

INTEGRAÇÃO DE DADOS DE MÉTODOS POTENCIAIS E DE
SENSORIAMENTO REMOTO COMO SUBSÍDIO À EXPLORAÇÃO
PETROLÍFERA OFFSHORE NAS BACIAS DE CUMURUXATIBA E
JEQUITINHONHA

José Guilherme de Castilho

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL.

Banca Examinadora:

Prof. Luiz Landau, D.Sc.

Dr. Fernando Pellon de Miranda, D.Sc.

Prof. José Luis Drummond Alves, D.Sc.

Dr. Juliano Magalhães Macedo, D.Sc.

Prof. Raimundo Almeida Filho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARCO DE 2005

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

CASTILHO, JOSÉ GUILHERME DE

Integração de Dados de Métodos Potenciais e de Sensoriamento Remoto Como Subsídio a Exploração Petrolífera Offshore das bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha [Rio de Janeiro] 2005

IX, 176 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Sistemas Petrolíferos, 2005)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Sistemas Petrolíferos
2. Exploração
3. Modelagem Gravimétrica
4. Radar de Abertura Sintética (SAR)
5. Exsudação Petrolífera
6. Bacia de Cumuruxatiba
7. Bacia de Jequitinhonha
8. Sensoriamento Remoto

I. COPPE/UFRJ II. Integração de Dados de Métodos Potenciais e de Sensoriamento Remoto como Subsídio à Exploração Petrolífera Offshore nas Bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha.

Dedico este trabalho a Adriana.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a COPPE-UFRJ e a ANP que viabilizaram a conclusão do meu curso de mestrado.

A Adriana pelo carinho, companheirismo e paciência.

A minha Mãe pelo apoio e pelas revisões.

Ao Fernando Pellon de Miranda pela orientação (na acepção da palavra).

Ao Luiz Landau pelo total apoio.

Ao Ricardo Bedregal, Felix Goncalves e Flavio Fernandes do Lab2M pelas discussões geológicas e utilização das facilidade do laboratório.

Ao Enrico Pedroso e Carlos Beisl do CBRR pelas discussões construtivas e utilização das facilidades.

A Magda Almada pela pesquisa e revisão bibliográfica.

Ao professor Walter Medeiros da UFRN pela ajuda no processamento e integração dos dados gravimétricos.

A Omni Laboratories Inc. pela liberação do tempo e utilização das facilidades.

E a todos que de alguma maneira contribuíram para o fechamento deste trabalho.

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

INTEGRAÇÃO DE DADOS DE MÉTODOS POTENCIAIS E DE
SENSORIAMENTO REMOTO COMO SUBSÍDIO À EXPLORAÇÃO
PETROLÍFERA OFFSHORE NAS BACIAS DE CUMURUXATIBA E
JEQUITINHONHA

José Guilherme de Castilho

Marco/2005

Orientadores: Luiz Landau

Fernando Pellon de Miranda

Programa: Engenharia Civil

A aplicação de técnicas de classificação digital de imagens orbitais de Radar de Abertura Sintética (SAR), visando à identificação de exsudações de óleo na superfície do oceano, pode fornecer subsídios para a identificação de sistema(s) petrolífero(s) ativo(s), principalmente em águas profundas e ultra profundas. Tais fronteiras exploratórias constituem regiões de difícil acesso e de alto custo de prospecção. Seis (6) imagens RADARSAT-1 foram assim analisadas, com dezessete (17) feições interpretadas como exsudações de óleo na porção offshore das bacias de Jequitinhonha e Cumuruxatiba. Dados de gravimetria obtidos em três levantamentos distintos foram homogeneizados, analisados e modelados, no intuito de caracterizar o arcabouço estrutural das citadas bacias. Tal procedimento apresentou resultados com boa correlação com estruturas geológicas existentes na literatura, assim como permitiu o prolongamento de alguns lineamentos e o mapeamento de feições lineares ainda não reportadas. Os resultados obtidos nestas duas abordagens foram integrados em um Sistema de Informações Geográficas (SIG) para fins de interpretação e análise espacial. A principal contribuição do trabalho foi à proposição do sistema petrolífero Urucutuca – Urucutuca (?) em águas ultra profundas da Bacia de Jequitinhonha.

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

POTENTIAL FIELD AND REMOTE SENSING DATA INTEGRATION AS AN AID
TO OFFSHORE PETROLEUM EXPLORATION IN THE CUMURUXATIBA AND
JEQUITINHONHA BASINS

José Guilherme de Castilho

March/2005

Advisors: Luiz Landau

Fernando Pellon de Miranda

Department: Civil Engineering

Offshore frontiers are difficult to access and expensive to explore. By using digital image classification of Synthetic Aperture Radar (SAR) data, for the objective of oil seep detection, it is possible to identify active petroleum systems mainly in deep and ultra-deep water on a cost effective basis. Six (6) RADARSAT-1 images were analyzed, and seventeen (17) features were interpreted as oil seeps in the offshore portion of Cumuruxatiba and Jequitinhonha basins. Gravity data provided by three different surveys were made uniform, analyzed and modeled, to characterize the structural framework of these basins. These procedures presented good correlation with known geologic structures and allowed to extend some lineaments and to map new features. The results obtained using these two methods were integrated using a Geographic Information System (GIS). The main contribution of this work is the proposition of the speculative petroleum system Urucutuca – Urucutuca (?), located at the ultra-deep water of Jequitinhonha Basin.

ÍNDICE

1. Introdução.....	1
1.1. Seleção da Área de Estudo e Objetivos da Pesquisa.....	1
1.2. Metodologia Utilizada.....	3
1.2.1. Sensoriamento Remoto.....	4
1.2.2. Dados Gravimétricos.....	4
1.2.3 <i>Ranking</i> de Exsudações de Óleo.....	5
2. Área de Estudo.....	6
2.1. Geologia Regional.....	6
2.1.1. Bacia de Cumuruxatiba.....	9
2.1.2. Bacia de Jequitinhonha.....	20
2.2. Sistemas Petrolíferos.....	26
2.2.1. Bacia de Cumuruxatiba.....	26
2.2.2. Bacia de Jequitinhonha.....	30
2.3. Histórico de Exploração.....	33
2.3.1. Bacia de Cumuruxatiba.....	33
2.3.2. Bacia de Jequitinhonha.....	34
3. Detecção de Exsudações de Óleo na Superfície do Mar Utilizando Imagens RADARSAT-1.....	36
3.1. Sensoriamento Remoto por Radar.....	37
3.1.1. Energia Eletromagnética.....	37
3.1.2. Espectro Eletromagnético.....	39
3.1.3. Faixas de Frequência Utilizadas no Sensoriamento Remoto por Radar.....	42
3.1.4. Princípios Básicos de Funcionamento de Radares Imageadores.....	43
3.1.5. Características das Imagens de Radar.....	44
3.1.6. Radares de Abertura Real e de Abertura Sintética.....	48
3.1.7. Mecanismo de Espalhamento e Rugosidade Superficial.....	50
3.1.8. Detecção de Óleo na Superfície do Mar Utilizando Sistemas de Radar.....	51
3.1.9. O Problema dos Falsos Alvos.....	53

3.1.10. Sistemas Orbitais de Radar para Estudos Oceanográficos.....	56
3.2. O Sistema RADARSAT-1.....	61
3.2.1. Características do Satélite.....	61
3.2.2. Modos de Operação Disponíveis.....	62
3.2.3. Opções Recomendadas para Detecção de Óleo.....	65
3.3. Contribuição da Análise de Exsudações de Óleo para a Compreensão de Sistemas Petrolíferos <i>Offshore</i>	66
3.4. Exemplos de Aplicações em Bacias <i>Offshore</i>	68
4. O Método Gravimétrico.....	71
4.1. Princípios Básicos.....	71
4.2. Redução dos Dados Gravimétricos.....	73
4.2.1. Correção de Latitude.....	73
4.2.2. Correção de Ar Livre.....	74
4.2.3. Correção Bouguer.....	75
4.2.4. Correção de Terreno.....	76
4.2.5. Correção de Eötvös.....	76
4.2.6. Anomalias de Ar Livre e Bouguer.....	77
4.3. Interpretação dos Dados Gravimétricos.....	77
5. Tratamento e Interpretação dos Dados Gravimétricos e de Sensoriamento Remoto.....	78
5.1. Processamento dos dados Gravimétricos.....	79
5.1.1. Homogeneização e Tratamento dos Dados.....	81
5.1.2. Análise Qualitativa.....	85
5.1.2.1 Extração de Lineamentos.....	90
5.2. Sensoriamento Remoto.....	110
5.2.1. Processamento Digital de Imagens RADARSAT-1 Visando a Detecção de Óleo no Mar.....	110
5.2.1.1. Resultados Obtidos.....	115
5.2.2. Inserção e Análise dos Resultados da Classificação USTC em Ambiente SIG.....	139
5.2.2.1. Associação espacial entre exsudações de óleo e feições meteorológicas oceanográficas.....	139
5.2.2.2 Associação espacial entre exsudações.....	156

5.2.2.3 Associação espacial entre as exsudações e os cenários tectônicos.....	157
5.2.3. Critérios de <i>Ranking</i>	161
5.3. Implicações Exploratórias.....	166
6. Conclusões e Recomendações.....	172
7. Bibliografia.....	174

1. Introdução

O petróleo é uma fonte de energia finita e de fundamental importância na matriz energética mundial para as próximas décadas do século XXI. Este fato é confirmado pela contínua e crescente demanda por energia. No intuito de atender o suprimento de energia para a sociedade, as empresas de petróleo se dedicam à exploração como prioridade na descoberta de novas jazidas. Esta é uma atividade estratégica composta por etapas complexas e processos decisórios envolvendo altos riscos e investimentos. A análise das incertezas inerentes a este estágio constitui um dos elementos chave na exploração e produção de hidrocarbonetos. Em decorrência dos recentes avanços tecnológicos e da crescente complexidade dos prospectos de óleo e gás, os métodos utilizados nas análises de risco tiveram de evoluir muito e abandonar o caráter simples e intuitivo empregado no passado.

A prospecção petrolífera no ambiente de águas profundas é uma tendência que se manifesta não somente no Brasil, mas em diversas áreas produtoras no mundo. Para enfrentar as restrições exploratórias desse e dos demais ambientes geológicos, tanto a inovação tecnológica como abordagens multidisciplinares vêm desempenhando papéis de grande importância na redução das incertezas, aumentando as probabilidades de sucesso e criando viabilidade econômica para novas jazidas.

1.1. Seleção da Área de Estudo e Objetivos da Pesquisa

O objetivo do trabalho é delimitar o arcabouço tectônico e identificar evidências na superfície do oceano de exsudações de óleo nas bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha, localizadas no sul do estado da Bahia (Figura 01). Exsudações de óleo e gás indicam a existência de sistemas petrolíferos ativos, que é uma informação útil para o desenvolvimento das atividades de exploração. A motivação na escolha da área de interesse encontra-se na publicação escassa de trabalhos científicos nestas bacias, além do estágio incipiente do esforço exploratório empreendido na região até o presente momento. É reportada, através de informações fornecidas pelo Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) da Agência Nacional de Petróleo (ANP), a existência de sistemas petrolíferos ativos nestas bacias, sendo o campo de Arraia, na bacia de Cumuruxatiba, o melhor exemplo (sistema petrolífero Regência – Urucutuca !). Foram

também constatados indícios de óleo em poços exploratórios perfurados nas duas bacias.



Figura 01 – Mapa de localização da área de estudo.

Para cumprir os objetivos da pesquisa, foram utilizados os resultados da análise de dados de Sensoriamento Remoto e de Métodos Potenciais.

Através dos dados de Métodos Potenciais (gravimetria), propõe-se uma atualização dos mapas estruturais existentes na literatura, com o mapeamento de possíveis falhas ao nível do embasamento. Sobre a linha de falha, os valores de gravidade apresentam forte gradiente horizontal, caracterizado nos mapas por uma maior densidade de contornos ou por mudança brusca de gradiente. Os dados gravimétricos foram empregados também com o intuito de mapear o limite entre a crosta continental e a crosta oceânica nessas duas bacias, a partir do espessamento decorrente do contato entre as mesmas e suas diferenças de densidade. Foi ainda realizada uma modelagem nos dados gravimétricos, a fim de determinar a espessura aproximada dos sedimentos destas bacias e estimar a forma do rifte.

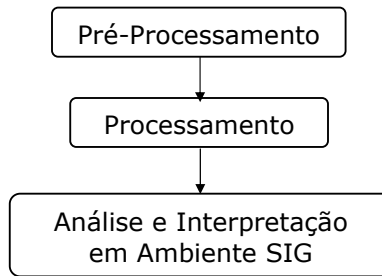
Os dados de Sensoriamento Remoto foram utilizados com o objetivo de identificar e classificar exsudações de óleo na superfície do oceano, provenientes de possíveis sistemas petrolíferos ativos. Estas feições podem indicar a presença de geração e migração de hidrocarbonetos, diminuindo, assim, o risco exploratório.

O acervo de conhecimento geológico referente à região que se pretende estudar é de fundamental importância como insumo para a utilização das citadas técnicas na análise de bacias. A integração dos resultados da aplicação destas ferramentas com o conhecimento disponível pode propiciar um melhor entendimento de sistema(s) petrolífero(s) ativo(s) porventura existentes nas bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha, a partir da comparação com modelos da literatura e com analogias de caráter geológico.

1.2. Metodologia Utilizada

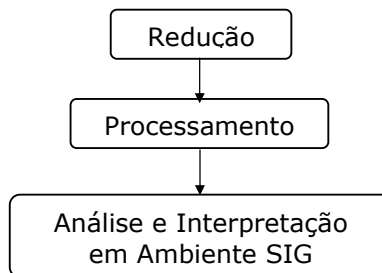
Os dados de Sensoriamento Remoto e de Gravimetria utilizados neste trabalho passaram por algumas etapas antes da interpretação e obtenção dos resultados. Tais procedimentos são de certo modo análogos para ambas as técnicas, conforme descrito resumidamente a seguir.

1.2.1. Sensoriamento Remoto



As imagens orbitais de radar utilizadas na identificação de exsudações de óleo são recebidas em estado bruto e precisam passar por procedimentos de Pré-Processamento. Este estágio inclui a leitura digital dos dados, correção radiométrica e correção geométrica. A fase seguinte diz respeito ao Processamento Digital de Imagens, onde os dados são realçados, filtrados e classificados. Os resultados da classificação são posteriormente inseridos em um ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas), com o intuito de analisá-los espacialmente em conjunto com outras informações geológicas e geofísicas como subsidio a interpretação exploratória.

1.2.2. Dados Gravimétricos



Os dados gravimétricos também passam necessariamente por tratamento antes de sua utilização. Primeiramente, é procedida a redução dos dados, que consiste em fazer com que os mesmos sejam corrigidos tendo em vista a posição geográfica e a altitude onde foram adquiridos, dentre outros fatores. Em seguida, os dados são tratados com o objetivo de realçar um determinado intervalo de profundidade que se deseja investigar.

Tal processamento inclui filtragens específicas, que individualizam anomalias de um determinado comprimento de onda. Também é utilizada a modelagem interativa para determinação da forma regional da bacia em estudo. Os resultados obtidos são posteriormente inseridos em um SIG, juntamente com as feições relacionadas a exsudações de óleo interpretadas nas imagens de radar, para posterior análise e interpretação.

1.2.3 *Ranking* de Exsudações de Óleo

Finalmente, as informações extraídas da gravimetria, isto é, lineamentos regionais e limite entre crosta oceânica e crosta continental, bem como o acervo publicado sobre a geologia estrutural da área de estudo, são inseridas em um ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica). A partir de tal inserção, regiões mais propícias para geração de óleo e subsequente migração até o assoalho oceânico são delimitadas. As exsudações de óleo detectadas por sensoriamento remoto são posteriormente colocadas no ambiente SIG recebendo uma avaliação de confiabilidade da interpretação de acordo com o cenário geológico em que se posicionam. Tal hierarquização leva também em conta o posicionamento geográfico das feições de óleo interpretadas como exsudações em relação à ocorrência de falsos alvos, causados nas imagens orbitais de radar, por efeitos meteorológicos e oceanográficos. A persistência das exsudações de óleo ao longo do tempo e, aproximadamente, na mesma localização geográfica (até 5 quilômetros de distância) valida fortemente a autenticidade da feição analisada. A recorrência temporal e espacial de exsudações é um excelente indicador da existência de rotas de migração na área de estudo, pois confirma a presença de sistema(s) petrolífero(s) ativo(s). Após a análise destes três fatores (tectônico, ambiental e temporal), define-se para cada exsudação um Fator de Confiabilidade, o que possibilita a hierarquização dessas feições como critério de focalização exploratória, no que diz respeito ao risco exploratório relacionado a geração e migração.

2. Área de Estudo

2.1. Geologia Regional

As bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha estão posicionadas na porção centro-sul da costa do estado da Bahia, entre as latitudes 15° e 18° S, ocupando uma área em torno de 45.000 km², correspondendo a um trecho retilíneo na direção N-S, com cerca de 350 km de comprimento. Limitam-se a norte com a Bacia de Almada, no Alto de Olivença, e a sul confinam com a bacia de Mucuri, em uma área de embasamento raso denominada Alto de Alcobaça (Santos *et al.*, 1994). O Banco Vulcânico de Royal Charlotte e sua projeção em direção à costa separam as bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha (Santos & Gontijo, 1994).

Tais áreas sedimentares integram-se ao conjunto de bacias da Margem Continental do Leste Brasileiro, caracterizadas como marginais passivas ou Tipo Atlântico (Hong *et al.*, 1990a), embora tenham existido ambientes tectônicos distintos durante sua evolução. O regime distensional destas bacias está ligado à cinemática da Tectônica de Placas, apresentando uma seção rifte, localizada na sua porção inferior, com falhas normais envolvendo o embasamento cristalino e vulcanismo básico associado. Os sedimentos sobrepostos correspondem, primeiramente, a uma fase evaporítica, seguidos por depósitos relacionados a deriva continental (drifte), estando separados, freqüentemente, por uma ou mais discordâncias regionais.

O rifte foi gerado pelo soerguimento e quebra da litosfera por expansão crustal, causada pelo aquecimento relacionado a elevação da astenosfera ou pela presença de plumas mantélicas.

Como resposta ao estágio de rifteamento, ocorreu uma fase de subsidência mecânica local. A fase de deriva continental (drifte) foi implantada e se inicia por expansão térmica com subsequente contração, causando subsidência regional. Admite-se que a sobrecarga provocada por elevadas taxas de sedimentação amplifique a subsidência (flexural) nesta fase (Chang, 1990a).

Baseados em dados adicionais de poços e sísmica, bem como em modelos conceituais de comportamento termo-mecânico do Atlântico e de variações globais do nível do mar, Chang *et al.* (1990b) reviram o conceito de Ponte *et al.* (1978) sobre a estratigrafia, do Jurássico ao Cretáceo, das bacias da margem Leste do Brasil, incluindo aquelas do sul da Bahia. Segundo os citados autores, tais bacias podem ser representadas por cinco megassequências: continental, evaporítica transicional, plataforma carbonática rasa, transgressiva marinha e regressiva marinha.

A Megassequência Continental possui três seqüências sin-rifte, onde a primeira (sin-rifte I) foi pouco afetada por falhamentos e teve sua gênese associada ao processo inicial de ruptura do Gondwana (Jurássico tardio – Idade Dom João). Nesta época, foi formada uma grande depressão a norte da Bacia do Espírito Santo, que foi preenchida por um complexo sistema de leques aluviais de clima árido e depósitos grosseiros fluviais com quantidade subordinada de evaporitos, representando um ambiente de lagos interiores (*playa*). Também são encontrados, comumente, depósitos eólicos nesta seqüência. A fase principal da seqüência, sin-rifte II, começou no Cretáceo Inferior (Andares Rio da Serra – Aratu), gerando uma série de meio-grábens. A norte, sedimentos pelíticos escuros ricos em matéria orgânica, assim como turbiditos associados a clásticos fluvio-deltaicos, foram depositados em uma série de lagos profundos e estratificados formados nessa época. A sul, ocorreu intenso magmatismo, que foi mais bem estudado na Bacia de Campos, representado por uma seqüência vulcano-sedimentar composta por derrames de basalto, clásticos vulcânicos e rochas sedimentares com idade variando de 120 a 130 milhões de anos (Ma) (Mizusaki, 1986; Ponte e Asmus, 1978; citados por Chang, 1990b). Os lagos foram ficando mais rasos, e, a norte, foram preenchidos lentamente por extenso pacote cíclico de clásticos fluvio-deltaicos. A sul, são encontradas rochas lacustres de textura fina associadas a clásticos vulcânicos. A seqüência sin-rifte III foi depositada no Barremiano (Andares Buracica – Jequiá), sendo formada pela deposição de camadas de coquinas com grande extensão e continuidade lateral, intercaladas com material siliciclástico grosseiro a fino. Esta seqüência é interpretada (na Bacia de Campos) como representativa de depósitos de ambientes lagunar interior de clima árido e lagunar de clima úmido (pluvial). Já na Bacia de Sergipe-Alagoas, esta seqüência é representada por uma sedimentação mista clástico-carbonática.

A Megassequência Transicional Evaporítica (Aptiano – Andar Alagoas) foi depositada sobre uma ampla discordância pós-rifte, responsável pela peneplanização da topografia existente. A planície gerada foi inundada, gradualmente, por água salgada advinda do oceano localizado a sul. Foram depositados conglomerados e arenitos pouco selecionados, que foram recobertos por clásticos finos e folhelhos ricos em matéria orgânica. Uma suíte completa de evaporitos foi depositada (chegando a dois quilômetros nos depocentros deste golfo salino), através de uma estreita passagem do mar evaporítico, formado ao longo de toda a Margem Leste Brasileira, ao norte da Bacia de Pelotas.

Os evaporitos supracitados foram sucedidos por uma extensa plataforma carbonática de alta energia, composta de calcários de água rasa e denominada de Megassequência Carbonática de Plataforma Rasa. Isto se deu graças à abertura gradual da estreita passagem marinha durante o Albiano. Sistemas clásticos do tipo fan-delta se intercalaram com as rochas carbonáticas, ao longo da linha de costa no Albiano. São encontrados calcários dolomitizados em abundância na porção basal da plataforma. No centro da bacia, calcilutitos e calcissiltitos intercalados com margas e folhelhos compõem a fácies dominante. Deformações atribuídas a halocinese são reportadas nesta seqüência carbonática, as quais controlam a distribuição de fácies dos carbonatos de água rasa.

A Megassequência Marinha Transgressiva se caracteriza por um ambiente gradativamente mais profundo, variando de nerítico profundo a batial raso, dando lugar a uma seqüência de baixa energia composta por calcilutitos, margas e folhelhos (final do Albiano). Durante o Cenomaniano-Turoniano, ocorreu um importante evento anóxico, quando a bacia alcançou a profundidade de 200-300 metros. A sedimentação turbidítica arenosa está presente ao longo de toda a margem.

A passagem de uma seqüência transgressiva para um ambiente regressivo varia em idade ao longo da margem. A Megassequência Marinha Regressiva possui um grupo de sistemas deposicionais síncronos: fan-delta, fluvio-deltaico, plataforma terrígena, plataforma carbonática, talude e bacia. Estes sistemas se caracterizam sísmicamente por um padrão *offlap* sob a plataforma continental atual. A deposição de areia em águas profundas diminuiu para norte, dando lugar a plataformas carbonáticas, enquanto

sistemas siliciclásticos dominam na Margem Sul. A movimentação de sal afetou fortemente a geometria e a distribuição desses corpos de areia em águas profundas.

A seguir, a geologia das bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha será descrita individualmente.

2.1.1. Bacia de Cumuruxatiba

Situa-se no extremo sul do estado da Bahia, limitando-se a norte com a Bacia de Jequitinhonha pelo Banco Vulcânico de Royal Charlotte, a sul com a Bacia de Mucuri pelo Banco Vulcânico de Abrolhos e a leste pelo Banco Vulcânico de Sulfur Minerva. Possui uma área de aproximadamente 20.500 km², dos quais cerca de 7.000 km² na parte emersa, entre as cidades de Porto Seguro e Alcobaça, e 13.500 km² na parte submersa, até a lâmina d'água de 2000 metros.

A Bacia de Cumuruxatiba está implantada sobre a Região de Dobramentos Araçuaí, um domínio geotectônico caracterizado por Inda & Barbosa (1978, citado por Gontijo, 1996) como uma faixa marginal ao Cráton de São Francisco. Segundo tais autores, esse domínio foi afetado por metamorfismo, magmatismo e deformação durante o Ciclo Brasileiro. O embasamento cristalino aflorante, adjacente à bacia, é constituído por rochas graníticas e gnáissicas, com núcleos de rochas granulíticas e charnoquíticas. Os poços que atingiram o embasamento constataram a presença de biotita-gnaisses (Santos & Gontijo, 1992).

As estruturas evidenciadas na seção sedimentar desta bacia foram, segundo Cunha (1985, citado por Santos & Gontijo, 1992), condicionadas por estruturas pretéritas do embasamento. As falhas normais de direção N20°-30°E estão alinhadas segundo reativações de antigas estruturas relacionadas ao Ciclo Transamazônico (2100 – 1800 / 1700 Ma). As falhas normais, orientadas N35°-45°W relacionam-se a reativações de faixas cisalhadas originadas ao final do Ciclo Brasileiro (450 – 700 Ma) e durante o Evento Sul-Atlântico (Mesozóico ao Terciário).

O arcabouço estrutural da bacia é composto por cinco compartimentos identificados em uma análise regional de sua porção marítima, com base em dados de sísmica de reflexão

e poços (Santos & Gontijo, 1992), a saber: Embasamento Raso, Patamar da Anidrita, Degrau Interno, Baixo Sul e Baixo Norte (Figura 02). Os limites destes compartimentos são formados por falhamentos associados a linhas de charneira que serviram para a deposição das seções sedimentares encontradas (Santos & Gontijo, 1992).

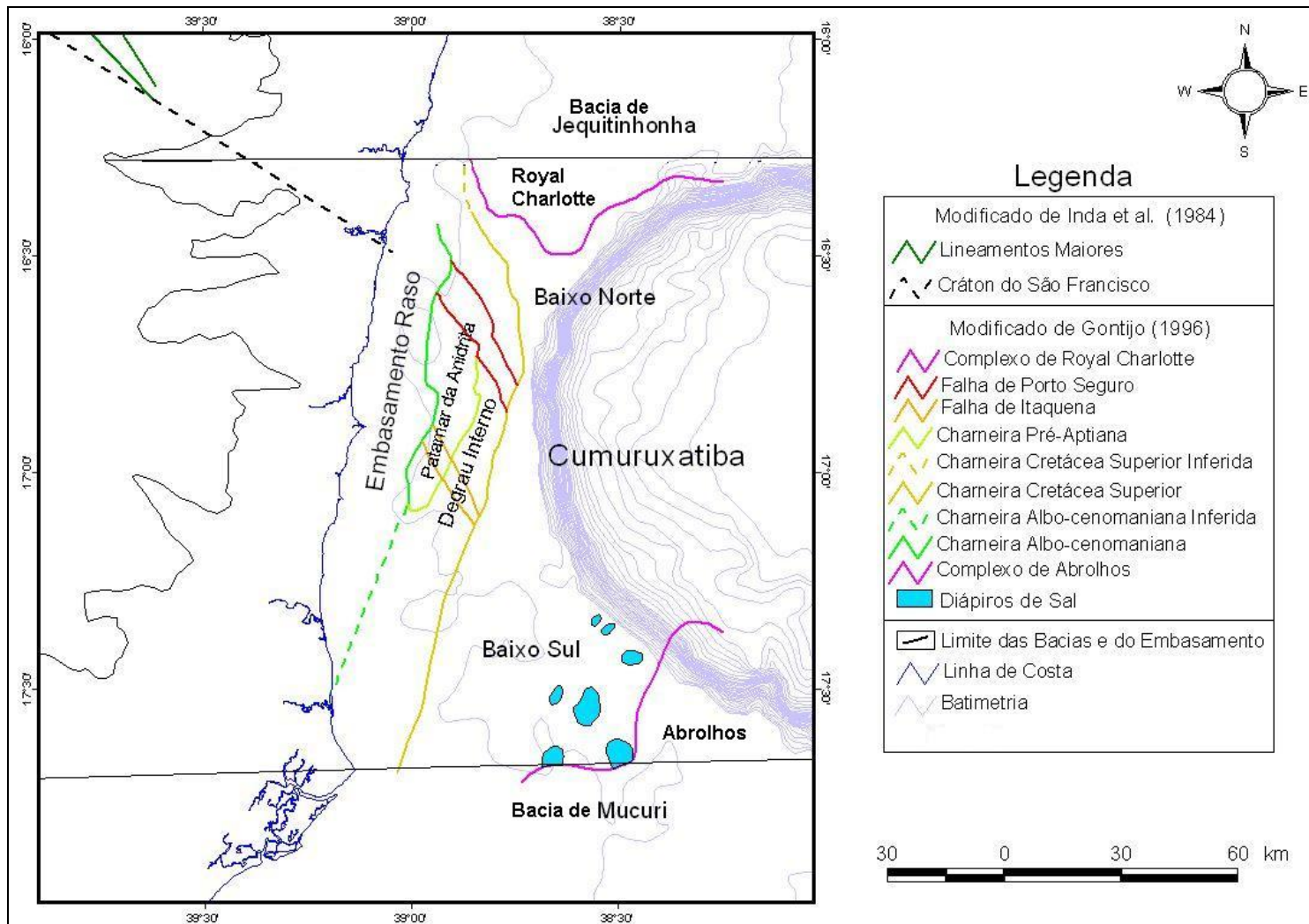


Figura 02 – Arcabouço estrutural da Bacia de Cumuruxatiba.

A região do Embasamento Raso situa-se na parte terrestre e na porção marinha próxima à costa, encontrando-se intensamente estruturada, de acordo com a análise de linhas sísmicas situadas sobre este compartimento. O embasamento é recoberto por sedimentos terciários, com espessuras não superiores a 1.000 metros (Santos & Gontijo, 1992).

O Patamar da Anidrita situa-se na porção centro-oeste da bacia, caracterizando-se por uma feição homoclinal, com mergulho suave para leste, onde a espessura sedimentar varia de 750 a 1.900 metros. É identificado sísmicamente através de um refletor de baixa frequência, alta amplitude e boa continuidade lateral. Registra a presença de seção Aptiana, onde ocorrem *onlaps* dos sedimentos proximais Albo-cenomanianos (Santos & Gontijo, 1992).

Em direção às porções mais profundas da bacia, encontra-se a região do Degrau Interno, que, em relação ao Embasamento Raso e ao Patamar da Anidrita, se caracteriza por um bloco abatido por falha normal em direção ao depocentro da bacia. A tectônica dominante está representada por uma série de falhamentos escalonados ancorados no embasamento em profundidades entre 2.200 a 4.200 metros, e apresenta raros falhamentos listricos, estando bem evidentes os lineamentos transversais provenientes de reativações de estruturas Brasileiras (Falha de Porto Seguro e Falha de Itaquena). Nesta porção da bacia, desenvolveu-se uma expressiva plataforma carbonática albiana (Santos & Gontijo, 1992).

Nas porções mais distais encontram-se os baixos Sul e Norte, onde a coluna estratigráfica é a mais completa da bacia, chegando a 10.000 metros de espessura sedimentar (de acordo com estimativas feitas a partir de seções sísmicas). A área do Baixo Sul é rica em estruturas originadas por halocinese, devido ao basculamento da bacia, originando uma série de domos de sal. Também é reportada a existência de argilocinese, provocada pela sobrecarga de derrames vulcânicos da Formação Abrolhos sobre pelitos da Formação Urucutuca (Santos & Gontijo, 1992). O lineamento que limita a oeste este Baixo com o Degrau Interno atuou como charneira para os sedimentos depositados entre o Aptiano e o Maastrichiano (Santos & Gontijo, 1992).

De grande importância é a ocorrência de uma falha transcorrente que corta a bacia na direção NW–SE, denominada Faixa de Cisalhamento ou Falha de Porto Seguro, apresentando largura variando de 5 a 9 quilômetros. Esta falha separa o Baixo Norte do Baixo Sul, sendo bem correlacionada em terra com a faixa de cisalhamento que separa o Cráton do São Francisco do Cinturão de Dobramentos Araçuaí (Idade Brasileira) (Figura 03). A expressão sísmica desta falha mostra que, desde o embasamento, sedimentos de idade Albo-Cenomaniana ou até mesmo do Terciário Inferior são afetados. Possui ainda uma configuração de flor positiva, o que denota a ocorrência de possíveis esforços transpressivos durante a evolução da bacia (Santos & Gontijo, 1992). É comum na margem continental leste brasileira a presença de lineamentos com características e direção NW-SE, como, por exemplo, os lineamentos de Cabo Frio e Colatina (DPC & Assoc., 2000). Alguns dos campos gigantes de petróleo da Bacia de Campos podem estar associados a lineamentos desta natureza, o que torna sua presença de grande importância exploratória.

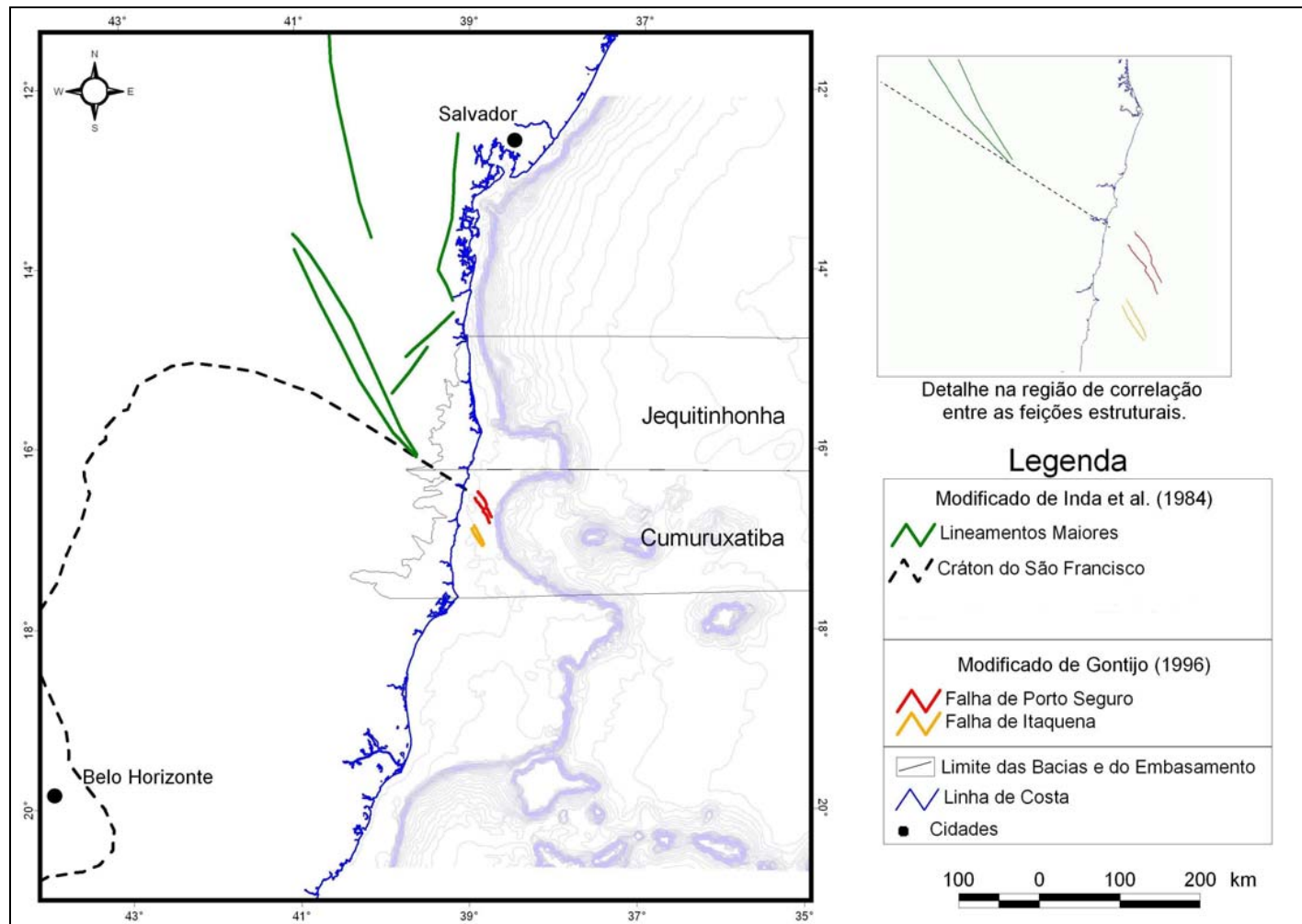


Figura 03 – Correlação da Falha de Porto Seguro com a faixa de cisalhamento que separa o Cráton do São Francisco da Faixa de Dobramentos Araçuaí.

A Falha de Itaquena, também observada na porção *offshore*, apresenta praticamente a mesma direção da Falha de Porto Seguro e aparece nos mapas gravimétricos como um alinhamento bastante evidente, de acordo com Santos & Gontijo (1992). Cunha (1985, citado por Santos & Gontijo, 1992) diz ainda que deslocamentos mapeados através de altos gravimétricos na região marinha podem ser resultado de esforços tangenciais sinistrais que atuaram ao longo desta falha.

A deformação dos sedimentos da fase rifte, pouco definida sismicamente, é representada por blocos falhados (*horsts* e *grabens*). Já nas fases evaporítica e marinha, a estruturação sofre influência da tectônica gravitacional, associada ao fluxo de sal, causando falhamentos lístricos e *rollovers* associados (Figura 04).

À semelhança de outras bacias da margem leste brasileira, a evolução tectono-sedimentar da Bacia de Cumuruxatiba contempla três fases distintas (Figura 05). A nomenclatura utilizada nas unidades estratigráficas obedece às definições anteriormente feitas por Carvalho e Garrido (1965), citado por Santos *et al.* (1994) e Asmus *et al.* (1971), além da inserção do Grupo Cumuruxatiba por Santos & Gontijo (1992), referente a uma seção clástica eocretácea ainda não constatada nas bacias adjacentes.

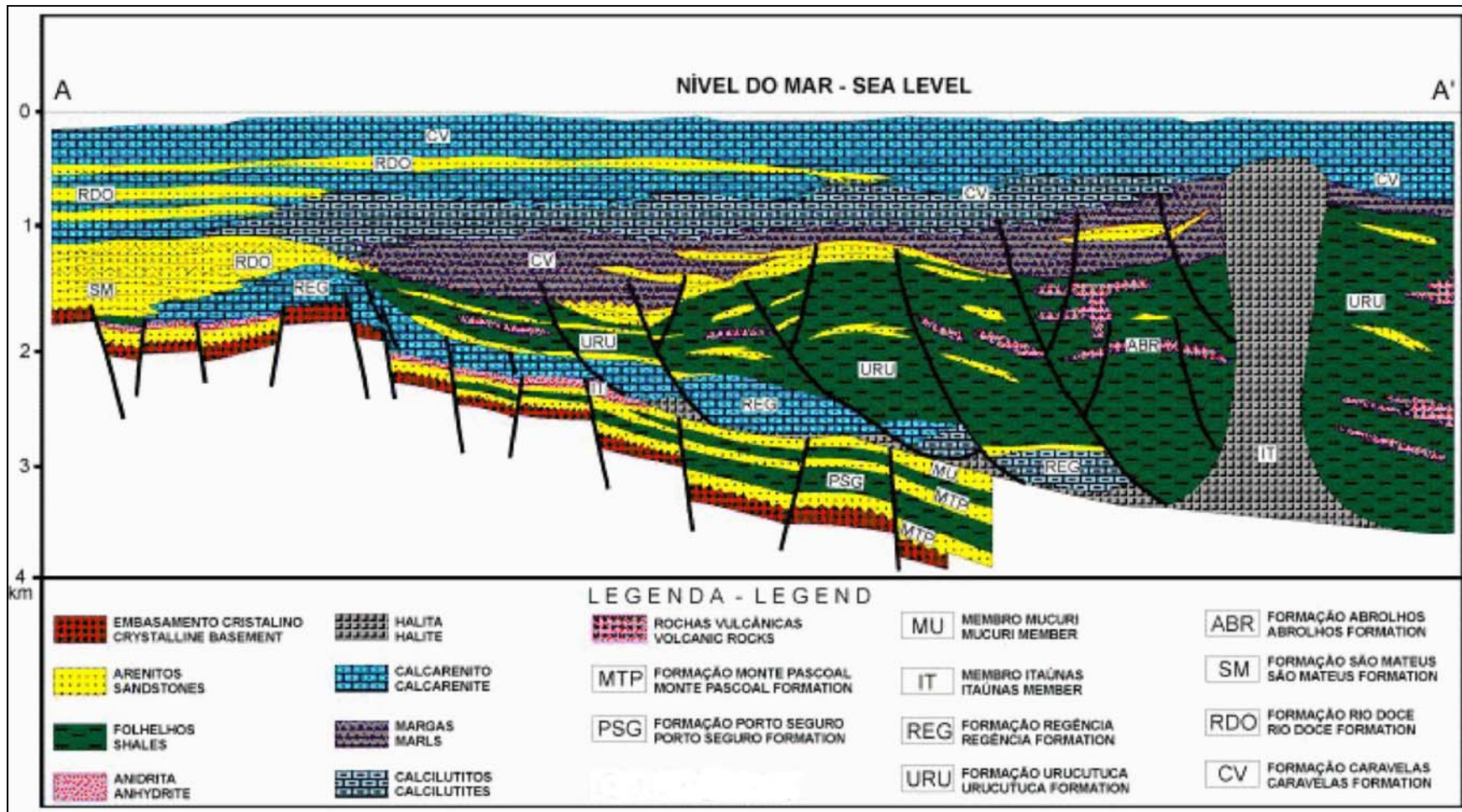


Figura 04 – Seção geológica esquemática *dip* da Bacia de Cumuruxatiba (Fonte: <http://www.anp.gov.br>).

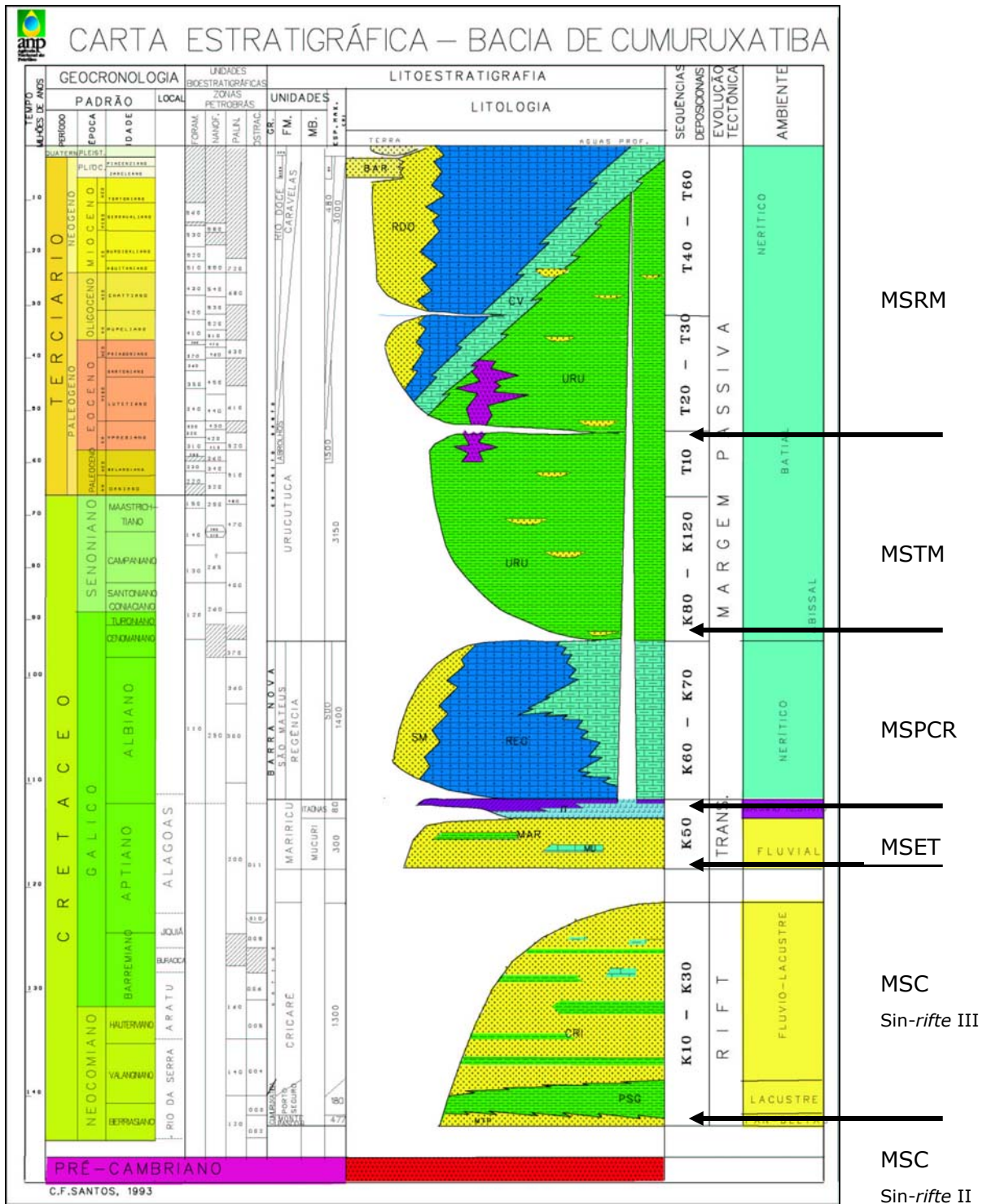


Figura 05– Carta estratigráfica da Bacia de Cumuruxatiba (Fonte: <http://www.anp.gov.br>).
 As setas e siglas representam as cinco Megassequências revistas por Hong *et al.* (1990b):
 Continental (MSC), Evaporítica Transicional (MSET), Plataforma Carbonática Rasa (MSPCR), Transgressiva Marinha (MSTM), Regressiva Marinha (MSRM).

A fase Rifte (Neocomiano – Eoaptiano) é composta pelo Grupo Cumuruxatiba e parte do Grupo Nativo, onde o primeiro foi proposto para designar rochas estratigraficamente abaixo da Formação Cricaré, constatadas por Santos *et al.* (1994) em quatro poços na parte norte da bacia. A idade atribuída a estes sedimentos foi Rio da Serra, com base em datações bioestratigráficas de ostracodes e palinóforos. E, por razão da falta de conteúdo fóssilífero, esta Formação não pôde ser correlacionada com o Andar Dom João das bacias do Recôncavo e Camamu-Almada (Pereira, 1974, citado por Santos *et al.*, 1994).

O Grupo Cumuruxatiba é composto pela Formação Monte Pascoal (ambiente siliciclástico fan-deltaico), constituída essencialmente por arcóseo médio a conglomerático branco e cinza. Intercalados aos arenitos, ocorrem delgados níveis de folhelho cinza-escuro e preto e de conglomerado vermelho, com matriz arenosa muito fina. O contato inferior desta formação é discordante sobre o embasamento e o contato superior é concordante com a Formação Porto Seguro (lacustre), que se caracteriza por um pacote de folhelho cinza escuro a preto. Os contatos da Formação Porto Seguro, tanto superior (Formação Cricaré) quanto inferior (Formação Monte Pascoal), são aparentemente concordantes. Esta unidade representa a deposição de um lago de água doce/salobra e apresenta fósseis de ostracodes, que permitiram conferir a ela uma idade Rio da Serra (Santos *et al.*, 1994).

O Grupo Nativo pertencente à fase rifte e inclui a Formação Cricaré (fluvio-lacustre), caracterizada por clásticos grosseiros depositados entre as idades Rio da Serra e Jequiá.

A fase evaporítica (Aptiano) é composta pela Formação Mariricu, que também faz parte do Grupo Nativo. Nesta Formação dois Membros são diferenciados: o Membro Mucuri, formado por clásticos grosseiros e finos flúvio-lacustres de idade Alagoas, e o Membro Itaúnas, caracterizado por evaporitos com idade Nealagoas, representando um ambiente marinho de circulação restrita (Santos *et al.*, 1994). O limite superior da seqüência é uma discordância situada no topo da seção evaporítica, evidenciada por *onlap* da plataforma carbonática albiana sobre uma espessa camada de anidrita (Gontijo, 1996).

A fase drifte ou de deriva continental (Albiano – Recente) é composta por dois grupos: Barra Nova e Espírito Santo. O Grupo Barra Nova (Albiano – Cenomaniano), depositado em ambiente nerítico, inclui a Formação São Mateus (siliciclástico marinho), representada por clásticos grosseiros depositados em leques deltaicos, registrando o início da fase transgressiva, e também a Formação Regência, que reúne carbonatos de alta e baixa energia. Esse pacote é recoberto por sedimentos siliciclásticos marinhos (espessos pelitos e arenitos finos), Neocretáceos e Terciários, depositados em ambiente de água profunda, da Formação Urucutuca, já pertencente ao Grupo Espírito Santo. Além desta formação, o Grupo Espírito Santo compreende duas outras: Formação Rio Doce, apresentando arenitos grosseiros de leques costeiros terciários, e Formação Caravelas, com carbonatos terciários neríticos de alta e baixa energia. Na parte terrestre da bacia, a Formação Barreiras é constituída por cobertura clástica Neocenozóica. O limite inferior das formações Rio Doce e Caravelas (discordância erosiva) marca a passagem entre a fase marinha transgressiva e a fase marinha regressiva na bacia.

Durante o Paleoceno/Eoceno, a bacia foi palco de intensa atividade tectônica e vulcânica, com uma associação litológica complexa, englobando rochas ígneo-básicas (composição toleítica a alcalina, conforme, Mizusaki, 1994). As datações realizadas em amostras destas rochas, utilizando o método K/Ar, compreendem o intervalo entre 37 e 59 Ma, interpretado como o período de maior atividade vulcânica reconhecida na região do Complexo de Abrolhos e áreas adjacentes (Mizusaki, 1994). Este vulcanismo alterna períodos de atividade subaquosa com períodos de vulcanismo subaéreo, possuindo maior ou menor intercalação com sedimentos siliciclásticos da Formação Abrolhos. São reportadas reativações de falhas normais e inversas, devido à sobrecarga deste complexo vulcânico.

Szatimari & Mohriak (1994, citado por Conceição, 1994, citado por Gontijo, 1996) propõem um modelo cinemático no qual o tectonismo Eocênico foi atribuído a esforços compressivos entre a cadeia meso-oceânica e a subducção andina. Segundo esta hipótese, lineamentos do embasamento proterozóico de direção ENE foram reativados, originando feições transtensivas e transpressivas, potencialmente formadoras de bacias sedimentares do tipo rifte intracontinentais, tais como Resende, Taubaté e São Paulo, e possivelmente

causadoras do surgimento das serras do Mar e da Mantiqueira. O caráter transtensivo desta reativação contribuiu para a formação de dutos para o magmatismo de Abrolhos (Gontijo, 1996).

Foram identificadas na carta estratigráfica da Bacia de Cumuruxatiba as cinco megassequências revisadas por Hong *et al.* (1990b), representadas na Figura 05 pelas setas pretas e por suas siglas correspondentes. A seqüência sin-rifte I não foi identificada em razão da ausência de conteúdo fossilífero que a caracterizasse como tendo idade Dom João.

2.1.2. Bacia de Jequitinhonha

A Bacia de Jequitinhonha possui uma área total de 10.100 km², sendo que 9.500 km² são submersos. Situa-se no litoral sul do Estado da Bahia, na região correspondente à foz do rio homônimo. A norte, limita-se pelo Alto de Olivença, que a separa da Bacia de Almada e, a sul, limita-se com a Bacia de Cumuruxatiba pelo Banco Vulcânico de Royal Charlotte e sua projeção para o continente.

Esta bacia está posicionada sobre a borda sul do Cráton de São Francisco (Figura 03), que, segundo Inda *et al.* (1984), é constituída por terrenos predominantemente granulíticos, total ou parcialmente retrabalhados no ciclo Transamazônico.

O arcabouço estrutural da bacia é composto na porção norte pelo Alto de Olivença, que se estende para sul como uma plataforma rasa na parte terrestre e avança cerca de dez quilômetros mar adentro. A porção sul se diferencia da norte pela ausência deste patamar do embasamento (Figura 06). O embasamento é constituído por rochas graníticas e gnáissicas.

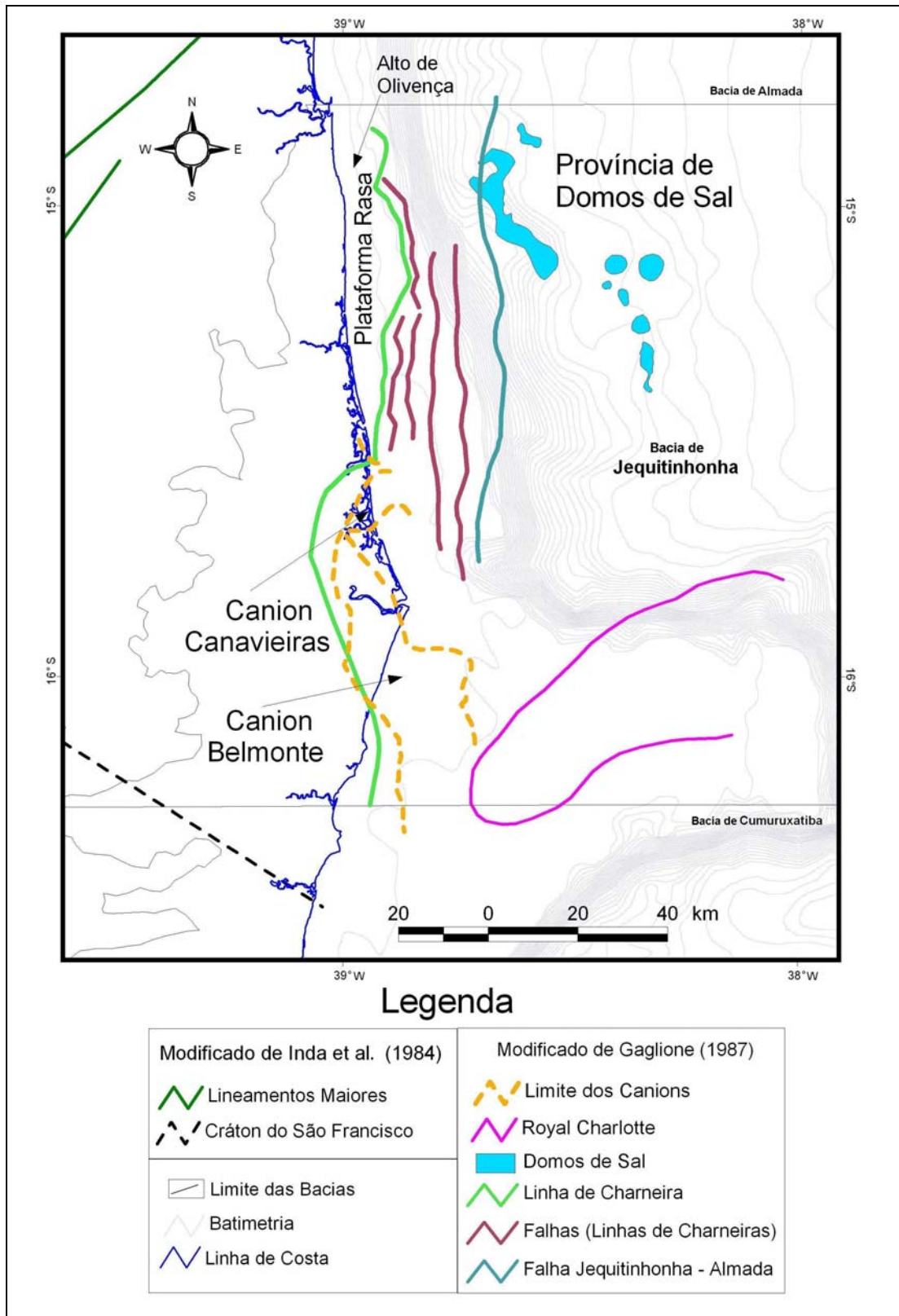


Figura 06 – Arcabouço Estrutural da Bacia do Jequitinhonha.

O limite da plataforma rasa supracitada se caracteriza como uma falha de borda que distingue a porção rasa a oeste, recoberta por sedimentos de idade Terciária, da porção localizada a leste, que apresenta o registro mais completo da sedimentação da bacia. O registro sedimentar observado na fase rifte é marcado por falhas normais que atingem o embasamento. A partir da falha de borda, que constitui o limite de deposição cretácea da bacia, as falhas normais aprofundam-se e estendem-se supostamente por toda a área sedimentar, formando *horsts*, *grabens* e *semi-grabens* (M. Araújo, 1990, citado por Córdoba, 1990).

Com base no comportamento das falhas normais, Córdoba (1990) dividiu a bacia em dois compartimentos informais: norte e sul. No compartimento sul, a falha de borda apresenta grande rejeito, feição característica dessa região. No compartimento norte, esta mesma falha delimita uma seqüência de blocos escalonados com mergulho geral para leste (M. Araújo, 1990, citado por Córdoba, 1990).

A coluna estratigráfica (Figura 07) é análoga às das outras bacias da costa leste brasileira, apresentando sedimentos lacustres da fase rifte iniciada no Eoaptiano, recobertos por rochas evaporíticas de idade Neo-aptiana e, subseqüentemente, por rochas de margem passiva do oceano aberto associadas à subsidência térmica. A nomenclatura utilizada nas unidades estratigráficas também obedece às definições anteriormente feitas por Carvalho e Garrido (1965), citados por Santos *et al.* (1994) e Asmus *et al.* (1971), as quais são as mesmas descritas para a Bacia de Cumuruxatiba. A exemplo da Bacia de Cumuruxatiba, as cinco megassequências revistas por Chang *et al.* (1990b) também foram identificadas na Carta Estratigráfica de Jequitinhonha, com a diferença da Megassequência Continental não ter sido subdividida nas três seqüências sin-rifte.

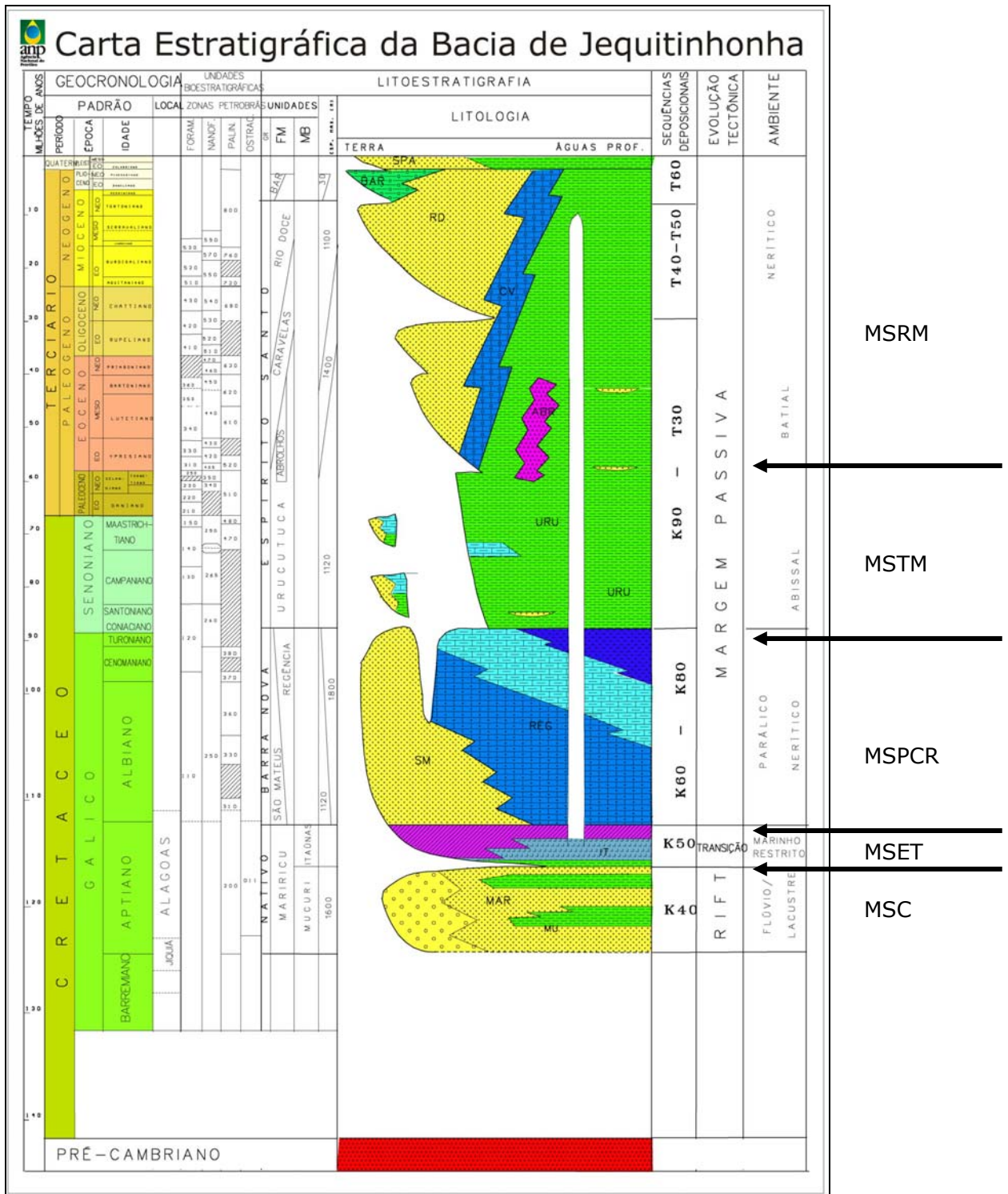


Figura 07 – Carta Estratigráfica da Bacia de Jequitinhonha (fonte: ANP). As setas e siglas representam as cinco Megassequências propostas por Hong *et al.* (1990b): Continental (MSC), Evaporítica Transicional (MSET), Plataforma Carbonática Rasa (MSPCR), Transgressiva Marinha (MSTM), Regressiva Marinha (MSRM).

A fase rifte constitui-se por sedimentos clásticos grosseiros e folhelhos do Membro Mucuri da Formação Mariricu, depositados em ambiente fluvio-lacustre. Estes sedimentos, de idade eoaptiana, apresentam maior espessura na parte terrestre e na porção marinha sul da bacia, pertencendo ao Grupo Nativo. Este grupo também é presente na estratigrafia da Bacia de Cumuruxatiba, que se diferencia da Bacia de Jequitinhonha pela ausência do Grupo Cumuruxatiba, posicionado estratigraficamente abaixo do Grupo Nativo (Santos & Gontijo 1992), como também pela ausência de parte do Grupo Nativo (Formação Cricaré). Vale lembrar que o Membro Mucuri está inserido na fase rifte da Bacia de Jequitinhonha e na fase evaporítica da Bacia de Cumuruxatiba.

A fase evaporítica representa as primeiras incursões marinhas durante a passagem do ambiente continental da fase rifte para o ambiente marinho aberto da fase drifte. Caracteriza-se pela deposição de sedimentos evaporíticos (halita e anidrita), em ambiente marinho de circulação restrita, interdigitados com arenitos do sistema deposicional costeiro. Tais rochas estão agrupadas no Membro Itaúnas da Formação Mariricu, com deposição durante o Neo-aptiano.

A fase drifte é representada pelo Grupo Barra Nova, constituído por sedimentos clásticos grosseiros depositados em leques deltaicos da Formação São Mateus, nas porções proximais da bacia. Nas porções mais distais, foram depositados os sedimentos carbonáticos de alta e baixa energia da Formação Regência. A idade do Grupo Barra Nova abrange o Albiano até o Coniaciano. Tal unidade apresenta as maiores espessuras na porção sul da bacia.

Do Neocretáceo até o Eoceno, a deposição do Grupo Espírito Santo ocorreu em ambiente francamente marinho, de caráter transgressivo, constituído por pelitos com arenitos finos intercalados (Formação Urucutuca). A partir do Eoceno, implantou-se um sistema regressivo, com a deposição de arenitos grosseiros característicos de leques costeiros da Formação Rio Doce, indicando uma possível reativação da área fonte nessa época (Fisher *et al.*, 1973, citado por Córdoba, 1990). Os carbonatos de alta e baixa energia, depositados em ambiente nerítico durante o Terciário, constituem a Formação Caravelas. Durante esta

fase regressiva, houve continuidade da deposição da Formação Urucutuca nas porções distais da Bacia de Jequitinhonha. A transgressão regional do Cretáceo Superior, responsável pela deposição da Formação Urucutuca, e a regressão regional oligocênica, que marca a deposição das formações Rio Doce e Caravelas, estão possivelmente relacionadas a reajustes isostáticos-eustáticos a elas contemporâneos.

A distribuição das fácies sedimentares que constituem esta fase de deriva continental e conspicuamente controlada pela halocinese, resultando numa tectônica de jangada (*raft tectonics*) (Magnavita *et al.*, 1999). Na calha (gráben) formada por este processo, encontram-se depositados sedimentos terciários cortados por falhas sintéticas e antitéticas que estão sobre uma cicatriz de sal aptiana. Na porção mais a leste, ocorre uma jangada de carbonatos albianos e turbiditos do Cretáceo Superior, depositados a partir de uma mudança na fisiografia da bacia devido à movimentação de sal, seguida, ainda mais a leste, por imensas muralhas de sal, que comprovam o fluxo halocinetico da plataforma em direção a águas profundas (Magnavita *et al.*, 1999).

Na porção sul da bacia, o Grupo Barra Nova se apresenta mais espesso se comparado à porção norte, em razão da ocorrência de uma taxa maior de subsidência, e, em parte, pelo aumento significativo de sedimentos arenosos da Formação São Mateus intercalados às rochas carbonáticas da Formação Regência.

Finalmente, durante o Mioceno/Plioceno, foram depositados na porção terrestre da bacia os sedimentos clásticos de leques aluviais da Formação Barreiras.

Na Bacia de Jequitinhonha, durante o Paleoceno/Eoceno, houve a intrusão de rochas ígneobásicas do Complexo Vulcânico de Royal Charlotte (Formação Abrolhos), definidas na Seção anterior (2.1.1).

2.2. Sistemas Petrolíferos

A definição de um sistema petrolífero em uma bacia sedimentar trata da relação genética entre uma determinada rocha geradora e as acumulações de óleo e gás dela resultantes (Magoon, 1994). Este termo engloba ainda todos os elementos essenciais e processos necessários para a existência de uma acumulação de óleo e gás. Os elementos essenciais são as rochas geradora, reservatório e selante, assim como sobrecarga sedimentar e o trapa. Os processos incluem a formação do trapa e a geração, migração e acumulação do petróleo (Magoon, 1994). Todos os elementos essenciais devem estar posicionados de forma adequada no tempo e no espaço (momento crítico), de modo que os processos necessários para a formação de uma acumulação de petróleo possam ocorrer.

A geoquímica orgânica é a disciplina que trata da identificação dos diferentes sistemas petrolíferos em uma determinada bacia sedimentar, pois possibilita correlacionar rochas geradoras com acumulações de petróleo, mapear fácies orgânicas e identificar e analisar indícios de óleo e gás.

A nomenclatura completa de um sistema petrolífero inclui a designação da rocha geradora, seguida da principal rocha reservatório (que contém o maior volume de hidrocarbonetos) e, por fim, de um símbolo que expressa o grau de certeza da correlação óleo-rocha. Caso o nível de certeza seja alto, o sistema petrolífero é dito conhecido e é indicado pelo símbolo (!). Em um sistema petrolífero hipotético (.), os estudos geoquímicos identificaram uma rocha geradora, mas não existe correlação com a acumulação. Quando a existência da rocha geradora ou de petróleo é baseada tão somente nas evidências geológicas e geofísicas, este sistema petrolífero é chamado de especulativo e recebe o símbolo (?) (Magoon, 1994).

2.2.1. Bacia de Cumuruxatiba

A Bacia de Cumuruxatiba possui acumulações de óleo e gás provenientes de dois sistemas petrolíferos distintos: Cricaré – Cricaré (!) e Regência – Urucutuca (!) (DPC & Assoc., 2000).

Sistema Petrolífero Cricaré – Cricaré (!)

O sistema Cricaré – Cricaré (!) inclui os folhelhos de idade Neocomiana da Formação Cricaré como rocha geradora, depositados em ambiente lacustre, e os arenitos fluvio-lacustres da mesma Formação Cricaré como reservatório. Uma ocorrência de óleo relacionada a este sistema petrolífero está representada pelo poço 1-BAS-48 (subcomercial) (Figura 08). Segundo os estudos realizados até o momento, este sistema petrolífero parece estar restrito à parte norte da bacia (DPC & Assoc., 2000).

Rocha Geradora e Ocorrências de Hidrocarbonetos

A rocha geradora associada à Formação Cricaré é representada por um pacote espesso, chegando até 500 metros, de folhelhos escuros com alto teor de COT (Carbono Orgânico Total), variando, na maioria das vezes, de 2% a 6%, e com índices de hidrogênio de até 900 mgHC/gCOT. Dados de petrografia orgânica revelaram o domínio de matéria orgânica amorfa, que, juntamente com o índice de hidrogênio, indicam que esta rocha geradora é composta por querogênio Tipo I (Gaglione *et al.*, 1987). Esta rocha geradora somente foi amostrada, com espessura significativa, por poucos poços na parte norte da bacia (e.g., 1-BAS-18A, Figura 08).

Gaglione *et al.* (1987) caracterizaram a acumulação do 1-BAS-48 (Figura 08) como um óleo com alto conteúdo de saturados (65%) e grau API 29°. Esta configuração geoquímica mostra uma boa correlação com os extratos orgânicos dos folhelhos lacustrinos da Formação Cricaré. Estes dados, corroborados com parâmetros de maturidade de biomarcadores, mostram um grau de evolução térmica moderado (DPC & Assoc., 2000).

Rocha Reservatório, Selo e Trapa

Os reservatórios relacionados a esta acumulação são os arenitos fluviais neocomianos da Formação Cricaré. O mecanismo de trapeamento é essencialmente estrutural e as rochas selantes são os folhelhos lacustrinos pertencentes a esta mesma formação.

Geração e Migração

A integração de dados de reflectância de vitrinita providas de diversos poços (Gaglione *et al.*, 1987) indica que o topo da janela de óleo na Bacia de Cumuruxatiba varia de 1.500 metros, perto da linha de charneira cretácica, até mais de 3000 metros, na parte oceânica distal. Com isto, na parte norte da bacia, as rochas geradoras atingiram o estágio de evolução termal maduro (porção distal da plataforma), enquanto, na parte centro-sul, estas rochas estão bastante soterradas e provavelmente atingiram o estado sobrematuro. A migração deve ter sido facilitada por contatos laterais e através de falhas riftes (DPC & Assoc., 2000).

Sistema Petrolífero Regência – Urucutuca (!)

O sistema Regência – Urucutuca (!) inclui as rochas geradoras formadas por margas e folhelhos calcíferos de ambiente marinho da Formação Regência, que possui idade Albiana a Cenomaniana, e os reservatórios turbidíticos da Formação Urucutuca, datada do Paleoceno. A ocorrência deste sistema é comprovada pela acumulação do Campo de Arraia, descoberto pelo poço 1-BAS-11, e pela área do 1-BAS-104 (Figura 08). A ocorrência deste sistema petrolífero está restrita, com os estudos realizados até o momento, à porção sul da bacia (DPC & Assoc., 2000).

Rochas Geradoras

As rochas geradoras mais importantes, em termos de volume gerado, são as margas e folhelhos calcíferos de ambiente marinho da Formação Regência, de idade Albiana a Cenomaniana, as quais possuem COT médio ao redor de 1%, com valores máximos em 4%, predominantemente do tipo II.

Rocha Reservatório, Selo e Trapa

Os principais reservatórios deste sistema petrolífero são os turbiditos da Formação Urucutuca (fase drifte), depositados desde o Neo-cretáceo até o Meso-terciário. Os selos para os reservatórios da Formação Urucutuca são os próprios folhelhos desta formação intercalados aos arenitos turbidíticos. Na acumulação do Campo de Arraia, os hidrocarbonetos são trapeados essencialmente por mecanismos estruturais.

Além destes, os arenitos das formações Mariricu e Cricaré (Aptiano) são também considerados objetivos exploratórios. Constituem reservatórios secundários os arenitos da Formação São Mateus e os calcarenitos da Formação Regência (Grupo Barra Nova – Albiano). Na Formação Cricaré, os reservatórios arenosos são selados pelos folhelhos da mesma formação.

A geração e a migração deste sistema petrolífero são análogas ao sistema Cricaré – Cricaré (!).

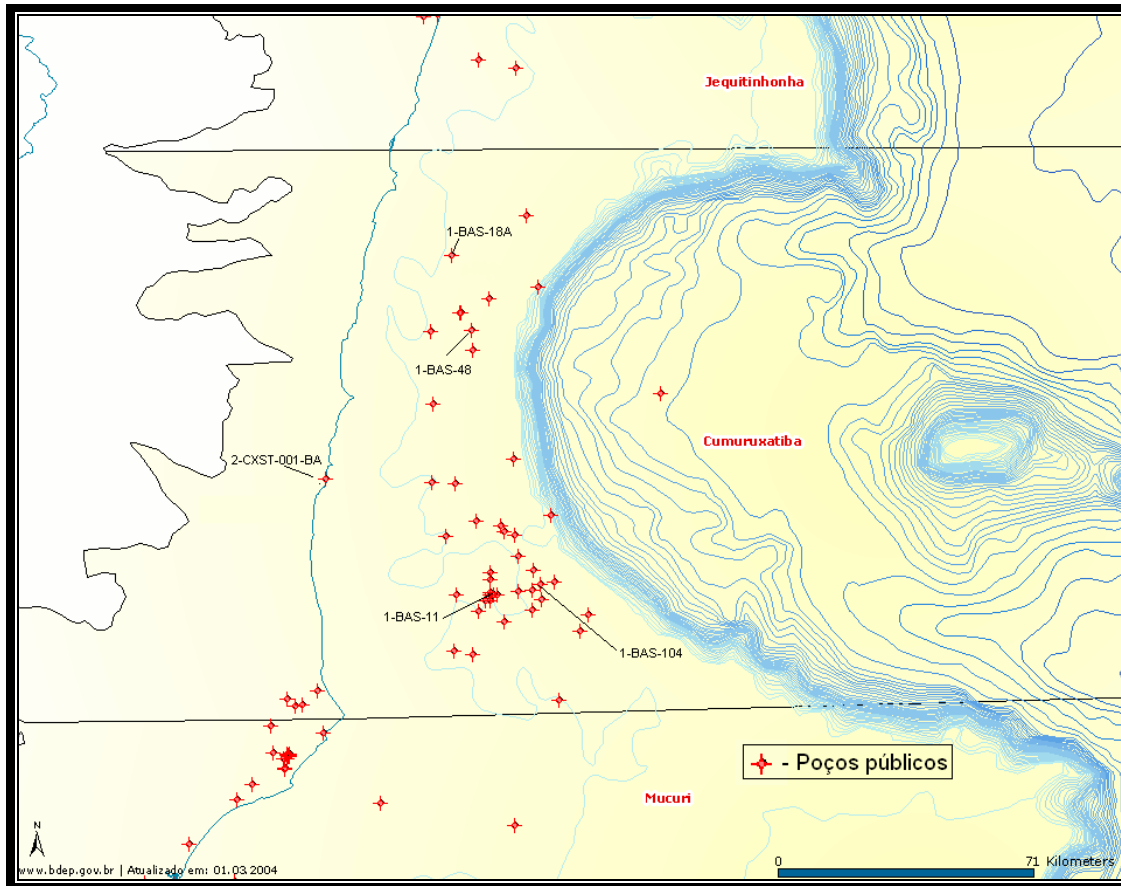


Figura 08 – Distribuição de poços e ocorrências de hidrocarbonetos na Bacia de Cumuruxatiba (Fonte: BDEP).

2.2.2. Bacia de Jequitinhonha

O sistema petrolífero **Regência – Mariricu (!)** é o responsável, até o momento, por todas as ocorrências de hidrocarbonetos nesta bacia (DPC & Assoc., 2000). A única ocorrência significativa, relacionada a este sistema petrolífero, foi descoberta pelo poço 1-BAS-37 (Figura 09). Poucos indícios de óleo foram localizados em poços da porção sul da bacia (e.g., 1-BAS-68, Figura 09).

Rocha Geradora

As rochas geradoras estão contidas na Formação Regência (Albiano-Cenomaniano) e incluem os folhelhos ricos em matéria orgânica depositados em ambiente marinho carbonático anóxico. Estas rochas apresentam teores de COT variando de 2% até 5%, e um potencial gerador satisfatório com, em média, 7 mgHC/g rocha (Gaglione *et al.*, 1987). Ocorre a dominância do querogênio Tipo II, mostrado pelo índice de hidrogênio de 500 – 600 mgHC/gCOT. Também são encontradas rochas geradoras marinhas potenciais nas Formações Mariricu (Aptiano) e Urucutuca (Cenomaniano-Turoniano), apesar destas serem pobres em matéria orgânica na região (DPC & Assoc., 2000).

As ocorrências de hidrocarbonetos relacionados à Formação Regência são compostas por poucos indícios de óleo e uma acumulação subcomercial no poço 1-BAS-37 (grau API 39,6°, Gaglione *et al.* (1987), Figura 09). As características geoquímicas revelam uma boa correlação com os extratos orgânicos dos folhelhos da Formação Regência. As informações sobre maturidade dos biomarcadores indicam um baixo nível de evolução termal para este óleo.

Rocha Reservatório, Selo e Trapa

As rochas que servem de reservatórios para os óleos gerados pela Formação Regência são de idade Aptiana e compostas por depósitos fluviais siliciclásticos do Membro Mucuri (Formação Mariricu). O selo é composto pelas rochas evaporíticas do Membro Itaúnas de mesma idade e formação. Os trapas são essencialmente estruturais, localizados sobre um alto do embasamento onde os reservatórios estão selados pelos evaporitos (DPC & Assoc., 2000).

Geração e Migração

A integração de dados de reflectância de vitrinita efetuada por Gaglione *et al.* (1987) em diversos poços da Bacia de Jequitinhonha indicou que o topo da janela de óleo varia de

1000 até 1500 metros na parte terrestre ou proximal e encontra-se acima de 3000 metros na parte oceânica distal. A partir desta análise, os folhelhos da Formação Regência são imaturos em praticamente toda a área plataformal, ficando matura somente no talude e regiões oceânicas profundas. As possíveis rotas de migração seriam através das principais falhas e de contatos diretos com as rochas carreadoras da Formação Mariricu (DPC & Assoc., 2000).

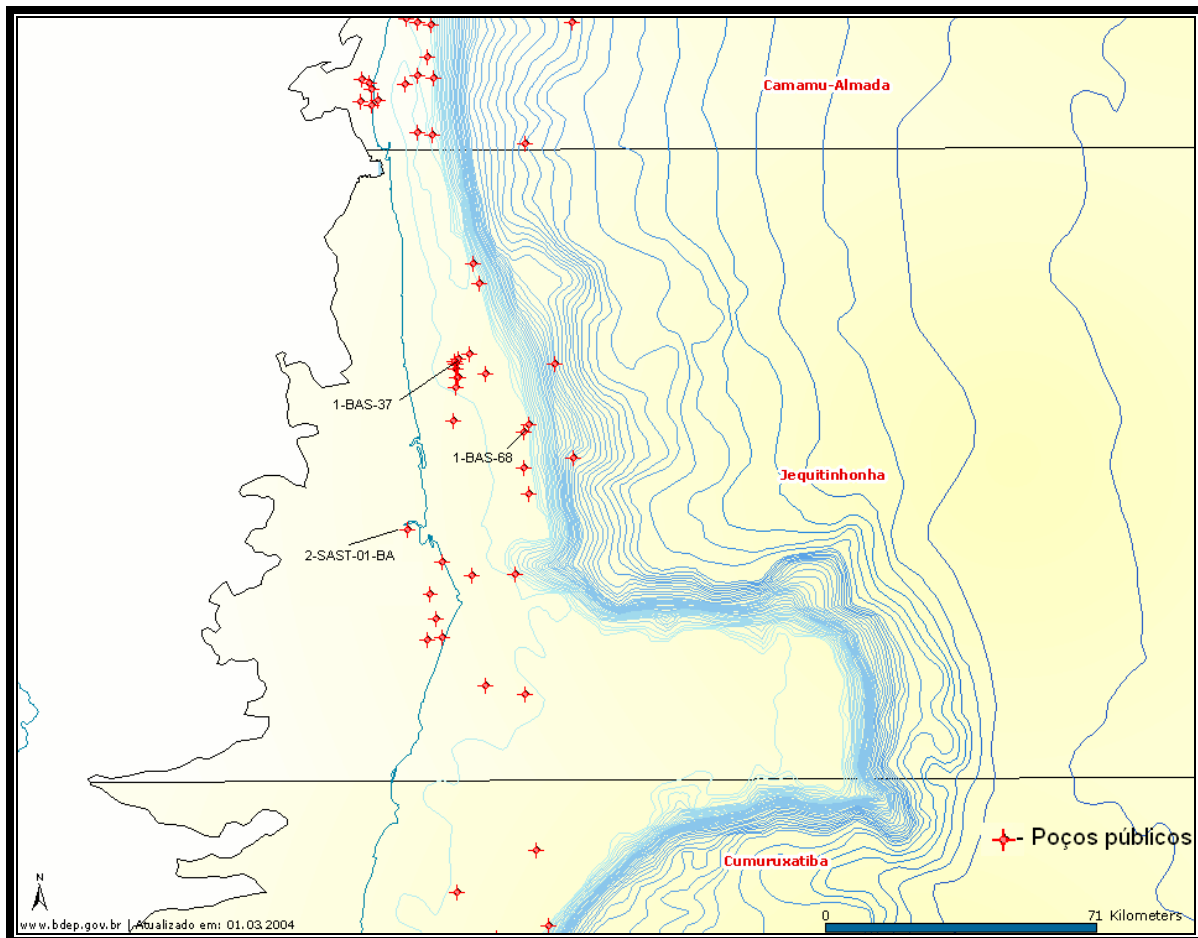


Figura 09 - Distribuição de poços e ocorrências de hidrocarbonetos na Bacia de Jequitinhonha (Fonte: BDEP).

2.3. Histórico de Exploração

2.3.1. Bacia de Cumuruxatiba

A história da exploração de petróleo na bacia teve início na década de 60, com a perfuração do poço estratigráfico 2-CXST-001-BA (Figura 08), no município de Prado. Até o presente, 52 poços exploratórios foram perfurados (05 terrestres e 47 no mar), sendo que 43 poços são pioneiros, 08 de extensão e 01 estratigráfico, segundo consta no Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) da Agência Nacional de Petróleo (ANP). O resultado obtido na perfuração destes poços está resumido na Tabela 1.

Tabela 01 – Resumo da perfuração na Bacia de Cumuruxatiba (Fonte: ANP).

Seco com indícios de óleo e gás	02
Seco com indícios de óleo	03
Seco sem indícios de óleo	31
Portador de gás	01
Produtor subcomercial de óleo	07
Produtor subcomercial de gás	01
Descobridor de campo com óleo	01
Descobridor de campo com gás e condensado	02
Abandonado por acidente mecânico	03
Abandonado por outras razões	01
Total	52

2.3.2. Bacia de Jequitinhonha

Segundo Bacocoli & Asmus (1968, citado por Córdoba, 1990), um extenso baixo gravimétrico de forma elipsoidal e direção noroeste-sudeste foi detectado na região entre os rios Pardo e Jequitinhonha. Assim foi descoberta a Bacia de Jequitinhonha, em 1959.

As atividades exploratórias na bacia tiveram início em 1966, com a perfuração de poços estratigráficos em terra, onde o primeiro, denominado 2-SAST-01-BA (Figura 09), perfurou 3618 metros de sedimentos sem encontrar o embasamento (Bacocoli & Asmus, 1968, citado por Córdoba, 1990). A partir de 1970, as atividades exploratórias foram direcionadas para a plataforma continental, com a execução dos primeiros levantamentos sísmicos na região marítima (Meister & Gomes, 1971, citado por Córdoba, 1990).

Foram perfurados até o presente cerca de 24 poços exploratórios, 6 de extensão, 3 estratigráficos e 2 de produção, totalizando 35 poços (Fonte: BDEP). Os resultados obtidos estão resumidos na Tabela 02.

Tabela 02 - Resumo da perfuração na Bacia de Jequitinhonha (Fonte: ANP).

Seco com indícios de óleo e gás	01
Seco sem indícios de óleo	23
Produtor subcomercial de óleo	04
Produtor comercial de óleo	01
Extensão produtor de óleo	01
Descobridor de campo de óleo	01
Abandonado por acidente mecânico	04
Total	35

Estão relacionados na Figura 10 os blocos licitados nas seis rodadas realizadas pela Agência Nacional de Petróleo (ANP), que estejam sob concessão. Nota-se que na Bacia de Cumuruxatiba não foram adquiridos blocos até o momento.

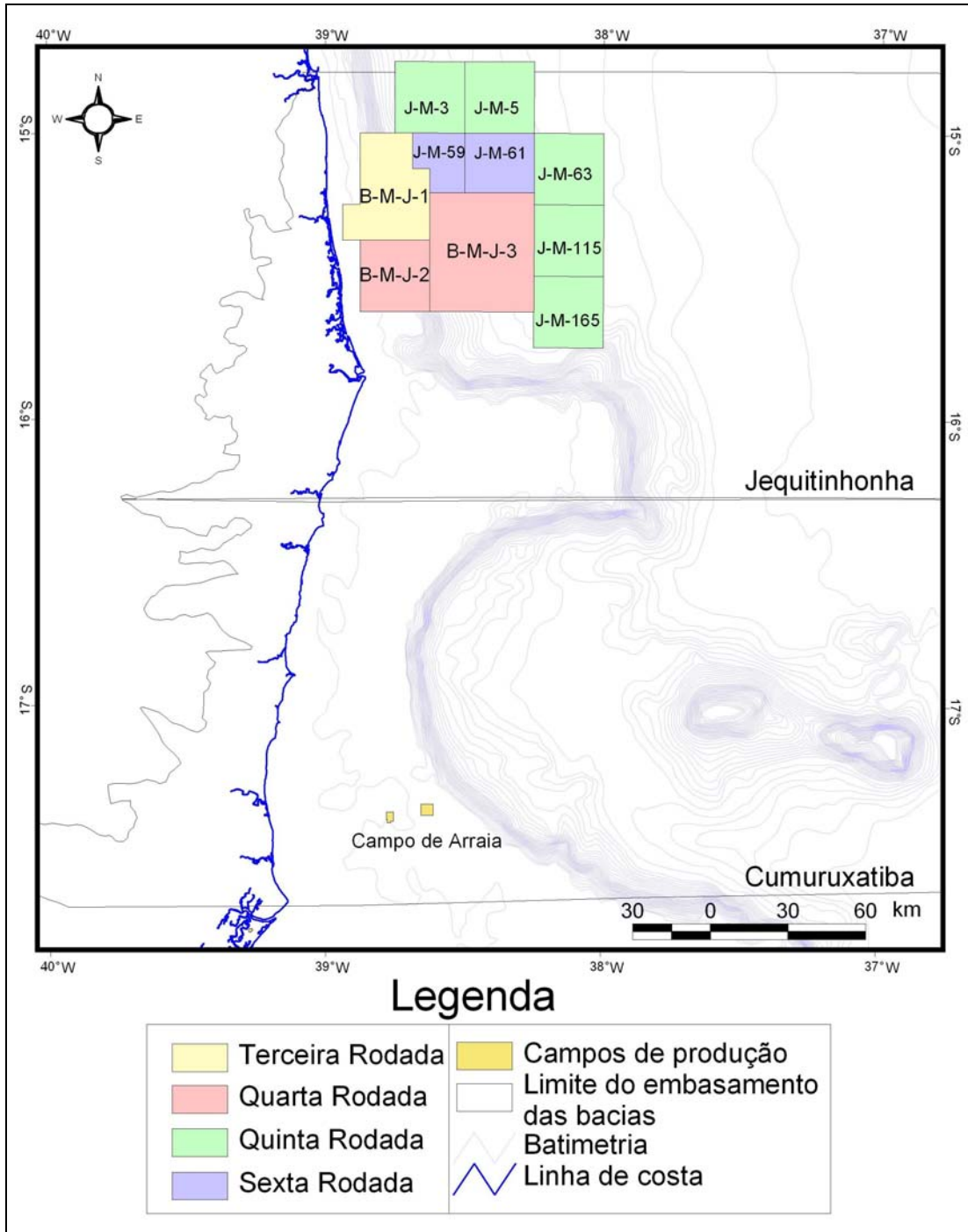


Figura 10 - Blocos sob concessão e campos de produção nas bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha.

3. Detecção de Exsudações de Óleo na Superfície do Mar Utilizando Imagens RADARSAT-1

O RADARSAT-1 é um satélite de observação da Terra projetado e desenvolvido pela Agência Espacial Canadense (CSA) para monitorar mudanças ambientais e mapear recursos naturais do planeta. Este satélite desenvolve uma órbita aproximadamente polar, em sincronia com o sol, a 798 km de altitude. Possui a bordo um radar com visada lateral para direita (Figura 11), imageando para oeste durante a órbita descendente e para leste durante a órbita ascendente.

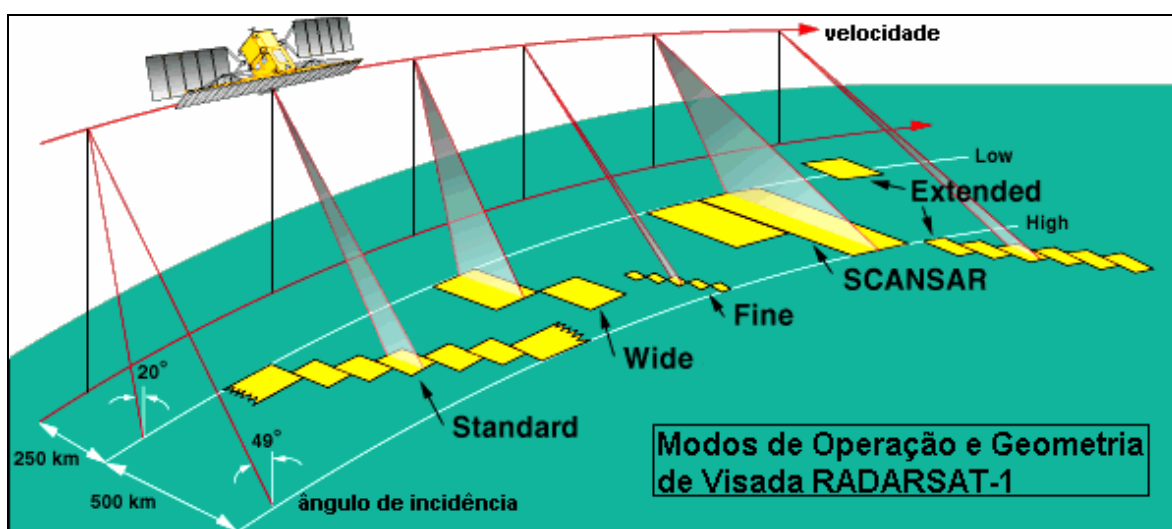


Figura 11 – Geometria de visada e modos de operação do satélite RADARSAT-1 (modificado de RADARSAT International).

O sensor radar (acrônimo de “*Radio Detection And Ranging*”) do satélite RADARSAT-1 é denominado de Abertura Sintética (Synthetic Aperture Radar - SAR). Este sistema sensor é dito ativo, pois fornece sua própria fonte de energia eletromagnética. A antena do radar transmite e recebe seqüencialmente os pulsos de energia eletromagnética em frequências específicas e polarizações determinadas. Os pulsos emitidos, normalmente, recobrem uma pequena banda de frequências, centrada na frequência selecionada para o sistema radar usado.

Na superfície da Terra, a energia do pulso do radar interage com o alvo e se espalha em várias direções. Parte desta energia retorna para a antena do sistema radar que a emitiu, a qual opera numa polarização específica (não obrigatoriamente a mesma polarização que o pulso de energia emitido). O sinal é então convertido pelo sistema eletrônico do radar para o formato digital e gravado para posterior processamento e visualização sob a forma de imagem.

A imagem de radar é comumente utilizada para a detecção de exsudações petrolíferas na superfície do mar, visto que o filme de óleo reduz a amplitude das ondas capilares formadas pelo vento. A exemplo do pulso de radar incidente no oceano, tais ondas capilares têm comprimento de onda centimétrico, o que resulta no retroespalhamento da energia eletromagnética do sistema SAR de forma difusa. Na presença de óleo, o pulso de radar é refletido especularmente, produzindo uma área com baixo sinal de retorno e textura lisa na imagem.

Nas seções seguintes, tais temas serão abordados em detalhe.

3.1. Sensoriamento Remoto por Radar

O sensoriamento remoto por radar utiliza um sistema ativo, que emprega ondas eletromagnéticas na faixa de microondas, embarcado em aeronaves (aerotransportado) ou satélites (orbital). Devido às características de penetração na atmosfera do sinal nessa faixa do espectro eletromagnético, o imageamento pode ser realizado na presença de nuvens, neblina e chuva. Além disso, por ser um sistema ativo, também pode ser utilizado durante a noite, sem a presença da luz solar.

3.1.1. Energia Eletromagnética

O sensoriamento remoto compreende a detecção de características físicas e/ou químicas de alvos na superfície da terra sem o contato direto entre tais feições e o sistema sensor. A condição essencial para o sensoriamento remoto é a existência de uma fonte de energia que

ilumine o alvo de interesse. Existe ainda o caso em que a energia é emitida pelo próprio alvo em razão de sua temperatura. Os sistemas de radar são sensores ativos, que iluminam a região de estudo emitindo a própria energia eletromagnética.

É através da energia eletromagnética que a informação é transmitida do objeto ao sensor. A informação transmitida pode ser definida em termos de frequência (ou comprimento de onda), intensidade e polarização da onda eletromagnética. A radiação eletromagnética se propaga à velocidade da luz; quanto maior sua frequência, menor seu comprimento de onda.

A radiação eletromagnética compõe-se de dois campos ondulatórios que se propagam à velocidade da luz ($c = 3 \times 10^8$ m/s). O campo elétrico (\vec{E}) e o campo magnético (\vec{M}) são perpendiculares entre si e oscilam perpendicularmente ao percurso feito pela radiação eletromagnética (Figura 12).

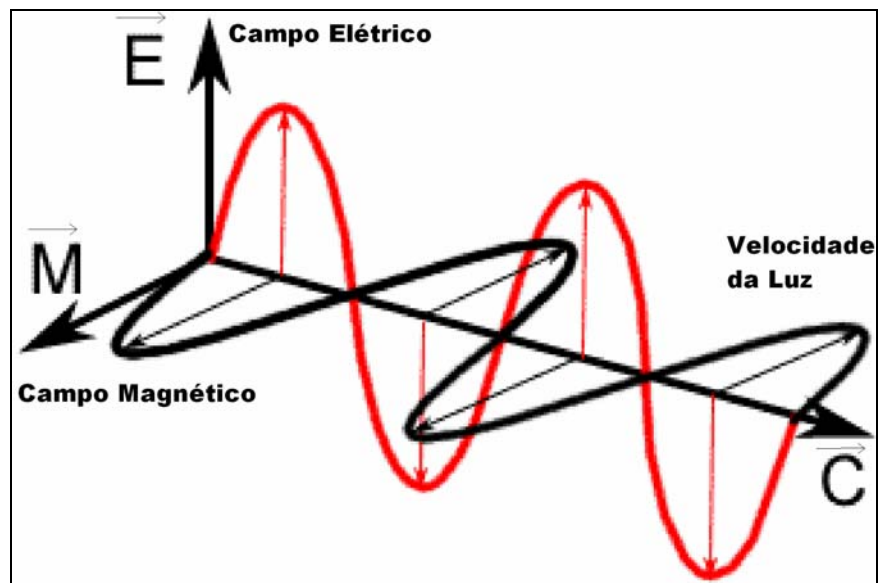


Figura 12 – Radiação eletromagnética.

O tempo de retorno da energia que foi retroespalhada pelo terreno imageado determina a posição e a distância entre os alvos e a antena do radar. A intensidade do sinal de retorno também é medida pela antena e está diretamente associada a um nível de cinza registrado pelo sistema. Este nível de cinza é comumente chamado de DN, do inglês *Digital Number*, e exibe uma medida feita pelo sensor, que representa a amplitude da energia retroespalhada pelos diferentes materiais presentes na área imageada, a qual corresponde ao elemento de resolução do radar no terreno.

3.1.2. Espectro Eletromagnético

A radiação eletromagnética inclui as ondas de rádio, microondas, radiação infravermelha, radiação visível, raios ultravioletas, raios-X e raios gama, conhecidos coletivamente como o espectro eletromagnético. A diferença entre tais faixas do espectro é o seu comprimento de onda (Figura 13) , que está diretamente relacionado com a quantidade de energia que a onda carrega. Quanto menor o comprimento de onda da radiação, maior é a energia.

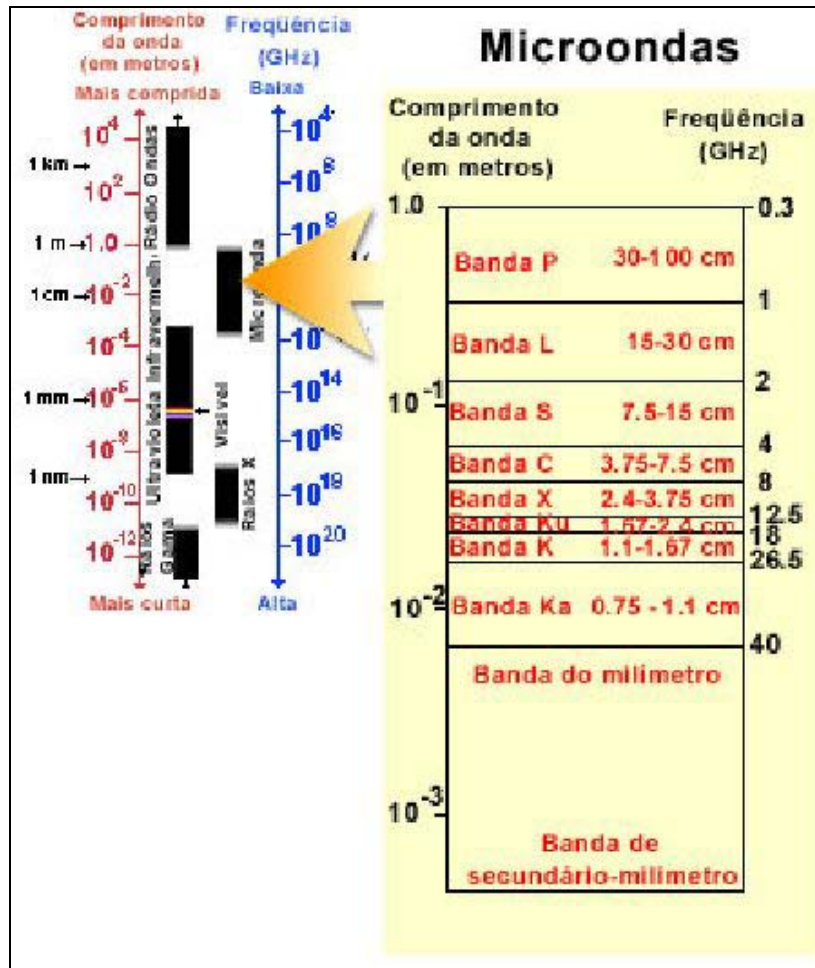


Figura 13– Espectro eletromagnético (modificado de Canada Centre for Remote Sensing).

Toda radiação que é captada por sensores remotos passa, necessariamente, pela atmosfera. O efeito causado por esta passagem varia com as condições vigentes no momento da aquisição do dado e com os comprimentos de onda envolvidos. A interação ocorre principalmente por mecanismos de espalhamento (*scattering*) e absorção. O espalhamento atmosférico consiste na interação da radiação com moléculas atmosféricas e outras minúsculas partículas que são muito menores em diâmetro do que o comprimento de onda desta radiação (espalhamento de Rayleigh). O efeito é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda (Lillesand & Kiefer, 1994). Assim, comprimentos de onda menores são mais afetados ou *espalhados* por este efeito. Outro tipo de espalhamento é chamado de Mie, onde o diâmetro das partículas da atmosfera é essencialmente igual ao comprimento de onda da energia utilizada na aquisição do dado. Este tipo de espalhamento

tende a influenciar comprimentos de onda maiores comparados com o espalhamento de Rayleigh (Lillesand & Kiefer, 1994). Um outro fenômeno, denominado espalhamento não-seletivo (*nonselective scatter*), acontece quando o diâmetro das partículas causadoras do espalhamento é muito maior que o comprimento de onda da energia empregada na aquisição do dado (Lillesand & Kiefer, 1994).

A absorção atmosférica é resultado da perda efetiva de energia para constituintes atmosféricos. Este processo normalmente envolve a absorção de energia em determinados comprimentos de onda. A escolha do sensor para determinada aplicação tem de ser feita levando em consideração a dependência da transmissividade atmosférica com o comprimento de onda utilizado.

As principais características das faixas do espectro eletromagnético utilizadas em sensoriamento remoto encontram-se descritas abaixo, ordenadas dos valores de comprimento de onda (λ) maiores para os menores (Sabins, 1996):

- **Microondas** (λ de 0,1 a 100 cm): Os sistemas de radar constituem a forma ativa do sensoriamento remoto por microondas. Imagens de radar são adquiridas em vários comprimentos de onda, com penetração em nuvens, nevoeiro e chuva. Os dados podem ser também adquiridos no modo passivo (radiômetros);
- **Infravermelho Termal** (λ de 3 a 5 μm ; 8 a 14 μm): principal janela atmosférica na região termal. Imagens com este comprimento de onda são adquiridas por varredores ótico-mecânicos;
- **Infravermelho refletido** (λ de 0,7 a 3,0 μm): radiação solar refletida que não contém informação sobre propriedades termais de materiais, mas sim sobre sua composição química ou mineralógica;
- **Visível** (λ de 0,4 a 0,7 μm): faixa do espectro passível de detecção com filmes fotográficos e fotodetectores;
- **Ultravioleta** (λ de 0,03 a 0,4 μm): comprimentos de onda menores que 0,3 μm são completamente absorvidos pelo ozônio da camada atmosférica superior.

3.1.3. Faixas de Frequência Utilizadas no Sensoriamento Remoto por Radar

A frequência é o número de cristas de onda que passam em um determinado ponto, em um período de tempo específico. A unidade utilizada é o Hertz, que expressa um ciclo (ou passagem) por segundo. O comprimento de onda mede a distância entre dois picos (máximos de campo elétrico ou magnético) sucessivos; a unidade comumente usada no sensoriamento remoto por radar é o centímetro.

O comprimento de onda e a frequência estão inter-relacionados de acordo com a equação abaixo:

$$\lambda = c / f,$$

onde c é a velocidade da luz (m/s^{-1}), f é a frequência (Hz) e λ é o comprimento de onda (m).

No sensoriamento remoto por radar, bandas específicas correspondentes a determinados intervalos de comprimento de onda e frequência são designadas por letras. Esta nomenclatura é arbitrária, herdada da política de segurança utilizada na Segunda Guerra Mundial. As frequências mais utilizadas e os comprimentos de onda correspondentes estão listados na Tabela 03.

Tabela 03 – Intervalos de comprimento de onda e frequência mais utilizados em sistemas de radar (modificado de Sabins, 1996).

Banda do radar	Comprimento de onda (cm)	Frequência (GHz)
K_a	0,8 – 1,1	40,0 – 26,5
K_s	1,1 – 1,7	26,5 – 18,0
K_u	1,7 – 2,4	18,0 – 12,5

X	2,4 – 3,8	12,5 – 8,0
C	3,8 – 7,5	8,0 – 4,0
S	7,5 – 15,0	4,0 – 2,0
L	15,0 – 30,0	2,0 – 1,0
P	30,0 – 100,0	1,0 – 0,3

3.1.4. Princípios Básicos de Funcionamento de Radares Imageadores

Um típico sistema radar imageador é composto basicamente por um coletor, um transmissor, um detector e uma antena (Figura 14). Seu princípio de funcionamento consiste na emissão de um pulso de microondas e no registro do sinal de retorno pela antena. O transmissor produz pulsos de microondas, que são regulados por um sincronizador e padronizados a uma potência conhecida por um modulador. A chave de transmissão / recepção previne a interferência entre os pulsos transmitidos e recebidos, bloqueando o circuito de recepção durante a transmissão e o circuito de transmissão durante a recepção dos dados. A antena focaliza o pulso de energia na forma desejada para a transmissão e também para a coleta do sinal que retorna do terreno. Um receptor amplifica as fracas ondas de energia coletadas pela antena, preservando o tempo de retorno e as variações de intensidade e fase do pulso recebido. Os pulsos são convertidos para uma forma adequada para amplificação e processamento pelo *mixer* e pelo oscilador local, sendo em seguida enviados para o receptor. O receptor amplifica o sinal, passando-o para o detector, que produz um sinal eletrônico adequado para gravação e armazenamento (Curran, 1985).

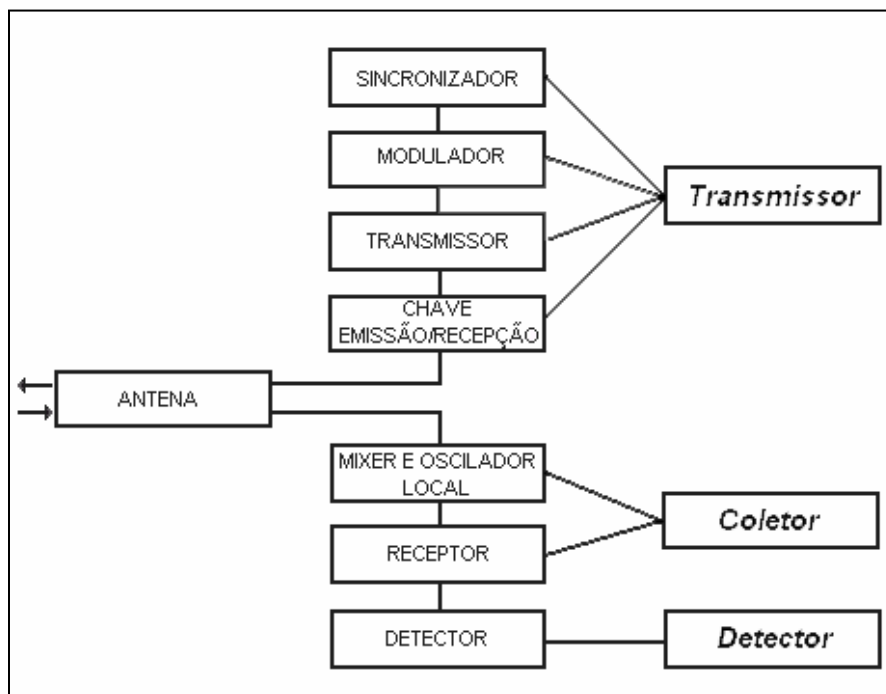


Figura 14 – Princípio de funcionamento de um radar imageador (modificado de Vanucci, 1999).

3.1.5. Características das Imagens de Radar

Geometria de Imageamento

A geometria básica de imageamento dos sistemas de radar pode ser observada na Figura 15. A plataforma se desloca a uma determinada velocidade (V) em relação ao solo e está posicionada a uma altitude H . O feixe de radar é transmitido, perfazendo ângulos retos com a direção de voo, iluminando uma faixa do terreno deslocada da posição nadir. A porção iluminada que está posicionada mais próxima à plataforma imageadora é chamada *near range* (alcance próximo), enquanto que a mais afastada é denominada *far range* (alcance afastado). O ângulo de depressão é definido como o ângulo entre o pulso de radar e um plano horizontal. O ângulo de incidência é formado entre o pulso de radar e a normal ao terreno imageado. Em regiões oceânicas (sem relevo), estes ângulos são complementares.

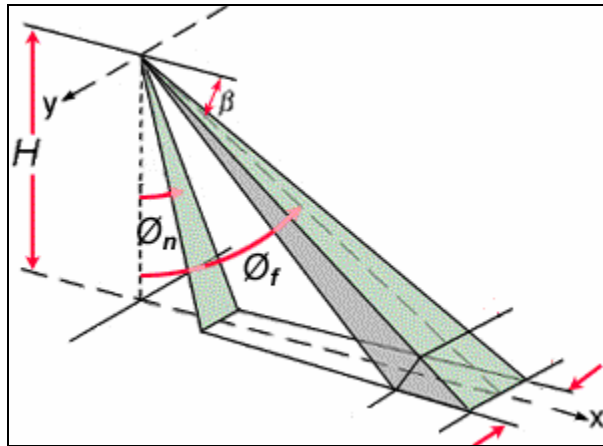


Figura 15 – Geometria de imageamento de sistemas de radar, onde H = altitude do vôo, β = ângulo de depressão, θ_n = ângulo de incidência no alcance próximo e θ_f = ângulo de incidência no alcance afastado (modificado de <http://www.ciat.cgiar.org/dtmradar/radar3-geometria.htm>).

A aquisição de imagens de radar é, portanto, feita lateralmente (*side look viewing*). Esta característica ocasiona distorções geométricas nos dados. Sendo um equipamento fundamentalmente de medição de distância, o radar grava o sinal de retorno de acordo com o afastamento entre o objeto imageado e a plataforma imageadora, formando uma imagem chamada *slant range* (Figura16). O resultado mostra que os alvos posicionados no *near range* aparecem comprimidos em relação ao *far range*.

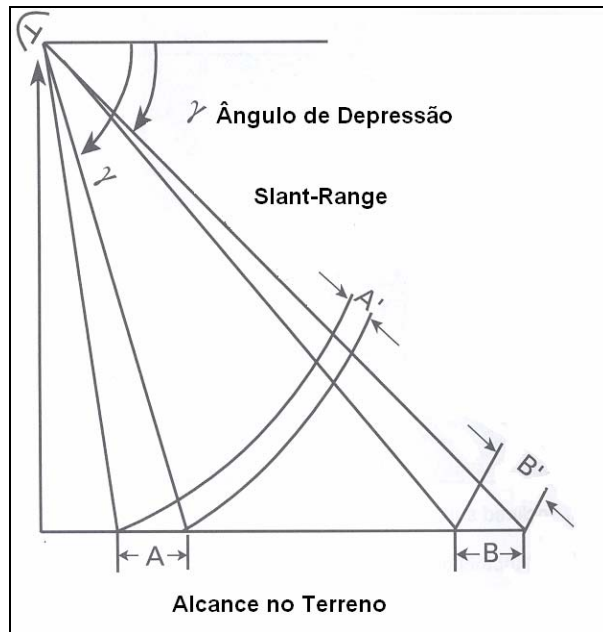


Figura 16 – Diagrama ilustrando a imagem *slant-range* (modificado de Sabins, 1996).

Todos os sistemas modernos de radar projetam automaticamente as imagens para o formato *ground range*, que expressa a distância horizontal verdadeira ao longo da superfície imageada. As distâncias em *ground range* podem ser calculadas a partir das distâncias em *slant range*, considerando a altitude da plataforma e o ângulo de depressão utilizado, através da equação:

$$G = H \left(\frac{1}{\sin^2 \gamma} - 1 \right)^{1/2},$$

onde G é a distância em *ground range*, H é a altitude da plataforma e γ é o ângulo de depressão usado.

Resolução

A resolução refere-se à distância de separação entre dois alvos necessária para que eles sejam exibidos como feições individuais utilizando um determinado sistema sensor. Esta é

uma característica fundamental na escolha do tipo do sensor, uma vez que define as dimensões das feições detectáveis na imagem.

Nos sistemas de radar, este parâmetro é definido pela dimensão da célula de resolução no terreno, que é calculada em duas direções diferentes: paralela (*azimuth*) e perpendicular (*range*) à linha de vôo.

A **resolução alcance** (G_r), ou resolução na direção de visada do radar (*range*), é determinada em função do ângulo de depressão (γ) e do comprimento do pulso (τ). O valor de τ é definido pela duração do pulso transmitido, medida em microsegundos. Tal valor pode ser convertido para distância, multiplicando-o pela velocidade da luz (c). A relação entre eles é dada pela equação:

$$G_r = \frac{\tau \cdot c}{2 \cos \gamma}$$

Com o aumento do ângulo de depressão, isto é, à medida que se aproxima do *near range*, a resolução alcance diminui. Com a proximidade do *far range*, a resolução alcance aumenta e objetos cada vez menores são possíveis de serem discernidos na imagem. É possível refinar a resolução alcance através do encurtamento do comprimento do pulso, mas isto ocasiona a redução da quantidade de energia total em cada pulso transmitido.

A **resolução azimutal** (R_a), ou resolução na direção de deslocamento da plataforma (azimute), é definida pela largura angular da faixa iluminada pela antena de radar no terreno. A faixa iluminada é menor na porção do *near range* da imagem, e maior no *far range*. O valor de R_a é dado pela equação que se segue:

$$R_a = \frac{0,7 \cdot S \cdot \lambda}{D} ,$$

onde S é a distância *slant range* (da antena até o alvo no terreno), λ é o comprimento de onda do pulso incidente e D é o comprimento da antena.

Polarização

A energia eletromagnética na faixa de microondas que atinge o terreno é despolarizada pelo alvo. A parte que retorna para a antena é gravada na polarização especificada para o sistema radar. A polarização transmitida pode ser horizontal (com o campo elétrico paralelo ao eixo da antena) ou vertical (com o campo elétrico perpendicular ao eixo da antena), e o recebimento idem, não necessariamente na mesma polarização do pulso de energia transmitido. Assim, existem basicamente quatro formas de polarização: HH (transmissão e recepção horizontal) ou VV (transmissão e recepção vertical), conhecidas como polarizações paralelas, HV (transmissão horizontal e recepção vertical) ou VH (transmissão vertical e recepção horizontal), conhecidas como polarização cruzada. Os sistemas de radar podem ter uma, duas ou todas as quatro combinações de polarização transmitida / recebida. Os sensores mais modernos, como o RADARSAT-2 (a ser lançado, ver Seção 3.3.11), oferecem a possibilidade de utilizar todas as quatro polarizações no modo de operação conhecido como *quadpol* ou polarimétrico.

3.1.6. Radares de Abertura Real e de Abertura Sintética

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

SLAR / RAR

O Radar de Abertura Real possui uma antena que ilumina lateralmente os alvos com um feixe que é amplo verticalmente e estreito horizontalmente. A varredura de geração da imagem é produzida pelo próprio movimento da aeronave durante a passagem sobre a área a ser recoberta. Este sistema apresenta o inconveniente apresentar o valor da resolução

azimutal diretamente proporcional à distância entre a antena e o alvo imageado, e inversamente proporcional ao comprimento da antena utilizada no imageamento. Desta forma, para se obter uma melhor resolução azimutal, ou se diminui a distância entre o radar e o alvo, ou aumenta-se o comprimento real da antena (Fonte: http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario/radar_in.htm).

SAR

O SAR apresenta as características de um radar convencional, com visada lateral, ou seja, o diagrama de irradiação da antena do radar é disposto perpendicularmente ao eixo definido pelo vetor velocidade da plataforma na qual está instalado (Figuras 15 e 16).

O Radar de Abertura Sintética se diferencia do Radar de Abertura Real no método utilizado para alcançar a resolução na direção azimutal, já que a resolução nesta direção é dependente do comprimento da antena. O sistema SAR utiliza uma antena de dimensões físicas muito menores que o outro sistema, enviando seus pulsos de microondas de diferentes posições enquanto a plataforma avança, simulando uma abertura real pela integração dos ecos de radar que retornam para o sensor, em um sinal composto (Figura 17).

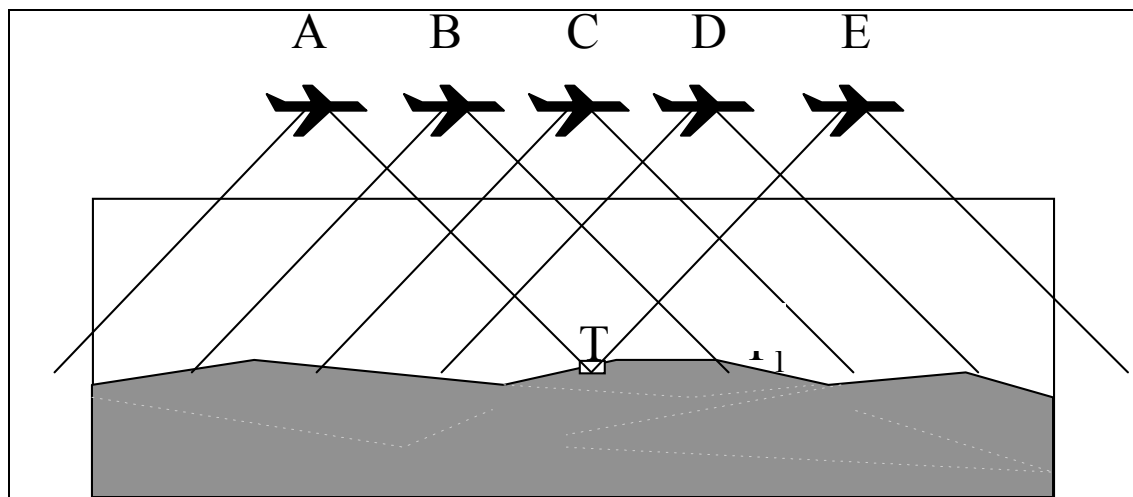


Fig.17 – Figura esquemática da aquisição de dados SAR.

No intervalo de tempo em que um alvo pontual no terreno imageado permanece dentro do campo de visada da antena SAR, o sensor envia vários pulsos, e, por conseguinte, coleta várias amostras de eco desse ponto. Estas amostras são armazenadas em um dispositivo de gravação. O eco recebido para cada pulso enviado sofre uma variação de frequência, devido à velocidade da plataforma. Esta variação é conhecida como efeito *Doppler*, e influencia diretamente na resolução azimutal. O relacionamento entre estas variáveis é inversamente proporcional, ou seja, quanto maiores as variações de frequência, menor a resolução.

A Tabela 05 apresenta as principais faixas de frequências onde atuam os sistemas SAR contemporâneos e a indicação de algumas das plataformas orbitais nas quais encontram-se instalados estes sensores.

Tabela 04 – Sistemas orbitais SAR, incluindo comprimentos de onda e respectivas frequências.

Banda	Comprimento de Onda (cm)	Sistemas Orbitais (freq. em GHz)
X	2.4 – 3.8	X-SAR (9.6)
C	3.8 – 7.5	ERS-1/2, ENVISAT (5.3), RADARSAT-1(5.3), SIR-C (5.3)
S	7.5 - 15	Magellan (2.385)
L	15 - 30	SEASAT, SIR-A/B/C, JERS-1 (1.275)

3.1.7. Mecanismo de Espalhamento e Rugosidade Superficial

O mecanismo de espalhamento da energia eletromagnética proveniente do radar depende da distribuição de tamanho dos elementos espalhadores no alvo imageado, sua composição e concentração, além do comprimento de onda do pulso incidente sobre tais elementos. Na superfície oceânica, onde as ondas capilares são as principais responsáveis pelo processo de espalhamento da radiação de microondas transmitida e possuem um comprimento de onda da mesma ordem de grandeza do pulso incidente, o retorno desta radiação se dá pelo efeito do retroespalhamento de Bragg (Johannessen *et al.*, 1994). A teoria de Bragg estabelece

que, para uma superfície randômica dividida em seus componentes espectrais, a energia retroespalhada dominante origina-se das componentes que estiverem em ressonância com a onda incidente (Espedal, 1998, citado por Soler, 2000). Se a posição das feições atingidas pelo pulso eletromagnético do radar for paralela à direção de vôo da plataforma imageadora e se o espaçamento existente entre estas feições for regular, o retorno do pulso (espalhamento Bragg) é reforçado para ângulos de incidência específicos, dependendo do comprimento de onda utilizado.

A textura das feições que compõem a rugosidade do oceano é da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda do pulso de radar incidente (centimétrica), o que influencia fortemente a energia que retorna para o sensor. A superfície do oceano pode ser classificada como lisa, intermediária ou rugosa, de acordo com critérios baseados no comprimento de onda do radar e no ângulo de depressão utilizado. Uma superfície lisa comporta-se refletindo especularmente toda, ou quase toda, energia incidente, com o ângulo de reflexão igual e oposto ao ângulo de incidência utilizado; uma superfície intermediária reflete uma parte da energia e espalha difusamente outra parte; uma superfície dita rugosa espalha difusamente toda a energia eletromagnética incidente em todas as direções.

3.1.8. Detecção de Óleo na Superfície do Mar Utilizando Sistemas de Radar

Ao atingir o alvo, a energia eletromagnética emitida é espalhada em várias direções (retroespalhamento). Uma parcela da energia é espalhada em direção ao próprio sensor, onde é medida para gerar uma imagem. Existem basicamente três tipos de interações entre o pulso incidente da energia eletromagnética do sistema SAR e o oceano, objeto de estudo do presente trabalho: (1) espalhamento difuso, (2) reflexão especular e (3) reflexão de canto (Figuras 18 e 19).

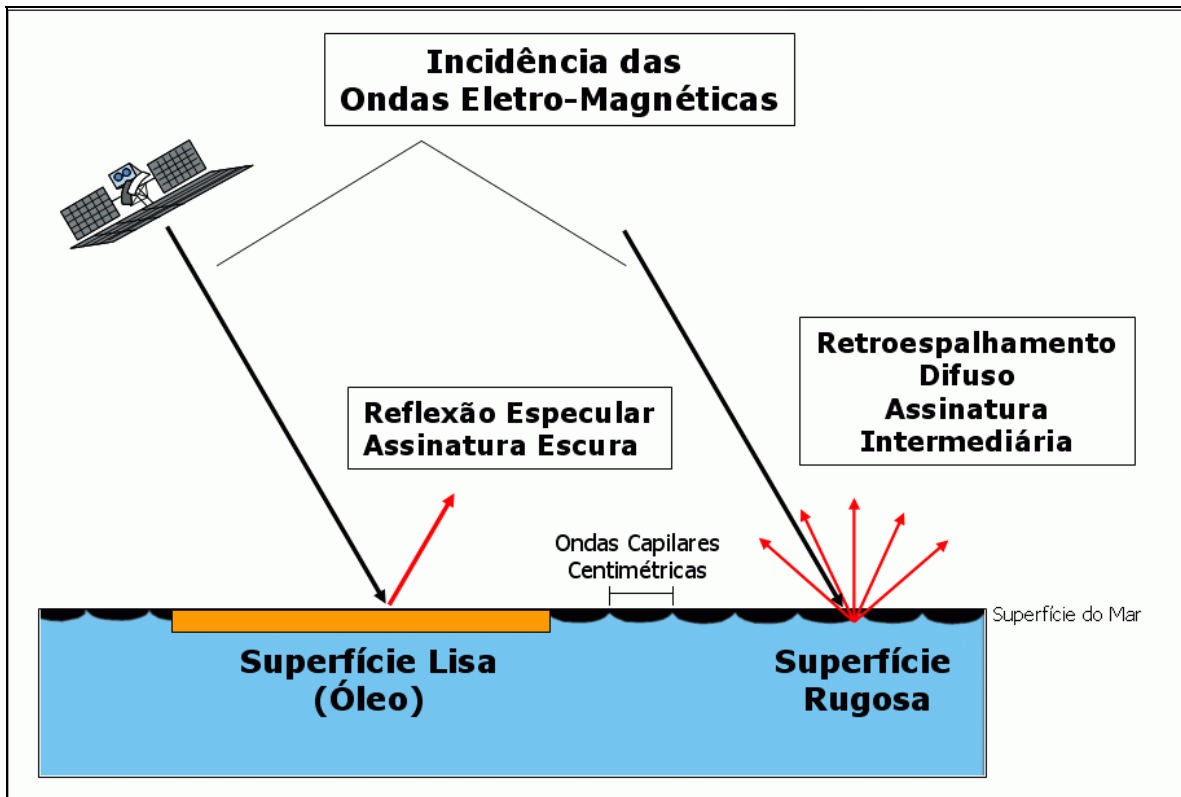


Fig. 18 – Diagrama mostrando dois tipos básicos de interação do pulso de radar com a superfície do mar: reflexão especular e espalhamento difuso (modificado de Sabins, 1996).

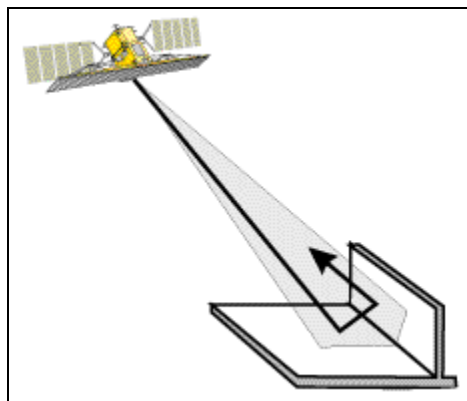


Fig. 19 – Refletor de Canto (plataformas e navios), formado por diedros e triedros, que esta associados a um forte retorno do sinal de radar.

A supressão das ondas capilares presentes na superfície do oceano (mesma ordem de grandeza do pulso de radar incidente) é ocasionada pela presença de óleo, que é menos denso do que a água do mar e flutua. O filme de óleo suaviza as ondas capilares, tornando esta região da imagem de radar escura em contraste com o *background* intermediário do oceano, cuja assinatura é dominada pelo espalhamento difuso (Figura 20). No entanto, esta suavização característica não ocorre somente na presença de óleo, já que fenômenos oceanográficos e meteorológicos também podem suprimir as ondas capilares (Seção 3.3.9).

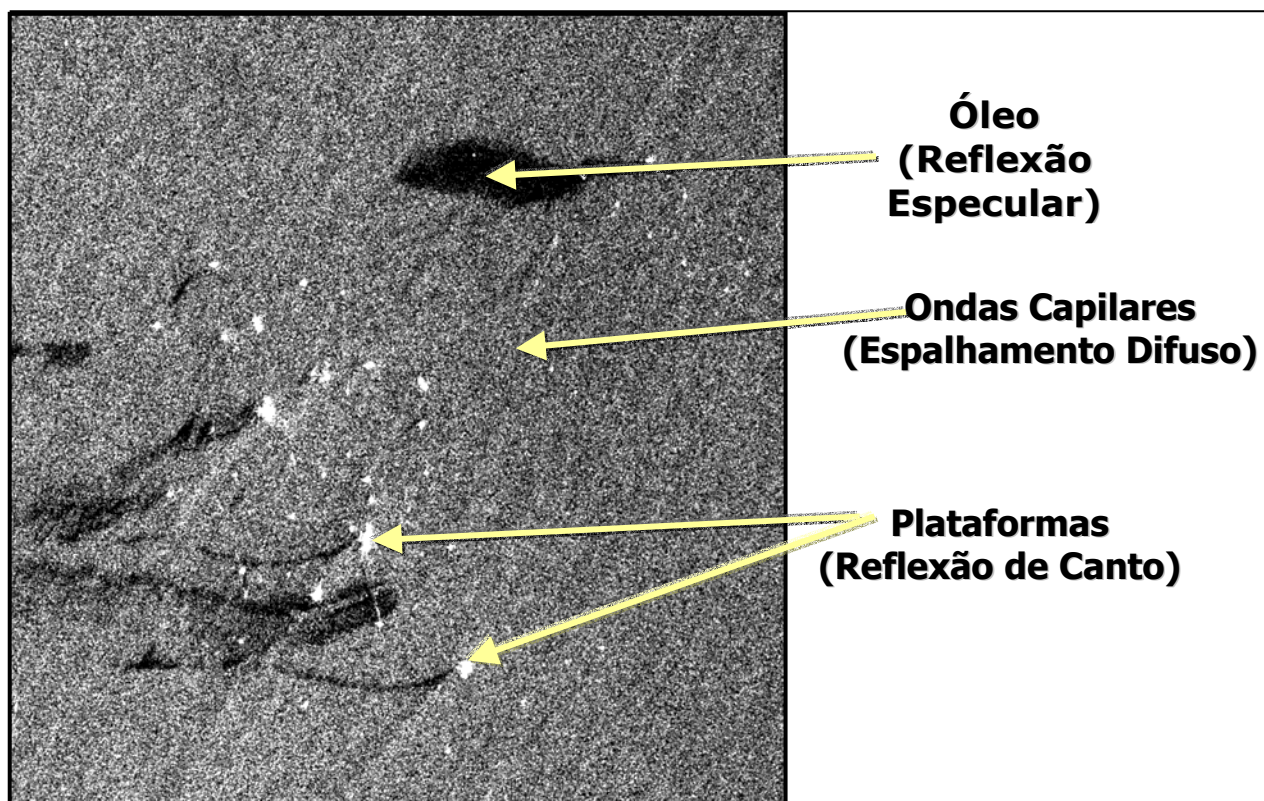


Fig. 20 – Imagem RADARSAT-1 Wide 1 Ascendente, adquirida em 20 de Agosto de 2000, na Baía de Campeche, Golfo do México, mostrando os três tipos de interação do pulso de radar com alvos na superfície do oceano.

3.1.9. O Problema dos Falsos Alvos

Da mesma forma que o óleo, alguns efeitos meteorológicos e oceanográficos suavizam a superfície do mar, suprimindo as ondas capilares, o que pode ocasionar falsas

interpretações. Dentre eles pode-se mencionar, baixo vento, ondas internas, células de chuva forte, *bloom* de algas, ressurgência, descargas fluviais e poluição em zonas costeiras. Dados auxiliares de sensoriamento remoto ao nível orbital são utilizados para fornecer informações sobre as condições climáticas e oceanográficas no horário de aquisição das imagens de SAR, conforme descrito a seguir.

Satélite NOAA – Sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*)

Dados de temperatura da superfície do mar (TSM) são obtidos a partir dos satélites da série NOAA, que possuem órbita polar, com uma altitude variando de 830 a 870 km. Os satélites dessa série incluem um sensor chamado AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), que, no ponto sub-satélite (nadir), apresenta resolução espacial de aproximadamente 1km x 1km. O seu sistema de varredura é transversal, gerando imagens com aproximadamente 2300 quilômetros de largura. Seus sensores estão distribuídos pelos canais do visível e infravermelho, sendo que, para calcular a temperatura da superfície do mar, utilizam-se os canais do infravermelho termal.

Os dados deste sensor são empregados para se obter uma visão sinótica da temperatura da superfície do mar, a qual nos fornece informações sobre feições como ressurgência, frentes e correntes oceânicas. Tais feições são utilizadas na identificação de falsos alvos durante a análise de dados SAR para detecção de óleo na superfície do mar.

Neste trabalho, foram utilizados os dados AVHRR dos satélites NOAA-15, 16 e 17.

Satélite GOES – Sensor Imager

Para observar o padrão de distribuição de nuvens e suas respectivas temperaturas, são utilizados dados do satélite GOES, que é geoestacionário. Devido à característica de sua órbita (36.800 km de altitude), o satélite fica sempre posicionado sobre o mesmo ponto em relação à superfície da Terra, que, no caso do GOES-8, é sobre o equador, na longitude de 75° W. Isso permite que o satélite adquira imagens sempre da mesma porção do globo

terrestre. Em regime normal, o satélite GOES-8 transmite uma imagem do globo terrestre a cada 3 horas, assim como de uma parte do continente sul-americano a cada meia hora.

O Sensor Imager registra a radiação proveniente da Terra em 5 faixas de comprimento de onda, variando do visível ao infravermelho termal. Cada elemento de imagem (*pixel*) corresponde a uma área de 1 x 1 km (canal visível), 4 x 8 km (vapor d'água) ou 4 x 4 km (canal infravermelho ou "termal") no nadir (ponto subsatélite).

Nuvens com temperaturas abaixo de -40° C são interpretadas como contendo células de chuva forte, associadas a presença de *cumulus nimbus*. Quando este fenômeno ocorre, as ondas capilares são suavizadas, confundindo tais áreas nas imagens SAR com manchas de óleo. Imagens no infravermelho termal do GOES-8 foram usadas para realçar os valores de baixas temperaturas, resultando na geração de mapas de Temperatura do Topo de Nuvens (TTN) contendo possíveis células de chuva forte, como subsídio à interpretação de manchas de óleo na superfície do oceano.

Satélite DMSP F-n – Sensor SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager)

Os dados de velocidade do vento (intensidade) são adquiridos pelo sensor SSMI, que integra o programa DMSP (Defense Meteorological Satellite Program). Consiste de sete radiômetros separados, os quais compartilham o mesmo mecanismo de alimentação, tendo como objeto de medida a radiação de microondas emitida pela superfície do oceano. Opera em quatro frequências distintas (19,35; 22,235; 37; 85,5 GHz), possibilitando a recuperação de importantes parâmetros geofísicos sobre o oceano, um deles a velocidade do vento a dez metros da superfície, utilizado neste trabalho.

A magnitude dos ventos sobre a superfície do oceano é importante para validar as interpretações da ocorrência de exsudações naturais nas imagens SAR, visto que a condição ideal varia de 3 m/s até 8 m/s (Staples and Hodgins, 1998). Nas áreas com velocidade do vento abaixo de 3 m/s, as ondas capilares estão ausentes, resultando na presença de regiões escuras nas imagens SAR, que constituem falsos alvos para a detecção de óleo. Nas áreas com vento muito forte, o contraste de rugosidade entre o filme de óleo e suas vizinhanças

deixa de existir. Os satélite da série DMSP utilizados neste trabalho foram o F-10 e o F-13. A resolução espacial utilizada neste estudo foi de 25 quilômetros, o que impossibilitou a obtenção de dados na região próxima a costa.

Satélite SeaStar – Sensor SeaWiFS

O sensor SeaWiFS, acrônimo de Sea-viewing Wide Field of View Sensor, tem como aplicação principal a detecção de variações de cor na superfície dos oceanos. Estas variações são indicativas da presença de fito-plâncton, de sedimentos em suspensão e de matéria orgânica dissolvida. O sensor possui oito bandas com capacidade de observação espectral na faixa do visível e do infravermelho próximo.

3.1.10. Sistemas Orbitais de Radar para Estudos Oceanográficos

Os benefícios na utilização de sensores orbitais SAR são muitos, principalmente no estudo de processos oceânicos, como, por exemplo, a possibilidade de vistoriar grandes áreas, monitorar alterações ambientais com observações regulares e de obter dados de regiões inacessíveis, além da capacidade de imageamento em condições atmosféricas adversas e na ausência de luz solar.

A seguir, serão apresentados os principais satélites cuja carga útil inclui um Sistema SAR, exceto o RADARSAT-1, que será descrito na Seção 3.2.

ERS-1 e ERS-2

Os primeiros Satélites Europeus de Sensoriamento Remoto, ERS-1 e ERS-2, foram desenvolvidos e lançados pela Agência Espacial Européia (ESA), em 17 de Julho de 1991 e 20 de Abril de 1995, respectivamente. Ambos foram projetados para operar a uma altitude de aproximadamente 785 quilômetros e para completar uma órbita polar em 100 minutos, com capacidade de realizar medições das propriedades atmosféricas e da superfície da Terra com alta resolução e em escala global. Ambos os satélites ERS (*European Radar Satellite*) foram construídos contendo dois radares especializados e um sensor imageador

infravermelho. As duas plataformas são praticamente idênticas, com a única diferença do ERS-2 conter um instrumento extra para monitorar níveis de ozônio na atmosfera.

O instrumento conhecido como *Active Microwave Instrument (AMI)* possui três modos de operação: Image Mode e Wave Mode (SAR), além do Wind Mode (SCATT). O modo estudado neste trabalho é o primeiro deles, cuja descrição encontra-se na Tabela 06.

Tabela 05 – Descrição do modo de operação Image Mode - ERS

Frequência	5,3 GHz (Banda C)
Tamanho da Antena	10 m x 1 m
Polarização:	Linear Vertical (LV)
Ângulo de Incidência	23 graus no centro do <i>swath</i>
Resolução Espacial	30 m
Largura da Faixa	100 km
Acurácia posicional	Ao longo da faixa menor ou igual a 1 km; transversalmente à faixa menor ou igual a 0,9 km

O ERS-1 encerrou sua atividade em 1999, tendo operado simultaneamente ao ERS-2 desde 1995.

ENVISAT

Este satélite foi lançado em Março de 2002, pela Agência Espacial Européia (ESA), entrando em órbita por intermédio do foguete Ariane 5, a partir do Centro Espacial de Kourou, na Guiana Francesa. O satélite ENVISAT - *Environment Satellite* (Satélite Ambiental) teve como base as experiências adquiridas no curso dos últimos dez anos pelos satélites ERS-1 e ERS-2.

Situa-se a 800 quilômetros de altitude, com uma trajetória orbital que cruza os dois pólos, e inclui dez instrumentos diferentes, que provêm medições da atmosfera, oceano, terra e gelo.

De acordo com o objetivo deste trabalho, o instrumento detalhado será o ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*), que é uma versão aprimorada do instrumento SAR instalado a bordo dos satélites ERS-1 e ERS-2. O ASAR tem uma antena de 10 m de comprimento e opera em 5 modos distintos, com resoluções variando de 25 metros a 1 quilômetro, especialmente desenvolvido para observar áreas continentais, oceânicas e as calotas polares. Por exemplo, no modo *Wide Swath*, imagens de 150 metros de resolução e 400 quilômetros de faixa recoberta podem ser adquiridas.

Operando na banda C, o ASAR assegura continuidade no fornecimento de dados no modo *Image* (SAR) e no modo *Wave* (instrumento AMI) dos satélites da família ERS. Ele oferece capacidade ampliada em termos de cobertura, de variação de ângulos de incidência, modo de operação e polarização. Esta última característica possibilita a utilização de polarizações paralelas (HH e VV) e polarizações cruzadas (HV e VH), com um conseqüente aumento de informações para diversos estudos.

RADARSAT-2

O RADARSAT-2 será lançado no ano de 2005, de acordo com a Agência Espacial Canadense e a MacDonald Dettwiller, que são parceiras neste empreendimento. Além de garantir a continuidade do fornecimento de todas as funcionalidades existentes no RADARSAT-1, o novo satélite da série terá suas capacidades realçadas, incluindo modos de operação adicionais, aperfeiçoamentos na resolução, multi-polarização, aumento na frequência de revisita e um incremento no *downlink*, possibilitando o recebimento de dados por antenas receptoras de mais baixo custo.

O RADARSAT-2 irá operar em uma órbita idêntica ao RADARSAT-1, exceto por uma diferença (*offset*) em tempo. Portanto, será colocado em uma órbita síncrona com o Sol a uma altitude de 798 quilômetros. Terá um ciclo de repetição de 24 dias, considerando o imageamento de uma mesma região geográfica com o mesmo ângulo de incidência. No

entanto, sua maior flexibilidade na seleção de ângulos de incidência e a possibilidade de imageamento tanto para a direita quanto para a esquerda (Figura 21) permitirão um aumento na resolução temporal para uma mesma área.

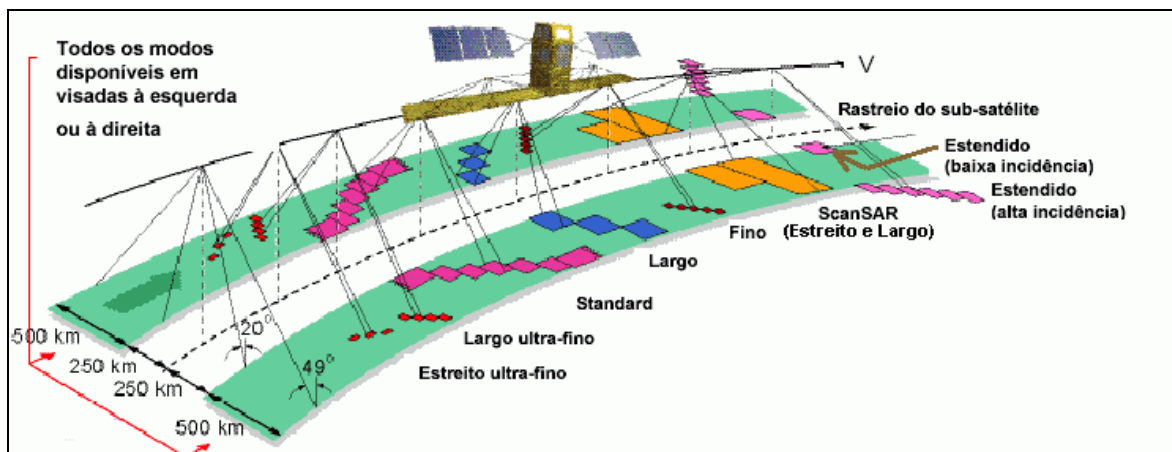


Figura 21– Modos de operação e geometria de imageamento do satélite RADARSAT-2 (modificado de <http://www.rsi.ca>).

O RADARSAT-2, além do modo polarimétrico, irá prover imageamento SAR na banda C, com polarizações horizontal, vertical e cruzada, com resoluções variando de 3 até 100 metros, largura de faixa de 10 a 500 quilômetros, utilizando uma antena de dimensões 15 x 1,5 metros. As especificações técnicas estão resumidas na Tabela 07.

Tabela 06 – Especificações técnicas dos produtos do satélite RADARSAT-2 (modificado de RADARSAT International).

Modo de Operação	Ângulo de Incidência	Largura Nominal da Faixa Imageada	Recobrimento da Faixa para esquerda ou direita da rota na superfície	Resolução Nominal (Alcance x Azimutal)
Fino	36° - 48°	50 km	525 - 750 km	10 x 9 m
Standard	20° - 49°	100 km	250 - 750 km	25 x 28 m

Polarização Seletiva transmissão H ou V recebimento H e / ou V	Estendido Baixa Incidência	10° - 23°	170 km	125 - 300 km	40 x 28 m	
	Estendido Alta Incidência	49° - 60°	70 km	750 - 1000 km	20 x 28 m	
	Largo	20° - 45°	150 km	250 - 650 km	25 x 28 m	
	ScanSAR Estreito	20° - 49°	300 km	250 - 600 km	50 x 50 m	
	ScanSAR Largo	20° - 49°	500 km	250 - 720 km	100 x 100 m	
	Polarimetria: transmissão H e V em pulsos alternados / recebimento H e V em qualquer pulso	Fino Quad-Pol	30° - 41°	25 - 50 km	400 - 600 km	11 x 9 m
	Standard Quad-Pol	20° - 41°	25 - 50 km	250 - 600 km	25 x 28 m	
Polarização Seletiva : Simples transmissão H ou V recebimento H ou V	Ultra-Fino Estreito	30° - 40°	10 km	400 - 550 km	3 x 3 m	
	Ultra-Fino Largo	30° - 40°	20 km	400 - 550 km	3 x 3 m	
	Triplo Fino	30° - 49°	50 km	400 - 750 km	3 x 3 m	

3.2. O Sistema RADARSAT-1

O satélite canadense RADARSAT-1 foi projetado e desenvolvido pela Agência Espacial Canadense (CSA) com o propósito de monitorar mudanças ambientais e recursos naturais, tendo a capacidade de recobrir todo o globo para atender aplicações específicas, além de possuir a habilidade de transferir grandes volumes de dados em tempo quase real (*Near Real Time delivery*). Lançado pela NASA em 4 de Novembro de 1995, o RADARSAT-1 se constitui no primeiro satélite com radar imageador civil plenamente operacional, com capacidade de produção em larga escala, proporcionando informações úteis para projetos comerciais, científicos ou governamentais nos campos da agricultura, cartografia, hidrologia, ecologia, manejo florestal, oceanografia, monitoramento da costa, estudos glaciais, geologia, dentre outros. Possui uma órbita *dawn-to-dusk*, o que significa que o satélite cruza o equador ao amanhecer e ao anoitecer, estando raramente em eclipse ou na escuridão. Com isso, proporciona oportunidade de imageamento regular e obtém energia solar quase contínua para sua operação.

3.2.1. Características do Satélite

O RADARSAT-1 é um sofisticado satélite de observação da Terra, que teve as empresas Spar Aerospace (principal colaborador), MacDonald Dettwiler & Associates, SED Systems, CAL Corporation, COM DEV, Fleet Industries, IMP e a FRE Composites, envolvidas na sua concepção e construção (Fonte: <http://snig.igeo.pt/Portugues/RedesTematicas/Rot/index.html>).

O principal objetivo do satélite RADARSAT-1 é auxiliar o estudo das mudanças climáticas e dos recursos naturais renováveis. No entanto, as imagens do RADARSAT-1 podem também ser utilizadas em outros campos de aplicação. Suas principais características estão descritas na Tabela 08.

Tabela 07 – Características RADARSAT-1

Entidade Responsável	CSA (Canadian Space Agency)
Situação Atual	Ativo
Tipo de órbita	Polar, síncrona com o Sol
Ciclo de Repetição (considerando o mesmo modo de operação)	24 dias
Órbitas por Dia	14
Altitude Média	798 km
Inclinação	98,6°
Período	101 minutos
Peso	2713 kg
Frequência (SAR)	5,3 GHz
Comprimento de Onda (SAR)	5,6 cm (Banda C)
Polarização (SAR)	HH (Horizontal-Horizontal)

3.2.2. Modos de Operação Disponíveis

Este satélite está equipado com um Radar de Abertura Sintética (SAR), que pode ser orientado para coletar dados em uma faixa no terreno de até 1175 quilômetros com diferentes geometrias, utilizando 7 modos de operação distintos, com resoluções variando de 10 até 100 metros. Possui ângulos de incidência variando de 10° a 59°, além de seis tipos de processamento diferentes, como pode ser visto na Figura 22 e Tabela 09.

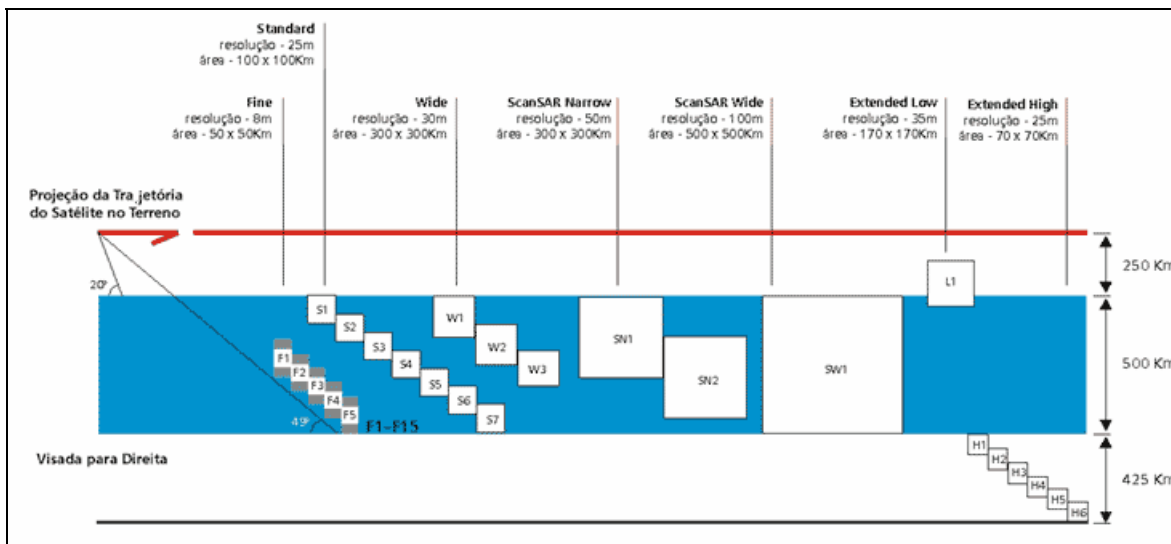


Fig. 22 – Diagrama dos modos de operação RADARSAT-1 (Fonte: <http://www.threetek.com.br>)

Tabela 08 – Resumo dos Modos de Operação do RADARSAT-1(modificado de RADARSAT International).

Modo de Operação		Ângulo de Incidência (°)	Resolução Nominal (m)	Área Nominal (km)
Fine	F1	37 – 40	8	50 x 50
	F2	39 – 42		
	F3	41 – 44		
	F4	43 – 46		
	F5	45 – 48		
Standard	S1	20 – 27	30	100 x 100
	S2	24 – 31		
	S3	30 – 37		

	S4	34 – 40		
	S5	36 – 42		
	S6	41 – 46		
	S7	45 - 49		
Wide	W1	20 – 31	30	165 x 165
	W2	31 – 39		
	W3	39 - 45		
ScanSAR Narrow	SCNA	20 – 40	50	300 x 300
	SCNB	31 - 46		
ScanSAR Wide	SCW	20 - 49	100	500 x 500
Extended High	H1	49 – 52	25	75 x 75
	H2	50 – 53		
	H3	52 – 55		
	H4	54 – 57		
	H5	56 – 58		
	H6	57 - 59		
Extended Low	EXTL1	10 - 23	35	170 x 170

3.2.3. Opções Recomendadas para Detecção de Óleo

A escolha do modo de operação do RADARSAT-1 a ser utilizado para detecção de exsudações petrolíferas na superfície do oceano é de extrema importância, já que o contraste entre o filme de óleo a ser detectado e suas vizinhanças é dependente do ângulo de incidência que se emprega. Ângulos de incidência baixos (10° a 40°) realçam a detecção de exsudações de óleo (Miranda *et al.* 2004). Os seguintes modos de operação RADARSAT-1 se enquadram nesta descrição: Extended Low 1, Standard 1 até 4, Wide 1 e 2, e ScanSAR Narrow 1 (Tabela 09). Cabe ressaltar que a capacidade de discriminação de feições de óleo no mar depende também das dimensões da feição analisada, bem como da resolução do modo de operação escolhido. Além disso, o problema dos falsos alvos deve ser levado em consideração, no intuito de afastar interpretações errôneas, como foi anteriormente descrito na Seção 3.1.9.

Em um experimento na Baía de Campeche, Golfo do México, Miranda *et al.* (2004) reportaram a detecção de derrames controlados de óleo com volumes de 100 litros e de 1 barril (~ 160 litros), respectivamente, utilizando uma imagem RADARSAT-1 Wide 1.

No presente trabalho, foram analisadas quatro imagens Wide 1 (27/10/1996, 20/11/1996, 06/03/1999 e 17/03/1999), uma ScanSAR Narrow 1 (14/05/1997) e uma ScanSAR Wide (15/07/1997). Tais dados encontram-se disponíveis nos arquivos da Radarsat International Inc. (RSI), daí a razão de sua escolha. O modo de operação Wide 1 é o mais utilizado para a detecção de óleo no mar, porque proporciona uma boa relação entre área nominal de cobertura, ângulo de incidência e resolução nominal. O modo de operação ScanSAR Narrow 1 também é bastante utilizado, pois provê uma visão sinótica da área de estudo em conjunto com uma resolução nominal e ângulos de incidência aceitáveis. O modo ScanSAR Wide, com ângulos de incidência variando de 20° a 49° , embora não figurando entre os modos de operação mais utilizados para detecção de óleo no mar, possibilita estudos nesta área, como mostram os resultados obtidos no presente trabalho.

3.3. Contribuição da Análise de Exsudações de Óleo para a Compreensão de Sistemas Petrolíferos *Offshore*

A indústria utiliza cada vez mais abordagens multidisciplinares na prospecção de hidrocarbonetos. Em áreas de fronteira exploratória, principalmente em regiões marinhas profundas, onde dados são escassos e adquiridos com alto custo, a detecção de exsudações de óleo é uma metodologia bem aceita na avaliação do risco exploratório (Miranda *et al.* 1998c). A presença de um sistema petrolífero ativo em uma bacia sedimentar é determinada pela existência de geração e migração de hidrocarbonetos, sem as quais não pode haver acumulações de valor comercial. O estudo da identificação de manchas de óleo por sensoriamento remoto, aliado ao conhecimento prévio da geologia da bacia, pode auxiliar na detecção da presença de sistemas ativos na área alvo.

O sensoriamento remoto, se utilizado como um meio de detectar manchas naturais de óleo, pode apresentar uma visão regional da distribuição de sistemas petrolíferos ativos em uma bacia sedimentar (MacDonald *et al.*, 1996). Segundo tais autores, a constatação de exsudações de óleo é comum em diversas regiões *offshore* no mundo, como Califórnia, Alasca e Oeste da África, e pode estabelecer uma estimativa inicial do potencial exploratório em uma nova região, com um custo relativamente baixo.

Trasher *et al.* (1996a) realizaram um estudo tentando identificar os diferentes estilos de exsudações de óleo, assim como correlacioná-los com a geologia e com o arcabouço estrutural associados a esse fenômeno. Os estilos variam de espetacular, prolífico, fraco mas focalizado, até ausente. O estilo espetacular parece resultar de altas taxas de sedimentação (*overpressure* e diapirismo de lama) e de tectonismo ativo (focalização estrutural da migração do petróleo). Rápida sedimentação e migração de petróleo, controladas largamente por halocinese, promovem o desenvolvimento de áreas prolíficas de ocorrência de exsudações de óleo. Em regiões onde ocorre migração de petróleo através de sistemas laterais de rochas carreadoras (diápiros de lama e sal, altos do embasamento e falhas de borda), podem ocorrer focalizações para exsudações verticais de óleo, classificadas por Trasher *et al.* (1996a) como fracas.

As exsudações de óleo, na maioria das vezes, não ocorrem diretamente acima de prospectos petrolíferos. São encontradas no final de rotas de migração, deslocadas dezenas ou até centenas de quilômetros do posicionamento geográfico identificado para a acumulação. Logo, para a utilização das exsudações de óleo na análise de bacias, deve-se avaliar as possíveis rotas de migração lateral e vertical, no intuito de correlacioná-las com acumulações (Thrasher *et al.*, 1996a).

Macgregor (1993, citado por Thrasher *et al.*, 1996a) concluiu, através de estudos de bacias do sudeste Asiático, que, em escala de sub-bacia, as exsudações se concentram sobre feições tectônicas como diápiros ativos, falhas ativas e bacias marginais soerguidas. Foi também observado por este autor que é relativamente rara a presença de exsudações localizadas diretamente acima de grandes campos de petróleo. O campo de Cantarell, no sul do Golfo do México, constitui uma notável exceção a esta regra geral (Miranda *et al.*, 2004)

Quanto maior a cobertura temporal das imagens analisadas com o objetivo de mapear e detectar exsudações de óleo, melhor e mais abrangente será o estudo, podendo contribuir significativamente no entendimento dos processos de geração e migração petrolífera. A recorrência, ao longo do tempo, das exsudações de óleo no mesmo posicionamento geográfico (com até 5 km de distância entre as feições de diferentes datas) é o principal fator para caracterizar a existência de uma rocha geradora ativa.

A etapa seguinte de um estudo de exsudações de óleo em uma determinada bacia sedimentar consiste no posicionamento para a execução de *piston cores*, uma técnica que obtém testemunhos de sedimentos do fundo oceânico e que possibilita a caracterização geoquímica do óleo amostrado (e.g., estágio de maturação térmica, presença de biodegradação, ambiente deposicional da rocha geradora).

3.4. Exemplos de Aplicações em Bacias *Offshore*

Exsudações de óleo e gás têm se mostrado, historicamente, importantes como informação para exploração em novas fronteiras prospectivas. As atividades de exploração no Golfo do México, por exemplo, iniciaram-se após o relato sobre exsudações de óleo na Baía de Campeche por um pescador - Sr. Cantarell – que deu nome ao complexo de campos petrolíferos descobertos abaixo de tais feições (Miranda *et al.* 2004).

Golfo do México

Miranda *et al.* (2004) investigaram a região sul *offshore* do Golfo do México, situada na Baía de Campeche. Para este estudo, foram adquiridas no ano 2000 trinta e seis imagens RADARSAT-1 no modo de operação Wide 1. Em doze delas foram identificadas possíveis manchas de óleo, as quais foram comparadas com dados auxiliares provindos de satélites meteorológicos e oceanográficos adquiridos no mesmo horário de aquisição das imagens SAR, durante os meses de Junho e Dezembro de 2000, para a eliminação de falsos alvos. Além disso, foram adquiridas, entre Abril e Dezembro de 2001, sessenta imagens com os modos de operação ScanSAR Narrow 1, Wide 1 e Wide 2, das quais vinte cenas, por conterem feições possivelmente associadas a manchas de óleo, foram comparadas com dados meteo-oceanográficos. Assim, foram identificadas em Cantarell nove exsudações de óleo no ano de 2000 e dezenove no ano de 2001. Este estudo pode contribuir para eximir a Pemex Exploración y Producción (PEP) de multas por possíveis vazamentos de óleo na área da exsudação de Cantarell.

Um estudo da escala, distribuição, recorrência e propriedades físicas de exsudações de óleo detectadas no oceano pode oferecer subsídios importantes para localizar reservas de óleo *offshore* (MacDonald *et al.*, 1996). A partir desta premissa, observações do assoalho oceânico, visando identificar características biológicas, químicas e geológicas de exsudações de óleo, foram coligidas por este grupo de pesquisadores na região norte do Golfo do México. Foram utilizados dados de sensoriamento remoto (uma cena do sensor Landsat Thematic Mapper, três cenas SAR do ERS-1 e uma fotografia obtida por

astronautas da Space Shuttle), bem como observações de campo através de navios e pesquisas submarinas. A pesquisa, utilizando informações publicadas e inéditas, identificou quarenta e três locais onde comunidades quimiosintéticas encontravam-se associadas a exsudações de óleo, em lâminas d'água variando de 300 a 2200 metros. Pela análise dos dados de sensoriamento remoto e informações auxiliares, foram encontrados sessenta e três locais com manchas de óleo perenes.

Um estudo realizado por Trasher *et al.* (1996a), descrito na Seção 3.3, contemplou a região de águas profundas do Golfo do México, dita prolífica por estes autores. As taxas de exsudação de óleo e gás nesta região são incrementadas por *overpressure* regional e movimentação de sal ativa. A maioria das exsudações é focalizada ao longo de rotas de migração sobre falhas ativas e margens de corpos salíferos, ou também provavelmente por migração vertical. Essa pesquisa forneceu subsídios importantes para estimar a carga (*charge*) para sub-bacias intra-sal, mas não para prospectos individuais.

Mar do Norte – Porção Central

De acordo com Trasher *et al.* (1996a), a região central do Mar do Norte é caracterizada por excelentes evidências de exsudações de óleo na maior parte dos diápiros de sal ali existentes. As exsudações identificadas e o diapirismo que ocorre na área estão relacionados a altos terciários regionais, sem exsudação direta dos reservatórios do Cretáceo ou do Paleoceno.

Haltenbanken - Noruega

Exsudações provindas de acumulações Jurássicas foram identificadas por Trasher *et al.* (1996a) em perfis de poços e como chaminés de gás em depósitos Cretáceos na região de Haltenbanken, Noruega. Não foi observada migração vertical, estando tais exsudações deslocadas em até cinqüenta quilômetros das acumulações e das *cozinhas* de geração.

Foz do Amazonas

Mello *et al.* (2001) consideram a Bacia da Foz do Amazonas, situada na região offshore dos estados do Pará e Amapá, importante fronteira exploratória, em razão da similaridade de tipos de óleo e de sistemas petrolíferos com as mais prolíficas bacias deltaicas no mundo (e.g., Delta do Niger). A ocorrência de acumulações subcomerciais em água rasa e a manifestação de exsudações de óleo associadas a falhas lítricas e transcorrentes indicam a presença de pelo menos dois sistemas petrolíferos na área. A coincidência no posicionamento geográfico de algumas manchas de óleo e de estruturas geológicas no topo da Formação Travosas possibilitou inferir o controle do tectonismo gravitacional Cenozóico nestas ocorrências. Este estudo propõe uma integração multidisciplinar entre sensoriamento remoto, geoquímica molecular e tectono-estratigrafia na predição e seleção de áreas de exploração em águas profundas do Atlântico Sul.

Santos

Foram identificadas, na porção *offshore* da Bacia de Santos, exsudações de óleo em dois domínios tectônicos distintos (Miranda *et al.*, 2001): (1) áreas rasas ao longo da linha de charneira pré-Aptiana; (2) áreas de água profunda, caracterizadas por movimentação intensa de sal, onde as falhas, domos de sal e muralhas de sal penetram nos sedimentos subjacentes, criando rotas de migração potenciais até o assoalho oceânico. Modelagens 2D de rotas de migração no tempo presente foram realizadas por estes autores, mostrando que exsudações de óleo são esperadas em regiões de água rasa, onde a migração lateral de óleo se dá através de sistemas regionais de rochas carreadoras. Além disso, o petróleo proveniente de rochas geradoras em áreas de movimentação halocinética ativa migra ao longo de falhas nos flancos dos diápiros. As ocorrências de exsudações de óleo detectadas com imagens RADARSAT-1 corroboram esta interpretação.

4. O Método Gravimétrico

O Método Gravimétrico tem sua origem relacionada à descoberta da força da gravidade por Galileu Galilei, em 1590, e à sua quantificação, por Isaac Newton, em 1687, através da lei que rege a atração dos corpos.

A Gravimetria é um método geofísico que mede variações no campo gravitacional da Terra, as quais, embora muito pequenas, podem ser detectadas, permitindo deduções sobre a densidade e forma de corpos em sub-superfície. É utilizada para localizar massas locais com maiores ou menores densidades do que as formações adjacentes. No entanto, não é possível determinar uma única solução para uma anomalia observada. Pequenas variações nas densidades das rochas em sub-superfície são medidas por esta técnica, que, juntamente com a magnetometria, faz parte dos métodos potenciais em geofísica (Telford, 1990).

A prospecção gravimétrica é utilizada em uma variedade muito grande de aplicações, incluindo desde análises que se referem a corpos localizados na superfície ou em sub-superfície, até a determinação da espessura da crosta, passando pela localização, identificação e avaliação do potencial econômico de jazidas diversas como petróleo, carvão, sal, assim como de matéria prima para indústria de cerâmica e construção.

4.1. Princípios Básicos

Segundo a Lei da Gravitação Universal, concebida por Newton para explicar a movimentação dos planetas, uma força atuando entre duas partículas de massas m_1 e m_2 , separadas por uma distância r , é diretamente proporcional ao produto das massas e inversamente proporcional ao quadrado das distâncias entre os centros de massa:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

onde F é a força de atração entre m_1 e m_2 , G é a constante gravitacional universal (6.672×10^{-8} dina . cm² / g², sistema cgs).

Se m_2 é a massa da Terra, então, pela segunda lei de Newton, a magnitude da força agindo em m_1 é dada por:

$$F = g m_1$$

Comparando as duas equações, temos a aceleração da gravidade:

$$g = \frac{G m_2}{r^2}$$

A unidade de aceleração utilizada em gravimetria é o miliGal, em homenagem a Galileu, onde 1 Gal = 1 cm/s² (c.g.s.). Como a aceleração normal da gravidade na superfície da Terra é cerca de 980 Gal, então 1 mGal é aproximadamente 1/10⁶ da gravidade normal, isto é, uma parte em um milhão. A unidade gravimétrica (gu) é igual a 0.1 mGal.

Existem basicamente duas maneiras de se medir a aceleração da gravidade, quais sejam:

- (a) Gravidade Absoluta, onde a medida é realizada sob condições de laboratório, utilizando experimentos que empregam dois métodos possíveis: corpo em queda e pêndulo. Esta medida é utilizada para fornecer valores absolutos da aceleração da gravidade (g) como padrões nacionais;
- (b) Gravidade Relativa, na maioria das aplicações baseadas neste método, somente a variação da gravidade relativa a uma estação principal é necessária. As medidas são gravadas em estações secundárias, para que as diferenças relativas sejam bem conhecidas.

4.2. Redução dos Dados Gravimétricos

Todas as medidas de gravidade são efetuadas no campo gravitacional da Terra. Seu conhecimento, portanto, é fundamental para que tais medidas sejam utilizadas em aplicações geológicas.

A magnitude da gravidade na Terra depende basicamente de cinco fatores: latitude, elevação, topografia dos terrenos circundantes, marés e variações de densidade na superfície. A exploração gravimétrica se interessa pelas anomalias causadas pelo último fator citado, e estas anomalias são muito menores do que as mudanças relacionadas à latitude e elevação, embora maiores do que aquelas relativas à maré e, normalmente, aos efeitos de topografia. A mudança de gravidade do equador para regiões polares é em torno de 5 Gals, ou 0.5% do valor médio de g (980 Gal), e o efeito da elevação pode ser maior do que 0.1 Gal, ou 0.01 % de g . Uma anomalia gravimétrica considerada grande para explorações petrolíferas gira em torno de 10 mGal, ou 0.001% de g . Assim, variações em g que sejam significantes para prospecção são pequenas em comparação com sua magnitude, como também quando comparadas com os efeitos da latitude e da elevação. Com isso, os valores de gravidade não podem ser diretamente comparados logo após sua observação, quando a finalidade for identificar anomalias de densidade. Pode-se, porém, com acurácia, remover a maior parte dos fatores que mascaram as anomalias gravimétricas de interesse para a prospecção geológica (Telford, 1990).

4.2.1. Correção de Latitude

Esta correção se faz necessária porque a Terra não possui uma forma esférica perfeita. Sua forma resulta de um balanço entre a força gravitacional, que tende a mantê-la na forma esférica, e a força centrífuga, causada pela rotação da Terra, que tende a achatá-la. Como resultado, o raio equatorial é, aproximadamente, 21 quilômetros maior do que o raio polar. Este achatamento significa que a aceleração da gravidade é 5.17 Gals maior nos pólos do que no equador (Nettleton, 1976). A forma exata da Terra tem sido um assunto de grande interesse científico desde os tempos de Newton, e é expressa como um esferóide de

referência ideal. O esferóide em questão é achatado nos pólos, se aproximando da superfície média dos mares e desconsiderando o terreno acima dela. Várias mudanças sutis e formulações matemáticas correspondentes foram desenvolvidas ao longo do tempo, em decorrência da quantidade e da precisão de informações geodéticas e gravimétricas adicionais. A fórmula mais utilizada para o cálculo do valor teórico da gravidade entrou em vigor a partir da Assembléia de Lucerne, quando a *International Union of Geodesy and Geophysics* (IUGG) adotou o GRS67, ou *Geodetic Reference System 67* (IAG, 1967):

$$\Delta g_{\text{lat}} = 978031,8 (1 + 0,0053024 \text{ sen}^2 \varphi - 0,0000058 \text{ sen}^2 2 \varphi),$$

onde φ corresponde à latitude. O valor gerado a partir desta equação, quando subtraído do valor observado, gera um valor que poderia ser chamado de Anomalia Gravimétrica Observada, que corresponde à diferença entre a gravidade esperada e aquela efetivamente medida (Fernandes, 1993).

4.2.2. Correção de Ar Livre

Supondo que a Terra fosse um fluido perfeito sem variações laterais de densidade, sua superfície corresponderia a um elipsóide de revolução (ou de referência) ideal, conforme definido na Seção anterior. Esta seria uma superfície de nível, com a direção da gravidade a ela perpendicular, em qualquer posição do Globo. Como esta hipótese não retrata a realidade, existem afastamentos entre a superfície de nível e o esferóide de referência ideal. Esta superfície de nível é conhecida por Geóide, sendo definida por uma superfície equipotencial e coincidente com o nível médio dos mares.

Por causa das variações laterais de densidade, o Geóide e o esferóide de referência não coincidem. Massas anômalas localizadas deformam o Geóide: para cima no interior dos continentes (por causa da atração causada pelo material acima), e para baixo sobre os oceanos (por causa da baixa densidade da água) (Telford, 1990) (Figura 23).

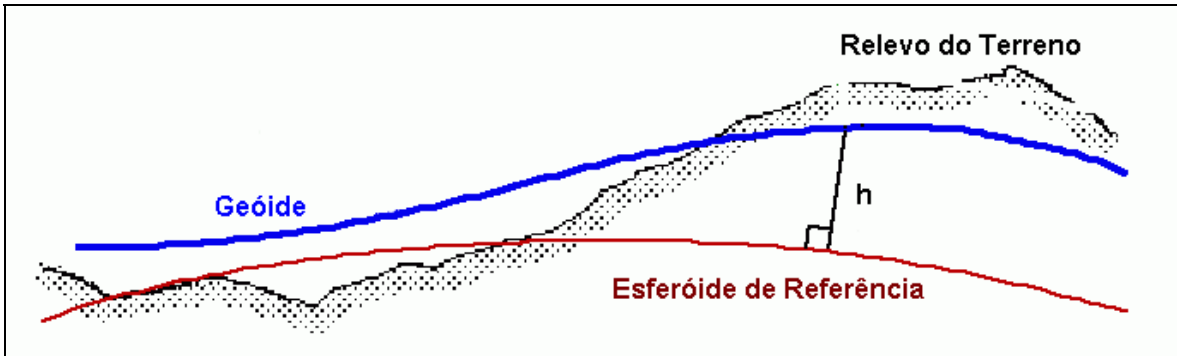


Figura 23 –Comparação esquemática entre o Esferóide de Referência e o Geóide
(modificado de Telford, 1990).

A gravidade varia inversamente com o quadrado da distância da fonte, logo se faz necessário corrigir as variações de elevação entre as estações de medição para homogeneizá-las a uma superfície de referência. A correção de Ar Livre não leva em consideração o material que se encontra entre a estação e o plano de referência. A fórmula utilizada neste cálculo corresponde à variação esperada do valor de gravidade com a variação de altitude (h), em relação à superfície de referência:

$$\Delta g_{fa} = 0,3086 h.$$

Para este cálculo, é utilizada a fórmula baseada na segunda lei de Newton (Seção 4.1), onde o raio médio da Terra é $6,367 \times 10^8$ cm e o valor teórico da gravidade, na latitude 45° e ao nível do mar, é de 980.629 Gals.

4.2.3. Correção Bouguer

Esta correção leva em consideração a atração gravitacional do material situado entre a superfície de referência e a elevação de onde foi feita a medição. Para o cálculo desta atração, considera-se a massa entre estas referências como sendo uma placa (*slab*) horizontal infinita, com espessura h e densidade ρ . Pode ser expressa matematicamente como o produto da densidade do material, a altura relativa do nível do mar (ou outra superfície de referência) e uma constante em mGal:

$$\Delta g_{\text{boug}} = 2 \pi \rho G h = 0,04193 \rho h,$$

onde ρ é a densidade do material em kg/m^3 e h a altura para a superfície de referência em metros.

4.2.4. Correção de Terreno

A fórmula descrita na Seção anterior considera uma topografia plana nas vizinhanças da estação de medição, desprezando o efeito do material localizado em cotas acima ou a falta de material em cotas abaixo. A aplicação da Correção de Terreno (Δg_{ter}) se faz necessária nestes casos.

Se a estação está próxima a regiões com alto relevo, há uma força extra para cima atuando no gravímetro, que reduz a leitura. Se a estação está próxima a um vale, existe uma ausência de massa que tende também a diminuir o valor medido. Em ambos os casos, a correção efetuada possui sinal positivo.

4.2.5. Correção de Eötvös

O modelo da Terra utilizado para as correções anteriores assume que o ponto de observação é fixo em um local específico. Esta suposição é violada em levantamentos marinhos, aéreos e orbitais, porque a plataforma de observação possui uma velocidade angular diferente da prevista pelo modelo da Terra para aquela latitude. Este fenômeno causa grandes erros somente se a plataforma utilizada possuir uma componente de velocidade na direção leste – oeste. Caso a plataforma se mova na direção norte – sul, a trajetória será realizada acompanhando a rotação da Terra. A fórmula para a correção de Eötvös é:

$$E = 7,508 V \cos\Phi \sin\Theta + V^2 / R,$$

onde V é a velocidade da plataforma em nós, Φ é a latitude em graus, Θ é a direção da plataforma em graus a partir do norte e R é o raio da Terra em metros para aquela latitude (Chapin, 1996).

4.2.6. Anomalias de Ar Livre e Bouguer

A Anomalia de Ar Livre (g_{AL}) é calculada subtraindo-se a correção de latitude (Δg_{lat}) da gravidade observada (g_{obs}) e adicionando-se uma correção para a elevação da estação de medição (correção de ar livre, Δg_{fa}):

$$g_{AL} = g_{obs} - \Delta g_{lat} + \Delta g_{fa}$$

Quando todas as correções citadas na Seção 4.2 forem aplicadas para a leitura da gravidade observada, obtém-se o valor da Anomalia Bouguer para a estação:

Anomalia Bouguer = Gravidade Observada – Modelo da Terra Corrigido

ou

$$g_B = g_{obs} - (\Delta g_{lat} + \Delta g_{fa} - \Delta g_{boug} + \Delta g_{ter})$$

Deve-se inserir nesta fórmula a correção de Eötvös, quando necessário.

4.3. Interpretação dos Dados Gravimétricos

O campo gravimétrico é composto por uma superposição de anomalias resultantes das mudanças de densidade (massas anômalas) em várias profundidades. Quanto mais profunda for a fonte causadora da anomalia, mais distribuída espacialmente ela ficará e menor será sua amplitude. A suavização (ou comprimento de onda aparente) da anomalia é geralmente proporcional à profundidade que se encontram as mudanças laterais de densidade.

O intervalo de profundidade que se deseja enfatizar depende dos objetivos da interpretação; o fator fundamental para a investigação é o conhecimento da geologia local. Os efeitos causados por uma massa anômala rasa possuem normalmente um comprimento de onda pequeno, que podem ser removidos através de filtragem. Massas localizadas em regiões profundas são chamadas de regionais e possuem comprimentos de onda grandes. O campo gravimétrico resultante da remoção do ruído próximo à superfície e do efeito regional é chamado de residual. O maior desafio na interpretação gravimétrica é a separação das anomalias de interesse dos efeitos sobrepostos de outras feições. A individualização das anomalias regional e residual normalmente não é completa, e distorções são causadas pela influência de ambas (Telford, 1990).

Depois da retirada dos efeitos de interferência causados por outras feições, o problema da interpretação, normalmente, é achar a distribuição de massa responsável pela anomalia residual. Os procedimentos geralmente utilizados consistem de modelagem interativa (Bhattacharyya, 1978, citado por Telford, 1990). O campo de distribuição de massas de um modelo é calculado e subtraído da anomalia residual para determinar os efeitos que o modelo não pode calcular. O modelo é então modificado e os cálculos refeitos até que os resíduos se tornem mínimos. A anomalia gravimétrica não é suscetível a pequenas variações na forma do corpo anômalo; com isto, formas simples produzem resultados satisfatórios (Telford, 1990). Vale ressaltar, entretanto, que, em razão da ambigüidade intrínseca aos métodos potenciais, não é possível determinar uma única solução para a anomalia residual.

5. Tratamento e Interpretação dos Dados Gravimétricos e de Sensoriamento Remoto

Serão aplicados nos dados gravimétricos tratamentos que visam a homogeneização dos mesmos, devido a utilização de diferentes levantamentos neste trabalho. Primeiramente, será aplicada uma redução nos dados, que consiste em obter somente as variações de densidade na sub-superfície, afastando efeitos relacionados a latitude e elevação do levantamento, além da topografia dos terrenos adjacentes e das marés atuantes. Os três levantamentos serão em seguida uniformizados, integrados e realçados para interpretação.

As seis imagens RADARSAT-1 analisadas neste estudo passarão por um pré-processamento, no intuito de corrigir distorções radiométricas e geométricas relacionadas ao seu processo de aquisição. Uma vez corrigidos, os dados serão filtrados e classificados para a individualização de feições nas imagens passíveis de interpretação como exsudações de óleo.

Os resultados mencionados nos parágrafos anteriores foram inseridos em um Sistema de Informação Geográfico (SIG), com o objetivo de se proceder a interpretação final. Nas seções seguintes, tais temas serão abordados em detalhe.

5.1. Processamento dos dados Gravimétricos

Foram utilizados três levantamentos distintos neste trabalho, dois deles realizados pela Petrobrás: um terrestre, chamado Gravter Bahia, e um marítimo, denominado EG13. O levantamento Gravter Bahia abrange as bacia do Tucano, Jatobá e Recôncavo, bem como porções emersas das bacias de Jacuípe, Camamu-Almada e Jequitinhonha, além disso recobre também uma pequena parte da porção central do Estado de Espírito Santo. O projeto EG13 inclui a porção marítima, até a isóbata de 400 metros, das bacias de Jacuípe, Camamu-Almada, Jequitinhonha, Cumuruxatiba, Mucuri e parte do Espírito Santo. A terceira fonte de dados refere-se ao satélite Geosat, cujo levantamento recobre todo o globo (Figura 24).

Os dados representados na Figura 24 recobrem uma área de 1.977.000 km²; a área de estudo possui aproximadamente 120.000 km².

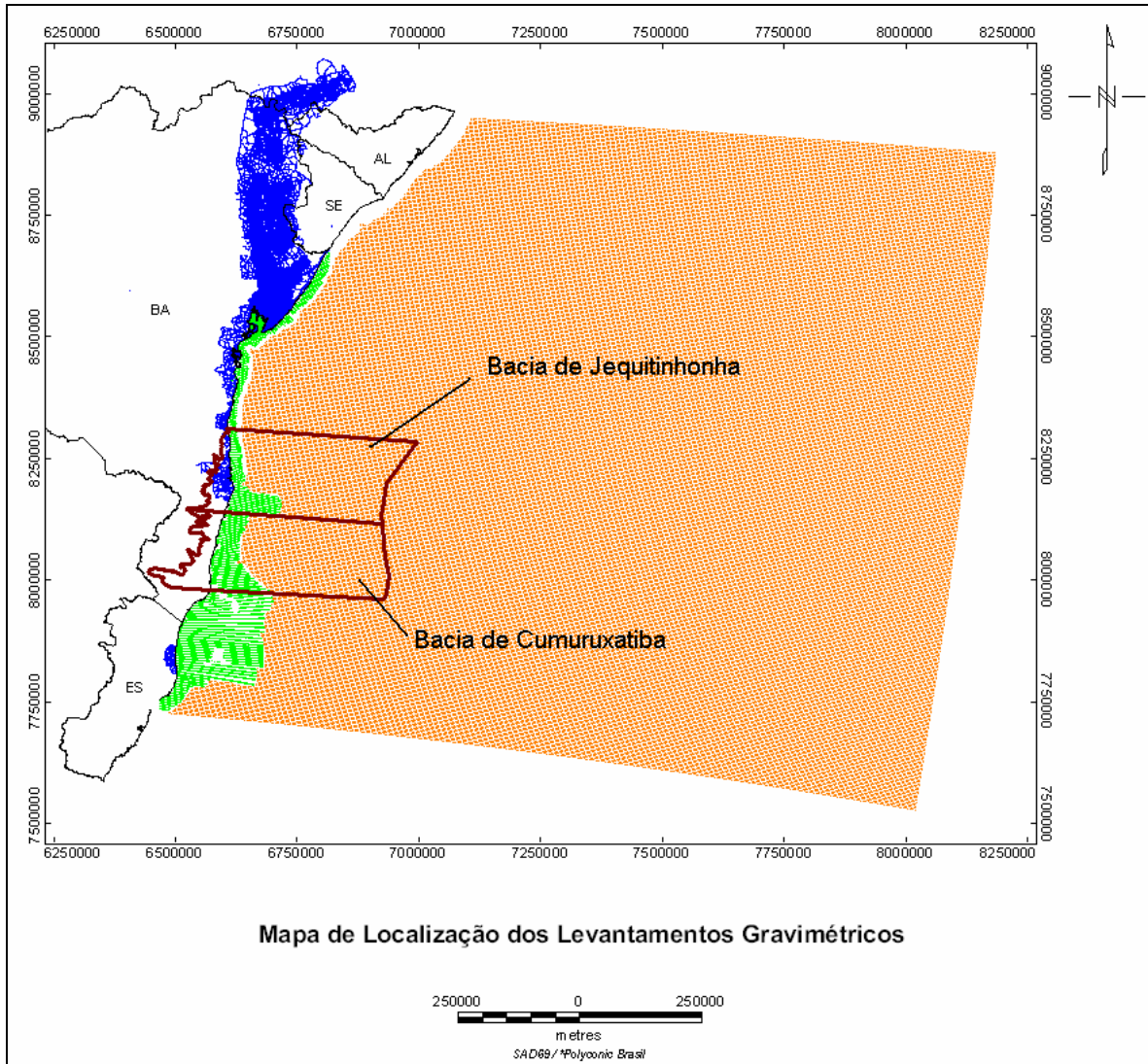


Figura 24 – Encontram-se, respectivamente, em verde e azul os levantamentos gravimétricos marítimo (EG13) e terrestre (Gravter Bahia) realizados pela Petrobrás. Em laranja, são representados os dados gravimétricos adquiridos pelo satélite Geosat. A área de estudo está representada pelos polígonos em marrom.

O Geosat, um acrônimo de *Geodetic Satellite*, utilizou um radar altímetro como ferramenta de medição. Foi desenvolvido e construído pelo Applied Physics Laboratory da Johns Hopkins University, para a Marinha dos Estados Unidos, com a finalidade de adquirir dados para aplicações nas áreas de geodésia, geofísica, dinâmica do oceano e estudos globais do clima. Os dados coletados por este satélite possuem uma malha regular em

graus, na qual o espaçamento dos pontos amostrais em quilômetros varia de acordo com a latitude de aquisição. Na região de estudo, a malha amostral possui um espaçamento de aproximadamente quatro quilômetros.

Os dados marítimos adquiridos pela Petrobras estão distribuídos segundo uma malha com distância entre os pontos amostrais variando de 1000 até 4000 (levantamento marítimo EG13). O levantamento terrestre Gravter Bahia possui também uma malha irregular com distâncias entre os pontos amostrais variando de 500 até 300 metros.

Os procedimentos utilizados na redução e processamento dos dados gravimétricos, descritos a seguir, foram realizados através do programa Oasis Montaj, Versão 5.1.8, da Geosoft.

5.1.1. Homogeneização e Tratamento dos Dados

Os três levantamentos gravimétricos, aqui utilizados passaram por um processo de uniformização antes de sua integração para interpretação. Os dados adquiridos pela Petrobras foram usados em sua totalidade na região de estudo, enquanto que os dados Geosat foram recortados obedecendo o limite *offshore* do levantamento marítimo da Petrobras, ou seja, até a isóbata de 400 metros.

Primeiramente, foram subtraídos 15,1 mGals do valor da gravidade observada no levantamento terrestre feito pela Petrobras, referentes à mudança das medidas gravimétricas do sistema Woollard Gravity Network (WGN) para o International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN71), adotado mundialmente como datum oficial (Côgo de Sá, 1986). Ao levantamento marítimo da Petrobras foi aplicado um nivelamento operacional através da subtração de 16,8 mGals da gravidade observada. Tal subtração difere das diferenças médias propostas por Côgo de Sá (1986), sendo utilizada pois verificou-se que, no contato entre os levantamentos Gravter Bahia e EG13 permitia um melhor ajuste dos dados.

Foi aplicada posteriormente aos dados a Correção de Latitude, a partir da fórmula de 1967, pois se observou que os levantamentos da Petrobras estavam corrigidos pela fórmula de 1930. Em seguida, foram utilizadas as correções de Ar Livre e Bouguer. A densidade empregada na Correção Bouguer foi $2,67 \text{ g/cm}^3$, por ser uma média das densidades das rochas graníticas, gnáissicas e granulíticas que compõem o embasamento das bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha.

A correção de Terreno foi aplicada somente aos dados do Gravter Bahia, sendo utilizados os valores de correção presentes no próprio levantamento. Não foi necessário aplicar tal procedimento ao restante dos dados marítimos (EG13 e Geosat). A Correção de Eötvös foi previamente aplicada aos dados provindos do satélite Geosat. Todos os dados gravimétricos foram ainda plotados e verificados, no intuito de se detectar valores de medição espúrios.

Após a redução dos dados correspondentes aos três levantamentos, valores discrepantes foram identificados na área de junção do EG13 com o Geosat. Foi observado que este valor discordante era aproximadamente constante em toda a região do contato, e que apresentava um valor médio de 14,1 mGals. Fez-se, então, um nivelamento operacional, adicionando tal valor aos dados de gravidade observada do levantamento Geosat, visando a uniformização dos levantamentos.

Existem vários métodos de interpolação utilizados para dispor dados irregularmente distribuídos na forma de malhas regulares (grid), com pontos espaçados a uma determinada distância. Neste trabalho, a escolha do método de interpolação foi feita com base nos principais métodos descritos na literatura: mínima curvatura, inverso do quadrado da distância e krigagem. De forma geral, todos os métodos oferecem bons resultados, destacando-se o método da Mínima Curvatura, que foi escolhido por produzir uma superfície estimada independentemente da distribuição dos dados e mais suave que as geradas pelos outros algoritmos. Em tal método, pelo menos um ponto amostrado em cada célula da malha tem seu valor respeitado de forma fiel (Landim, 2000). A malha resultante foi calculada, para todos os dados, com uma célula de 2.500 metros.

As estruturas geológicas deixam sua assinatura no campo gravitacional terrestre, como resultado da contribuição simultânea de fontes rasas, de caráter mais local, e de fontes profundas ou mais regionais. Estas fontes possuem um comprimento de onda distinto, passíveis de serem realçados. Após a aplicação de todas as correções, o produto resultante é o Mapa de Anomalia Bouguer (Figura 25), que mostra a necessidade da separação de anomalias com grande comprimento de onda, de caráter regional, das anomalias locais, permitindo uma melhor visualização das estruturas de interesse.

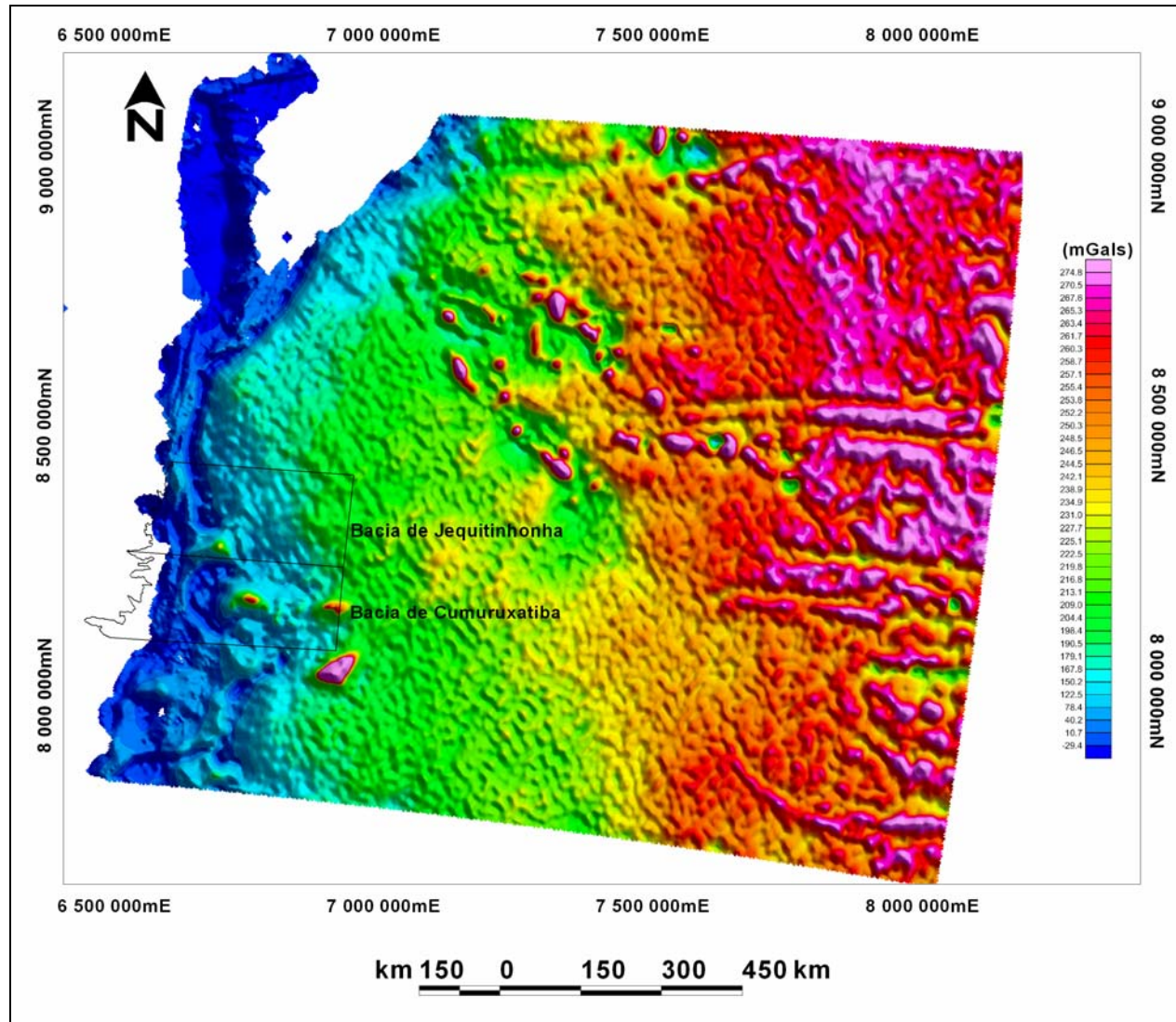


Figura 25 – Mapa de Anomalia Bouguer; a densidade utilizada na correção foi $2,67 \text{ g/cm}^3$. Os polígonos em preto indicam o posicionamento geográfico da área de estudo. Foi aplicado um sombreamento artificial, com 45° de azimuth e 45° de elevação da iluminação.

Foram realizadas diferentes filtrações nos dados integrados com o objetivo de verificar qual das técnicas resultaria num melhor realce das feições de interesse. Os métodos utilizados foram: 2ª derivada vertical do campo gravitacional, sinal analítico e filtração de comprimento de ondas. A partir de testes realizados, o método escolhido foi o de filtração de comprimento de ondas, que se mostrou mais eficaz na separação das anomalias regional e residual. Esta técnica é aplicada transformando o dado para o domínio de número de onda (*wavenumber*) utilizando a transformada de Fourier bi-dimensional (Telford, 1990). São removidos (filtrados) certos componentes do número de onda e uma transformação inversa é aplicada para a reconstituição dos dados. Normalmente, são removidos os pequenos números de onda (comprimento de onda = 1 / número de onda) do conteúdo regional do dado, mas filtrações com intervalos específicos também são possíveis. Este procedimento é muito utilizado no tratamento de dados de métodos potenciais (Gravimetria e Magnetometria), porque possibilita a separação de anomalias apresentando distintos comprimentos de onda, relacionadas a fontes diferentes. Com a utilização da citada filtração, pode-se retirar ou conservar intervalos de interesse através de filtros Passa Alta (filtra frequências baixas e médias), filtros Passa Baixa (filtra médias e altas frequências), e filtros Passa Banda (filtra altas e baixas frequências).

As filtrações aplicadas aos dados gravimétricos utilizaram o algoritmo Gaussiano, que possui a peculiaridade de preservar a forma das feições existentes, principalmente as lineares e de borda. Cada filtração teve o objetivo de realçar um intervalo de comprimento de onda que descrevesse melhor as feições investigadas.

5.1.2. Análise Qualitativa

Foram utilizadas três filtrações Passa Banda, utilizando o algoritmo Gaussiano, para a identificação dos principais compartimentos tectônicos e de estruturas geológicas ao nível do embasamento, para a delimitação dos complexos vulcânicos existentes na região e para a determinação do limite entre a crosta continental e a crosta oceânica. A primeira filtração foi um Passa Banda de 5 até 250 quilômetros, e teve como objetivo a identificação do

arcabouço tectônico das duas bacias, da forma geral do rifte e de suas principais calhas sedimentares (Figura 26).

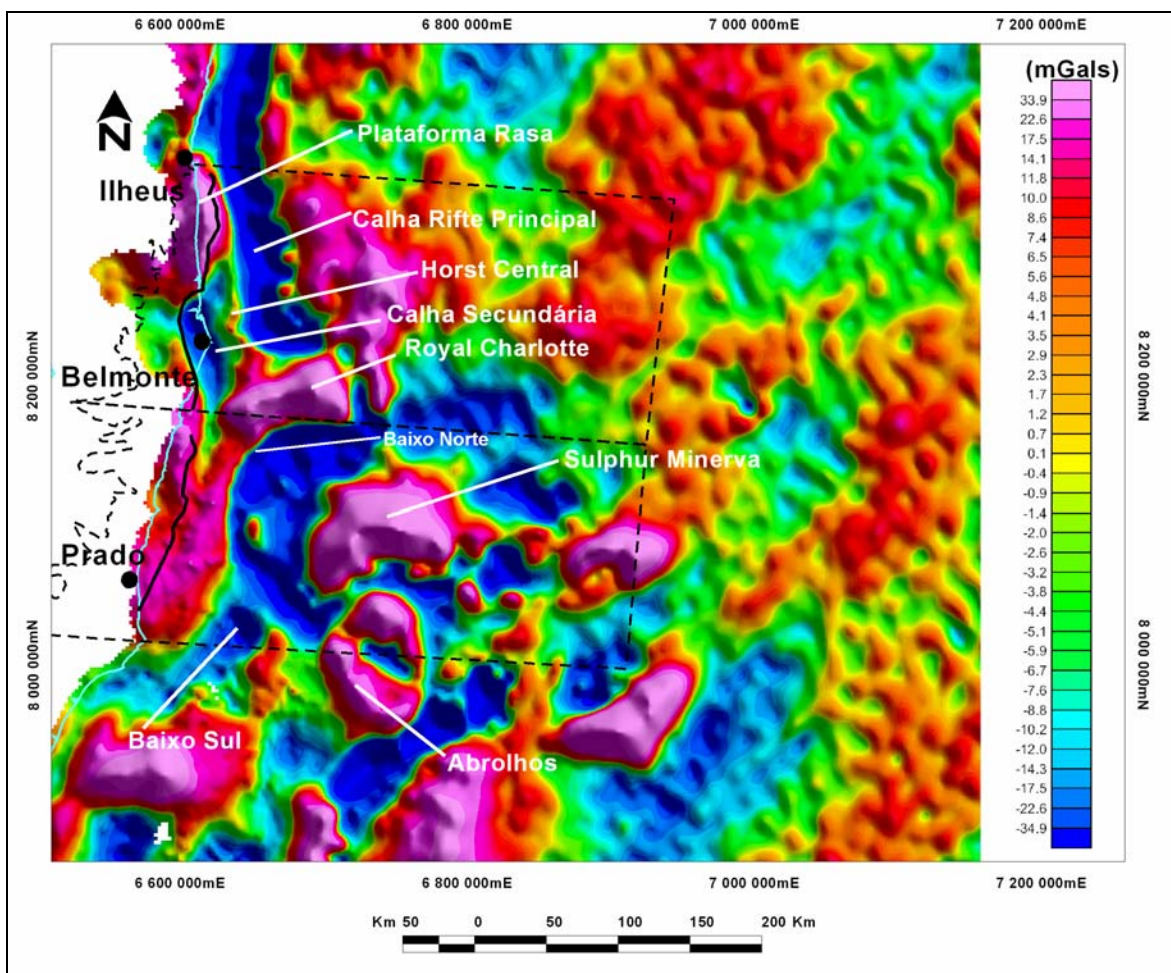


Figura 26 – Mapa de Anomalia Bouguer Filtrado – Passa Banda 5 – 250 km. Sombreamento artificial com 45° de azimute e 45° de elevação da iluminação. A linha de costa está representada em azul claro. Os polígonos (tracejados) em preto indicam o posicionamento geográfico das bacias de Cumuruxatiba (a sul) e de Jequitinhonha (a norte); as linhas sólidas em preto representam linhas de charneira, que limitam a oeste a porção das bacias contendo sedimentos terciários sobre o embasamento (Gaglione, 1987, e Gontijo, 1996).

O mapa de anomalia Bouguer filtrado realça os contrastes de densidade na crosta, tendendo a acentuar a localização de bacias sedimentares e de feições flexuralmente compensadas como flancos de rifte e altos do embasamento. As principais feições gravimétricas positivas são associadas com *footwalls* de grandes falhas de borda que limitam as bacias (Karner, 2000).

Observa-se na Bacia de Jequitinhonha (Figura 27), a calha principal do rifte representada por um baixo gravimétrico de direção aproximada norte - sul. Esta calha principal possui cerca de 38 quilômetros de largura e 135 de extensão, sendo limitada a oeste pela linha de charneira descrita por Gaglione (1987) (na porção norte da bacia) e pelo horst central (na porção central da bacia). Limita-se ainda a sul com o Complexo Vulcânico de Royal Charlotte e a leste faz fronteira com um alto gravimétrico bem pronunciado (44 mGals), possivelmente associado a um alto do embasamento. Nota-se que o horst central, localizado na região centro-sul da bacia, limita uma outra calha a oeste, que provavelmente forma uma sub-bacia sedimentar com aproximadamente 25 quilômetros de largura e 85 de comprimento. Tal sub-bacia é representada por uma feição alongada norte-sul, consistindo de um baixo gravimétrico (-38 mGals). Na parte sul da bacia, pode-se identificar o complexo vulcânico de Royal Charlotte bem demarcado por um alto gravimétrico (147 mGals) e alongado na direção ENE-WSW.

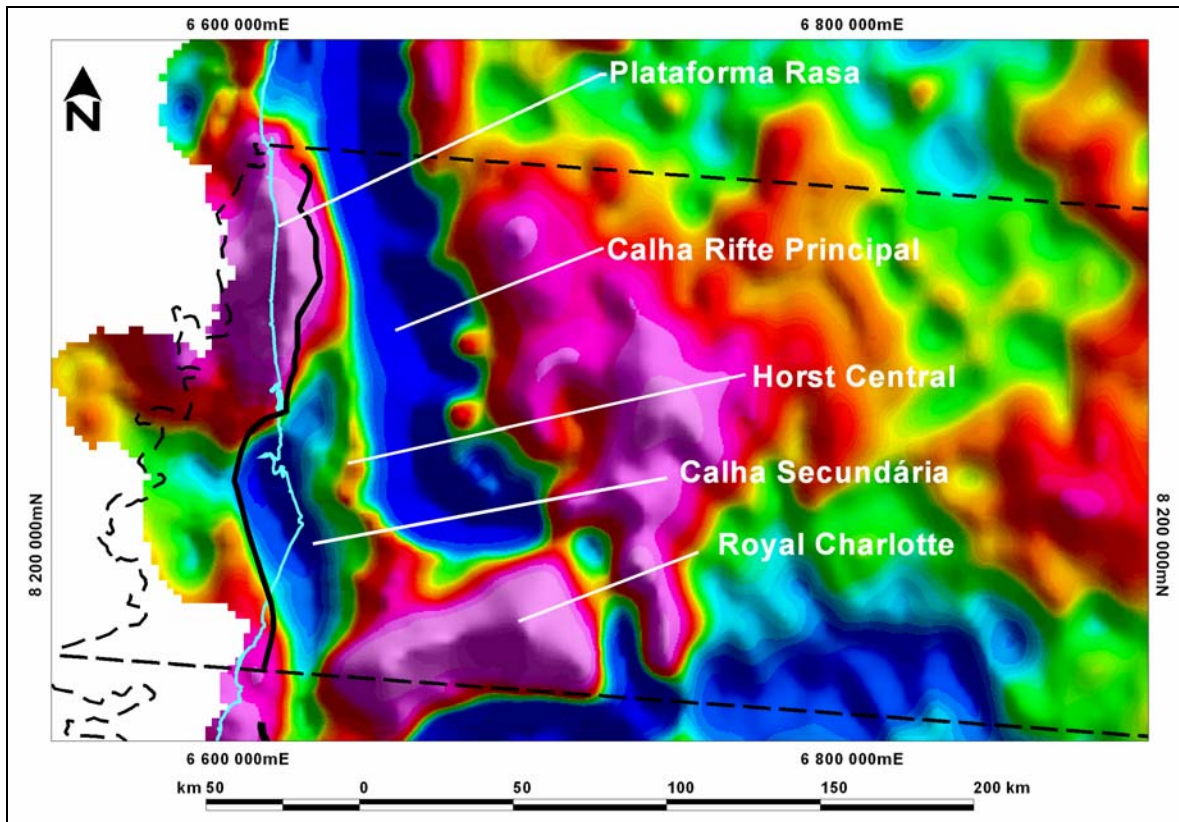


Figura 27 – Detalhe da Bacia de Jequitinhonha com seus principais compartimentos. A linha de costa esta representada em azul claro; o polígono em preto tracejado indica a localização geográfica da bacia; a linha sólida em preto representa a linha de charneira que limita a oeste a porção da bacia contendo sedimentos terciários sobre o embasamento (Gaglione, 1987). As especificações, bem como a escala de cores podem ser observadas na Figura 26.

Na bacia de Cumuruxatiba (Figura 28), pode-se verificar a continuação da calha secundária da bacia de Jequitinhonha, que se atenua em direção a sul. Um alto gravimétrico (máximo de 25 mGals) se estende de norte a sul pela porção da bacia próxima à costa (Embasamento raso, Gontijo, 1996), avançando lateralmente cerca de 50 quilômetros em direção ao mar. Seguindo para leste deste platô gravimétrico, observa-se um baixo gravimétrico (chegando a -97 mGals) bem pronunciado em forma de arco, possivelmente representando uma grande espessura de sedimentos. Os complexos vulcânicos de Sulphur Minerva e Abrolhos estão bem caracterizados por altos gravimétricos proeminentes (150 e 62 mGals,

respectivamente). O compartimento tectônico Baixo Sul, descrito por Gontijo (1996), está representado no mapa por um baixo gravimétrico de direção nordeste – sudoeste, com cerca de 110 quilômetros de extensão (adentrando a Bacia de Mucuri, a sul) e 25 quilômetros de largura, apresentando valores gravimétricos que chegam a -41 mGals. Algumas sub-bacias são identificadas na porção distal da bacia entre os complexos vulcânicos, podendo ter histórias de preenchimento sedimentar distintas.

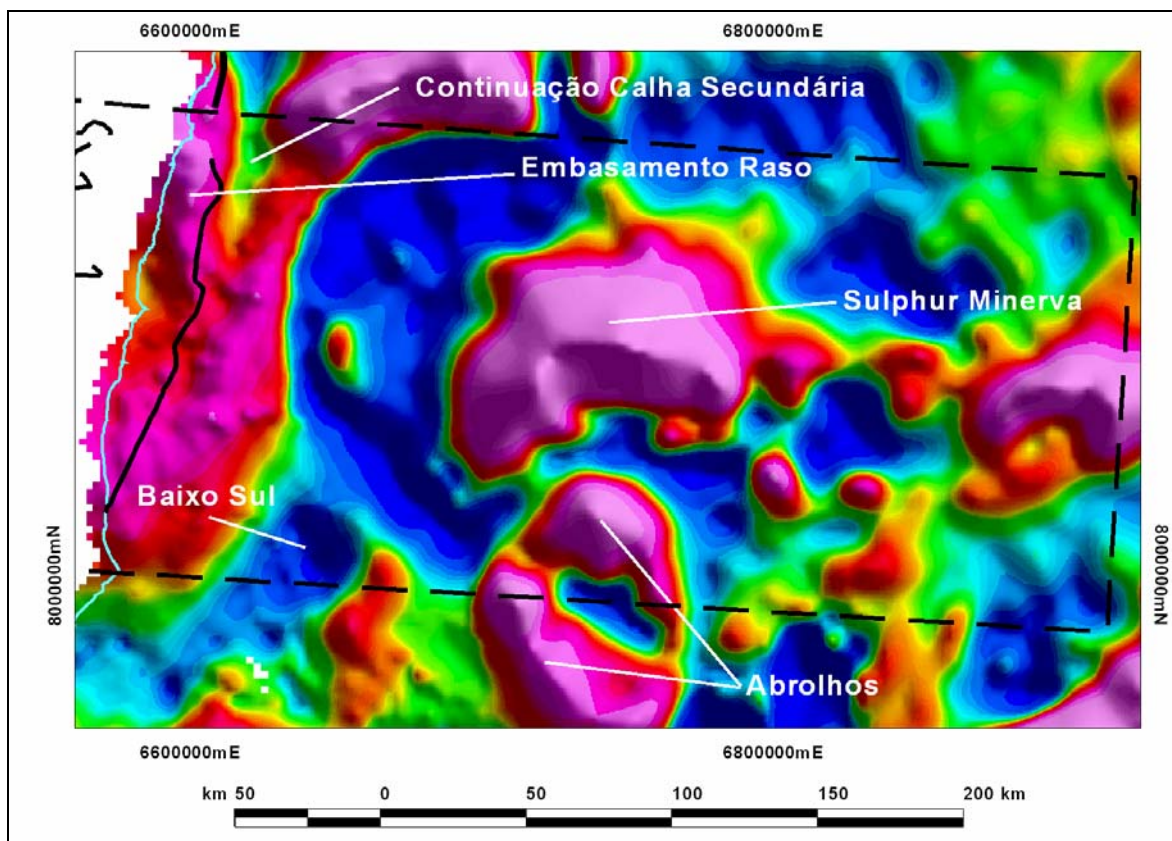


Figura 28 - Detalhe da Bacia de Cumuruxatiba com seus principais compartimentos. A linha de costa esta representada em azul claro; o polígono em preto tracejado indica a localização geográfica da bacia; a linha sólida em preto representa a linha de charneira que limita a oeste a porção da bacia contendo sedimentos terciários sobre o embasamento (Gontijo, 1996). As especificações, bem como a escala de cores podem ser observadas na Figura 26.

5.1.2.1 Extração de Lineamentos

O mapa gravimétrico Bouguer foi em seguida realçado por um filtro Gaussiano Passa Banda com limites de 5 e 22 quilômetros. Este intervalo foi escolhido no intuito de filtrar tendências regionais nos dados, preservando as impressões geológicas referentes à estruturação da bacia e a seu embasamento, como também de eliminar os ruídos de alta frequência. Tomou-se o cuidado em não interpretar feições na parte mais *offshore*, onde somente os dados Geosat estão presentes, porque as especificações técnicas deste acervo informam que o limite de resolução é de 20 a 25 quilômetros. Também foram levados em consideração os efeitos de borda causados pela quebra da plataforma, que podem influenciar os dados gravimétricos. Os lineamentos interpretados nesta região podem ser afetados pelos efeitos de borda causados por este desnível batimétrico.

Bacia de Cumuruxatiba

Uma análise preliminar do mapa Bouguer realçado mostra, na Bacia de Cumuruxatiba, um alto gravimétrico (máximo de 7 mGals) em forma de arco que se reflete na batimetria do fundo oceânico (Figura 29). Esta feição está provavelmente associada às intrusões eocênicas dos Complexos Vulcânicos de Abrolhos, a sul, Royal Charlotte, a norte, e Sulphur Minerva, a leste. Estas feições são também observadas na Figura 26.

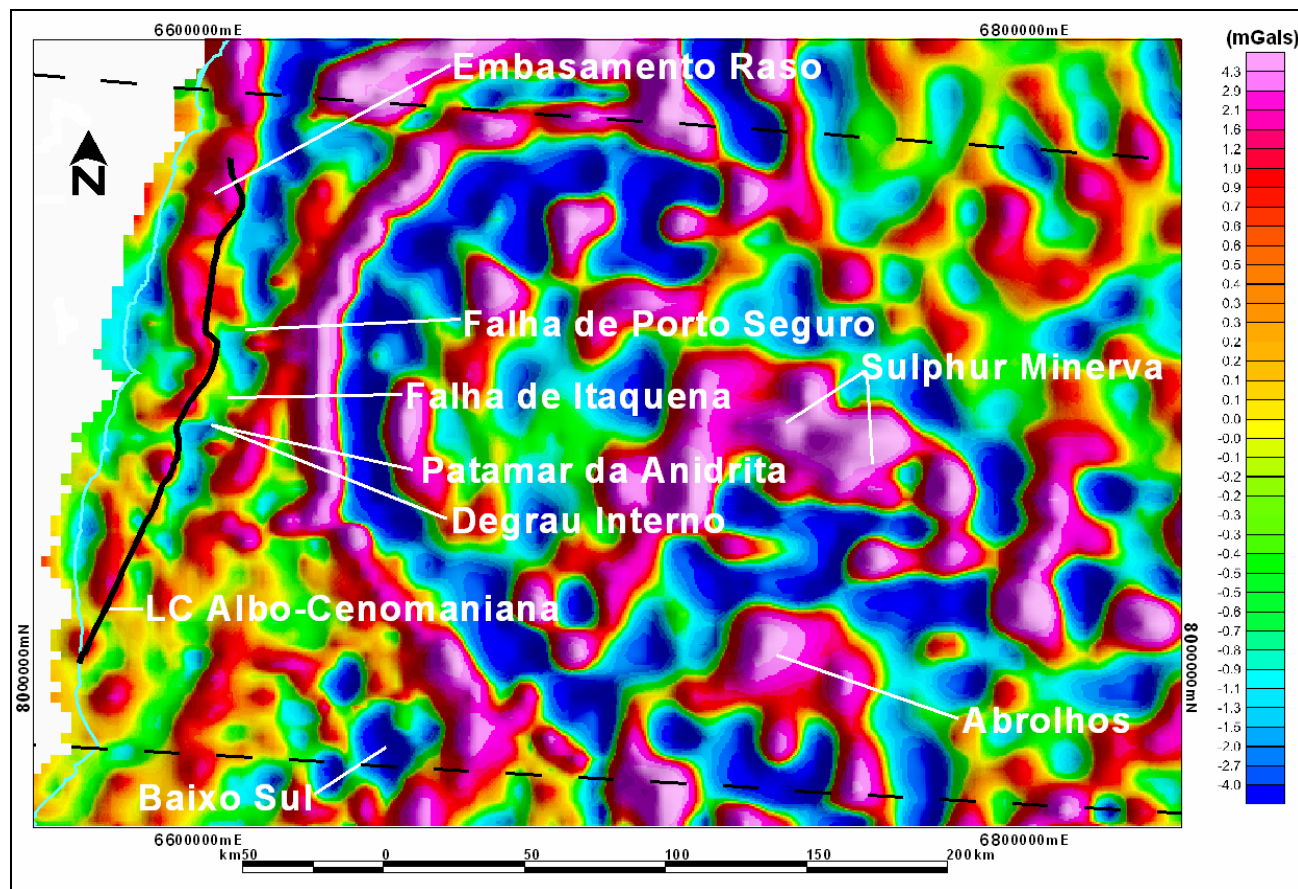


Figura 29 – Detalhe da Bacia de Cumuruxatiba com seus principais compartimentos. Foi utilizada uma filtragem Passa Banda de 5 até 22 km, assim como um sombreamento artificial com 45° de azimute e 45° de elevação da iluminação. A linha de costa esta representada em azul claro; o polígono em preto tracejado indica a localização geográfica da bacia; a linha sólida em preto representa a linha de charneira que limita a oeste a porção da bacia contendo sedimentos terciários sobre o embasamento (Gontijo, 1996).

Pode ser observado, na região norte próxima à costa, o compartimento estrutural chamado de Embasamento Raso (Gontijo, 1996) (Figura 29), representado por um alto gravimétrico alongado (máximo de 4 mGals). Esta anomalia positiva, de direção aproximada norte – sul, se estende em direção à porção sul da bacia por cerca de oitenta e cinco quilômetros, onde sua magnitude se atenua. O limite leste desta anomalia coincide com a Linha de Charneira Albo – Cenomaniana (Gontijo, 1996), que demarca o contato entre o compartimento Embasamento Raso e os compartimentos Patamar da Anidrita e Degrau Interno. Estes últimos dois compartimentos parecem compor um único segmento e revelam-se no mapa Bouguer filtrado como um baixo gravimétrico pouco ressaltado (até -4 mGals). Tal baixo gravimétrico possui duas feições pouco destacadas de direção noroeste – sudeste, que podem estar associadas, apesar da pequena diferença de posicionamento geográfico entre elas, com as Falhas de Itaquena e de Porto Seguro, descritas por Gontijo (1996) (Figura 29). Na parte sul da bacia, encontra-se o compartimento Baixo Sul, com espessura sedimentar de até 10.000 metros, segundo estimativas feitas a partir de seções sísmicas analisadas por Gontijo (1996). Este compartimento corresponde a alguns baixos gravimétricos, chegando até -5,5 mGals, agrupados na porção mais distal da bacia.

Com base no mapa gravimétrico realçado (Figura 29), extraiu-se os principais lineamentos da Bacia de Cumuruxatiba (Figura 31). Estes apresentaram boa correlação com os levantamentos estruturais preexistentes (Gontijo, 1996), tendo sido mapeadas novas feições.

As estruturas assim delineadas possuem três direções principais: uma aproximadamente norte – sul, outra leste-oeste e, por último, uma noroeste-sudeste, esta última possuindo o mesmo *trend* estrutural das Falhas de Itaquena e Porto Seguro, descritas na Seção 2.1.1. As estruturas extraídas com direção norte - sul são correlacionáveis com as linhas de charneira descritas por Gontijo (1996) (Figura 06). Os lineamentos de direção leste – oeste, mapeados na porção proximal da bacia, parecem truncar as demais estruturas de direção norte - sul. Estes lineamentos podem estar relacionados à reativação de cicatrizes de falhas transformantes observadas em crosta oceânica, mas que podem exercer influência na estruturação continental e ainda servir de condutos para migração de óleo (Karner 2000).

Bacia de Jequitinhonha

É observado na Bacia de Jequitinhonha (Figura 30) o Alto de Olivença, representado por um alto gravimétrico (8 mGals), limitando-a a norte com a Bacia de Almada. Esta feição avança em direção ao oceano por cerca de quinze quilômetros e se estende como uma plataforma rasa para sul, adentrando o continente. Um limite gravimétrico bem marcante (coincidente com a linha de charneira principal) individualiza a porção mais rasa, a oeste, recoberta por sedimentos de idade Terciária, da porção mais profunda, a leste, que apresenta o registro mais completo da sedimentação da bacia (M. Araújo, 1990, citado por Córdoba, 1990). Esta feição caracteriza uma falha de borda que se prolonga a sul até encontrar a linha de charneira Albo-Cenomaniana da Bacia de Cumuruxatiba, constituindo uma única linha de charneira em escala regional. Quando esta falha adentra a porção terrestre da Bacia de Jequitinhonha, um baixo gravimétrico (-6,8 mGals) é formado, o qual coincide com o posicionamento geográfico da foz do rio homônimo.

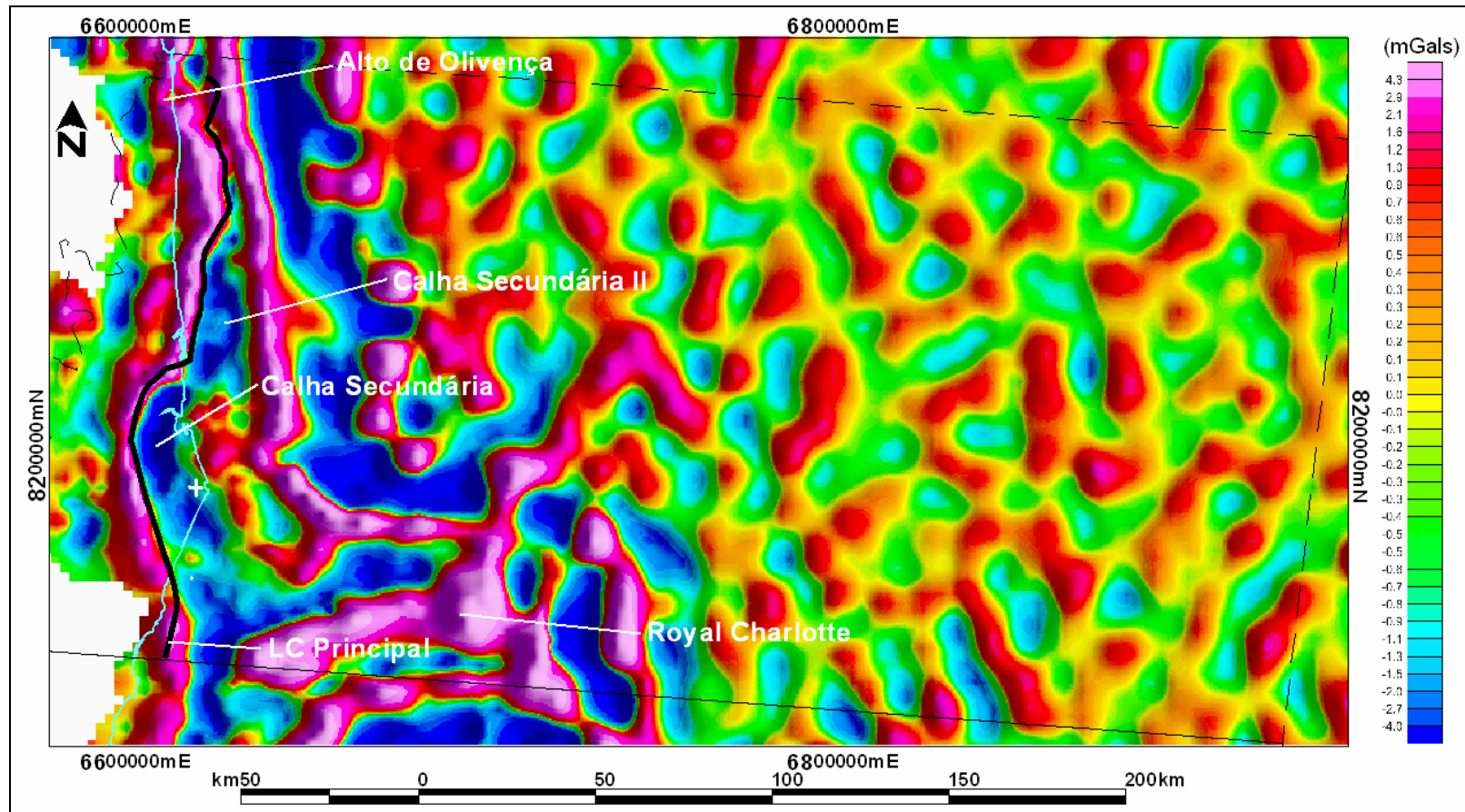


Figura 30 - Detalhe da Bacia de Jequitinhonha com seus principais compartimentos. Foi utilizada uma filtragem Passa Banda de 5 ate 22 km. Sombreamento artificial com 45° de azimute e 45° de elevação da iluminação. A linha de costa esta representada em azul claro; o polígono em preto tracejado indica a localização geográfica da bacia; a linha sólida em preto representa a linha de charneira que limita a oeste a porção da bacia contendo sedimentos terciários sobre o embasamento (Gaglione, 1987). A cruz em branco mostra a foz do Rio Jequitinhonha.

Na porção norte da bacia, a leste da principal linha de charneira (Figura 30), um baixo gravimétrico (até - 3,7 mGals), não visualizado na filtragem Passa Banda 5 – 250 km (Figura 26), se prolonga por cerca de 45 quilômetros para sul, possuindo 15 quilômetros de largura, em média. Este compartimento, aqui chamado de Calha Secundária II, parece se prolongar até a região sul da bacia, conectando-se com a Calha Secundária, até encontrar-se com o compartimento Baixo Norte da Bacia de Cumuruxatiba.

O mapa de lineamentos gerado para a Bacia de Jequitinhonha (Figura 31), a partir do Mapa de Anomalia Bouguer filtrado (5 – 22 km) (Figura 30), mostra boa correlação com as estruturas encontradas na literatura e acrescenta algumas feições de direção leste – oeste que parecem truncar aquelas de direção norte – sul. Além disso, alguns lineamentos de direção noroeste – sudeste, na parte centro – sul da bacia, foram mapeados (Figura 31), podendo estar relacionados com o mesmo evento gerador das falhas de Itaquena e Porto Seguro, localizadas na Bacia de Cumuruxatiba (Gontijo, 1996), que possuem esta mesma direção.

O mapa estrutural integrado (Figura 32) incorpora os dados provindos da literatura e os extraídos neste estudo, possibilitando prolongar o traçado de algumas feições já mapeadas por outros autores e obter uma visão mais ampla da estruturação regional das bacias estudadas.

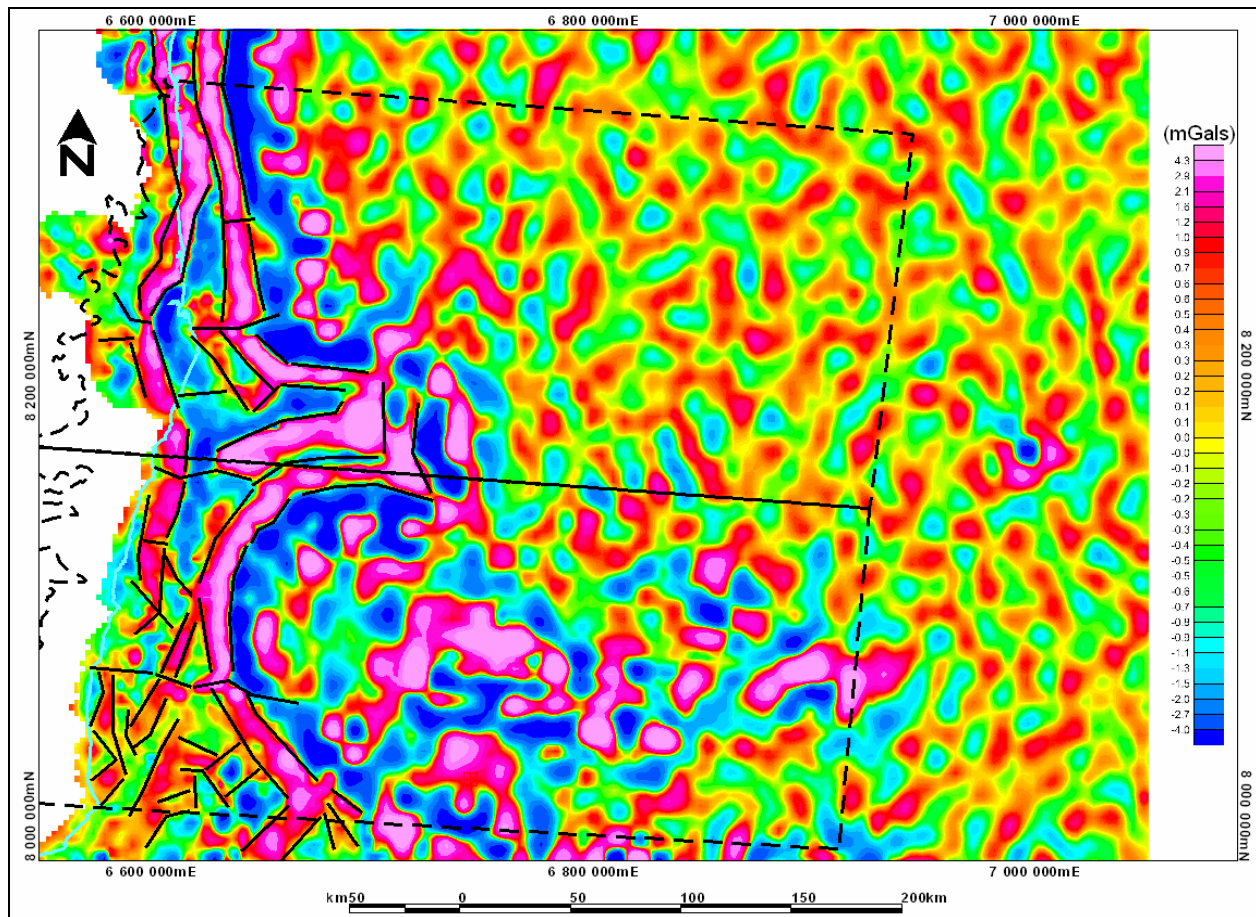


Figura 31 – Mapa Bouguer filtrado – Passa Banda 5 – 22 km. O polígono em preto tracejado representa a localização geográfica das bacias. A linha de costa esta representada em azul claro. As linhas sólidas em preto representam o resultado da interpretação dos lineamentos.

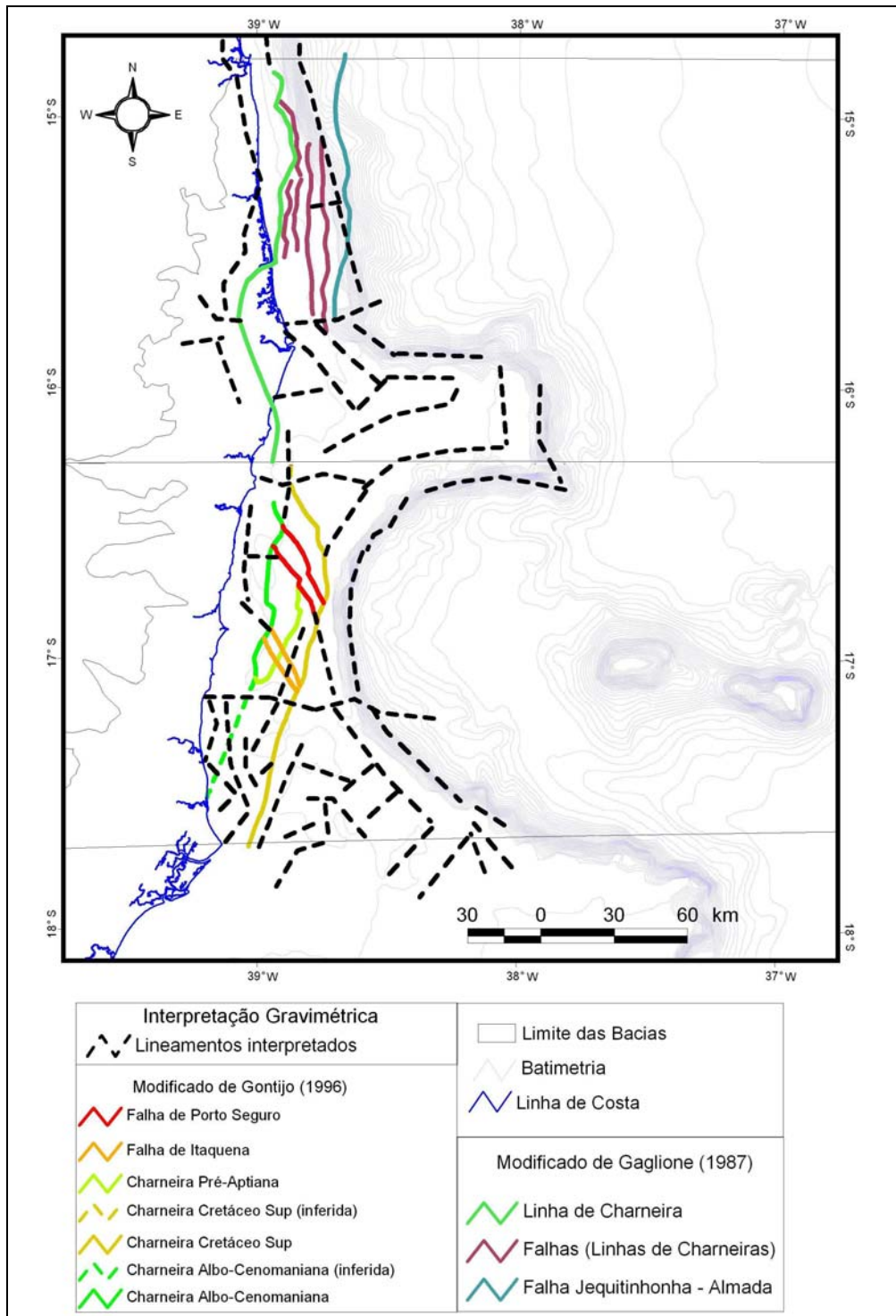


Figura 32 – Integração dos dados estruturais da literatura com os extraídos no presente trabalho a partir dos dados gravimétricos (Lat/Long – SAD69). Em caso de superposição com os lineamentos interpretados, foram mantidas nessa figura as estruturas definidas por Gontijo (1996) e Gaglione (1987).

Limite Crosta Oceânica – Crosta Continental e Complexos Vulcânicos

O contato entre a crosta continental e a crosta oceânica pode ser associado a duas feições gravimétricas: (1) a uma anomalia dipolar atribuída ao espessamento crustal e a diferença de densidade decorrente do contato entre as duas crostas e, (2) a zonas de fratura causadas pela movimentação diferencial da Placa Tectônica Sulamericana (Medeiros, 2004, informação verbal). Quando estes lineamentos regionais entram em contato com as anomalias dipolares, tem-se um ponto com maior segurança para a determinação do limite.

Karner (2000) correlacionou, ao longo da margem sudeste brasileira, gradientes gravimétricos negativos - positivos com a terminação de zonas de fratura oceânicas. Considerou ainda o limite dos evaporitos sin-rifte e mudanças abruptas na direção das anomalias de leste - oeste para paralelas à margem. A fonte da dipolaridade gravimétrica observada no limite entre as crostas é, em parte, consequência da justaposição da crosta oceânica antiga, relativamente espessada, adjacente a uma crosta continental afinada. O espessamento crustal é função do espalhamento do assoalho oceânico aliado à proximidade com plumas mantélicas. A localização do limite entre crosta continental e crosta oceânica se torna difícil em alguns casos, devido a acumulações espessas de sedimentos pós-rifte, comumente estruturados por diapirismo de sal, que tendem a mascarar as estruturas sin-rifte da margem em estudo (Karner, 2000).

Segundo Behn (2000), feições observadas nos dados gravimétricos que contenham valores de gravidade altos e baixos, lado a lado, podem geneticamente estar associadas e, por conseguinte, situadas sobre a transição abrupta entre a crosta continental afinada e a crosta oceânica espessada.

Nas bacias em estudo, o mapa de Anomalia Bouguer (Figura 25) e o mapa de Anomalia Bouguer Filtrado (Figura 26) não mostraram os lineamentos regionais gerados a partir do espalhamento do fundo oceânico próximos a região de ocorrência das anomalias dipolares. Contudo, o limite aproximado da crosta continental com a crosta oceânica foi delimitado baseado nestas anomalias dipolares, que foram identificadas no mapa de Anomalia Bouguer

realçado por uma filtragem Gaussiana Passa Banda de 20 – 150 quilômetros (Figura 33). Estes limites foram utilizados para filtrar os comprimentos de onda regionais, que não interessam nesta investigação, de modo a individualizar aqueles referentes à anomalia causada pelo contato entre as crostas.

Os complexos vulcânicos de Abrolhos, Sulphur Minerva e Royal Charlotte foram delimitados a partir do mapa gerado pela filtragem 20 – 150 quilômetros (Figura 33). Este procedimento fez-se necessário porque estas feições se localizam em águas profundas e ultra-profundas, onde existem somente os dados Geosat, de menor resolução. A maior parte do sinal adquirido pelo Geosat na banda (comprimento de onda) 20 – 25 quilômetros é atribuído a ruídos e não são usualmente utilizados.

O Complexo Vulcânico de Abrolhos tem uma porção emersa com altitudes de cerca de até 100 metros acima do nível do mar, circundado por águas profundas, com aproximadamente 1.500 – 2.000 metros de profundidade. O mapa de anomalia Bouguer realçado mostra feições bem delimitadas e com altos valores de gravidade (em torno de 92 mGals para Royal Charlotte e Sulphur Minerva, e 45 mGals para Abrolhos) nas três regiões (Figura 33). A disposição aparentemente leste – oeste destes complexos denota uma possível ligação com a direção das falhas transformantes antigas geradas pela abertura do oceano Atlântico. Por outro lado, de acordo com Szatimari e Mohriak (1994, citado por Conceição (1994, citado por Gontijo, 1996)), este magmatismo Eocênico foi atribuído a esforços compressivos entre a cadeia meso-oceânica e a subducção andina, gerando reativações de direção ENE, originando feições transtensivas e transpressivas. Segundo Gontijo (1996), nos domínios transtensivos desta reativação ocorreu a formação de dutos aproveitados pelo magmatismo de Abrolhos.

Os resultados obtidos através da interpretação dos dados gravimétricos estão consolidados na Figura 34.

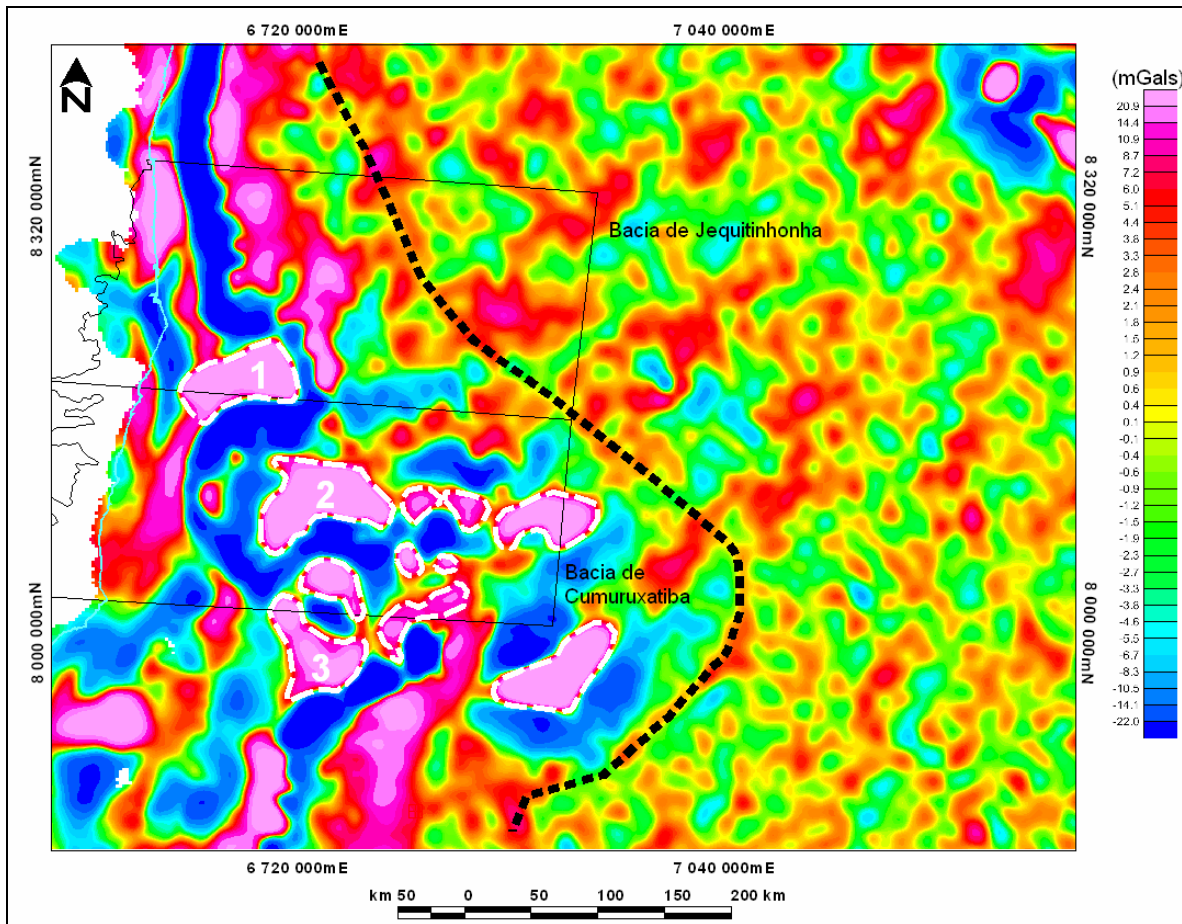


Figura 33 – Mapa de Anomalia Bouguer filtrado – Passa Banda 20 – 150 km (Policônica – Sad 69). Limite interpretado (linha preta tracejada) entre a Crosta Continental e a Crosta Oceânica. Complexos vulcânicos de Royal Charlotte (1), Sulphur Minerva (2) e Abrolhos (3).



Figura 34 – Resultados obtidos através da interpretação dos dados gravimétricos.

Modelagem Gravimétrica

Seis perfis gravimétricos foram modelados (Fig. 35), com o objetivo de estudar a geometria interna das bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha. Sabe-se que uma mesma anomalia gravimétrica pode resultar de distribuições distintas de densidades e geometrias dos corpos em sub-superfície. Para diminuir a ambigüidade na interpretação gravimétrica, são utilizadas todas as informações existentes sobre a geologia da área, tais como densidade das rochas e geometria dos corpos, isto é, limitam-se os graus de liberdade.

Os valores de densidade média para as diferentes litologias foram empregados com base na literatura geológica disponível (Telford, 1990): manto ($3,5 \text{ g/cm}^3$), crosta oceânica ($3,0 \text{ g/cm}^3$), crosta continental (embasamento; $2,67 \text{ g/cm}^3$), rochas vulcânicas (Formação Abrolhos; $3,0 \text{ g/cm}^3$) e rochas sedimentares ($2,1 - 2,2 \text{ g/cm}^3$). Com a utilização destes parâmetros, construiu-se o modelo inicial que melhor se aproximou das informações geológicas e geofísicas disponíveis. O efeito gravimétrico referente ao modelo foi calculado e então comparado com a anomalia gravimétrica observada, para a posterior execução de ajustes.

O método utilizado para a modelagem foi o de Talwani (Talwani *et al.*, 1959), que calcula o efeito gravimétrico vertical e horizontal de um corpo bidimensional de forma arbitrária, aproximando-a de um polígono de n lados. A acurácia do método aumenta quanto maior for o número de vértices do polígono que melhor represente o corpo a ser modelado.

A escolha do posicionamento dos perfis foi feita de forma que os principais compartimentos tectônicos e calhas sedimentares fossem amostrados (Figura 35).

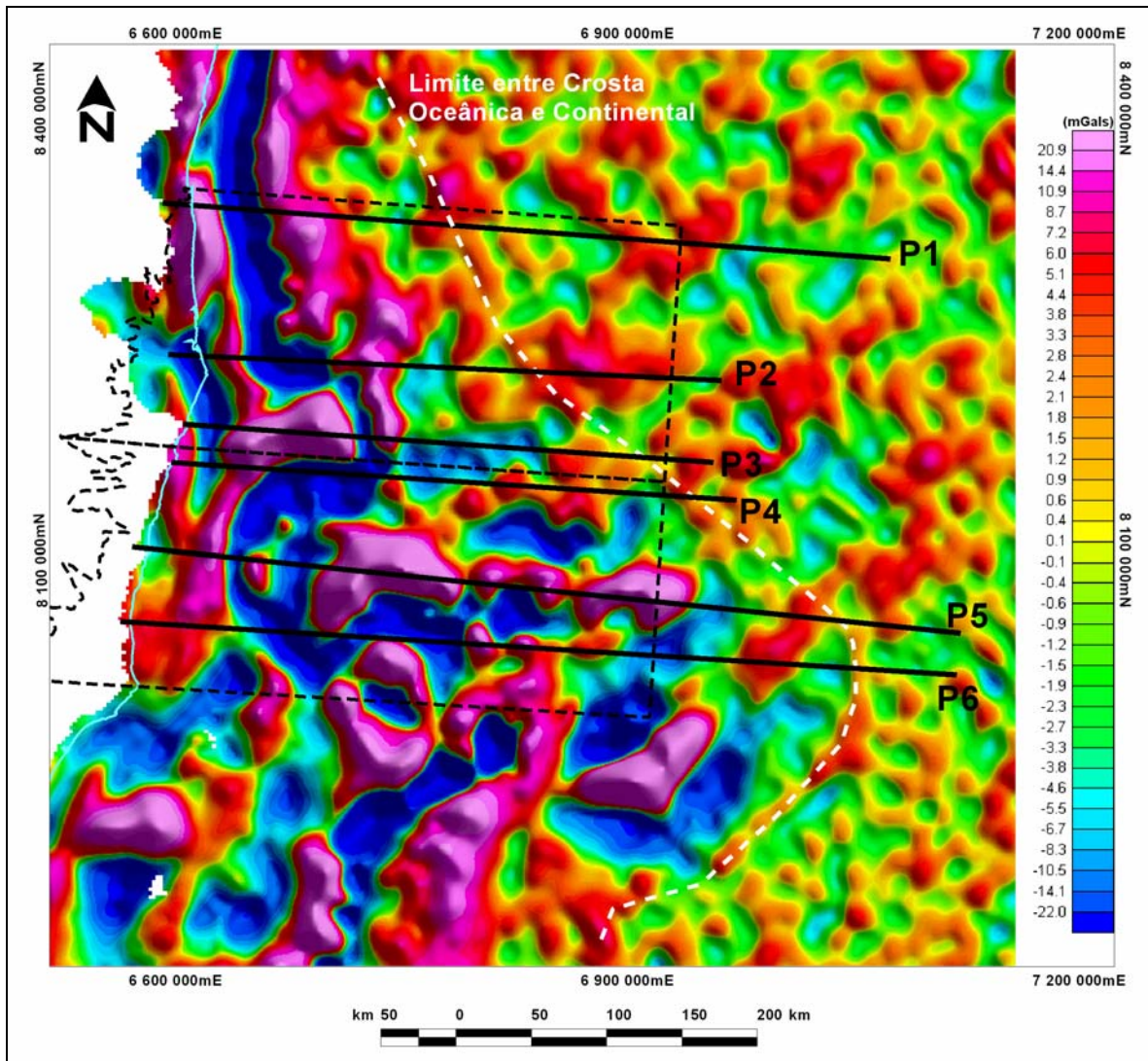


Figura 35 – Mapa de Anomalia Bouguer Filtrado Passa Banda 20 – 150 km (Policônica SAD69) incluindo a localização dos perfis gravimétricos modelados, P1 a P6. A linha preta tracejada representa a localização geográfica das bacias, a linha azul clara, a linha de costa; a linha branca tracejada, o limite entre a Crosta Continental e a Crosta Oceânica.

Todos os perfis modelados foram gerados a partir do Mapa de Anomalia Bouguer (Figura 25). Porém, foram *plotados* no mapa de Anomalia Bouguer Filtrado Passa Banda 20 – 150 km, somente para melhor visualização dos diferentes compartimentos de ambas as bacias (Figura 35).

O perfil **P1** (Figura 36), localizado na região norte da Bacia de Jequitinhonha, mostra uma calha sedimentar principal com cerca de 9.000 metros de profundidade e aproximadamente 16.000 metros de largura. Este baixo gravimétrico (1 mGal) é limitado a oeste por uma falha de borda acentuada (Exagero Vertical = 4), interpretada como a Linha de Charneira Principal, que divide a Plataforma Rasa dos demais compartimentos da bacia (Gaglione, 1987). Observa-se um alto do embasamento com uma sub-bacia associada a leste desta calha principal, com cerca de 2.200 metros de espessura sedimentar. O limite utilizado entre a crosta oceânica e a crosta continental, foi mapeado anteriormente pela gravimetria, mostrando um espessamento da crosta oceânica em suas proximidades. Este espessamento, segundo Karner (2000), é resultado da fusão de material astenosférico (através de descompressão), decorrentes das temperaturas relativamente quentes do manto, provavelmente induzido pela presença de plumas durante os estágios iniciais do espalhamento do assoalho oceânico.

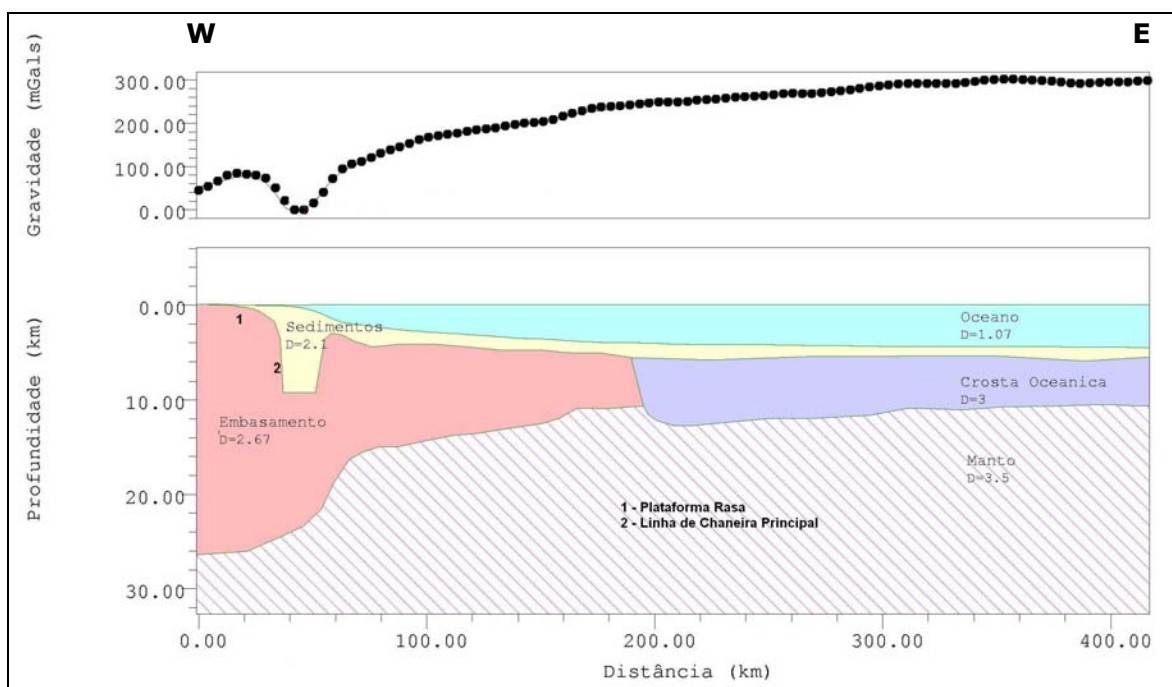


Figura 36 – Perfil P1, onde os símbolos (●) e (-) referem-se ao valor de gravidade observado e calculado, respectivamente. Exagero Vertical = 4.

O perfil **P2** (Figura 37), também localizado na Bacia de Jequitinhonha, mostra uma seqüência de linhas de charneira e baixos / altos gravimétricos individuais. São observados quatro compartimentos diferentes. Primeiramente, na porção oeste do perfil, tem-se uma rampa inclinada em direção ao depocentro da bacia com cerca de 1000 metros de profundidade. Tal rampa termina a leste com uma falha de borda que limita a Calha Secundária, que possui 3.500 metros de espessura sedimentar. Seguindo para leste, pode ser observado o *Horst* Central, evidenciado por um valor de gravidade observada de 52 mGals. Continuando em direção a leste, tem-se a Calha Rifte Principal, com cerca de 9.000 metros de profundidade e uma gravidade observada de 52 mGals. Logo a leste da Calha Principal, encontra-se um proeminente alto do embasamento que a limita na direção *offshore*. Uma outra sub-bacia está posicionada a leste deste alto do embasamento, com cerca de 5.000 metros de espessura sedimentar. A crosta oceânica também se mostra espessada próxima ao contato com a crosta continental.

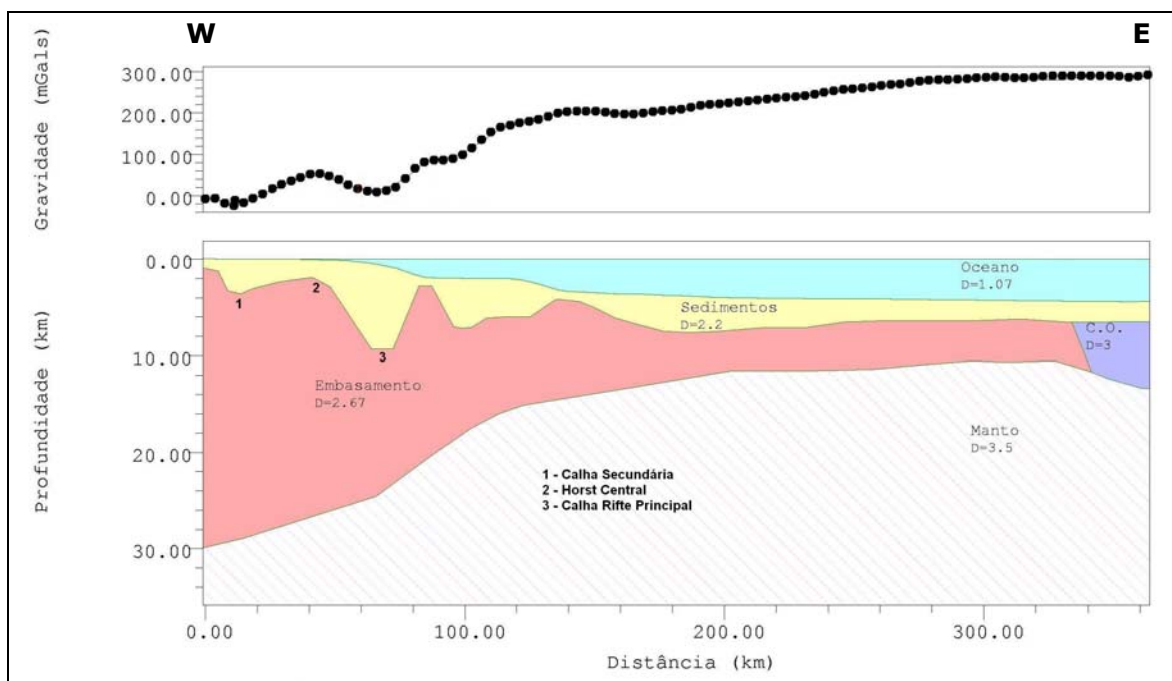


Figura 37 – Perfil P2, onde os símbolos (●) e (-) referem-se ao valor de gravidade observado e calculado, respectivamente. Exagero Vertical = 4.

Na porção sul da Bacia de Jequitinhonha, encontra-se ainda o perfil **P3** (Figura 38). Este perfil amostra a Calha Secundária, que possui cerca de 3.000 metros de profundidade. No limite leste deste baixo gravimétrico (13,5 mGals), está posicionado o Complexo Vulcânico de Royal Charlotte, com anomalias positivas de até 225 mGals, se estendendo por 70 quilômetros. Ao final da anomalia atribuída a este complexo vulcânico, encontra-se uma calha sedimentar profunda com 10.000 metros de espessura sedimentar e 14.000 metros de largura. Outro alto gravimétrico positivo (205 mGals) é observado a leste desta calha principal, associado também ao Complexo Vulcânico de Royal Charlotte. O manto e o embasamento situados abaixo deste complexo vulcânico encontram-se afinados e formam um *horst*. No Mapa Bouguer Filtrado Passa Banda 20 – 150 km (Figura 35), pode ser observado um baixo gravimétrico alongado (em torno de 190 mGals) na direção leste – oeste, possuindo em média 2.500 metros de espessura sedimentar. A crosta oceânica se mostra espessada no contato com a crosta continental, a exemplo das modelagens feitas anteriormente.

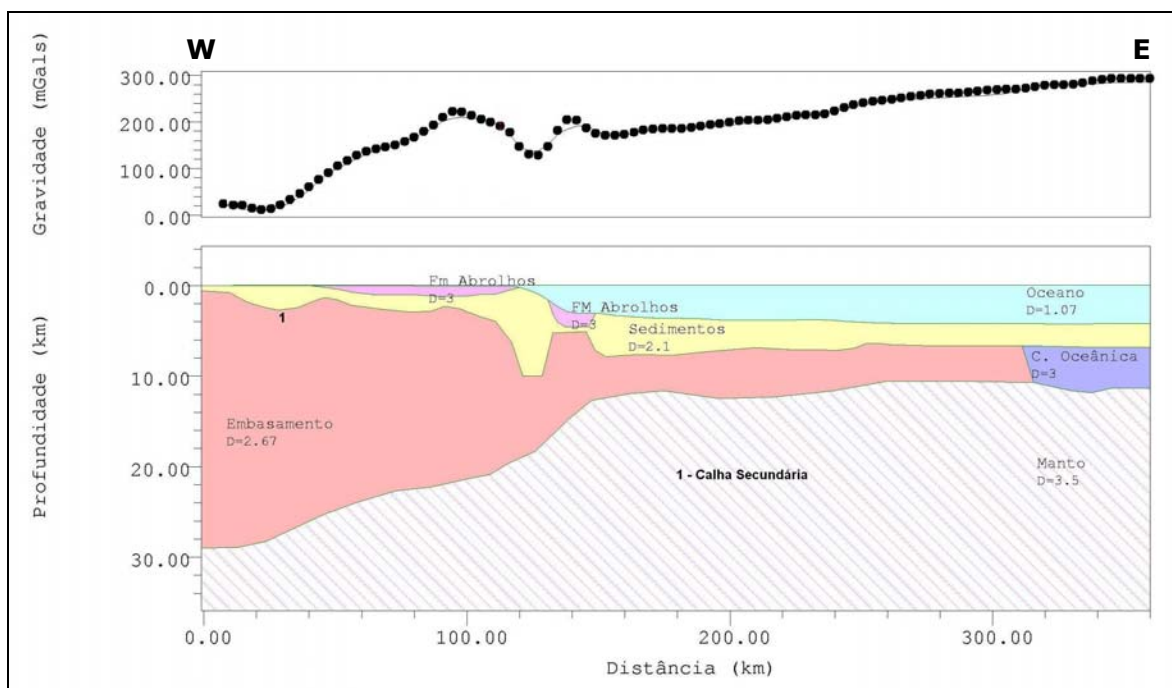


Figura 38 – Perfil P3, onde os símbolos (●) e (-) referem-se ao valor de gravidade observado e calculado, respectivamente. Exagero Vertical = 4.

O perfil **P4** (Figura 39), localizado na porção norte da Bacia de Cumuruxatiba, evidencia, na sua parte oeste, a Calha Secundária que se desenvolve desde a Bacia de Jequitinhonha. Tal calha apresenta, através da modelagem gravimétrica, cerca de 2.000 até 3.800 metros de profundidade e 20 mGals de valor de gravidade. A leste, tem-se um alto do embasamento, próximo ao Complexo Vulcânico de Royal Charlotte, seguido por um *gráben* com cerca de 5.000 metros de espessura sedimentar. Os dados gravimétricos evidenciam ainda outra calha sedimentar a leste, com 10.000 metros de espessura por 15.000 metros de largura, limitada a oeste e a leste por falhas de borda acentuadas. Um alto gravimétrico (Formação Abrolhos), com 170 mGals de valor de gravidade, limita uma sub-bacia suave a leste, também identificada no perfil P3, possuindo 3.000 metros de espessura sedimentar em seu depocentro. Encontra-se levemente espessada a crosta oceânica no contato com a crosta continental.

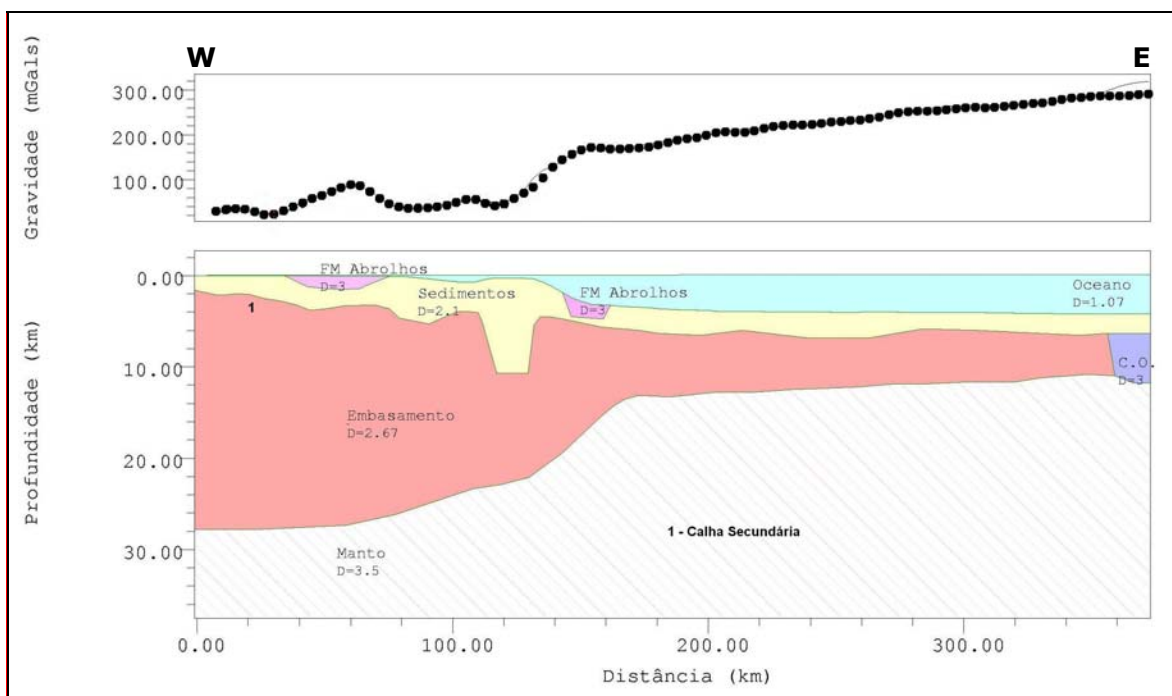


Figura 39 – Perfil P4, onde os símbolos (●) e (-) referem-se ao valor de gravidade observado e calculado, respectivamente. Exagero Vertical = 4.

O perfil **P5** (Figura 40) está localizado na porção central da Bacia de Cumuruxatiba e sobre o Complexo Vulcânico de Sulphur Minerva. De acordo com os dados gravimétricos, uma rampa inclinada em direção ao depocentro da bacia culmina em um alto do embasamento. Este compartimento é delimitado a oeste por este *horst*, apresentando cerca de 3.000 metros de espessura sedimentar. A borda leste deste *horst* parece estar associada com a Linha de Charneira Cretácea Superior, descrita por Gontijo (1996). A leste de tal falha de borda, tem-se uma sub-bacia com cerca de 4.500 metros de espessura sedimentar e 20.000 metros de largura. A crosta continental parece estar bastante afinada na região de águas profundas e ultraprofundas; a crosta oceânica está levemente espessada no contato entre elas. Uma seqüência de altos gravimétricos proeminentes foi atribuída às rochas vulcânicas da Formação Abrolhos.

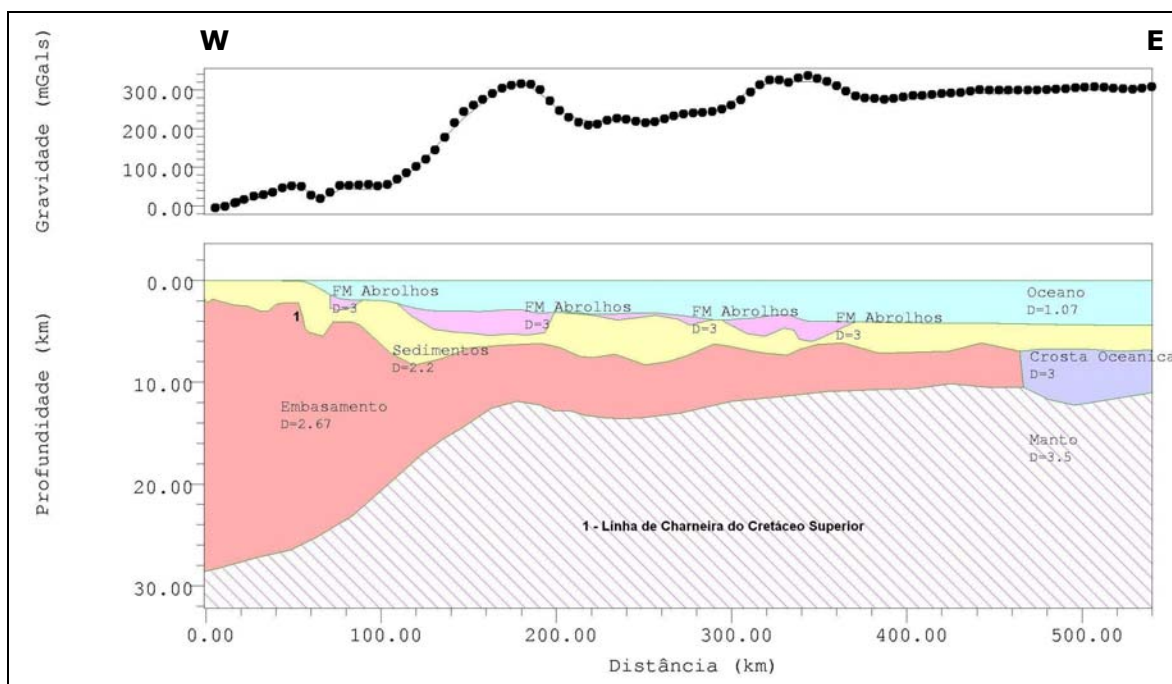


Figura 40 – Perfil P5, onde os símbolos (●) e (-) referem-se ao valor de gravidade observado e calculado, respectivamente. Exagero Vertical = 5.

O perfil **P6** (Figura 41) é influenciado por picos anômalos positivos referentes aos complexos vulcânicos de Sulphur Minerva e Abrolhos, em contraste com as rochas

sedimentares adjacentes. Pode-se notar um desnível gradual do embasamento na parte proximal da bacia, que culmina em uma sub-bacia com cerca de 4.000 metros de espessura seguida de um alto do embasamento a leste. O limite leste deste *horst* é coincidente com a linha de Charneira do Cretáceo Superior, que limita os compartimentos com maiores espessuras sedimentares (Gontijo, 1996). A calha sedimentar que se segue possui cerca de 7.000 metros de espessura sedimentar e 15.000 metros de largura. A partir deste baixo gravimétrico principal, em direção a leste, existem quatro ocorrências da Formação Abrolhos, enquanto que a bacia se mantém com uma espessura sedimentar constante e em torno de 3.000 metros. No contato entre as crostas continental e oceânica, esta última se mostra espessada.

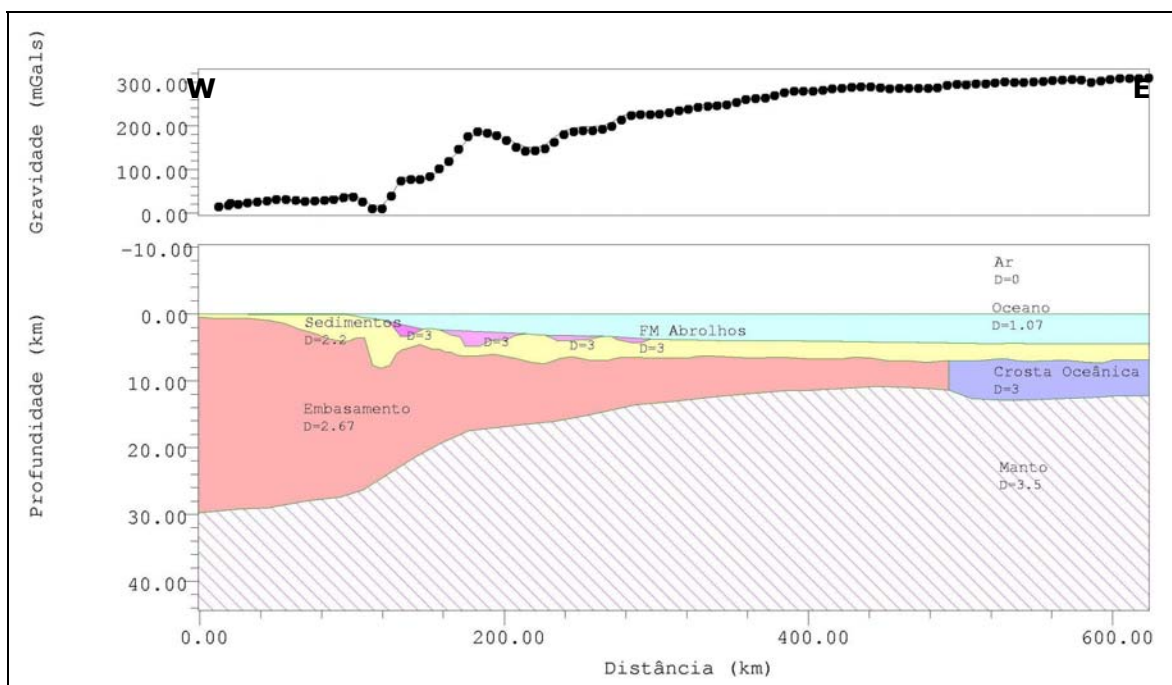


Figura 41 – Perfil **P6**, onde os símbolos (●) e (-) referem-se ao valor de gravidade observado e calculado, respectivamente. Exagero Vertical = 4.

5.2. Sensoriamento Remoto

5.2.1. Processamento Digital de Imagens RADARSAT-1 Visando a Detecção de Óleo no Mar

A primeira etapa do processamento digital realizado nas seis imagens RADARSAT-1 analisadas neste trabalho é denominada Pré-processamento. Este procedimento consiste na transformação de dados digitais brutos em dados corrigidos geometricamente e radiometricamente.

As imagens produzidas por sensores remotos orbitais apresentam uma série de distorções espaciais, o que acarreta em uma imprecisão cartográfica quanto ao posicionamento de objetos, superfícies ou feições nelas representadas. Estas distorções podem ser ocasionadas por diversos fatores: a perspectiva de aquisição do dado, a movimentação do sistema imageador, a altitude, atitude e velocidade da plataforma, o relevo do terreno e a curvatura e rotação da Terra.

A correção geométrica ou georreferenciamento refere-se à transformação geométrica que relaciona coordenadas na imagem (linhas e colunas) com coordenadas de um sistema de referência. Assim, os *pixels* em uma imagem georreferenciada correspondem à unidade de projeção cartográfica escolhida. A projeção cartográfica é a maneira de se representar a superfície curva da Terra sobre uma folha plana de papel (mapa). Existem diferentes tipos de projeção cartográfica, onde cada um deles representa uma tentativa de preservar alguma propriedade da área mapeada, como a representação uniforme de áreas, formas ou distâncias.

Para o georreferenciamento das imagens utilizadas neste trabalho, foram empregados os dados referentes à órbita do satélite (efemérides). A correção geométrica apoiada nos parâmetros espaciais dos arquivos descritores da imagem (dados de posicionamento e efemérides do satélite), em regiões oceânicas, onde não existe a influência do relevo, pode chegar a 100 metros de erro posicional, conseguindo minimizar as distorções espaciais

presentes na imagem em seu estado bruto. Este procedimento leva em consideração uma prévia transformação do dado de *slant* para *ground range* (Seção 3.1.5), que representa a distância horizontal verdadeira ao longo do terreno imageado. As imagens ScanSAR Narrow e ScanSAR Wide, em órbita descendente, tiveram de ser invertidas na direção Leste-Oeste para que o posicionamento geográfico se conservasse correto.

As distorções radiométricas causadas pela antena são inerentes à natureza do radar de abertura sintética, podendo produzir uma iluminação não uniforme na direção do alcance (*range*). O feixe de radar é dependente do desenho da antena, e, numa seção perpendicular à direção de deslocamento da plataforma, se apresenta geralmente na forma de lóbulo. O resultado deste feixe com forma de lóbulo é uma imagem com intensidades mais claras no alcance próximo (*near range*). Tipicamente, os *pixels* nesta área são mais claros que os *pixels* que estão no alcance distante (*far range*) e é necessário corrigir esta distorção para que seja possível fazer uma boa análise radiométrica da imagem. Este efeito também ocorre através das variações de baixa frequência no brilho das imagens na direção *range*, que são causadas principalmente pela perda de potência relacionada com a geometria de visada lateral, aliada à distância entre a antena e um dado ponto no terreno. A correção deste efeito, conhecida como Correção do Padrão de Antena, visa criar uma imagem que possua uma média radiometricamente uniforme de níveis de cinza na direção *range*. Este método baseia-se na função polinomial de mínimos quadrados para estimar o nível de cinza médio em cada posição da imagem original. Usando esta função polinomial, pode ser definida uma correção de suavização. Isso leva em conta e preserva a variação que é resultante das feições presentes em cada uma das colunas da imagem.

Outra correção radiométrica realizada nas cenas usadas no presente trabalho foi a remoção do ruído *speckle*. O *speckle* presente na maioria das imagens de radar é causado pelos pulsos de radar refletidos por alvos individuais num mesmo *pixel*, que somam-se aleatoriamente quando estão em fase ou reduzem o sinal de retorno destrutivamente quando estão fora de fase. A imagem resultante ganha um comportamento ruidoso, tornando difícil a interpretação, conhecido como efeito *salt and pepper*. Pacotes comerciais para processamento de imagens de radar provêm aos analistas de imagens vários filtros

específicos projetados para reduzir o *speckle*, a fim de tornar os dados mais fáceis de interpretar. A filtragem altera os valores dos *pixels* com base nos valores de nível de cinza dos *pixels* adjacentes. Para tal, utiliza uma matriz quadrada ímpar, que varre toda a imagem (geralmente de 3 por 3 até 11 por 11) e insere o valor calculado pelo algoritmo para os *pixels* desta matriz na célula central da mesma. O filtro Frost foi utilizado para a remoção do ruído nas imagens trabalhadas. Este filtro suaviza a imagem sem remover bordas. Usa um algoritmo de filtragem adaptativa conhecido comumente por filtro Frost realçado, que é um filtro de convolução exponencial que se adapta às feições ao utilizar estatísticas locais. O filtro calcula um conjunto de valores de peso para cada pixel da janela de filtragem ao redor de cada pixel trabalhado. O filtro Frost tem por finalidade dividir a imagem em áreas de três classes. A primeira classe corresponde a áreas homogêneas nas quais o *speckle* pode ser eliminado pela aplicação de um filtro passa-baixa. A segunda classe corresponde a áreas heterogêneas nas quais o *speckle* deve ser reduzido e a textura preservada. E a terceira classe são áreas que contêm alvos isolados, cujos valores observados deveriam ser preservados pelo filtro.

Após o Pré-processamento, inicia-se a etapa onde o intérprete irá aplicar ao dado SAR realces que lhe proporcionem um melhor conforto na interpretação das imagens visando a identificação das manchas de óleo na superfície do mar. Este procedimento é chamado de Processamento.

Os modos de operação das imagens RADARSAT-1 aqui processadas caracterizam-se pela resolução radiométrica de 16 bits (modo de operação Wide 1) e 8 bits (modos de operação ScanSAR Narrow e ScanSAR Wide), o que quer dizer que possuem 65.536 e 256 possíveis níveis de cinza, respectivamente. Mas, na prática, dificilmente as informações contidas na imagem abrangem todo o intervalo possível de nível de cinza, concentrando-se na maioria das vezes em uma pequena faixa. O principal motivo é que os sistemas sensores são concebidos para registrar toda a gama possível de valores de energia eletromagnética, originada por todos os tipos de materiais. É raro um local na superfície da Terra onde sinais extremos de retorno se apresentem ao mesmo tempo. Com isso, a distribuição dos níveis de cinza de quase todas as imagens fica comprimida em uma porção relativamente reduzida do

intervalo dinâmico. A técnica usada para realçar os dados SAR foi o aumento de contraste (*contrast stretch*), onde o histograma comprimido foi expandido para ocupar todo o intervalo disponível (Figura 42). Este procedimento envolve a identificação dos limites mínimo e máximo a partir do histograma e a aplicação de uma função linear.

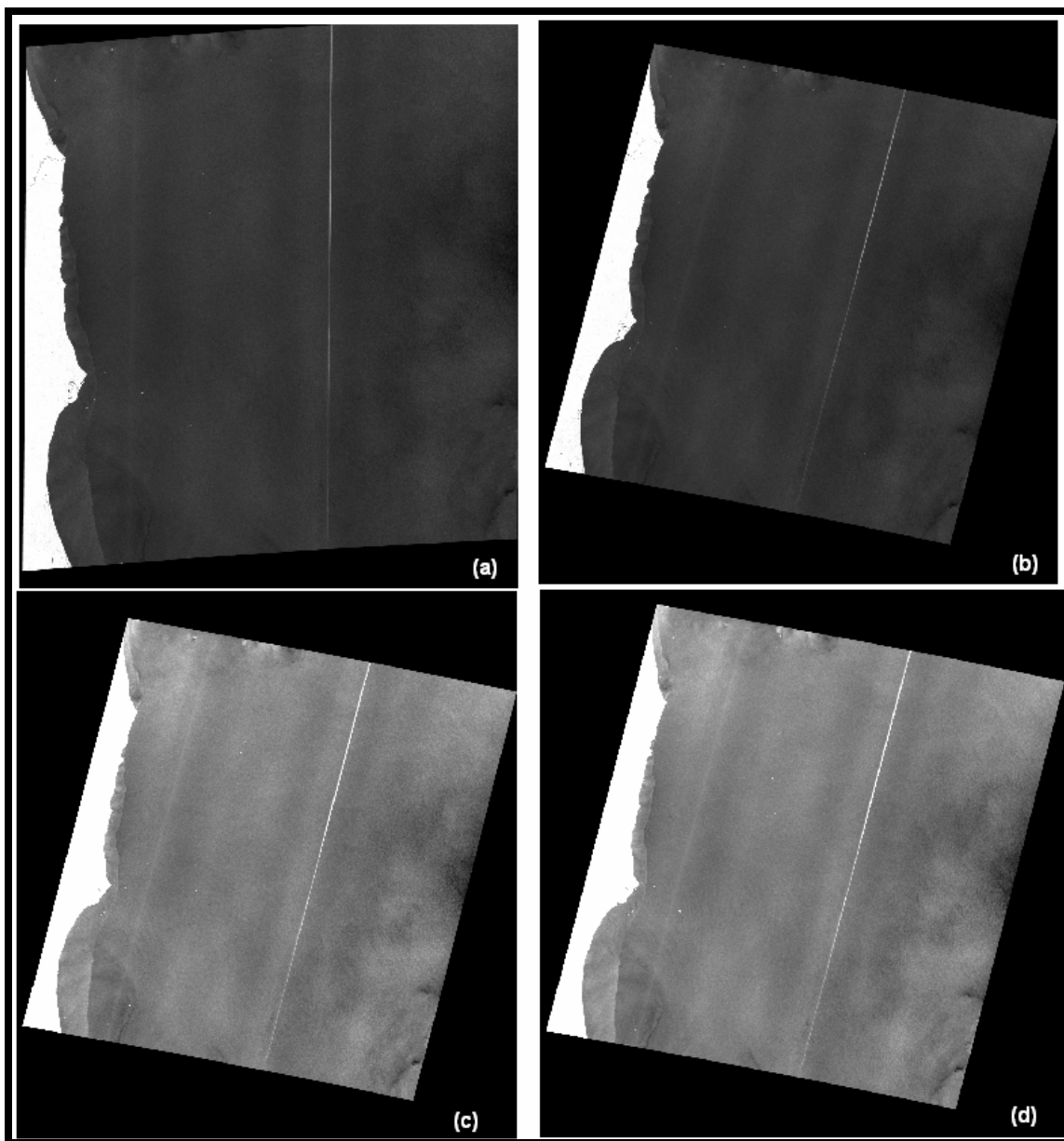


Figura 42 – Imagem ScanSAR Wide de 15 de Julho de 1997. Etapas do processamento digital: (a) imagem em estado bruto, (b) imagem georreferenciada, (c) aumento de contraste e (d) filtro Frost aplicado. A feição linear branca paralela à direção de azimute é um artefato que caracteriza as imagens ScanSAR Wide e Narrow.

A partir desta etapa, as imagens SAR selecionadas são visualmente interpretadas, buscando-se regiões contendo manchas de óleo para recorte, minimizando tempo de processamento. Uma vez interpretadas e recortadas as áreas de interesse, estes dados são classificados utilizando o Classificador Textural por Semivariograma Não-supervisionado (USTC) (Miranda 1998a, 1998b, 1998c). É um classificador determinístico, que possibilita a identificação de feições possivelmente associadas a manchas de óleo na superfície do mar, levando em consideração tanto informações texturais quanto radiométricas. A informação radiométrica é dada pelo valor do nível de cinza, enquanto que a informação textural é descrita pela forma e pelo valor da função circular semivariograma, que possui a seguinte expressão:

$$\gamma(x_0, h) = (1/2n) \sum_{\theta=0}^{2\pi} (DN(x_0 + r) - \mu_h(x_0)), \text{ onde:}$$

$\gamma(x_0, h)$ é a função semivariograma para o *pixel* x_0 , a uma distância radial (*lag*) de h *pixels*; $DN(x_0 + r)$ é o valor do nível de cinza na distância radial (*lag*) de h *pixels* a partir de x_0 (raio h , ângulo θ); $\mu_h(x_0)$ é o valor médio de uma vizinhança circular de raio H , centro x_0 ; H é a distância radial (*lag*) máxima (em *pixels*) adequada para descrever texturalmente o dado; n é o número de *pixels* vizinhos na distância radial (*lag*) h .

A informação textural é também descrita pela variância (σ^2) do nível de cinza em uma vizinhança circular de raio H em torno do *pixel* [$\sigma^2_H(x_0)$]. A variância do nível de cinza é incluída no procedimento de classificação porque reflete o valor da função semivariograma para uma distância *lag* muito grande (maior que H). Para um *pixel* x_0 localizado em uma imagem RADARSAT-1, o vetor $Z(x_0)$, de dimensão $H + 2$, tem a seguinte forma:

$$Z(x_0) = [DN(x_0), \gamma(x_0,1), \gamma(x_0,2), \dots, \gamma(x_0,H), \sigma^2_H(x_0)]$$

A classificação é executada baseada em todos os componentes do vetor de dimensão $H + 2$, calculado para cada posição de *pixel*. O algoritmo USTC utiliza para classificação um método não-supervisionado conhecido como ISODATA que executa uma aglomeração (*clustering*). O resultado obtido após a classificação não-supervisionada é reunido através de uma agregação interativa de classes que possuam o mesmo significado temático. Neste estudo, duas classes foram individualizadas, no intuito de discriminar regiões da superfície do oceano que possuam textura lisa (possíveis manchas de óleo) de texturas intermediárias e rugosas (*background* oceânico). As áreas lisas, relacionadas com possíveis exsudações ou derramamentos de óleo, são automaticamente individualizadas como polígonos *raster* posteriormente submetidos a um processo de vetorização.

5.2.1.1. Resultados Obtidos

Foram analisadas seis imagens RADARSAT-1; em cinco delas, foram interpretadas trinta manchas de óleo, como descrito na Tabela 10. Seis manchas de óleo foram interpretadas como derramamento de óleo, com base no formato em que aparecem nas imagens SAR e na relação de proximidade com alvos possivelmente associados a refletores de canto (embarcações). A forma característica de um derramamento é alongada, mais ou menos linear e geograficamente posicionada próximo a alvos claros (refletores de canto) associados a possíveis fontes causadoras do derramamento (Figura 43). Esta forma descrita é dependente da dinâmica oceânica, podendo variar.

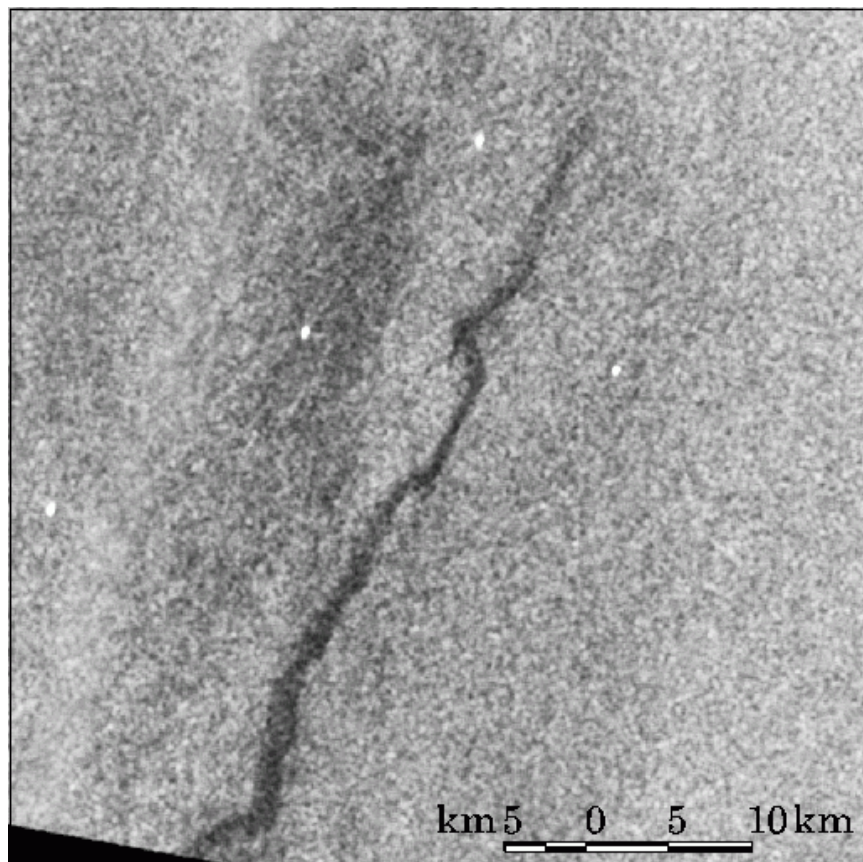


Figura 43 – Feição interpretada como derramamento de óleo na imagem ScanSAR Wide de 15 de Julho de 1997, circundada por alvos relacionados a possíveis fontes causadoras (pontos brancos representativos de pixels saturados), ou seja, embarcações (refletores de canto).

A imagem Wide 1 do dia 06 de Março de 1999 não continha candidatos. Efetivamente, dentro da área que compreende as bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha, foram identificadas neste estudo dezessete exsudações (Figura 44).

Tabela 9 – Resumo da classificação USTC das imagens RADARSAT-1

Data	ID- Polígono	Modo de Operação	Área (km²)	Perímetro (km)	Centróide*	Interpretação
27/10/1996	1	Wide 1	0,282	14,675	38° 43' 59" W/ 17° 07' 46"S	Exsudação
20/11/1996	2	Wide 1	2,739	67,017	38° 45' 03"W / 16° 27' 33"S	Exsudação
20/11/1996	3	Wide 1	5,526	110,714	38° 38' 34"W / 16° 33' 53"S	Exsudação
14/5/1997	4	ScanSAR Narrow 1	0,635	9,604	38° 33' 55"W / 13° 04' 58"S	Derramamento
14/5/1997	5	ScanSAR Narrow 1	9,289	106,663	37° 22' 11"W / 14° 48' 53"S	Exsudação
14/5/1997	6	ScanSAR Narrow 1	6,985	55,102	36° 58' 17"W / 15° 08' 31"S	Exsudação
14/5/1997	7	ScanSAR Narrow 1	11,402	43,818	37° 06' 05"W / 15° 24' 28"S	Exsudação
14/5/1997	8	ScanSAR Narrow 1	0,175	4,562	37° 00' 06"W / 15° 26' 37"S	Exsudação
14/5/1997	9	ScanSAR	0,084	4,202	37° 00'	Exsudação

		Narrow 1			39°W / 15° 34' 09"S	
14/5/1997	10	ScanSAR Narrow 1	5,267	78,872	37° 19' 51"W / 15° 28' 38"S	Exsudação
14/5/1997	11	ScanSAR Narrow 1	0,135	4,262	37° 21' 45"W / 15° 35' 21"S	Exsudação
14/5/1997	12	ScanSAR Narrow 1	0,322	7,803	37° 12' 11"W / 15° 44' 44"S	Exsudação
14/5/1997	13	ScanSAR Narrow 1	86,214	263,565	37° 10' 45"W / 15° 39' 45"S	Exsudação
14/5/1997	14	ScanSAR Narrow 1	0,601	17,887	37° 10' 03"W / 15° 50' 34"S	Exsudação
15/7/1997	15	ScanSAR Wide	0,256	3,721	37° 41' 52"W / 15° 45' 12"S	Derramament o
15/7/1997	16	ScanSAR Wide	0,119	1,801	38° 24' 39"W / 18° 22' 58"S	Derramament o
15/7/1997	17	ScanSAR Wide	0,821	12,005	36° 49' 16" W / 15° 19' 32" S	Derramament o
15/7/1997	18	ScanSAR Wide	3,019	43,577	38° 45' 44"W / 18° 37' 26"S	Derramament o
15/7/1997	19	ScanSAR	26,193	203,842	38° 02'	Derramament

		Wide			50°W / 19° 18' 54"S	o
15/7/1997	20**	ScanSAR Wide	0,241	2,401	38° 40' 12"W / 18° 01' 57"S	Exsudação
15/7/1997	21**	ScanSAR Wide	0,396	3,962	37° 26' 08"W / 18° 05' 50"S	Exsudação
15/7/1997	22**	ScanSAR Wide	0,317	5,762	38° 30' 07"W / 18° 09' 25"S	Exsudação
15/7/1997	23**	ScanSAR Wide	0,494	7,923	38° 16' 46"W / 18° 06' 32"S	Exsudação
15/7/1997	24**	ScanSAR Wide	1,517	16,567	38° 03' 03"W / 17° 54' 18"S	Exsudação
15/7/1997	25**	ScanSAR Wide	0,295	4,442	38° 42' 55"W / 18° 37' 41"S	Exsudação
15/7/1997	26**	ScanSAR Wide	2,980	32,053	37° 20' 36"W / 19° 06' 42"S	Exsudação
17/3/1999	27	Wide 1	0,628	7,387	38° 30' 45"W / 16° 08' 06"S	Exsudação
17/3/1999	28	Wide 1	0,692	13,602	37° 52' 51"W / 17° 03' 12"S	Exsudação
17/3/1999	29	Wide 1	0,693	10,201	38° 07'	Exsudação

					59"W / 17° 04' 54"S	
17/3/1999	30	Wide 1	0,963	19,875	38° 00' 06"W / 17° 25' 05"S	Exsudação

* O termo centróide refere-se às coordenadas (latitude e longitude) do centro de massa do polígono.

**Feição localizada fora da área de estudo, conforme apresentado na Figura 44.

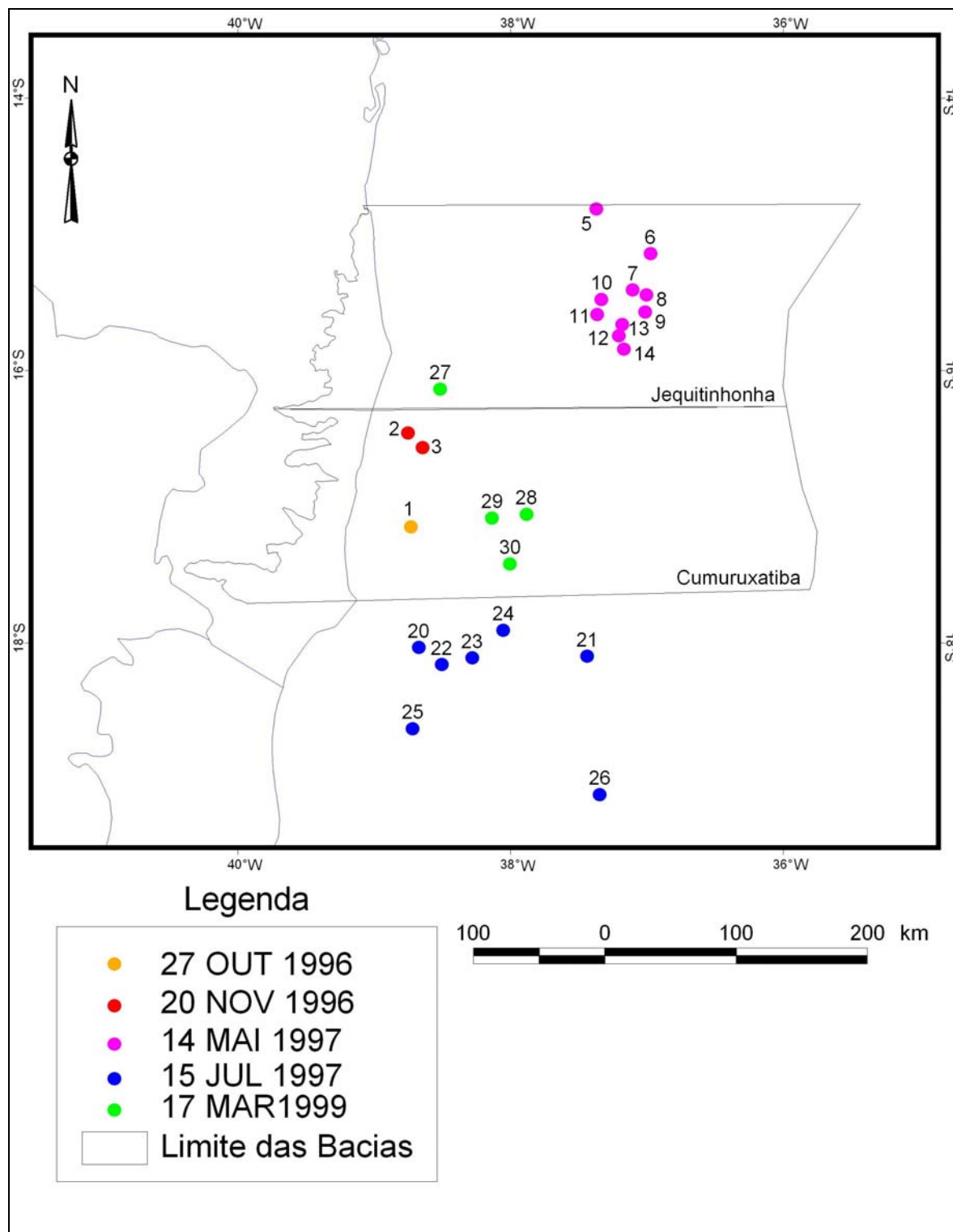


Figura 44 – Posição geográfica das vinte e quatro manchas de óleo interpretadas como exsudações e seus respectivos identificadores. No presente trabalho, somente serão consideradas as dezessete feicoes localizadas nas bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha.

Serão mostradas, a seguir (Figuras de 45 a 61), todas as exsudações de óleo identificadas nas imagens RADARSAT-1 da área de estudo, bem como sua respectiva classificação digital utilizando o algoritmo Unsupervised Semivariogram Textural Classifier – USTC (Seção 5.2.1).

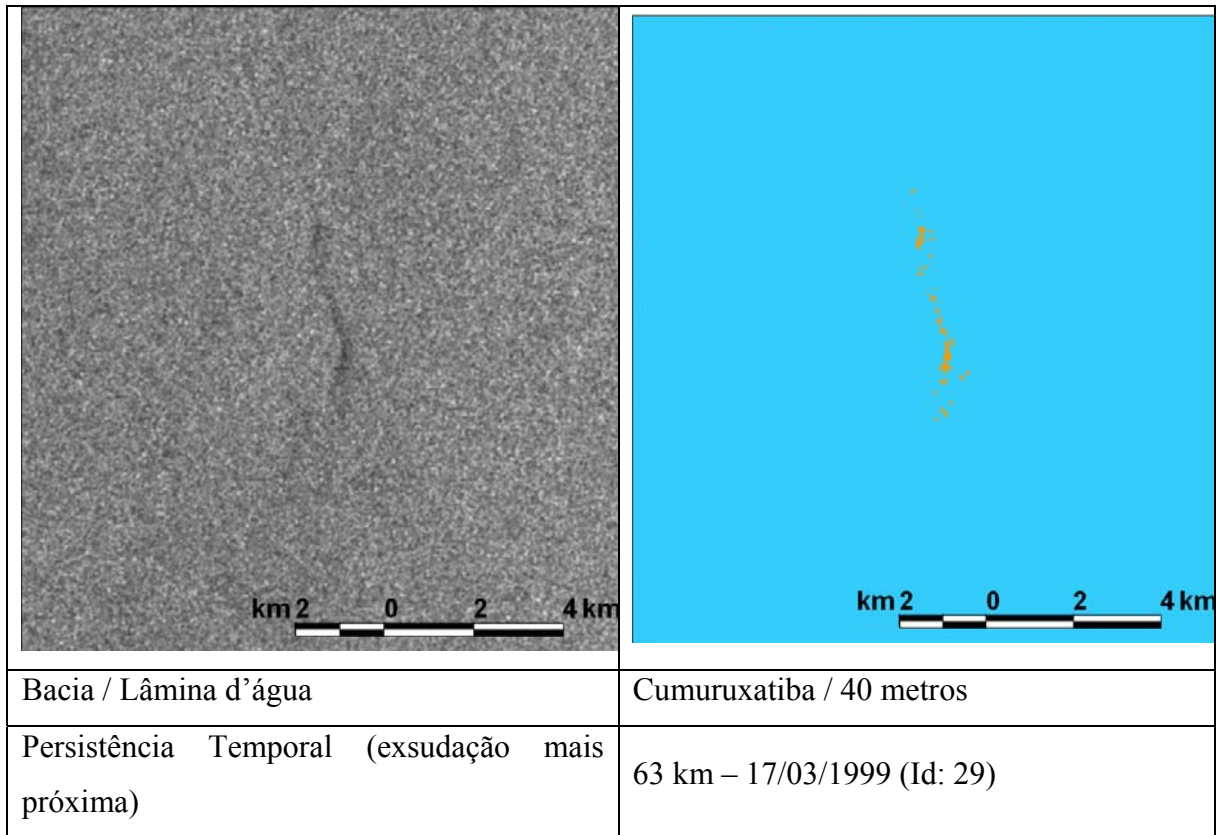


Figura 45 – Exsudação de óleo interpretada na imagem RADARSAT-1 W1 adquirida em 27/10/1996 (Identificador 01 na Tabela 9). O resultado da classificação USTC está apresentado à direita.

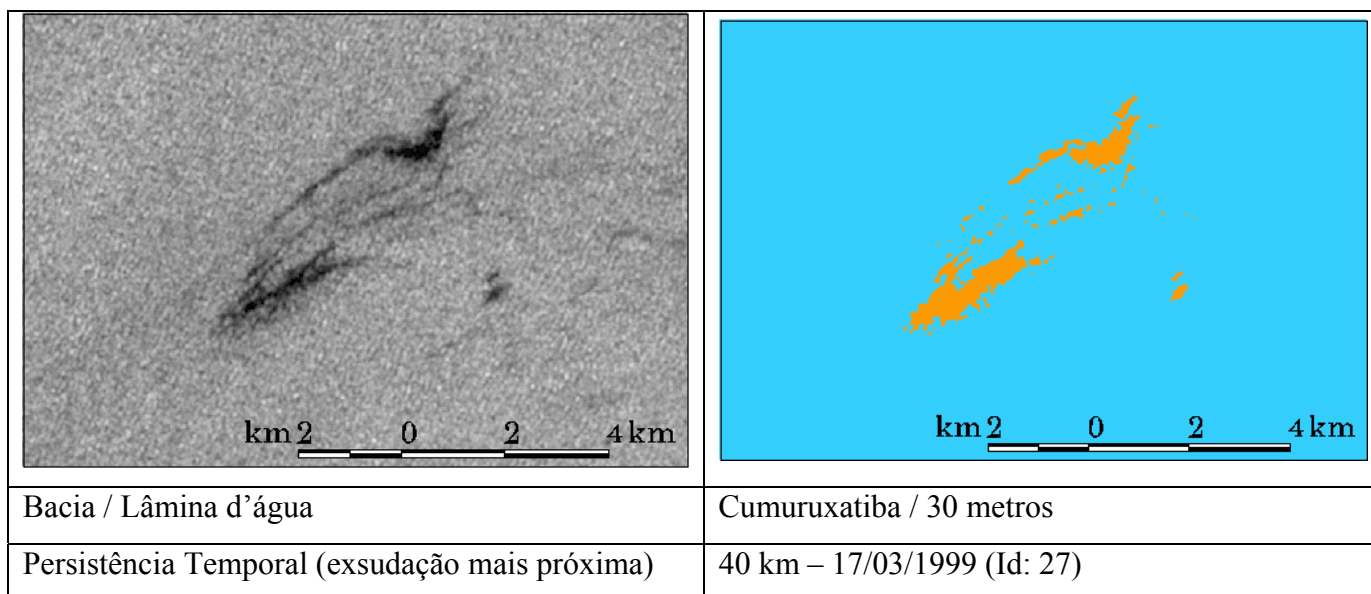


Figura 46 – Exsudação de óleo interpretada na imagem RADARSAT-1 W1 adquirida em 20/11/1996 (Identificador 02 na Tabela 9). O resultado da classificação USTC está apresentado à direita.

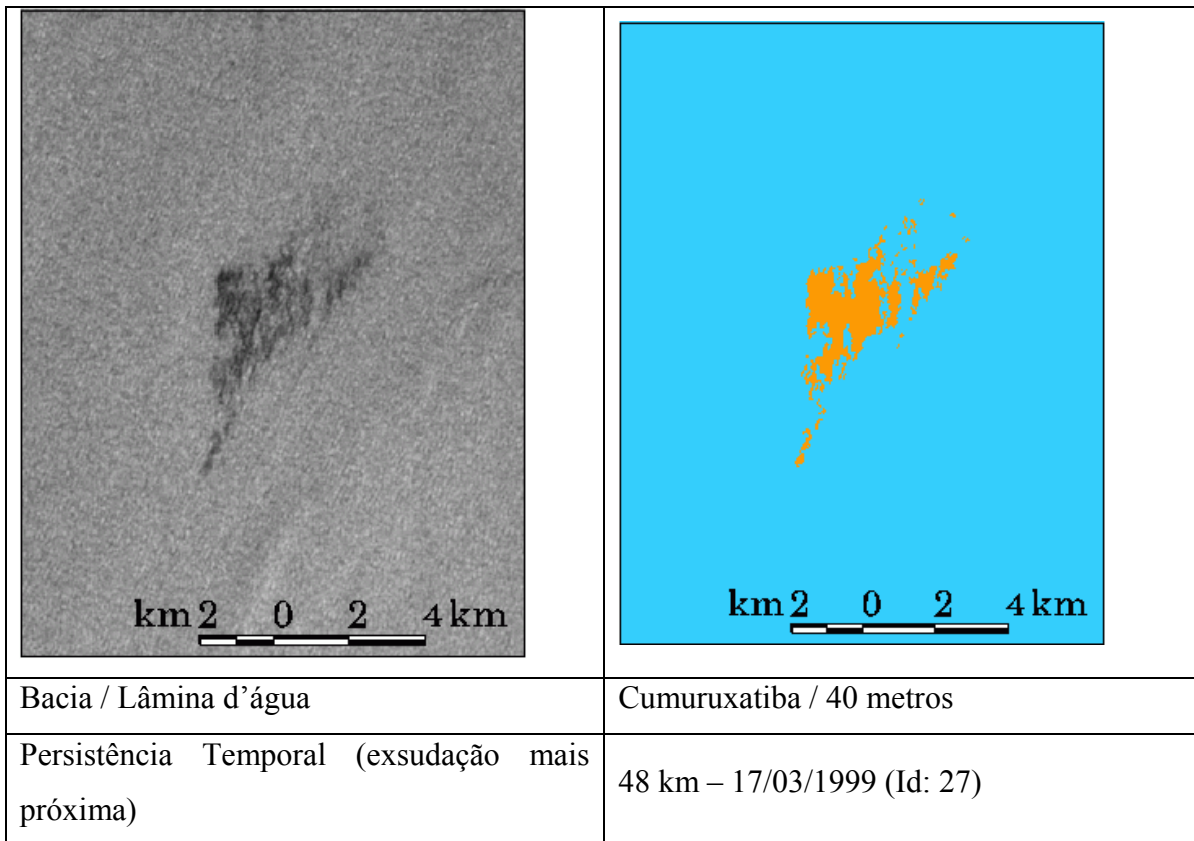


Figura 47 – Exsudação de óleo interpretada na imagem RADARSAT-1 W1 adquirida em 20/11/1996 (Identificador 03 na Tabela 9). O resultado da classificação USTC está apresentado à direita.

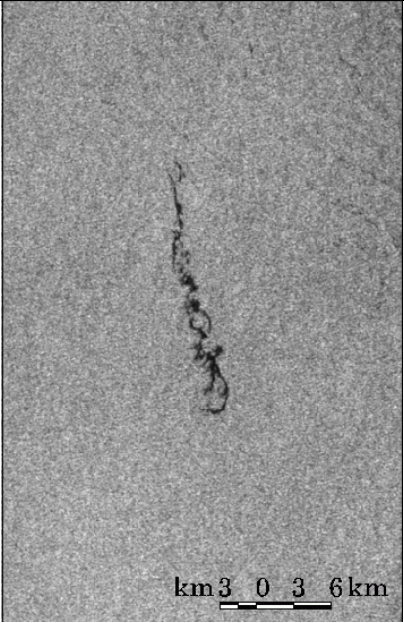

	
Bacia / Lâmina d'água	Jequitinhonha / 4000 metros
Persistência Temporal (exsudação mais próxima)	192 km – 17/03/1999 (Id: 27)

Figura 48 – Exsudação de óleo interpretada na imagem RADARSAT-1 SNAR adquirida em 14/05/1997 (Identificador 05 na Tabela 9). O resultado da classificação USTC está apresentado à direita.

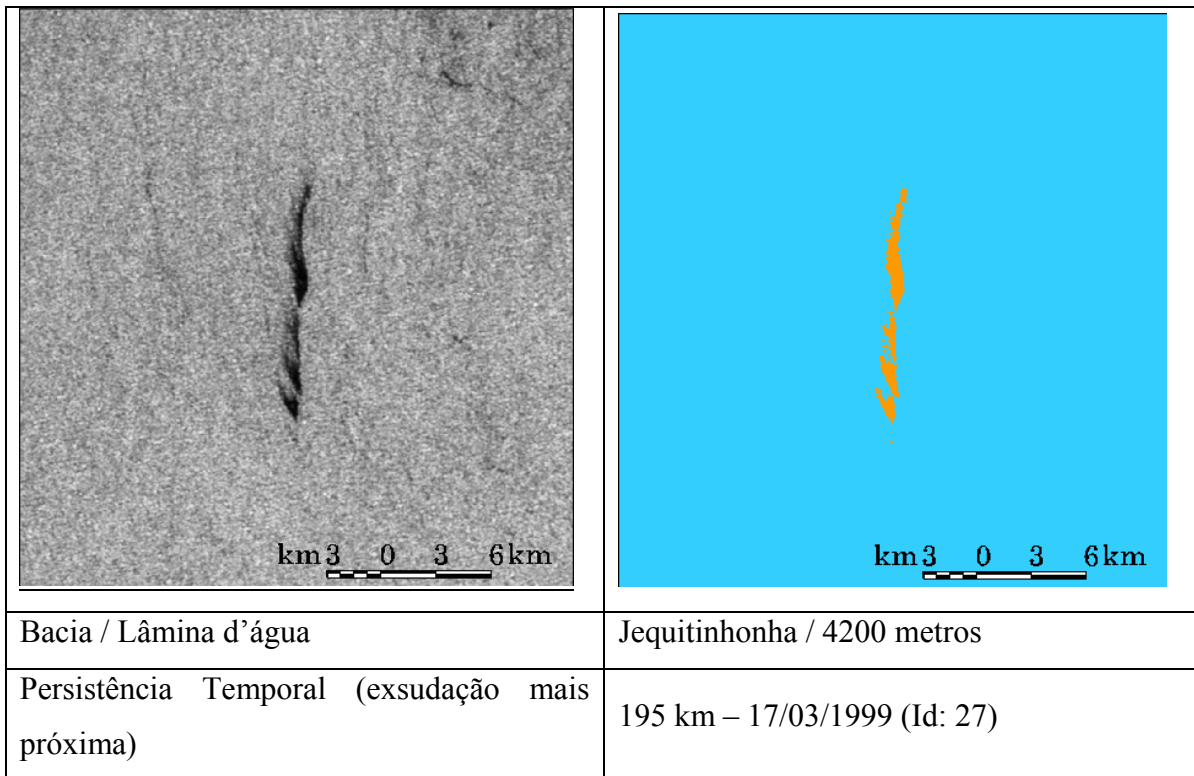


Figura 49 – Exsudação de óleo interpretada na imagem RADARSAT-1 SNAR adquirida em 14/05/1997 (Identificador 06 na Tabela 9). O resultado da classificação USTC está apresentado à direita.

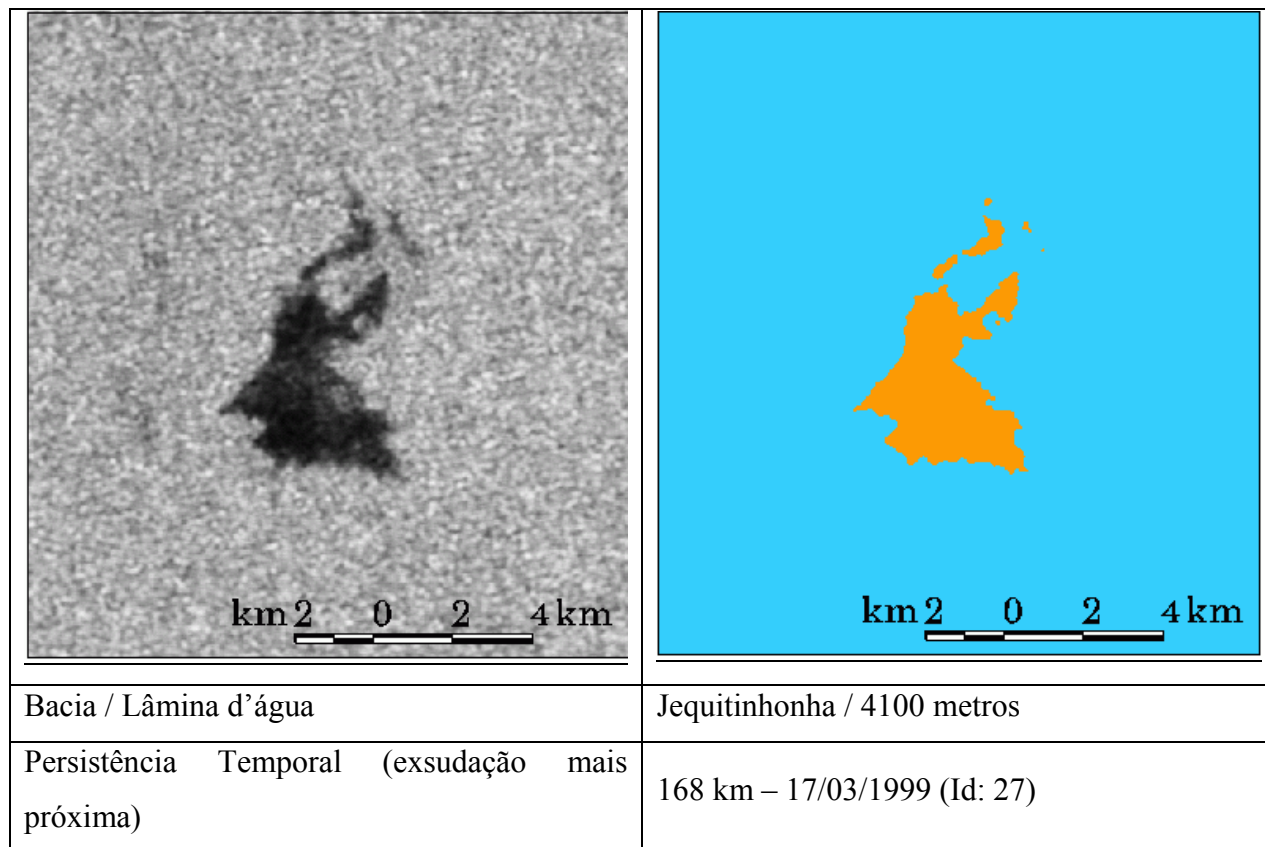


Figura 50 – Exsudação de óleo interpretada na imagem RADARSAT-1 SNAR adquirida em 14/05/1997 (Identificador 07 na Tabela 9). O resultado da classificação USTC está apresentado à direita.

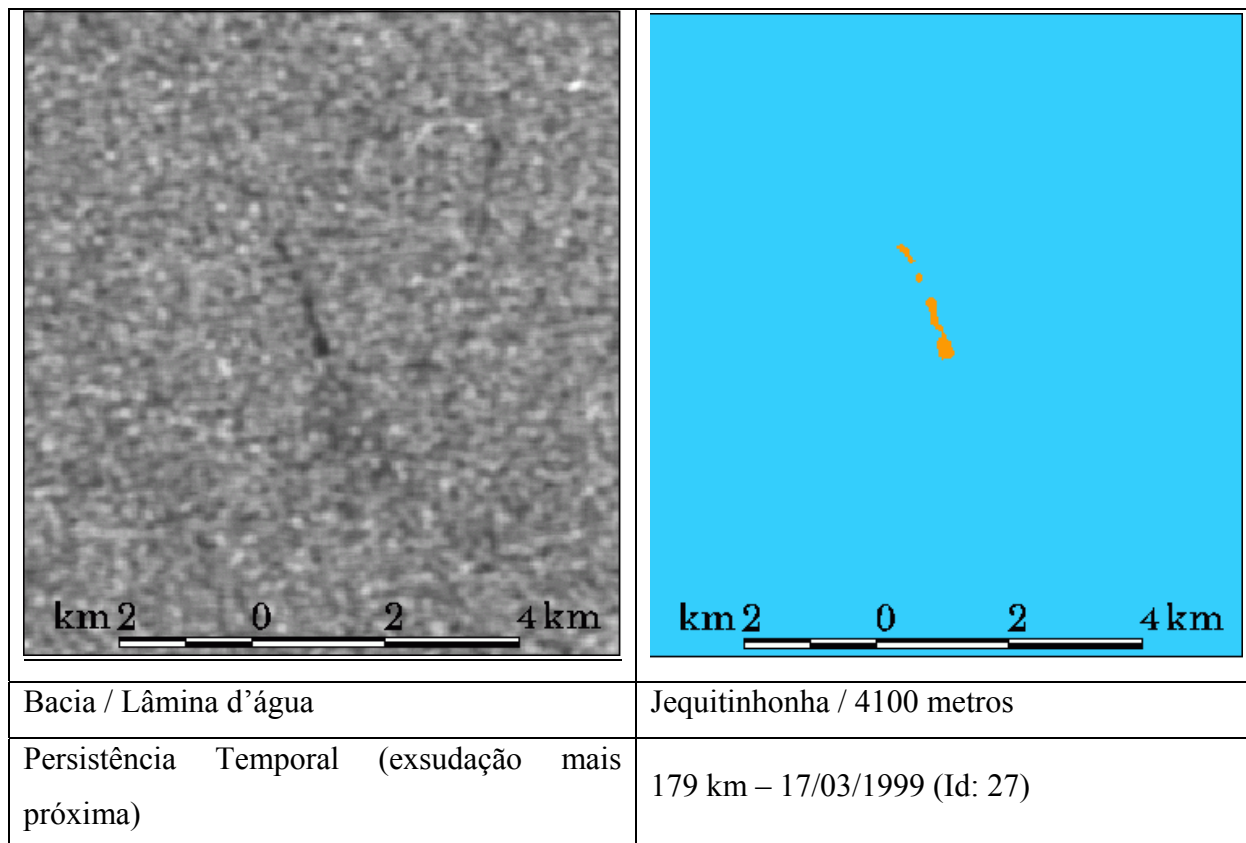


Figura 51 – Exsudação de óleo interpretada na imagem RADARSAT-1 SNAR adquirida em 14/05/1997 (Identificador 08 na Tabela 9). O resultado da classificação USTC está apresentado à direita.

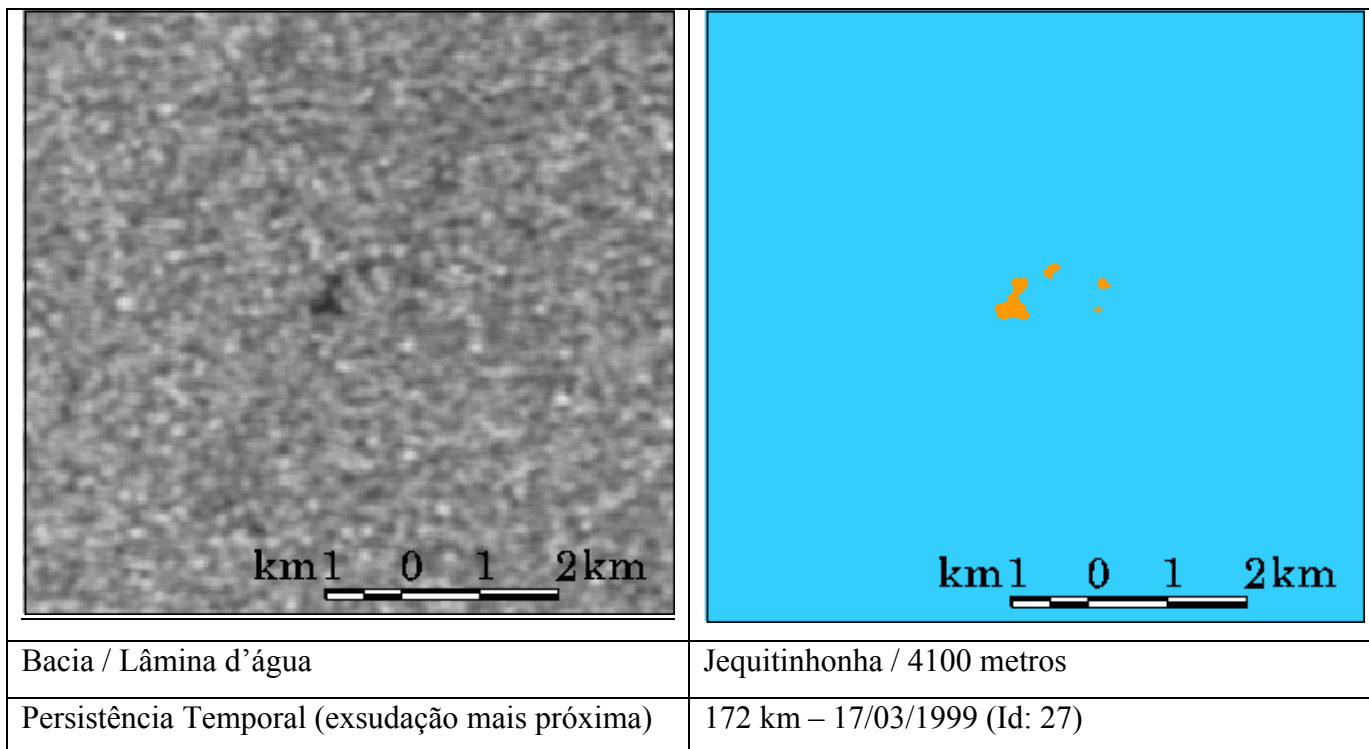


Figura 52 – Exsudação de óleo interpretada na imagem RADARSAT-1 SNAR adquirida em 14/05/1997 (Identificador 09 na Tabela 9). O resultado da classificação USTC está apresentado à direita.

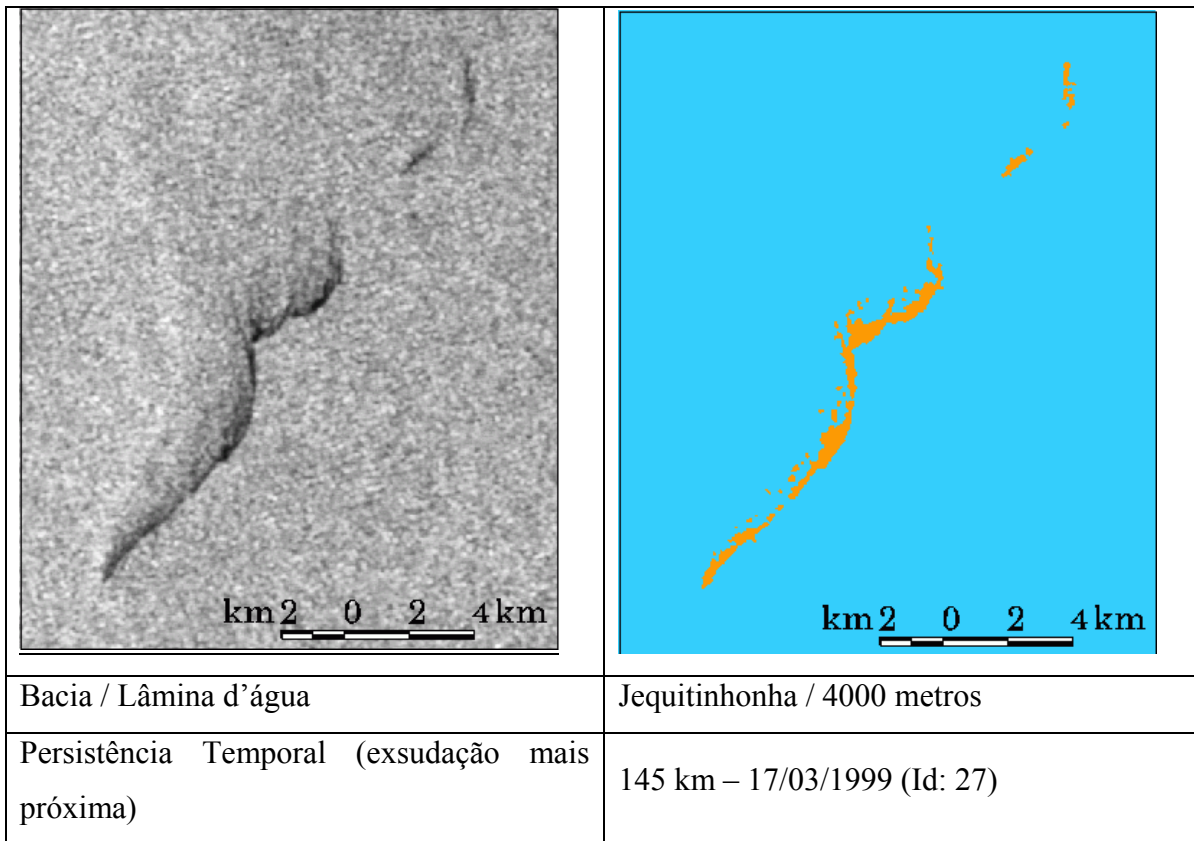


Figura 53 – Exsudação de óleo interpretada na imagem RADARSAT-1 SNAR adquirida em 14/05/1997 (Identificador 10 na Tabela 9). O resultado da classificação USTC está apresentado à direita.

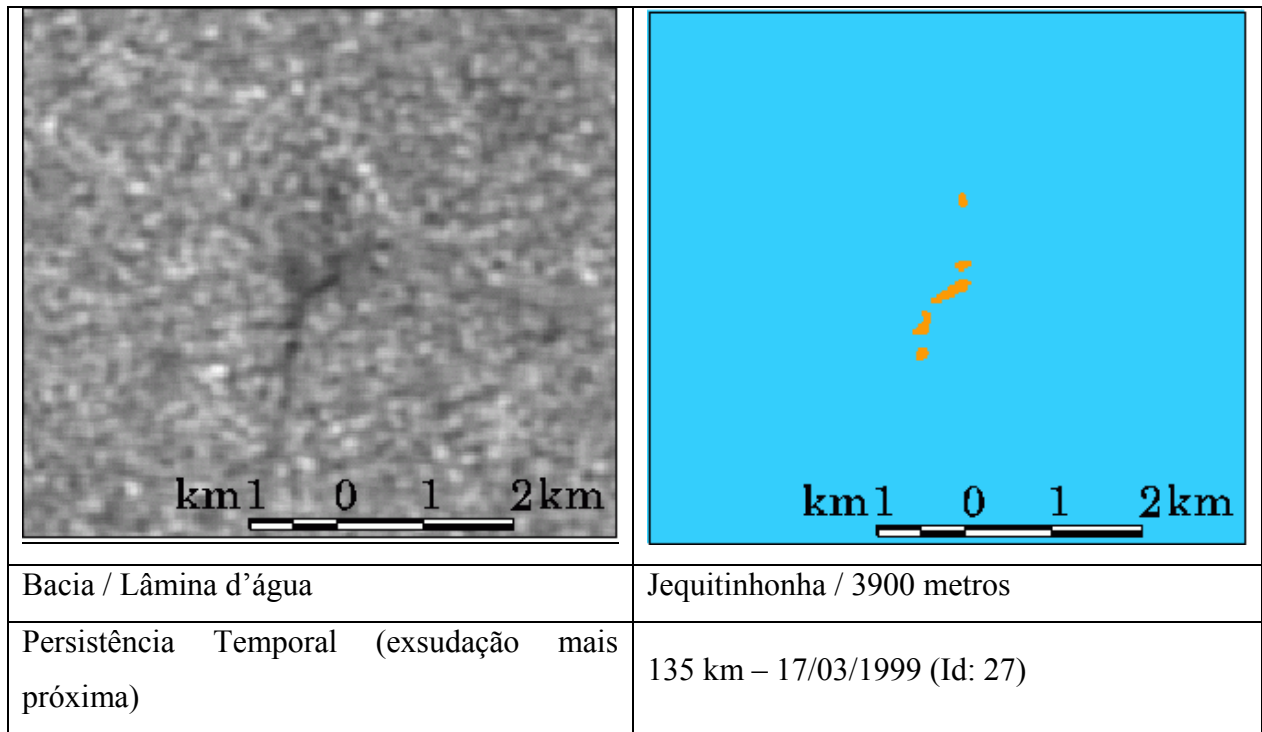


Figura 54 – Exsudação de óleo interpretada na imagem RADARSAT-1 SNAR adquirida em 14/05/1997 (Identificador 11 na Tabela 9). O resultado da classificação USTC está apresentado à direita.

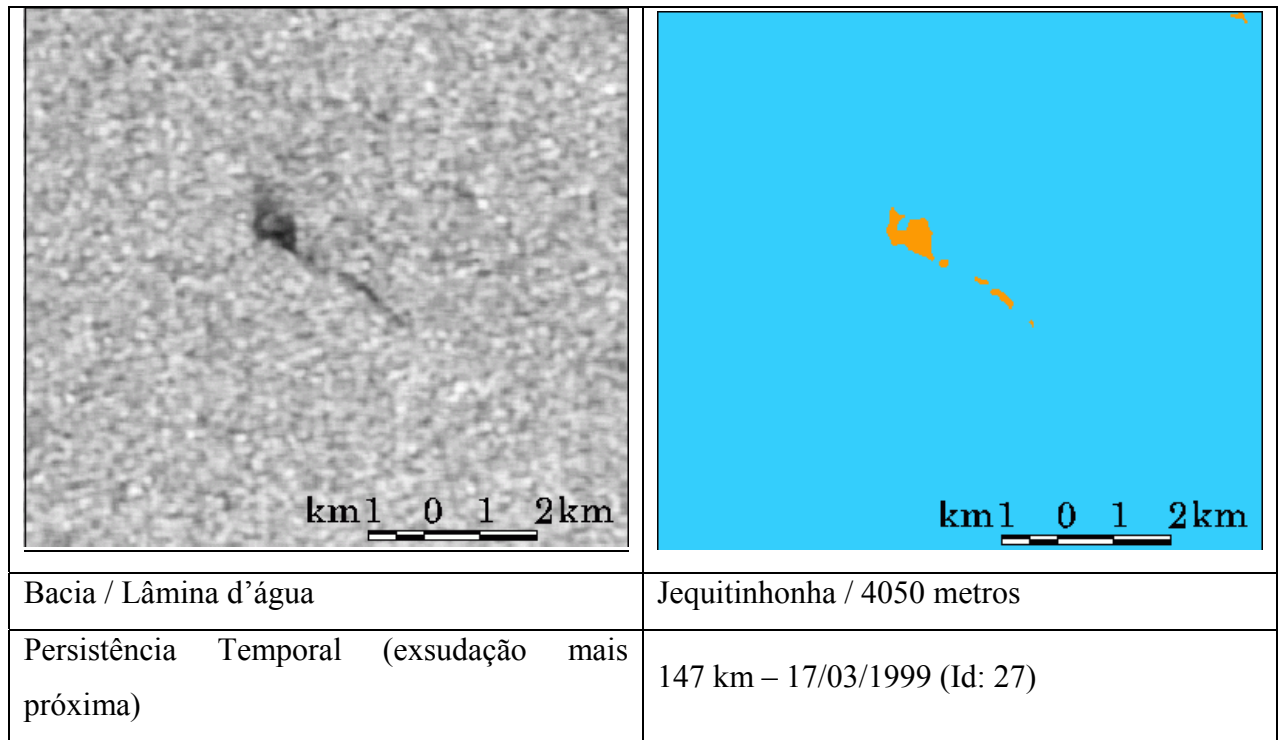


Figura 55 – Exsudação de óleo interpretada na imagem RADARSAT-1 SNAR adquirida em 14/05/1997 (Identificador 12 na Tabela 9). O resultado da classificação USTC está apresentado à direita.

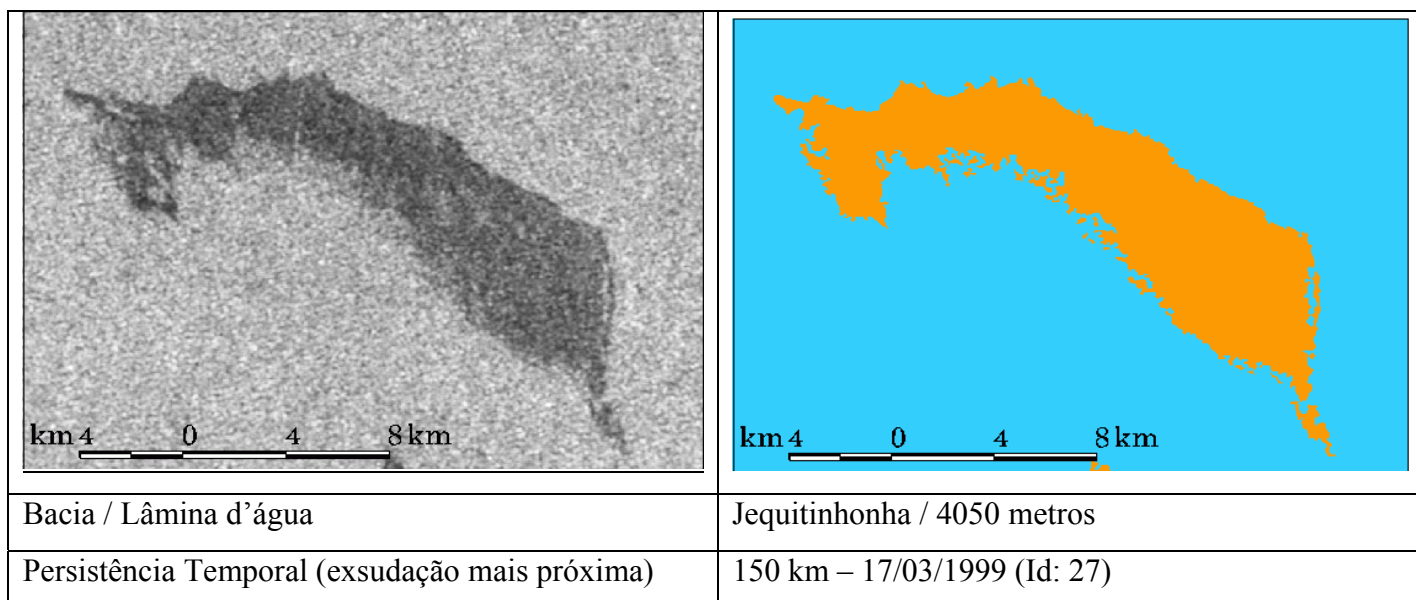


Figura 56 – Exsudação de óleo interpretada na imagem RADARSAT-1 SNAR adquirida em 14/05/1997 (Identificador 13 na Tabela 9). O resultado da classificação USTC está apresentado à direita.

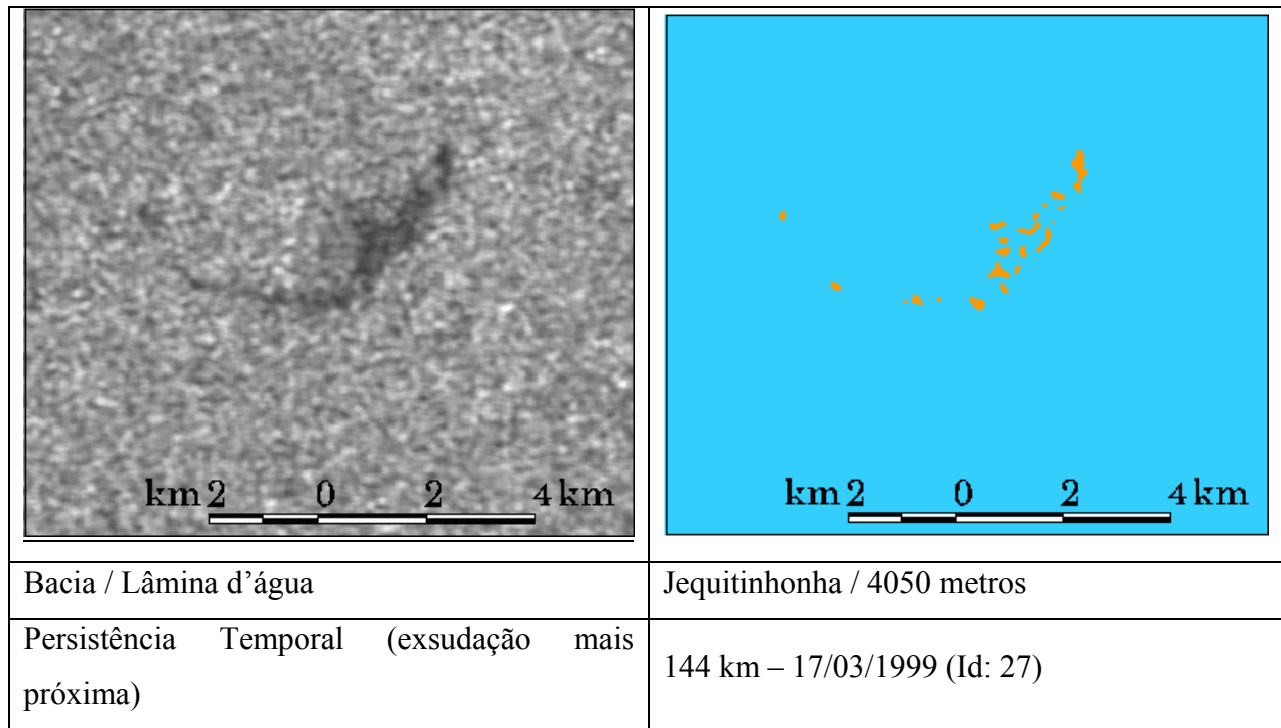


Figura 57 – Exsudação de óleo interpretada na imagem RADARSAT-1 SNAR adquirida em 14/05/1997 (Identificador 14 na Tabela 9). O resultado da classificação USTC está apresentado à direita.

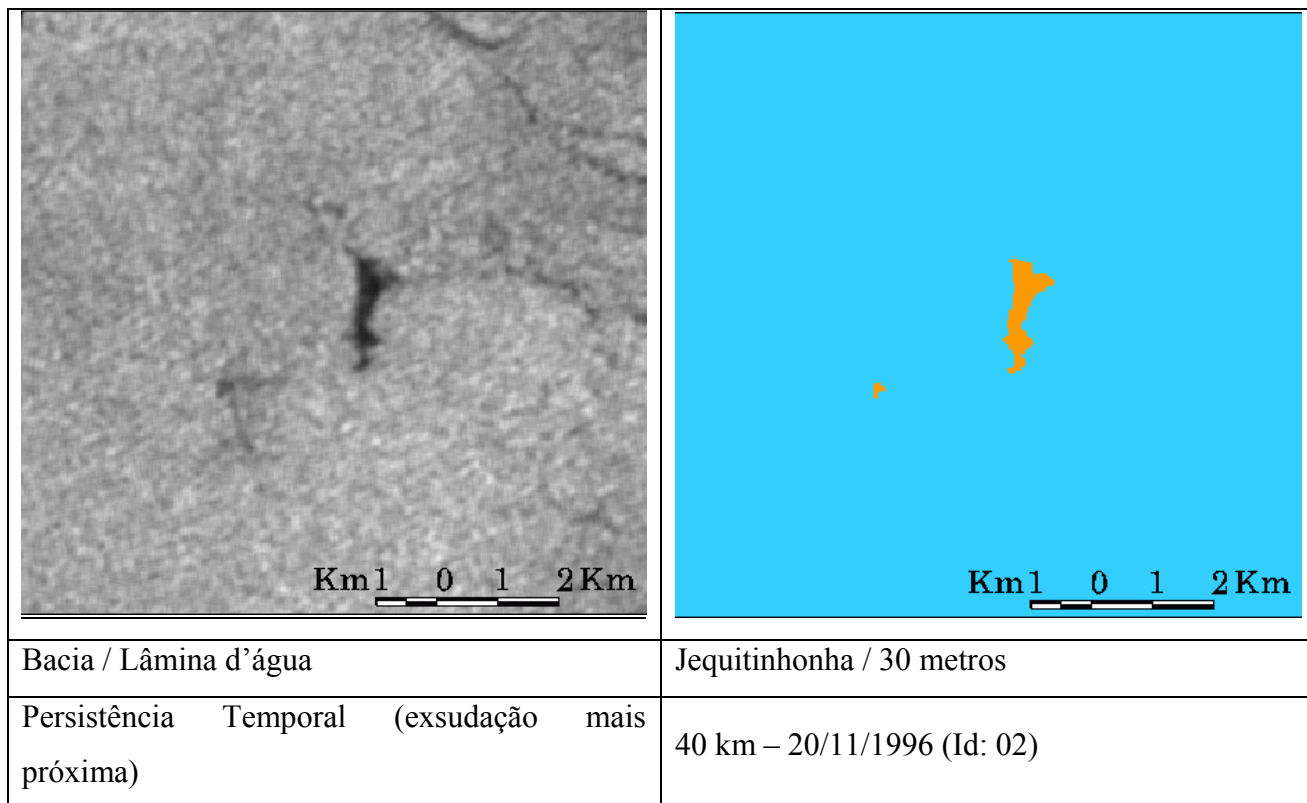


Figura 58 – Exsudação de óleo interpretada na imagem RADARSAT-1 W1 adquirida em 17/03/1999 (Identificador 27 na Tabela 9). O resultado da classificação USTC está apresentado à direita.

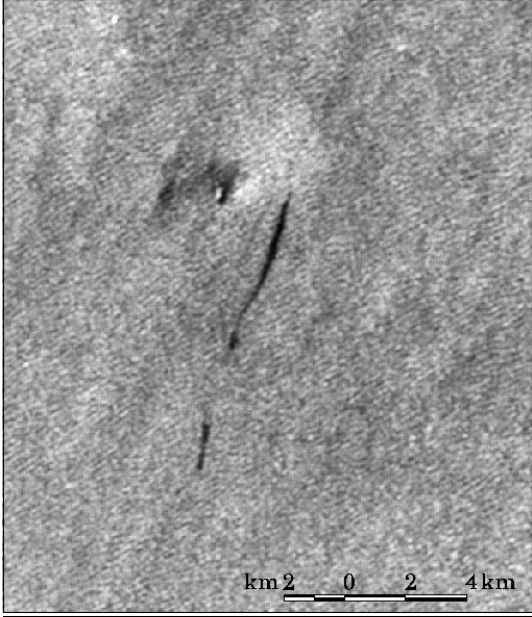
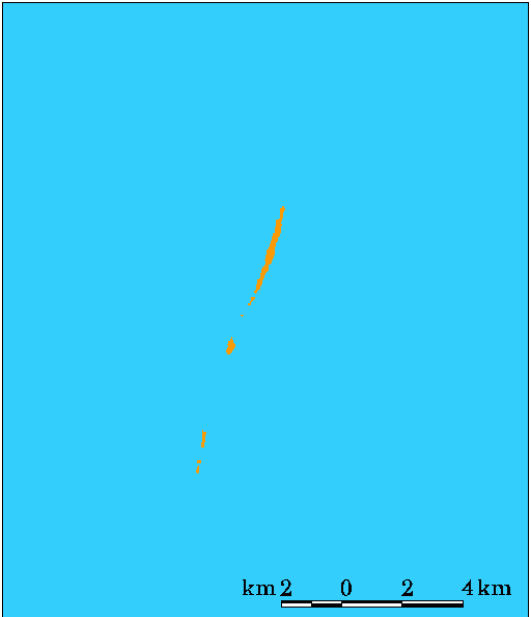
	
Bacia / Lâmina d'água	Cumuruxatiba / 2250 metros
Persistência Temporal (exsudação mais próxima)	89 km – 27/10/1996 (Id: 01)

Figura 59 – Exsudação de óleo interpretada na imagem RADARSAT-1 W1 adquirida em 17/03/1999 (Identificador 28 na Tabela 9). O resultado da classificação USTC está apresentado à direita.

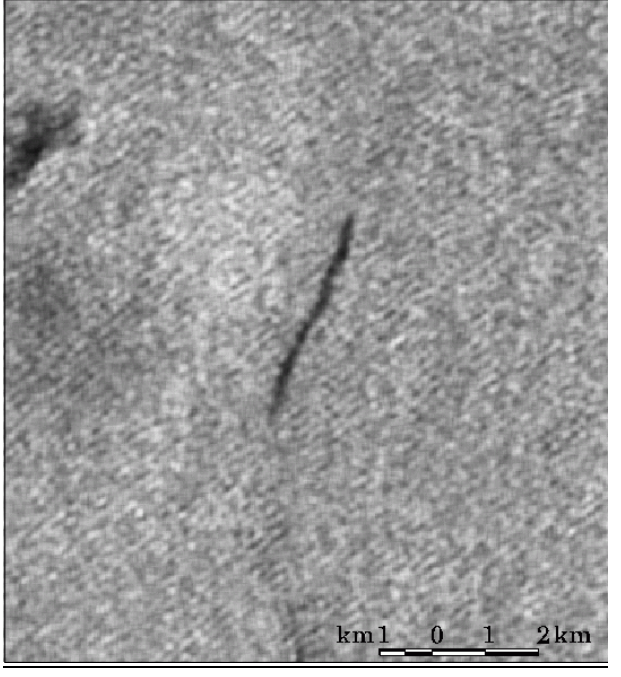
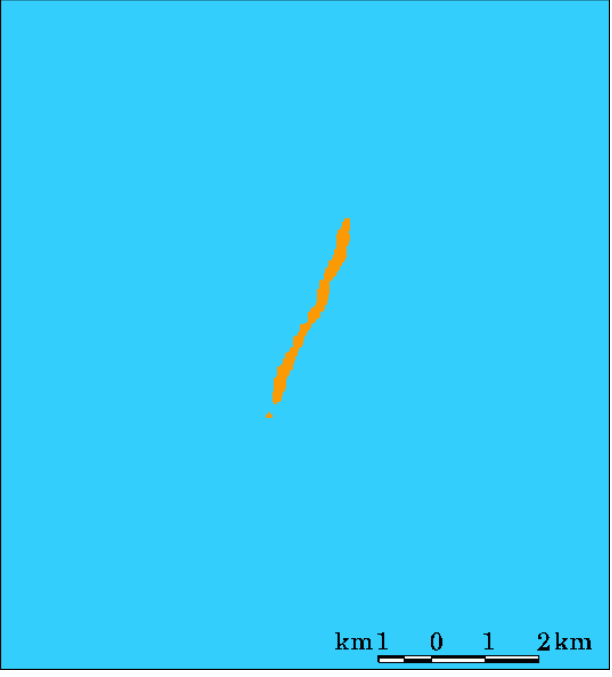
	
Bacia / Lâmina d'água	Cumuruxatiba / 2250 metros
Persistência Temporal (exsudação mais próxima)	63 km – 27/10/1996 (Id: 01)

Figura 60 – Exsudação de óleo interpretada na imagem RADARSAT-1 W1 adquirida em 17/03/1999 (Identificador 29 na Tabela 9). O resultado da classificação USTC está apresentado à direita.

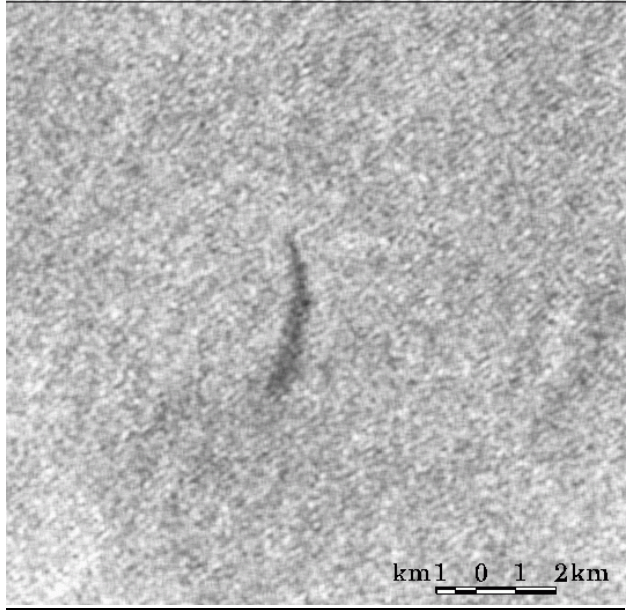
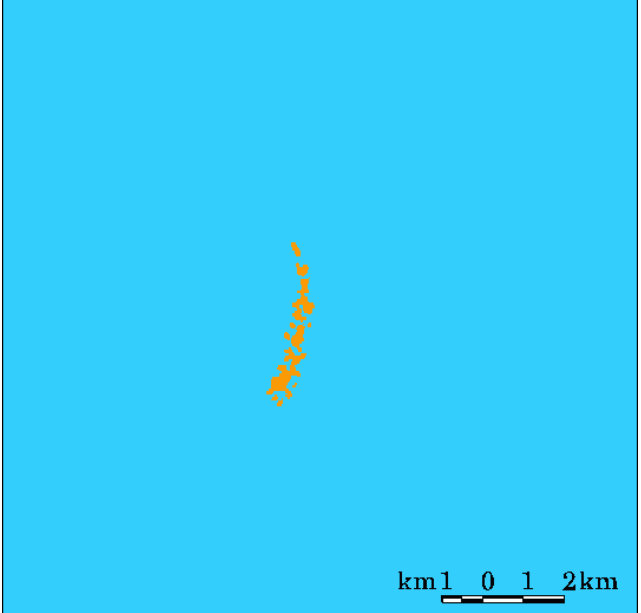
	
Bacia / Lâmina d'água	Cumuruxatiba / 2000 metros
Persistência Temporal (exsudação mais próxima)	83 km – 27/10/1996 (Id: 01)

Figura 61 – Exsudação de óleo interpretada na imagem RADARSAT-1 W1 adquirida em 17/03/1999 (Identificador 30 na Tabela 9). O resultado da classificação USTC está apresentado à direita.

5.2.2. Inserção e Análise dos Resultados da Classificação USTC em Ambiente SIG

As principais atividades em Geociências envolvendo a utilização de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) são: gerenciamento de dados, visualização, análise espacial, integração de diversos tipos de dados e suporte à decisão. Projetos geocientíficos normalmente incluem vários tipos de dados provenientes de diferentes fontes (geologia, geoquímica, geofísica, sensoriamento remoto, etc.). Neste aspecto, o SIG é uma ferramenta indispensável para o seu uso integrado. É necessário que todos os níveis de informação do projeto estejam georreferenciados corretamente e possuam a mesma projeção e *datum*, para que as pesquisas feitas neste banco de dados sejam espacialmente coerentes.

A análise espacial aplicada neste trabalho utiliza a habilidade do SIG em combinar diferentes níveis de informação e de observá-los simultaneamente para descobrir suas relações. Os seguintes dados foram inseridos e analisados:

- ✓ polígonos das manchas de óleo gerados pela classificação USTC na área de estudo e interpretados como exsudações;
- ✓ polígonos das feições meteo-oceanográficas (potencialmente causadoras de falsos alvos);
- ✓ informações geológicas pré-existentes e aquelas geradas a partir dos dados gravimétricos, incluindo o limite entre crosta continental e crosta oceânica.

5.2.2.1. Associação espacial entre exsudações de óleo e feições meteo-oceanográficas

A primeira investigação realizada foi a verificação da distribuição espacial das exsudações de óleo em relação às feições meteo-oceanográficas potencialmente causadoras de falsos alvos, no intuito de estabelecer a proximidade entre elas. Os polígonos limitantes das feições possivelmente associadas a falsos alvos foram traçados representando áreas com

textura lisa na imagem SAR próximas de variações meteorológicas e oceanográficas observadas nos sistemas NOAA / AVHRR e DMSP Fn / SSMI.

Os intervalos de Temperatura do Topo de Nuvens (TTN), da Intensidade do Vento e da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) considerados no presente trabalho foram descritos na Seção 3.1.9. Eles estão associados a fenômenos causadores da suavização da superfície do oceano e passíveis de serem erroneamente interpretados como manchas de óleo. Foram utilizadas distâncias (*buffers*) de 5, 10 e 50 quilômetros de raio a partir de cada uma das exsudações de óleo identificadas na área de estudo. Este procedimento foi realizado para todas as imagens, visando avaliar a confiabilidade da interpretação para cada exsudação individualmente, no que diz respeito às condições ambientais no momento da aquisição do dado SAR.

No dia 27 de Outubro de 1996, os dados de TSM mostram algumas áreas com temperatura relativamente mais baixa na região costeira (Figura 62), as quais, entretanto, não afetaram a imagem SAR (Figura 64). Na imagem TTN foi verificado a ausência total de nuvens, motivo pela qual ela não foi gerada.

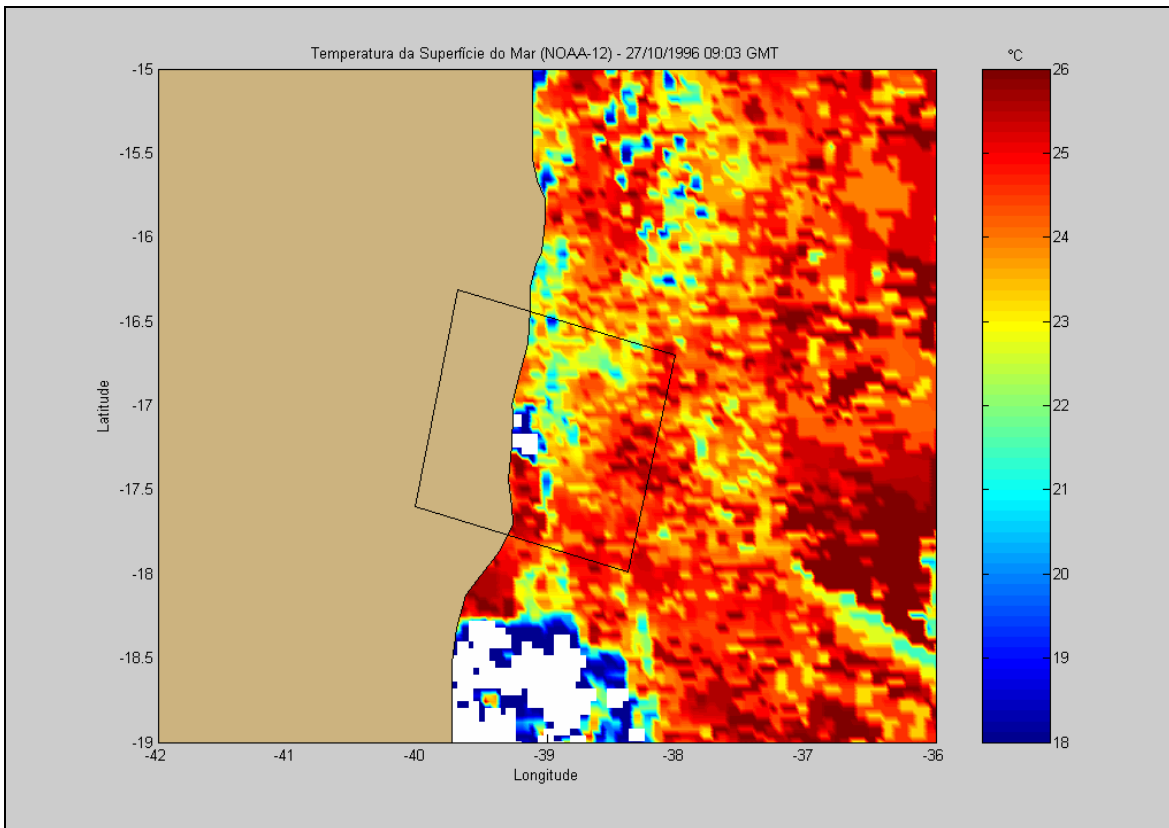


Figura 62 – Temperatura da Superfície do Mar no dia 27/10/1996, obtida pelo sensor AVHRR, a bordo do satélite NOAA-12, as 09:03 hs (Greenwich Meridian Time - GMT).

As áreas brancas correspondem a nuvens

O dado de intensidade do vento para o dia 27 de Outubro de 1996 foi obtido as 08:24 hs (GMT), somente no extremo leste da área abrangida pela imagem RADARSAT-1 W1 (Figura 63). Pode-se observar velocidades de 8 a 10 m.s^{-1} , que causam um retorno forte e uniforme do pulso de radar (Figura 64).

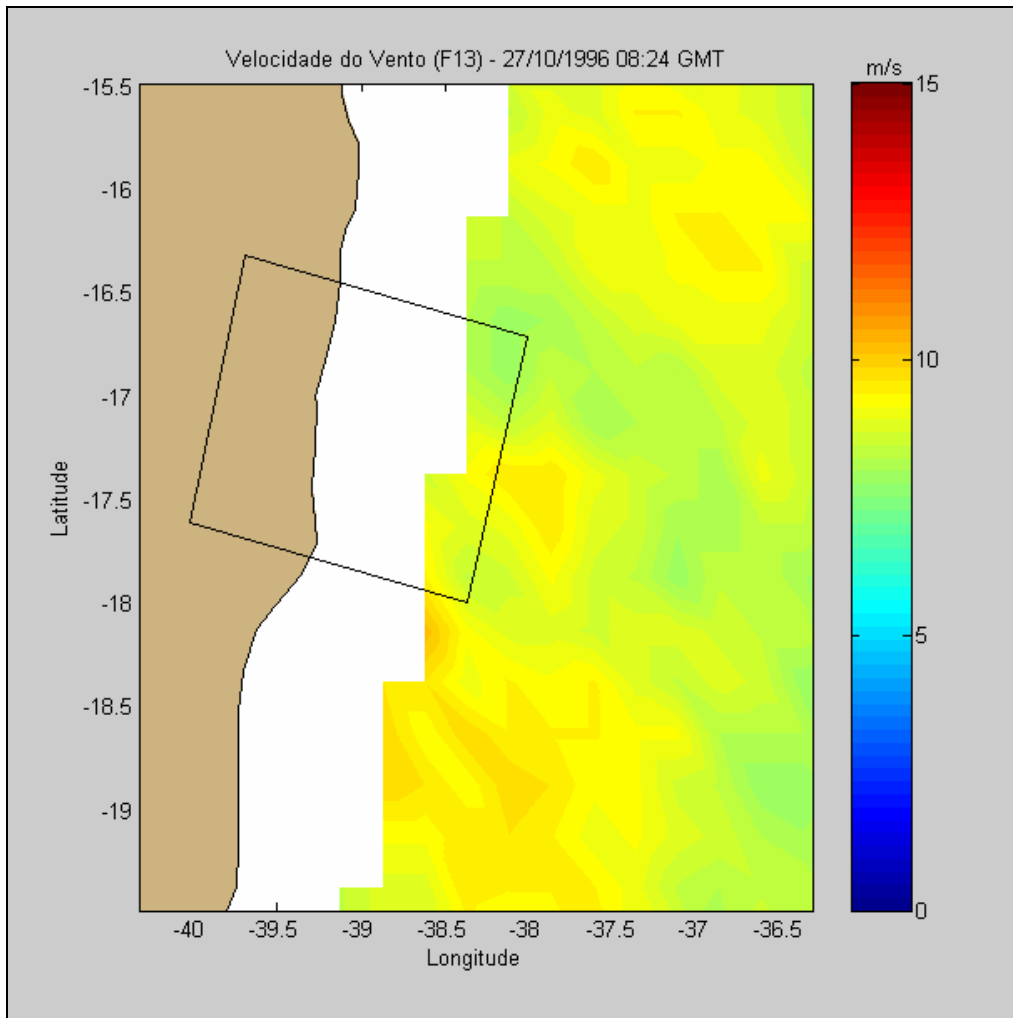


Figura 63 – Velocidade do vento no dia 27/10/1996, AS 08:24 hs (GMT), obtida pelo sensor DMSP F13.

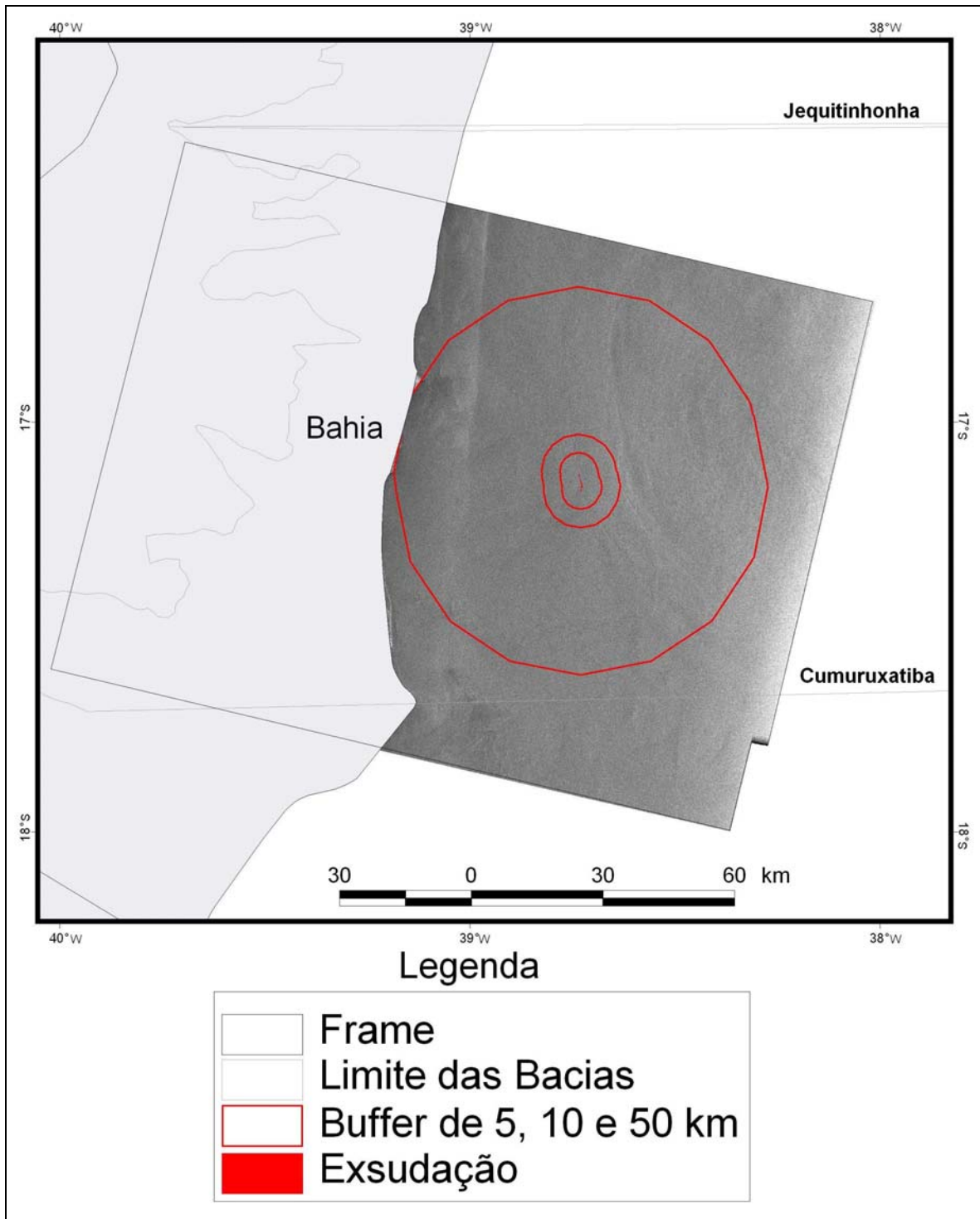


Figura 64 - Imagem RADARSAT-1 Wide 1 descendente, adquirida às 08:13 hs (GMT) do dia 27 de Outubro de 1996. Ver Figura 44 para localização da exsudação.

No dia 20 de Novembro de 1996, os dados de TSM mostram áreas com temperatura muito baixa (ate 12°C) na região costeira e da plataforma continental (Figura 65), que podem explicar a ocorrência de porções com baixo retorno na imagem SAR.

Os dados de TTN na área de estudo, obtidos no dia 20 de Novembro de 1996, não indicam a existência de celas de chuva caracterizadas por nuvens com temperatura abaixo de -40°C (Figura 66).

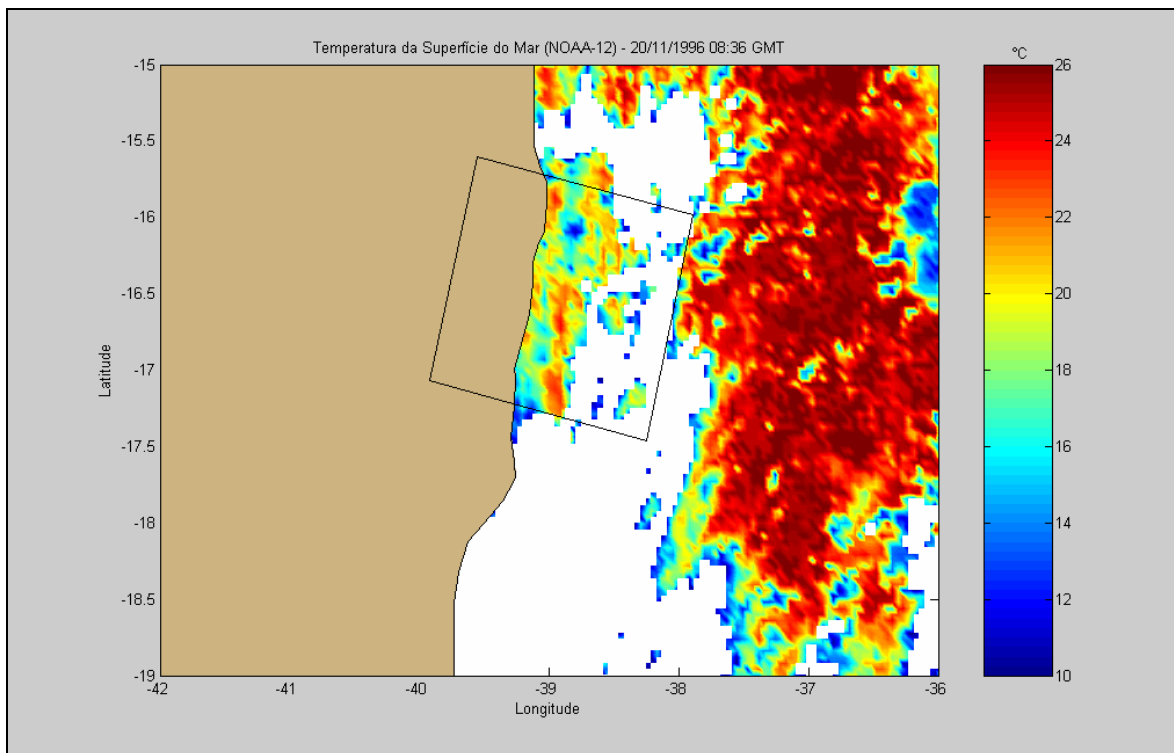


Figura 65 - Temperatura da Superfície do Mar no dia 20/11/1996, obtida pelo sensor AVHRR, a bordo do satélite NOAA-12, às 08:36 hs (GMT). As áreas brancas correspondem a nuvens.

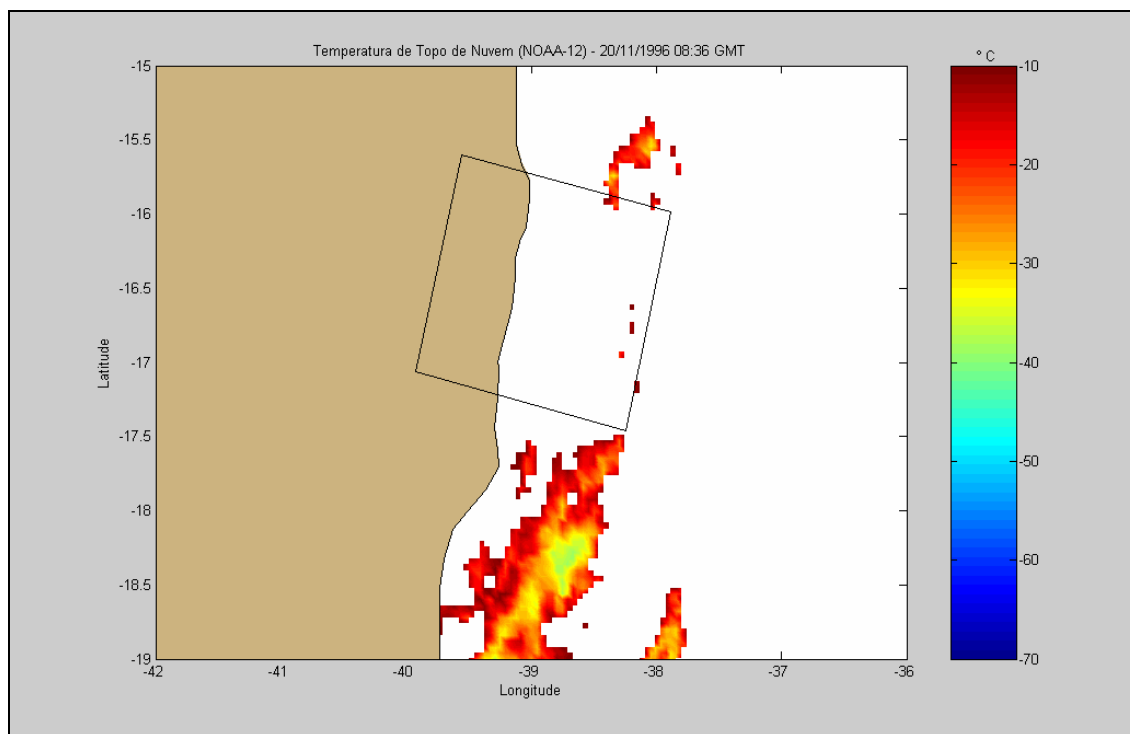


Figura 66– Temperatura do Topo de Nuvens no dia 20/11/1996, obtida pelo sensor AVHRR, a bordo do satélite NOAA-12, as 08:36 hs (GMT).

O dado de intensidade do vento não recobre a região costeira impossibilitando a confirmação de baixas velocidades (Figura 67), que poderiam estar relacionadas as feições de baixo retorno localizadas nesta área da imagem SAR (Figura 68). Além disso, os horários de aquisição dos dados RADARSAT-1 W1 e DMSP F-10 são muito diferentes.

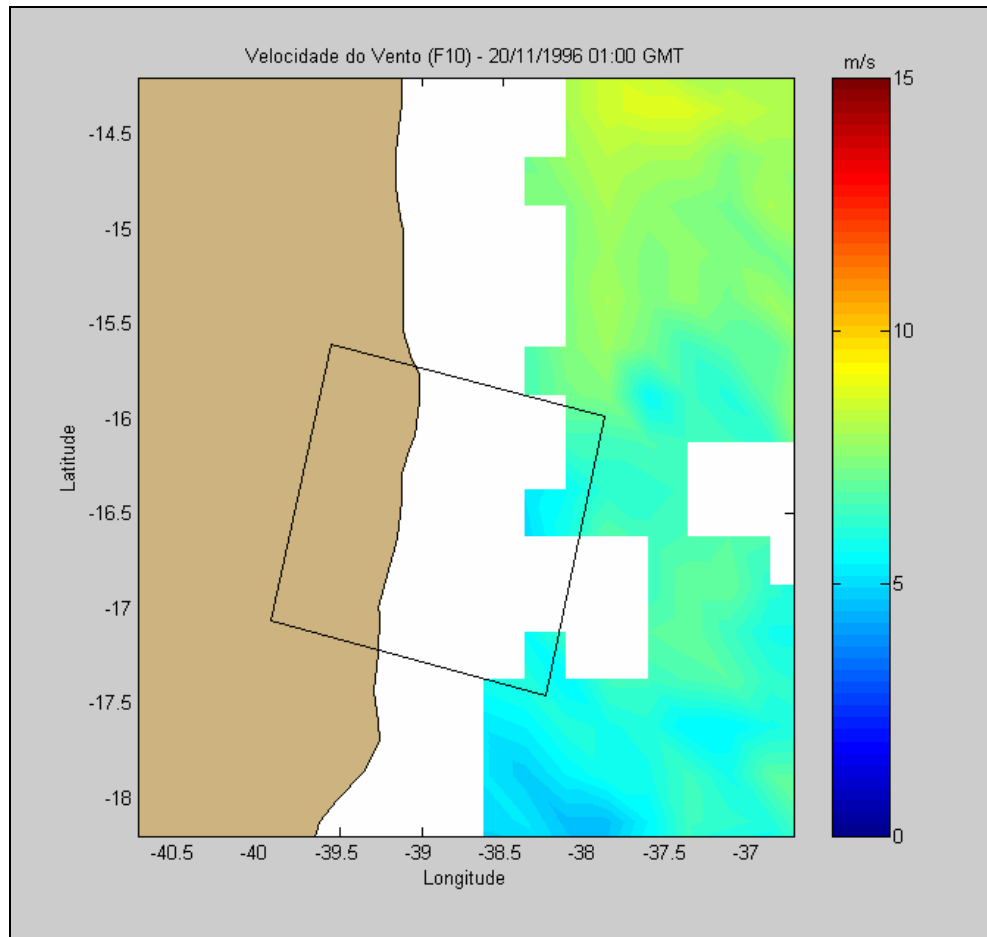


Figura 67 - Velocidade do vento no dia 20/11/1996, obtida as 01:00 hs (GMT) pelo sensor DMSP F10.

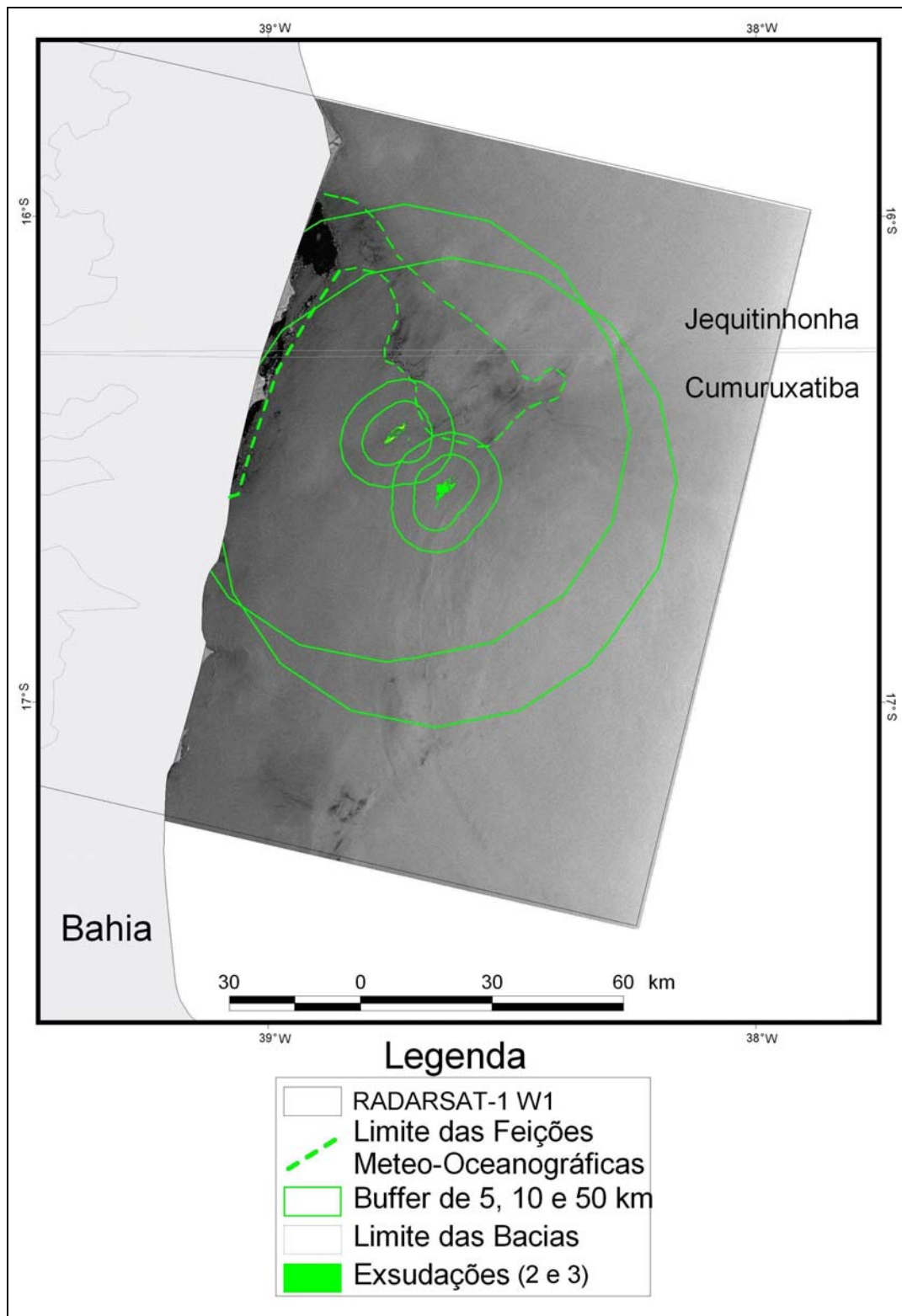


Figura 68 – Imagem RADARSAT-1 Wide 1 descendente, adquirida às 08:13 hs (GMT) do dia 20 de Novembro de 1996.

No dia 14 de Maio de 1997, os dados de TSM mostram áreas com temperatura relativamente mais baixa na região costeira (Figura 69), as quais, não afetaram a imagem SAR (Figura 72).

Os dados de TTN na área de estudo, obtidos no dia 14 de Maio de 1997, mostram a presença de nuvens na porção centro-sul, com temperaturas chegando a -45°C (Figura 70). Esta feição é percebida na imagem SAR, onde as celas de chuva causam a suavização da superfície do oceano (Figura 72). As áreas de retorno intenso nas proximidades das celas de chuva são associadas ao fenômeno de *downdraft*.

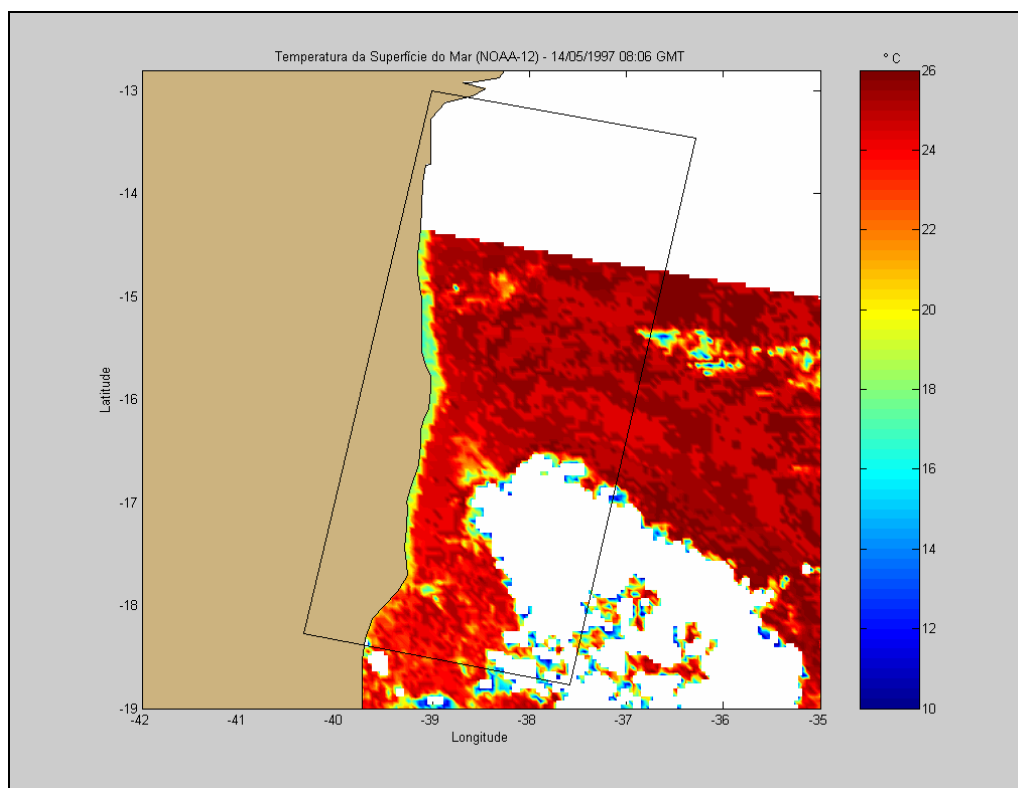


Figura 69 - Temperatura da Superfície do Mar no dia 14/05/1997 obtida pelo sensor AVHRR, a bordo do satélite NOAA-12, as 08:06 hs (GMT). As áreas brancas correspondem a nuvens.

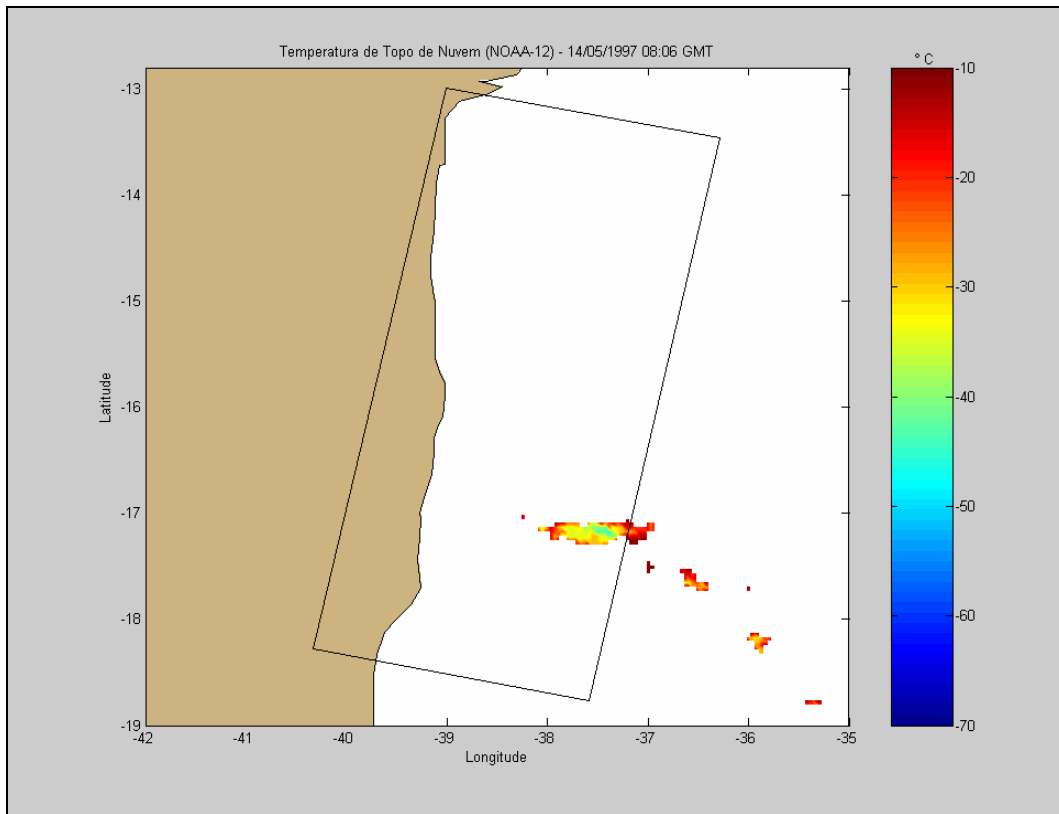


Figura 70 – Temperatura do Topo de Nuvens no dia 14/05/1997, obtida pelo sensor AVHRR, a bordo do satélite NOAA-12, as 08:06 hs (GMT).

A velocidade do vento na região central e norte da cena RADARSAT-1, encontra-se abaixo de 5 m.s^{-1} , chegando a $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ (Figura 71), o que pode explicar o baixo retorno encontrado nessa porção da imagem SAR (Figura 72).

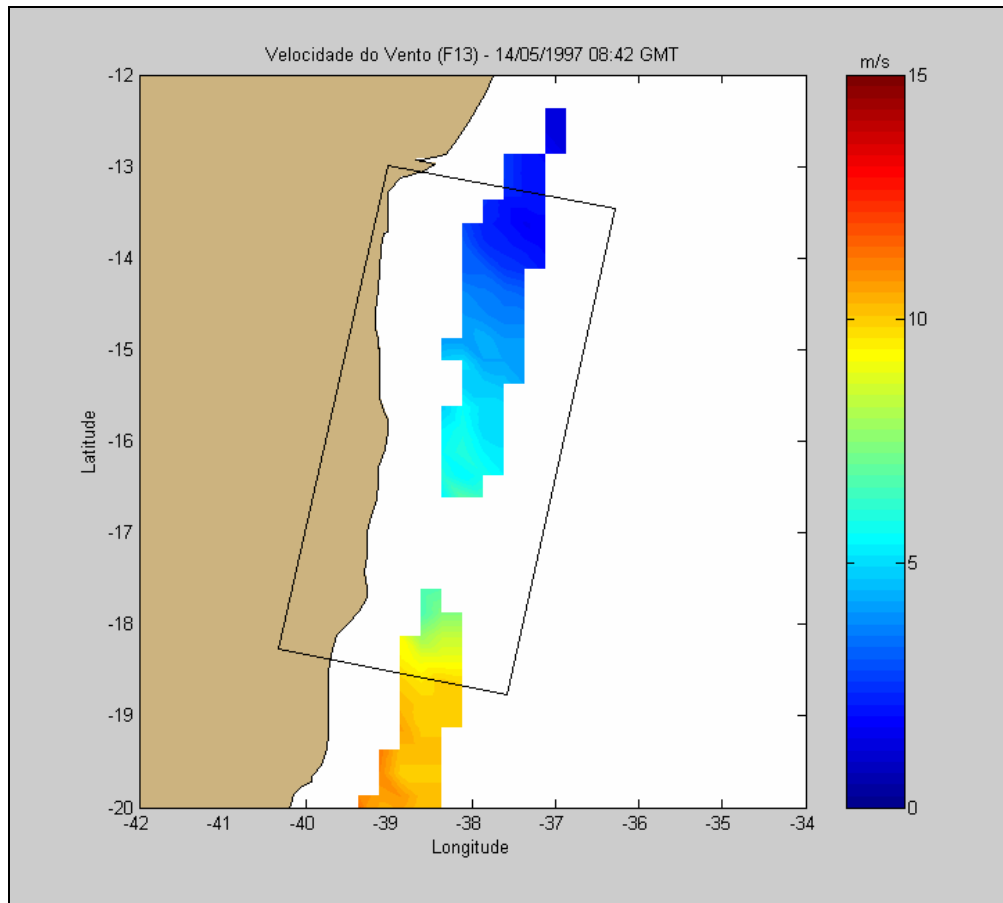


Figura 71 - Velocidade do vento no dia 14/05/1997, obtida as 08:42 hs (GMT) pelo sensor DMSP F-13.

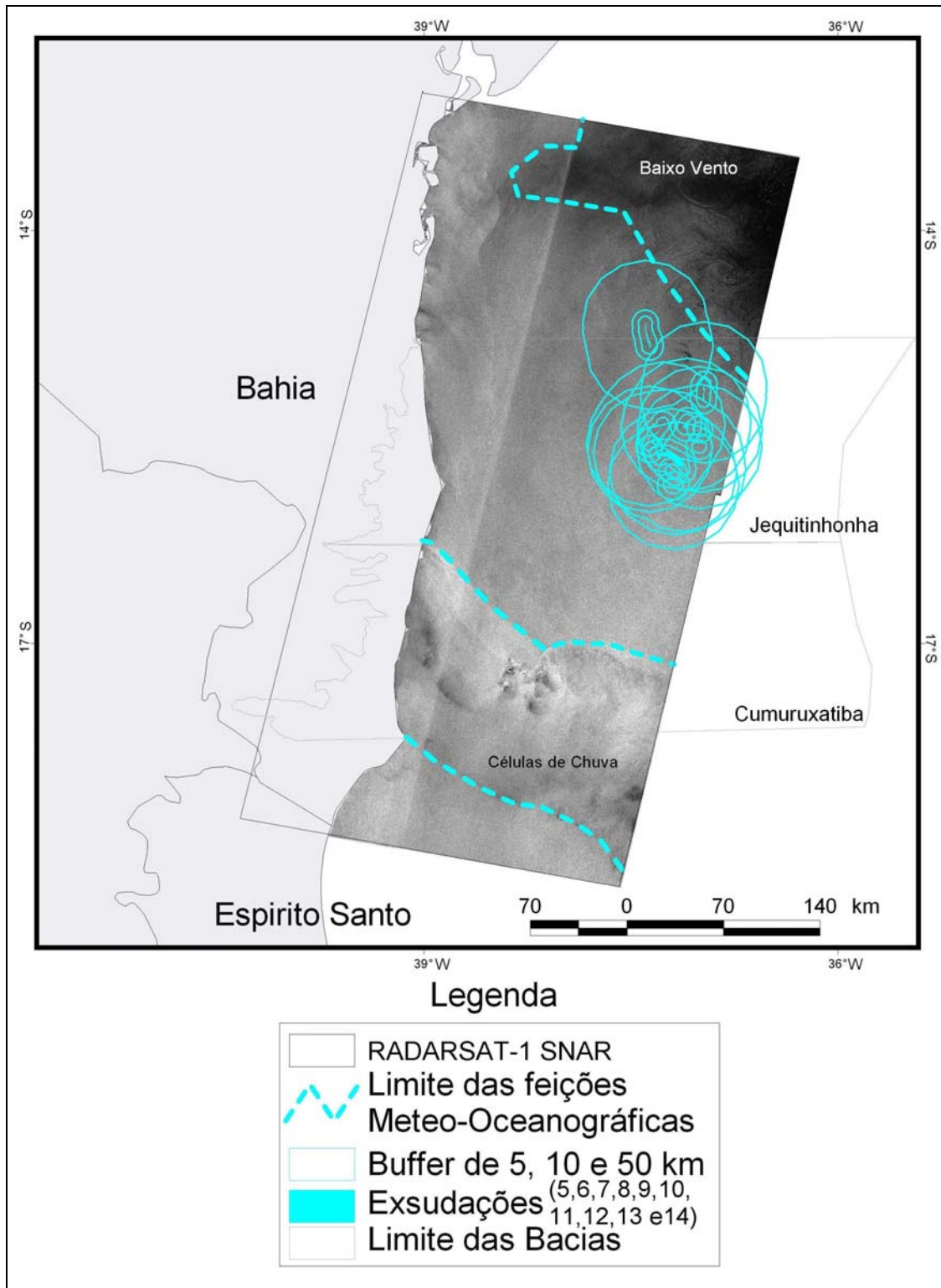


Figura 72 – Imagem RADARSAT-1 ScanSAR Narrow 1 (dois *frames* descendentes adjacentes), adquirida às 08:08 hs (GMT) do dia 14 de Maio de 1997.

No dia 17 de Março de 1999, os dados de TTN e TSM possuem uma defasagem de sessenta e quatro minutos em relação a aquisição da imagem SAR. As informações contidas nesses produtos não sugerem interferências meteo-oceanograficas na cena RADARSAT-1 (Figuras 73 e 74). No entanto, a mesma apresenta feições características de células de chuva forte (células convectivas), principalmente em sua região norte (Figura 76). A análise da Figura 74 indica a presença de nuvens na periferia da cena com temperaturas chegando a -40°C . Assim admite-se no presente trabalho que os falsos alvos verificados na imagem RADARSAT-1 estão associados a ocorrência de chuvas fortes no momento de sua aquisição.

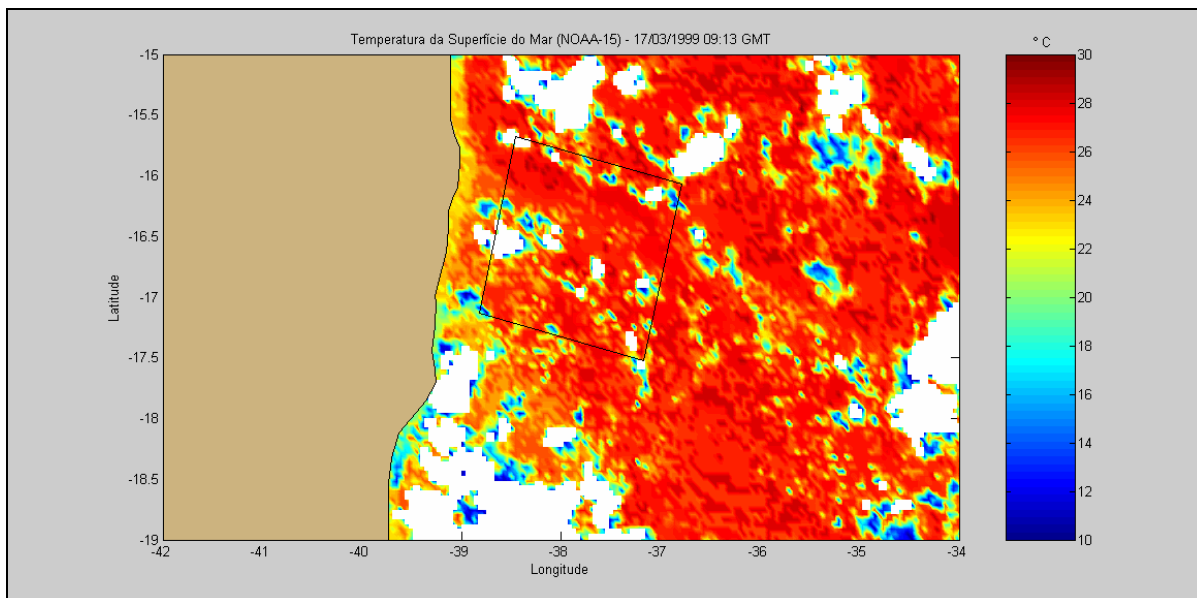


Figura 73 - Temperatura da Superfície do Mar no dia 17/03/1999, obtida pelo sensor AVHRR, a bordo do satélite NOAA-15, as 09:13 hs (GMT). As áreas brancas correspondem a nuvens .

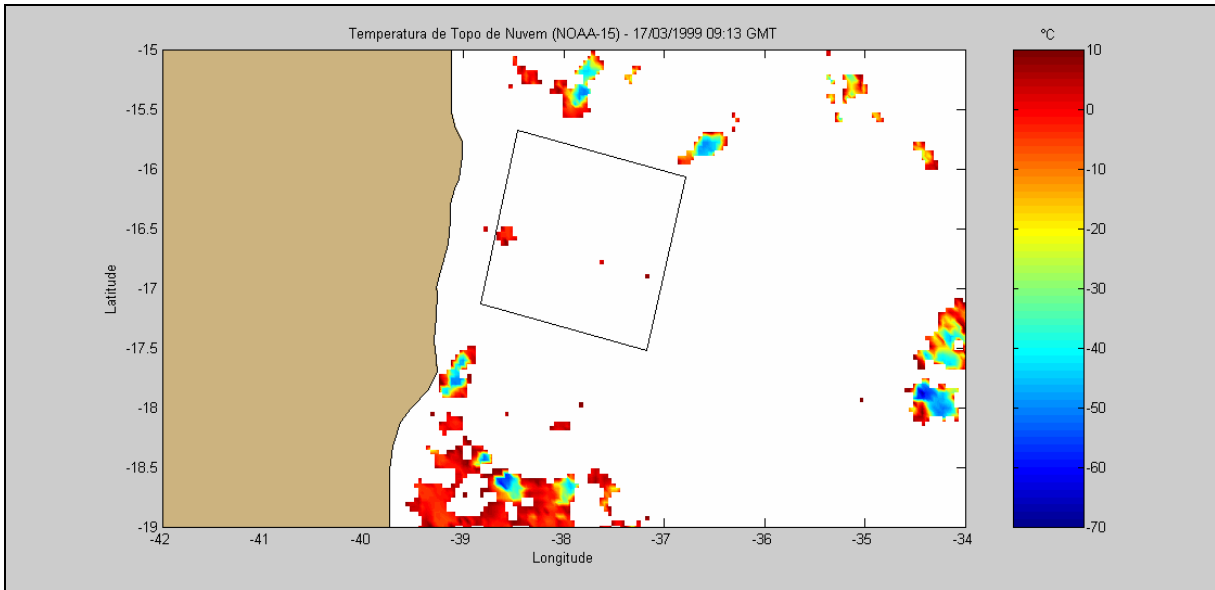


Figura 74 – Temperatura do Topo de Nuvens no dia 17/03/1999, obtida pelo sensor AVHRR, a bordo do satélite NOAA-15, as 09:13 hs (GMT).

A velocidade do vento na parte central e norte da cena RADARSAT-1 situa-se entre 2,0 e 4,0 m.s^{-1} (Figura 75), o que pode explicar em parte o baixo sinal de retorno encontrado nessa porção da imagem SAR (Figura 76). As feições escuras com formato filamentosas no extremo nordeste da cena RADARSAT-1 são características da presença de substâncias orgânicas na superfície do mar, as quais são realçadas quando ocorrem ventos com velocidade menor que 3,0 m.s^{-1} .

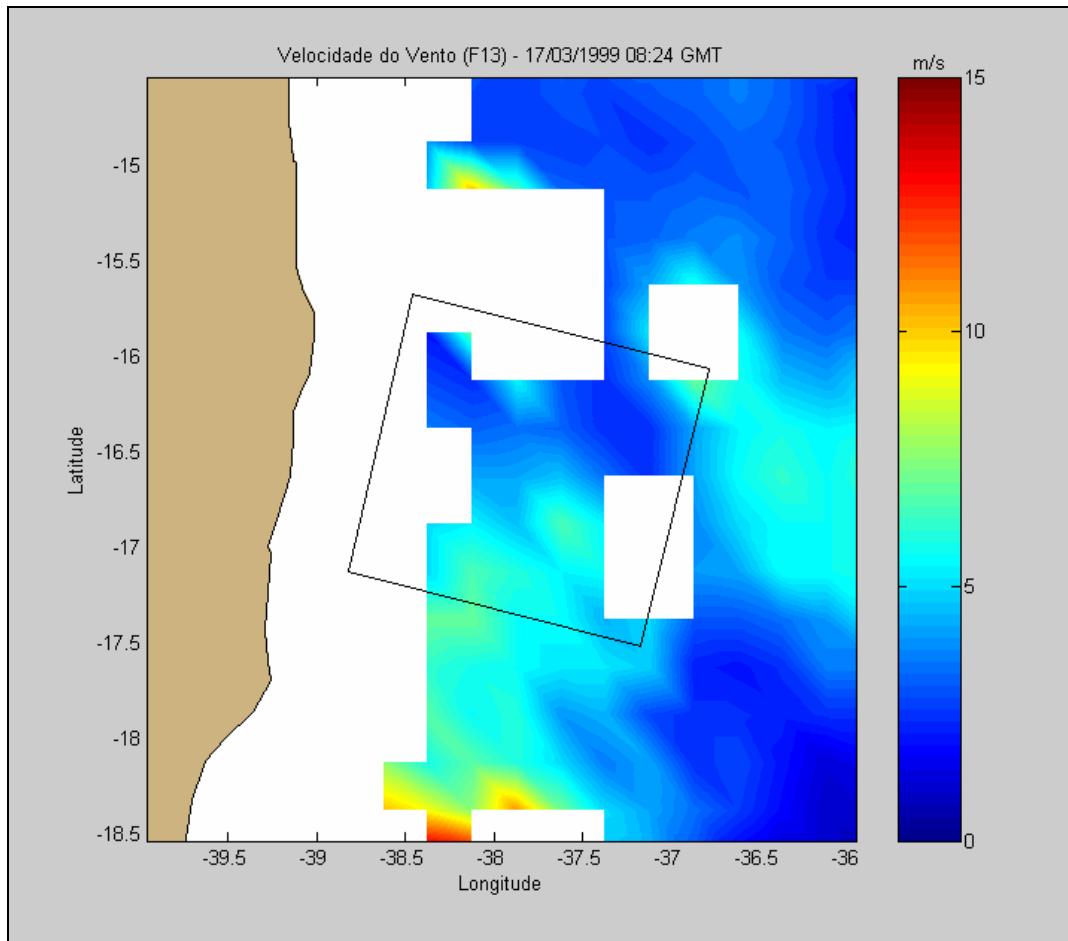


Figura 75 - Velocidade do vento no dia 17/03/1999, obtida as 08:24 hs (GMT) pelo sensor DMSP F-13.

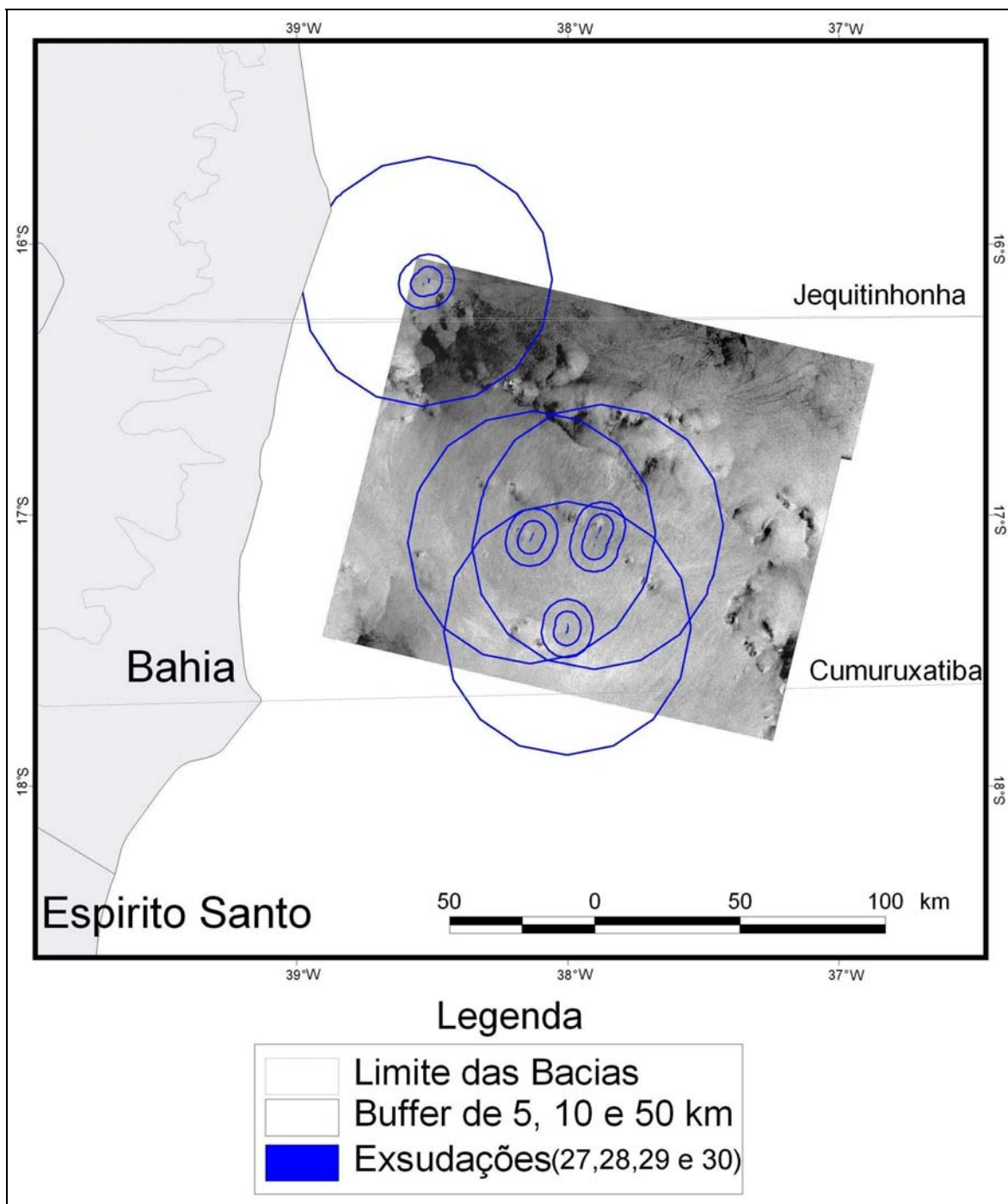


Figura 76 – Imagem RADARSAT-1 Wide 1 descendente, adquirida às 08:09 hs (GMT) do dia 17 de Março de 1999.

5.2.2.2 Associação espacial entre exsudações

Esta parte do trabalho contemplou a análise da persistência temporal das manchas de óleo interpretadas, isto é, exsudações que apareçam nas imagens RADARSAT-1 em diferentes datas e aproximadamente no mesmo local; considerando 5 , 10 e 50 quilômetros de raio entre elas (Figura 77). É importante ressaltar a existência da Corrente do Brasil nesta região, de direção Norte – Sul, e com velocidade aproximada de 30km/h, que pode deslocar as feições analisadas. A frequência de ocorrência é o fator que confere maior segurança na interpretação de exsudações de óleo na região que está sendo estudada, pois sugere a presença ao longo do tempo de sistemas petrolíferos ativos. Este será um dos critérios utilizados na hierarquização da confiabilidade das exsudações interpretadas.

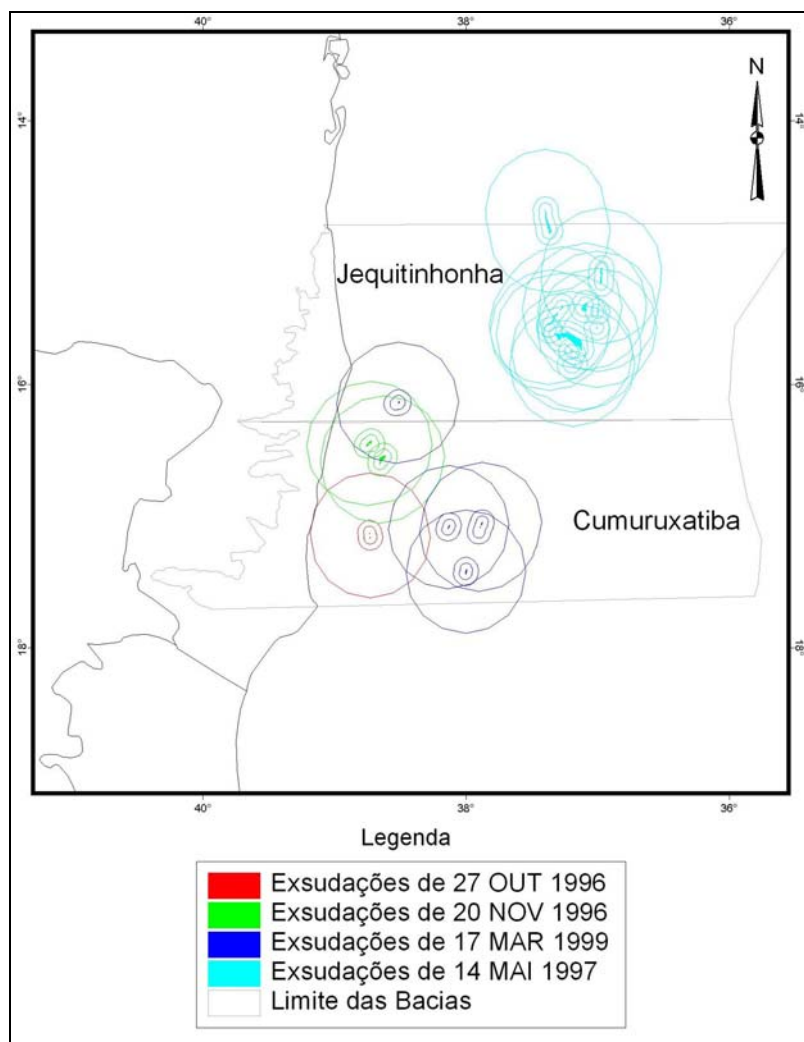


Figura 77 – Relação espacial entre as exsudações interpretadas a partir das imagens RADARSAT-1 obtidas em diferentes datas, com espaçamentos (*buffers*) de 5, 10 e 50 quilômetros. Ver Figura 44 para localização das exsudações.

5.2.2.3 Associação espacial entre as exsudações e os cenários tectônicos

A análise subsequente foi obtida através da inserção das informações geológicas no SIG, com o objetivo de identificar domínios mais propícios para a geração e a migração de óleo até o assoalho oceânico. Foram utilizadas as informações da literatura sobre a geologia estrutural e os sistemas petrolíferos das bacias, além dos lineamentos e do limite entre crosta continental e crosta oceânica extraídos dos dados gravimétricos. Este procedimento visa determinar compartimentos que possibilitem a formação de rotas de migração para as exsudações analisadas, delimitando assim domínios tectônicos para a hierarquização da confiabilidade da interpretação. Foram definidos quatro cenários tectônicos (Figura 78), a saber:

- Ótimo – compreende a área que vai desde a linha de charneira Albo-Cenomaniana até a quebra da plataforma e início da região de águas profundas das duas bacias, englobando também os domos de sal descritos na literatura. A linha de charneira Albo-Cenomaniana (ou limite exploratório) limita os compartimentos com o registro mais completo da sedimentação das bacias (a leste) dos compartimentos estruturais chamados de Embasamento Raso (para a Bacia de Cumuruxatiba) e Plataforma Rasa (para a Bacia de Jequitinhonha), ambos recobertos por sedimentos de idade terciária. Este cenário tectônico ótimo compreende quase a totalidade dos poços perfurados nas duas bacias e nove dentre dez poços com indícios de hidrocarbonetos (Figura 79). Todos os sistemas petrolíferos conhecidos para as bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha estão, portanto, nele representados. Neste cenário, encontram-se também os principais falhamentos associados às linhas de charneira de direção aproximada norte-sul, assim como falhas de direção noroeste-sudeste associadas a movimentos transpressivos, que afetam desde o embasamento até sedimentos do albo-cenomaniana ou até mesmo do Terciário Inferior. Três modelos são propostos por Gaglione *et al.* (1987) para as acumulações encontradas

neste domínio. Todos eles implicam em migração ascendente do óleo a partir de rochas geradoras através de falhas listricas, de falhas associadas a movimentos transpressivos ou de contatos laterais com a rocha reservatório. As rotas de migração até as rochas reservatórios tendem a ser também os elos de ligação entre as rochas geradoras e o assoalho oceânico, podendo dar origem a exsudações petrolíferas;

- Alta Confiabilidade – abrange a região de águas profundas e ultraprofundas, situada entre a quebra da plataforma e o limite entre a crosta continental e a crosta oceânica, o qual foi definido através dos dados gravimétricos (Figura 78). Possui informações geológicas escassas, poucos poços perfurados e apenas um com indícios de hidrocarbonetos (Figura 79);
- Confiabilidade Intermediária – localiza-se no domínio crosta oceânica (interpretada a partir dos dados gravimétricos). Não existem informações geológicas nesta área. Podem ocorrer rochas geradoras da fase *drift*, mas provavelmente há pouca sobrecarga sedimentar para a maturação térmica. O mais provável é que domos de sal, falhas ou *carrier beds* propiciem a migração a longa distância, a partir de cozinhas de geração em ambientes mais proximais;
- Baixa Confiabilidade – região de embasamento raso, contendo somente sedimentos de idade terciária.

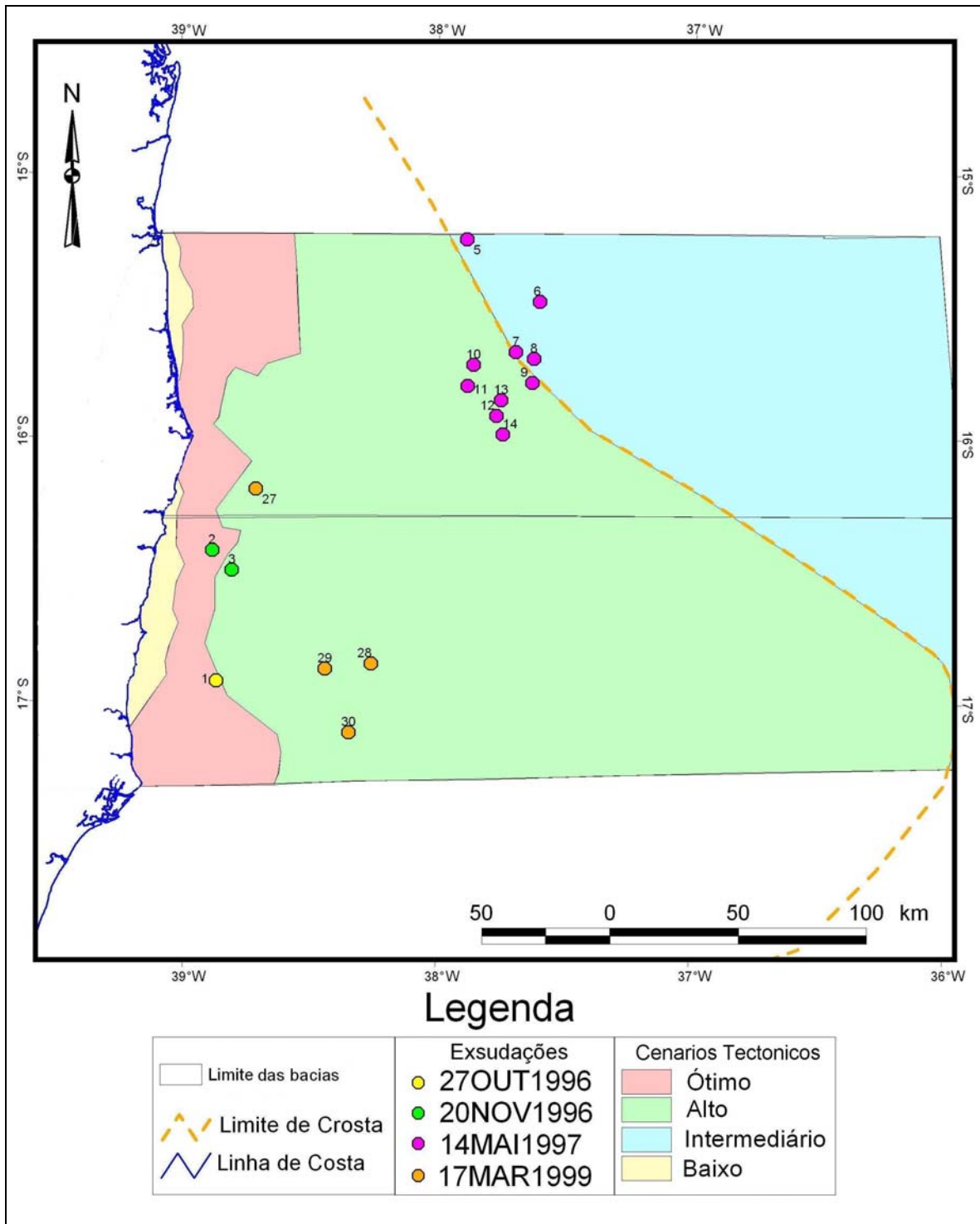


Figura 78 – Os quatro cenários tectônicos utilizados para a hierarquização da confiabilidade das exsudações interpretadas.

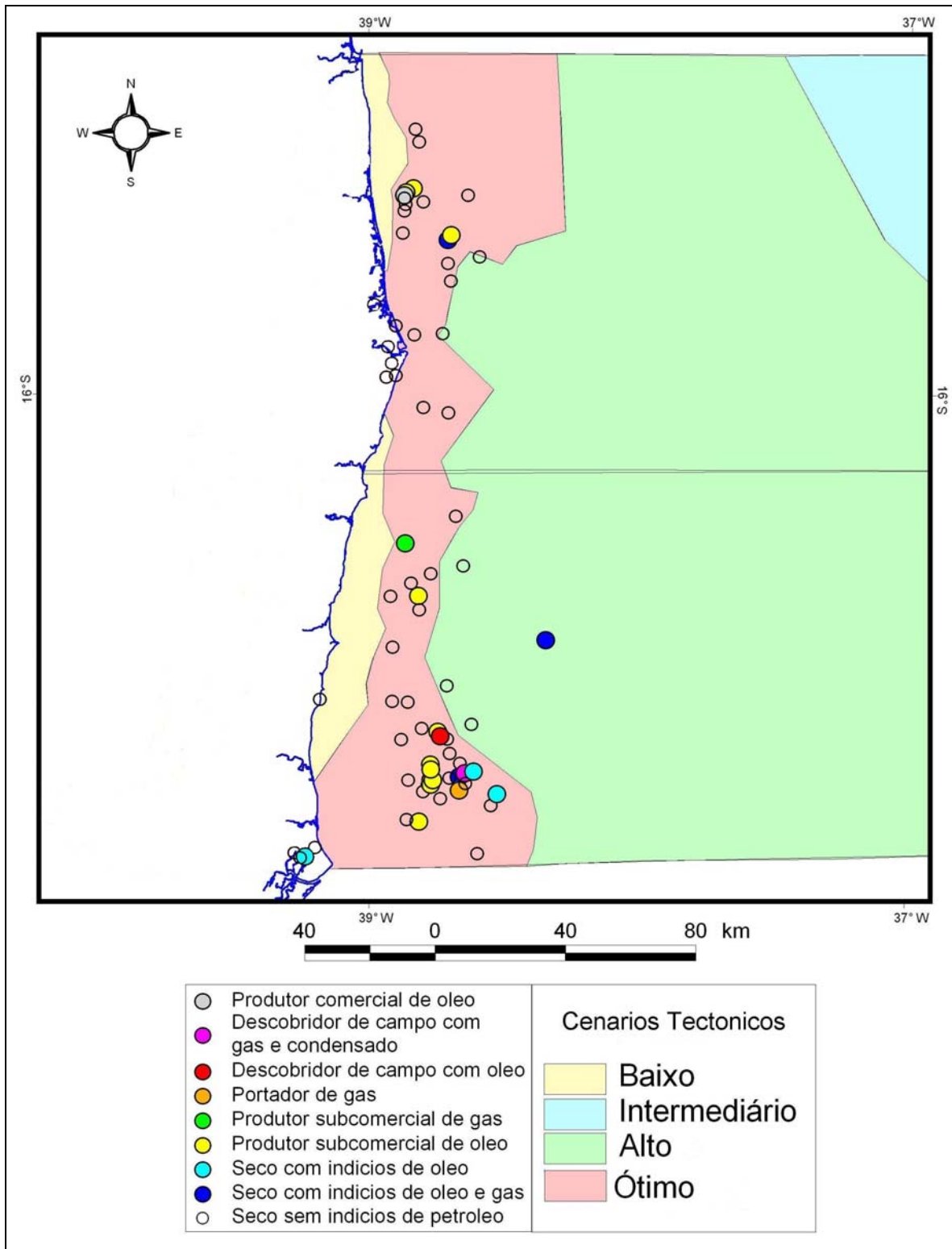


Figura 79 - Os quatro cenários tectônicos utilizados para hierarquização da confiabilidade da interpretação das exsudações e a localização dos poços perfurados.

5.2.3. Critérios de *Ranking*

A detecção de exsudações de óleo em regiões oceânicas das bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha se torna mais segura quando alguns cenários ótimos tendem a convergir, como segue:

(a) cenário tectônico: ocorrência de exsudações na área que vai desde a linha de charneira Albo-Cenomaniana até a quebra da plataforma e início da região de águas profundas, na presença de tectonismo e halocinese, possibilitando a criação de rotas de migração para o óleo, diretamente de rochas geradoras ou de reservatórios existentes, até o assoalho oceânico;

(b) cenário temporal: a persistência de exsudações de óleo ao longo do tempo e aproximadamente na mesma localização geográfica (até 5 quilômetros de distância) valida fortemente a autenticidade das feições analisadas. A recorrência temporal e espacial é um excelente indicador da existência de rotas de migração até o assoalho oceânico na área de estudo;

(c) cenário ambiental: as condições meteorológicas e oceanográficas durante a aquisição das imagens RADARSAT-1 devem ser adequadas, de modo a não interferirem na interpretação das exsudações de óleo (falsos alvos).

Com o objetivo de hierarquizar quantitativamente as exsudações de óleo interpretadas nas imagens SAR, Miranda *et al.* (1998) propuseram um Fator de Confiabilidade (F_c). Este parâmetro estima o quanto os cenários tectônico, temporal e ambiental relativos às citadas feições se aproximam dos cenários ótimos descritos acima. O cálculo do Fator de Confiabilidade da exsudação considerada é obtido pela multiplicação dos valores de cada cenário individual conforme estabelecido pela equação:

$$F_c \text{ exsu} = (\text{fc tectônico}) (\text{fc temporal}) (\text{fc ambiental}).$$

Quatro níveis de confiabilidade foram definidos por estes autores: ótimo ($f_c = 1,00$), alto ($f_c = 0,75$), intermediário ($f_c = 0,50$) e baixo ($f_c = 0,25$). O critério utilizado para atribuir um valor para cada cenário está exposto na Tabela 11.

Tabela 10 – Critérios para a Determinação do Nível e do Fator de Confiabilidade nas Bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha.

Nível de Confiabilidade	Fator de Confiabilidade	Cenário Tectônico	Cenário Temporal	Cenário Ambiental
1,00	Ótimo	Área que vai da linha de charneira Albo-Cenomaniana até a quebra da plataforma e início da região de águas profundas, na presença de tectonismo e halocinese, possibilitando a criação de rotas de migração para o óleo	Recorrência no tempo de exsudações de óleo com até 5 km de distância	Sem associação espacial com feições meteorológicas oceanográficas potencialmente associadas a falsos alvos
0,75	Alto	Regiões de águas profundas e ultra-profundas, entre a quebra da plataforma e o limite entre crosta continental e crosta oceânica, com possibilidade de ocorrência de sistemas petrolíferos ativos	Recorrência no tempo de exsudações de óleo com até 10 km de distância	Associação espacial com feições meteorológicas oceanográficas com até 50 km de distância
0,50	Intermediário	Região localizada sobre crosta oceânica, podendo	Recorrência no tempo de	Associação espacial com

		conter sistemas petrolíferos ativos com rochas geradoras da fase drifte	exsudações de óleo com ate 50 km de distância	feições meteo-oceanográficas com ate 10 km de distância
0,25	Baixo	Região de embasamento raso, contendo somente sedimentos de idade Terciária	Sem recorrência no tempo	Associação espacial com feições meteo-oceanográficas com ate 5 km de distância

A partir destes critérios, gerou-se a hierarquização da confiabilidade das exsudações interpretadas conforme a na Tabela 12. Tais resultados estão apresentados na Figura 80.

Tabela 11 – Hierarquização da Confiabilidade das exsudações interpretadas nas bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha.

RANKING	Exsudação -ID	F_C exsu	f_c tectonico *	f_c temporal **	f_c ambiental ***
#4 ****	02	0,125	1,00	0,50	0,25
#2 ****	03	0,1875	0,75	0,50	0,50
#1	01	0,25	1,00	0,25	1,00
#3	09	0,1875	0,75	0,25	1,00
#3	10	0,1875	0,75	0,25	1,00
#3	11	0,1875	0,75	0,25	1,00
#3	12	0,1875	0,75	0,25	1,00
#3	13	0,1875	0,75	0,25	1,00
#3	14	0,1875	0,75	0,25	1,00
#5	07	0,125	0,50	0,25	1,00

#5	08	0,125	0,50	0,25	1,00
#7	05	0,09375	0,50	0,25	0,75
#7	06	0,09375	0,50	0,25	0,75
#6 ****	27	0,09375	0,75	0,50	0,25
#8	28	0,046875	0,75	0,25	0,25
#8	29	0,046875	0,75	0,25	0,25
#8	30	0,046875	0,75	0,25	0,25

*Figura 79

**Figuras 78; 45 a 61

***Figuras 65, 69, 73 e 77

**** No caso de igualdade nos valores de F_{cexsu} , prevalecera o maior valor de $f_{\text{ctectonico}}$, seguido de $f_{\text{ctemporal}}$.

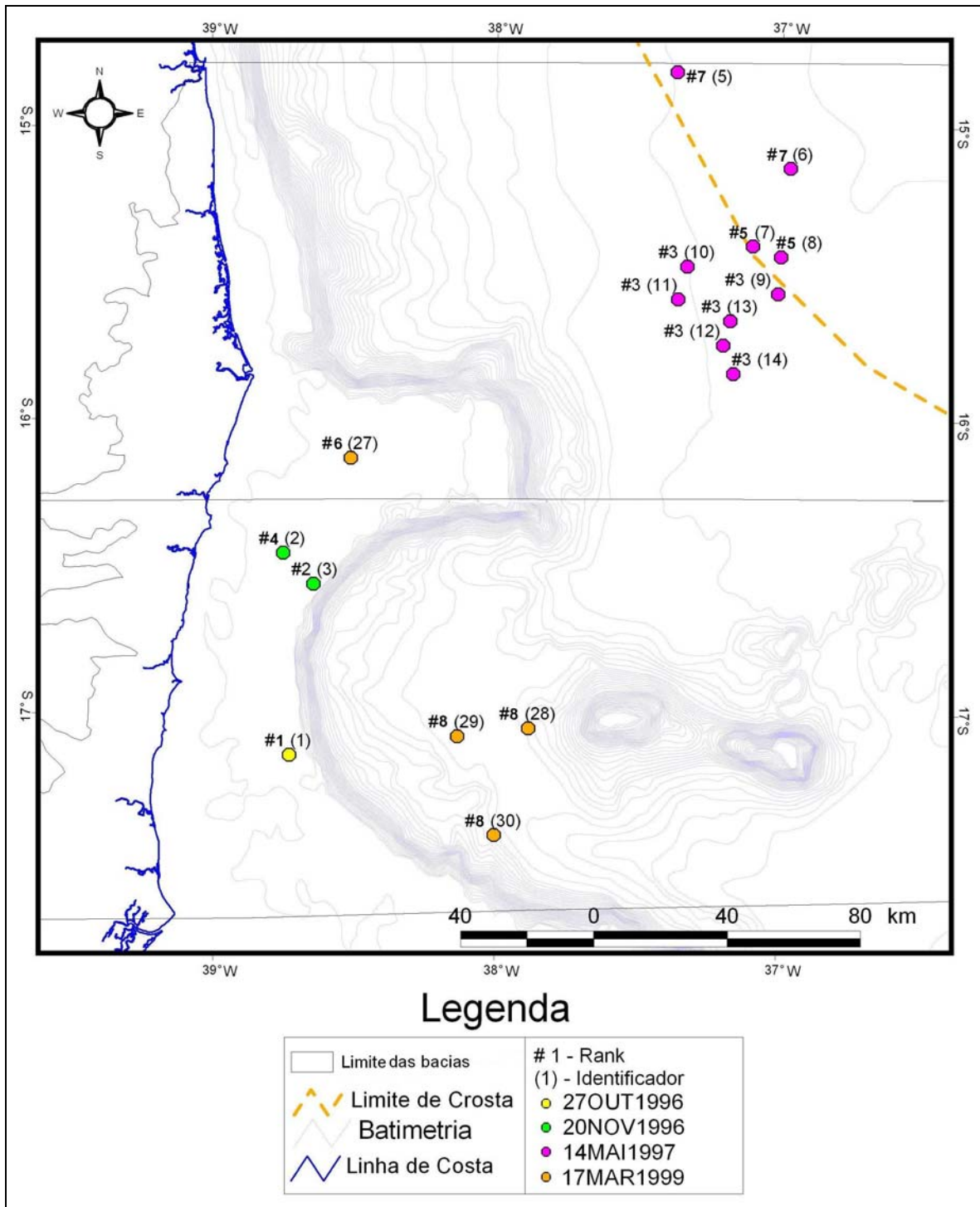


Fig. 80 – Resultado da hierarquização da confiabilidade das exsudações interpretadas nas bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha.

5.3. Implicações Exploratórias

Os resultados obtidos através da análise dos dados gravimétricos e de sensoriamento remoto possuem implicações exploratórias que serão discutidas nos parágrafos seguintes.

O limite entre a crosta oceânica e a crosta continental, mapeado no presente trabalho através dos dados gravimétricos, expande os limites geográficos de uma possível fronteira exploratória em águas ultraprofundas.

A modelagem gravimétrica também evidenciou, na Bacia de Jequitinhonha, uma espessura sedimentar da Calha Rifte Principal em torno de 9.000 metros. Já a Calha Secundária apresenta espessura sedimentar em torno de 3.000 a 3.500 metros. Na Bacia de Cumuruxatiba, esta Calha Secundária possui cerca de 2.000 até 3.800 metros de espessura sedimentar, segundo os perfis gravimétricos posicionados neste compartimento. Além disso, foram identificadas nesta bacia calhas sedimentares de 7.000 até 10.000 metros de espessura, logo após a quebra da plataforma, na direção *offshore*.

Os lineamentos mapeados através dos dados gravimétricos, de direção leste – oeste e noroeste – sudeste, tendem a demarcar regiões tectonicamente afetadas, onde a migração de hidrocarbonetos foi eventualmente favorecida. Pode-se especular que os esforços que resultaram na estruturação leste – oeste estejam relacionados à reativação de cicatrizes de falhas transformantes antigas (Karner 2000). Já os de direção noroeste – sudeste podem estar associados com a reativação de faixas de cisalhamento do Ciclo Brasileiro e do Evento Sul-Atlântico, como, por exemplo, a Falha de Porto Seguro, localizada na Bacia de Cumuruxatiba. A expressão sísmica da faixa de cisalhamento de Porto Seguro (configuração em flor positiva, denotando esforços transpressivos) mostra que, desde o embasamento até sedimentos do Albo-Cenomaniano ou até mesmo do Terciário Inferior, o pacote sedimentar sofreu deformação (Santos & Gontijo, 1992).

Foram posicionados, no mapa de Anomalia Bouguer Filtrado (5 – 250 quilômetros), os poços descobridores, produtores ou que acusaram indícios de hidrocarbonetos nas bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha (Figura 82). Os poços utilizados foram: 1-BAS-37 (descobridor de campo com óleo), 1-BAS-68 (seco com indícios de óleo e gás), 1-BAS-18A (produtor subcomercial de gás), 1-BAS-48 (produtor sub-comercial de óleo), 1-BAS-11 (descobridor de campo de óleo) e 1-BAS-104 (descobridor de campo com gás e condensado). Nota-se que, tanto na Bacia de Cumuruxatiba como na de Jequitinhonha, tais poços estão localizados em altos do embasamento, representados por altos gravimétricos na Figura 81. A migração de óleo está possivelmente associada às falhas contíguas a estes horsts, que constituem o elo de ligação entre as rochas geradoras e os reservatórios. Tal mecanismo pode também ter originado rotas de migração até o assoalho oceânico. Assim, a geometria interna das bacias, obtida nos mapas de anomalia Bouguer, pode indicar regiões propícias para a ocorrência de exsudações petrolíferas na presença de arcabouço estrutural análogo (Figura 81). Vale também notar que as exsudações com identificadores 28, 29 e 30 situam-se nas proximidades (cerca de 20 a 40 quilômetros) do alto gravimétrico associado ao complexo vulcânico de Sulphur Minerva.

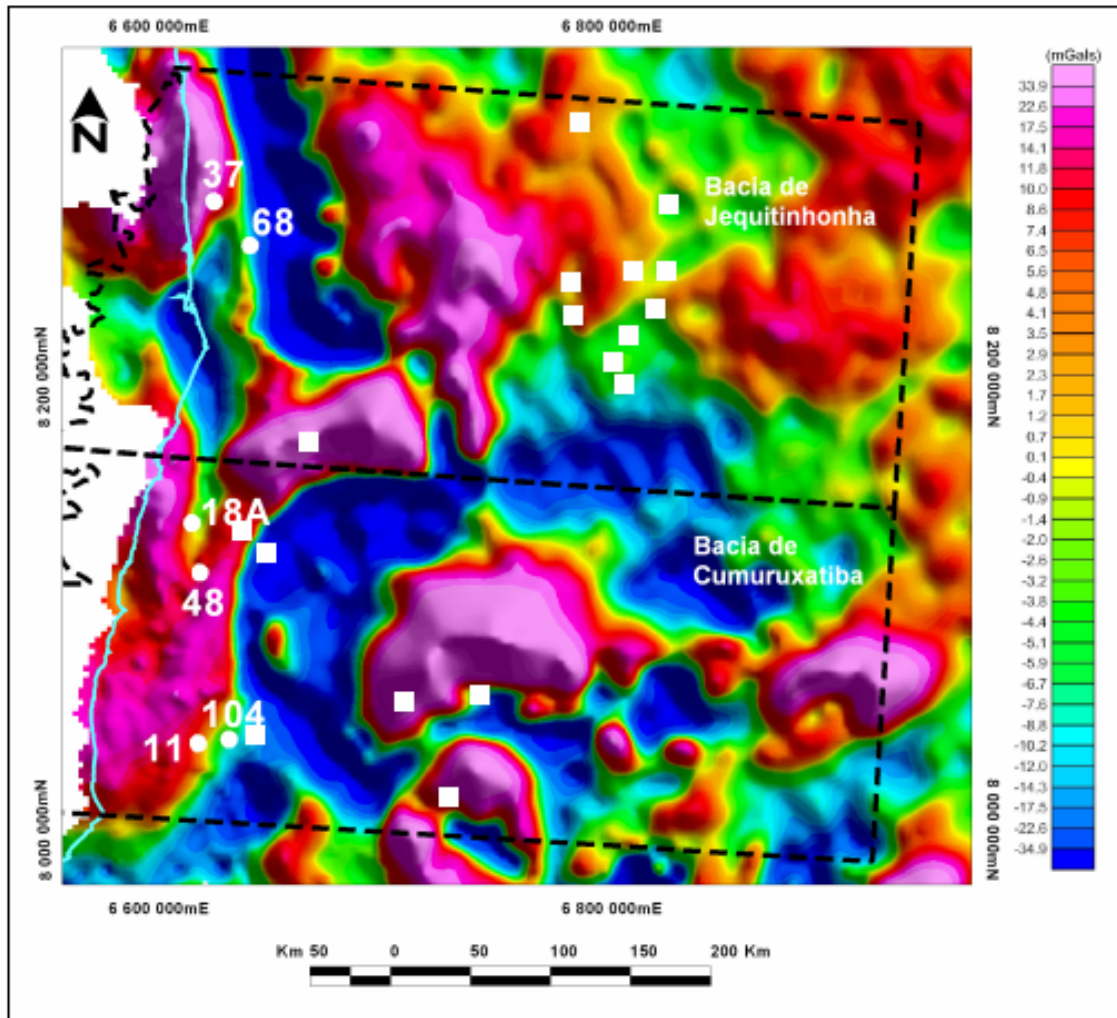


Figura 81 – Mapa de Anomalia Bouguer Filtrado (Passa Banda 5 – 250 km). Sombreamento artificial com 45° de azimute e 45° de elevação da iluminação. A linha de costa está representada em azul claro. A linha tracejada em preto indica o posicionamento geográfico das bacias. Os círculos brancos simbolizam os poços petrolíferos, todos possuindo nomenclatura iniciada por 1-BAS. Os quadrados brancos representam o posicionamento geográfico das dezessete exsudações classificadas.

A posição geográfica das exsudações de óleo interpretadas com base nas imagens RADARSAT-1, juntamente com o cálculo de seu fator de confiabilidade (ranking), confere a três regiões na área de estudo (Figura 82) maior prioridade para inferências de caráter exploratório. As feições que nelas se localizam ocupam os quatro primeiros lugares do ranking de exsudações (Tabela 11), sugerindo a presença de sistema(s) petrolífero(s) ativo(s) e de possíveis rotas de migração de óleo em sua área de ocorrência. As estruturas que serviram como condutos para a ascensão do óleo até o fundo oceânico podem ter preenchido de óleo alguma armadilha no percurso de migração e gerado, assim, acumulações esputáveis.

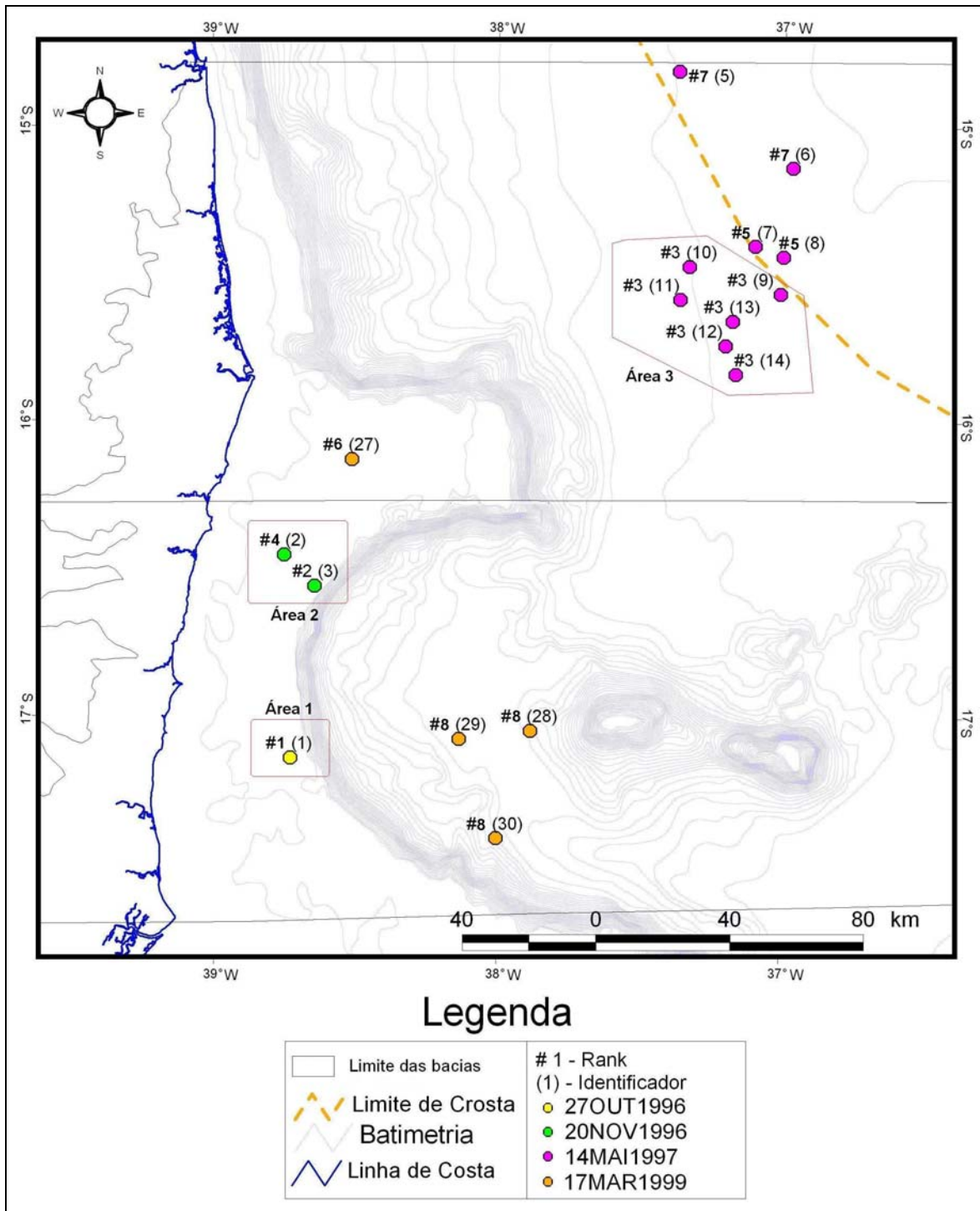


Figura 82 – Localização geográfica das exsudações de óleo identificadas nas imagens RADARSAT-1 e a correspondente hierarquização da confiabilidade de sua interpretação. Delimitadas em vermelho estão as três áreas analisadas em detalhe.

A Área 1 (Figuras 82 e 83) inclui a exsudação de óleo com identificador 1 e *ranking* 1, observada na imagem RADARSAT-1 Wide 1 adquirida em 27/10/1996. Esta feição está próxima dos poços 1-BAS-11 e 1-BAS-104 (cerca de 30 quilômetros), descobridores do Campo de Arraia, e possivelmente associada ao mesmo sistema petrolífero representativo desta acumulação (Regência-Urucutuca (!)). Esta exsudação encontra-se em uma região onde foi mapeado, através dos dados gravimétricos, um lineamento de direção aproximada leste – oeste. Esta direção, como mencionado anteriormente, pode estar associada a falhas transformantes antigas e ter servido de duto para a ascensão do óleo até o assoalho oceânico. Além disso, a citada exsudação situa-se no prolongamento da falha de Porto Seguro, que sofreu reativações transpressivas no Terciário.

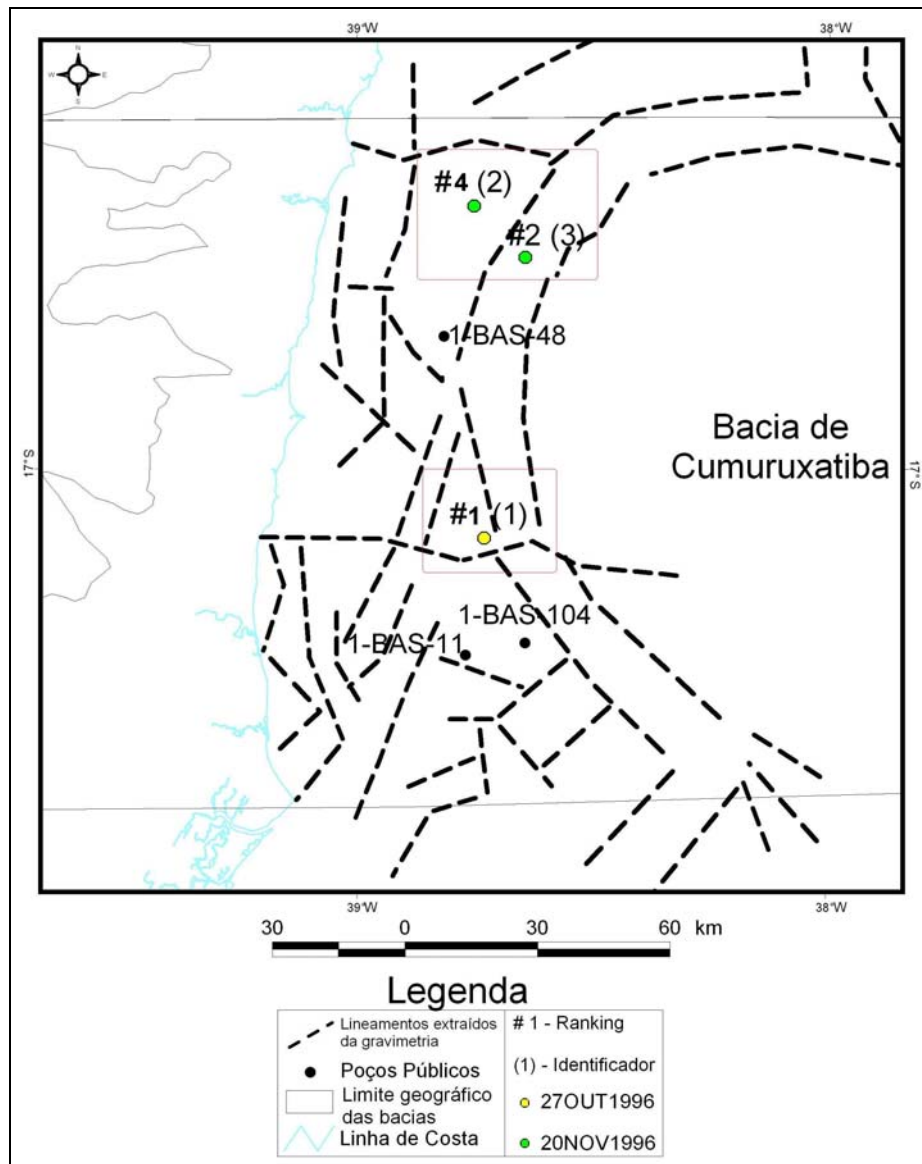


Figura 83 – Posicionamento geográfico dos poços (1-BAS-48, 1-BAS-11 e 1-BAS-104) produtores e descobridores de hidrocarbonetos, além das exsudações de óleo das Áreas 1 e 2 da Figura 83.

Na Área 2 (Figuras 82 e 83), existem duas exsudações com identificadores 2 e 3, observadas na imagem RADARSAT-1 Wide 1 adquirida em 20/11/1996. Estas feições apresentam *ranking* #4 e #2, respectivamente, e estão posicionadas próximas ao poço 1-BAS-48 (em torno de 30 quilômetros), representativo do sistema petrolífero Cricaré-Cricaré (!). Elas podem, portanto, estar geneticamente relacionadas a este sistema. A norte destas exsudações existe um lineamento de direção leste – oeste, possivelmente associado a cicatrizes de falhas transformantes antigas, que podem ter permitido a migração de óleo até o assoalho oceânico.

A Área 3 (Figura 82) localiza-se em águas ultra profundas, com cerca de 4.000 metros de lâmina d'água. Foram observadas dez exsudações de óleo na imagem RADARSAT-1 ScanSAR Narrow 1, adquirida em 14/05/1997. Seis delas obtiveram um fator de confiabilidade 3, com os seguintes identificadores: 9,10,11,12,13 e 14. Esta é uma área de fronteira exploratória, próxima ao limite entre as crostas continental e oceânica, onde estudos mais detalhados devem ser realizados para o melhor entendimento do fenômeno de exsudação petrolífera. Entretanto, é interessante notar que as feições da Área 3 encontram-se aparentemente em altos do embasamento, representados por altos gravimétricos na Figura 81.

É possível propor um sistema petrolífero especulativo para a Área 3, tendo por rocha geradora os folhelhos Cenomanianos-Turonianos da Formação Urucutuca e por reservatórios os arenitos turbidíticos a eles intercalados, ou seja, Urucutuca-Urucutuca (?). Vale ressaltar que tal proposição é consistente com a conceituação de Magoon (1994), segundo a qual a existência da rocha geradora ou de petróleo em um sistema especulativo é baseada tão somente em evidências geológicas e geofísicas (no caso, as feições interpretadas como exsudações de óleo nas imagens RADARSAT-1).

Para tal sistema petrolífero, o aporte sedimentar em águas ultra profundas ocorreria através de caninos como os de Belmonte e Canavieiras (Figura 06).

A modelagem gravimétrica realizada próximo às ocorrências descritas (identificadores de 9 a 14) mostra uma espessura sedimentar, nas proximidades do contato entre a crosta oceânica e a crosta continental, não superior a 2.000 metros (perfil P1, Figura 36). Tal resultado sugere, deficiência na sobrecarga sedimentar necessária para a maturação da matéria orgânica e posterior geração e migração de óleo. Esta constatação é um complicador para a adoção da hipótese do sistema petrolífero Urucutuca-Urucutuca (?).

6. Conclusões e Recomendações

A detecção de manchas de óleo no mar associadas a exsudações, utilizando imagens RADARSAT-1, sugere fortemente a presença de sistemas petrolíferos ativos em bacias sedimentares *offshore*. A existência de exsudações de óleo na superfície do oceano pode ser considerada um indicador positivo da geração e migração de hidrocarbonetos, diminuindo o risco exploratório em fronteiras exploratórias em águas profundas. O trabalho de pesquisa aqui apresentado demonstrou a adequação dessa metodologia as características geológicas e ambientais das bacias de Jequitinhonha e Cumuruxatiba.

O algoritmo de classificação textural USTC, aplicado aos dados RADARSAT-1 Wide 1, ScanSAR Narrow 1 e ScanSAR Wide, se mostrou efetivo no realce de feições relacionadas a exsudações de óleo na superfície do oceano. Os sistemas sensores utilizados para medições meteorológicas e oceanográficas obtiveram bom resultado, fornecendo informações sobre as condições ambientais no horário (ou próximo) da aquisição dos dados RADARSAT-1. Houve boa correlação entre a radiometria das imagens SAR e as informações adquiridas pelos seguintes sensores: AVHRR (satélite NOAA), Imager (satélite GOES) e SSMI (satélite DMSP – F13). Desta forma, as incertezas associadas a falsos alvos foram reduzidas, gerando maior credibilidade na interpretação de feições de óleo como exsudações.

Com base na hierarquização das dezessete (17) exsudações de óleo encontradas nas seis imagens RADARSAT-1 utilizadas, foi possível identificar três áreas com feições cuja posição no ranking foi igual ou maior que três (3). Duas delas estão localizadas na plataforma continental da Bacia de Cumuruxatiba (em torno de 30 metros de lâmina d'água), em regiões onde já foram constatados sistemas petrolíferos ativos através de poços perfurados: Regência – Urucutuca (!) e Cricaré – Cricaré (!). Na Bacia de Jequitinhonha encontra-se a terceira área, posicionada próxima ao limite entre a crosta oceânica e a crosta continental (mapeado neste trabalho através dos dados gravimétricos), em águas ultra profundas (4.000 metros de lâmina d'água). As exsudações de óleo encontradas nesta região caracterizam uma nova fronteira exploratória, onde foi tentativamente proposto o sistema petrolífero Urucutuca-Urucutuca (?).

A continuidade operacional dos modos de aquisição RADARSAT-1 utilizados neste trabalho está assegurada pelo lançamento, em 2006, do satélite RADARSAT-2. Além disso a resolução espacial nominal das imagens SAR por ele fornecidas irá aumentar, chegando a três metros. Este aumento na resolução das cenas, juntamente com a capacidade polarimétrica que este sensor possuirá, aumentará ainda mais a potencialidade de detecção de óleo na superfície do mar com sistemas orbitais de radar.

A integração dos três levantamentos gravimétricos utilizados neste trabalho possibilitou a caracterização geométrica da calha rifte das bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha. Os principais compartimentos sedimentares das citadas bacias foram identificados nos mapas de Anomalia Bouguer e Bouguer Filtrado. As calhas sedimentares limitam-se

lateralmente por fortes gradientes gravimétricos, evidenciando um forte contraste de densidade e a presença de falhas confinando estes compartimentos.

As estruturas geológicas existentes na literatura, mapeadas através da sísmica de reflexão, apresentam boa correlação com os dados gravimétricos aqui analisados. Assim, fica demonstrada a importância de uma avaliação deste tipo previamente a uma campanha sísmica e tornam-se validadas as filtragens aplicadas ao Mapa de Anomalia Bouguer.

A filtragem Passa Banda (5 – 250 quilômetros), aplicada ao Mapa de Anomalia Bouguer, foi utilizada para analisar qualitativamente a geometria de ambas as bacias. O resultado obtido na Bacia de Jequitinhonha foi a identificação da Plataforma Rasa (Gaglione, 1987), do Complexo Vulcânico de Royal Charlotte, da Calha Rifte Principal, do Horst Central e da Calha Secundária. Na Bacia de Cumuruxatiba, foram caracterizados por esta filtragem os compartimentos tectônicos Embasamento Raso e Baixo Sul (Gontijo, 1996), os complexos vulcânicos de Sulphur Minerva e Abrolhos, além da continuação da Calha Secundária da Bacia de Jequitinhonha.

As seis modelagens gravimétricas realizadas em ambas as bacias também possibilitaram a identificação dos principais compartimentos tectônicos e linhas de charneira descritos na literatura. Esta abordagem permitiu também quantificar as espessuras sedimentares da Calha Rifte Principal da Bacia de Jequitinhonha, em torno de 9.000 metros, e também da Calha Secundária, 3.000 a 3.500 metros. Na Bacia de Cumuruxatiba, a sedimentação atribuída a Calha Rifte Principal varia de 7.000 até 10.000 metros de espessura. Os Complexos Vulcânicos de Royal Charlotte, Sulphur Minerva e Abrolhos foram amostrados nos perfis gravimétricos realizados e representaram anomalias gravimétricas positivas bem marcantes em relação as rochas adjacentes menos densas.

A extração dos lineamentos ao nível do embasamento foi obtida através da filtragem Passa Banda (5 – 22 quilômetros) do Mapa de Anomalia Bouguer. Esta análise possibilitou a identificação mais precisa dos compartimentos tectônicos observados na filtragem mais regional (5 – 250 quilômetros), com o acréscimo dos compartimentos tectônicos Degrau Interno e Patamar da Anidrita, além das falhas de Porto Seguro e de Itaquena na Bacia de Cumuruxatiba. Na Bacia de Jequitinhonha as mesmas feições gravimétricas reconhecidas na filtragem mais regional foram também mapeadas, sendo identificada uma nova calha localizada na porção central e próxima a costa da bacia denominada Calha Secundária II. Os lineamentos extraídos através desta filtragem (5 – 22 quilômetros) obtiveram boa correlação com a geologia estrutural descrita na literatura e mapeou novas feições contribuindo para um melhor entendimento da geologia regional de ambas as bacias. Foram identificados lineamentos de direção leste – oeste e noroeste – sudeste, que podem estar associados a regiões tectonicamente afetadas, que geraram um favorecimento para a migração de hidrocarbonetos nestas áreas.

Os resultados aqui apresentados demonstram a importância da realização de levantamentos sistemáticos, nas bacias de Jequitinhonha e Cumuruxatiba, utilizando dados RADARSAT-1, ENVISAT e RADARSAT-2 (estes quando disponíveis). Tal

procedimento pode indicar, ao longo do tempo, a presença de agrupamentos de exsudações em pontos específicos dessas fronteiras exploratórias. Recomenda-se que, nas áreas de ocorrência desses agrupamentos, amostras de óleo na superfície do mar sejam coletadas para análise geoquímica de alta resolução, visando caracterizar possíveis sistemas petrolíferos ativos. Além disso, a aquisição de testemunhos do assoalho oceânico (*piston core*), é uma forma de confirmar o relacionamento do óleo encontrado na superfície do oceano com o fenômeno de exsudação petrolífera.

7. Bibliografia

- AGÊNCIA Nacional do Petróleo. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acesso em 15 Mai. 2004.
- ASMUS, H.E., GOMES, J.B., PEREIRA, A.C.B. Integração geológica regional da Bacia do Espírito Santo. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**, 25., 1971, São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1971. p 235-252, v.3
- BANCO de Dados de Exploração e Produção. Disponível em: <http://www.bdep.gov.br>. Acesso em 26 Jun. 2004.
- BEHN, M. D. Segmentation in gravity and magnetic anomalies along the U.S. East Coast passive margin: implications for incipient structure of the oceanic lithosphere. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 105, p.769-790. 2000.
- CANADA Centre for Remote Sensing. Disponível em: <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>. Acesso em 10 Abr. 2004.
- CÔGO DE SÁ, N., BLITZKOW, D., 1986, “Uma Tentativa de Homogeneizar os Dados Gravimétricos no Brasil”. In: Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 4, pp 73-77.
- CORDOBA, Valéria C. **Microfácies, modelo deposicional e evolução da plataforma carbonática albo-cenomaniana da Bacia de Jequitinhonha**. 1990. f.Dissertação (Mestrado em Geociências) – Ouro Preto: UFOP, 1990.
- CURRAN, P. J. **Principles of remote sensing**. London: Editora Longman, 1985.
- DPC & Assoc., RELATÓRIO Anual: Petroleum Systems of Brazil. Rio de Janeiro, 2000.
- EXPLORAÇÃO petrolífera. Disponível em: <http://acd.ufrj.br/multimin/mmp/textos/cap1p/index/htm>. Acesso em 22 jul. 2004.
- FERNANDES, F. L. **Arcabouço estrutural e evolução da Bacia de Taubaté – SP**. 1993. f. Dissertação (Mestrado em Geociências) Ouro Preto; UFOP. 1993.
- GAGLIONE, P.C., TRINDADE, L.A.F., NASCIMENTO, M.M., 1987, Avaliação geoquímica das bacias marginais ao Sul da Bahia, Brasil. In: **Congresso Brasileiro de Geoquímica**, 1., 1987, Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geoquímica, 1987. p. 467-491, v.2.
- GEOPROCESSAMENTO e Sensoriamento Remoto. Disponível em: <http://www.threetek.com.br>. Acesso em 25 Ago. 2004.
- HUNG, Kiang Chang et al.1990a, Origem e evolução termodinâmica de bacias sedimentares. In: RAJA GABAGLIA, Guilherme P.; MILANI, Edison José (Coord.). **Origem e evolução de bacias sedimentares**, Rio de Janeiro: Petrobrás, 1990. p. 49 – 71
- HUNG, Kiang Chang, KOWSMANN, Renato O., FIGUEIREDO, Antônio M.F. 1990b. Novos conceitos sobre o desenvolvimento das Bacias Marginais do Leste Brasileiro. In: RAJA GABAGLIA, Guilherme P.; MILANI, Edison José (Coord.). **Origem e evolução de bacias sedimentares**. Rio de Janeiro: Petrobrás, 1990. p. 269 – 289.
- INDA, H.A.V. et al. O Cráton do São Francisco e a faixa de dobramentos Araçuaí. In: **Geologia do Brasil**. Brasília: DNPM, 1984, p 193-199.

- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario/radar_in.htm. Acesso em 02 mar. 2004.
- INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY(IAG). **Geodetic Reference System**. Bull.Geod., Spec. Pub., n.3, p.116, 1967.
- JOHANNESSEN, J.A. et al. SAR ocean feature catalogue. In: **ESA SP-1174**. 1994
- KARNER, Garry.D. Rifts of the Campos and Santos Basin, southeastern Brazil: distribution and timing. In: MELLO, Marcio Rocha; KATZ, Barry J. (Ed.). **Petroleum systems of South Atlantic Margins**. Tulsa: AAPG, 2000. p.301 – 315 (AAPG, Memoir 73).
- LANDIM, P. M. B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. Rio Claro: UNESP, 2000. (Departamento de Geologia Aplicada, Laboratório de Geomatemática – Texto Didático, 2).
- LILLESAND, T.M. KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. Madison: John Wiley & Sons, 1994.
- MACDONALD, I.R., et al. Remote sensing inventory of active oil seeps and chemosynthetic communities in the northern Gulf of Mexico. In: SCHUMACHER, Dietmar; ABRAMS, Michael (Ed.). **Hydrocarbon migration and its near-surface expression**. Tulsa: AAPG, 1966. p 27-37. (AAPG, Memoir 66).
- MAGNAVITA, L.P., et al. Controle da tectônica salífera na distribuição de fácies sedimentares na Bacia de Jequitinhonha, Bahia. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 71, p 1039–1040, 1999.
- MAGOON, Leslie; B.; DOW, Wallace G. The Petroleum system. In: **The Petroleum system – from source to trap**. Tulsa: AAPG, 1994, p.3 – 24. (AAPG Memoir 60).
- MEDEIROS, Walter. Professor de Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Informação Verbal, em 15 Mar. 2004.
- MELLO, M. R., et al. Foz do Amazonas Area: The Last frontier for elephant hydrocarbon accumulations in the South Atlantic realm. In: **Petroleum Provinces of the Twenty-first Century**, Tulsa: AAPG, 2001. (AAPG Memoir 74), p 403-414.
- MILANI, E. J., et al. Petroleum in the brazilian continental margin: geology, exploration, results and perspectives. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.18, n.3, p 352-396., 2000.
- MIRANDA, F.P., et al. Application of unsupervised semivariogram textural classification of RADARSAT-1 data for the detection of natural oil seeps offshore the Amazon River Mouth. In: RADARSAT ADRO SYMPOSIUM, 1998b, Canada. **Proceedings of the RADARSAT ADRO Symposium**, Canada, 1998.
- MIRANDA, F.P. et al. Oil seep detection using RADARSAT-1 data in offshore frontier areas of northern Brazil. In: LATIN AMERICAN CONGRESS ON ORGANIC GEOCHEMISTRY, 6., 1998c, Venezuela. **Proceedings of the 6th Latin American Congress on Organic Geochemistry**, Venezuela: ALAGO, 1998.
- MIRANDA, F.P., et al. 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: AAPG INTERNATIONAL CONFERENCE & EXHIBITION, 1998d, Rio de Janeiro. **Extended Abstracts Volume AAPG International Conference & Exhibition**, Rio de Janeiro, 1998.

- MIRANDA, F.P., et al. Seepage Slick Detection in the Brazilian continental margin using RADARSAT-1 Data, Brazil. In: **Proceedings of OMAE Conference**, Rio de Janeiro, 2001.
- MIRANDA, F.P., et al. Analysis of RADARSAT-1 data for offshore monitoring activities in the Cantarell Complex, Gulf of México, using the unsupervised semivariogram textural classifier (USTC). **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 3, p 1-13., 2004.
- MIZUSAKI, A. M. P. et al. Eventos magmáticos nas Bacias do Espírito Santo, Mucuri e Cumuruxatiba. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**, 38., 1994, Camboriú: Sociedade Brasileira de Geologia, 1994, p 566-568.
- NETTLETON, L. L. **Gravity and magnetics in oil prospecting**. EUA: McGraw Hill Book Company, 1976.
- RADARSAT International. Disponível em: <http://www.rsi.ca>. Acesso em 02 Abr. 2004.
- SÁ, N. Côgo de, BLITZKOW, D. Uma Tentativa de homogeneizar os dados gravimétricos no Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 4, p. 73-77. 1986.
- SABINS, F.F. **Remote sensing: principles and interpretation**. 3 ed. New York: W.H. Freeman and Company, 1997.
- SANTOS, C.F., GONTIJO, R.C. Compartimentação e alinhamentos estruturais da Bacia de Cumuruxatiba (BA). In: **Congresso Brasileiro de Geologia**, 37., 1992, São Paulo. **Resumos...**São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1992, p 564.
- SANTOS, C.F., et al. Bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v.8, n.1, p 185-190, 1994.
- SENSORIAMENTO remoto. Disponível em: http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/Radar_Course_III/real_aperture_radar.htm. Acesso em 22 jul. 2004.
- SISTEMA de Informação Geográfica. Disponível em: <http://snig.igeo.pt/Portugues/RedesTematicas/Rot/index.html>. Acesso em 08 Mar. 2004.
- STAPLES, G.C, D.O. HODGINS, 1998. RADARSAT-1 emergency response for oil spill monitoring. In: **International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environment**, 5., 1998, Califórnia, 1998.
- TALWANI, M., WORZEL, J.L., LANDISMAN, M. Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone". **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 64, n 1, p 49-59, 1959.
- TEORIA de Radar. Disponível em: <http://www.ciat.cgiar.org/dtmradar/radar3-geometria.htm>. Acesso em 26 Jun. 2004.
- TELFORD, W.M., GELDART, L.P., SHERIFF, R.E. **Applied Geophysics**. 2.ed. Cambridge University Press, 1990.
- THOMAZ FILHO, A., et al. Rifting and magmatism associated with the South América and Africa Break Up. **Revista Brasileira de Geociências**, v.30, n.1, p 17-19, 2000.
- THRASHER, Jane et al. Understanding geology as the key to using seepage in exploration: the spectrum of seepage styles. In: SCHUMACHER, Dietmar; ABRAMS, Michael (Ed.). **Hydrocarbon migration and its near-surface expression**. Tulsa: AAPG, 1966. p 223-241. (AAPG, Memoir 66).

- VANNUCCI, T. A. M. **Redução de speckle em imagens radar**. ANO. NÚMERO DE FOLHAS. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em). FACULDADE TAL, Universidade Federal do Paraná, Paraná. ANO
- VASCONCELOS, R. et al. **Geofísica em levantamentos geológicos no Brasil**, Rio de Janeiro: CPRM. 1992.

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](#)