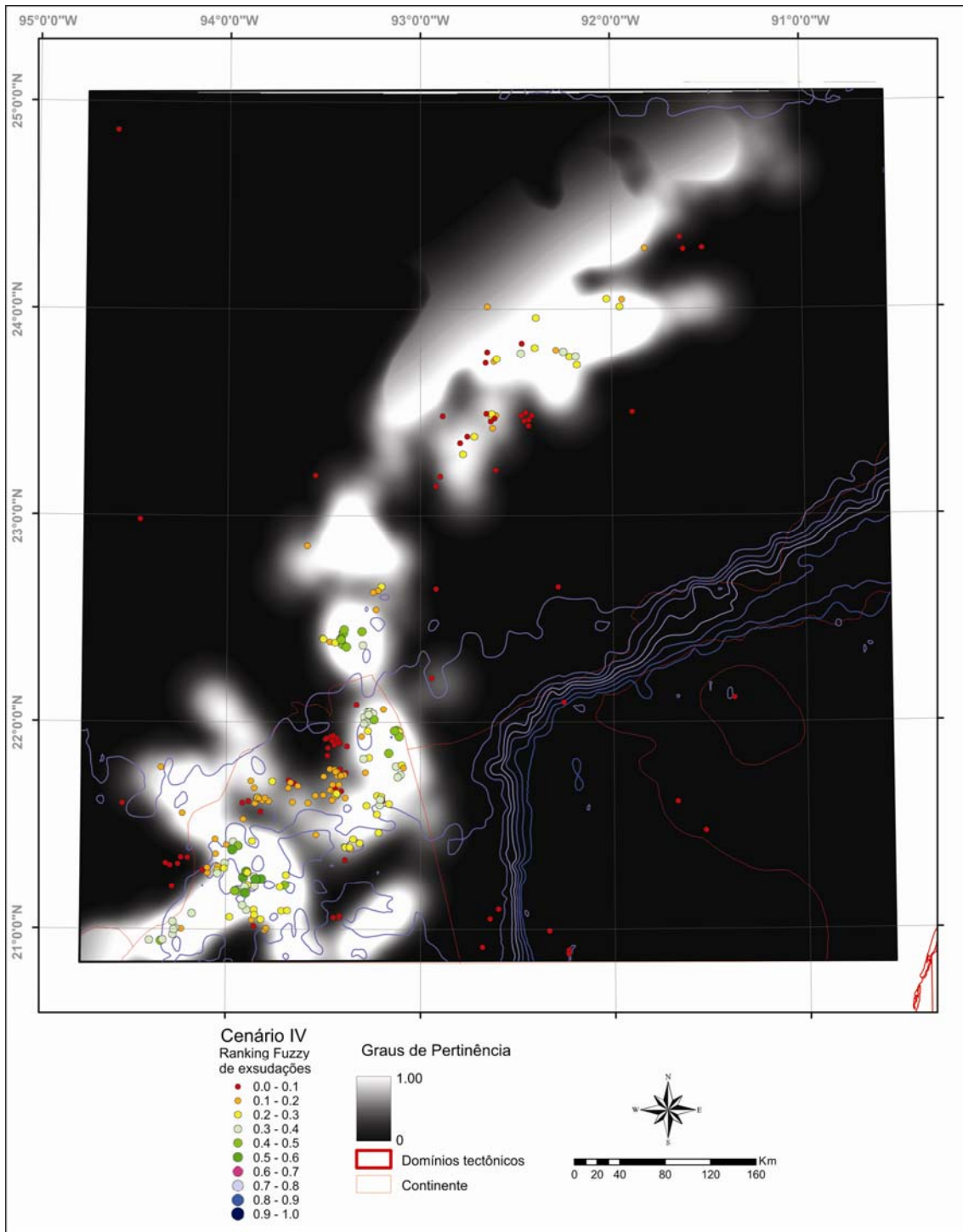


Figura 6.35 - *Ranking* das exsudações (centróides) obtido a partir do Cenário IV sobreposto ao mapa *fuzzy* da contextualização geológica (Mínimo entre domínios tectônicos ponderados, densidade de domos e *knolls* e limite crustal).

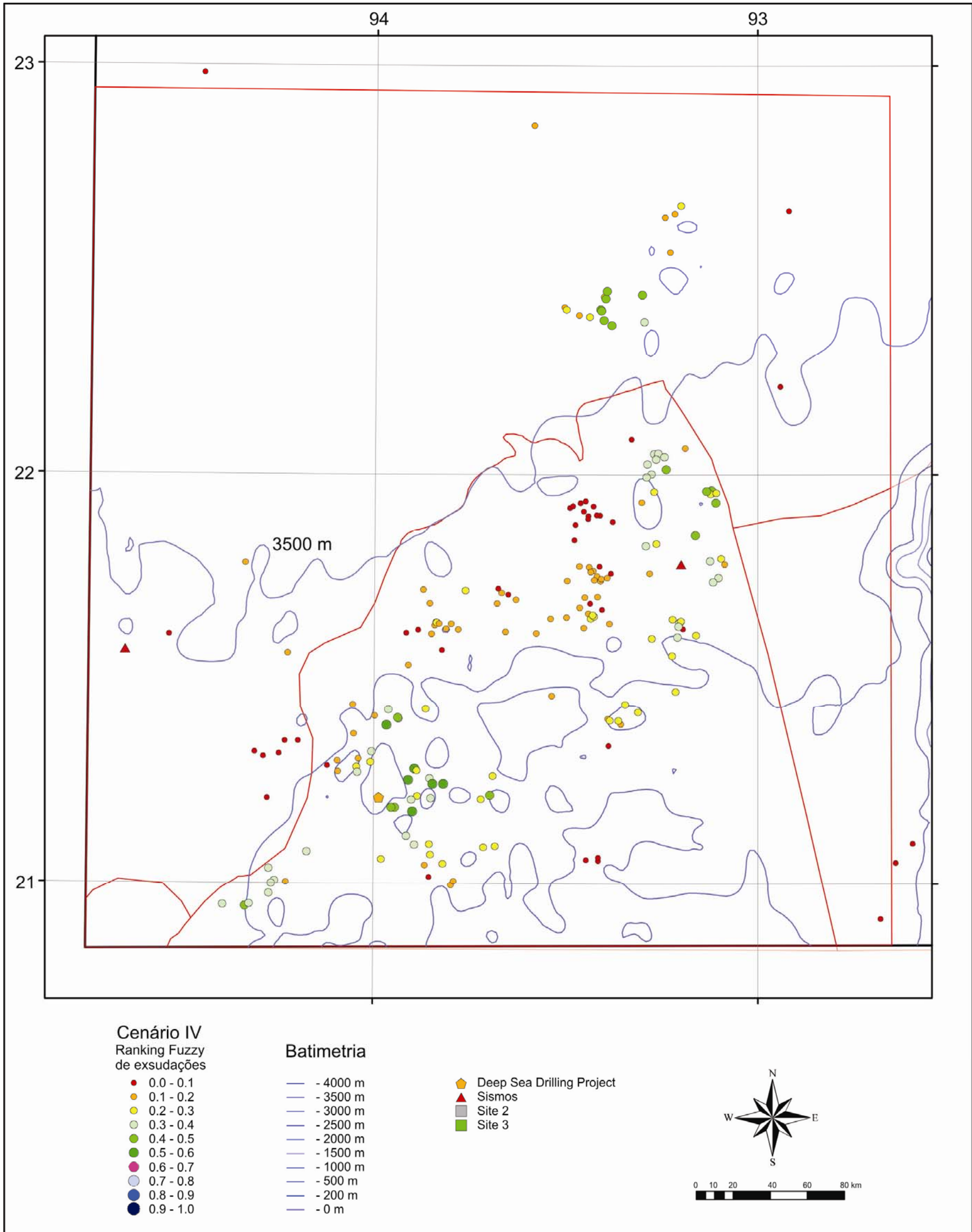


Figura 6.36 - Ranking das exsudações (centróides) obtido a partir do Cenário IV, localizadas no *tile* 4 da área de estudo.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho tem como principal contribuição a criação de um protocolo técnico-científico semi-automático para a determinação de um *ranking* de exsudações de hidrocarbonetos utilizando conjuntos *fuzzy* e produtos de sensoriamento remoto por radar de abertura sintética, dados geológicos e geofísicos, além de dados oceanográficos e meteorológicos auxiliares.

O processamento digital textural e interpretação associada dos dados RADARSAT-1 resultou na detecção de duzentas e quarenta e sete (247) exsudações de óleo (*seepage slicks*) na porção mexicana de águas ultra-profundas do Golfo do México. A existência de exsudações de óleo em fronteiras exploratórias é indicativa da presença de sistemas petrolíferos ativos onde se observa processos atuantes em tempo presente de migração e/ou geração de hidrocarbonetos. Informações sobre exsudações de óleo em ambientes marinhos reduzem o risco exploratório, são consideradas informações valiosas para: (i) o planejamento de campanhas de geoquímica de superfície através da amostragem de sedimentos do assoalho oceânico; (ii) a calibração de modelagem de bacias sedimentares e; (iii) condição de contorno em modelos reversos da trajetória do óleo na coluna d'água.

O método desenvolvido para o cálculo do ranking de exsudações de óleo a partir de dados de múltiplas fontes tem como principal característica o seu aspecto restritivo. Diante da complexidade inerente à detecção de óleo na superfície do mar por sistemas de radar, a fusão de informações referentes aos contextos geológicos, temporais e ambientais foi realizada através de operadores fuzzy T-Normas (*Fuzzy AND*) e Médias (*Fuzzy Means*). O método em questão reduz a responsabilidade do intérprete nos processos de identificação de exsudações ou derrames de óleo. Para isso, atenção especial foi dada às informações fuzzificadas nos domínios da contextualização ambiental e temporal, a fim de se obter uma interpretação e categorização mais conservativas para as feições relacionadas ao fenômeno de exsudações de óleo.

A alta densidade de exsudações de óleo identificada através dos “clusters de exsudações” (*seepage slick clusters*) foi identificada nas proximidades de ocorrências conhecidas de vulcanismo asfáltico e presença de comunidades quimio-sintéticas, mais precisamente na porção norte do domínio “Campeche Knolls” e proximidades do domínio “Challenger Knolls”, onde há rochas sobrepostas ao domo salino saturadas de

hidrocarbonetos termogênicos. Em ambos os casos, a migração de óleo a partir de rochas reservatório ou até mesmo rochas geradoras até o assoalho oceânico é possível devido aos processos de halocinese que possibilitam a geração de condutos ou caminhos estruturais de migração (Figura 7.1).

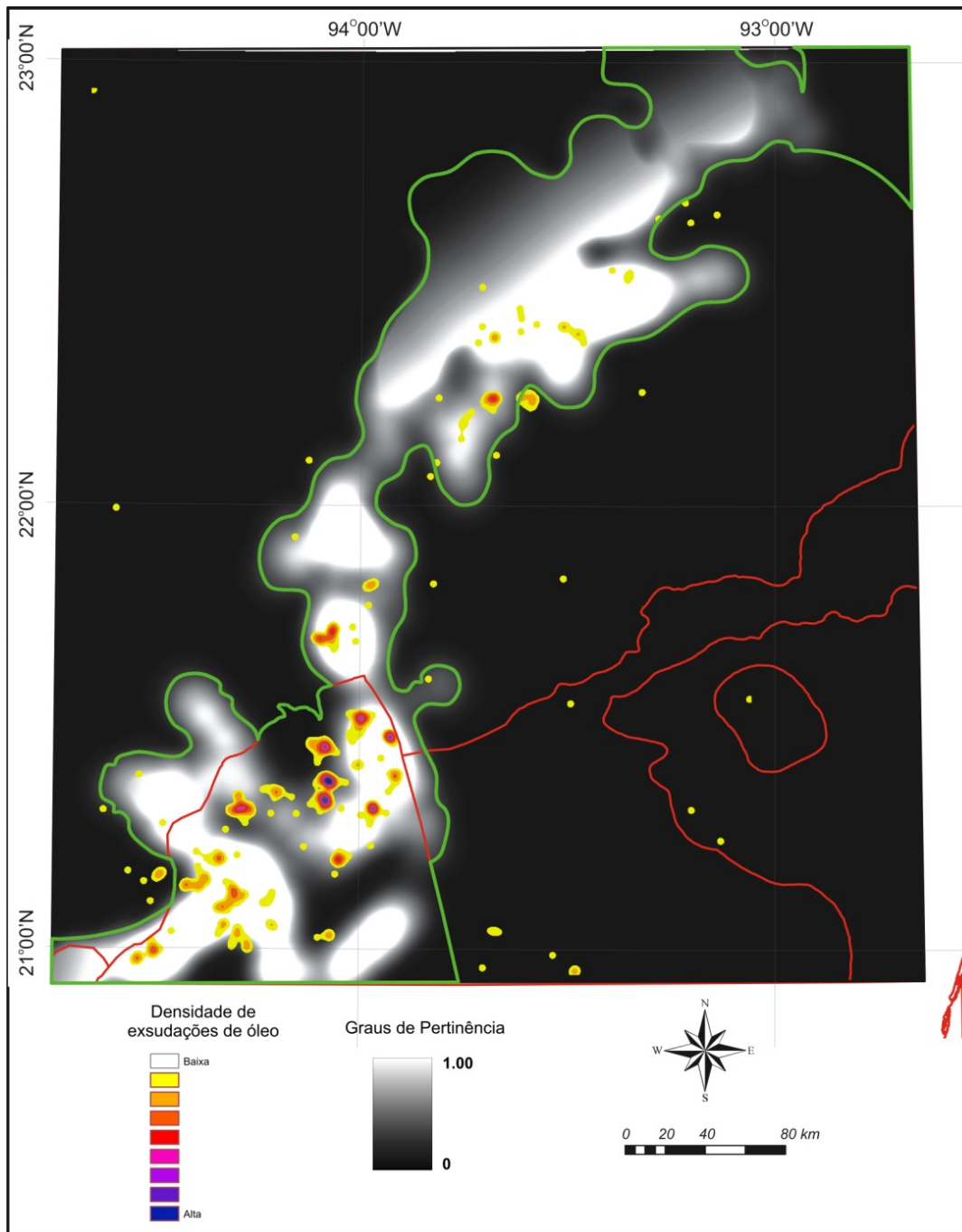


Figura 7.1 – Mapa da densidade de centróides das exsudações de óleo interpretadas em imagens RADARSAT-1, sobreposta à superfície *fuzzy* [0,1] da contextualização geológica ilustrada nos Cenários II e IV, gerado a partir do operador *Fuzzy AND* entre os domínios tectônicos ponderados, a densidade de domos e *knolls* e o limite crustal. Os domínios tectônicos estão em vermelho e o domínio sob influência da presença de sal está em verde.

O processo de fuzzyficação dos limites ou fronteiras entre os domínios tectônicos se mostrou favorável para a redução da incerteza inerente aos métodos Booleanos de análise. A análise da pertinência das exsudações de óleo aos domínios tectônicos permite a obtenção de graus ou valores contínuos no intervalo [0,1] possibilitando desta forma a maior discretização entre exsudações que irá favorecer diretamente aos processos de tomadas de decisão em campanhas exploratórias.

O monitoramento a longo termo das atividades petrolíferas do Golfo do México aplicado à exploração e ao meio ambiente através de ferramentas de sensoriamento remoto é um exemplo de contribuição da indústria para com autoridades ambientais locais ou até mesmo a sociedade. O fenômeno das exsudações de óleo nesta região é responsável por aproximadamente 70% do óleo detectado anualmente na superfície do mar por imagens SAR.

A fusão entre imagens SAR e dados oceanográficos e meteorológicos auxiliares por especialistas tem sido continuamente validada por (i) campanhas de geoquímica de superfície através da amostragem da exsudação de óleo à superfície do mar e, (ii) pelo planejamento de derrames controlados realizados em horários coincidentes aos horários de aquisição de dados RADARSAT-1, a fim de se caracterizar a sensibilidade do sensor para a detecção de volumes incipientes de óleo.

Em uma análise preliminar nota-se que o Cenário I foi o que apresentou número maior de exsudações com valor de ranking máximo. Cabe lembrar que este cenário somente contemplou para a contextualização geológica os dados referentes aos domínios tectônicos. Este Cenário equivale à automatização do método pré-existente onde as informações são processadas do ponto de vista dos conjuntos fuzzy. Ainda assim, as exsudações com confiabilidade mais alta equivalem a 10% da base de dados. Posteriormente, a inclusão do fator que corrige a frequência de imageamento RADARSAT-1, ilustrada no Cenário IA, discretizou ainda mais os polígonos referentes às exsudações de óleo, fazendo com que apenas os polígonos 071E e 069E obtivessem a primeira posição no ranking. Tal fato nos chama a atenção, pois ambos os polígonos destacados no Cenário IA estão posicionados entre os quinze melhor posicionados nos Cenários II, III e IV.

As exsudações de destaque entre os dez melhores posicionamentos no ranking calculado a partir dos Cenários I, II, III e IV foram os polígonos 578E, 483E, 069E, 071E, 482E, 517E, 577E, 070E e 458E (Tabela 7.1). Em todos os quatro cenários

fuzzy nota-se o poder de granularidade e robustez do método, independentemente do operador utilizado. A discretização entre os valores do ranking dos polígonos referentes às exsudações de óleo seleciona áreas mais favoráveis à ocorrência deste fenômeno natural. Esta variação contínua no intervalo de [0,1] contribui para procedimentos de tomada de decisões a respeito da localização de pontos ou planejamento de coleta de amostras.

Tabela 7.1 – Seleção das exsudações de óleo com os dez melhores posicionamentos no ranking calculado pelos Cenários I, II, III e IV.

Exsudação/ Ranking	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
578E	•••••	••								
483E	••	•••••								
069E	••			••••	•			••		
071E	••						••		••	
482E		••						•	•	
517E		••								
577E			••••		••••	•				
070E			••	••	•		••			
458E			••							••
074E				••	•	•		•	•	
582E						••				
159E						••				
524E							•	•		
472E							•	•		
589E									••	
189E										••

A área de estudo demonstrou um potencial bastante interessante para a realização de investigações na área de geoquímica de superfície. O caráter contínuo do ranking de exsudações de óleo obtido nos diferentes cenários apontou candidatos que se destacaram nos aspectos relacionados à contextualização geológica, temporal e ambiental.

A província batimétrica de *Campeche Knolls* e localização da área de influência da província “Salina do Golfo Profundo” são neste trabalho as regiões mais importantes do ponto de vista exploratório em razão do padrão de alta frequência de ocorrência de exsudações de óleo. A utilização das informações sobre a localização de estruturas diapíricas do Golfo do México (Projeto “Deep Sea Drilling”) nos permitiu delimitar um domínio (Figura 7.2) marcado pela presença destas feições dômicas que ultrapassa os limites delimitados para a Província Salina do Golfo Profundo, adentrando aos limites

da Província Planície Abissal. Acredita-se que este domínio possa revelar novas descobertas, especialmente onde há presença de rochas geradoras do Jurássico Superior (Tithoniano).

O conhecimento sobre os princípios de sistemas de radar e as características do retroespalhamento da energia eletromagnética das microondas a partir da superfície dos oceanos, em função de fenômenos meteorológicos e oceanográficos foi decisivo na a definição de funções de pertinência *fuzzy* utilizadas no sistema de análise espacial integrada das exsudações de óleo extraídas dos dados RADARSAT-1.

Os processos de halocinese (tectônica de sal) reinantes no Golfo do México são os principais agentes formadores de estruturas geológicas que conectam rochas reservatórios e/ou rochas geradoras ao assoalho oceânico permitindo desta forma a existência de escape de exsudações de petróleo. Desta forma, o monitoramento sistemático destas regiões consiste em uma informação valiosa para a redução do risco exploratório para a e geração e migração de hidrocarbonetos através da indicação precisa de sistemas petrolíferos ativos. Estimativas sobre o grau de importância dos planos de informações utilizados neste trabalho são baseadas em dados conclusivos obtidos a partir de uma vasta base de dados exploratórios.

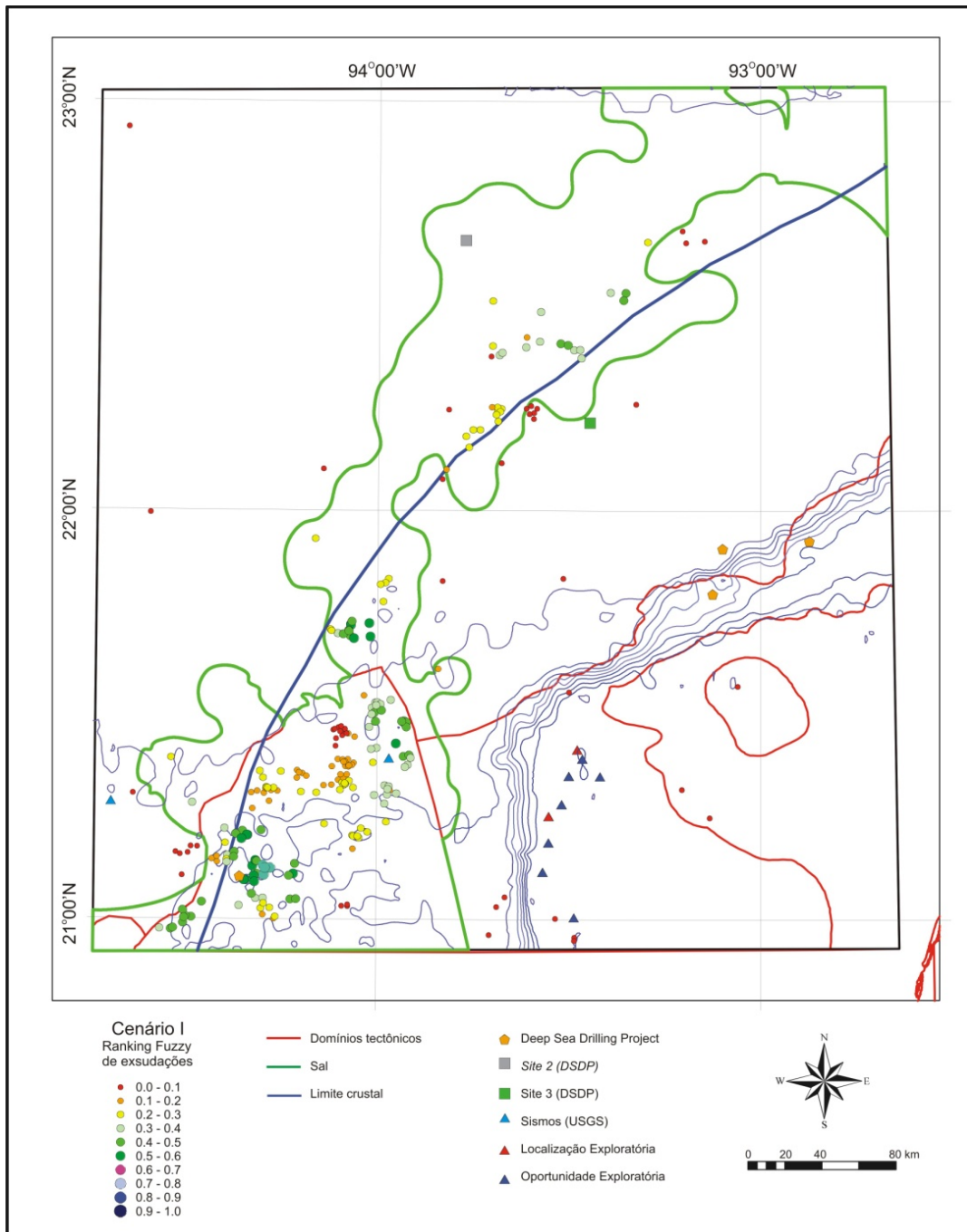


Figura 7.2 – Ranking das exsudações (centróides) obtido a partir do Cenário I. Os domínios tectônicos estão em vermelho, o domínio sob influência da presença de sal está em verde e o limite crustal está em azul.

O recente planejamento e lançamento de sistemas e constelações de sensores SAR é um prenúncio do avanço tecnológico e da nova tendência dos sistemas de sensoriamento remoto de observação da terra. A disponibilidade de novos e melhores dados espaciais, somada ao avanço de métodos de análise inteligente de dados espaciais anuncia o aquecimento da indústria do sensoriamento remoto para o estudo e exploração dos recursos naturais.

A importância dos radares de abertura sintética para a detecção de exsudações ou derrames de óleo está muito bem documentada na literatura técnica específica. É chegada a hora dos sistemas de radar polarimétricos. Esta característica poderá ser bastante útil na diferenciação entre diferentes óleos detectados na superfície do mar, oriundos de derrames ou exsudações. Além disso, a detecção de óleo por sensores que operam nas faixas do visível, infravermelho e infravermelho termal possui um grande potencial para o avanço da técnica de detecção de óleo em ambiente marinho.

A continuidade do monitoramento de exsudações de óleo em águas ultra-profundas servirá para a validação do método proposto. Trabalhos futuros incluem o cálculo do ranking de novas exsudações detectadas em campanha exploratória realizada no ano de 2008 na mesma área de estudo deste trabalho. Pretende-se investigar a contribuição efetiva de dados de temperatura da superfície do mar e concentração de colorofila tipo A para sua implementação no método fuzzy proposto, objetivando-se analisar a caracterização de feições superficiais indicativas de padrões de correntes oceânicas, zonas de ressurgência e produtividade primária.

A continuidade deste trabalho se dará no sentido de se obter um número maior de atributos referentes às exsudações de óleo, a partir das próprias imagens SAR. Informações sobre o campo superficial de vento e correntes quando extraídos da própria imagem, tornam o método mais eficaz, já que nem sempre é possível obter dados ambientais de sensoriamento remoto no mesmo horário de aquisição de dados SAR. Também serão investigados os modelos inversos da trajetória do óleo na coluna d'água serão investigados para que se possam interligar estudos de modelagem de bacias e geoquímica de superfície. Para tanto, o monitoramento contínuo de regiões de fronteira exploratórias é indispensável para investigações a respeito do comportamento de exsudações de hidrocarbonetos.

REFERÊNCIAS

ABRAMS, M.A. 1996. "Distribution of subsurface hydrocarbon seepage in near-surface marine sediments". In: SCHUMACHER, D. & ABRAMS, M.A. (eds.), *Hydrocarbon migration and its near-surface expression: AAPG Memoir 66*, pp. 1 - 14.

ALMEIDA FILHO, R.; MIRANDA, F.P.; LORENZETTI, J.A. "et al.". 2004. "Exploration assessment in a petroleum frontier area offshore the Amazon River mouth using RADARSAT-1 images". In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Anchorage - Alaska. Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE.

ALPERS, W. e MELSHEIMER, C. 2004. "Rainfall". In: *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual*, Washington, DC, CHRISTOPHER R. J. e APEL, J. R. Cap. 17, pp. 355 - 371.

ALPERS, W. e HÜHNERFUSS, H. 1988. "Radar signatures of oil films floating on the sea surface and the Marangoni effect", *Journal of Geophysical Research*, vol. 93, pp.3642 - 3648.

AN, P.; MOON, W. M.; RENCZ, A. 1991. "Application of fuzzy set theory to integrated mineral exploration", *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, vol. 27, nº. 1, pp 1 - 11.

ANGELES-AQUINO, F. J. J.; REYES-NUÑES, J. M.; QUEZADA-MUÑETÓN; MENESES-ROCHA, J. J. 1994. "Tectonic evolution, structural styles and oil habitat in the Sonda de Campeche, Mexico". *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 78, pp. 1448 - 1449.

ANSARI, A.; NOORZAD, A.; ZAFARANI, H. 2009. "Clustering analysis of the seismic catalog of Iran", *Computers & Geosciences*, vol. 35, pp. 475 - 586.

ANTOINE, J. W. 1972. "Strucute of the Gulf of Mexico". En: REZAK, R. & HENRY, V. J. (eds). *Contributions on the Geological and Geophysical Oceanography of the Gulf of the Mexico*, Texas A & M University Oceanographic Studies 3, pp. 1 - 34.

AQUINO, J. A. L.; RUIZ, J. M.; FLORES, M. A., “*et al.*”. 2003. “The Sihil Field: Another Giant Below Cantarell, Offshore Campeche, Mexico”, In: HALBOUTY, M.T., USA. (eds), *Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1990-1999*, 1^a ed., chapter 6, Oklahoma, USA, The American Association of Petroleum Geologists.

AQUINO-LÓPEZ, J. A. 2004. “Sureste Basin, México and Associated Sub-basins: An Update and Future Potential”. In: *AAPG International Conference*, Cacun, Mexico.

ARVELYNA, Y.; OSHIMA, M.; KRISTIJONO, A., “*et al.*”. 2001. “Auto Segmentation of Oil Slick in RADARSAT SAR Image Data around Rupert Island, Malacca Strait”. 22nd *Asian Conference on Remote Sensing*, Singapore, 5-9 November.

ATKINSON, P. M. e LEWIS, P. 2000. “Geostatistical classification for remote sensing: an introduction”, ***Computers & Geosciences***, vol. 26, pp. 361 - 371.

BANNERMAN, K.; RODRIGUEZ, M.H., MIRANDA, F.P, “*et al.*”. 2009. “Operational applications of RADARSAT-2 for the environmental monitoring of oil slicks in the Southern Gulf of Mexico”. IGARSS 2009, Capetown, July, CD-ROM.

BÁRDOSSY, A. e DUCKSTEIN, L. 1995. ***Fuzzy Rule-Based Modeling with Applications to Geophysical, Biological and Engineering Systems***. 1^a ed. CRC Press.

BARKER, J. L; HARDEN, M. K.; ANUTA, E. A. “*et al.*”. 1992. “MODIS spectral sensitivity study: requirements and characterization”. 84 pp.

BARTOLINI, C.; BUFFLER, R. T.; CANTÚ-CHAPA, A. 2001. ***The Eastern Gulf of Mexico Basin***. 1^a ed. USA, The American Association of Petroleum Geologists.

BEISL, C.H.; PEDROSO, E.C.; SOLER, L.S., “*et al.*”. 2004. “Use of genetic algorithm to identify the source point of seepage slick clusters interpreted from Radarsat-1 images in the Gulf of Mexico”. In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Anchorage - Alaska. Institute of Electrical and Electronics Engineers.

BEISL, C.H.; MIRANDA, F.P.; SILVA JÚNIOR, C.L. 2000. "Combined use of RADARSAT-1 and AVHRR data for the identification of mesoscale oceanic features in the Campos Basin, Brazil". In: *Proceedings of Sixth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, Charleston, USA, May.

BENTZ, C. M.; POLITANO, A. T.; GENOVEZ, P. 2005. "Monitoramento Ambiental de Áreas Costeiras e Oceânicas com Múltiplos Sensores Orbitais", *Revista Brasileira de Cartografia*, nº. 57/01, pp.43 - 47.

BENTZ, C. M.; MIRANDA, F.P.; PEDROSO, E. C. e BEISL, C.H. 2000. "Application of remote sensing data for oil spill monitoring in the Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil: preliminary results". In: *7th Latin American Congress on Organic Geochemistry*, Foz do Iguaçu, vol. 1. pp. 59 - 61.

BEUKELAER, S. M.; MACDONALD, I. R.; GUINNASSO, N. L., "et al". 2003. "Distinct side-scan sonar, RADARSAT SAR, and acoustic profiler signatures of gas and oil seeps on the Gulf of Mexico slope", *Geo-Marine Letters*, vol. 23, pp. 177 - 186.

BIEGERT, E.K.; BAKER, R.N.; BERRY, J.L.; "et al". 1997. "Gulf offshore satellite applications project to detects oil slicks using RADARSAT". In: *Proceedings of the International Symposium of Geomatics in the Era of RADARSAT (GER'97)*, Ottawa, Canada, May.

BIRD, D. E.; BURKE, K.; HALL, S. A. 2005. "Gulf of Mexico tectonic history: Hotspot tracks, crustal boundaries, and early salt distribution", *AAPG Bulletin*, vol. 89, nº. 3 (Mar), pp. 311 - 328.

BLONDA, P.; POLOSA, R.L.; LOSITO, S., "et al". 1989. Classification of multi-temporal remotely-sensed images based on a fuzzy logic technique: PROC. IGARSS '89, Inst. Electr. Eletron. Eng., CH2768-0, pp.834 - 837.

BONN AGREEMENT. 1999. Bonn Agreement counter pollution manual. vol. 1, Chapt. 4, Annex 1. Available from http://www.bonnagreement.org/eng/html/counter-pollution_manual [accessed on 24 April 2002].

BONHAM-CARTER, G. F. 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: modelling with GIS*. 1^a ed. Netherlands, Pergamon.

BOROUSHAKI, S. e MALCZEWSKI, J. 2008. "Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS", **Computers & Geosciences**, vol. 34, pp. 399 - 410.

BREKKE, C. e SOLBERG, A. H. S. 2005. "Oilspill detection by satellite remote sensing", **Remote Sensing of Environment**, vol. 95, pp. 1 - 13.

BROWN, C. E.; FINGAS, M. F.; GOODMAN, R. H., "et al". 2000. "Airborne oil slick thickness measurement". In: *6th International Conference Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, Charleston, SC.

BROWN, E.; COLLING, A.; PARK, D. "et al.". 2001. "The north atlantic gyre: observations and theories". In: *Ocean Circulation*. The Open University, Walton Hall, England. Cap. 4. pp. 79 - 142.

BURK, C.A.; EWING, M.; WORZEL, J.L., "et al". 1969. "Deep-sea drilling into the Challenger Knoll, Central Gulf of Mexico": **The American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, vol. 53, pp. 1338 - 1347.

BURROUGH, P. A. & MCDONNELL, R. A. 1998. *Principles of Geographical Information Systems (Spatial Information Systems)*. 2^a Ed, Oxford University.

BURROUGH, P. A. e HEUVELINK, G. B. M. 1992. "The sensitivity of boolean and continuous (Fuzzy) logical modelling to uncertain data". In: *European Conference and Exhibition on Geographical Information Systems Munich*, 3. (EGIS'92). Munich, Germany. *Proceedings*. Munich, Germany: EGIS'92. pp. 1032 - 1041.

BURROUGH, P. A. 1986. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford: Clarendon, 192 pp.

CAMERON, N. R.; BROOKS, J. M.; BERNARD, B. B., "et al". 2000. "Surface Geochemical Exploration continues to progress global deepwater frontiers". In: *IBC Worldwide Deepwater Technologies forum*, London.

CARMALT, S.W., e JOHN, B. ST.1986. Giant oil and gas fields, in M.T. Halbouty, ed., Future Petroleum Provinces of the World (Oroceedings of the Wallace & Pratt Memorial Conference Phoenix, December 1984): American Association of Petroleum Geologists Memoir 40, pp. 11 - 53.

CARR, J.R. e MIRANDA, F.P. 1998. "The semivariogram in comparison to the co-occurrence matrix for classification of image texture". **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 36, pp.1945 - 1952.

CARR, J.R. 1996. "Spectral and textural classification of single and multiple band digital images". **Computers & Geosciences**, 22. pp. 849 - 866.

CERQUEIRA, J. R.; MIRANDA, F. P.; MARMOL, A. M. Q., "et al.".2004. "Integrated study of oil seeps in the Campeche Bay, Cantarell Field case history". In: *International Conference and Exhibition*, Cancun. American Association of Petroleum Geologists – AAPG.

CERSAT - Center for Satellite Exploitation and Research - Disponível na Internet via <http://cersat.ifremer.fr/>. Pesquisa em Abril de 2009.

CHEN, Z.; EMBRY, A.F.; OSADETZ, K.G. e HANNIGAN, P.K. 2002. "Hydrocarbon favourability mapping using fuzzy integration: western Sverdrup Basin, Canada", **Bulletin of Canadian Petroleum Geology**, vol. 50, nº. 4, pp. 492 - 506.

CLARKE, R.H. e CLEVERLY, R.W. 1991. "Petroleum seepage and post-accumulation migration". *Geological Society, London, Special Publication*, parte IV: Trap leakage and subsequent migration vol. 59, pp. 265 - 271.

CRACKNELL, A.P.; NEWCOMBE, S.K.; BLACK, A.F e KIRBY, N.E. 2001. "The ABDMAP (Algal Bloom Detection, Monitoring and Prediction) Concerted Action". University of Dundee. In: *International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, pp. 205 - 247.

CSERNA, Z. 1989. An outline of the geology of Mexico: The Geology of North America, vol. A, The Geology of North America, An overview, The Geological Society of America, pp. 233 - 264.

DE-BEUKELAER, S. M.; MACDONALD, I. R.; GUINNASSO JR., N. L., “*et al*”. 2003. “Distinct side-scan sonar, RADARSAT SAR, and acoustic profiler signatures of gas and oil seeps on the Gulf of Mexico slope”, ***Geo-Mar Lett***, vol. 23, pp. 177 - 186.

DEMIN, B.T.; ERMAKOV, S.A.; PELINOVSKY, N.Y. “*et al*”. 1985: Study of the elastic properties of sea surface-active films. *Atmos. Oceanic Phys.*, 21, pp. 312 - 316.

DESNOS, Y-L.; PALAZZO, F.; REGNER, P., “*et al*”. 2001. “Research Activities in Response to the Envisat Announcement of Opportunity”, ***ESA Bulletin***, vol. 106, 118 pp.

DEMICO, R.V. & KLIR, G. J. 2004. *Fuzzy logic in Geology*. Ed. Elsevier Academic Press, Binghamton, New York.

DIGIACOMO, P. M.; WASHBURN, L.; HOLT, B., “*et al*”. 2004. “Coastal pollution hazards in southern California observed by SAR imagery: stormwater plumes, wastewater plumes, and natural hydrocarbon seeps”, ***Marine Pollutins Bulletin***, vol. 49, pp. 1013/1024.

DUBOIS, D.; PRADE, H.; SESSA, S. 2003. “Recent Literature”, ***Fuzzy Sets and Systems***, vol. 138, pp. 213 - 219.

EDGAR, N.T. e CLAYTON, J.L. 1992. Origin of the Challenger Knoll oil, Gulf of Mexico: U.S. Geological Survey Circular, 1074, pp. 24 - 26.

ELACHI, C. 1988. *Spaceborne Radar Remote Sensing, Applications and Techniques*, IEEE Press, NY, 254 pp.

ELACHI, C. T.; BICKNELL; R. L.; JORDAN e WU, C. 1982. Spaceborne Synthetic-Aperture Imaging Radars: Apllications, Techniques and Technology, *IEEE Proc.* 70 (10): pp.1174 - 1209.

ELACHI, C. T. 1980. Spaceborne Imaging Radar: Geologic and oceanographic application. Reprinted by permission of the American Association for the Advancement of Science from *Science*, vol. 209, n° 4461 (1980), pp. 1073 - 1082.

EL COLEGIO DE LA FRONTERA SUR – ECOSUR - Disponível na Internet via <http://www.ecosur.mx/>. Pesquisa em Abril de 2005.

EL-RAEY, M.; ABDEL-KADER, A. FARID, NASR, S. M., “*et al.*”. 1996. “Remote sensing and GIS for an oil spill contingency plan, Ras-Mohammed, Egypt”, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, nº.11, pp. 2013 - 2026.

ESPEDAL, H.A. e JOHANNESSEN, O.M. 2000. Detection of oil spills near offshore installations using synthetic aperture radar (SAR), vol. 21, pp. 2141 - 2144.

ESPEDAL, H.A. e WAHL, T. 1999. Satellite SAR oil spill detection using wind history information. *Int. Journal of Remote Sens.*, 20, pp. 49 - 65.

ESPEDAL, H.A.; WAHL, T.; JOHANNESSEN, J.A.; “*et al.*”. 1998. COASTWATCH'95: ERS-1/2 SAR detection of natural film on the ocean surface. *J. Geophys. Research*, 10, pp. 24969 - 24982.

ESPEDAL, H.A. 1998. “Detection of oil spill and natural film in the marine environment by spaceborne Synthetic Aperture Radar”. Dr. Scientist Thesis, Department of Physics, University of Bergen, 200pp.

EUROPEAN SPACE AGENCY - Disponível na Internet via <http://envisat.esa.int> Pesquisa em Outubro de 2007.

EVANS, D. L.; ALPERS, W.; CAZENAVE, A. “*et al.*” 2005. “Seasat - A 25 - year legacy of success”. *Remote Sensing of Environment* 94. Ed. Elsevier Academic Press, pp. 384 - 404.

FEINDT, F. V.; WISMANN, W. ALPERS e W. C. KELLER. 1986. Airborne measurements of the ocean radar cross section at 5.3 GHz as a function of the wind speed. *Radio Sci.*, 21, pp. 845 - 956.

FERRARO, G.; BASCHEK, B.; MONTPELLIER, G. DE, “*et al.*”. 2009. “On the SAR derived alert in the detection of oil spills according to the analysis of the EGEMP”. *Marine Pollution Bulletin*, In Press, Corrected Proof.

FERRARO, G.; BERNARDINI, A.; DAVID, M. "et al.". 2007. "Towards an operational use of space imagery for oil pollution monitoring in the Mediterranean basin: A demonstration in the Adriatic Sea". *Marine Pollution Bulletin*, vol. 54, Issue 4, pp. 403 - 422.

FINGAS, M. F.; BROWN, C. E.; GAMBLE, L. 1999. "The Visibility and Detectability of Oil Slicks and Oil Discharges on Water", In: *Proceedings of the Twenty-Second Arctic Marine Oilspill Program Technical Seminar, Environment Canada*, pp. 865 - 886, Ottawa, Ontario.

FINGAS, M. e BROWN, C. E. 1997. "Remote sensing of oil spills". *Sea Technology*, vol. 38, pp. 37 - 46.

FINGAS, M. e BROWN, C. E. 2000. "Review of Oil Spill Remote Sensing", In: *Spillcon 2000*, Darwin, Australia, 19 pp.

FISCELLA, B.; GIANCASPRO, A.; NIRCHIO, F. "et al.". 2000. Oil spill detection using marine SAR images. Int. **Journal of Remote Sensing**, 21, pp. 3561 - 3566.

FORGET, P.; BROCHE, P. 1996. "Slicks, Waves, and Fronts Observed in a Sea Coastal Area by an X-Band Airborne Synthetic Aperture Radar", *Remote Sensing of the Environment*, vol. 57, pp. 1 - 12.

FORTIN, M-J. e DALE, M. 2005. **Spatial Analysis: A Guide for Ecologists**. Cambridge (United Kingdom): Cambridge University Press.

FOUCHER, S. 2007. An Update on Mexico's Oil Production--The Rapid Collapse of Cantarell by the Numbers. Disponível na internet via <http://www.theoildrum.com/node/2226>. Pesquisa em Agosto de 2009.

FREITAS, A. A. 1964. **Data Mining and Knowledge Discovery with Evolutionary Algorithms**. New York, Springer.

FU, L.L. e HOLT, B. 1982. *Seasat views oceans and sea ice with synthetic aperture radar*. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Calif., JPL Publication 81 - 120. 200 pp.

GADE, M. e W. ALPERS. 1999. "Using ERS-2 SAR images for routine observation of marine pollution in European coastal waters", *Sci. Total Environ.*, 237-238, 441-448.

GADE, M.; ALPERS, W.; HÜHNERFUSS, H. "et al.". 1998. Imaging of biogenic and anthropogenic ocean surface films by the multifrequency/multipolarization SIR-C/X-SAR. *J. Geophys. Res.* 103, 18851-18866.

GADE, M.; ALPERS, W.; HÜHNERFUSS, H. "et al.".1998. "On the reduction of radar backscatter by oceanic surface films: Scatterometer measurements and their theoretical interpretation", *Remote Sensing of Environment*, vol. 66, nº.1, pp. 52 - 70.

GAGLIARDINI, D.A.; CLEMENTE-COLÓN, P.; BAVA, J.; "et al.". 2001. "Complementary use of SAR and thermal IR observations in the Brazil Malvinas confluence region", *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 27, nº. 6, pp.643 - 650.

GARCÍA, M.C.A. e BLAINE, E. C. 2004. **El Chapopotli**. Disponível na Internet via <http://www.pep.pemex.com/reporteannual2004/webreporte/recursos/html/chapopote/chapopote.htm>. Pesquisa em Janeiro de 2005.

GENOVEZ, P.; PALMEIRA, F. L. B.; BENTZ, C. M. 2009. "Detecção e Monitoramento de Óleo através da Utilização Integrada de Imagens de Satélite, Verificações de Campo e Modelagem de Deriva de Óleo: Uma abordagem Operacional", In: *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, pp. 5235 - 5242.

GENSKE, D. D. e HEINRICH, K. 2009. "A Knowledge-based fuzzy expert system to analyse degraded terrain", *Science Direct*, vol. 36, pp. 2459 - 2472.

GERSHENZON, O. N.; GERSHENZON, V. E.; OSHEYKO, S. V. 2007. "Integral solution for oil spill detection using SAR Data", In: *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, pp. 4873 - 4878, Florianópolis, 21-26 abr.

GLAGOWSKI, T. G.; JONES, K. L.; STAFFORD, M. E. 1996. "A New Method for Implementing Fuzzy Retrieval from a Spatial Database", *Information Sciences*, vol. 88, pp. 209 - 225.

GOODMAN, R.; QUINTERO-MARMOL, A.M.; BANNERMAN, K., "et al." 2005. "Spreading of oil and the concept of average oil thickness". *Projeto PEMEX, PEP-Relatório Interno*.

GOODMAN, R. e FINGAS, M.F. 1988. "The use of Remote Sensing for the determination of dispersant effectiveness". In: *Proceedings of the eleventh Arctic and Marine oilspill program technical seminar*, Environment Canada, Ottawa, Ontario, pp. 377 - 384.

GOODMAN, R. 1988. *Simple Remote Sensing System for the detection of oil on water*, Environmental Studies Research fund report Number 98, Ottawa, Ontario, 31 pp.

GORE, R.H. 1992. "The Gulf of Mexico". Pineapple Press, Inc. Sarasota Florida. 384p.

GRAJALES-NISHIMURA, J.M.; CEDILLO-PARDO, E.; ROSALES-DOMINGUEZ, C., "et al." 2000. "Chicxulub impact: The origin of reservoir and seal facies in the southeastern Mexico oil fields", ***Geology***, v. 28, pp. 307-310.

GUO, P. 2009. "Fuzzy data envelopment analysis and its application to location problems", ***Information Sciences***, vol. 179, pp. 820 - 829.

GULFBASE - RESOURCE DATABASE FOR GULF OF MEXICO RESEARCH - Disponível na Internet via <http://www.gulfbase.org/facts.php>. Pesquisa em setembro de 2009.

GUZMAN-VEGA, M.A. e MELLO, M.R. 1999. "Origin of Oil in the Sureste Basin, Mexico", ***AAPG Bulletin***, vol. 83, nº. 7 (Jul), pp. 1068 - 1095.

GUZMÁN, A.E. e MÁRQUEZ-DOMÍNGUEZ, B. 2001. "The Gulf of Mexico Basin South of the Border: The Petroleum Province of The Twenty-First Century". In: DOWNEY, M.W., THREET, J.C., MORGAN, W.A., USA. (eds), *Petroleum provinces of the twenty-first century: AAPG Memoir 74*, chapter 17, USA, The American Association of Petroleum Geologists.

HARRY, D. L. e LONDONO, J. 2004. "Structure and evolution of the central Gulf of Mexico continental margin and coastal plain, southeast United States", ***GSA Bulletin***, vol. 116, nº. 1-2, pp. 188 - 189.

HAGEN, A. 2003. "Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps", ***International Journal Geographical Information Science***, vol. 17, nº. 3, pp. 235 - 249.

HEDBERG, H.D. 1981. "Utilization of Hydrocarbon Seep Information (Foreword)". In: SCHUMACHER, D. & ABRAMS, M.A. (eds). *Hydrocarbon migration and its near-surface expression: AAPG Memoir 66*, pp. 1 - 14.

HENDERSON, F.M. e LEWIS, A.J. 1998. ***Principles and Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing***, 3ª ed., vol. 2, pp. 631 - 675. USA, John Wiley & Sons, Inc.

HENGL, T. 2006. "Finding the right pixel size." *Computers & Geosciences* 32, pp.1283 -1298.

HERNÁNDEZ, J. G.; CASTILLO, M. G.; RUIZ, J. Z. 2005. "Structural style of the Gulf of Mexico's Cantarell complex", ***The Leading Edge***,. 136 pp.

HEUVELINK, G. B. M. e BURROUGH, P. A. 2002. "Developments in statistical approaches to spatial uncertainty and its propagation". ***International Journal Geographical Information Science***, vol. 16, nº. 2, pp. 111 - 113.

HODGINS, D. O.; SALVADOR, S. S.; TINIS, S. E., "et al". 1997. "RADARSAT SAR For Oil Spill Response". ***Spill Science & Technology Bulletin***, vol. 3, nº. 4, pp. 241 – 246.

HOOD, K. C.; WENGER, L. M.; GROSS, O. P., "et al.". 2002. "Hydrocarbon Systems Analysis of the Northern Gulf of Mexico: Delineation of Hydrocarbon Migration Pathways Using Seeps and Seismic Imaging", In: SCHUMACHER, D. & LESCHACK, L. A., USA. (eds), *Surface exploration case histories: Applications of geochemistry, magnetics, and remote sensing*, 1ª ed., chapter 2, Oklahoma, USA, The American Association of Petroleum Geologists.

HOLLINGER, J.P.; PEIRCE, J.L.; POE, G.A. 1990. "SSM/I instrument evaluation". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(5), pp. 781 - 790.

HOLT, B. 2004. "SAR imaging of the ocean surface". In: *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual*, Washington, DC, JACKSON, C. R. e APEL, J. R. Cap. 2, pp. 25 - 80.

HONG, T.P.; KUO, C.S.; CHI, S.C. 1999. Mining association rules from quantitative data. *Intelligent Data Analysis*, (3), pp. 363 - 376.

HOWARD, A. S.; HATTON, B.; REITSMA, F.; LAWRIE, K. I. G. 2009. "Developing a geoscience knowledge framework for a national geological survey organisation". ***Computers & Geosciences***, vol. 35, pp. 820 - 835.

HU, C.; LI, X.; PICHEL, W. G., "et al". 2009. "Detection of natural oil slicks in the NW Gulf of Mexico using MODIS imagery". ***Geophysical Research Letters***, vol. 36, L01604.

HÜHNERFUSS, H. e GARRET, W.D. 1981. "Experimental sea slicks: Their practical applications and utilizations for basic studies of air-sea interactions", *Journal of Geophysical Research*, vol. 86, pp. 439 - 447.

HWANG, D.; KARIMI, H. A.; BYUN, D. W. 1998. "Uncertainty Analysis of Environmental Models within GIS Environments", ***Computers & Geosciences***, vol. 24, nº. 2, pp. 119 - 130.

ICAGA. Y. 2007. "Fuzzy evaluation of water quality classification", ***Ecological Indicators***, vol. 7, pp. 710 - 718.

IKEDA, M. e DOBSON, F.W. 1995. "**Oceanographic applications of remote sensing**", CRC Press, 492 pp.

IOANNIDIS, C. e VASSILAKI, D. 2008. Combined use of Spaceborne Optical and SAR Data - Incompatible Data Sources or a Useful Procedure? TS 1H - Developments in Scanner and Sensor Technologies. Stockholm, Sweden.

JACKSON, C. R. e APEL, J. R. 2004. ***Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual***, Washington, DC, U.S. Department of Commerce.

JENSEN, J. R. 2009. ***Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres***, São José dos Campos.

JIANG, H. e EASTMAN, J. R. 2000. "Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS", *International Journal Geographical Information Science*, vol. 14, n^o. 2, pp. 173 - 184.

JOHANNESSEN, O. M.; SANDVEN, S. JENKINS, A. D. 2000. "Satellite earth observation in operational oceanography", *Coastal Engineering*, vol. 41, pp. 155 - 176.

JOHANNESSEN, J.A.; SHUCHMAN, R.A.; DIGRANES, G.; "et al.". 1996. "Coastal ocean fronts and eddies imaged with ERS-1 synthetic aperture radar", *Journal of Geophysical Research*, vol. 101, n^o. C3, pp. 6651 - 6667.

JOHANNESSEN, O. M.; ESPEDAL, H. A.; JENKINS, A. D., "et al.". 1995. "SAR Surveillance of Ocean Surface Slicks". In: *Proceedings of the Second ERS Applications Workshop*, pp. 187 - 192, London, UK, 6-8 December.

JOHANNESSEN, J.A.; DIGRANES, G.; ESPEDAL, H. "et al.". 1994. *SAR ocean feature catalogue*. European Space Agency (ESA) Publications Division, Noordwijk, The Netherlands, ESA SP-1174. 106 pp.

JOHANNESSEN, J.A.; SHUCHMAN, R.A.; JOHANNESSEN, O.M. "et al.". 1991. "Synthetic aperture radar imaging of upper ocean circulation features and wind fronts", *Journal of Geophysical Research*, vol. 96, n^o. C6, pp. 10411 - 10422.

JONES, B. e MITCHELSON-JACOB, G. 1998. "On the interpretation of SAR imagery from the Sea Empress oil spill", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, n^o. 4, pp. 789 - 795.

KARATHANASSI, V.; TOPOUZELIS, K.; PAVLAKIS, P. "et al.". 2006. "An object-oriented methodology to detect oil spills", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, n^o. 23-24 (Dec), pp. 5235 - 5251.

KENNICUTT, M. C. e BROOKS, J. M. 1988. Relation between shallow sediment bitumens and deeper reservoired hydrocarbons, offshore Santa Maria basin, California, U.S.A.: *Applied Geochemistry*, vol. 3, pp. 573 - 582.

KERAMITSOGLU, I.; CARTALIS, C.; KIRANOUDIS, C. T. 2006. "Automatic identification of oil spills on satellite images", ***Environmental Modeling & Software***, vol. 21, pp. 640 - 652.

KIDDER, S.Q. e HAAR, T. H. V. 1995. **Satellite Meteorology an introduction**. Academic Press, 466 pp.

KORNACKI, A. S.; KENDRICK, J. W.; BERRY, J. L. 1994. "Impact of oil and gas vents and slicks on petroleum exploration in the deepwater Gulf of Mexico", ***Geo-Marine Letters***, vol. 14, pp. 160 - 169.

LAMMOGLIA, T. e SOUZA FILHO, C. R. de,. 2009. "Detecção e classificação de exsudações de hidrocarbonetos *off-shore* por espectroscopia e sensoriamento remoto", In: *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, pp. 3243 - 3251, Natal, 25-30 abr.

LAMMOGLIA, T. e SOUZA FILHO, C. R. de,. 2009. "Caracterização Espectral de petróleos de bacias produtoras brasileiras", In: *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, pp. 3235 - 3242, Natal, 25-30 abr.

LEE, E. S. 2000. "Neuro-Fuzzy Estimation in Spatial Statistics". ***Journal of Mathematical Analysis and Applications***, vol. 249, pp. 221 - 231.

LEIFER, I.; LUYENDYK, B.; BRODERICK, K. 2006 "Tracking an oil slick from multiple natural sources, Coal Oil Point, California". ***Marine and Petroleum Geology***, vol. 23, pp. 621 - 630.

LEWIS, A.J. e HENDERSON, F.M. 1998. Radar Fundamentals: the geoscience perspective. In: HENDERSON, F.M. & LEWIS, A.J. Principles & Applications Imaging Radar, Manual of Remote Sensing, 3^a Ed., vol. 2, Cap. 3, pp. 131 - 176.

LILLESAND, T.M e KIEFER, R.M. 1994. *Remote sensing and image interpretation*. New York, N.Y.: Academic Press, 1994, 392 pp.

LINK, W. K. 1952 "Significance of Oil and Gas Seeps in World Oil Exploration". ***AAPG Bulletin***, vol. 36.

LU, J. 2003. "Marine oil spill detection, statistics and mapping with ERS SAR imagery in south-east Asia". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, nº.15, pp. 3013 - 3032.

LUO, X. e DIMITRAKOPOULOS, R. 2003. "Data-driven fuzzy analysis in quantitative mineral resource assessment", *Computers & Geosciences*, vol. 29, pp. 3 - 13.

LYZENGA, D.R. 1991. "Interaction of short surface and electromagnetic waves with ocean fronts". *Journal of Geophysical Research*, vol. 96, nº. C6, pp. 10765-10772.

MACDONALD, I. R.; BOHRMANN, G.; ESCOBAR, E., "et al.". 2004. "Asphalt Volcanism and Chemosynthetic Life in the Campeche Knolls, Gulf of Mexico", *Science*, vol. 304, nº. 5673 (May), pp. 999 - 1002.

MACDONALD, I. R.; SAGER, W. W.; PECCINI, M. B. 2003. "Gas hydrate and chemosynthetic biota in mounded bathymetry at mid-slope hydrocarbon seeps: Northern Gulf of Mexico", *Marine Geology*, vol. 198, pp. 133 - 158.

MACDONALD, I. R.; LEIFER, I.; SASSEN, R., "et al". 2002. "Transfer hydrocarbons from natural seeps to the water column and atmosphere". *Geofluids*, vol. 2, pp. 95 - 107.

MACDONALD, I. R.; REILLY, J. F., JR.; BEST, S. E.; VENKATARAMAIAH, R.; SASSEN, R.; GUINASSO, N.L., JR. e AMOS, J. 1996. Remote sensing inventory of active oil seeps and chemosynthetic communities in the northern Gulf of Mexico. In *Hydrocarbon migration and its near-surface expression*. Edited by D.Schumaker and M.A. Abrams. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Okla. AAPG Memoir 66, pp. 27 - 37.

MACDONALD, J. A. 1991. *Automatic classification of satellite images in the textural domain using semivariograms*. M.Sc. dissertation, University of Nevada, Reno, Nev. 82 pp.

MDA - ESSENTIAL INFORMATION SOLUTIONS - Disponível na Internet via <http://gs.mdacorporation.com> . Pesquisa em Março de 2008.

MANN, P.; GAHAGAN, L.; GORDON, M. B. 2003. "Tectonic Setting of the World's Giant Oil and Gas Fields", In: HALBOUTY, M.T., USA. (eds), *Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1990-1999*, 1ª ed., chapter 2, Oklahoma, USA, The American Association of Petroleum Geologists.

MARTÍN, R. G. 1978. Northern and eastern Gulf of Mexico continental margin: stratigraphic and structural framework, In: BOUMA, A.H.; MOORE, G.T.& COLEMAN, J.M. (eds). *Framework, facies, and oil trapping characteristics of the upper continental margin: American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology 7*, pp. 21 - 42.

MARTIN, B. 2004. Introduction to ocean remote sensing. Cambridge University Press, In press.

MARTON, G. e R. T. BUFFLER. 1994. Jurassic reconstruction of the Gulf of Mexico Basin: **International Geology Review**, vol. 36, pp. 545 - 586.

MATA, A. e CORCHADO, J. M. 2009. "Forecasting the probability of finding oil slicks using a CBR system". **Expert Systems with Applications**, vol. 36, pp. 8239 - 8246.

MEDRANO, M. L. M. 1996. Subsistemas generadores de hidrocarburos en la Sonda de Campeche. Class notes of Curso de Geoquímica Organica, V Congreso Latinoamericano de Geoquímica Organica, 5 y 6 de Octubre, Cancún, México.

MIRANDA, F. P.; MARMOL, A. M. Q.; PEDROSO, E. C.; BEISL, C. H.; WELGAN, P. e MORALES, L. M. 2004. "Analysis of RADARSAT-1 data for offshore monitoring activities in the Cantarell Complex, Gulf of Mexico, using the unsupervised semivariogram textural classifier (USTC)". **Canadian Journal of Remote Sensing**, vol. 30, nº. 3, pp. 424 - 436.

MIRANDA, F. P.; PEDROSO, E. C.; BEISL, C. H. 2001a. "Detección de emanaciones naturales de petróleo". *Projeto PEMEX-MODULO 3*. Contrato PEP-S-62/2001, Relatório Interno.

MIRANDA, F. P.; LANDAU, L.; BENTZ, C. M., “*et al.*”. 2001. “Seepage slick detection in the Brazilian continental margin using RADARSAT-1 data”. In: *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Rio de Janeiro. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering.

MIRANDA, F. P.; PEDROSO, E. C.; BEISL, C. H. 2000. *Verificação do desempenho da metodologia de detecção de exsudações de óleo no Complexo de Cantarell, Baía de Campeche, Golfo do México (Meteo Programming)*. **Relatório interno, PETROBRAS. CENPES. DIVEX. CEGEQ**; 45f. (650 - 23465) (Projeto 600246), Rio de Janeiro.

MIRANDA, F. P.; FONSECA, L. E. N. e CARR, J.R. 1998a. “Semivariogram textural classification of JERS-1 (Fuyo-1) SAR data obtained over a flooded area of the Amazon rainforest. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, pp. 549 - 556.

MIRANDA, F. P.; BENTZ, C. M.; BEISL, C. H.; LORENZZETTI, J. A.; ARAÚJO, C. E. S., e SILVA, C. L., Jr. 1998b. “Application of unsupervised semivariogram textural classification of RADARSAT-1 data for the detection of natural oil seeps offshore the Amazon River mouth”. In *Proceedings of the RADARSAT ADRO Symposium*, 13–15 Oct., Montréal, Quebec. [CD-ROM].

MIRANDA, F. P.; BENTZ, C. M.; BEISL, C. H.; LORENZZETTI, J. A.; ARAÚJO, C. E. S. e SILVA, C. L., JR. 1998c. “Oil seep detection using RADARSAT-1 data in offshore frontier areas of northern Brazil”. In *Proceedings of the 6th Latin American Congress on Organic Geochemistry*, Oct, Margarita Island, Venezuela. ALAGO Congress Secretariat, Petrobras, Rio de Janeiro, Brazil [CD-ROM].

MIRANDA, F. P.; BENTZ, C. M.; BEISL, C. H.; LORENZZETTI, J. A.; ARAÚJO, C.E.S. e SILVA, C.L.JR. 1998d. “Application of the unsupervised semivariogram textural classifier (USTC) for the detection of natural oil seeps using RADARSAT-1 data obtained offshore the Amazon River mouth, Brazil”. In *Extended Abstracts Volume of the 1998 AAPG International Conference & Exhibition*, 8–11 Nov., Rio de Janeiro, Brazil. pp. 198 - 199.

MIRANDA, F. P.; FONSECA, L. E. N.; BEISL, C. H.; "et al.". 1997. Seasonal mapping of flooding extent in the vicinity of the Balbina Dam (Central Amazonia) using RADARSAT-1 and JERS-1 SAR data. In *Geomatics in the Era of RADARSAT (GER'97), Proceedings of the 13th International Symposium*, 26–30 May, Ottawa, Ont. Geomatics Canada, Natural Resources Canada [CD-ROM].

MIRANDA, F. P.; FONSECA, L.E.N.; CARR, J. R. e TARANIK, J. V. 1996. "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*, vol. 17, pp. 3523 - 3529.

MIRANDA, F.P. e CARR, J.R. 1994. "Application of the semivariogram textural classifier (STC) for vegetation discrimination using SIR-B data of the Guiana Shield, northwestern Brazil". *Remote Sensing Reviews*, vol. 10, pp. 155 - 68.

MIRANDA, F. P.; MACDONALD, J.A. e CARR, J.R. 1992. "Application of the semivariogram textural classifier (STC) for vegetation discrimination using SIR-B data of Borneo". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, pp. 2349 - 2354.

MIRANDA, F. P. 1990. *Reconnaissance geologic mapping of a heavily-forested shield area (Guiana Shield, northwestern Brazil)*. Ph.D. thesis, University of Nevada, Reno, Nev. 176 pp.

MIRANDA, F. P. e MACDONALD, J. A. 1989. "A variogram study of SIR-B data in the Guiana Shield, Brazil". In *Proceedings of the Image Processing '89 Conference*, 23–26 May, Reno, Nev. pp. 66 - 77.

MITNIK, L.; SHAN, K. e WANG, C. T. 2006. Estimation of average surface currents from ERS SAR images of oil-tank cleaning spills. In: GADE, M.; HÜHNERFUSS, H. & KORENOWSKI, G. (eds). New York. **Marine Surface Films**. pp. 315 - 336.

MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S. M. C. 2008. **Sal: Geologia e Tectônica, exemplos nas bacias brasileiras**. 1ª ed. São Paulo, Beca Edições Ltda.

MOON, W.M e AN, P. 1990. "Integration of geological and geophysical data using fuzzy set theory". *Proc ISME-AI'90 Symposium*, Tokyo, pp 98 - 103.

MOON, W.M, AN, P. e CHUNG 1990. "Representation and integration of geological, geophysical and remote sensing". *Proc ISME-AI'90 Symposium*. Tokyo, pp 162 - 166.

MOON, W.M, AN, P. e CHUNG 1990. "Representation and integration of geological, geophysical and remote sensing". *Proc ISME-AI'90 Symposium*. Tokyo, pp 162 - 166.

MONTGOMERY, D.R. 1985. "SEASAT Data Applications in Ocean Industries". In: *Monitoring Earth's Ocean, Land and Atmosphere from Space – Sensor, Systems and Applications*, pp. 419 - 439.

MORÁN-ZENTENO, D. 1994. ***Geology of The Mexican Republic***. 1ª ed. USA, The American Association of Petroleum Geologists.

MOREIRA, F. R. S.; ALMEIDA FILHO, R.; CÂMARA, G. 2003. "Spatial analysis techniques applied to mineral prospecting: An evaluation in the Poços de Caldas Plateau", ***Revista Brasileira de Geociências***, vol. 33, (2-Suplemento), pp. 183 - 190.

MOREIRA, F. R. S.; ALMEIDA FILHO, R.; CÂMARA, G. 2002. "Aplicação da abordagem de Importação Semântica (IS) para caracterização de contatos litológicos em modelos de Inferência Espacial", ***Revista da Escola de Minas***, vol. 55, nº. 4 (Out. Dez.), pp. 301 - 306.

MOUCHOT, M. C. e GARELLO, R. 1998. "SAR for Oceanography". In: LEWIS, A. J. & HENDERSON. F. M. (eds). 3ª ed., New York, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. pp. 631 - 675.

NICOLETTI, M. C. e CAMARGO, H. A. 2004. ***Fundamentos da Teoria de Conjuntos Fuzzy***. São Carlos, EdUFSCar.

NIKRAVESH, M. e AMINZADEH, F. 2001. "Past, present and future intelligent reservoir characterization trends". ***Journal of Petroleum Science and Engineering***. vol. 31, pp. 67 - 79.

NOASSIS – NOAA SATELLITE AND INFORMATION SERVICE – Disponível na Internet via <http://noaasis.noaa.gov/> Pesquisa em Março de 2009.

OCHADLICK, A.R. JR.; CHO, P. e EVAN-MORGIS, J. 1992. "Synthetic aperture radar observations of currents colocated with slicks". **Journal of Geophysical Research**, vol. 97, n°. C4, pp 5325 - 5330.

ONSTOTT, R. e RUFENACH, C. 1992. "Shipboard Active and Passive Microwave Measurement of Ocean Surface Slicks off the Southern California Coast". **Journal of Geophysical Research**, vol. 97, n°. 4, pp. 5315 - 5323.

ORANGE, D.; HOVLAND, M.; GREENE, G. 2001. "The Implications of Hydrocarbon Seepage, Gas Migration and Fluid Overpressures to Both Exploration and Geohazards - from Frontier Exploration to Slope Failure Risk Assessment". *AAPG Hedberg Conference, Vancouver, BC, Canada, 16-19 September.*

O' REILLY, J. E; MARITORENA, S.; O' BRIEN, M.C. "et al". 2002. "SeaWiFs Postlaunch Calibration and Validation Analyses". In: *NASA Tech. Memo. 2000 - 2206892*, Parte 3, vol. 11. In: HOOKER, S.B & FIRESTONE, E.R. (eds), Greenbelt, Md, NASA Goddard Space Flight Center.

PADILLA Y SÁNCHEZ, R. J. 2007. "Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México". **Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana**, vol. 59, n°. 1, pp. 19 - 42.

PEAKE, W. H. e OLIVER, T. L. 1971. *Response of Terrestrial Surfaces at Microwave Frequencies*, Air Force Avionics Lab Report # TR - 70 - 301, Columbus: Ohio State Univ.

PEDROSO, E. C.; BEISL, C.H.; LANDAU, L. "et al.". 2006. Radar remote sensing for oil detection in marine Environments In: *Offshore Arabia Conference & Exhibition*, vol.1.

PEDROSO, E. C.; MIRANDA, F. P.; MENDOZA, A. "et al.". 2004. "Satelite environmental monitoring of oil spills in the South Gulf of Mexico". In: *Offshore Technology Conference*, Houston - Texas. Offshore Technology Conference.

PEDRYCZ, W. e GOMIDE, F. 1998. **An introduction to fuzzy sets: analysis and design**. London, MIT Press.

PEMEX - Petróleos Mexicanos - Disponível na Internet via www.pemex.com. Pesquisa em Abril de 2005.

PETERS, K.E. e FOWLER, M.G. 2002. "Applications of petroleum geochemistry to exploration and reservoir management". *Organic Geochemistry*. Volume 33, Issue 1, pp 5-36.

PLANT, W. J. 1990. "Bragg scattering of electromagnetic waves from the air/sea interface". *Surface Waves and Fluxes*. GEERNAERT, G. L. & PLANT, W. J. (eds). vol. 2, Kluwer Academic Publishers, pp 41 - 108.

PORCELLO, L. J.; MASSEY, N. G.; INNES, R. B. e MARKS, J. M. 1976. "Speckle Reduction in Synthetic Aperture Radar". *Journal of Optical Society of America*. vol. 66, nº 11, pp. 1305 - 1311.

POURVAKHSHOURI, S. Z.; SHATTRI, B. M.; ZELINA, Z. I., "et al.". 2006. "Decision Support System in Oil Spill Management". In: *Proceedings ISPRS Technical Commission II Symposium*, pp. 93 - 96, Vienna, 12 - 14 July.

QUINTERO-MÁRMOL, A. M.; PEDROSO, E.C.; BEISL, C.H., "et al.". 2005. "Operational Applications of RADARSAT-1 for the Monitoring of Natural Oil Seeps in the South Gulf of Mexico". *Proceedings of the IGARSS International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Seoul, South Koorea, CD-ROM.

QUINTERO-MÁRMOL, A. M.; MIRANDA, F. P.; PEDROSO, E. C., "et al.". 2004. "Cantarell oil seep characterization using a satellite monitoring program in the South Gulf of Mexico". In: *International Conference and Exhibition*, Cacun. American Association of Petroleum Geologists - AAPG.

QUINTERO-MÁRMOL, A. M.; MIRANDA, F. P.; PEDROSO, E. C., "et al.". 2003. "Operational application of RADARSAT-1 for the monitoring of natural oil seeps in the South Gulf of Mexico". In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Toulouse. IEEE.

QUINTERO-MÁRMOL, A. M.; CASTILLO, O. L.; MIRANDA, F. P. 2002. "Diseño, evaluación y aplicación operativa de tecnología satelital para el monitoreo de las emanaciones naturales en el Golfo de México". In: *Radarsat AIPM 2002*.

RADARSAT-2 - A NEW ERA IN SAR - Disponível na Internet via <http://www.radarsat2.info>. Pesquisa em Setembro de 2008.

RADARSAT INTERNATIONAL (RSI). 1996. "RADARSAT Illuminated. Your Guide to Products & Services", RADARSAT user guide produced by RSI, Richmond, B.C., Canadá.

RANEY, R.K.; LUSCOMBE, A.P.; LANGHAM, E.J. e AHMED, S. 1991. "RADARSAT". *Proc. IEEE*, 79, pp 839 - 849.

RANEY, K. 1998. "Radar fundamentals: Technical perspective". In: HENDERSON, F. M. & LEWIS, A. J. (eds). *Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing*, 3^a ed., New York, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, cap. 2, pp.9 - 130.

REILLY, JR., J. F.; MACDONALD, I. R.; BIEGERT, E. K. "et al.". 1996. "Geologic controls on the distribution of chemosynthetic communities in the Gulf of Mexico". In: SCHUMACHER, D. & ABRAMS, M. A. (eds). *Hydrocarbon migration and its near-surface expression: AAPG Memoir 66*, pp. 39 - 62.

REMOTE SENSING SYSTEMS - Disponível na Internet via <http://www.remss.com/> Pesquisa em Abril de 2008.

RESHMIDEVI, T. V., ELDHO, T. I., JANA, R. 2009. "A GIS-integrated fuzzy rule-based inference system for land suitability evaluation in agricultural watersheds". ***Agricultural Systems***, vol. 101, pp. 101 - 109.

REES, W. G. e SATCHELL, M. J. F. 1997. "The Effect of Median Filtering on Synthetic Aperture Radar Images". *Int. J. Remote Sensing*, vol.18, nº 13, pp.2887 - 2893.

RICHARDS, J.A. e JIA, X. 1999. *Remote sensing digital image analysis - An Introduction*, Springer-Verlag, 363 pp.

ROBINSON, I.S. 1985. *Synthetic Aperture Radar*. In *Satellite Oceanography. An introduction for Oceanographers and Remote Sensing Scientists*, Wiley & Sons, pp. 334 - 394.

RODRIGUEZ, M.R.; BANNERMAN, K.; CÁCERES, R.G., "et al.", 2007. "SAR derived ocean surface wind and meteo-oceanographic buoy data". *Proceedings of the IGARSS (International Geoscience and Remote Sensing Symposium)*, Barcelona, Spain, CD-ROM.

ROSTIROLLA, S. P. 1997. "Alguns aspectos da avaliação de favorabilidade em geologia exploratória". *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 27 (Dez), pp. 327 - 338.

RUBIN, T. 1989. "Analysis of radar image texture with variograms and other simplified descriptors". In *Proceedings of the Image Processing '89 Conference*, 23 - 26 May, Reno, Nev. pp. 185 - 195.

RUD, G. & GADE, M. 2000. "Using multi-sensor data for algae bloom monitoring". In: *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS' 2000)*, Honolulu, IEEE, Pisacataway, USA.

SAATY, T.L. e VARGAS, L.G. 1991. *Prediction, Projection and Forecasting*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 251pp.

SABINS, F.F. 1999. "Remote Sensing - Principles and Applications". Third Edition, W.H. Freeman and Company, New York.

SALISBURY, J. W.; D'ARIA, D. M.; SABINS JR., F. F. 1993. "Thermal Infrared Remote Sensing of Crude Oil Slicks". *Remote Sensing of Environment*, vol. 45, pp. 225 - 231.

SANDRI, S. e CORREA, C. 1999. "Lógica nebulosa". V Escola de Redes Neurais, Promoção: Conselho Nacional de Redes Neurais, pp. c73 – c90 - ITA, São José dos Campos – SP.

SANDWELL, D.T.; SMITH W.H.F.; GILLE S.; "et al. 2001. "Bathymetry from space: white paper in support of a high-resolution, ocean altimeter mission". *Scripps Institution of Oceanography*, NOAA, La Jolla, California.

SANDWELL, D.T. e SMITH, W.H.F.1992. Global marine gravity from ERS-1, Geosat and Seasat reveals new tectonic fabric. *EOS Trans. AGU*, 73, pp. 133.

SASSEN, R. 1998. "Sea-Floor Seeps and the Framework of Oil Generation and Migration in the Gulf of Mexico Slope". In: *AAPG Hedberg Research Conference*, Galveston, Texas.

SCANTLAND, S. e BIEGERT, E.K. 1996. Radar locates offshore oil slicks. *Earth Observation Magazine*, vol. 5, pp. 30 - 32.

SCHUMACHER, D. e ABRAMS, M. A. 1996. ***Hydrocarbon Migration and Its Near-Surface Expression***. 1^a ed. USA, The American Association of Petroleum Geologists.

SCOTT, J.C. 1986. "Surface films in oceanography". *ONRL Workshop Report c-11-86*, 19 pp.

SIQUEIRA, J. R. e MACHADO, L. A. T. 2004. Influence of the frontal systems on the day-to-day convection variability over South America. *J. Climate*, 17, pp.1754 – 1766.

SOLBERG, A. H. S.; STORVIK, G.; SOLBERG, R., "et al.". 1999. "Automatic Detection of Oil Spills in ERS SAR Images". ***IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing***, vol. 37, nº. 4, pp. 1916 - 1924.

SOUZA, R. B. 2005. ***Oceanografia por satélite***. Organizador. São Paulo: Oficina de textos. 336 pp.

STAPLES, G.C. e HODGINS, D.O. 1998. "RADARSAT-1 emergency response for oil spill monitoring". In *Proceedings of the 5th International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, 5 - 7 Oct., San Diego, Calif. Environmental Research Institute of Michigan (ERIM) (now Altarum), Ann Arbor, Mich.

STOVER, S. C.; GE, S.; WEIMER, P., "et al.". 2001. "The effects of salt evolution, structural development, and fault propagation on Late Mesozoic-Cenozoic oil migration: A two-dimensional fluid-flow study along a megaregional profile in the northern Gulf of Mexico Basin". ***AAPG Bulletin***, vol. 85, nº. 11, Nov., pp. 1945 - 1966.

STRINGER, W. J.; DEAN, K. G.; GURITZ, R. M., "et al.". 1992. "Detection of petroleum spilled from the MV Exxon Valdez". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, nº.13, pp. 799 - 824.

STROPPIANA, D.; BOSCHETTI, M.; BRIVIO, P. A., "et al.". 2009. "A fuzzy anomaly indicator for environmental monitoring at continental scale". *Ecological Indicators*, vol. 9, pp. 92 - 106.

THRASHER, J.; FLEET, A. J.; HAY, S. J. "et al.". 1996a. "Understanding geology as the key to using seepage in exploration: spectrum of seepage styles". In: SCHUMACHER, D. & ABRAMS, M. A. (eds). *Hydrocarbon migration and its near-surface expression: AAPG Memoir 66*, pp. 223 – 241.

THOMPSON, K.R.; KELLEY, D.E.; STURLEY, D.; TOPLISS, B.; LEAL, R. 1998. "Nearshore circulation and synthetic aperture radar: an exploratory study", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, nº.6, pp. 1161 - 1178.

THUNDERBOLTS.INFO - Disponível na Internet via <http://www.thunderbolts.info/tpod/2006/arch06/060130crater.htm>. Pesquisa em Setembro de 2008.

TOMIYASU, K. 1978. "Tutorial Review of Synthetic Aperture Radar (SAR) with Applications to Imaging of the Ocean Surface". *Proceedings Sensing*, vol. 3, nº 1, pp. 63 - 68.

TRAN, L. e DUCSKSTEIN, L. 2002. "Comparison of fuzzy numbers using a fuzzy distance measure". *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 130, pp. 331 - 341.

TUCKER, M. J. 1983. "The effect of a Moving Sea Surface on SAR Imagery". In: *Satellite Microwave Remote Sensing*. ALLAN, T.D.(ed.), pp. 146 - 1154.

UCHUPI, E. e EMERY, K. O. 1968. "Structure of continental margin off Gulf Coast of the United States The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, vol. 7, pp. 1162 – 1193.

ULABY, F.T.; MOORE, R.K. e FUNG, A.K. 1986. *Microwave Remote Sensing*, Volumes I, II e III, Artech House, Norwood, MA, 2162 pp.

ULABY, F.T.; MOORE, R.K. e FUNG, A.K. 1982. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*. vol 2. Addison-Wesley, pp. 457 - 1064.

VALARMOV, S. M. e GOTO, S. 2002. "Assimilation of Remote Sensing Information in the Oil Drift Model". In: *Seventh International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, Miami, Florida, May.

VALENZUELA, G.R. 1978. "Theories for the Interaction of Electromagnetic and Ocean Waves - A Review". *Boundary Layer Meteorology*, 13, pp. 61 - 85.

VAN DER MEIJDE, M.; VAN DER WERFF, H. M. A.; JANSMA, P. F.; VAN DER MEER, F. D.; GROOTHUIS, G. J. 2009. "A spectral-geophysical approach for detecting pipeline leakage". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 11, pp. 77 - 82.

VAN DER SANDEN, J. J. e ROSS, S. G. 2001. Applications potential of RADARSAT-2: A preview. Report for the Canadian Space Agency. Ottawa: CCRS. 80 pp.

VAN DER SANDEN, J. J.; BJERKELUND, C. A.; CHUNCHUZOV, I., "et al". 1999. "Radarsat Sar for Imaging Coastal Zones and Oceans: an update of CCRS Activities". In: *21th Canadian Symposium on Remote Sensing*, Ottawa, Canada, 21-24 June.

VESECKY, J. F. e STEWART, R. H. 1982. Observations of the sea surface phenomena using imagery from the Seasat synthetic aperture radar: An assessment. *Journal of Geophysical Research*, 87, pp. 3397 - 3430.

VILLALÓN, R.M. 1998. *Geoquímica de reservatórios no Campo de Taratunich, área marinha de Campeche, México*. Dissertação de Mestrado, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), 134 pp.

VINIEGRA-O, F. 1981. "Great carbonate bank of Yucatán, Southern Mexico". *Journal of Petroleum Geology*, vol. 3, pp. 247 - 278.

WALD, L. 1999. "Definitions and terms of reference in data fusion". In: Baltasvias, CSATHO, B.; HAHN, M.; KOCH, B.; SIEBER, A.; WALD, L. & WANG, D. (eds), *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, pp. 2 - 6.

WANG, F. 1989. "A fuzzy expert system for remote sensing image analysis". PROC. IGARSS '89, Inst. Electr. Eletron. Eng., CH2768-0, pp. 848 - 851.

WATKINS, J.S.; BRADSHAW, B.E.; HUH, S.; LI, R. e ZHANG, J. 1996. "Structure and distribution of growth faults in the Northern Gulf of Mexico OCS". In: *The Gulf Coast Association of Geological Societies*, pp. 63 - 77.

WEIMER, P.; ROWAN, M.G.; MCBRIDE, B.C., "et al.".1998. "Evaluating the Petroleum Systems of the Northern Deep Gulf of Mexico Through Integrated Basin Analysis: An Overview¹". **AAPG Bulletin**, vol. 82, n°. 5B (May 1998 Part B), pp. 865 - 877.

WERLE, D. e TITTLE, B. 1997. "Using RADARSAT-1 SAR Imagery to Monitor the Recovery of the *Irving Whale* Oil Barge", In: *Proceedings of Geomatics in the Era of RADARSAT – GER 97*, Ottawa, 25 - 30 May.

WEY, Y. e WU, J. 1992. "In situ measurements of surface tension, wave damping, and wind properties modified by natural films". **Journal of Geophysics Research**, vol. 97, n°. C4, pp 5307 - 5313.

WILLIAMS, A. e LAWRENCE, G. 2002. "The role of satellite seep detection in exploring the South Atlantic's ultradeep water". In: *Surface exploration case histories: Applications of geochemistry, magnetics and remote sensing*. SCHUMACHER, D. & LESCHACK, L.A. (eds). AAPG Studies in Geology n°. 48 and SEG Geophysical References Series n°. 11, pp. 327 - 344.

WANG, F. e HALL G. B. 1996. "Fuzzy representation of geographical boundaries in GIS". **International Journal of Geographical Information Systems**, vol. 10, n° 5, pp.573 - 590.

WISMANN V.; GADE M.; ALPERS, W.; HÜHNERFUSS, W H. 1998. "Radar signatures of marine mineral oil spills measured by an airborne multi-frequency radar". **International Journal of Remote Sensing**, vol. 19, n°. 18, pp. 3607 - 3623.

YERGIN, D. A. 1991. **The Prize: Pocket Books, Pubs-Paramount Communications Co.**, 885 pp.

ZADEH, L.A. 1965. **Fuzzy Sets**: Inst. Electr. Eletron. Eng., Information and Control vol. 8, nº. 3 338 - 353.

ZADEH, L.H. e YAGER, R.R. 1991. Uncertainty in knowledge bases. Springer-Verlag, Berlim.

ZARGHAMI, M. e SZIDAROVSKY, F. 2009. "Revising the OWA operator for multi criteria decision making problems under uncertainty", **European Journal of Operational Research**, vol. 198, pp. 259 - 265.

ZATYAGALOVA, V.; IVANOV, A. Y.; GOLUBOV, B. N. 2007. "Aplication of Envisat Imagery for Mapping and Estimation of Natural Oil Seeps in the South Caspian Sea". In: *Proceedings of Envisat Symposium 2007*, Montreux, Switzerland, 23-27 April.

ZIMMERMANN, H. 1985. **Fuzzy Set Theory and its application**: Kluwer Academic Publ.

ZUMBERGE, J.; ILLICH, G.; PRATSCH, C., "et al". 1998. "Origin of Oil in the Gulf of Mexico: Exploration Significance". In: *AAPG Hedberg Research Conference*, Galveston, Texas.

ANEXO 1 - Detecção de hidrocarbonetos por sensoriamento remoto de microondas

A1.1. Trabalhos Anteriores

O óleo detectado em ambientes marinhos é de grande relevância para aspectos políticos, econômicos, científicos e públicos. Estimativas apontam que 22% da poluição dos mares é causada por vertimento de óleo por embarcações em rotas operacionais (Ferraro *et al.*, 2007). Há também uma importante parcela atribuída aos derrames de óleo, comuns em regiões produtoras de petróleo, e até mesmo às exsudações de óleo observadas em grande parte das bacias sedimentares marítimas mundiais.

A presença de óleo na superfície do mar causa a suavização das ondas capilares (“*Bragg Waves*”) causadas pelo vento, que modelam a interação da superfície do mar com a energia do radar. Como resultado, o retorno de sinal para a antena será inferior e as regiões representadas pela presença de óleo aparecerão com tonalidade escura nas imagens. Usualmente, quanto mais curto for o comprimento de onda utilizado para a detecção de óleo, maior será a redução do retroespalhamento (Hühnerfuss e Garret, 1981; Hühnerfuss *et al.*, 1983 e Hühnerfuss e Alpers, 1982 *in* Mouchot e Garello, 1998; Alpers e Hühnerfuss, 1988; Wey e Wu, 1992; Lammoglia e Souza Filho, 2009; Pourvakhshouri, *et al.*, 2006). Tal fenômeno se explica pelo fato de que ondas capilares curtas são mais intensamente afetadas por filmes de óleo.

Apesar dos inúmeros fatores inerentes à configuração de sistemas de radar possibilitar a detecção de óleo na superfície do mar, este processo ainda é intimamente relacionado às condições meteorológicas e oceanográficas reinantes no exato momento da aquisição do dado SAR. Tais condições irão limitar a detectabilidade ou desencadear fenômenos naturais responsáveis pela geração de feições com assinatura textural semelhante ao óleo (*look-alikes*). O entendimento da teoria relacionada à detecção de óleo da superfície do mar por sensoriamento remoto de microondas deve ser resultado da análise integrada de diferentes disciplinas, tais como a física dos sistemas orbitais SAR, as interações entre a energia de microondas e a superfície do mar, química de filmes de óleo, além das propriedades dinâmicas dos oceanos (Bentz *et al.*, 2005; Genovez *et al.*, 2009).

O óleo consiste em uma mistura complexa de compostos orgânicos, em sua maioria hidrocarbonetos, que podem conter enxofre, oxigênio, nitrogênio, níquel, ferro e

cromo. Após o refino, na geração de produtos derivados (óleos combustíveis, diesel, gasolina, etc.), muitas destas substâncias são removidas. Cada tipo de óleo (*crude oil*) e produto derivado (*refined oil*) possui propriedades químicas e físicas particulares que irão determinar o comportamento do derrame ou exsudação. Quando o óleo entra em contato com a superfície do mar a partir de uma fonte móvel ou fixa, os seguintes processos ocorrerão: (a) espalhamento (*spreading*); (b) deriva (*drift*); (c) dispersão (*dispersion*) ; (d) evaporação (*evaporation*); (e) emulsificação (*emulsification*); (f) submersão (*submerging*); (g) foto-oxidação (*photo-oxidation*); (h) sedimentação (*sedimentation*) e; (i) biodegradação (*biodegradation*). Os últimos três processos são bastante lentos e se tornam importantes apenas para derrames ou exsudações presentes na superfície por vários dias (Espedal *et al.*, 1998).

As imagens produzidas por radares de abertura sintética (SAR) são sensíveis a aspectos texturais, sobretudo para aplicação em oceanografia, onde se busca, dentre outras feições, filmes de óleo na superfície do mar. O mecanismo físico que permite a detecção de óleo na superfície do oceano é descrito pela suavização ou supressão das ondas capilares (“*Bragg Waves*”) que consistem na informação mais importante do retroespalhamento da energia do radar. O retroespalhamento *Bragg* também pode ser utilizado para outras aplicações tais quais a determinação da altura de ondas, campo superficial de ventos (intensidade e direção), batimetria (Johannessen *et al.*, 1994), além de outras feições superficiais (Johannessen *et al.*, 1995).

Vesecky e Stewart (1982) detectaram a presença de óleo na superfície do mar em imagens SAR obtidas pelo satélite SeaSAT. Evans *et al.* (2005) resumiram os 25 anos de legado deixado para a ciência e indústria dos sistemas de radares de abertura sintética.

Onstott e Rufenach (1992) utilizaram dados de sensoriamento de microondas ativo e passivo a partir de sensores instalados em um navio a fim de caracterizar feições alinhadas na superfície do mar (*slicks*).

Stringer *et al.* (1992) reportaram a utilização de sensoriamento remoto ótico na detecção do trágico derrame causado pela embarcação “Exxon Valdez”, em 1989, no Golfo do Alaska. Outro trabalho sobre o fatídico acidente na costa do Alaska foi realizado por El-Raey *et al.* (1996).

Salisbury *et al.* (1993) descreveram a utilização de sensoriamento remoto do infravermelho termal de óleos de diferentes densidades (*API gravities*) e composições, não detectando variações significativas na assinatura espectral das amostras consideradas.

Johannessem *et al.* (1996) apresentaram um modelo conceitual de classificação de feições oceanográficas superficiais denominadas “*ocean surface slicks*”. Os dados ERS-1 SAR demonstram por si só a habilidade na detecção destas feições que podem estar relacionadas a filmes naturais de óleo (*oil seeps*), à poluição causada pelo homem (*oil spills*), ou até mesmo aos conhecidos falsos alvos (*look-alikes*), sendo estes representados por fenômenos naturais (vórtices, correntes, ondas internas, dentre outros fatores). Trabalhos correlatos podem ser encontrados em Lu (2003) e DiGiacomo *et al.* (2004).

Forget e Broche (1996) utilizaram o sistema SAR aerotransportado E-SAR (DLR-Alemanha) que opera na banda X (9,6 GHz) com polarização HH, para aplicações em regiões costeiras, objetivando a caracterização de ondas e correntes superficiais através da distribuição de padrões e propriedades físicas de feições superficiais.

Hodgins *et al.* (1997) avaliam a potencialidade do sistema SAR a bordo do satélite RADARSAT-1 para monitoramento de derrames de óleo no mar do Japão. Trabalhos correlatos foram desenvolvidos por Staples e Holgins (1998), Varlamov e Goto (2002).

Werle e Tittley (1997) utilizaram os dados RADARSAT-1 para aplicações em monitoramento ambiental. Já Biegert *et al.* (1997) avaliaram as potencialidades do mesmo satélite para aplicações exploratórias no Golfo do México através do programa GOSAP (*Gulf Offshore Satellite Applications Project*).

Espedal (1998) analisou os vários aspectos relacionados à detecção de feições oceânicas superficiais a partir de imagens ERS SAR. A Tabela A1.1 ilustra as características de derrames de óleo e assemelhados (*look-alikes*) em imagens ERS.

Wismann *et al.* (1998) estudaram a assinatura de derrames de óleo a partir de um sistema SAR multifrequência e aerotransportado utilizando as bandas L (30 -15 cm), S (15-7,5 cm), C (7,5-3,75 cm), X (3,75-2,40 cm) e Ku (2,40-1,67 cm). O retroespalhamento medido a partir de derrames controlados mostrou que as bandas Ku, X e C, com os comprimentos de onda mais curtos, apresentam índices maiores de

suavização das ondas capilares e, conseqüentemente, valores de retroespalhamento menores.

Jones e Mitchellsou-Jacob (1998) propuseram um método de monitoramento de derrames de óleo através da simulação do espectro de ondas e modelagem de ventos superficiais. Esta técnica foi avaliada no derrame de óleo da embarcação “Sea Empress” na costa do Reino Unido, em fevereiro de 1996.

Van der Sanden *et al.* (1999) analisaram as potencialidades do pacote “OMW” (*Ocean Monitoring Workstation, Satlantic SA*) na extração de informações relacionadas ao estado do mar. Além do mapeamento de fenômenos atmosféricos a partir de dados RADARSAT-1, eles discutiram os novos parâmetros que seriam incluídos no satélite RADARSAT-2.

A partir de 1999, técnicas automáticas e semi-automáticas de detecção de derrames de óleo começam a surgir na literatura específica. Solberg *et al.* (1999) apresentaram um método probabilístico da combinação entre medições estatísticas e cálculos de densidade a partir de regras de associação. Trabalhos correlatos podem ser encontrados em Arvelina *et al.* (2001) e Keramitsoglou *et al.* (2006). Estes descreveram um sistema automático de classificação de derrames de óleo e falsos alvos presentes em imagens SAR baseando-se em técnicas de lógica *Fuzzy*.

Fingas *et al.* (1999) e Fingas e Brown (2000) analisaram parâmetros que influenciam na visibilidade e detectabilidade de derrames de óleo em ambiente marinho.

Brown *et al.* (2000) estudaram técnicas para a medição da espessura de manchas de óleo a partir do sensor aerotransportado denominado LURSOT (*Laser Ultrasonic Remote Sensing of Oil Thickness*).

Tabela A1.1 - Resumo de derrames de óleo e assemelhados (look-alikes), aspectos e limitações em imagens ERS SAR. Fonte:Espedal, 1998.

Fenômeno	Assinatura na imagem SAR	Localização Geográfica	Limitações do Tempo	Retroespalhamento na feição (dB)	Suavização (<i>dampening</i>) Δ dB (**)
Vazamento (<i>Oil spill</i>)	Feições lineares escuras adjacentes a navios ou plataformas (<i>black slicks</i>)	Rotas de navios ou áreas de plataformas	$IV \leq 15 \text{ m.s}^{-1}$	-10.9 e -10.8 a -24	6 a 13
Filme natural (<i>Natural film</i>)	Feições que se formam através da interação com correntes	Regiões costeiras ou áreas com zonas de ressurgência	Visível em $IV \leq 7 \text{ m.s}^{-1}$	-6.7 a -24	8 a 11.3
Gelo (<i>Grease ice</i>)	Grandes domínios com tonalidade escura	Regiões adjacentes a corpos de gelo (<i>ice edge</i>) ou em águas abertas	Inverno ou noites frias em áreas adjacentes a corpos de gelo (<i>ice edge</i>)	-14 a -24	14 a 19
Limite da intens. do vento (<i>Threshold wind speed</i>)	Grandes domínios com tonalidade escura	Qualquer localidade	$IV \leq 3 \text{ m.s}^{-1}$	-18 a -24	9.6 a 18.5
Áreas costeiras protegidas do vento (<i>Wind sheltering by land</i>)	Regiões próximas à costa com tonalidade escura	Regiões próximas à costa	Até mesmo em áreas com alta intensidade de ventos (15 m.s^{-1})	-18 a -24	7.7 a 20.6
Células de chuva (<i>rain cells</i>)	Células brilhantes com centros de tonalidade escura	Regiões sub-tropicais	Chuvas fortes e ventos fortes	-6 a -24	0.6 a 6.7
Ondas internas (<i>Internal waves</i>)	Série com feições lineares escuras e claras intercaladas	Águas rasas	$IV \leq 8 \text{ m.s}^{-1}$	-8.9 e -11	0.8 a 6.0
Zonas de cisalhamento (<i>Shear zones</i>)	Assinaturas lineares estreitas, curvas e com tonalidades claras ou escuras	Áreas com correntes severas	$IV \leq 10 - 12 \text{ m.s}^{-1}$	-6.1 e -12.9	1.4 a 6.2
Exsudação de óleo (<i>Natural seepage</i>)	feições em formatos de gotas ou feições lineares curvas com tonalidade escura	Regiões próximas a falhas, domos de sal ou acumulações	$IV \leq 12 \text{ m.s}^{-1}$ (*)	-5 e -24 (*)	0.6 a 12 (*)

IV = Intensidade do vento

* Valores assumidos; não há muitos casos confirmados

** Suavização Δ dB = $\sigma_{\text{background}}[\text{dB}] - \sigma_{\text{slick}}[\text{dB}]$

Quintero-Mármol *et al.* (2002) avaliaram aspectos operacionais da detecção de derrames e exsudações de óleo na região da Sonda de Campeche, Región Marina Noreste, através de imagens do satélite RADARSAT-1. Neste trabalho, os autores utilizam técnicas de classificação textural por semivariogramas. Trabalhos correlatos são encontrados em Bentz *et al.* (2000); Miranda *et al.* (2001); Quintero-Mármol *et al.* (2003); Pedroso *et al.* (2004); Cerqueira *et al.* (2004); Almeida-Filho *et al.* (2004); Quintero-Mármol *et al.* (2004); Quintero-Mármol *et al.* (2005); Goodman *et al.* (2005); Pedroso *et al.* (2006); Rodriguez *et al.* (2007); Bannerman *et al.* (2009).

Brekke e Solberg (2005) publicaram estudo sobre o estado da arte da detecção de derrames de óleo nos mares que circundam os continentes. São discutidos os diferentes sensores SAR e a detectabilidade de derrames de óleo sob condições e parâmetros distintos. Especial atenção é dada aos métodos manuais e automáticos de discriminação entre derrames de óleo e falsos alvos. Trabalhos correlatos são realizados por Karathanassi *et al.* (2006); Gershenson *et al.* (2007); Mata e Corchado (2009); Van der Meijde *et al.* (2009).

Inúmeros autores publicaram estudos sobre a detecção de exsudações de óleo no mar por sensoriamento remoto. Apesar desta técnica consistir em um método indireto de investigação, sua utilização tem sido cada vez maior nas etapas iniciais de atividades exploratórias da indústria do petróleo. As principais vantagens desta técnica residem: (i) na possibilidade de cobertura sinóptica, (ii) aquisição de dados em condições atmosféricas adversas e períodos diurnos ou noturnos, (iii) no baixo custo da tecnologia e (iv) na redução do risco geológico em regiões de fronteira exploratória de águas profundas e ultra-profundas (Beukelaer *et al.*, 2003; Miranda *et al.*, 2004; Hu *et al.*, 2009).

Além da presença de óleo na superfície do mar, inúmeros fenômenos também produzem regiões com níveis baixos de retorno de sinal de radar à antena devido à reflexão especular ocorrida em superfícies onde há supressão das ondas capilares. Estes fenômenos, assim como o óleo, são representados nas imagens através de feições escuras ou domínios de baixo retroespalhamento (Figura A1.1). Estes fenômenos podem estar relacionados aos seguintes fatores: (a) contato de sistemas fluviais com os oceanos; (b) regiões sob influência de ausência de ventos ou ventos com velocidades inferiores a 3 m.s^{-1} ; (c) zonas de sombra; (d) áreas protegidas ou abrigadas; (e) comunidades de algas; (f) zonas de ressurgência; (g) óleos originados da secreção de organismos marinhos (*surfactants*); (h) esteiras de popa produzidas

por navios; (i) células convectivas; (j) frentes atmosféricas; (k) esteiras produzidas por ondas; (l) ondas gravitacionais internas. As características das feições oceânicas podem ser encontradas na Tabela A1.2 (Elachi, 1980; Fu e Holt, 1982; Johannessen *et al.*, 1996; Fingas e Brown, 1997; Espedal *et al.*, 1998; Gade *et al.*, 1999; Espedal e Johannessen, 2000; Holt, 2004; Brekke e Solberg, 2005; Keramitsoglou *et al.*, 2006; Karathanassi *et al.*, 2006; Ferraro *et al.*, 2009).

Condições particulares do estado do mar podem limitar a utilização de imagens SAR na caracterização da presença de óleo à superfície. Regiões com velocidades de vento da ordem de 3.0 m.s^{-1} ou inferiores não produzem ressonância *Bragg* suficiente nas adjacências do óleo, não permitindo desta forma a diferenciação do retroespalhamento da energia de microondas entre o óleo e a água do mar livre de óleo (Johannessen *et al.*, 1995 e Gade *et al.*, 1999; Gade *et al.*, 1998).

Velocidades de vento muito intensas produzem turbulência e ondas nas camadas superficiais do oceano, impossibilitando a detecção de filmes de óleo. A altura dinâmica de ondas superiores a 2.0 m podem alterar os sinais de retroespalhamento nas imagens SAR através da variação dos ângulos de incidência local (Demin *et al.*, 1985; Scott, 1986; Espedal e Wahl, 1999). Segundo Staples e Hodgins (1998), o intervalo ótimo de velocidade de ventos à altura de 10 m acima do nível do mar varia aproximadamente entre $3,0$ e $8,0 \text{ m.s}^{-1}$.

Ademais, a presença de células convectivas representativas de sistemas Cumulus Nimbus (*Cb Systems*) podem reduzir a amplitude das ondas capilares, resultando nas imagens em uma região de baixo sinal de retorno localizada no centro da célula de chuvas e uma região com sinal de retorno (*backscatter*) superior nas adjacências da célula (Johannessen *et al.*, 1994). Este fenômeno prejudica a detecção da presença de óleo na superfície do mar e é particularmente recorrente em regiões tropicais, como, por exemplo, o Golfo do México.

Tabela A1.2 - Características das feições oceânicas em imagens de radar. Fonte: Holt, 2004.

FEIÇÕES OCEÂNICAS	ESCALA	MEDIÇÕES OBTIDAS	CARACTERÍSTICAS DO IMAGEAMENTO	FAIXA DA INTENSIDADE DE VENTO	CARACTERÍSTICAS E CONSIDERAÇÕES
ondas superficiais (<i>surface waves</i>)	100 - 600 m (comprimento de onda)	Comprimento de onda Direção de propagação Altura de ondas	Tilt Hidrodinâmica Intensidade (<i>bunching</i>)	3 - 40	Ondas de azimute em movimento podem não ser lineares . Fatores limitantes incluem o comprimento de onda e altura de ondas
ondas internas (<i>internal waves</i>)	0,3 - 3 km (comprimento de onda)	Comprimento de onda Direção Amplitude Profundidade de camadas	Convergência / Divergência Óleos Biogênicos (<i>Surfactants</i>)	2 - 10	feições curvilíneas com ondas múltiplas e comprimento de onda decrescente a partir das porções frontais.Sensível às condições do vento.Cristas das ondas alinhadas com a plataforma
marés (<i>internal tides</i>)	10 - 20 km	Comprimento de onda Direção	Interação centimétrica Ondas / Correntes / Óleos Biogênicos (<i>Surfactants</i>)	3 - 7	
correntes e frentes (<i>currents and fronts</i>)	1 - 100 km	Localização <i>Shear</i> <i>Strain</i> Velocidade	<i>Shear</i> / Convergência Convergência Vento (<i>stress</i>) <i>Surfactants</i>	3 - 10 3 - 10 3 - 10 3 - 7	Sensível às condições do vento Presença freqüente de múltiplos mecanismos simultaneamente
vórtices (<i>eddies</i>)	1 - 200 km (diâmetro)	Localização e origem Diâmetro Velocidade <i>Shear</i> <i>Strain</i>	<i>shear</i> / convergência Vento (<i>stress</i>) Óleos Biogênicos (<i>Surfactants</i>)	3 - 10 3 - 10 3 - 7	Sensível às condições do vento Presença freqüente de múltiplos mecanismos simultaneamente
batimetria (<i>shallow water bathymetry</i>)	5 - 50 m (profundidade)	Deteção de mudança Velocidade de correntes Profundidade	Convergência	3 - 12	Sensível ao vento; Propriedades das correntes; Profundidade
INTERAÇÃO OCEANO-ATMOSFERA	ESCALA	MEDIÇÕES OBTIDAS	CARACTERÍSTICAS DO IMAGEAMENTO	FAIXA DA INTENSIDADE DE VENTO	CARACTERÍSTICAS E CONSIDERAÇÕES
ventos (<i>surface winds</i>)	> 1 km (<i>grid</i>)	intensidade do vento Direção do vento	estrias de vento modelos, outros sensores	3 - 25	Variabilidade costeira (mesoescala); Exige calibração
vórtices (<i>roll vortices</i>)	1 - 5 km (comprimento de onda)	Estratificação de camadas Altura Espectro de turbulência Coeficiente de arrasto	estrias de vento (<i>wind stress</i>)	3 - 15	Eixo longo com cristas paralelas à direção do vento
ondas gravitacionais (<i>gravity waves</i>)	2 - 10 km (comprimento de onda)	Taxa de chuva	estrias de vento (<i>wind stress</i>)	3 - 15	Eixo longo com cristas perpendiculares à direção do vento, associados à batimetria
células de chuva	2 - 40 km (diâmetro)	Extensão areal	estrias de vento (<i>wind stress</i>), suavização por chuvas	3 - 15	Aparente sensibilidade à freqüência Pluviometria; Intensidade do vento
FEIÇÕES DE ÓLEO	ESCALA	MEDIÇÕES OBTIDAS	CARACTERÍSTICAS DO IMAGEAMENTO	FAIXA DA INTENSIDADE DE VENTO	CARACTERÍSTICAS E CONSIDERAÇÕES
óleos biogênicos (<i>biogenic surfactants</i>)	> 100 m ² (area)	Extensão areal	convergência	2 - 8	Ambas as formas possuem assinaturas semelhantes a feições de baixos ventos etc.
óleos minerais (<i>mineral oils</i>)	> 100 m ² (area)	Extensão areal	exsudações, vertimentos por navios, efluentes	3 - 15	Intensidade do vento, combinação das bandas L, C e X podem auxiliar na discriminação das formas

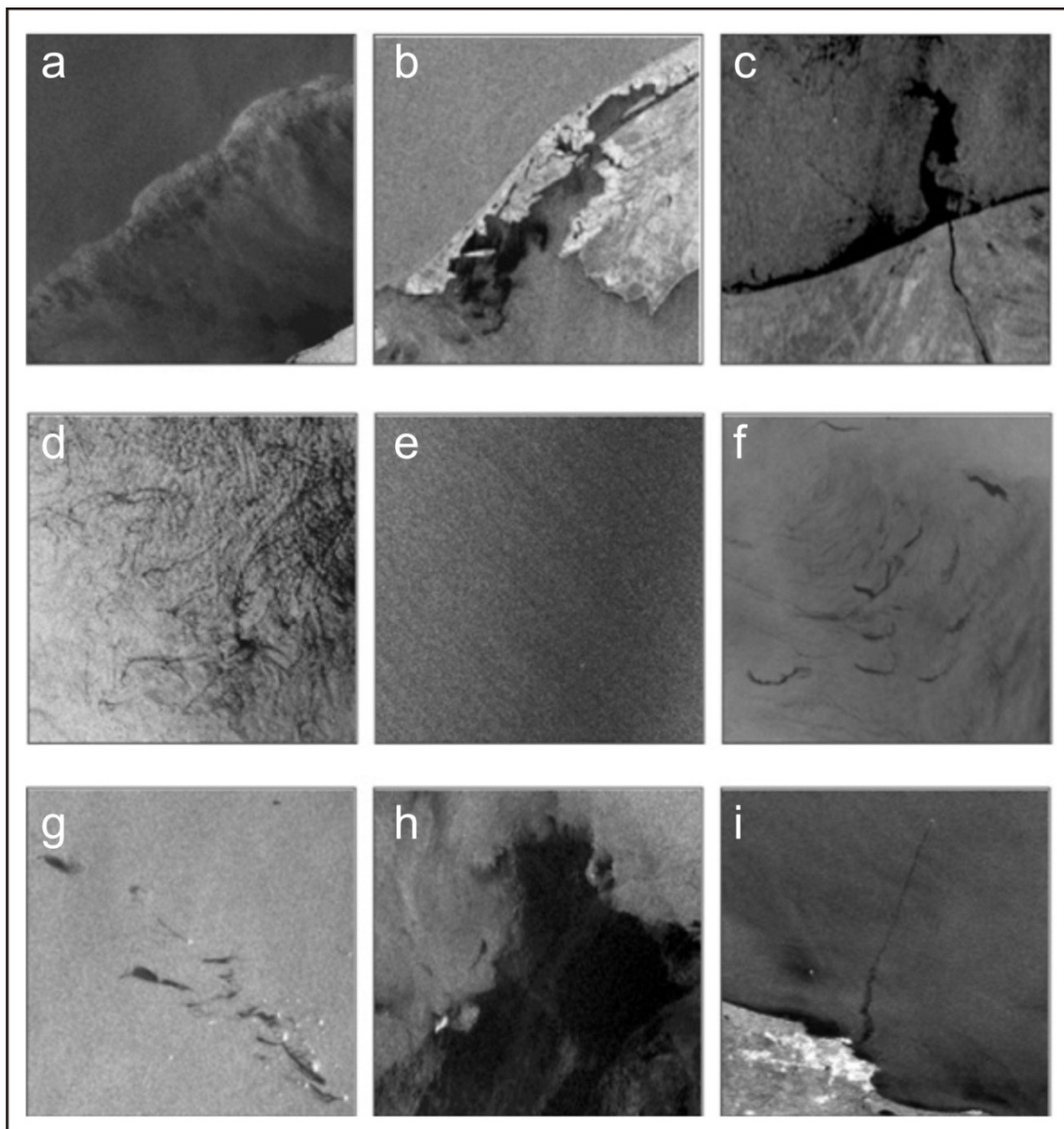


Figura A1.1 - Feições causadas pelo baixo retroespalhamento da energia de microondas na incidente na superfície do mar, conforme observadas em imagens RADARSAT-1, sendo (a) feições relacionadas à frentes atmosféricas (*storms*); (b) áreas protegidas; (c) efluentes orgânicos ou plumas de água doce; (d) óleos biológicos (*surfactants*); (e) ventos com intensidade alta; (f) exsudações de óleo; (g) derrames de óleo; (h) ventos com intensidade baixa e; (i) descarte de óleo por embarcações.

A análise integrada de imagens SAR e dados complementares meteorológicos e oceanográficos é fundamental no auxílio à interpretação de feições de óleo em imagens de radar. Com efeito os fenômenos meteorológicos e oceanográficos anteriormente citados são, em sua maioria, detectáveis por imagens de satélite. Logo, a metodologia multi-sensor ora descrita, tem um papel fundamental nos processos de seleção e interpretação rigorosa de imagens de radar, a fim de se obter feições relacionadas à presença de exsudações de óleo na superfície do mar.

A1.2 Classificação textural por semivariograma utilizando o algoritmo USTC

Ao contrário dos dados de sensoriamento remoto multiespectral, onde a informação está contida nos níveis de reflectância obtidos a partir dos materiais, os dados obtidos a partir do sensoriamento remoto de microondas (imagens de radar) possuem a textura como principal informação a ser extraída. As variações tonais e texturais das imagens de radar são caracterizadas respectivamente pelos valores dos níveis de cinza (*digital numbers*) contidos nos pixels e pela interrelação e distribuição espacial destes níveis de cinza. A textura ou assinatura textural das imagens digitais baseia-se principalmente em três fatores: contraste local, escala e orientação preferencial (Rubin, 1989). Desta forma, análise textural de uma imagem deverá estar contida não somente no valor individual de cada pixel, mas sim no arranjo espacial entre um pixel e sua vizinhança. Esta relação pode ser calculada a partir de métodos geoestatísticos, como por exemplo a função semivariograma (Miranda e MacDonald, 1989 e Rubin, 1989). A aplicação de semivariogramas na classificação de imagens de sensoriamento remoto por radar foi efetuada, dentre outros, por MacDonald, 1991; Carr, 1996; Carr e Miranda, 1998; Miranda, 1990; Miranda e Carr, 1994; Miranda *et al.*, 1992 e 1996; Miranda *et al.*, 1998a, 1998b, 1998c e 1998d; Atkinson e Lewis, 2000 e Miranda *et al.*, 2004.

O algoritmo USTC (*Unsupervised Semivariogram Textural Classifier*) consiste em um classificador determinístico que possibilita a combinação das informações texturais e radiométricas contidas nas imagens SAR. A informação textural está contida na forma e valor da função semivariograma, e se expressa pela variância dos números digitais (Miranda *et al.*, 1997). A informação radiométrica está contida no valor intrínscico do número digital dos *pixels* que compõem a imagem após a remoção do ruído *speckle*¹. A informação textural pode ser descrita pela seguinte equação:

$$\gamma(x_0, h) = \frac{1}{2n} \sum_{\theta=0}^{2\pi} [DN(X_0 + r) - \mu_H(X_0)]^2$$

¹*Speckle* refere-se à interferência aleatória do sinal de radar, tanto destrutiva quanto construtiva, produzida no interior da célula de resolução do sensor, que resulta em uma aparência granulada na imagem, dificultando sua interpretação. Segundo Rees & Satchell (1997).

sendo $\gamma(x_0, h)$ equivalente à função semivariograma de um pixel localizado em x_0 e distância radial de separação de h pixels; $DN(x_0 + r)$ equivale ao valor do número digital em uma distância radial r a partir de x_0 (raio h e ângulo θ); $\mu_H(x_0)$ é o valor médio de uma vizinhança circular de raio H e centro x_0 ; H equivale ao valor máximo de distância radial em pixels; n corresponde ao número de pixels vizinhos em uma distância radial de separação h .

A informação textural também pode ser descrita pela variância (σ) em uma vizinhança circular de raio H em torno do pixel $[\sigma_H^2(x_0)]$. A variância do número digital é incluída no processo de classificação, pois a mesma reflete o valor da função semivariograma para uma distância de separação superior a H . Dado um pixel localizado em x_0 em uma imagem SAR, o vetor $Z(x_0)$, de dimensão $H + 2$ possui a seguinte equação:

$$Z(x_0) = [DN_{dsp}(x_0), \gamma(x_0, 1), \gamma(x_0, 2), \dots, \gamma(x_0, H), \sigma_H^2(x_0)] \quad \text{Equação 3.6}$$

A etapa de classificação é então realizada em todos os componentes do vetor dimensional $H + 2$, calculado para cada pixel. Utiliza-se então o algoritmo não – supervisionado ISODATA para se obter os resultados da classificação dos vetores em questão. Processos posteriores de agregação e edição avançada são aplicados nas imagens SAR a fim de se obter polígonos representativos de superfícies lisas potencialmente relacionadas à exsudações de óleo (Figuras A1.2).

O classificador USTC é empregado para discriminar áreas texturalmente lisas (com baixa rugosidade) de áreas com textura intermediária a grosseira (com rugosidade relativamente mais alta) nas imagens SAR. As áreas texturalmente lisas são realçadas e isoladas para identificação e remoção dos falsos alvos utilizando o Sistema de Informações Geográficas (SIG). Outros algoritmos utilizados na detecção da presença de óleo na superfície do mar e na consequente redução do risco de falsas interpretações causadas por fenômenos naturais ou antropogênicos, anteriormente mencionados, são descritos em Espedal *et al.* (1998) e Fiscella *et al.* (2000).

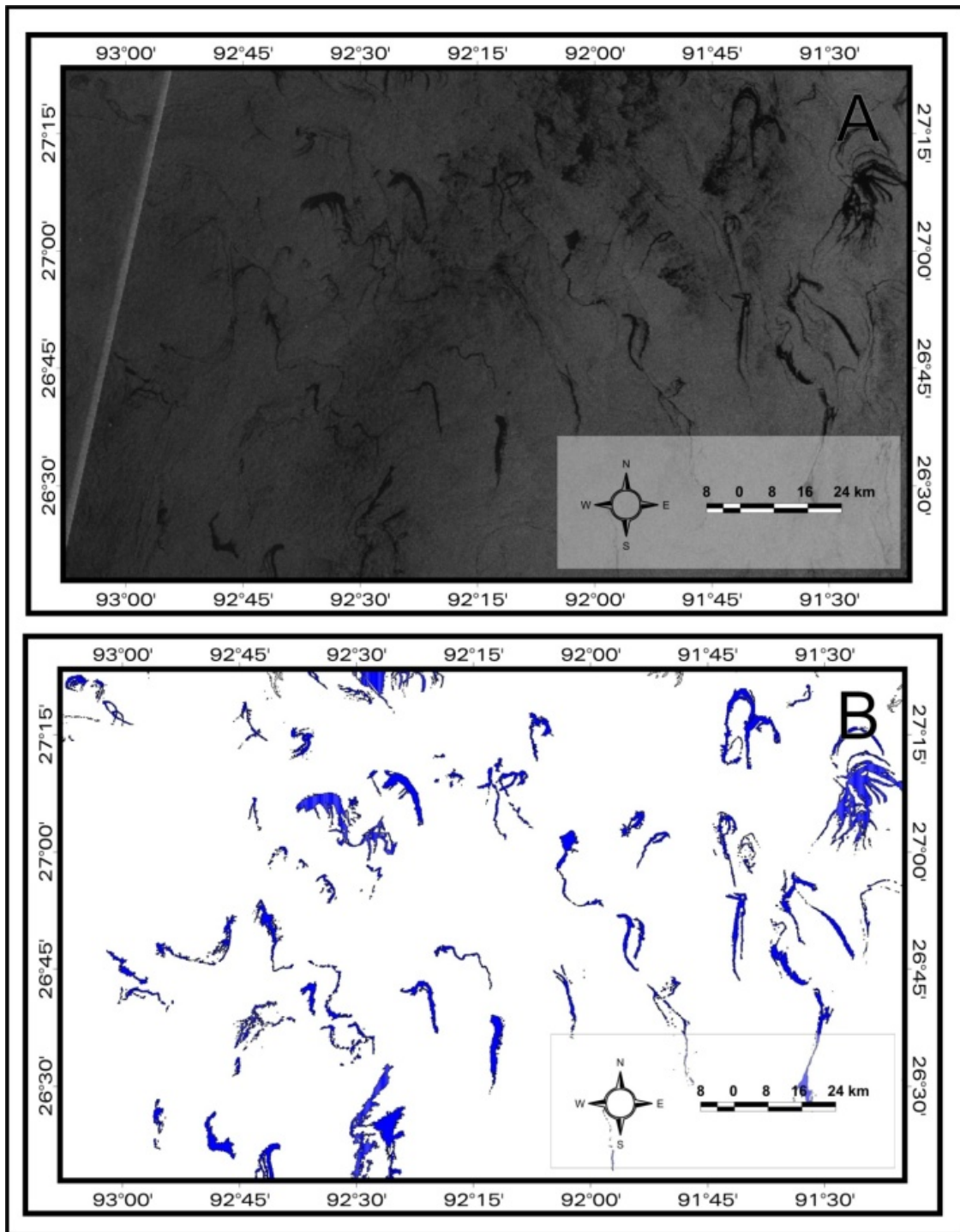


Figura A1.2 - (A) Imagem RADARSAT-1 ScanSAR Narrow 1 (SNAR) ilustrando feições correspondentes à exsudações de óleo; (B) Classificação textural por semivariogramas ilustrando os polígonos de exsudação detectados no processamento digital do dado SAR.

A1.3 Sensoriamento remoto oceanográfico e meteorológico

O sensoriamento remoto traz inúmeras vantagens para o entendimento dos aspectos oceanográficos e meteorológicos, pois se trata de uma ferramenta indispensável na aquisição de informações ambientais. Esta tecnologia permite a aquisição de medições meteorológicas e oceanográficas periódicas de regiões em escala sinóptica. Algumas desvantagens são observadas nos sistemas sensores que operam nas faixas do espectro visível e infravermelho, como a restrição de coleta de dados em cenários atmosféricos adversos. Outra desvantagem consiste nos inúmeros processos de validação, necessários para que se possa correlacionar com precisão dados de sensores remotos com medidas oceanográficas e meteorológicas locais. Por outro lado, a tecnologia de sensoriamento remoto abriga sistemas que operam nas mais diversas faixas do espectro eletromagnético e são frequentemente utilizados em distintas aplicações relacionadas ao meio ambiente. Grande parte do sensoriamento remoto oceanográfico é capaz de obter informações apenas da camada superficial dos oceanos. Entretanto, a camada superficial milimétrica dos oceanos pode ser considerada como a de maior importância na constituição dos aspectos climáticos mundiais, através das propriedades e processos que ocorrem na interface oceano-atmosfera. (Ikeda e Dobson, 1995).

Os dados meteorológicos e oceanográficos utilizados nesta metodologia de pesquisa são obtidos principalmente a partir dos sistemas sensores e satélites AVHRR-NOAA, Imager-GOES, SeaWinds-QuickSCAT, SSM/I-DMSP-F13/14 e MODIS-Aqua/Terra. A análise integrada das imagens SAR foi realizada com os dados de temperatura da superfície do mar, temperatura de topo de nuvens, intensidade e direção de ventos a 10 m do nível do mar e concentração de clorofila tipo-A na superfície do mar (Figura A1.3).

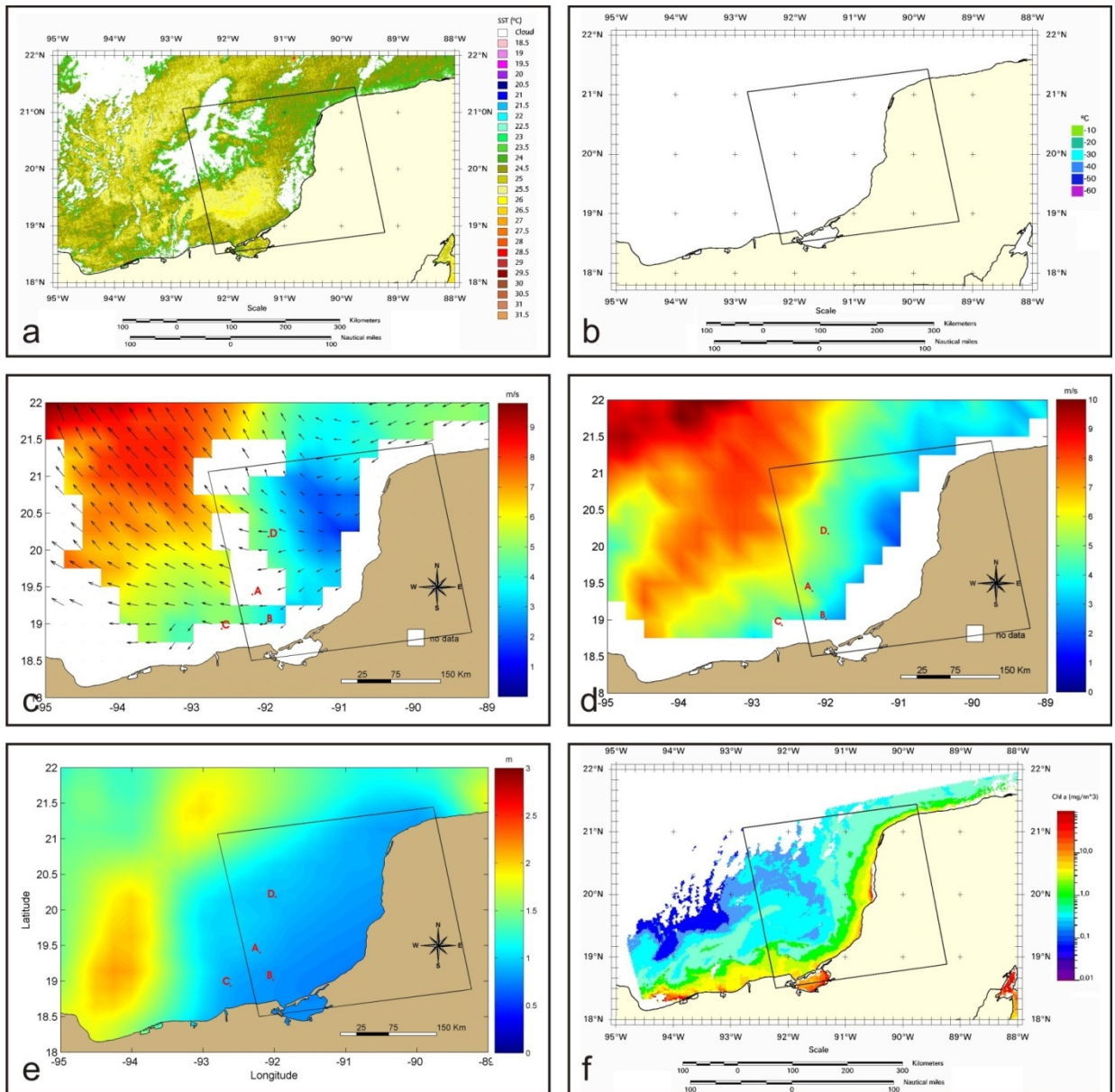


Figura A1.3 - Ilustração dos principais produtos de sensoriamento remoto oceanográfico e meteorológico utilizados na metodologia de detecção de óleo na superfície do mar, a saber: (a) Mapa de temperatura da superfície do mar (TSM); (b) Mapa da temperatura de topo de nuvens; (c) Mapa do campo superficial de intensidade e direção de vento (QuikSCAT); (d) Mapa do campo superficial de intensidade do vento (SSM/I); (e) Mapa da altura significativa de ondas e; (f) Mapa de concentração de clorofila-A na superfície do mar. Fonte: Miranda *et al.*, 2004.

A partir da década de 70, com base nos dados coletados pelos satélites meteorológicos nas faixas do espectro visível e infravermelho, os oceanógrafos começaram a perceber que, na ausência de nuvens, informações extremamente úteis sobre os oceanos também estavam sendo adquiridas por estes satélites. Os satélites da série TIROS (*Television Infra Red Observational Satellites*), operados até 2005 pela NOAA (*National Oceanic and Space Administration*), vêm desde esta época oferecendo aos usuários medidas da temperatura da superfície do mar (TSM). Estas

medidas têm aplicação direta nos estudos de cinemática, dinâmica e clima dos oceanos.

O oceano irradia energia na direção da atmosfera em comprimentos de onda longos devido ao fato da temperatura média superficial do mar variar entre aproximadamente 0°C e 30°C. Como a radiação de onda longa é altamente absorvida pela água, apenas a camada milimétrica do oceano na interface ar-mar é a responsável pelo fluxo desta energia emitida do oceano para a atmosfera. A camada superficial dos oceanos, modulada por sua temperatura, é também responsável pelos processos de transferência de calor latente do mar para a atmosfera. Dessa forma, tanto a climatologia da TSM dos oceanos quanto anomalias de TSM são parâmetros importantíssimos para os estudos climáticos do planeta em geral.

A1.3.1 Temperatura da superfície do mar

Dados de temperatura da superfície do mar podem ser estimados a partir de sensores passivos que operam nas faixas do infravermelho e microondas do espectro eletromagnético. A resolução espacial destes sensores varia de 1 a 25 km, sendo os sensores óticos os mais utilizados para cálculos de estimativa da temperatura da superfície do mar como, por exemplo, o AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) da série NOAA, o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo dos satélites Terra e Aqua e o AATSR (*Advanced Along-Track Scanning Radiometer*) do satélite Envisat.

O sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) consiste em um radiômetro a bordo da série de satélites NOAA, que opera nas faixas do visível, infravermelho próximo e infravermelho termal. Ele possui órbita polar, altitude aproximada de 833 km e dados com acurácia de 1° K (Kidder e Haar, 1995). De acordo com as bandas espectrais ilustradas na Tabela A1.3, os satélites NOAA-6 a NOAA-10 (AVHRR) utilizavam os canais 1, 2, 3B e 4, os satélites NOAA-7 a NOAA-14 (AVHRR-2), as bandas 1, 2, 3B, 4 e 5, e os satélites NOAA-15 a NOAA-18 (AVHRR-3), a totalidade das bandas. Estas bandas possuem resolução espacial no NADIR, respectivamente, de 1.0 kmX1.0 km (Banda 1), 4.0 km x 4.0 km (Bandas 2, 4 e 5) e 8.0 x 8.0 km (Bandas 3A e 3B). Imagens dos canais infravermelho termal (3,0µm a 5,0µm e 8,0µm a 14,0µm) são utilizadas para a geração de mapas de temperatura da superfície do mar, assim como na geração de mapas de temperatura de topo de nuvens.

Tabela A1.3 - Bandas espectrais do sensor AVHRR-3. Fonte: <http://noaasis.noaa.gov/>.

Banda	Comprimento de onda (µm)	Amplitude de temperatura (°K)	Utilização
1	0,58 - 0,68		Mapa de nuvem e superfície diurno
2	0,725 - 1,00		Limite água-terra
3A	1,58 - 1,64		Detecção de gelo e neve
3B	3,55 - 3,93	180 - 335	Mapa de nuvem noturno e TSM
4	10,30 - 11,30	180 - 335	Mapa de nuvem noturno e TSM
5	11,50 - 12,50	180 - 335	TSM

Como parte da missão EOS (*Earth Observation System*), os satélites Terra e Aqua foram lançados em órbita heliosíncrona e altitude de 705 km, respectivamente, em 1999 e 2002. Ambos transportam o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), um radiômetro que possui 36 bandas espectrais distribuídas na

faixa do visível ao infravermelho termal (0,4 μ m a 14,4 μ m). Os cálculos de temperatura da superfície do mar são obtidos da mesma forma que o AVHRR, especialmente no que diz respeito às temperaturas de brilho das bandas de 11 μ m e 12 μ m (Kidder e Haar, 1995 e Souza, 2005). O satélite Terra possui ainda o sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), com 14 bandas espectrais, resolução espacial de 15 m nos espectros do visível e infravermelho próximo, 30 m no infravermelho médio e 90 m no infravermelho termal, sendo 5 no infravermelho termal e, faixa imageada de 60 km. Estimativas da TSM também podem ser feitas por meio de radiômetros operando em microondas, onde a atenuação atmosférica é praticamente desprezível. Exemplos de radiômetros de microondas utilizados para a determinação da TSM são o SSM/I (*Special Sensor Microwave/Imager*), o imageador de microondas TMI/TRMM (*Tropical Rainfall Mapping Mission*) e o AMSR-Aqua (*Advanced Microwave Scanning Radiometer*).

A análise pormenorizada de dados de TSM possibilita a identificação de fenômenos de meso-escala, além de feições locais na superfície do mar, ambas relacionadas à dinâmica oceânica. Informações valiosas sobre frentes oceânicas, ressurgências, meandros, vórtices, correntes são identificadas devido à diferença na temperatura superficial característica das massas d'água envolvidas. Estes fenômenos podem ser observados em imagens SAR, através de variações na rugosidade da superfície do mar (Miranda *et al.*, 2000, Beisl *et al.*, 2000 e Gagliardini *et al.*, 2001).

A1.3.2 Células Convectivas

As células convectivas são fenômenos caracterizados pelos processos de movimentação vertical e ocorrência em escalas múltiplas. O estudo do ciclo de duração de sistemas convectivos é de grande importância para processos de modelagem atmosférica, já que os sistemas convectivos ou aglomerados de nuvens são responsáveis pela maior parte da precipitação nos trópicos e em localidades de latitudes médias durante o verão.

Dados de temperatura de topo de nuvens podem ser associados diretamente a processos convectivos nos Trópicos, ou seja, valores muito baixos de temperatura de topo de nuvem estão relacionados à de nuvens de grande altitude. Regiões onde o topo de nuvem apresenta temperaturas inferiores a 273° K (ou 0°C) chegam a atingir pressões menores que 560 hPa (Siqueira e Machado, 2004). O monitoramento dos sistemas convectivos profundos é de grande interesse nas regiões tropicais, onde a maior fração da precipitação média anual provém de nuvens cumuliformes (Kidder e Haar, 1995, Fu e Holt, 1982).

A chuva é considerada como um dos fenômenos atmosféricos mais importantes, pois a mesma interfere nos processos globais de circulação atmosférica, além de alterar o tempo em escalas maiores. As chuvas podem ocorrer de forma estratiforme (altas latitudes) ou convectiva (*rain cells*) principalmente em regiões tropicais e subtropicais). Em geral, as células de chuva apresentam diâmetros variando de 5 a 10 km e período de duração que pode chegar a 30 minutos. Atualmente, a única forma de se medir a distribuição de chuvas em escalas globais é a partir de técnicas de sensoriamento remoto. Os principais sensores orbitais capazes de obter informações sobre chuvas são os radiômetros de microondas SSM/I, TMI, PR, além dos radares altímetros Topex-Poseidon, Jason, dentre outros. Os princípios por trás dos sensores supracitados se baseiam no espalhamento ou atenuação das microondas pelas gotas de chuva presentes na atmosfera. A partir do lançamento da Missão SEASAT em 1978, descobriu-se que células de chuva também podiam ser detectadas a partir de radares de abertura sintética. Logo, a necessidade de caracterização de feições relacionadas à células de chuva auxiliam os processos de identificação de falsos alvos em imagens de radar. (Fu e Holt, 1982; Alpers e Melsheimer, 2004).

Chuvas sob forma de células convectivas se tornam visíveis em imagens SAR segundo três processos físicos. Os dois processos iniciais estão relacionados ao espalhamento superficial: (i) colisão das gotas de chuva com a superfície do mar e (ii) rajadas de vento (*spreading downdrafts*). O terceiro processo consiste na interação atmosférica entre as gotas de chuva e a frequência do radar. Em geral, eventos de chuvas são relacionados a rajadas de vento que alteram a rugosidade da superfície do oceano. A precipitação a partir de células de chuva normalmente produzem processos convectivos de fluxo de ar descendente (*downdraft*) devido aos fenômenos de arrastamento e resfriamento evaporativo localizados imediatamente abaixo das nuvens. A medida que feições de *downdraft* (Figura A1.4) alcançam a superfície do oceano, há dissipação radial sob a forma de ventos fortes que causarão o aumento da rugosidade superficial.

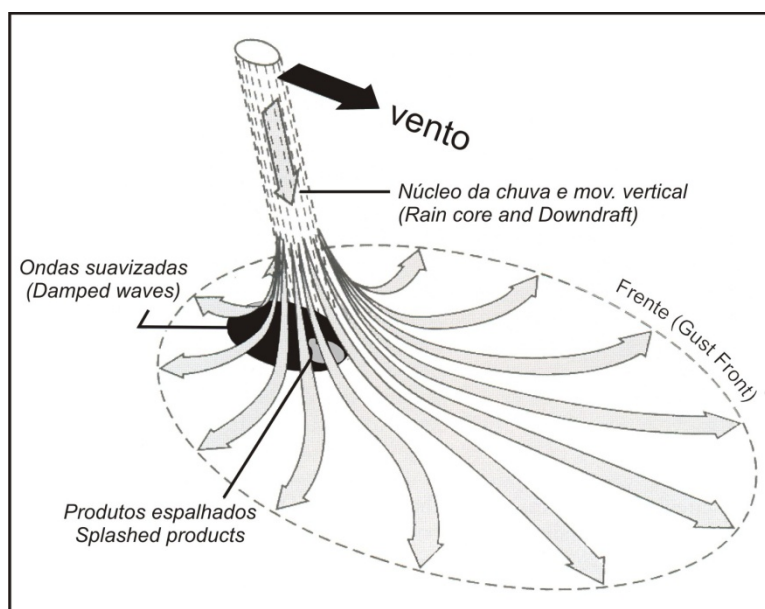


Figura A1.4 - Desenho esquemático de feições de fluxo de ar descendente (*downdraft*) associados a células de chuva. Fonte: Modificado de Alpers e Melsheimer, 2004.

É possível estimar a temperatura de topo de nuvem a partir de radiômetros termais a bordo dos sistemas GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), AVHRR-NOAA ou MODIS-Aqua/Terra. Estes dados são utilizados em interpretações de imagens SAR porque o movimento convectivo e as chuvas potencialmente associadas a áreas com temperaturas muito negativas de topo de nuvem (e.g. -60°C) causam variações na rugosidade da superfície do mar. O efeito de chuvas fortes em áreas oceânicas pode dificultar a interpretação de dados SAR em aplicações de detecção da presença de óleo na superfície do mar.

O programa GOES da NASA e NOAA inclui diversos satélites meteorológicos em órbita geossíncrona, ou seja, que permanecem no plano equatorial da Terra, a uma altura de aproximadamente 35.800 km e em velocidade equivalente à de nosso planeta, o que possibilita o imageamento contínuo da mesma região. As imagens do radiômetro *GOES I-M Imager* possuem resolução temporal de 30 minutos nas bandas do visível e infravermelho termal, sendo que as bandas do visível são operacionais ao longo do período diurno e as do infravermelho termal durante os períodos diurno e noturno (Tabela A1.4). Atualmente, encontram-se em operação os satélites GOES-10 e GOES-12, que cobrem as costas oeste e leste, sendo respectivamente posicionados sobre a linha do Equador à 135°W e 75°W (Kidder e Haar, 1995).

Tabela A1.4 - Características do satélite GOES. Fonte: <http://noaasis.noaa.gov/>.

Banda	Comprimento de onda (μm)	Região do espectro eletromagnético
1	0,55 - 0,75	Visível
2	3,80 - 4,00	Infravermelho médio
3	6,50 - 7,00	Vapor D'água

A1.3.3 Campo superficial de ventos

A tecnologia para o conhecimento do comportamento e magnitude dos ventos oceânicos, representa em uma das mais importantes ferramentas utilizadas na análise de imagens SAR para aplicações oceanográficas, meteorológicas e climatológicas, sobretudo na detecção da presença de óleo na superfície do mar. Como mencionado anteriormente, há para os ventos oceânicos uma janela ideal de intensidade na qual o processamento de dados SAR não está necessariamente sujeito a interferências. Os dados de vento podem ser obtidos por meio de sensores de microondas passivos ou ativos. No primeiro caso, os radiômetros passivos são limitados a obter a intensidade dos ventos; já os sensores ativos, denominados escaterômetros, estimam dados de intensidade e direção do vento.

O programa DMSP (*Defense Meteorological Satellite Program*), mantido pela Força Aérea dos Estados Unidos desde os anos 60, projeta, constrói, lança e mantém satélites para aplicações em monitoramento meteorológico e oceanográfico. Os satélites deste programa orbitam a Terra a 800 km de altitude com inclinação de 99°, em órbita síncrona ao sol, quase polar. Atualmente, apenas os satélites F-13 e F-14, lançados, respectivamente, em 1995 e 1997, estão em operação.

O SSM/I (*Special Sensor Microwave/ Imager*) é um radiômetro passivo de microondas com 7 bandas linearmente polarizadas, que mede as temperaturas de brilho na faixa das microondas ou a emissão de energia de microondas a partir da superfície terrestre e sua interação com a atmosfera, nas frequências 19,3 GHz, 22,2 GHz, 37,0 GHz e 85,5 GHz. Os dados obtidos na frequência de 19 GHz possuem a maior área de cobertura, com 43 km x 69 km, enquanto que aqueles gerados a partir de 85,5 GHz possuem a menor área imageada (*footprint*) de 13 km x 15 km. Os dados SSM/I são frequentemente utilizados na medição de variáveis geofísicas, tais como a intensidade de ventos na superfície do mar, áreas oceânicas cobertas por gelo (idade e limites), precipitação pluviométrica sobre os continentes e oceanos, temperatura da superfície do mar e continentes, umidade do solo, dentre outras (Hollinger *et al.*, 1990).

Dados de intensidade e direção de vento são estimados a partir de radares escaterômetros. Os dados de escaterômetro são obtidos a partir do espalhamento decorrente da interação dos fótons ou ondas eletromagnéticas com a superfície do mar, que é agitada principalmente em função da ação dos ventos. Por serem instrumentos ativos, emitem ondas na faixa das microondas, com uma frequência

escolhida de modo que o comprimento da onda eletromagnética seja similar ao das ondas capilares. A direção do vento é obtida a partir da observação das ondas de dois ângulos de incidência diferentes, que determina duas curvas diferentes, gerando quatro possíveis direções para o vento. A escolha de qual direção é a mais provável pode ser feita por métodos estatísticos, físicos ou pela utilização de vários ângulos de incidência. Os sensores Seawinds a bordo do satélite QuikSCAT e o escaterômetro a bordo do satélite ERS-2 (*European Remote Sensing Satellite*) são os únicos instrumentos operacionais capazes de gerar informações acerca da intensidade e direção de ventos, haja vista o término precoce das operações do sensor Seawinds a bordo do satélite ADEOS-II (*Advanced Earth Observation Satellite II*).

O QuikScat foi lançado pela NASA, em 1999, e opera numa órbita helissíncrona quase polar, a uma altitude aproximada de 800 km, cobrindo a Terra a cada 100 minutos (Figura A1.5). O sensor SeaWinds opera a bordo do QuikScat e é o terceiro escaterômetro da série lançado pela NASA, operando na banda Ku (ou frequência próxima a 13,4 GHz). O primeiro escaterômetro esteve a bordo do SeaSat, lançado em 1978. Em 1996, foi lançado o NSCAT a bordo do ADEOS-I. O sensor SeaWinds é um radar escaterômetro de microondas que mede o rumo e a velocidade dos ventos próximos da superfície do mar sob todas as condições de tempo e nuvens. O sensor *SeaWinds* é capaz de medir velocidades de 3 m.s^{-1} a 20 m.s^{-1} , com uma precisão de 2 m.s^{-1} em intensidade e 20° em direção, com uma resolução espacial de $0,5^\circ$ ou 25 km.

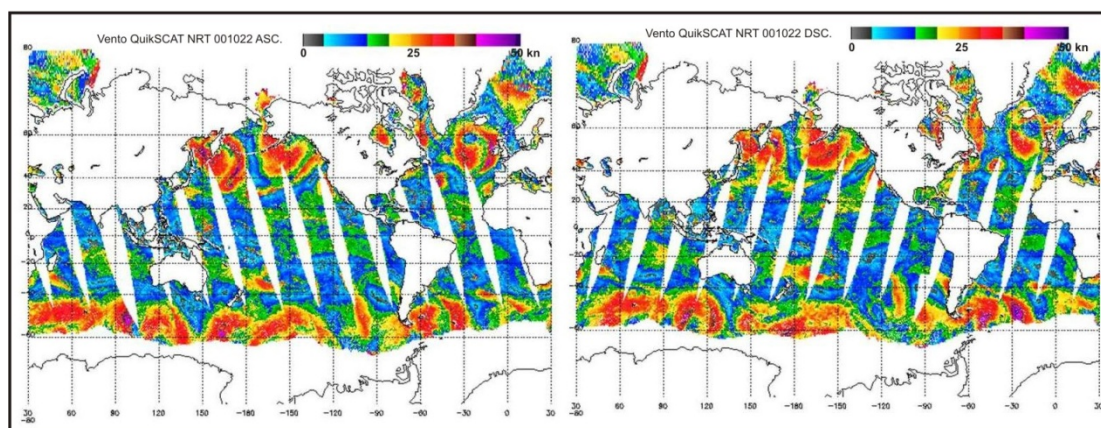


Figura A1.5 - Padrão de cobertura diária das órbitas ascendente e descendente do satélite QuikSCAT.
Fonte: <http://www.remss.com>

O satélite ERS-1 (*European Remote Sensing satellite*) foi o primeiro satélite de sensoriamento remoto europeu lançado pela ESA (*European Space Agency*), em 1991. Dando continuidade à missão, em 1995, a ESA lançou o segundo satélite da

série, o ERS-2, com instrumentos semelhantes aos do ERS-1 e que opera até o presente. O satélite ERS-2 possui órbita quase-circular, polar, helissíncrona, altitude de aproximadamente 785 km, inclinação de 98,5° e período de cerca de 100 minutos. O ERS-2 perfaz 14,3 órbitas por dia e tem um ciclo de repetição de 3 dias, 35 dias e 176 dias (Figura A1.6). Os dados de vento são estimados através do *Wind Scatterometer (WS)*, que é capaz de obter informações da velocidade e direção do vento para incorporação em modelos, estatísticas globais e estudos sobre climatologia. O sistema opera na banda C (5,3 GHz), com polarização VV. O campo estimado de vento pelo WS tem uma acurácia de 3 m.s⁻¹ e resolução espacial de 25 km.

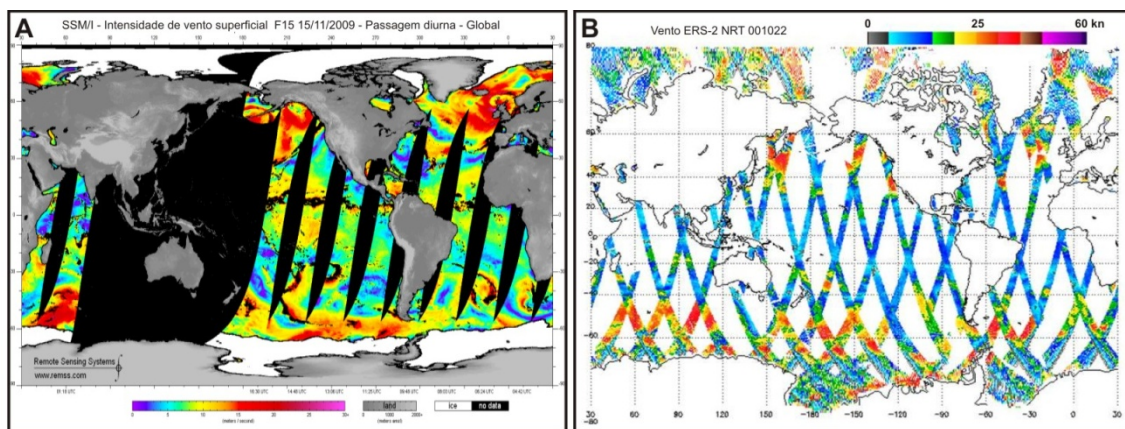


Figura A1.6 - Padrão de cobertura diária de aquisição de dados de intensidade de vento superficial dos satélites (A) SSM/I DMSP F-15 e (B) ERS-2. Fonte: <http://www.remss.com> ; <http://www.cersat.ifremer.fr>

A1.3.4 Altura significativa de ondas

A altura significativa de onda é a média do terço superior das maiores ondas e pode ser estimada através de radares de microondas ativos conhecidos como altímetros.

Este é um instrumento ativo que emite pulsos na banda de microondas, atingindo uma área cujo raio é de aproximadamente 30 km. Visto que a superfície do mar é irregular, a reflexão que volta ao altímetro não é exatamente especular, ou seja, parte de sua energia transmitida volta à antena do satélite após um tempo, o que permite, então, calcular a distância entre o altímetro e a superfície do mar a partir da velocidade da luz. A precisão deste método pode chegar a 2 cm (Jackson e Apel, 2004).

Com tal sistema, valores significativos de altura de ondas são extraídos a partir inclinação de borda da forma da onda captada pela antena. Mares calmos com ondas relativamente baixas apresentam sinais de retorno curtos e pulso bem definido. Mares agitados com ondas elevadas retornam pulsos alongados. Alturas significativas de ondas superiores a 1,5 m não são indicadas para o processamento de dados SAR na detecção de óleo, visto que podem alterar localmente o valor do ângulo de incidência. Nos anos 70, começaram as primeiras medidas de altimetria por satélite, a bordo das missões Skylab e Geos3, Seasat em 1978, e Geosat, em 1985. Nos anos 90, foram lançados mais satélites como ERS-1 (1991 a 1996), Topex/Poseidon (1992 a 2003) e ERS-2 (desde 1995). Para análise de feições de meso-escala (de 100 a 300 km), utiliza-se a combinação de diversos dados de satélites diferentes. Assim, é possível melhorar a resolução espacial e temporal resultante dessa metodologia. Dados estimados de altimetria de ondas são provenientes dos satélites JASON-1 e GFO (Geosat Follow-on) e, para os anos anteriores a 2003, também são utilizados os dados do TOPEX/Poseidon, ERS-2 e RA2-ENVISAT.

A1.3.5 Sensoriamento remoto da cor do oceano

Dados estimados a partir de satélites para analisar a abundância e distribuição do fitoplâncton com base na concentração de clorofila *a* têm sido utilizados desde 1978, quando foi lançado o satélite *Coastal Zone Color Scanner (CZCS)*. A estimativa de concentração de clorofila *a* por meio de sensoriamento remoto considera o princípio em que os pigmentos de fitoplâncton absorvem energia nas regiões do azul e vermelho do espectro e refletem o verde. Por isso, existe essa relação entre a luz espalhada e a distribuição de pigmentos de fitoplâncton nas camadas superiores do oceano. Desta forma, as medidas de radiância em determinados comprimentos de onda podem nos dar uma estimativa da concentração de fitoplâncton e posteriormente da produção primária (Ikeda e Dobson, 1995, Souza, 2005).

O pigmento de fitoplâncton é predominantemente constituído por clorofila; no entanto, contém também subprodutos de degradação (feopigmentos). Adicionalmente, substâncias que absorvem luz ou partículas refletivas na água tendem a influenciar os algoritmos utilizados no cálculo de concentração de pigmentos, especialmente nas proximidades das regiões costeiras. Sensores mais modernos, como SeaWiFS e MODIS, utilizam mais bandas com menores intervalos espectrais, permitindo que algoritmos discriminem melhor a clorofila dos pigmentos de fitoplâncton e de outras partículas na água. Os algoritmos também fazem correção atmosférica, importante devido ao fato de que 90% da luz recebida pelo satélite vêm da atmosfera e somente 10% do oceano.

A concentração de clorofila do tipo A na superfície do mar constitui uma informação valiosa para o mapeamento de comunidades algais (*algae blooms*) que podem confundir a interpretação feições relacionadas à presença de óleo em dados SAR. Mapas de concentração de clorofila-A podem ser obtidos a partir dos sistemas sensores Aqua-Terra/MODIS (Tabelas A1.5 e A1.6) e SeaWifs (Tabela A1.7 e A1.8), (Ikeda e Dobson, 1995).

Tabela A1.5 - Especificações das Bandas 1 a 19 do Sensor MODIS. Fonte: Modificadas de Barker *et al.* (1992) e Lillesand e Kiefer (1994).

Uso primário	Banda	Largura da banda (nm)	Resolução	*SNR
Superfície terrestre/nuvem	1	620 - 670	250	128
	2	841 - 875	250	201
Propriedade da superfície/nuvem	3	459 - 479	500	243
	4	545 - 565	500	228
	5	1230 - 1250	500	74
	6	1628 - 1652	500	275
	7	2105 - 2155	500	110
Cor dos Oceanos/Fitoplâncton/Bioquímica	8	405 - 420	1000	880
	9	438 - 448	1000	838
	10	483 - 493	1000	802
	11	526 - 536	1000	754
	12	546 - 556	1000	750
	13	662 - 672	1000	910
	14	673 - 683	1000	1087
	15	743 - 753	1000	586
Vapor d' água Atmosférico	16	862 - 877	1000	516
	17	890 - 920	1000	167
	18	931 - 941	1000	57
	19	915 - 965	1000	250

*SNR - "Signal-noise ratio".

Tabela A1.6 - Especificações das Bandas 20 a 36 do Sensor MODIS. Fonte: Modificadas de Barker *et al.* (1992) e Lillesand e Kiefer (1994).

Uso primário	Banda	Largura da banda (nm)	Resolução	*NEAT
Temperatura nuvens/superfície	20	3660 - 3840	1000	0.05
	21	3929 - 3989	1000	2.00
	22	3929 - 3989	1000	0.07
	23	4020 - 4080	1000	0.07
Temperatura Atmosférica	24	4433 - 4498	1000	0.25
	25	4482 - 4549	1000	0.25
Cirrus	26	1360 - 1390	1000	150 ⁽²⁾
Vapor d' água	27	6535 - 6895	1000	0.25
	28	7175 - 7475	1000	0.25
	29	8400 - 8700	1000	0.05
Ozônio	30	9580 - 9880	1000	0.25
Temperatura nuvens/superfície	31	10780 - 11280	1000	0.05
	32	11770 - 12270	1000	0.05
Altitude Topo da nuvem	33	13185 - 13485	1000	0.25
	34	13485 - 13785	1000	0.25
	35	13785 - 14085	1000	0.25
	36	14085 - 14385	1000	0.35

*NEAT - "oise - equivalent temperature difference".

Com o lançamento do sensor SeaWiFs (Sea-Viewing, Wide Field-of-View Sensor) a bordo do satélite GeoEye's OrbView – 2, também conhecido como SeaStar, o estudo das propriedades dos oceanos avançou consideravelmente. Os dados gerados pelo SeaWiFs possuem resolução de 1.1 km (LAC) ou 4.5 km (GAC).

Tabela A1.7 - Especificações das Bandas 1 a 8 do Sensor SeaWiFS. Fonte: Cracknell *et al.*, 2001.

Banda	Comprimento de onda (nm)
1	402 - 422
2	433 - 453
3	480 - 500
4	500 - 520
5	545 - 565
6	660 - 680
7	745 - 785
8	845 - 885

Tabela A1.8 – Características da missão do sensor SeaWiFs. Fonte: Cracknell *et al.* (2001).

Órbita	Síncrona ao sol a 705 km
Horário de passagem pelo Equador	Ao meio dia + 20 minutos em órbita descendente
Período	99 minutos
Largura da faixa	2.801 km LAC/HRPT (58.3 graus)
Largura da faixa	1.502 km GAC (45 graus)
Resolução Espacial	1.1 km LAC, 4.5 km GAC
Taxa de transferência de dados em tempo real	665 kbps
Revisita	1 dia
Quantização	10 bits

A1.3.6 Correntes Marinhas

As correntes oceânicas influenciam os climas globais e locais e impactam a vida marinha e terrestre através da redistribuição de calor, nutrientes e poluentes. Muitos destes processos são influenciados por fortes gradientes focalizados nas proximidades dos limites de grandes sistemas globais de correntes e em regiões de efluentes e estuários (Figura A1.7).

A circulação oceânica global apresenta duas componentes principais controladas pela energia solar. A componente superficial fundamenta-se no regime de ventos, enquanto que a componente termoalina se baseia no comportamento dos padrões de densidade da água do mar. A circulação superficial apresenta um movimento predominantemente horizontal que tem grande importância no transporte do excesso de calor das zonas equatorial e tropical para os pólos. Por sua vez, a circulação termoalina tem um componente vertical acentuado e é responsável pelo movimento das massas de água no oceano profundo.

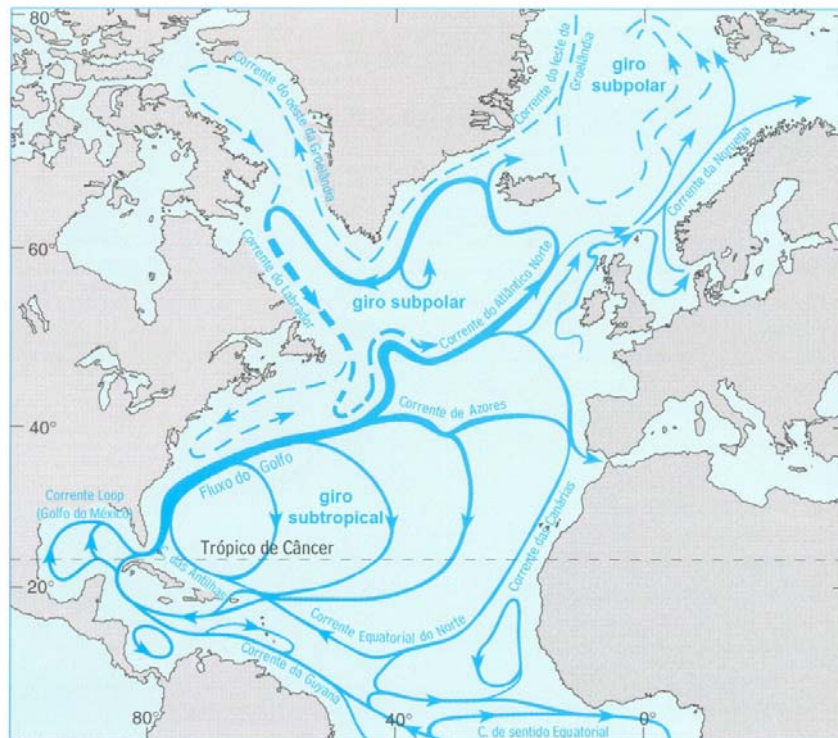


Figura A1.7 - Fluxo do Golfo em relação à circulação superficial do Atlântico. O fluxo é representado pelo aporte de águas oriundas do sistema equatorial de correntes, em sua maioria vinda do Caribe e Golfo do México, além das águas que re-circulam através do giro subtropical do Atlântico Norte. Fonte: Modificado de Brown *et al.*, 2001.

A circulação oceânica controlada pela ação dos ventos acontece principalmente nas primeiras centenas de metros abaixo da superfície oceânica e, conseqüentemente,

seu movimento inicial é tanto horizontal como superficial. Na escala horizontal, os efeitos causados pela fricção dos ventos na superfície do oceano e pela força de *Coriolis*, além da geometria do fundo oceânico, o movimento de rotação da Terra e as massas continentais, criam um movimento giratório nas águas superficiais, em sentido horário no hemisfério norte e anti-horário hemisfério sul, gerando os grandes movimentos giratórios observados em superfície.

Os limites de correntes oceânicas são usualmente acompanhados de modificações na rugosidade de superfície e podem ser detectados por sistemas de radar de abertura sintética. Estas modificações de rugosidade são causadas por três mecanismos principais. O primeiro envolve a acumulação de óleos biogênicos (*surfactants*) em regiões de convergência de correntes. O segundo mecanismo envolve a interação de ondas superficiais com gradientes de correntes superficiais. Estas interações podem gerar a diminuição ou aumento da rugosidade superficial dependendo do tipo de gradiente da corrente (convergente, divergente ou cisalhante) e da direção de propagação das ondas. O mecanismo final está relacionado à estabilidade dos efeitos atmosféricos associada aos gradientes de temperatura superficial que, freqüentemente, estão relacionados aos sistemas de correntes (Ochadlick *et al.*, 1992; Lyzenga, 1991).

Em imagens de SAR, as correntes observadas em ambientes marinhos e costeiros são caracterizadas através de mudanças na rugosidade superficial da imagem em regiões próximas a frentes atmosféricas. As imagens SAR são capazes de detectar as expressões superficiais de vórtices, meandros, giros, zonas de cisalhamento, produzindo, desta forma, informações qualitativas sobre suas estruturas e evolução (Lyzenga, 1991; Ochadlick *et al.*, 1992; Thompson *et al.*, 1998; Johannessen *et al.*, 1991, 1994, 1996, 2000).

As correntes podem ser identificadas na faixa do infravermelho termal do espectro eletromagnético através de gradientes em mapas de temperatura da superfície do mar ou concentração de clorofila em razão da diferença de massas de água de origens distintas. A extração de feições superficiais em imagens SAR relacionadas às correntes marinhas e costeiras desempenha, portanto, um importante papel em aplicações relacionadas ao monitoramento ambiental de poluição, através da indicação de trajetórias de potenciais derrames ou exsudações de óleo (Mitnik *et al.*, 2006).

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)