sid.inpe.br/mtc-m19/2013/08.30.19.54-TDI

DETECÇÃO DE POSSÍVEIS ZONAS DE MICROEXSUDAÇÕES DE HIDROCARBONETOS NA BACIA POTIGUAR ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO DE IMAGENS LANDSAT COM DADOS DE CAMPO

Igor Peregrino da Silva Sena

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Raimundo Almeida Filho, e Fernando Pellon de Miranda aprovada em 26 de setembro de 2013.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3ENPCHB>

INPE
São José dos Campos
2013

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GB)
Serviço de Informação e Documentação (SID)
Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/6921
Fax: (012) 3208-6919
E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):
Presidente:
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Membros:
Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)
Drª Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)
Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)
Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)
Drª Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação
Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)
BIBLIOTECA DIGITAL:
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)
REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)
EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:
Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)
André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)

sid.inpe.br/mtc-m19/2013/08.30.19.54-TDI

DETECÇÃO DE POSSÍVEIS ZONAS DE MICROEXSUDAÇÕES DE HIDROCARBONETOS NA BACIA POTIGUAR ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO DE IMAGENS LANDSAT COM DADOS DE CAMPO

Igor Peregrino da Silva Sena

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Raimundo Almeida Filho, e Fernando Pellon de Miranda aprovada em 26 de setembro de 2013.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3ENPCHB>

INPE
São José dos Campos
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Sena, Igor Peregrino da Silva.

Se55d Detecção de possíveis zonas de microexsudações de hidrocarbonetos na bacia potiguar através da integração de imagens LANDSAT com dados de campo / Igor Peregrino da Silva Sena. – São José dos Campos : INPE, 2013.

xx + 87 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/08.30.19.54-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientadores : Drs. Raimundo Almeida Filho, e Fernando Pellon de Miranda.

1. LANDSAT-TM. 2. microexsudações de hidrocarbonetos. 3. razão de bandas. 4. sensoriamento remoto I.Título.

CDU 528.8:662.767

Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

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

Sensoriamento Remoto

Dr. Lênio Soares Galvão

Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Raimundo Almeida Filho

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Fernando Pellon de Miranda

Orientador(a) / Petrobrás / Rio de Janeiro - RJ

Dr. Carlos Henrique Beisl

Convidado(a) / Fundação Coppetec / Rio de Janeiro - RJ

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(x) unanimidade

Aluno (a): *Igor Peregrino da Silva Sena*

São José dos Campos, 26 de Setembro de 2013

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem a grande ajuda de inúmeras pessoas que me cercam. Muitas foram as “mãos” que direta ou indiretamente ajudaram neste trabalho.

Aos professores Ricardo Farias do Amaral, Vanildo Pereira da Fonseca e Reinaldo Antonio Petta, pelo apoio no ingresso ao programa de mestrado do INPE. E aos professores Raquel Franco de Souza, Cynthia Romariz Duarte e Paulo Sérgio de Rezende Nascimento pelo incentivo à pesquisa e grande ajuda, ainda na fase de graduação.

Ao pesquisador Raimundo Almeida Filho pelo voto de confiança que me foi dado durante a seleção do mestrado e me escolhendo como seu orientado no processo.

Ao amigo geólogo Alexandre Henrique Pereira Barbalho, sem o qual eu não teria condições de fazer a mudança para a cidade de São José dos Campos.

A todos os amigos que conheci durante o curso, sempre prestativos e num ambiente de convivência saudável. Especialmente aos colegas Clayton Borges da Silva e Felipe das Neves Fávaro, por me aguentarem 2 anos sob o mesmo teto e aos colegas do “divino” (Vanessa Bastos, Thiago Batista, Silvia Polizel e Taissa Rodrigues) que nunca perdem o bom humor na hora do trabalho!

A todos os pesquisadores que utilizaram uma parte do seu precioso tempo para atuar como ótimos professores na pós-graduação, como João Lorenzetti, Camilo Rennó, José Epiphanio, Guaraci Erthal, entre outros.

Ao Dr. Fernando Pellon de Miranda por ter me “adotado” no meio dessa empreitada e ter aberto inúmeras portas de apoio na Petrobras.

À equipe do setor de geodésia da Petrobrás unidade RN/CE pela cessão dos dados MDE LiDAR e mosaico de fotografias aéreas, especialmente à José Wellington Mendes Costa, Geovânio Elias Barbosa, Davi de Lima e Claudionor Soares de Souza pelo enorme apoio prestado durante a realização do trabalho de campo.

Ao Guilherme Assunção Gontijo, pelo grande apoio oferecido na unidade da Petrobrás em Natal-RN e seu esforço em conseguir todo o apoio necessário à atividade de campo e ao Carlos Siqueira Bandeira de Mello do CENPES pelo valoroso apoio na metodologia de coleta das amostras de solo.

À gerência de geoquímica da Petrobrás/CENPES pelas análises cromatográficas das amostras de solo.

Ao Professor Fernando Antonio Pessoa Lira Lins do laboratório de geologia e geofísica do petróleo da UFRN, pela cessão dos aparelhos Superspec RS 125 e Kappameter, assim como a enorme ajuda de Williame Cocentino na operação dos equipamentos.

Às secretárias da PGSER, Vera Gabriel da Silva Pontes e Valéria Abrão, pela enorme presteza e desempenho excepcional de suas funções.

Ao Luiz Antonio Paiva pelo apoio intelectual e amizade nestes anos de mestrado.

Por fim, gostaria de agradecer a minha família pelo grande apoio nesta empreitada, principalmente a minha mãe, Iedna Peregrino da Silva, e minha irmã, Ingrid Peregrino da Silva Sena. Sem nenhum dos citados aqui, nada disso seria possível.

RESUMO

Imagens de sensoriamento remoto são cada vez mais utilizadas hoje em dia como ferramenta auxiliar na pesquisa de óleo e gás. Elas são utilizadas com o objetivo de selecionar áreas-alvo potenciais, no esforço de reduzir os riscos das campanhas exploratórias. As tecnologias modernas incluem imagens obtidas por diferentes sistemas de sensores remotos orbitais, que são realçadas por diferentes técnicas de processamento digital. As imagens realçadas são analisadas em conjunto com uma série de informações adicionais, que podem incluir dados geofísicos, geoquímicos, topográficos e geológicos. Este trabalho utilizou o sensoriamento remoto com o objetivo de detectar áreas anômalas, possivelmente associadas às microexsudações de hidrocarbonetos. O campo petrolífero de Fazenda Belém/CE, localizado na porção emersa da Bacia Potiguar, foi a área teste escolhida. Imagens do sensor Thematic Mapper do satélite LANDSAT 5, realçadas utilizando técnicas como razões de bandas e componentes principais seletivas, apresentaram algumas áreas de anomalias tonais, interpretadas como possíveis ocorrências de microexsudação de hidrocarbonetos. Mapas de lineamentos indicativos de falhas e fraturas extraídos de modelos digitais de elevação SRTM e LiDAR foram utilizados para apoiar a interpretação geológica nas áreas de anomalias tonais. Adicionalmente, dados de gasometria de solo (metano-pentano), bem como susceptibilidade magnética, gamaespectrometria in situ foram obtidos. As dosagens geoquímicas de solos obtidas possuem valores muito baixos de concentração de gases. No entanto, algumas das amostras de gases possuem indícios de uma fonte termogênica por possuírem uma razão etano/eteno alta. Indicando que as anomalias tonais podem ser uma expressão dos hidrocarbonetos em subsuperfície.

DETECTION OF POSSIBLE HYDROCARBON MICROSEEPAGE ZONES BY INTEGRATING LANDSAT IMAGERY AND FIELD DATA AT POTIGUAR BASIN, BRAZIL

ABSTRACT

Nowadays, remote sensing images are increasingly used as an auxiliary exploratory tool for oil and gas. As a tentative effort to reduce exploratory risks, the approaches aim the selection of potential target areas for further field investigation. Modern technologies include images obtained by different orbital remote sensing systems, which are enhanced by different techniques of digital processing. Enhanced images are analyzed in combination with a number of additional information, which may include geophysical, geochemical, topographic and geological data. In present study, remote sensing technology was used aiming at the detection of areas possibly associated with the occurrence of hydrocarbon microseepage, using as a test-site the Fazenda Belém oil field, located on the onshore portion of the Potiguar Basin. LANDSAT-5 Thematic Mapper images enhanced through band-ratio and selective principal component analysis techniques indicated some areas of tonal anomalies, which were interpreted as possibly associated with manifestation of hydrocarbon microseepage. Lineament maps indicative of faults and fractures extracted from SRTM and LiDAR digital elevation models were used to support geological interpretation in these areas of tonal anomalies. In addition, soil gas data (methane to pentane), as well as magnetic susceptibility and gamma spectrometry soil measurements were obtained in these areas. Soil samples indicated very low values of soil gas concentration. However, some samples indicated high ethane/ethene relation, fact that suggests a possible thermogenic origin for the of the soil gas data in the areas, so indicating that tonal anomalies may be manifestation of hydrocarbons in subsurface.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 2.1 – Possíveis caminhos ascendentes de microexudações através de redes de fraturas, juntas, planos de acamamento entre o reservatório e a superfície..... 7
Figura 2.2 – Curvas espectrais de alguns alvos com as bandas espectrais LANDSAT TM realçadas. O comportamento da vegetação (representado pela grama), da caulinita e da hematita é importante para a detecção de microexsudações de hidrocarbonetos. As curvas foram retiradas da biblioteca espectral do aplicativo ENVI 4.8..... 14
Figura 2.3 – Comportamento dos principais alvos de interesse em três diferentes razões de bandas..... 15
Figura 2.4 – Diagrama esquemático do processamento de componentes principais seletivas..... 16
Figura 3.1 – Mapa de localização da área de estudo, com poligonais dos campos de produção de petróleo (em preto)..... 21
Figura 3.2 – Vegetação arbustiva margeando antiga linha sísmica na região do campo de Fazenda Belém..... 22
Figura 3.3 – Plantação jovem de cajueiros..... 23
Figura 3.3 – Carta estratigráfica da Bacia Potiguar..... 25
Figura 3.4 – Modelo de acumulação de óleo no campo de Fazenda Belém..... 28
Figura 4.1 – Fluxograma metodológico de trabalho. Os números indicam a ordem de execução dos processos..... 32
Figura 4.2 – Dados da estação pluviométrica de Aracati. Mensais para os anos de 1979, 1984 e 1993 (a) e diários para o mês de agosto de 1979, 1984 e 1993 (b)..... 33
Figura 4.3 – Localização dos perfis selecionados para coleta de dados em campo..... 36
Figura 4.4 – Susceptibilímetro utilizado em atividade de campo..... 38
Figura 4.5 – Gama espectrômetro utilizado em atividade de campo..... 38
Figura 4.6 – Tratamento da amostra de solo com bactericida. Etapa final de coleta de uma amostra..... 40
Figura 5.1 – Composição colorida TM RGB 2/3, 4/3, 5/7 de 11/08/1984, na qual áreas em magenta representam possíveis zonas de microexsudações de hidrocarbonetos. Notar a presença, na imagem, dos poços do campo de Fazenda Belém..... 42
Figura 5.2 – Composição colorida TM RGB 2/3, 4/3, 5/7 de 04/08/1993, na qual áreas em magenta representam possíveis zonas de microexsudações de hidrocarbonetos..... 43
Figura 5.3 – Composição colorida MSS RGB 4/5, 6/5, 4/5-6/5 de 10/08/1979, na qual áreas em magenta representam possíveis zonas de microexsudações de hidrocarbonetos. Esta imagem precede a implantação do campo de Fazenda Belém..... 45
Figura 5.4 – Composição colorida TM RGB 2/3, 4/3, 2/3-4/3 de 11/08/1984, na qual áreas em magenta representam possíveis zonas de microexsudações de hidrocarbonetos..... 46
Figura 5.5 – Composição colorida TM RGB 2/3, 4/3, 2/3-4/3 de 04/08/1993, na qual 47

áreas em magenta representam possíveis zonas de microexsudações de hidrocarbonetos.....
Figura 5.6 – Detalhe da composição colorida da imagem de 1979. Setas indicam possíveis áreas de interesse..... 48
Figura 5.7 – Detalhe da composição colorida da imagem de 1984. Setas indicam possíveis áreas de interesse. Existe repetição de algumas zonas encontradas na imagem de 1979..... 48
Figura 5.8 – Composição colorida da imagem de 1993. Setas indicam possíveis áreas de interesse. As zonas destacadas são mais restritas devido à maior presença de vegetação em relação à imagem de 1984..... 49
Figura 5.9 – Exemplo de comportamento esperado de dois alvos nas componentes principais seletivas entre as bandas TM 3 e TM 4..... 50
Figura 5.10 – Composição colorida entre CP's 2 RGB 2/3, 3/4, 5/7. Não existem alvos tendendo a preto na imagem. FZB representa o campo de Fazenda Belém e IC o campo de Icapuí..... 51
Figura 5.11 – Rede de drenagem extraída do MDE SRTM. FZB representa o campo de Fazenda Belém e IC o campo de Icapuí..... 53
Figura 5.12 – Rede de drenagem extraída do MDE LiDAR. FZB representa o campo de Fazenda Belém e IC o campo de Icapuí..... 54
Figura 5.13 – Mapa geológico da CPRM (CAVALCANTE, 2003) com estruturas geológicas interpretadas por Sousa (2002) superpostas. LPGFB é o lineamento Ponta Grossa – Fazenda Belém..... 55
Figura 5.14 – Lineamentos de drenagem interpretados manualmente a partir das duas redes de drenagem. Os vermelhos foram interpretados do MDE SRTM e os pretos, do MDE LiDAR..... 56
Figura 5.15 – Diagramas de rosetas com comprimento absoluto (a) e frequência absoluta (b) dos lineamentos extraídos do MDE SRTM..... 59
Figura 5.16 – Diagramas de rosetas com comprimento absoluto (a) e frequência absoluta (b) dos lineamentos extraídos do MDE LiDAR..... 60
Figura 5.17 – Densidade de lineamentos de drenagem (Km de lineamento por Km²) filtrados na direção N-S sobre imagem LANDSAT. Limites dos campos de Fazenda Belém e Icapuí em preto..... 61
Figura 5.18 – Densidade de lineamentos de drenagem (Km de lineamento por Km²) filtrados na direção NE-SW sobre imagem LANDSAT. Limites dos campos de Fazenda Belém e Icapuí em preto..... 62
Figura 5.19 – Densidade de lineamentos de drenagem (Km de lineamento por Km²) filtrados na direção NW-SE sobre imagem LANDSAT. Limites dos campos de Fazenda Belém e Icapuí em preto..... 63
Figura 5.20 – Densidade de lineamentos de drenagem (Km de lineamento por Km²) filtrados na direção E-W sobre imagem LANDSAT. Limites dos campos de Fazenda Belém e Icapuí em preto. Foi a única das direções de lineamentos que apresenta mais de 1,4 km de lineamento por km² na janela de análise de 1500 m..... 64
Figura 5.21 – Histograma de valores de razão etano/eteno. O valor de cada classe corresponde ao seu limite superior. Os intervalos de valores são de 0,25. Notar os valores acima de 1,5 com comportamento diferente das demais. 69
Figura 5.22 – Amostras anômalas (razão Etano/Eteno maior que 1,5) em destaque em relação aos perfis amostrados na área de estudo..... 70
Figura 5.23 – Anomalias gasométricas x anomalias nas imagens para o perfil 3. Notar 71

a presença de pontos com razão etano/eteno maior que 1,5 dentro de áreas em magenta na imagem. Composição colorida da Figura 5.5.....
Figura 5.24 – Anomalias gasométricas x anomalias nas imagens para o perfil 3. Notar a presença de pontos com razão etano/eteno maior que 1,5 dentro de áreas em azul na imagem. Composição colorida da Figura 5.10..... 72
Figura 5.25 – Anomalias gasométricas x MDE LiDAR e lineamentos para o perfil 3. Notar que o perfil amostrado encontra-se num platô, sendo esta a zona mais elevada da área de estudo..... 73

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 2.1 – Informações sobre as resoluções do sensor MSS..... 17
Tabela 2.2 – Informações sobre as resoluções espectral e espacial do sensor TM..... 18
Tabela 5.1 – Autovetores de cada par de bandas/componentes principais..... 49
Tabela 5.2 – Resultados da análise exploratória dos lineamentos de drenagem do MDE SRTM no aplicativo SPRING..... 58
Tabela 5.3 – Resultados da análise exploratória dos lineamentos de drenagem do MDE LiDAR no aplicativo SPRING..... 59
Tabela 5.4 – Resultados da medição de radiação total e concentração de U, Th e K em cada um dos pontos amostrados..... 65
Tabela 5.5 – Resultados da medição de susceptibilidade magnética em cada um dos pontos/perfis amostrados. Pontos com – indicam que não houve visita/medição..... 67
Tabela 5.6 –. Resultados da medição de gasometria de solos em cada um dos pontos amostrados..... 68

SUMÁRIO

Pág.

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 Objetivos 3

2 REFERENCIAL TEÓRICO 5

2.1 Mecanismos de migração 5

2.2 Tipos de alterações na superfície 8

2.3 Detecção das exsudações por sensoriamento remoto 10

2.3.1 Lixiviação de arenitos vermelhos 12

2.3.2 Caulinização 12

2.3.3 Enriquecimento em carbonatos 13

2.3.4 Estresse da vegetação 13

2.4 Processamentos de realce das feições diagnósticas 13

2.4.1 Razões de bandas 14

2.4.2 Análise por componentes principais 16

2.5 Principais características dos sensores MSS e TM 17

2.5.1 MSS 17

2.5.2 TM 17

2.6 Principais características dos modelos SRTM e LiDAR 18

2.6.1 SRTM 18

2.6.2 LiDAR 18

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 21

3.1 Localização 21

3.2 Clima e vegetação 22

3.3 Geomorfologia 22

3.4 Geologia 23
3.4.1 Evolução e litoestratigrafia 23
3.4.2 Campos de petróleo de Fazenda Belém e Icapuí 28
3.4.3 Neotectônica 29
4 MATERIAIS E MÉTODOS 31
4.1 Materiais 31
4.2 Métodos 31
4.2.1 Aquisição de imagens 31
4.2.2 Processamento das imagens 32
4.2.3 Definição de avlos preliminares 34
4.2.4 Aquisição de MDE's 35
4.2.5 Processamento dos modelos digitais de elevação 35
4.2.6 Interpretação dos lineamentos de drenagem 37
4.2.7 Atividade de campo 37
4.2.7.1 Suceptibilidade Magnética 37
4.2.7.2 Gamaespectrometria 37
4.2.7.3 Amostragem de gases no solo 39
4.2.7.4 Integração de dados 39
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 41
5.1 Processamento das imagens LANDSAT 41
5.1.1 Razões de bandas 41
5.1.2 Componentes principais seletivas 49
5.2 Lineamentos de drenagem 52
5.3 Atividade de Campo 60
5.3.1 Gamaespectrometria 65

5.3.2 Susceptibilidade Magnética 67

5.3.3 Gasometria do solo 67

5.4 Integração de dados 69

6 CONCLUSÕES 75

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 79

1 INTRODUÇÃO

Os recursos naturais não renováveis possuem uma demanda cada vez maior pela sociedade. Em contrapartida, os mesmos são cada vez mais difíceis de serem localizados. Mais e mais ferramentas prospectivas são utilizadas para auxiliar na detecção de novas jazidas, aumentando a eficiência na sua localização. Dados geoquímicos, geofísicos, estruturais, litológicos, estratigráficos, entre outros, são utilizados como guias na busca de minerais metálicos, industriais e petróleo.

O Sensoriamento Remoto é uma das ferramentas utilizadas para a prospecção mineral e de petróleo. Desde a década de 70, principalmente com os dados da família de satélites Landsat, novas aplicações são desenvolvidas para facilitar a detecção de novas jazidas. Essa série de dados torna-se ainda mais importante quando levamos em conta que os processos geológicos, em sua maioria, possuem um tempo de ocorrência bem maior que as décadas de nossa existência. Sendo assim, a Terra que vemos em uma imagem de 20 anos atrás, é geologicamente muito semelhante à atual, com a vantagem de possuir uma menor interferência do uso do solo pelos habitantes locais.

Atualmente, as imagens de satélite da série Landsat podem ser obtidas gratuitamente através do site da Agência Espacial Norte-Americana (NASA) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Desta forma, estes dados são ainda mais atrativos para aplicação nas mais diversas áreas em que haja interesse.

O petróleo é um dos nossos recursos naturais mais procurados e com demanda sempre crescente. Sua prospecção envolve atividades complexas, que exigem a análise sinergística de dados adquiridos por meio de várias tecnologias, de modo que nos nossos dias raramente uma descoberta comercial de óleo ou gás pode ser atribuída a uma única ferramenta exploratória, mas ao somatório de diferentes tecnologias que se complementam.

Os hidrocarbonetos armazenados em subsuperfície, na maioria das vezes, percolam através das rochas que o contem e vaza em direção à superfície. Quando chegam em seu

estado líquido, geram feições de exsudações (poços de piche, manchas naturais de óleo no mar). Quando chegam apenas na forma gasosa, geram feições conhecidas como microexsudações. As microexsudações não podem ser vistas, mas causam alterações ambientais nos locais onde ocorrem. As exsudações e microexsudações de hidrocarbonetos ocorrem porque, em geral, os reservatórios não são hermeticamente fechados, permitindo o escape de hidrocarbonetos leves e compostos associados para a superfície, através de planos de falhas, fraturas e acamamento das rochas.

O sensoriamento remoto é consagrado na pesquisa petrolífera *offshore* (nas bacias marítimas), onde aplicações com dados na faixa das microondas detectam exsudações de óleo na superfície do mar. Embora antigo, o uso na prospecção petrolífera onshore é mais tímido. Imagens multiespectrais, na faixa do visível e infravermelho, foram utilizadas para detectar feições ligadas às microexsudações de hidrocarbonetos nos trabalhos de: Segal e Merin (1989); Young e McCoy (1990); Schumacher (1996); Jones et al. (2000); Almeida Filho et al. (1998; 2002); Wang e Ding (2000); Almeida Filho (2002); Augusto et al. (2005); FU et al. (2007); Lammoglia et al. (2008); Petrovic et al. (2008); Mohammed et al. (2011), etc.

Nestes trabalhos as microexsudações puderam ser detectadas nas imagens de satélite, pela observação de alterações superficiais por elas causadas. Podendo-se citar a lixiviação de óxidos de ferro, anomalias geobotânicas, anomalias geomórficas e enriquecimento em argilominerais como exemplos. A eficiência das imagens de sensoriamento remoto é maior em regiões áridas e/ou semiáridas, pois a exposição do solo permite que a resposta obtida esteja ligada diretamente ao conjunto solo/rocha, não sendo mascarada pela presença da vegetação densa.

Sabendo que os reservatórios de óleo não são perfeitamente selados, o campo de óleo de Fazenda Belém, no estado do Ceará, foi escolhido como área teste para a detecção de possíveis alterações superficiais causadas pelas microexsudações nas imagens da família Landsat. Além das imagens de satélite, serão utilizados neste trabalho dados topográficos de modelos digitais de elevação (MDE's) e dados geoquímicos e geofísicos de campo, a fim de confirmar as anomalias identificadas. Técnicas de realce

espectral, como razões de bandas e análise por componentes principais, foram escolhidas para proporcionar a identificação das feições nas imagens.

1.1 Objetivos

Este estudo tem como objetivo a análise de imagens do sensor Thematic Mapper do satélite LANDSAT-5 e MSS do satélite LANDSAT-2, complementada com informações geológicas, topográficas, geofísicas e geoquímicas, visando à detecção de possíveis áreas de ocorrência de microexsudações de hidrocarbonetos sobre o campo de óleo de Fazenda Belém na Bacia Potiguar. Como objetivos secundários, pretende-se (a) correlacionar e validar os resultados obtidos com dados geoquímicos e geofísicos de campo, (b) comparar eficiência da metodologia por razões de bandas com a metodologia de componentes principais seletivas e (c), com base em modelos de elevação digital extraídos da Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) e de levantamento por LiDAR (Light Detection And Ranging), analisar a eventual influência de lineamentos indicativos de prováveis falhas e/ou fraturas no condicionamento das feições tonais anômalas que vierem a ser detectadas na área de estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O petróleo origina-se principalmente da degradação termal e craqueamento da matéria orgânica disseminada nas rochas sedimentares. Campos de óleo e gás são formados pela migração dos fluidos resultantes desse processo até sua posterior acumulação em arranjos geológicos favoráveis, denominados armadilhas ou trapas, que são selados hidrodinamicamente (RUAN; FEI, 2000). Este conjunto de condições e processos integra um sistema petrolífero, definido por Magoon e Dow (1994) como um sistema natural que reúne uma célula de rocha fonte ativa e o óleo e gás a ela relacionada, incluindo elementos geológicos e processos essenciais para o acúmulo de hidrocarbonetos. Os elementos essenciais são: rocha fonte de óleo, ou rocha geradora; rocha reservatório; rocha selante; e rochas sobrejacentes. Por processos essenciais entende-se a: formação de armadilhas e a geração-migração-acumulação de petróleo. Porém, esses elementos e processos precisam da ocorrência adequadamente arranjada no tempo-espaço, propiciando a conversão da matéria orgânica da rocha fonte em petróleo e sua migração até o reservatório. Ao longo do tempo geológico, os hidrocarbonetos tendem a continuar procurando caminhos de escape em direção à superfície. Desta forma, a manifestação superficial de hidrocarbonetos numa bacia sedimentar está condicionada à existência de um sistema petrolífero subjacente. Neste item do trabalho, os processos associados à existência de um sistema petrolífero e que indicam sua presença na superfície do terreno serão rapidamente discutidos, tendo como foco os hidrocarbonetos leves (metano - pentano) presentes no solo.

2.1 Mecanismos de migração

As formas de migração de hidrocarbonetos leves em direção à superfície podem ser divididas em três tipos: difusão, efusão (JONES et al., 2000; RUAN; FEI, 2000) e flutuabilidade (RUAN; FEI, 2000).

A difusão consiste no transporte de determinado elemento (em fase fluida) a partir do local onde se encontra mais concentrado, em direção a um ambiente de menor concentração devido à movimentação de suas moléculas. Como não há envolvimento de

forças externas, a difusão é um processo lento, mas constante (RUAN; FEI, 2000). As velocidades de deslocamento dependem da litologia e das condições geológicas (JONES et al., 2000), como o tipo de sedimento atravessado, assim como a espessura e grau de litificação, entre outros fatores. Dos três mecanismos mencionados, este é o de menor importância para as microexsudações, possuindo um papel secundário, a menos que o reservatório seja muito raso.

A efusão é um movimento de hidrocarbonetos em fluido monofásico ou dissolvidos em água que necessita de uma força externa (gradiente de pressão ou tensão) e de um sistema bem definido de condutos. As microexsudações geradas desse fluxo são caracteristicamente confinadas a uma pequena área, gerando anomalias de alto contraste que geralmente contêm hidrocarbonetos de maior peso molecular. Tal movimento é governado pela Lei de Darcy (RUAN; FEI, 2000). A tectônica da área pode influenciar o fluxo até a superfície, sendo que falhas e fraturas fornecem as principais rotas de efusão em subsuperfície (JONES et al., 2000). Acredita-se que o transporte por efusão seja o principal modo de movimentação de hidrocarbonetos do reservatório até o ambiente próximo à superfície (topo da zona saturada/lençol freático). A taxa de transporte vertical, chegando a vários metros por dia, é claramente maior do que a comportada por difusão (JONES; THUNE, 1982). A água subterrânea pode deslocar os hidrocarbonetos lateralmente de acordo com o seu fluxo, principalmente na ausência de fraturas para o transporte. A água da chuva pode defletir anomalias na zona não-saturada do solo. Rostron e Tóth (1996) demonstram a importância da hidrogeologia e das propriedades hidráulicas das rochas na criação e migração de uma pluma de hidrocarbonetos.

Saunders et al. (1999) consideram que a hipótese mais provável de migração de hidrocarbonetos leves é a ascensão vertical flutuante de bolhas de gás de hidrocarbonetos leves ultra-pequenas (tamanho coloidal, 1 nm a 1 μm) através de uma rede de fraturas preenchidas por águas subterrâneas (Figura 2.1). A flutuabilidade se origina da diferença de densidade entre a água e bolhas de hidrocarbonetos gasosos (RUAN; FEI, 2000). Assumindo-se este processo como o principal meio de movimentação, seria difícil a existência de moléculas de pentano ou hidrocarbonetos

mais pesados em quantidades significativas presos no solo, pois, nas condições de temperaturas e pressões superficiais, estão em estado líquido e não têm flutuabilidade suficiente para migrar até a superfície (SAUNDERS et al., 1999; RUAN; FEI, 2000).

Philp (2003) ressalta que vários fatores podem afetar a posição espacial da anomalia em superfície, em relação à fonte de hidrocarbonetos em profundidade. Fatores locais como características litológicas das camadas sobrejacentes, fluxo de águas subterrâneas, grau de fraturamento e profundidade de acumulação podem causar deslocamentos da ordem de quilômetros. Jones et al. (2000) afirmam que a presença de falhas lístricas pode também ocasionar deslocamentos que defletem a localização superficial das anomalias em relação à sua fonte em subsuperfície.

De acordo com o arranjo geológico do local de ocorrência do fenômeno, um desses três fatores deverá sobressair em relação aos outros. Desta forma, a abordagem de detecção das microexsudações deve sempre se levar em conta os aspectos litológicos e estruturais da área.

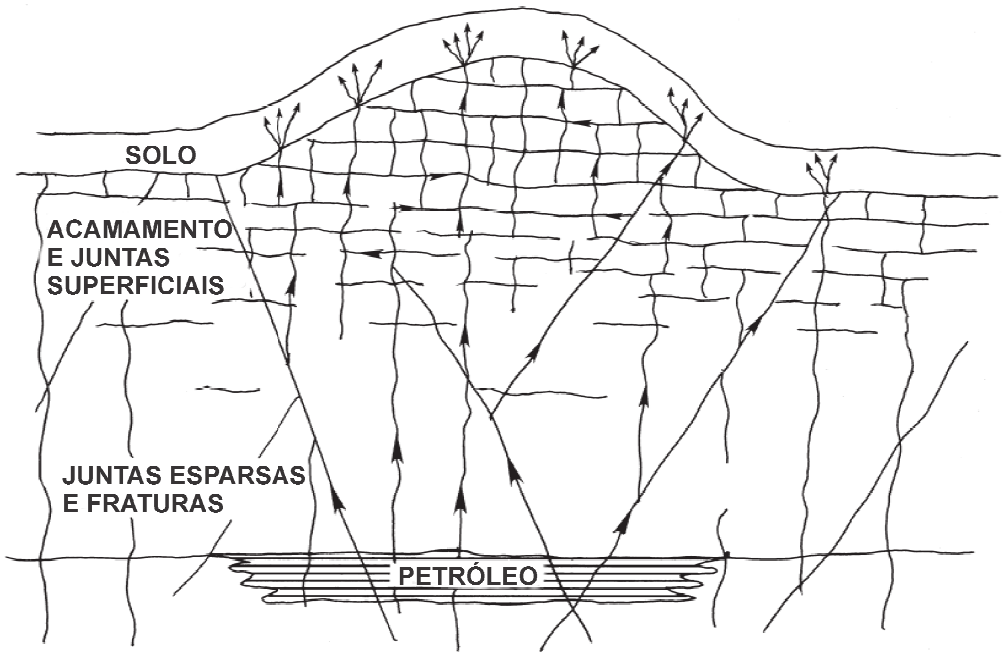

Figura 2.1 – Possíveis caminhos ascendentes de microexudações através de redes de fraturas, juntas e planos de acamamento entre o reservatório e a superfície.
Fonte: Adaptado de Saunders et al. (1999).

2.2 Tipos de alterações na superfície

Os hidrocarbonetos e compostos associados que escapam até a superfície encontram ambientes geoquímicos diferentes daqueles da rocha fonte ou reservatório, provocando uma série de alterações na rocha, solo, água e vegetação, que podem se expressar de formas variadas, tais como anomalias microbianas, mudanças mineralógicas, lixiviação de arenitos vermelhos (*red beds*), alterações de argilominerais e alterações eletroquímicas, além de anomalias de radiação, biogeoquímicas e geobotânicas (SCHUMACHER, 1996; YANG et al., 2000). As alterações ocorrem porque o escape de hidrocarbonetos gera zonas de oxidação e/ou redução que favorecem o desenvolvimento de inúmeros arranjos de mudanças químicas e mineralógicas (KHAN; JACOBSON, 2008).

A presença de arenitos vermelhos (*red beds*) descoloridos na superfície (*bleaching*) ocorre toda vez que fluidos ácidos ou básicos estão presentes para remover óxido férrico (hematita). Esta alteração libera ferro durante a dissolução da hematita, o que favorece a formação de pirita e siderita. Os principais agentes redutores sobre as ocorrências de petróleo são os próprios hidrocarbonetos, H_2S e CO_2 (SCHUMACHER, 1996).

Dentre os efeitos mais comuns de alterações induzidas por hidrocarbonetos nos solos, está a formação de carbonatos diagenéticos e de cimentos carbonáticos. Cimento carbonático preenche poros e é dominantemente controlado por oxidação de hidrocarbonetos causada por bactérias aeróbicas e anaeróbicas (SCHUMACHER, 1996). Segundo Matthews (1986), a maturação precoce do querogênio também pode gerar soluções ricas em oxigênio que dissolvem carbonatos e silicatos instáveis, como o feldspato, gerando porosidade secundária e precipitando carbonatos e silicatos mais acima. Schumacher (1996) alerta que alterações similares também podem ser geradas por outros processos, como atividade hidrotermal, vulcânica, catagênese da matéria orgânica e redução termoquímica do sulfato. Análises cuidadosas necessitam ser feitas para determinar a natureza e a origem dos carbonatos rasos e dos cimentos carbonáticos.

Outra alteração comum, de acordo com Schumacher (1996), é a formação de pirita e outros sulfetos secundários (pirrotita, marcassita, galena, esfalerita e sulfeto nativo). Estas alterações dependem de uma fonte de enxofre no fluido ascendente (petróleo rico em enxofre, atividade de bactérias anaeróbicas, ou oxidação do petróleo em subsuperfície), bem como uma fonte de ferro (óxidos de ferro, águas meteóricas profundas e alguns tipos de minerais e rochas).

O ambiente químico redutor gerado por atividades microbianas pode resultar no desenvolvimento de concentrações de urânio. O urânio oxidado (UO_2^{2+}) é solúvel na água, mas, em ambiente redutor, ele se precipita na forma relativamente insolúvel de uraninita (UO_2) (SCHUMACHER, 1996). Este mesmo ambiente redutor e com baixa acidez favorece o intemperismo diagenético de feldspatos, gerando argilominerais, principalmente caulinita. Esses permanecem quimicamente estáveis no ambiente, a menos que haja mudança no mesmo (SCHUMACHER, 1996). No entanto, sob condições climáticas equatoriais, a caulinita e óxidos/hidróxidos de ferro já são importantes constituintes dos minerais presentes no solo (GALÁN, 2006).

A precipitação dos minerais citados acima gera redução de porosidade do solo e o torna mais endurecido. Este endurecimento faz com que o solo seja mais resistente à erosão e pode formar pequenos altos topográficos (MATTHEWS, 1986).

Os hidrocarbonetos leves interagem com as plantas, podendo causar variações de crescimento da vegetação. As atividades bacterianas diminuem a disponibilidade de oxigênio nos solos e criam ambientes favoráveis à movimentação de elementos traços. Estes elementos traços podem prejudicar o desenvolvimento da vegetação, seja pela falta ou pelo excesso, mas também podem favorecer alguma espécie em relação às outras (SCHUMACHER, 1996). Indiretamente, a redução da porosidade e o endurecimento do solo também podem alterar o desenvolvimento da cobertura vegetal (SCHUMACHER, 1996), com modificações como mudanças estruturais e descoloração das folhas, quedas de folhas, menor densidade de plantas, atrofiamento, e, em casos mais extremos, morte da vegetação (AUGUSTO et al., 2005).

2.3 Detecção das exsudações onshore por sensoriamento remoto

As alterações impostas ao ambiente pela presença de hidrocarbonetos e compostos associados incluem mudanças químicas, mineralógicas, microbiológicas e botânicas complexas. Estas alterações variadas permitem o uso de vários métodos de prospecção, tanto geofísicos, geoquímicos, geobotânicos e pedológicos, quanto sensoriamento remoto. O uso de imagens ópticas de sensoriamento remoto apresenta como principais vantagens um reconhecimento rápido e de baixo custo das alterações impostas no ambiente (YANG et al., 2000), já que nesta faixa as imagens de satélite refletem a composição química dos alvos. No entanto, validação de campo e bom conhecimento dos fenômenos estudados e suas implicações são necessários para que o processamento utilizado não leve a um resultado equivocado. Outro ponto a ser notado é que as respostas destas alterações nas imagens variam com o ambiente e isto torna mais complexa a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto.

Em ambientes onde a rocha ou o solo estão expostos, o uso de técnicas de sensoriamento remoto óptico visa identificar alterações mineralógicas, de coloração do solo e/ou rochas, como também identificar lineamentos e outras estruturas geológicas que controlam o fluxo de hidrocarbonetos. A presença do argilomineral caulinita pode ser indicada com o uso de bandas no infravermelho de ondas curtas (*Short wave infrared* ou SWIR). Os sensores *Thematic Mapper* e *Enhanced Thematic Mapper plus* (TM e ETM+ respectivamente) da série de satélites LANDSAT são úteis na detecção de lineamentos e de mudanças súbitas nas respostas espectrais relacionadas a mudanças na litologia (BAILEY; ANDERSON, 1982; FREEMAN, 2003; HALBOUTY, 1976).

O sensoriamento remoto multiespectral tem potencial de detectar mudanças na litologia, enquanto que imagens hiperespectrais têm potencial para identificar minerais e produtos de alterações (FREEMAN, 2003). Este fato possibilita uma determinação melhor de zonas de alteração relacionadas com microexsudações de hidrocarbonetos. Embora relativamente recentes, vários trabalhos identificaram com sucesso regiões com concentração preferencial de minerais, tais como: óxidos de ferro, jarosita, calcita, caulinita e outros argilominerais (FREEMAN, 2003; KHAN; JACOBSON, 2008;

MOHAMMED et al., 2011; PERRY; KRUSE, 2011). A identificação destes minerais se dá principalmente na área do SWIR do espectro eletromagnético, onde os mesmos possuem feições de absorção características.

Em regiões com cobertura vegetal, a detecção de alterações causadas pela presença de hidrocarbonetos e compostos associados pode ser eventualmente denotada no espectro da vegetação, principalmente na faixa relacionada à clorofila (visível), à estrutura celular (infravermelho próximo) e ao conteúdo de água das folhas (SWIR) (OLIVEIRA, 1998; van der MEER et al., 2002). Os danos estruturais nas plantas causam redução do pico de reflectância característico no infravermelho próximo (near infrared ou NIR), aumento da reflectância no pico de absorção da clorofila devido à sua menor quantidade na planta, e mudança da região do espectro (limite entre o vermelho e o infravermelho próximo) onde a vegetação passa de baixa reflectância para alta reflectância (*red edge*) em direção a comprimentos de onda mais curtos (também chamada *blue shift*) (van der MEER et al., 2000). Estas mudanças estruturais e fisiológicas tendem a ser crônicas, porque as microexsudações ocorrem em períodos de tempo maiores que o tempo de vida da vegetação (FREEMAN, 2003). Tais variações são específicas de cada local, dependendo do clima, drenagem e tipo de solo (EVERETT et al., 2002; SCHUMACHER, 1996). Augusto et al. (2005) encontraram relação satisfatória entre anomalias geobotânicas e medições de teores de hidrocarbonetos numa plantação de eucalipto. É perceptível que a vegetação estressada por alterações impostas pelos hidrocarbonetos apresenta resposta diferente daquela esperada para a vegetação sadia, gerando oportunidade de detecção de hidrocarbonetos no solo por imagens de satélite.

Apesar das microexsudações de hidrocarbonetos afetarem solos e vegetação, não existe uma resposta espectral única, aplicável a todas as ocorrências em diferentes partes do globo. Ou seja, o fenômeno das microexsudações causa alterações distintas em diferentes tipos de solo, vegetação, clima e outros fatores. Em alguns casos, a rocha subjacente, tipo de solo, mistura de solos, topografia e clima podem ter efeito maior no ambiente do que a presença dos hidrocarbonetos em si (SCHUMACHER, 1996) mascarando as feições de alteração. É importante lembrar que nem a ocorrência de microexsudações de petróleo na superfície, e nem a presença de minerais de alteração

garantem que exista uma acumulação rentável em subsuperfície, pois estas alterações também podem ser desenvolvidas a partir de outros fenômenos geológicos. As exsudações podem ainda indicar que o selo do reservatório tem sua integridade comprometida, implicando em perdas nas reservas de óleo ao longo do tempo geológico (FREEMAN, 2003).

Estes meios de detecção remota serão detalhados a seguir, em relação a cada tipo de modificação imposta sobre solos e rochas.

2.3.1 Lixiviação de arenitos vermelhos

O ferro férrico (presente na hematita) possui maiores valores de reflectância em comprimentos de onda maiores que 1,0-1,1 μm, com feição distintiva de absorção em 0,9 μm. Quando presente em solos e rochas, ocasiona queda na reflectância de 0,8 μm em direção a comprimentos de onda menores (HUNT et al., 1973). Por outro lado, minerais ferrosos opacos (pirita e magnetita) apresentam valores baixos e uniformes de reflectância (HUNT; SALISBURY, 1970). Estas características podem ser usadas pelo sensoriamento remoto para separar arenitos lixiviados (esbranquiçados) dos seus equivalentes vermelhos (YANG et al., 2000). Segal e Merin (1989) apontam que mesmo utilizando bandas relativamente largas como as do MSS e TM, é prontamente possível discriminar rochas limonitizadas (avermelhadas) de rochas lixiviadas (esbranquiçadas).

2.3.2 Caulinização

A caulinita possui forte feição de absorção em 2,2 μm e uma feição subordinada em 2,16 μm, formando portanto, um par diagnóstico. Isto pode ser utilizado no sensoriamento remoto para identificar áreas enriquecidas em caulinita (YANG et al, 2000).

2.3.3 Enriquecimento em carbonatos

Métodos de sensoriamento remoto podem detectar o aumento na formação de carbonatos e cimento carbonático induzidos pela oxidação de hidrocarbonetos. Em regiões relativamente áridas, esse enriquecimento pode ser detectado em imagens de satélite como anomalia tonal clara, indicando excesso de caliche nos solos superficiais (YANG et al., 2000). Os enriquecimentos em carbonatos também podem ser determinados selecionando os comprimentos de onda sensíveis a variações na absorção e reflectância da calcita, mais bem pronunciados na região do SWIR (YANG et al., 2000). Os comprimentos de onda utilizados para mapear a concentração de carbonatos (calcita) são tipicamente as de 1,8 μm, 2,0 μm, 2,16 μm, 2,35 μm e 2,55 μm (HUNT; SALISBURY, 1971).

2.3.4 Estresse da vegetação

São duas as formas possíveis de manifestação dos efeitos da microexsudação de hidrocarbonetos na cobertura vegetal: (1) distribuição preferencial de espécies na área, com diferenças de vigor e morfologia (BROOKS, 1972; SIEGEL, 1974), seja pelo desaparecimento de espécies, ou pela presença dominante de espécies (indicadores geobotânicos); (2) diferenças nas características espectrais entre vegetação sadia e estressada, considerando variações no pico do verde, no *red edge* e na altura do patamar do infravermelho próximo (YANG et al., 2000).

Dadas as peculiaridades do comportamento espectral dos alvos afetados, processamentos digitais de realce devem ser aplicados para auxiliar a detecção destas modificações. Vários tipos de processamentos já foram utilizados com sucesso e alguns deles serão detalhados a seguir.

2.4 Processamentos de realce das feições diagnósticas

Conhecendo-se o comportamento espectral das principais feições diagnósticas das microexsudações de hidrocarbonetos, é possível, a partir de métodos de processamento digital, a diferenciação entre rochas ou solos alterados e não alterados. O método mais

extensivamente usado para essa finalidade na resolução espectral do LANDSAT-5 TM, é a razão de bandas. Além deste, outros métodos também podem se mostrar eficientes, como a análise por componentes principais (ACP).

2.4.1 Razões de bandas

Razões entre bandas do LANDSAT MSS, TM ou ETM+ são úteis para a separação e mapeamento de vários materiais alterados. Elas removem variações de brilho e realçam diferenças espectrais entre as bandas. Desta forma, razões de bandas são geralmente saturadas e não mostram informações topográficas (WILFORD; CREASER, 2002). Na figura 2.2 podem ser observadas algumas curvas espectrais de alvos importantes para a identificação das microexsudações de hidrocarbonetos com destaque para as regiões do espectro amostradas por cada banda do sensor TM. A curva da vegetação apresenta seu patamar típico na região do NIR, a caulinita exibe a feição de par diagnóstico na região do SWIR, a hematita representando os óxidos de ferro e suas feições diagnósticas na região do visível e a calcita com suas feições diagnósticas também na região do SWIR.

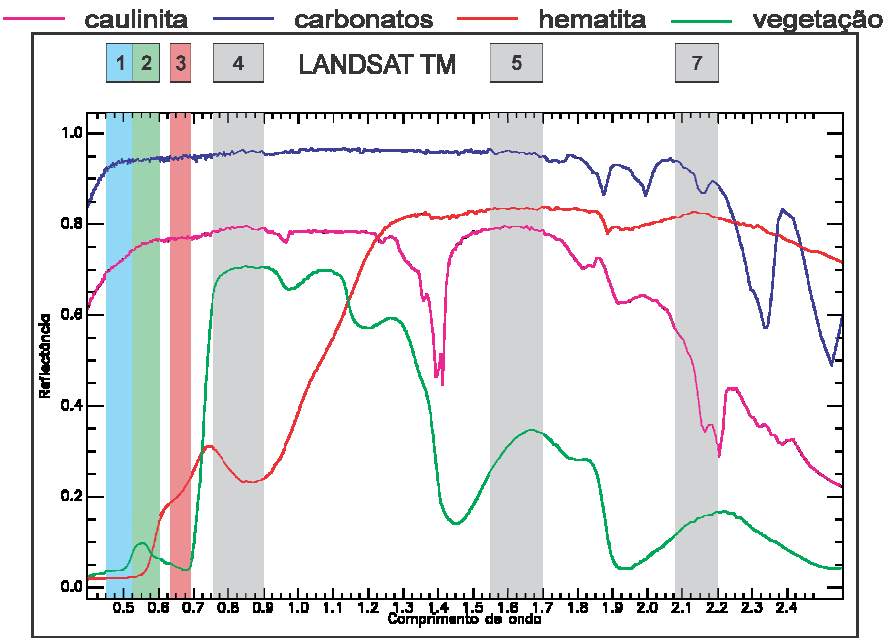

Figura 2.2 – Curvas espectrais de alguns alvos com as bandas espectrais LANDSAT-5 TM realçadas. O comportamento da vegetação (representado pela grama), da caulinita e da hematita é importante para a detecção de microexsudações de hidrocarbonetos. As curvas foram retiradas da biblioteca espectral do aplicativo ENVI 4.8.

A razão de bandas TM 2/3 foi usada por Segal e Merin (1989) para identificar variações no conteúdo de ferro férrico em rochas da Formação Wingate, no Vale Lisbon, onde rochas ricas em ferro férrico exibem baixos valores de razão, enquanto que rochas empobrecidas em ferro ou cobertas com vegetação verde exibem valores altos. Como maneira de remover o efeito ambíguo da vegetação sobre a razão 2/3, Almeida Filho et al. (1998), utilizaram a subtração de razões TM 2/3-4/3 numa composição colorida RGB 2/3, 4/3, (2/3-4/3) para identificar zonas de lixiviação nos solos da Bacia do Tucano. Esta técnica apresenta melhores resultados em áreas de vegetação esparsa e com rochas ricas em ferro (van der MEER et al., 2002).

Utilizando imagens do sensor TM, Segal e Merin (1989) observaram que arenitos pobres em caulinita possuíam valores relativamente menores de razão de bandas 5/7, sendo o mesmo aumentado com o enriquecimento em caulinita de tais litologias. No entanto, os citados autores notaram que a vegetação também exibe resposta semelhante, levando a uma ambigüidade no emprego dessa razão de bandas. Assim, eles utilizaram a razão 3/4 para isolar somente os efeitos da vegetação.

O diagrama esquemático da Figura 2.3 mostra o comportamento dos principais alvos de interesse para detecção de microexsudações de hidrocarbonetos nas razões de bandas TM 2/3, 5/7 e 4/3.

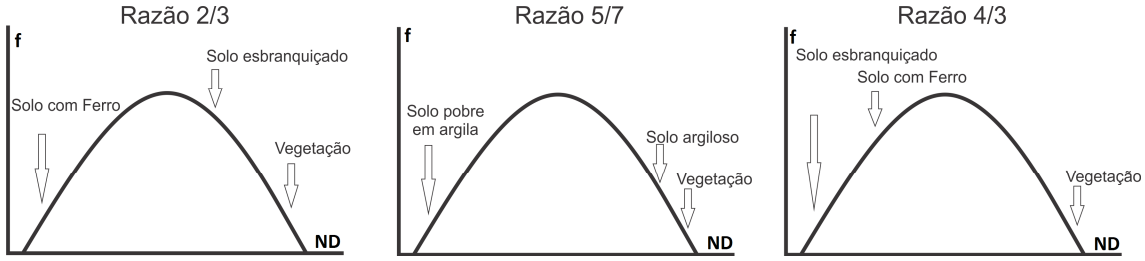

Figura 2.3 – Comportamento dos principais alvos de interesse em três diferentes razões de bandas. Gráficos de frequência x nível digital.
Fonte: Adaptado de Segal e Merin (1989).

2.4.2 Análise por componentes principais

Algumas vezes, o usuário está mais interessado em informações que são únicas a uma banda espectral, ao invés das características espectrais dos vários tipos de cobertura na imagem. Utilizando apenas duas imagens na análise por componentes principais, a informação que é comum a ambas será mapeada para a primeira componente (CP1), enquanto que as informações que são únicas para qualquer uma delas serão mapeadas para a segunda componente (CP2) com relativo contraste entre elas (Figura 2.4) (CHAVEZ; KWARTENG, 1989). Alvos com reflectância semelhante nas duas bandas utilizadas são aglomerados com os alvos com comportamento divergente na CP1 impossibilitando uma discriminação. Porém, na CP2, os alvos com comportamento divergente vão se concentrar nas bordas dos histogramas das imagens, podendo ser distinguidos do restante dos dados. Esta técnica é conhecida como análise por componentes principais seletivas.

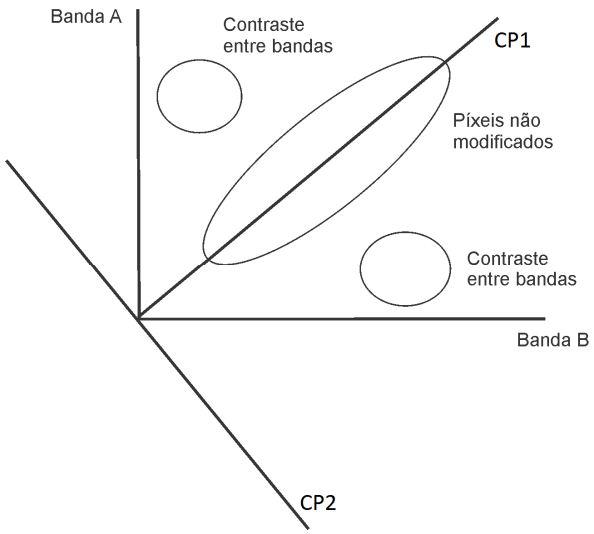

Figura 2.4 – Diagrama esquemático do processamento de componentes principais seletivas.
Fonte: Adaptado de Pereira (1992).

Dentre as vantagens desta técnica, Souza Filho e Drury (1997) ressaltam: a interpretação muito mais fácil dos autovetores, que necessitam apenas de uma pequena experiência com ACP e das características espectrais dos alvos; o aumento significante

da relação sinal-ruído de todas as imagens resultantes; um pequeno tempo computacional.

2.5 Principais características dos sensores MSS e TM

2.5.1 MSS

O sensor MSS é uma das cargas úteis dos satélites LANDSAT-1, LANDSAT-2 e LANDSAT-3, LANDSAT-4 e LANDSAT-5. Ele possui quatro bandas dispostas no visível e infravermelho próximo (*visible near infrared* ou VNIR). O sensor operou no período de 1972 a 1983 nas plataformas 1 a 3. Os satélites LANDSAT-1 a 3 apresentam período de revisita de 18 dias em órbita polar heliossíncrona descendente. As principais características do sensor MSS podem ser vistas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Informações sobre as resoluções do sensor MSS.

Banda	Resolução espectral (µm)	Resolução espacial (m)
4	0,50-0,60	80
5	0,61-0,71	
6	0,70-0,80	
7	0,81-1,10	

2.5.2 TM

O sensor TM é uma das cargas úteis do satélite LANDSAT-5. Ele possui seis bandas dispostas no VNIR e SWIR e uma banda no TIR. O sensor opera desde 1984, porém a aquisição de imagens foi suspensa em novembro de 2011, devido a problemas de transmissão de dados. O satélite LANDSAT-5 apresenta período de revisita de 16 dias em órbita polar heliossíncrona descendente. As principais características do sensor TM podem ser vistas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Informações sobre as resoluções espectral e espacial do sensor TM.

Banda	Resolução espectral (µm)	Resolução espacial (m)
1	0,45-0,52	
2	0,52-0,60	
3	0,63-0,69	30
4	0,76-0,90	
5	1,55-1,75	
6	10,4-12,5	120
7	2,08-2,35	30

2.6 Principais características dos modelos SRTM e LiDAR

2.6.1 SRTM

Com sua sigla significando *Shuttle Radar Topography Mission*, a missão SRTM empregou dois conjuntos de radares de abertura sintética (SAR), um emitindo na banda C (5,6 cm) e outro na banda X (3,1 cm), lançados em órbita a bordo do ônibus espacial Endeavour. Após 159 órbitas em aproximadamente 10 dias, foi recoberta a área entre 60º N de latitude e 56º S. O radar da banda C operou emitindo pulsos e recebendo-os de volta a partir de duas antenas com distância de 60 m entre si. A partir do princípio de interferometria radar foi possível (pela diferença de fase entre os pulsos recebidos nas duas antenas) determinar a distância que o alvo está do sensor (FARR et al., 2007).

A partir do processamento dos dados, um modelo com resolução aproximada de 90 m foi disponibilizado pelo USGS ao público em geral. Porém, um produto refinado sobre todo o território nacional brasileiro foi elaborado. Dentre as modificações pretendidas para o novo modelo, constam um aumento na resolução para 30 m, remoção das falhas, redução de artefatos e distribuição da aleatoriedade (VALERIANO, 2005). Este novo produto é distribuído pelo projeto TOPODATA na página web www.dsr.inpe.br/topodata/ ao público em geral.

2.6.2 LiDAR

Representando o acrônimo em inglês para "*Light Detection and Ranging*", o LiDAR é uma tecnologia empregada para coletar dados de elevação densos e precisos sobre a

superfície terrestre. Esta é uma técnica de sensoriamento remoto ativa, que utiliza feixes de laser. Um sistema LiDAR aeroportado é composto por um conjunto de instrumentos: aparelho de laser; unidade de medição inercial de navegação, que monitora os vetores de atitude da aeronave; um GPS de alta precisão aeroportado; uma base GPS, num raio de até 50 Km da aeronave, para realizar correção diferencial dos dados. O comprimento de onda dos pulsos para uso topográfico está contido, geralmente, na faixa entre 1040 e 1065 nm. A aquisição de dados LIDAR independende da iluminação solar e pode ser realizada à noite. Dias úmidos e chuvosos, ou com névoa que limite a visão não devem ser escolhidos para a aquisição dos dados pois a radiação infravermelha não penetra o vapor d'água (GATZIOLIS; ANDERSEN, 2008).

O aparelho de laser emite pulsos (ou feixes) de luz para determinar a distância dos alvos ao sensor. Esta distância é calculada medindo-se precisamente o tempo entre a emissão do pulso e a detecção do sinal refletido de volta ao sensor. A energia laser devolvida ao sistema pode ser armazenada de duas maneiras: como um sinal quase contínuo; ou então quantizado em intervalos de amplitude e guardado como pontos referenciados precisamente no tempo e no espaço (GATZIOLIS; ANDERSEN, 2008). A varredura do sensor no solo é condicionada ao espelho de varredura presente no conjunto óptico do sistema. Um conjunto de lentes e espelhos orienta os pulsos gerados em direção ao terreno. Dentre as configurações empregadas estão o espelho de varredura, espelho oscilante, polígono rotatório, varredura Palmer e varredura de fibras rotatórias (GIONGO et al., 2010).

Os dados obtidos pelo sensor constituem uma nuvem de pontos com coordenadas x, y e z, onde os pontos indesejados são filtrados e removidos por algoritmos, restando apenas aqueles que tocam o solo. Este procedimento visa à posterior geração de um modelo digital de elevação (LIU et al., 2005).

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização

A área de estudo corresponde ao *ring fence* dos campos petrolíferos *onshore* de Fazenda Belem (FB) e Icapuí (IC), localizando-se nos municípios de Icapuí e Aracati, distando aproximadamente 185 km da cidade de Fortaleza/CE. Ela é definida pelas seguintes coordenadas geográficas: 4º 36’ a 4º 48’ de latitude sul e 37º 18’ a 37º 42’ de longitude oeste (Figura 3.1).

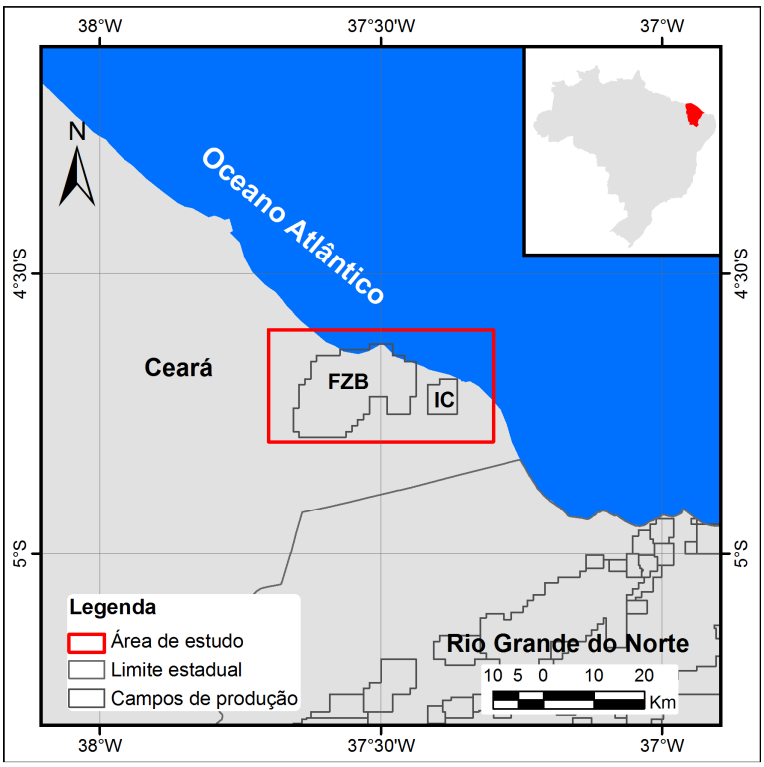

Figura 3.1 – Mapa de localização da área de estudo, com poligonais (em preto) dos campos de produção de petróleo de Fazenda Belém (FZB) e Icapuí (IC).

3.2 Clima e vegetação

A área de estudo está inserida num clima semi-árido, com baixa pluviosidade e temperaturas médias anuais entre 27 e 32º (XAVIER NETO, 2006). O período de maior precipitação ocorre entre os meses de fevereiro e maio e é influenciado principalmente pela Zona de Convergência Intertropical, considerada o principal sistema causador da

pluviometria na porção setentrional do nordeste do Brasil (FUNCEME, 2010). A vegetação na área do campo petrolífero de Fazenda Belém possui caráter arbóreo-arbustivo (Figura 3.2), com estrato herbáceo. As principais espécies vegetais encontradas na região são o cajueiro (*Anacardium occidentale;* Figura 3.3), catingueira (*Caesalpinia pyramidalis*), catanduva (*Piptadenia moniliformis*), jurema de imbira (*Mimosa malacocentra*), cabeça de velho (*Borreria capitata*) e urtigas (*Loasa rupestris*) (NEVES, 2008). Através de estudos da vegetação no estado do Ceará realizados com imagens LANDSAT-TM, Martins et al. (1993) constataram que a microrregião Litoral de Aracati (onde se localiza a área de estudo) já possuía mais de 40% de sua área modificada pelo homem nos anos de 1984/1985. Para o ano de 1990, os mesmos autores indicaram um grau de antropização maior que 60%.

Figura 3.2 – Vegetação arbustiva margeando antiga linha sísmica na região do campo de Fazenda Belém.

3.3 Geomorfologia

A área de estudo encontra-se no domínio dos tabuleiros costeiros, com relevo suave a plano (XAVIER NETO, 2006). Os tabuleiros costeiros foram assim denominados pela predominância de formas tabulares, estendendo-se ao longo do litoral dos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. Tal unidade limita-se, no interior, com a Depressão Sertaneja. Os campos de dunas, bem como as planícies marinhas e flúvio-marinhas quaternárias sobrepostas, estão incluídas na unidade denominada faixa

litorânea e estão inclusas nesta unidade. Os cursos inferiores dos rios mais extensos sobre esta unidade são paralelizados e nitidamente influenciados pela tectônica regional (PROJETO RADAMBRASIL, 1981).

Figura 3.3 – Plantação jovem de cajueiros.

3.4 Geologia

A área de estudo cobre uma superfície de 981 km^2. Ela está situada no interior da Bacia Potiguar, que se localiza no extremo nordeste do território brasileiro, ocupando, em sua maior parte, o estado do Rio Grande do Norte e, em pequena parte, o estado do Ceará. Possui superfície de aproximadamente 48.000 km², 44% dos quais correspondendo à porção emersa (PESSOA NETO et al., 2007). Geologicamente, limita-se a sul, leste e oeste pelo embasamento cristalino, estendendo-se a norte até a isóbata de 2000 m. É separada da Bacia do Ceará, a oeste, pelo Alto de Fortaleza e termina, a leste, no Alto de Touros.

3.4.1 Evolução e litoestratigrafia

Segundo Pessoa Neto et al. (2007), a Bacia Potiguar apresenta três supersequências no seu registro estratigráfico: Supersequência Rifte (dividida nas fases Rifte I e Rifte II), depositada no Cretáceo Inferior; Supersequência Pós-rifte, depositada no Aptiano - Eoalbiano; Supersequência Drifte, depositada entre o Albiano e o Recente (Figura 3.3).

Suas rochas podem ser divididas em três grupos, da base para o topo: Areia Branca, Apodi e Agulha (Fig. 3.2) (ARARIPE; FEIJÓ, 1994).

A fase Rifte I (Neoberriasiano/Eobarremiano) se caracteriza por regime tectônico de estiramento crustal, onde falhas com até 5000 m de rejeito são formadas e definem meio-grábens assimétricos e altos internos de direção geral NE-SW. Sobre essas calhas depositou-se a Formação Pendência. A fase Rifte II (Neobarremiano/Eoaptiano) é marcada pela implantação do regime transcorrente/transformante ao longo da futura margem equatorial. O eixo de rifteamento é deslocado para a porção submersa da bacia, causando levantamento e erosão na parte emersa. A direção de transporte tectônico muda de NNW para E-W, com movimento predominantemente transtencional dextral. O topo da Formação Pendência e a Formação Pescada representam esta etapa da evolução da bacia (PESSOA NETO et al., 2007).

A fase Pós-rifte é marcada pela passagem gradativa de sistemas deposicionais continentais para marinhos, durante o intervalo Aptiano-Albiano. A subsidência térmica é o regime tectônico dominante. A sedimentação desta fase é dominada por sistemas deposicionais flúvio-lacustres, depositados em forte discordância angular sobre os sedimentos da fase rifte. Esta fase está representada pelos sedimentos da Formação Alagamar (PESSOA NETO et al., 2007).

Associado a estas fases de evolução está o Grupo Areia Branca que contempla as formações de conteúdo predominantemente clástico: Pendência, Pescada e Alagamar. A Formação Pendência compreende arenitos finos, médios e grossos, com intercalações de folhelho e siltito, que ocorrem geralmente preenchendo baixos estruturais em discordância com o embasamento cristalino. São cobertos discordantemente por clásticos e carbonatos da Formação Pescada, que compreende arenitos médios e finos, intercalados com folhelho e siltito e ocorre unicamente no bloco baixo da Falha de Pescada. Seu contato superior com a Formação Alagamar é discordante. A Formação Alagamar é constituída por arenitos finos e grossos, folhelhos, calcarenitos e calcilutitos ostracoidais e folhelhos escuros. Ela possui contato superior em discordância com a

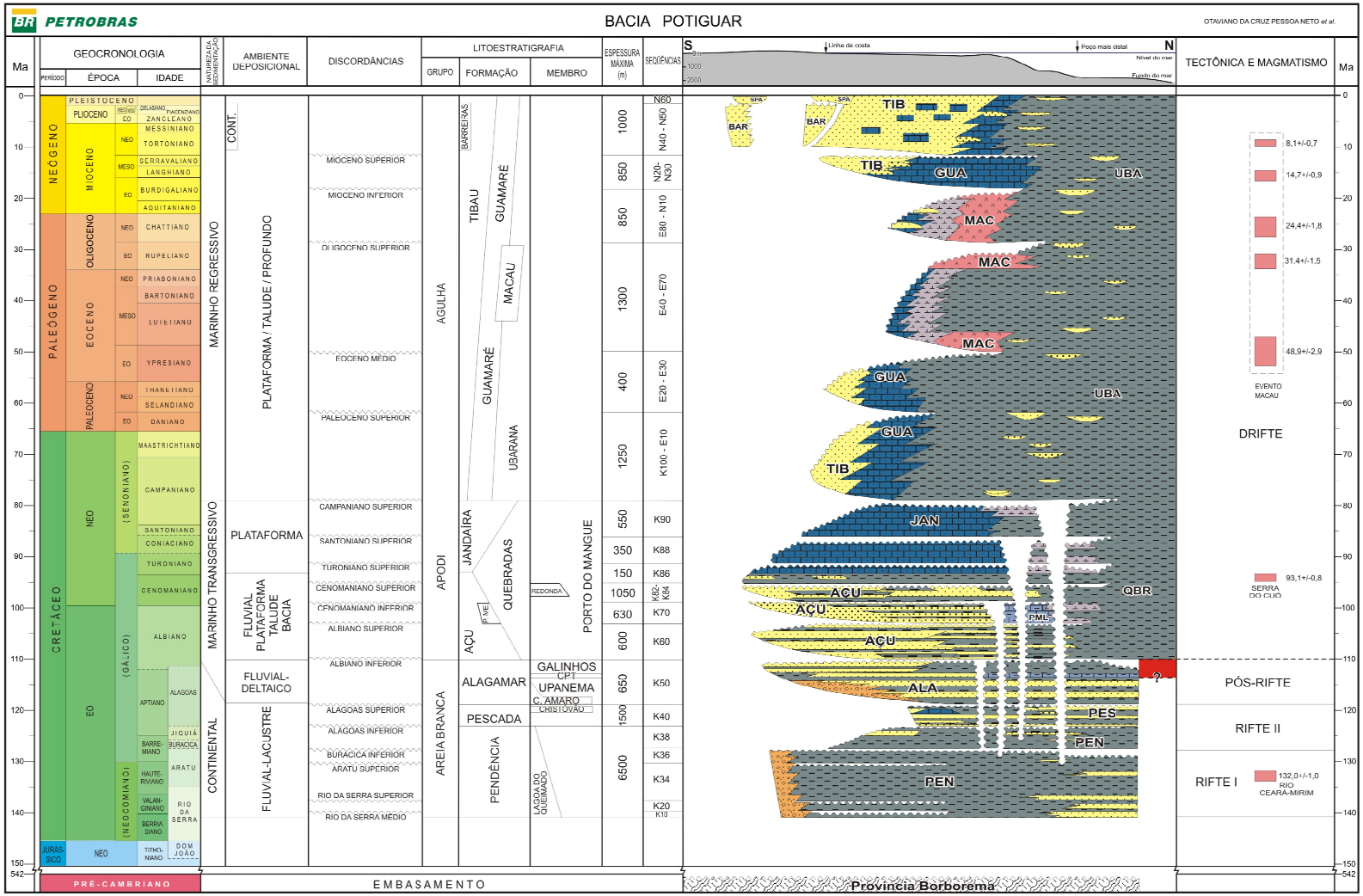

Figura 3.3 – Carta estratigráfica da Bacia Potiguar
Fonte: Pessoa Neto et al. (2007)

Formação Açu (ARARIPE; FEIJÓ, 1994).

A supersequência drifte se divide em dois conjuntos: as Sequências Marinhas Transgressivas (Eoalbiano-Eocampaniano) e as Sequências Marinhas Regressivas (Neocampaniano-Holoceno). Durante a fase marinha transgressiva, o depocentro principal da bacia gerou uma grande calha fluvial NE-SW, com sistema transicionando para plataforma rasa siliciclástica a mista, com carbonatos de borda de plataforma e turbiditos, associados a cânions submarinos. Este sistema foi gradativamente afogado pela transgressão do Neocretáceo, passando de sistemas fluviais entrelaçados para meandrantes e estuarinos, onde por fim, se implanta uma plataforma carbonática dominada por maré. Estes eventos deram origem às formações Açu, Quebradas e Ponta do Mel. O máximo transgressivo desta sequência ocorreu na passagem Cenomaniano – Turoniano, quando ocorreu a deposição de uma seção de folhelhos na porção submersa e o afogamento dos sistemas fluviais e estuarinos na porção emersa. Uma plataforma carbonática, dominada por marés, permanece até o Eocampaniano, dando origem à Formação Jandaíra. As sequências regressivas se instalam após evento erosivo de grande porte durante o Neocampaniano e perduram até os dias atuais. Elas são caracterizadas por sistemas mistos de leques costeiros, sistemas de plataformas rasas com borda carbonática e sistemas de talude/bacia. Seus correspondentes litoestratigráficos são as formações Barreiras, Tibau, Guamaré e Ubarana (PESSOA NETO et al., 2007).

O Grupo Apodi difere do Grupo Areia Branca por possuir quantidade mais expressiva de carbonatos, incluindo as formações Açu, Jandaíra, Ponta do Mel e Quebradas. A Formação Açu é composta por espessos pacotes de arenitos médios a muito grossos, intercalados com folhelhos, argilitos e siltitos. Interdigita-se lateralmente com as formações Ponta do Mel e Quebradas e possui contato superior concordante com a Formação Jandaíra. A Formação Ponta do Mel possui calcarenitos oolíticos, doloesparitos e calcilutitos, com camadas de folhelhos. Ela interdigita-se lateralmente e recobre concordantemente os arenitos da Formação Açu e está recoberta em discordância pela Formação Quebradas, composta por arenitos finos, folhelhos e siltitos,

localizando-se entre os arenitos Açu e os pelitos Ubarana, com os quais forma uma interdigitação lateral. Possui contato superior concordante com a Formação Jandaíra e inferior discordante com a Formação Ponta do Mel. A Formação Jandaíra é composta por calcarenitos bioclásticos com foraminíferos bentônicos e calcilutitos com marcas de raízes, dismicritos e gretas de contração. Lateralmente interdigita-se com a parte inferior da Formação Ubarana e seu contato superior é discordante com o Grupo Agulha (ARARIPE; FEIJÓ, 1994).

O Grupo Agulha reúne as formações Ubarana, Guamaré e Tibau, formadas por clásticos e carbonatos de alta energia. A Formação Ubarana ocorre somente na porção *offshore* da bacia e compreende espessa seção de folhelho e argilito, intercalada por finas camadas de arenito grosso a muito fino, siltito e calcarenito fino. Ela interdigita-se lateralmente em direção ao continente com as rochas do Grupo Apodi e da Formação Guamaré. A Formação Guamaré se encontra interposta lateralmente à Formação Ubarana e à Formação Tibau. Ela compreende calcarenitos bioclásticos e calcilutitos. A Formação Tibau é caracterizada por arenitos grossos e interdigita-se lateralmente com as formações Guamaré e Barreiras (ARARIPE; FEIJÓ, 1994).

Três eventos de vulcanismos afetaram a Bacia Potiguar. O primeiro deles é o Magmatismo Rio Ceará-Mirim (com pulso em 132,2 ± 1 Ma) (PESSOA NETO et al., 2007), representado por diques basálticos, com direção predominante E-W (ARARIPE; FEIJÓ, 1994; SOUSA, 2002). O segundo é o Magmatismo Serra do Cuó, representado por basaltos de tendência alcalina (SOUSA, 2002), que possui idade radiométrica (Ar-Ar) de 93,1 ± 0,8 Ma (SOUZA et al., 2004). O terceiro e último evento é o Magmatismo Macau, que se caracteriza por olivina-basaltos, intercalados nas rochas das formações Tibau, Guamaré e Ubarana (ARARIPE; FEIJÓ, 1994), cujas datações $^{40}Ar/^{39}Ar$ forneceram idades de 24,6 ± 0,8 Ma (SOUZA et al., 2003).

Capeando as rochas da Bacia Potiguar, encontra-se a Formação Barreiras, composta por conglomerados e arenitos ferruginosos, com matriz argilosa e concreções ferruginosas, bem como com intercalações de siltitos e argilitos entre níveis conglomeráticos. Não

raramente, ocorrem níveis lateríticos no topo da unidade (MOURA LIMA et al., 2010). Sua idade de deposição gira em torno do período Mioceno-Plioceno (SOUSA, 2002).

3.4.2 Campos de petróleo de Fazenda Belém e Icapuí

O campo de petróleo de Fazenda Belém (FZB) foi descoberto em 1980, entrando em produção neste mesmo ano. Já o campo de Icapuí (IC) foi descoberto em 1996, entrando em produção nesse mesmo ano. Juntos possuem área aproximada de 344,78 km² (ANP, 2010) e, entre 2009 e 2012, produziram cerca de 2,63 milhões de barris de óleo, onde o campo de Icapuí contribui com uma quantidade reduzida.

Em ambos os campos, as rochas reservatório são constituídas por arenitos grosseiros a conglomeráticos, ricos em bolas de argila e pobremente selecionados, possuindo também níveis descontínuos de arenitos, folhelhos, siltitos e argilitos. Elas apresentam porosidade superior a 25%. Os principais cimentos presentes na rocha reservatório são constituídos por ilita, interestratificados de ilita-esmectita e caulinita (EIDELWEIN, 1992).

Estes campos são considerados exemplos de armadilhas paleogeomórficas, onde o óleo se acumula em estruturas de baixo relevo, truncadas por paleo-elevações do embasamento cristalino (Figura 3.4) (EIDELWEIN, 1992; BERTANI et al., 1990).

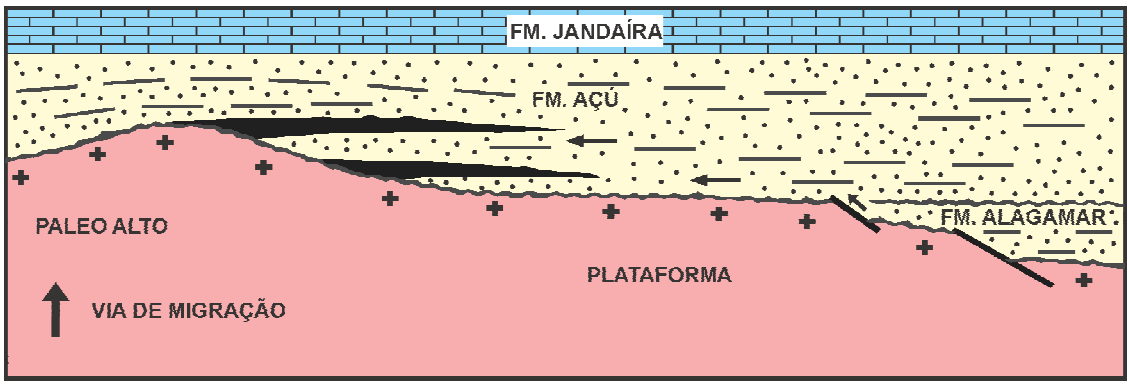

Figura 3.4 – Modelo de acumulação de óleo no campo de Fazenda Belém.
Fonte: Adaptado de Eidelwein (1992).

A alta viscosidade do óleo (12 a 16º API e viscosidade de até 16000 cP) condiciona o aprisionamento preferencial do óleo em litofácies mais porosas e permeáveis, resultando

em baixas taxas de recuperação primária, tendo sido necessário implantar um projeto de injeção cíclica de vapor de água para aumentar a recuperação (EIDELWEIN, 1992). As rochas geradoras pertencem à Formação Alagamar, na porção offshore da bacia, o que indica expressiva migração lateral do óleo (SOUTO FILHO et al., 2000).

3.4.3 Neotectônica

Trabalhos desenvolvidos na Bacia Potiguar e adjacências têm chamado atenção para importância da ocorrência de tectônica cenozóica na região (BEZERRA et al., 2005; MOURA LIMA et. al., 2010; SOUSA, 2002). Por esta razão, o papel da tectônica moderna no controle dos sistemas petrolíferos precisa ser estudado, podendo fornecer informações sobre possíveis manifestações de hidrocarbonetos na superfície.

Milani et al. (2000) chamam a atenção para o papel de eventos tectônicos tardios na Bacia Potiguar, responsáveis pela reativação de feições estruturais com orientação geral para NE-SW, decorrentes de campos de tensões E-W que é responsável para que a região seja, até os dias atuais, uma das mais sismicamente ativas do país.

Através de estudos integrando sísmica 3D, análises de afloramentos e datação geocronológica, Lima et al. (2009) identificaram três pulsos de inversão tectônica na falha de Carnaubais: (1) Evento intra-rifte de idade Valangiana com $\sigma 1$ na direção WNW-ESE; (2) Evento 2 com $\sigma 1$ na direção WNW-ESE e idade Aptiana; e (3) Evento pós-rifte de idade pós-Campaniana com $\sigma 1$ na direção N-S.

Reis (2012), em estudos sobre a magnitude de tensões na Bacia Potiguar, propõe a ocorrência de uma inversão no regime distensivo da fase rifte na porção emersa da bacia, que se torna compressivo, de estilo transcorrente, com orientação atual da compressão máxima entre NW-SE e E-W, paralelo à costa. Considera também que a orientação da compressão máxima atual é produto da ação conjunta de um mecanismo de *ridge push*, atuando em escala regional, e um mecanismo local, relacionado à carga sedimentar sobre a plataforma continental.

Moura Lima et al. (2010) observaram juntas e falhas, com cinemática e direção variadas, com predominância de falhas sinistrais orientadas segundo NW-SE e estrias de deslocamento bem desenvolvidas sobre marcadores cinemáticos presentes nestas rochas. Veios de sílex cortando os sedimentos da Formação Barreiras e estruturas de liquefação em mais de 50 afloramentos de Depósitos Aluviais Antigos também constituem evidências destes eventos.

Em trabalho na região de Icapuí (CE), Sousa (2002) demonstra que o Lineamento Ponta Grossa-Fazenda Belém (que controla o campo de petróleo de Fazenda Belém) possuiu pelo menos duas reativações depois da deposição da rocha reservatório da Formação Açu. Tal fato ressalta a complexidade do controle estrutural daquele campo petrolífero.
Este evento parece ter desenvolvimento paralelo à evolução das condições de maturação e migração de óleo no campo (SOUSA, 2002), podendo ter desempenhado um importante papel na constituição dos sistemas petrolíferos que deram origem aos campos de Fazenda Belém e Icapuí.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Para a realização deste trabalho foram utilizados os seguintes materiais:

- Imagens LANDSAT 5 – TM órbita/ponto 216/063;
- Imagem LANDSAT 2 – MSS órbita/ponto 232/063;
- Imagem LANDSAT 7 – ETM+ órbita/ponto 216/063;
- Modelo digital de elevação SRTM/TOPODATA;
- Modelo digital de elevação LiDAR;
- Mosaico aerofotogramétrico;
- Dados de gasometria do solo;
- Dados de susceptibilidade magnética do solo;
- Dados de radiação total do solo;

Os softwares utilizados foram:

- ENVI 4.8;
- ArcGIS 10.1;
- SPRING 5.1.8;
- XATMCORR 0.2.6

4.2 Métodos

Para alcançar os seus objetivos, este trabalho segue a metodologia exposta no fluxograma da Figura 4.1. Onde cada uma das subseções a seguir, contempla uma das fases envolvidas no trabalho. Números nas caixas indicam a sequência de atividades.

4.2.1 Aquisição de imagens

Neste trabalho buscou-se utilizar imagens do período seco para minimizar a influência do vigor da vegetação na detecção das zonas de microexsudações. Neste sentido, o mês de agosto se mostrou muito favorável para a aquisição das imagens. Como se busca um fenômeno geológico, não há problemas em utilizar imagens mais antigas devido ao seu

longo tempo de existência esperado. Imagens mais antigas ainda apresentam a vantagem de ter uma menor influência do uso do solo em relação as mais novas. Com isto em mente, duas imagens do sensor TM órbita/ponto 216/063, adquiridas em 11/08/1984 e 04/08/1993, e uma imagem MSS órbita/ponto 232/063, adquirida em 10/08/1979, foram usadas no presente estudo. Estas datas de aquisição das imagens correspondem a períodos secos, como pode ser visto na Figura 4.2 que mostra gráficos de pluviosidade, da estação pluviométrica de Aracati/CE. Uma imagem ETM+ órbita ponto 216/063 com data de 07/10/1999, ortorretificada, foi obtida através do catálogo *Global Land Facility Cover* (GLCF) da NASA.

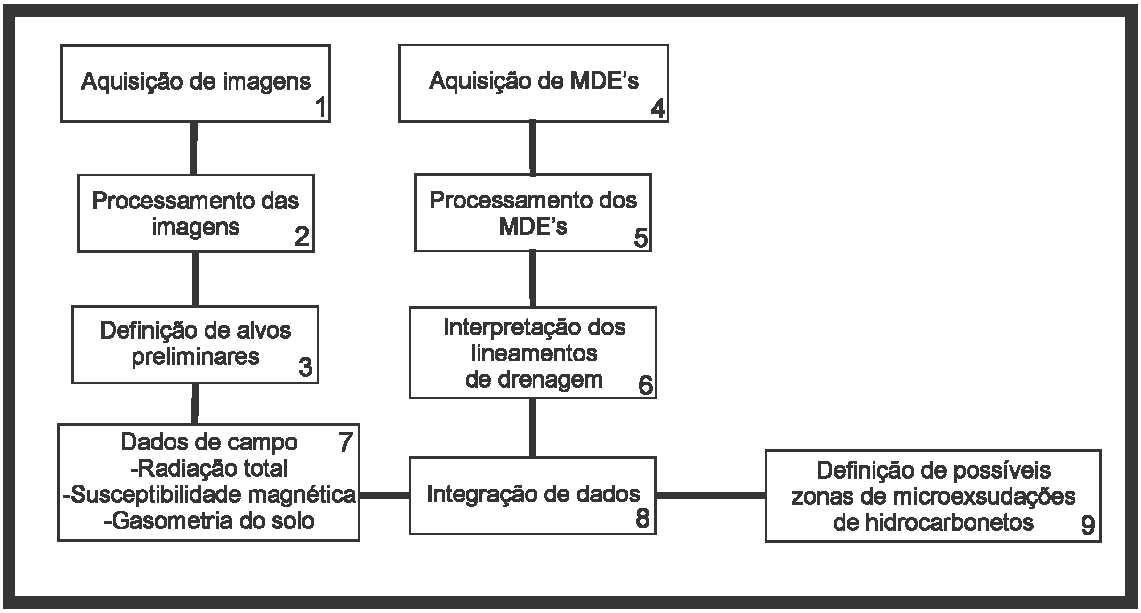

Figura 4.1 – Fluxograma metodológico de trabalho. Os números indicam a ordem de execução dos processos.

4.2.2 Processamento das imagens

As imagens LANDSAT-5 TM passaram por correção atmosférica pelo método 6S no aplicativo xatmcorr, desenvolvido por alunos da pós-graduação do INPE para as imagens TM baixadas no catálogo de imagens desta instituição e disponível em http://code.google.com/p/xatmcorr/. O método 6S (*Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum*) foi desenvolvido por Vermote (1997). Ele se baseia num modelo de transferência radiativa e possui como parâmetros de entrada as efemérides do satélite, dia, mês, latitude e longitude, modelo atmosférico, visibilidade horizontal,

altura em relação ao alvo, sensor a bordo do satélite e banda espectral (FRAGAL; MONTANHER, 2011). Os parâmetros utilizados para todas as imagens foram uma atmosfera muito clara, além de modelo marítimo e tropical ao nível do mar. A imagem MSS, por possuir menor resolução radiométrica e pela ocorrência de atmosfera sempre muito clara na região, não passou por correção atmosférica, pois o autor acredita que a inexistência de aplicativos direcionados a este produto e a este fim, poderia gerar um resultado insatisfatório. Com isto, ela foi apenas convertida para reflectância.

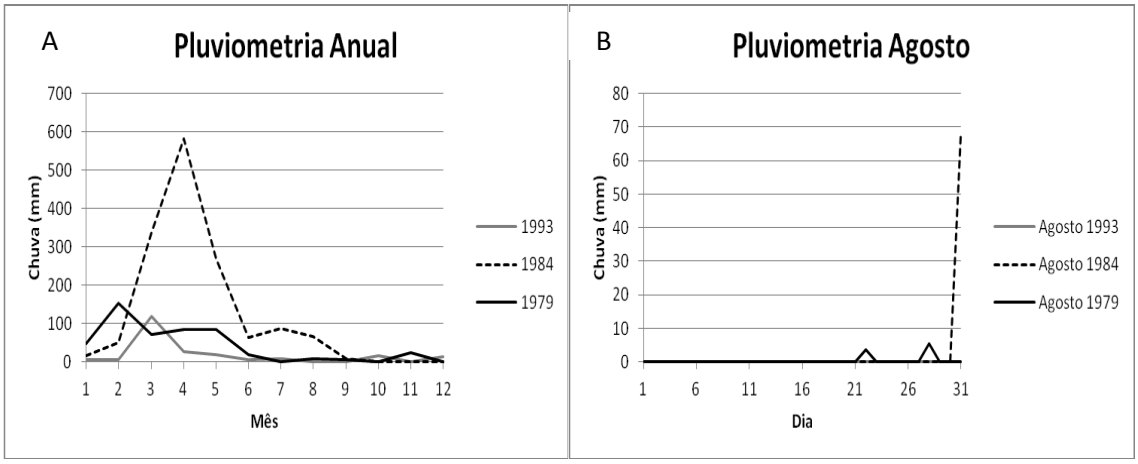

Figura 4.2 – Dados da estação pluviométrica de Aracati. Mensais para os anos de 1979, 1984 e 1993 (a) e diários para o mês de agosto de 1979, 1984 e 1993 (b).
Fonte: Baseado em dados do FUNCEME (2010).

Após a correção atmosférica (conversão para reflectância aparente, no caso da imagem MSS), as imagens foram georreferenciadas, tendo como base a cena ETM+ ortorretificada da NASA, através do aplicativo ENVI 4.8. Pelo menos 10 pontos de controle foram reconhecidos na imagem ortorretificada (*base*) e na imagem sem georreferenciamento (*warp*). Definiu-se que somente com erro RMS abaixo de 0,5 pixel a imagem é georreferenciada.

Visando realçar feições de interesse como vegetação, lixiviação de óxidos de ferro e argilominerais, foram obtidas imagens de razões entre bandas. As razões utilizadas de maneira geral foram: vegetação (NIR/vermelho), óxidos e hidróxidos de Fe^{3+} (vermelho/azul e/ou vermelho/verde; verde/vermelho – NIR/vermelho) e argilas e carbonatos [SWIR (TM5) / SWIR (TM7)] (ALMEIDA FILHO et al., 1998; HUNT, 1991; LAMMOGLIA et al., 2008; PROST, 1980). Os procedimentos acima

correspondem às seguintes combinações em bandas TM e MSS: vegetação (TM4/TM3; MSS4/MSS5), óxidos e hidróxidos de Fe^{3+} (TM3/TM1 e/ou TM3/TM2; TM2/TM3-TM4/TM3; MSS5/MSS4; MSS4/MSS5 – MSS6/MSS5) e argilas e carbonatos (TM5/TM7). Estas imagens de razões entre bandas foram combinadas em composições coloridas para uso posterior.

A imagem de 1993 passou pelo processamento de componentes principais seletivas, onde as componentes principais (CP) foram geradas a partir de pares de imagens, constituídos pelas bandas 2 e 3, 3 e 4 e 5 e 7. Como não havia necessidade de homogeneizar os valores de nível de cinza entre as imagens, a matriz de correlação foi utilizada no lugar da matriz de covariância como método de geração das componentes principais. As CP's 1 possuem pequena importância para este trabalho, pois elas concentram os dados em comum das duas bandas (boa parte da variância total das duas imagens), sendo dominadas pela informação da topografia. As CP's 2 concentram os dados únicos a cada uma das bandas de entrada, sendo dominadas por objetos contrastantes entre imagens e pelo ruído. Como há um interesse pelo contraste espectral, as CP's 2 de cada par foram usadas numa composição colorida, onde tentou-se identificar feições do terreno que pudessem estar relacionadas ao fenômeno da microexsudação de hidrocarbonetos.

4.2.3 Definição de alvos preliminares

A partir do uso de composições coloridas com imagens de razões de bandas e com imagens de componentes principais seletivas, foram selecionadas anomalias tonais alvo para a investigação em campo. Os alvos devem possuir a cor esperada para a composição colorida montada (na maioria das utilizadas neste trabalho, a cor é magenta). Priorizou-se anomalias identificadas em mais de uma imagem e que não apresentassem um comportamento de píxeis isolados (aparência ruidosa como é bem comum na porção oeste da área de estudo). Foram selecionados 4 perfis de amostragem, com extensão aproximada de 3 km e com espaçamento entre amostras de 200 m (Figura 4.3), com o objetivo de investigar o significado das anomalias tonais identificadas.

Estes perfis estão posicionados de maneira a atravessar toda a anomalia, amostrando áreas de *background* antes e depois de cada uma das anomalias escolhidas.

4.2.4 Aquisição de MDE's

Um modelo digital de elevação (MDE) TOPODATA foi adquirido através do site de Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (www.dsr.inpe.br/topodata/) do INPE. E, por fim, um MDE LiDAR com resolução espacial de 15 cm e tamanho de pixel de 5 m, acompanhado de um levantamento aerofotogramétrico com tamanho de pixel da imagem de 5 m, foram gentilmente cedidos pela Petrobrás.

4.2.5 Processamento dos modelos digitais de elevação

A rede de drenagem da área de estudo foi extraída dos modelos digitais de elevação (TOPODATA e LiDAR), através de processamentos disponíveis no software ArcGis 10. A ordem de uso das ferramentas foi a seguinte: *fill*, *flow direction*, *flow accumulation*, *stream order*, reclassificação do raster, *stream to features*.

A ferramenta *fill* preenche ou remove pequenas falhas presentes no MDE. *Flow direction* computa para cada pixel da imagem de entrada o pixel adjacente para onde um fluxo seria direcionado. *Flow accumulation* computa o fluxo acumulado em cada pixel do modelo utilizando a imagem de direção de fluxo, onde, quanto maior o número digital, maior é a contribuição de fluxo que aquele pixel recebeu. *Stream order* classifica a ordem das drenagens identificadas, o método de classificação usado pelo programa foi o de Strahler (1957). A imagem de ordem é então reclassificada retirando as drenagens de menor ordem que dificultam a visualização. Esta imagem reclassificada é submetida à ferramenta *stream to feature*, onde é extraída a rede de drenagem vetorial. Zonas planas tendem a gerar drenagens "defeituosas" onde são formadas várias drenagens paralelas. Portanto, houve necessidade da edição e remoção das linhas paralelas geradas, preparando o produto para uso posterior.

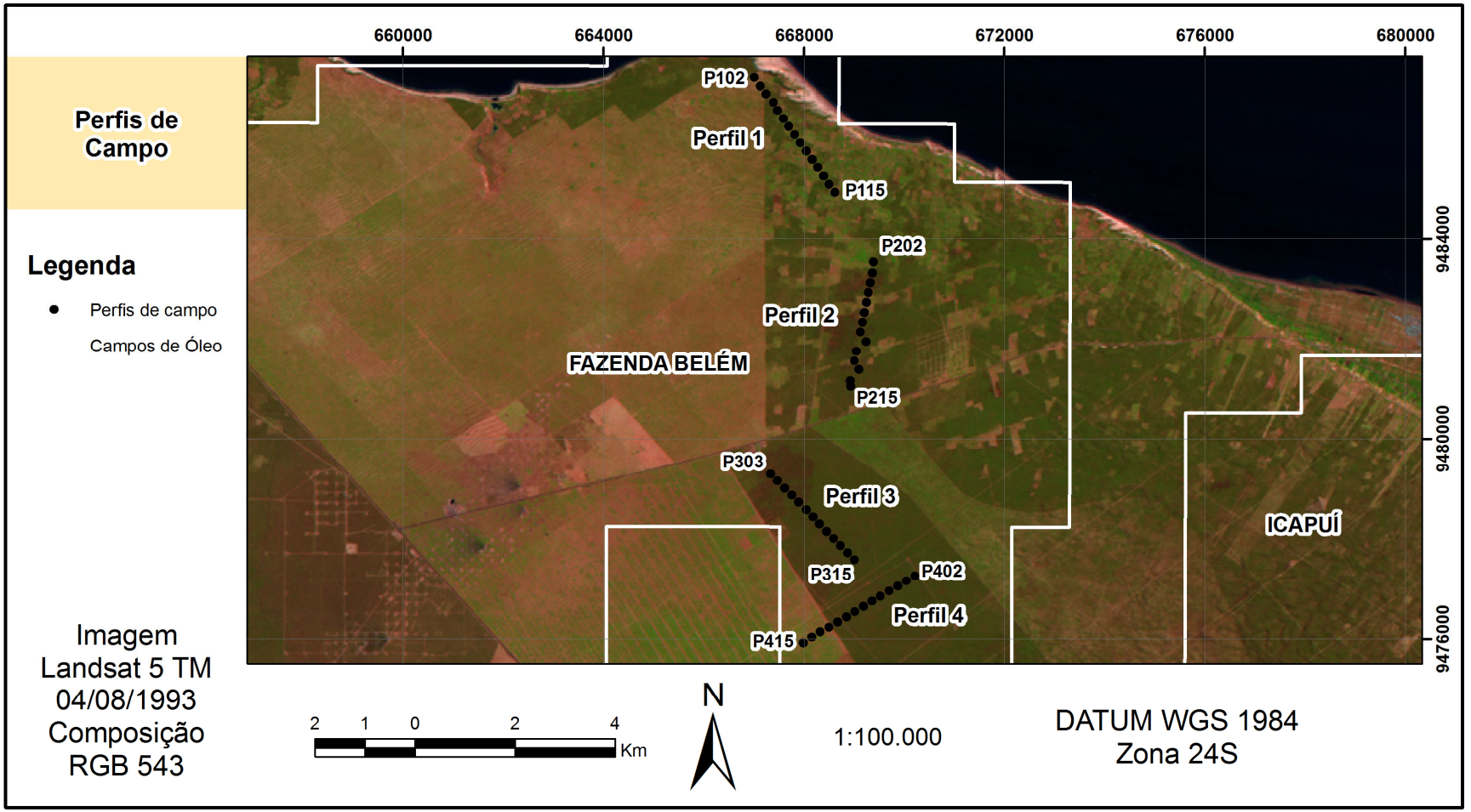

Figura 4.3 – Localização dos perfis selecionados para coleta de dados em campo.

4.2.6 Interpretação dos lineamentos de drenagem

A partir da rede de drenagem extraída dos dois MDE's, foram interpretados visualmente e obtidos manualmente os lineamentos de drenagem. Imagens de densidade de lineamentos foram confeccionadas utilizando a ferramenta *kernel density* do aplicativo ArcGIS 10. A zona de busca utilizada foi de 1500 m, escolhida de maneira empírica, depois de alguns testes com outros tamanhos que subavaliavam ou eram muito abrangentes. As imagens foram reclassificadas para intervalos fixos de km de lineamento/km².

4.2.7 Atividade de Campo

Medições de susceptibilidade magnética de solo, gama espectrometria e amostras de solo para gases foram adquiridas ao longo dos quatro perfis escolhidos. O Campo foi realizado em 4 dias, de 05/02/13 a 08/02/13 e nesta etapa houve a colaboração da equipe da geodésia da Unidade RN/CE da Petrobras em Mossoró. Com os dados de susceptibilidade magnética, pretende-se identificar possíveis minerais magnéticos neoformados pela lixiviação do ferro férrico e transformação em ferro ferroso. Com a gama espectrometria procura-se minerais radioativos neoformados. Por fim, com os dados de gasometria do solo, pretende-se identificar a presença dos hidrocarbonetos gasosos na área.

4.2.7.1 Susceptibilidade magnética

Em cada um dos pontos amostrais, após a retirada de possível capa de matéria orgânica, foram realizadas 10 medidas de susceptibilidade magnética (10^{-3} SI) utilizando um aparelho *kappameter* (Figura 4.4) em contato direto com o solo. Assim que ocorre a sequência de medidas, o próprio aparelho fornece o valor médio das mesmas.

4.2.7.2 Gamaespectrometria

Em cada um dos pontos amostrais, foi realizada uma medida com o aparelho Superspec RS 125 (Figura 4.5) em contato direto com o solo, após a retirada de possível capa de

matéria orgânica. O aparelho foi ligado em cada ponto e, após sua estabilização, foi efetuada uma medida com 5 minutos de duração. Em alguns locais o aparelho não estabilizou, mesmo após uma espera de 30 minutos. Desse modo, devido ao curto período de campo disponível (apenas 4 dias), foi realizada a medida mesmo com o aparelho não estabilizado.

Figura 4.4 – Susceptibilímetro utilizado em atividade de campo.

Figura 4.5 – Gama espectrômetro utilizado em atividade de campo.

4.2.7.3 Amostragem de gases no solo

Em dois dos quatro perfis amostrados (Perfis 1 e 3 da Figura 4.3) foi realizada a coleta de gases no solo para posterior análise em laboratório. No total foram obtidas 28 amostras, submetidas à análise na Petrobrás/CENPES pelo método de cromatografia gasosa. As amostras foram adquiridas a 1 m de profundidade, com o auxílio de um cavador. Em seguida, foram acondicionadas em recipientes IsoJar, completadas com água e tratadas com 7 gotas de bactericida "Zefiran" (Figura 4.6). Após este procedimento, os recipientes foram fechados e agitados para posterior acondicionamento em uma caixa, na temperatura ambiente, com a finalidade de envio ao CENPES. Após os gases e vapores entrarem em equilíbrio dentro do recipiente, a amostra pode ser analisada no cromatógrafo a partir da injeção de uma seringa no espaço ocupado pelos gases (*headspace*).

4.2.8 Integração de dados

Todos os dados gerados até esta etapa foram colocados no sistema de informações geográficas (SIG) ArcGIS 10.1, onde as anomalias tonais escolhidas foram comparadas visualmente com os lineamentos interpretados e os resultados das análises nos perfis de campo. Nesta etapa foi avaliada a coincidência, ou não, das anomalias tonais com possíveis anomalias encontradas em campo e/ou a forte presença de lineamentos de drenagem. Foram gerados mapas, gráficos, tabelas e diagramas com os resultados obtidos na pesquisa. Com isto, foi possível avaliar a existência, ou não, de zonas de ocorrência de microexsudações de hidrocarbonetos.

Figura 4.6 – Tratamento da amostra de solo com bactericida. Etapa final de coleta de uma amostra.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Processamento das imagens LANDSAT

5.1.1 Razões de bandas

De posse das imagens de razões entre bandas, foi feita uma composição colorida RGB com as razões TM 2/3, 4/3 e 5/7. Neste produto, a razão 2/3 evidencia o fenômeno da lixiviação do óxido de Ferro do solo, a razão 4/3 denota a densidade de vegetação e a razão 5/7 a presença de carbonatos e argilominerais. Assim, zonas possivelmente sob a ação de microexsudações devem se apresentar com uma coloração magenta, diferenciando-se de zonas com muita vegetação que se apresentam na cor branca. (Figuras 5.1 e 5.2).

Com relação à razão 5/7, não é possível diferenciar o processo gerador das caulinitas, seja ele intempérico ou devido às microexsudações. Como já citado, o ambiente tropical é extremamente propício à formação de argilominerais por intemperismo, podendo este, superar em muito a formação de argilominerais como resultado das microexsudações. Esta razão será tão mais eficiente quanto maior for a concentração de caulinita no solo. Logo, a diluição deste mineral numa matriz arenosa, ou a presença maciça de vegetação, por exemplo, vão diminuir a influência deste mineral na resposta obtida pelo sensor. Num caso extremo, tal fato inviabiliza o uso desta razão para este trabalho.

As imagens das datas de 1993 e 1984 apresentaram algumas zonas com possibilidade de ocorrência de fenômenos de microexsudação de hidrocarbonetos. No entanto, estas composições não apresentaram bons guias para a localização de áreas para posterior confirmação, por possuir um baixo contraste entre feições. É possível observar, na imagem de 1993 (Figura 5.2), o aumento da quantidade de vegetação, em relação à imagem de 1984 (Figura 5.1), na zona litorânea do campo de Fazenda Belém. Tal fato dificulta ainda mais a detecção de zonas anômalas.

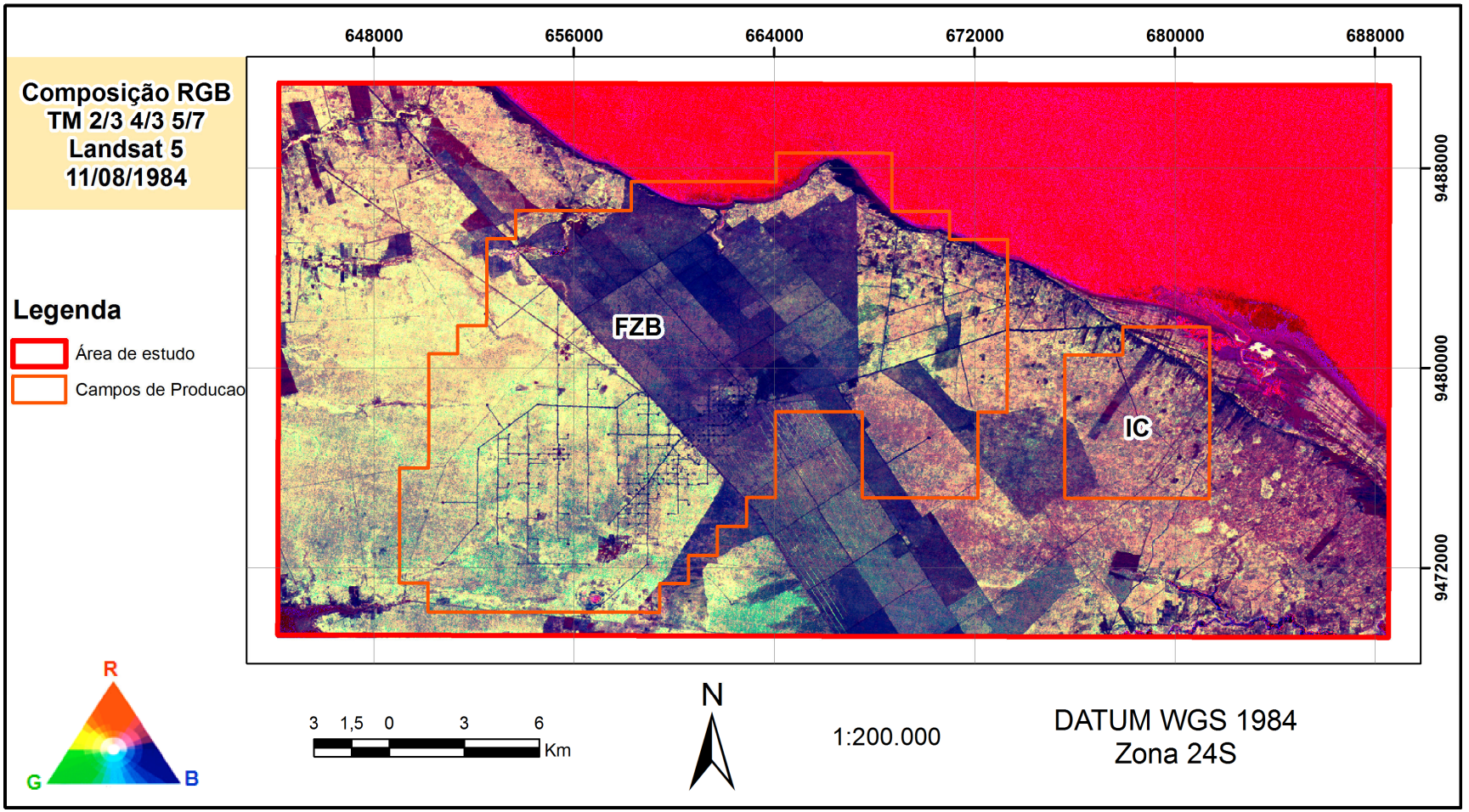

Figura 5.1 – Composição colorida TM RGB 2/3, 4/3, 5/7 de 11/08/1984, na qual áreas em magenta representam possíveis zonas de microexsudações de hidrocarbonetos. Notar a presença, na imagem, dos poços do campo de Fazenda Belém.

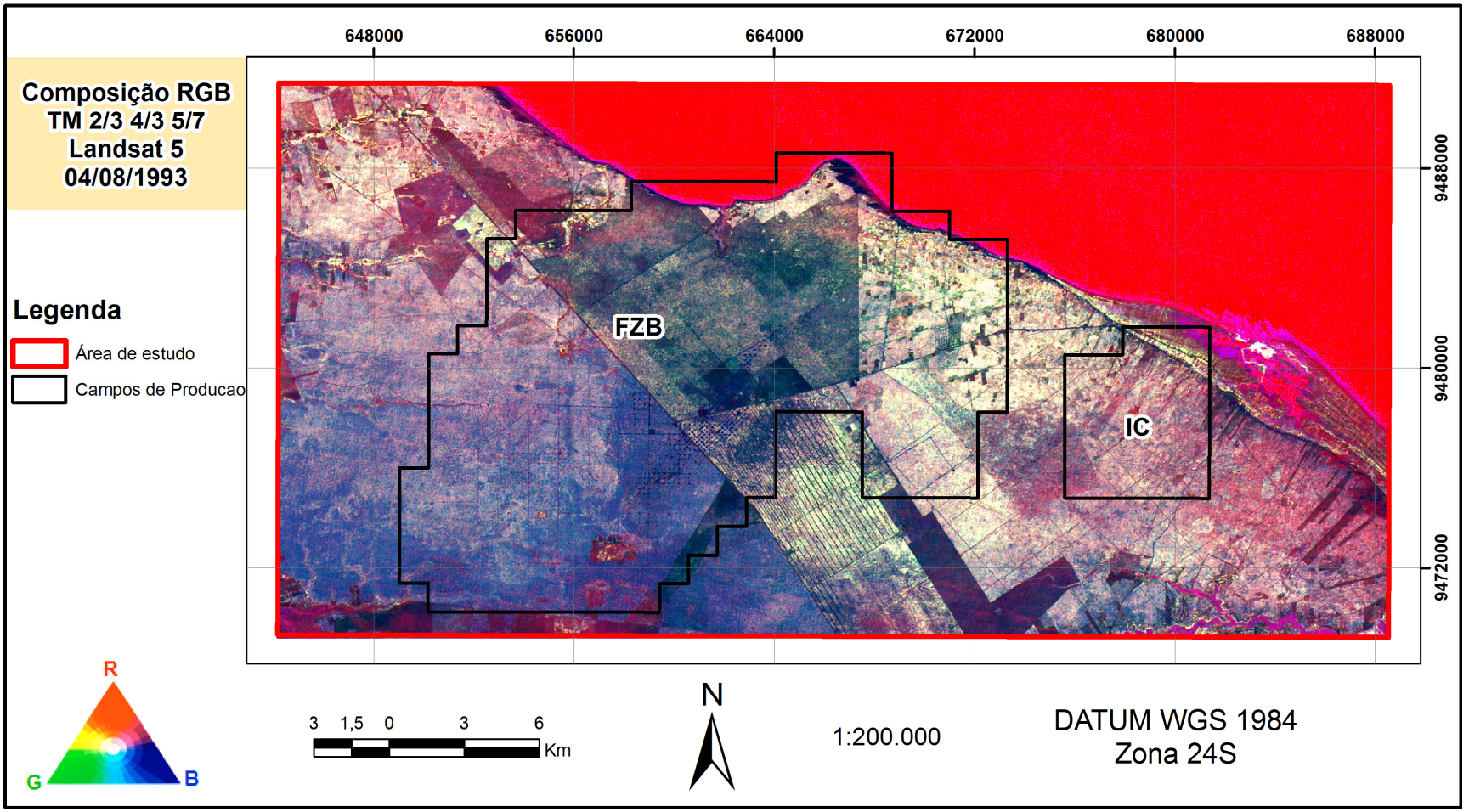

Figura 5.2 – Composição colorida TM RGB 2/3, 4/3, 5/7 de 04/08/1993, na qual áreas em magenta representam possíveis zonas de microexsudações de hidrocarbonetos.

Outra composição utilizada foi aquela proposta por Almeida Filho et al. (1998) para realce do fenômeno da lixiviação de ferro férrico dos solos, como resposta à presença de hidrocarbonetos. Essa composição utiliza a subtração entre as razões 2/3 e 4/3, separando o efeito da lixiviação (presente na razão 2/3) da presença de vegetação (presente em ambas). Neste caso, imagens MSS do satélite LANDSAT-2 também puderam ser utilizadas. As composições coloridas geradas são a MSS 4/5, 6/5, 4/5-6/5 (Figura 5.3) e TM RGB 2/3, 4/3, 2/3-4/3 (Figuras 5.4 e 5.5). Também nestes produtos, as possíveis feições diagnósticas se caracterizam por possuir uma coloração magenta (Figuras 5.3, 5.4 e 5.5). Em tal composição, o alvo saturado na cor azul é o solo exposto, a vegetação se apresenta em tons de verde e amarelo, o mar e os corpos d'água saturam na cor magenta.

Embora a imagem MSS possua uma resolução espacial baixa, dificultando a detecção, é possível notar pequenas zonas a norte do campo de Fazenda Belém e no centro dos campos de Icapuí e Fazenda Belém (Figura 5.6). Nessa visualização em detalhe, áreas de cor magenta se manifestam. A vegetação se mostra na coloração amarela e predomina na porção leste da área de estudo.

A imagem de 1984 confirma alguns dos pontos vistos na imagem de 1979 e apresenta mais uma região em magenta na porção sudeste da área do campo de Fazenda Belém como pode ser visto no detalhe (Figura 5.7).

A imagem de 1993 apresentou pontos mais bem definidos em relação à imagem de 1984, devido ao crescimento da vegetação, facilitando a visualização de anomalias nas imagens devido ao contraste entre alvos. Entretanto, os alvos em destaque são semelhantes aos observados no produto anterior, o que mostra a existência de um fenômeno permanente e não restrito apenas a uma imagem. Algumas anomalias são apontadas por setas na Figura 5.8.

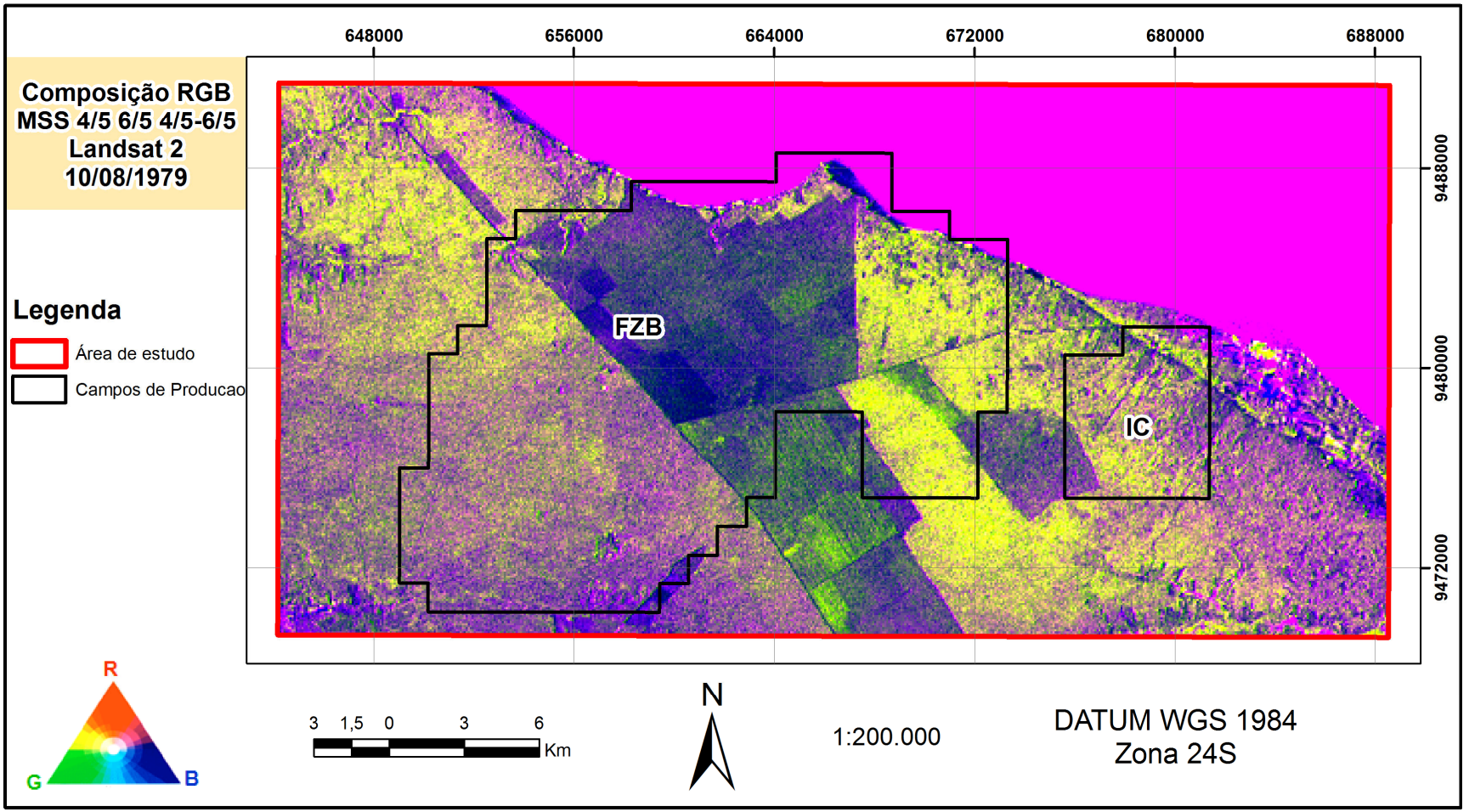

Figura 5.3 – Composição colorida MSS RGB 4/5, 6/5, 4/5-6/5 de 10/08/1979, na qual áreas em magenta representam possíveis zonas de microexsudações de hidrocarbonetos. Esta imagem precede a implantação do campo de Fazenda Belém.

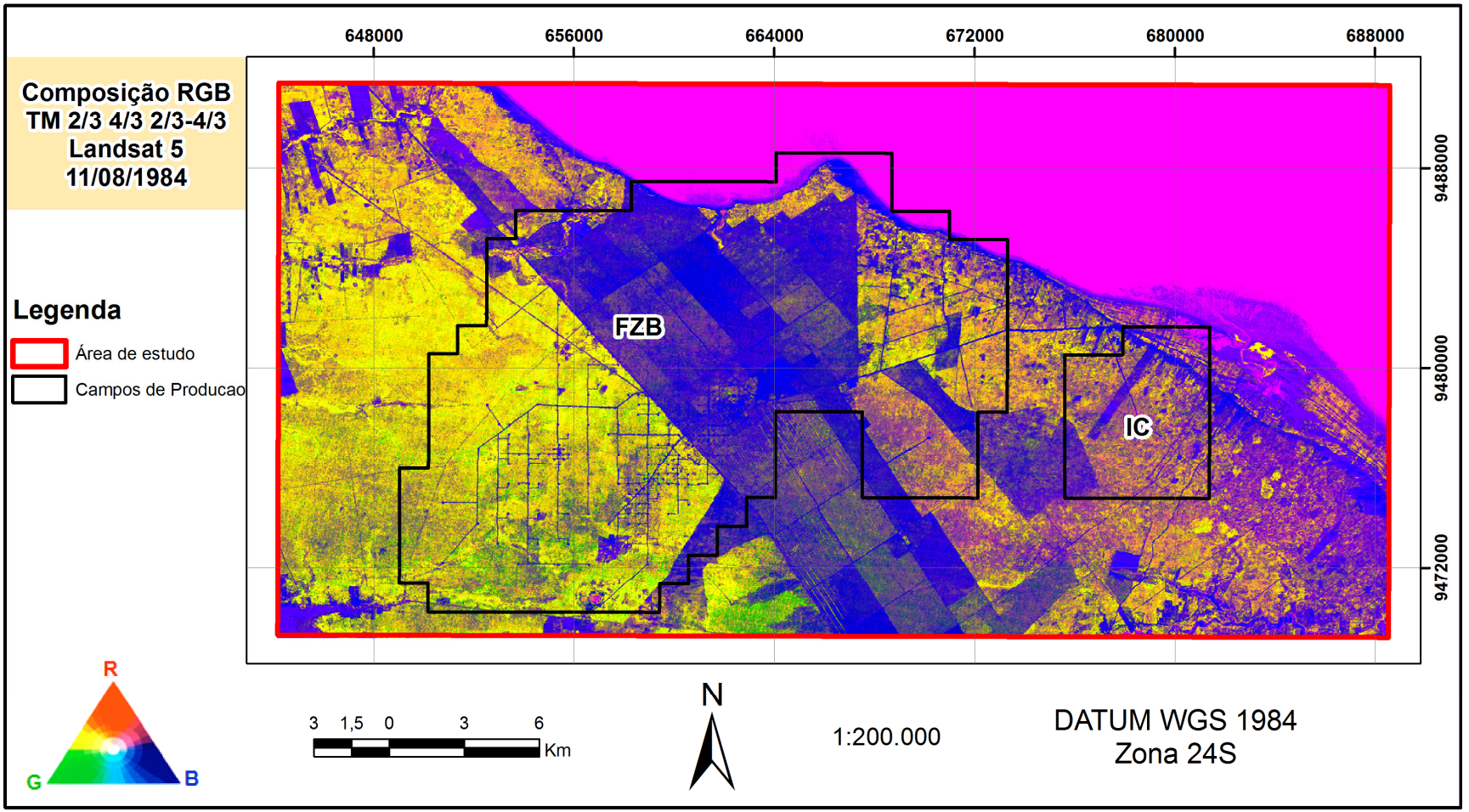

Figura 5.4 – Composição colorida TM RGB 2/3, 4/3, 2/3-4/3 de 11/08/1984, na qual áreas em magenta representam possíveis zonas de microexsudações de hidrocarbonetos.

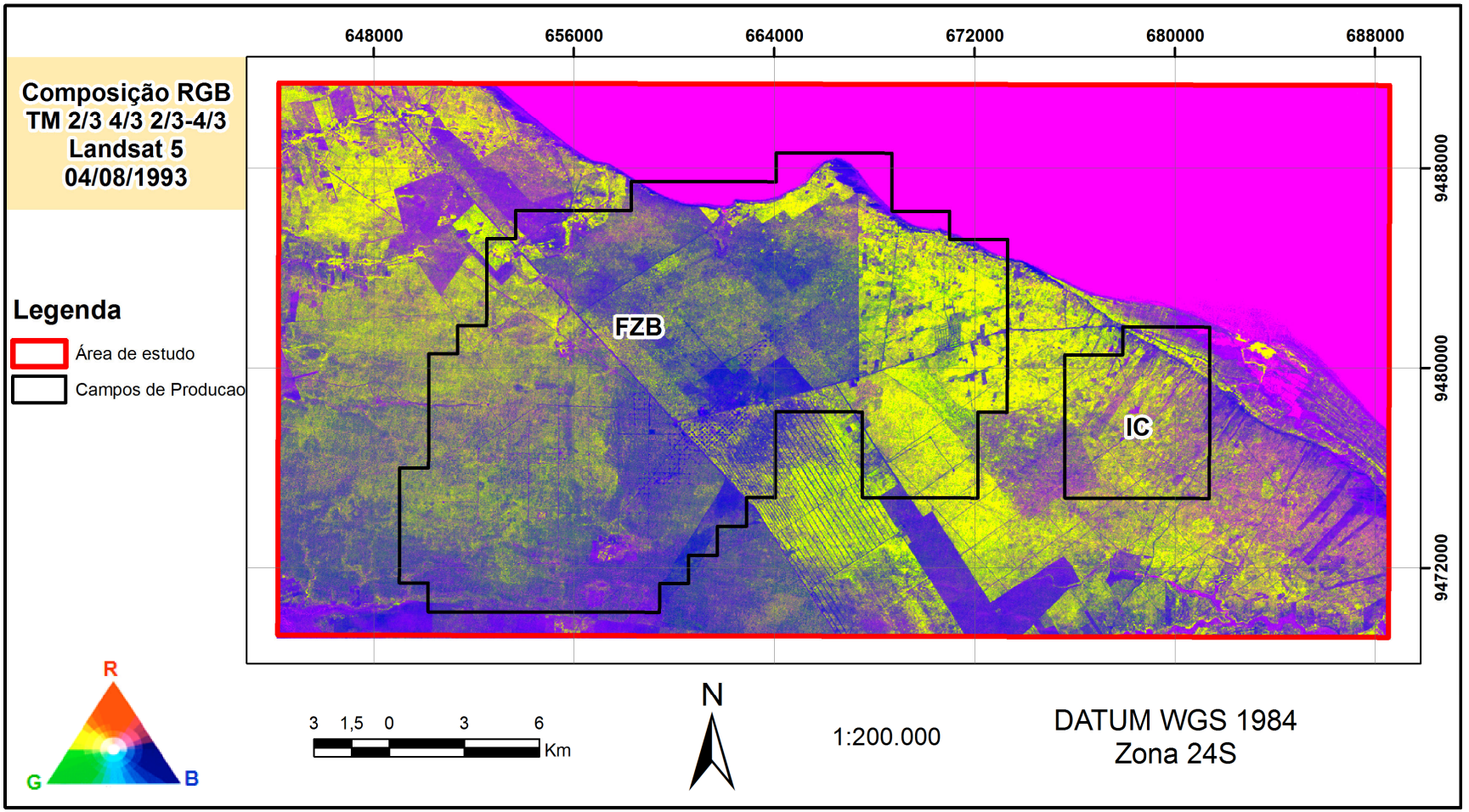

Figura 5.5 – Composição colorida TM RGB 2/3, 4/3, 2/3-4/3 de 04/08/1993, na qual áreas em magenta representam possíveis zonas de microexsudações de hidrocarbonetos.

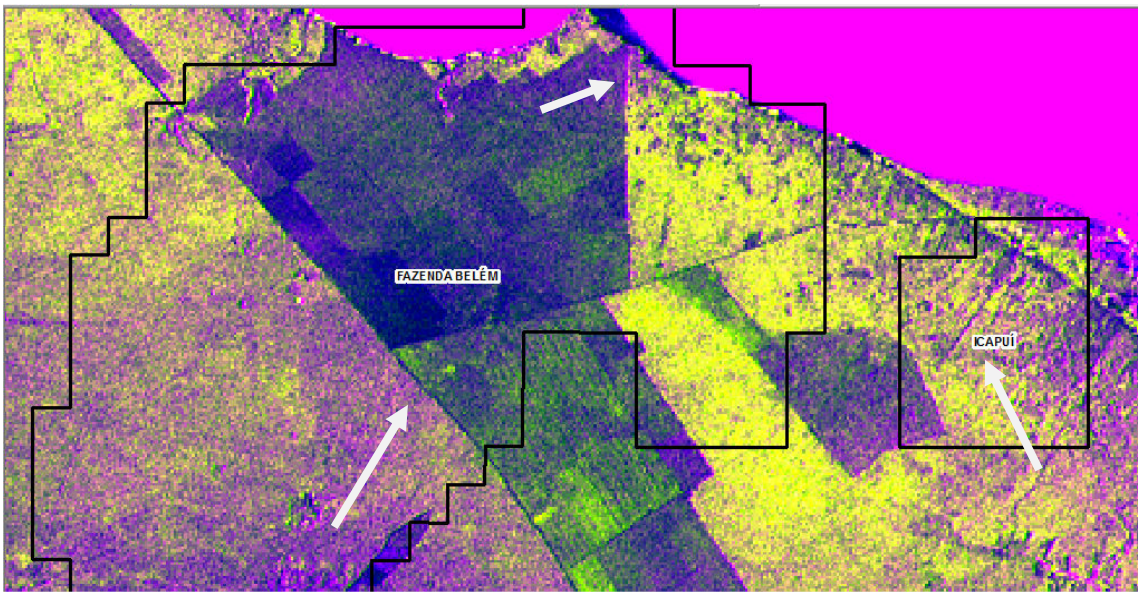

Figura 5.6 – Detalhe da composição colorida da imagem de 1979. Setas indicam possíveis áreas de interesse.

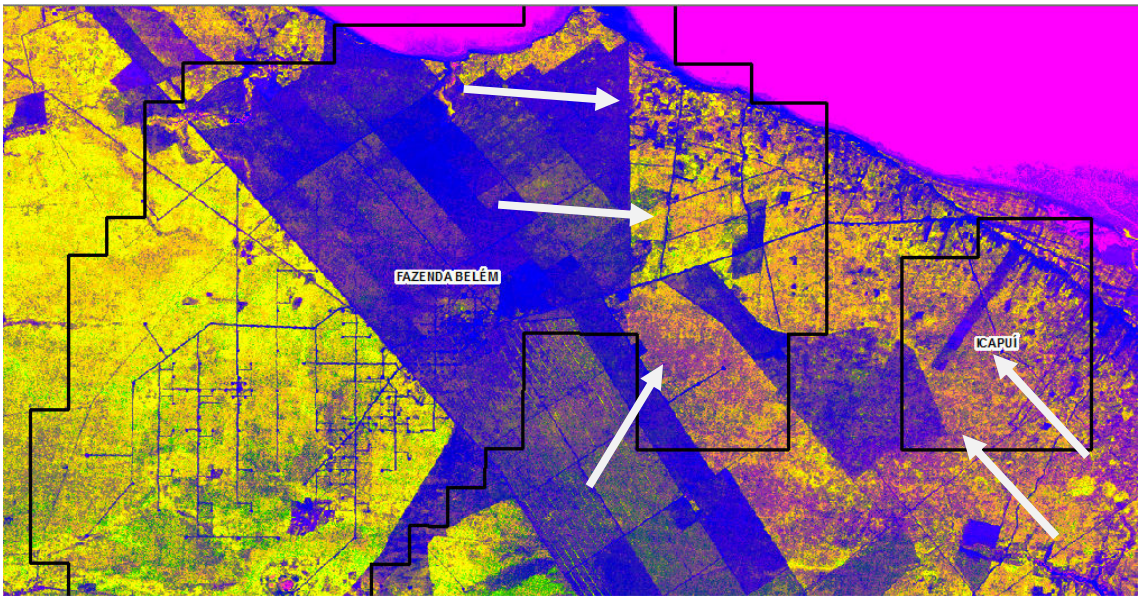

Figura 5.7 – Detalhe da composição colorida da imagem de 1984. Setas indicam possíveis áreas de interesse. Existe repetição de algumas zonas encontradas na imagem de 1979.

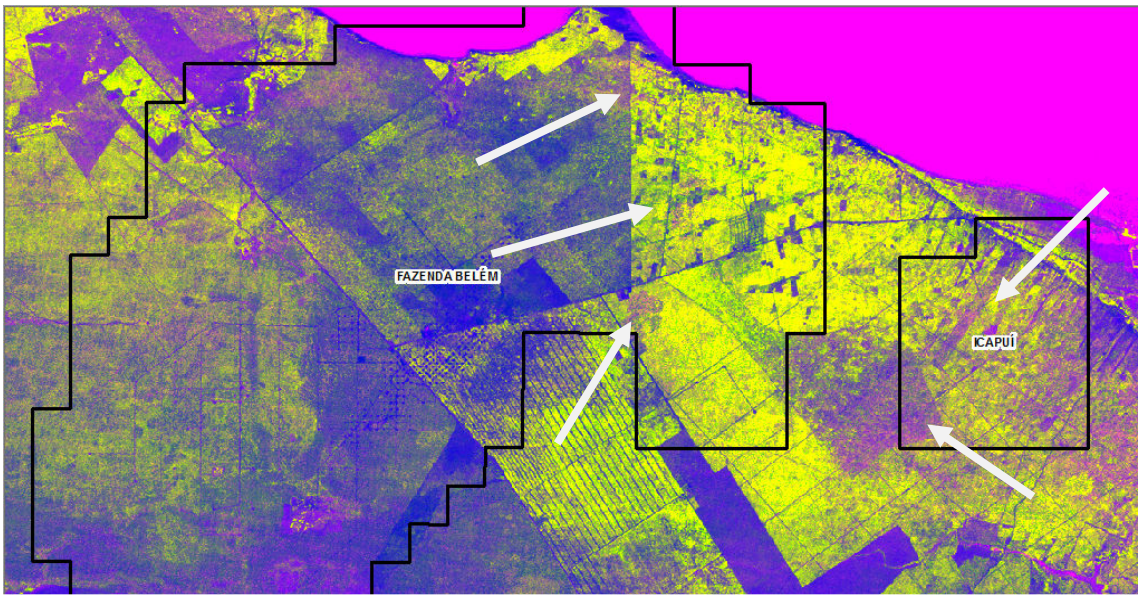

Figura 5.8 – Composição colorida da imagem de 1993. Setas indicam possíveis áreas de interesse. As zonas destacadas são mais restritas devido à maior presença de vegetação em relação à imagem de 1984.

A partir da observação das imagens LANDSAT, obtêm-se indícios de que pode ocorrer o fenômeno de microexsudações de hidrocarbonetos na área de estudo. Nota-se que nas três composições trabalhadas há semelhanças nas posições de objetos destacados. No caso das anomalias, observa-se que os argilominerais e carbonatos não se mostraram expressivos nas imagens da área, onde o principal fator de realce nas composições coloridas foi o fenômeno da lixiviação.

5.1.2 Componentes principais seletivas

O resultado do processamento por componentes principais seletivas da imagem de 1993 é encontrado na Tabela 5.1, que mostra os autovetores de cada uma das novas imagens geradas no processo. A Figura 5.9 pode ajudar no entendimento da composição colorida final entre as CP's 2 da Figura 5.10.

Tabela 5.1 – Autovetores de cada par de bandas/componentes principais.

	Banda 2	**Banda 3**		**Banda 3**	**Banda 4**		**Banda 5**	**Banda 7**
CP1	0,707107	0,707107	**CP1**	0,707107	0,707107	**CP1**	0,707107	0,707107
CP2	-0,707107	0,707107	**CP2**	-0,707107	0,707107	**CP2**	-0,707107	0,707107

A partir dos autovetores, observa-se que um alvo que possua um valor alto na primeira banda e baixo na segunda, aparecerá escuro na CP2, pois os autovetores para as primeiras bandas são sempre negativos, levando a uma contribuição forte negativa (*e. g.*: solo lixiviado e vegetação para as bandas 2 e 3; argilominerais e carbonatos para as bandas 5 e 7). Um alvo que possua comportamento inverso, aparecerá claro na CP2, pois a contribuição pelos autovetores obtidos é forte positiva (por exemplo a vegetação para o par 3 e 4). Este fenômeno pode ser observado na Figura 5.9, onde foi dado um exemplo com a vegetação e o solo lixiviado nas bandas originais e seu resultado nas componentes principais seletivas. A Figura 2.3 e pode ajudar neste raciocínio. Na composição colorida RGB gerada entre CP 2 para as pseudorrazões 2/3, 3/4 e 5/7 (Figura 5.10), se espera que solo exposto, lixiviado e com argilominerais apareça escuro, tendendo à cor preta. Por outro lado, que um solo rico em óxido de ferro apareça na cor vermelha e que a vegetação apareça na coloração verde a cian.

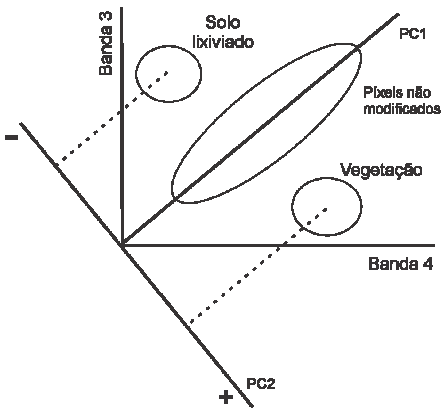

Figura 5.9 – Exemplo de comportamento esperado de dois alvos nas componentes principais seletivas entre as bandas TM 3 e TM 4.

Observando a Figura 5.10, nenhuma área da imagem possui a coloração tendendo ao preto. No entanto, alguns dos alvos encontrados nas composições entre razões de bandas também apareceram realçados na cor azul, o que indica um solo exposto lixiviado, mas pouco argiloso. Isto corrobora com a idéia que o principal fenômeno controlando as anomalias nas imagens é mesmo a lixiviação do óxido de ferro do solo.

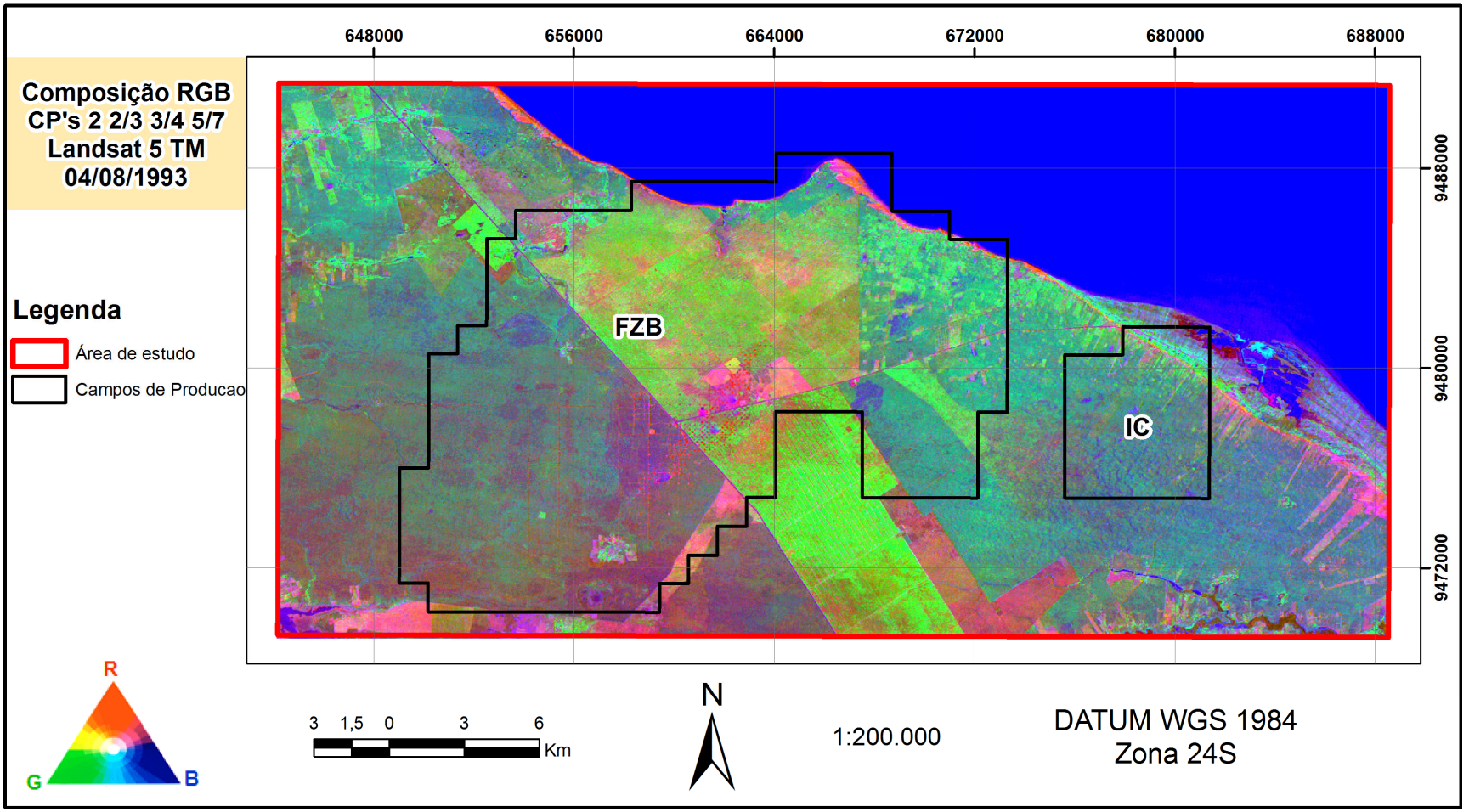

Figura 5.10 – Composição colorida entre CP's 2 RGB 2/3, 3/4, 5/7. Não existem alvos tendendo a preto na imagem. FZB representa o campo de Fazenda Belém e IC o campo de Icapuí.

5.2 Lineamentos de drenagem

A partir dos dois modelos digitais de elevação utilizados neste trabalho foram geradas duas redes de drenagem. Uma de menor escala, obtida a partir do MDE da SRTM, e o outro de escala maior, gerado a partir do MDE LiDAR, com 5 m de resolução espacial (Figuras 5.11 e 5.12).

É interessante notar que, visualmente, sobre as redes de drenagem extraídas do modelo LiDAR e do modelo SRTM, existe uma tendência evidente das mesmas apresentarem tropia na direção E-W. Normalmente, estratos sedimentares horizontais e homogêneos produzem caracteristicamente o padrão de drenagem dendrítico. Ocorrências de elevações e domos em subsuperfície podem levar à geração de padrões de drenagem diferentes dos normais, portanto anômalos. Um exemplo de trabalho que aborda padrões anômalos de drenagem é o de Almeida Filho et al. (2010). Foram observadas duas anomalias de drenagem no estilo radial, na porção E do campo de Fazenda Belém e na borda SE do mesmo campo, bem visíveis no modelo SRTM (a e b da Figura 5.11). Elas exibem em seu centro a cor avermelhada, correspondente às maiores cotas da área de estudo. Estas feições indicam a existência de um paleoalto do embasamento com alinhamento aproximadamente NE-SW. Esta interpretação é reforçada pela posição da estrutura dentro do Lineamento Ponta Grossa-Fazenda Belém proposto por Sousa (2002) (Figura 5.13). Vale ressaltar que este paleoaltos são as estruturas consideradas armadilhas para a acumulação de óleo neste campo (Figura 3.3).

A partir da análise visual das duas redes, foram extraídos 2393 lineamentos, sendo estes mais refinados na porção compreendida pela rede de drenagem extraída do modelo LiDAR. Na porção externa aos campos de óleo, os lineamentos foram baseados na rede de drenagem extraída da imagem SRTM (Figura 5.14).

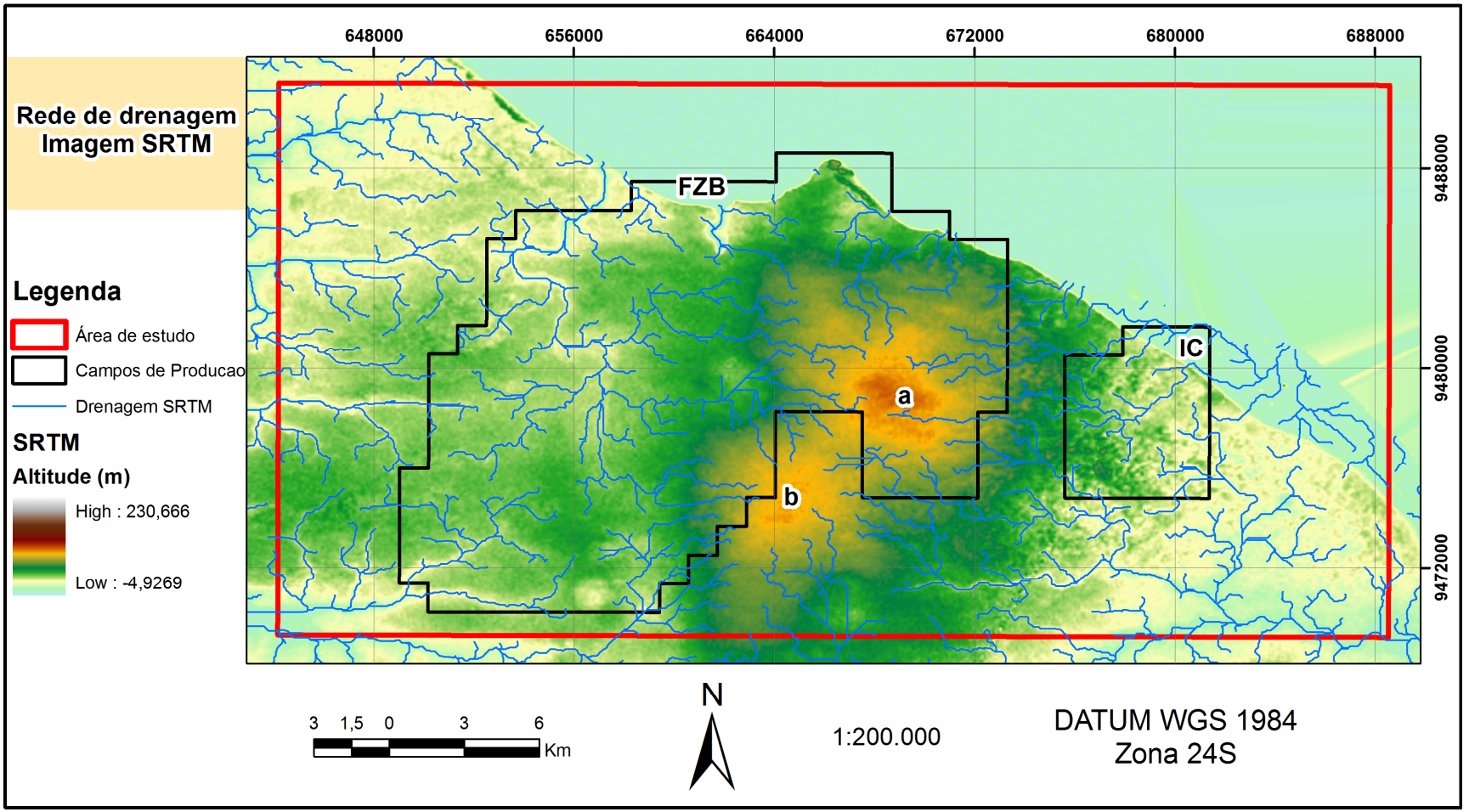

Figura 5.11 – Rede de drenagem extraída do MDE SRTM. FZB representa o campo de Fazenda Belém e IC o campo de Icapuí.

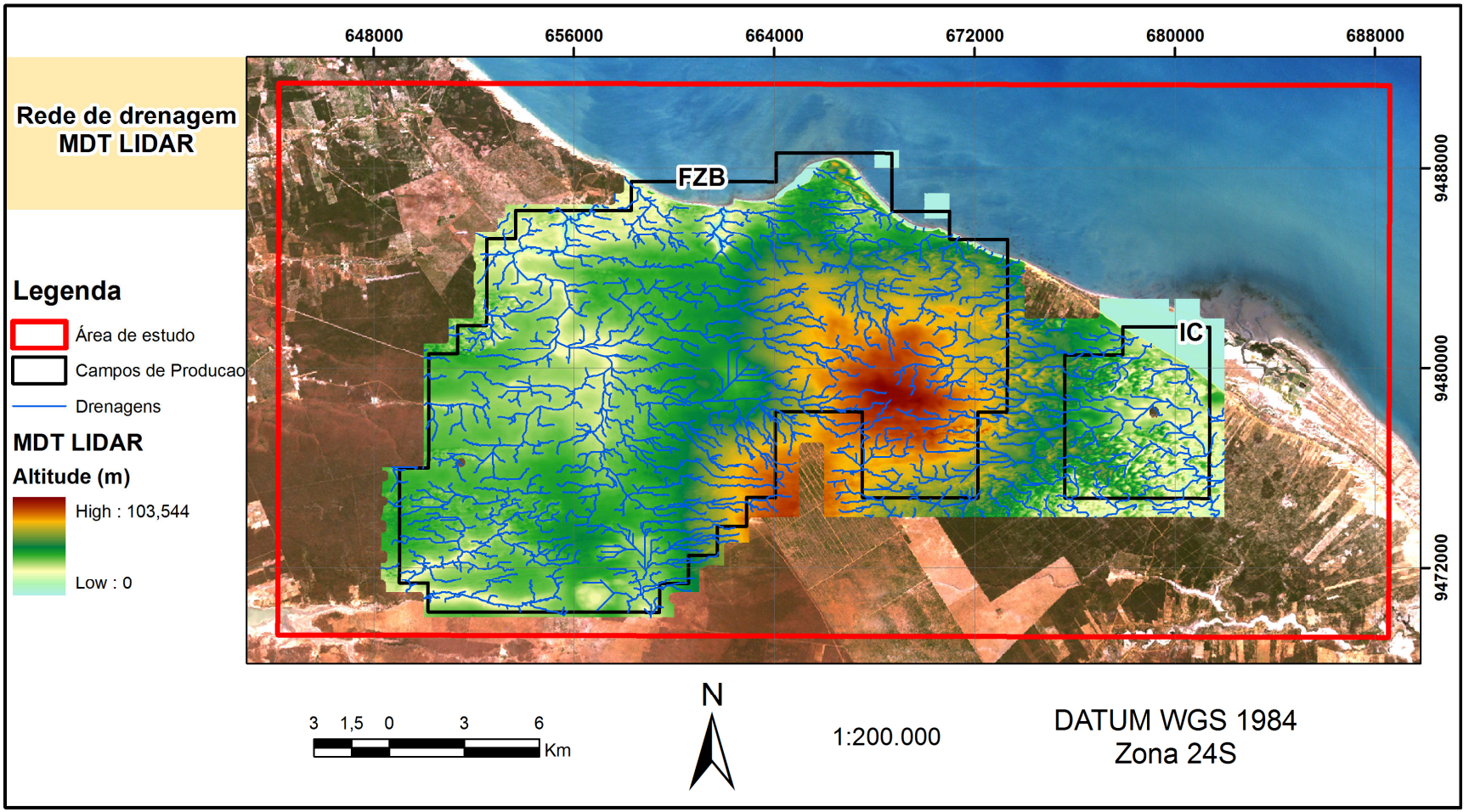

Figura 5.12 – Rede de drenagem extraída do MDE LiDAR. FZB representa o campo de Fazenda Belém e IC o campo de Icapuí.

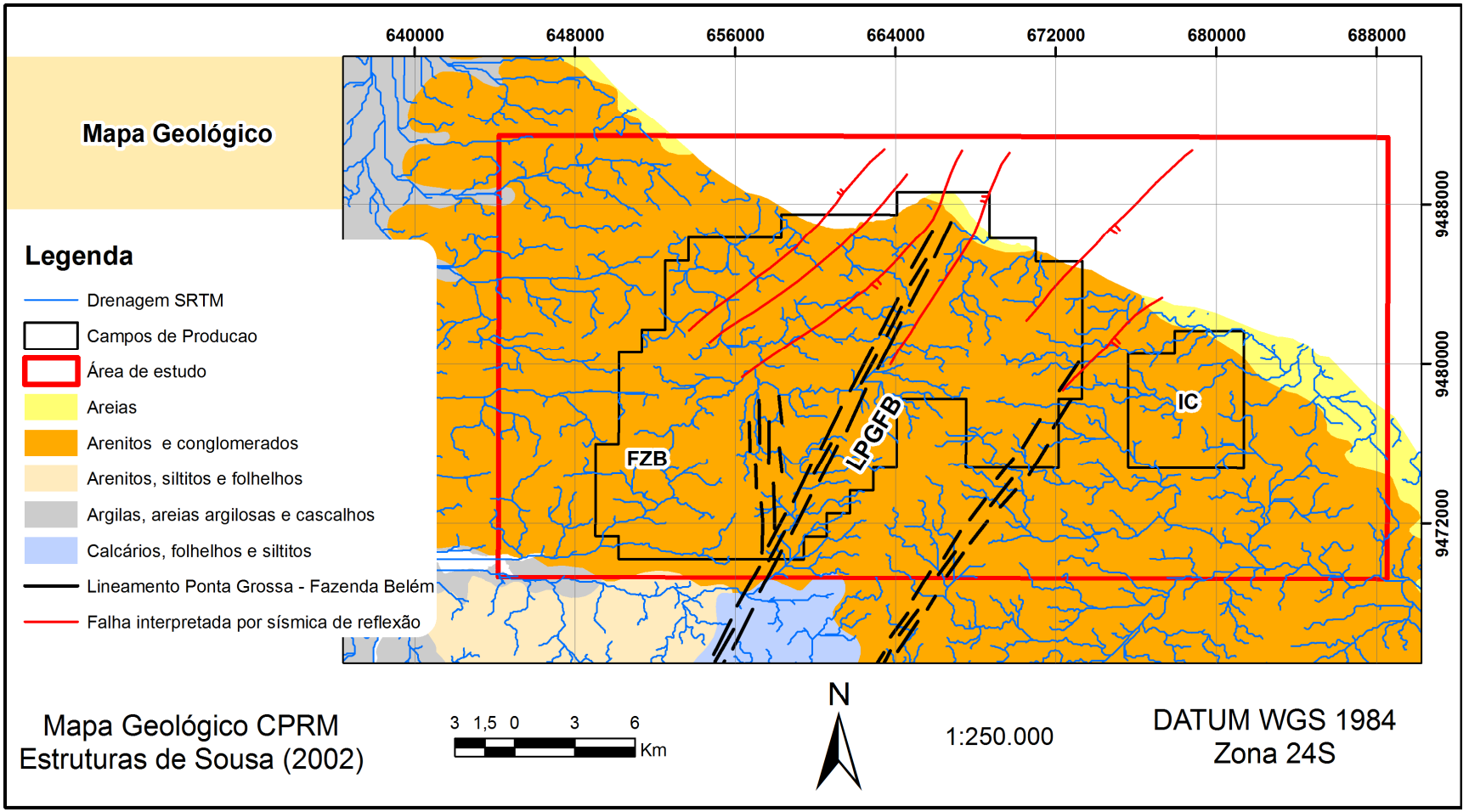

Figura 5.13 – Mapa geológico da CPRM (CAVALCANTE, 2003) com estruturas geológicas interpretadas por Sousa (2002) superpostas. LPGFB é o lineamento Ponta Grossa – Fazenda Belém.

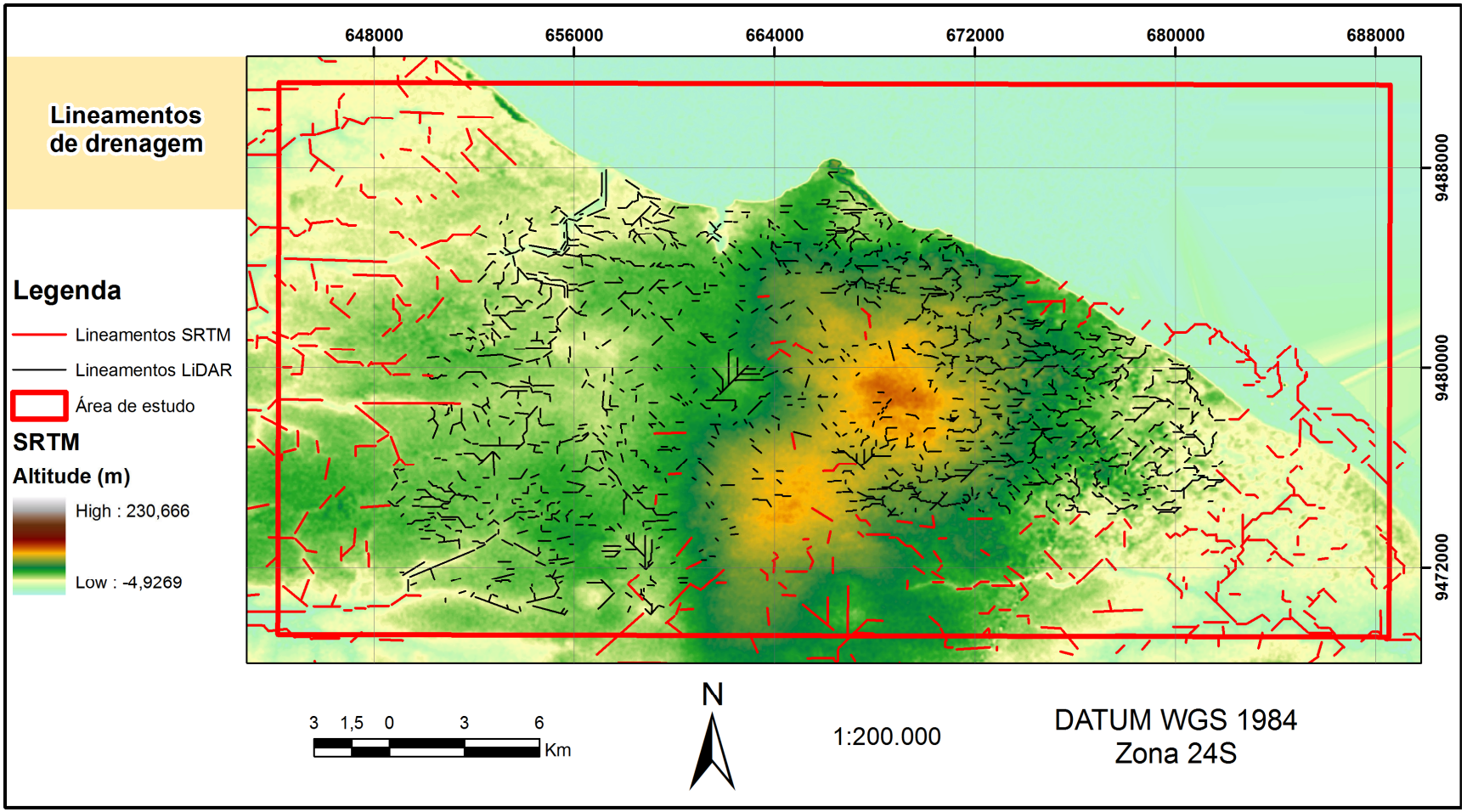

Figura 5.14 – Lineamentos de drenagem interpretados manualmente a partir das duas redes de drenagem. Os vermelhos foram interpretados do MDE SRTM e os pretos, do MDE LiDAR

Os lineamentos obtidos foram tratados no software Spring 5.1.8, com sua ferramenta de análise de lineamentos. Os lineamentos interpretados da rede de drenagem do MDE SRTM foram tratados separadamente dos obtidos com o MDE LiDAR (Tabelas 5.2 e 5.3). Tanto em questão de comprimento, quanto em frequência relativa, a direção E-W (80–100º Az) foi a que mais apresentou lineamentos nos dois conjuntos de dados, como pode ser visto nas Figuras 5.15 e 5.16. Secundariamente, os intervalos de direções 40-50º Az e 310–320º Az também possuem grande frequência absoluta e comprimento absoluto. Uma quarta direção em evidência é a N-S.

O Intervalo angular de 80-100º Az, sozinho, concentra 21,65% dos lineamentos em frequência e 32,78% do seu comprimento total nos lineamentos do MDE SRTM. Nos lineamentos do MDE LiDAR, o mesmo intervalo angular concentra 30,12% em frequência e 33,84% em comprimento. Desta forma, confirma-se como aparente na análise visual da rede de drenagem, que boa parte dos lineamentos identificados encontra-se na direção aproximada E-W. Os intervalos de 350º-10º, 40º-50º e 310º-320º Az possuem respectivamente 16,38%, 13,03% e 15,49% do total de lineamentos para o conjunto de dados do MDE SRTM e 12,31%, 13,36% e 13,41% respectivamente, para o conjunto de dados do MDE LiDAR.

Os lineamentos NE-SW são provavelmente relacionados às estruturas de mesma direção presentes no embasamento e também originadas durante a fase rifte da bacia, que podem ter sido reativadas pelo campo de tensões E-W atual. Os lineamentos NW-SE podem ser reativações de estruturas geradas nos eventos 1 e 2 mencionados por Lima et al. (2009), onde a tensão horizontal máxima se concentrava na direção WNW-ESE. Já os lineamentos N-S também podem ser caracterizados como reflexo de estruturas N-S geradas num evento pós-rifte de idade pós-Campaniana, como sugerido por Lima et al. (2009). Os de orientação E-W, mais evidentes na área de estudo, podem estar relacionados ao estado de tensões horizontais atual na área de estudo, sendo gerados como resposta à compressão E-W indicada por Reis (2012) e Milani et al. (2000).

Elaborando-se uma análise da densidade de lineamentos, em uma janela de análise de 1500 m² (Figuras 5.17-5.20), fica evidente espacialmente o resultado obtido na análise

exploratória que os lineamentos na direção E-W são mais frequentes. Nesse caso, apresentam maior densidade de ocorrência. Mais estruturas foram identificadas sobre o Campo de Icapuí do que sobre o campo de Fazenda Belém em relação à cobertura de sua área. É possível inferir então que se estes lineamentos representarem estruturas mais profundas, o campo de Icapuí sofreu um maior retrabalhamento estrutural recente o que pode ter reduzido bastante suas reservas de óleo.

Tabela 5.2 – Resultados da análise exploratória dos lineamentos de drenagem do MDE SRTM no aplicativo SPRING.

Intervalo angular (Az)	Freq. absoluta	Freq. Relativa	Comp. relativo	Comprimento		Azimute	
				Média	DP	Média	DP
90-80	68	11,97	16,44	788,75	832,65	85,54	3,16
80-70	4	0,7	1,14	929,17	335,49	79,18	4,54
70-60	5	0,88	0,74	480,85	314,69	60,26	4,99
60-50	32	5,63	3,78	384,88	200,22	53,13	2,55
50-40	74	13,03	12,63	556,77	444,08	46,74	2,77
40-30	19	3,35	2,99	513,48	386,52	38,66	2,63
30-20	8	1,41	1,02	416,93	203,81	26,57	4,08
20-10	6	1,06	1,18	639,38	383,83	15,71	3,37
10-0	26	4,58	3,54	443,93	397,98	4,76	2,31
0-350	67	11,8	7,72	376,05	222,34	172,87	5,68
350- 340	9	1,58	1,9	688,96	434,4	169,7	4,76
340-330	5	0,88	0,97	634,38	238,75	152,65	5,4
330-320	25	4,4	2,87	374,46	235,12	141,84	2,99
320-310	88	15,49	13,68	506,96	346,74	139,64	5,43
310-300	34	5,99	6,99	670,29	500,56	129,81	4,05
300-290	5	0,88	1,04	681,05	293,04	118,61	5,84
290-280	1	0,18	0,15	494,4	0	104,93	0
280-270	55	9,68	16,34	968,87	1094,28	93,7	2,09

Tabela 5.3 – Resultados da análise exploratória dos lineamentos de drenagem do MDE LiDAR no aplicativo SPRING.

Intervalo angular (Az)	Freq. absoluta	Freq. Relativa	Comp. relativo	Comprimento		Azimute	
				Média	DP	Média	DP
90-80	416	21,79	23,6	256,45	184,46	89,12	2,34
80-70	48	2,51	3,15	296,91	213,14	74,62	2,78
70-60	45	2,36	2,73	273,7	408,27	62,56	3,42
60-50	79	4,14	3,84	219,64	169,59	54,25	2,85
50-40	255	13,36	12,46	220,92	180,73	45	2,56
40-30	54	2,83	2,17	181,82	102,2	30,8	6,14
30-20	25	1,31	0,98	177,61	108,48	23,84	3,82
20-10	20	1,05	0,85	191,96	103,12	18,43	5,43
10-0	85	4,45	4,05	215,31	189,49	3,01	2,4
0-350	150	7,86	7,08	213,44	191,6	176,19	3,18
350- 340	22	1,15	1,15	236,27	165,9	164,05	3,43
340-330	27	1,41	1,42	238,06	102,97	156,5	3,67
330-320	60	3,14	2,46	184,98	92,52	140,19	4,61
320-310	256	13,41	12,56	221,78	148,96	138,01	3,91
310-300	78	4,09	3,33	192,72	102,6	121,61	5,48
300-290	45	2,36	2,87	288,26	292,63	116,57	3,69
290-280	38	1,99	2,91	346,65	249,84	106,99	3,5
280-270	159	8,33	10,24	291,06	184,24	94,57	2,8

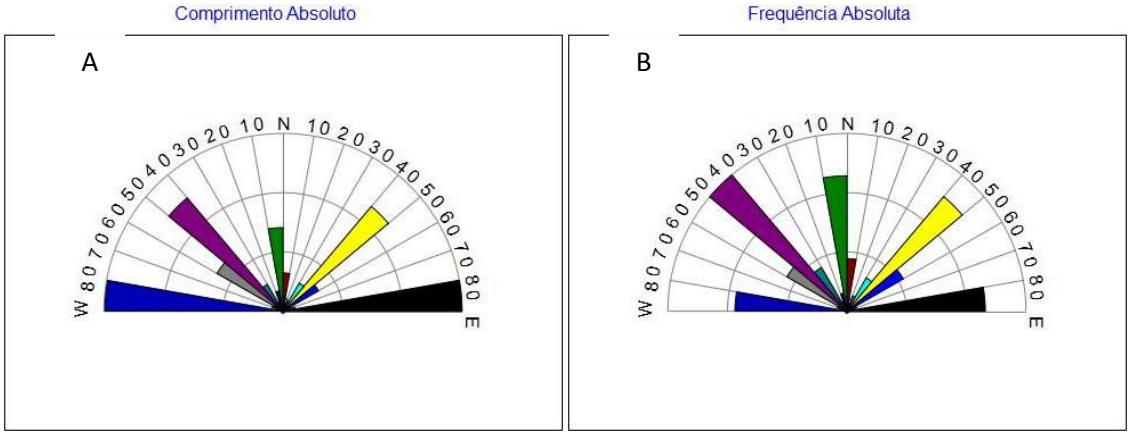

Figura 5.15 – Diagramas de rosetas com comprimento absoluto (a) e frequência absoluta (b) dos lineamentos extraídos do MDE SRTM.

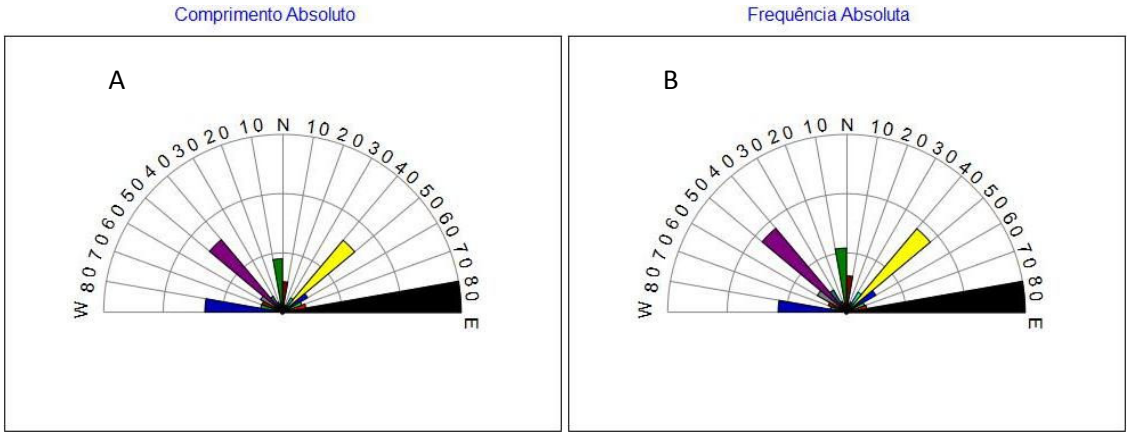

Figura 5.16 – Diagramas de rosetas com comprimento absoluto (a) e frequência absoluta (b) dos lineamentos extraídos do MDE LiDAR.

5.3 Atividade de Campo

Observou-se que a cobertura vegetal predominante na área de estudo era composta por vegetação arbustiva densa a esparsa (Figura 3.2) intercalada com zonas de plantação de cajueiros (Figura 3.3). A região possui vários acessos para poços de produção de óleo, bem como trilhas que restaram de linhas sísmicas antigas (algumas já reocupadas pela vegetação). Os resultados dos métodos utilizados em campo serão apresentados a seguir.

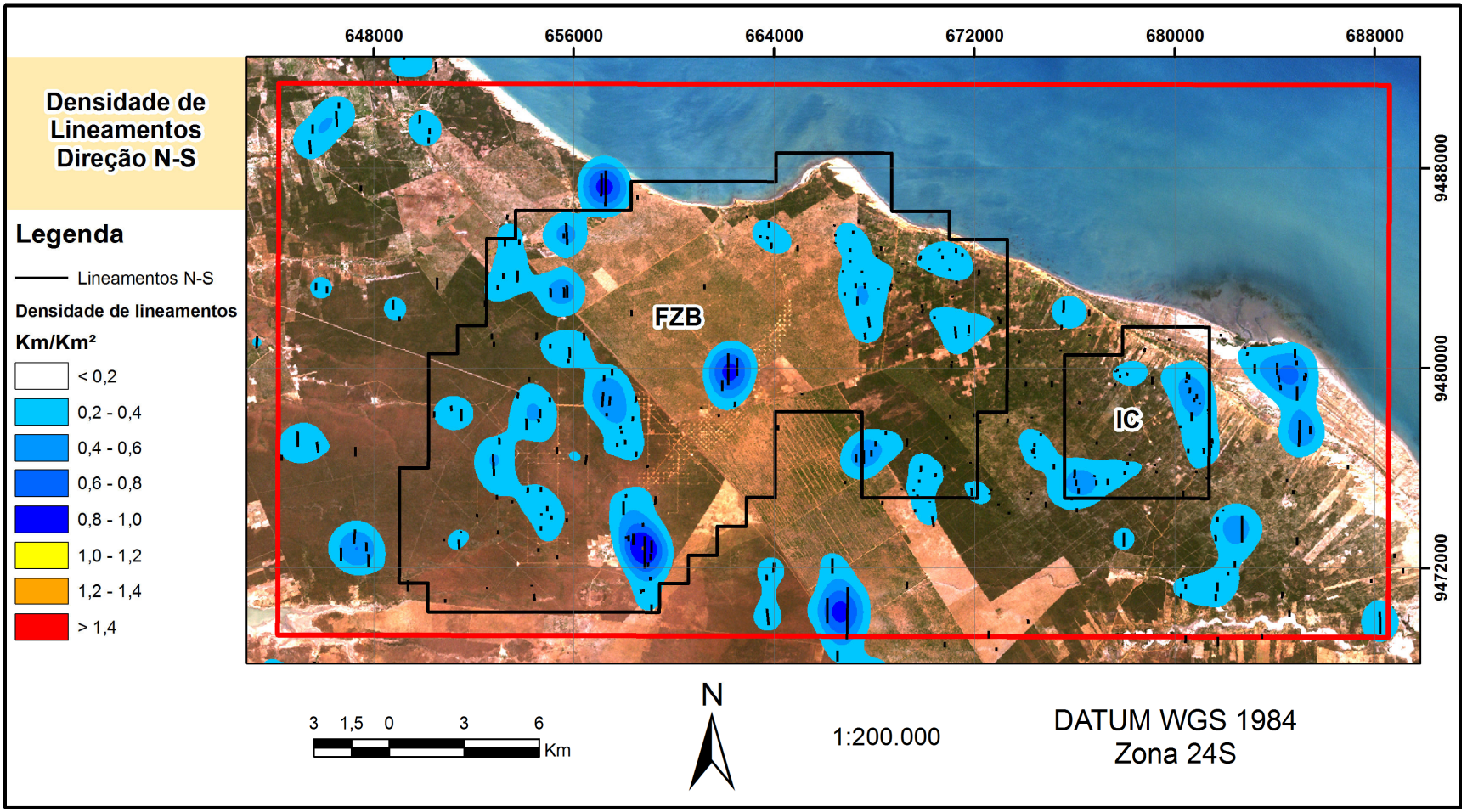

Figura 5.17 – Densidade de lineamentos de drenagem (Km de lineamento por Km²) filtrados na direção N-S sobre imagem LANDSAT. Limites dos campos de Fazenda Belém e Icapuí em preto.

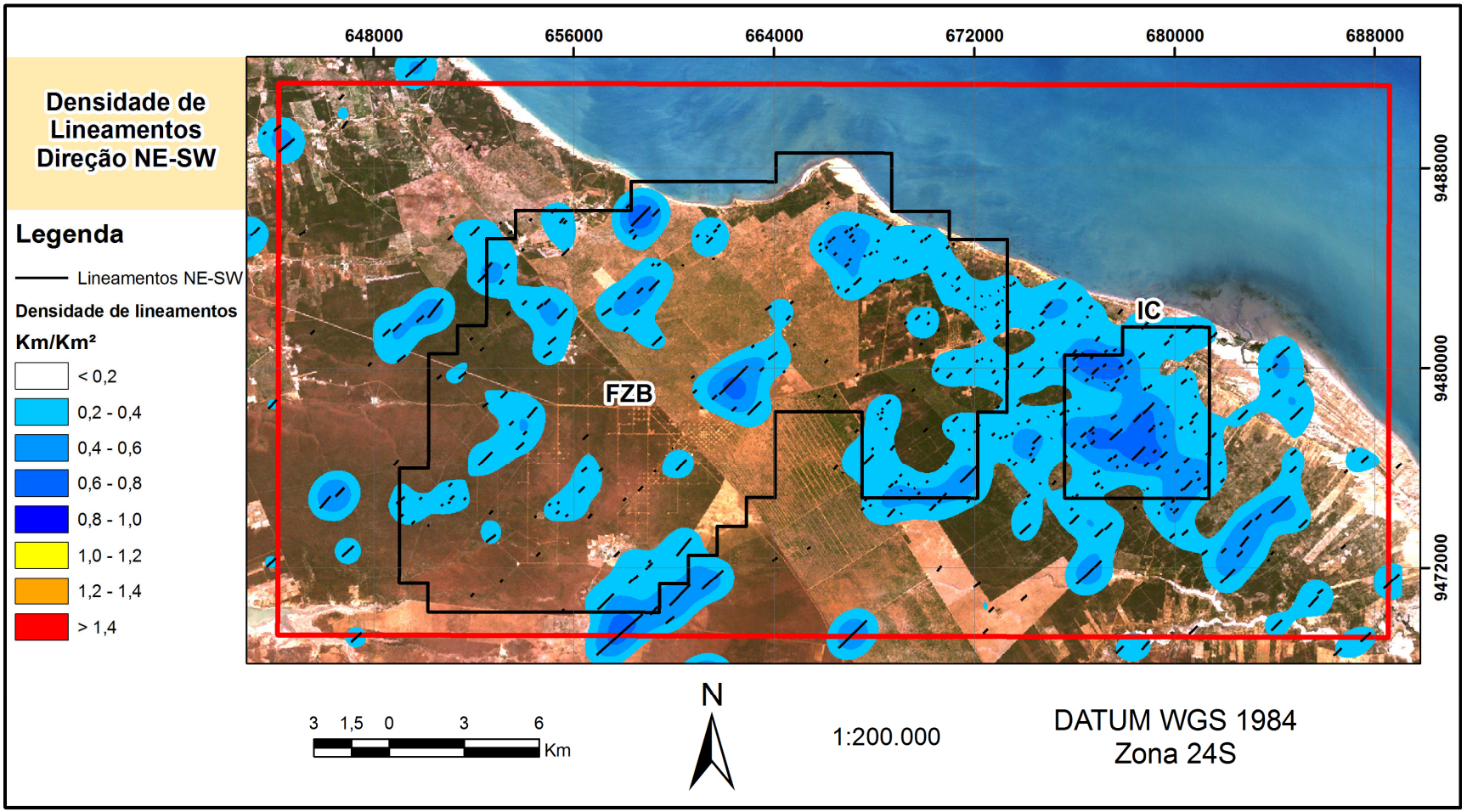

Figura 5.18 – Densidade de lineamentos de drenagem (Km de lineamento por Km²) filtrados na direção NE-SW sobre imagem LANDSAT. Limites dos campos de Fazenda Belém e Icapuí em preto.

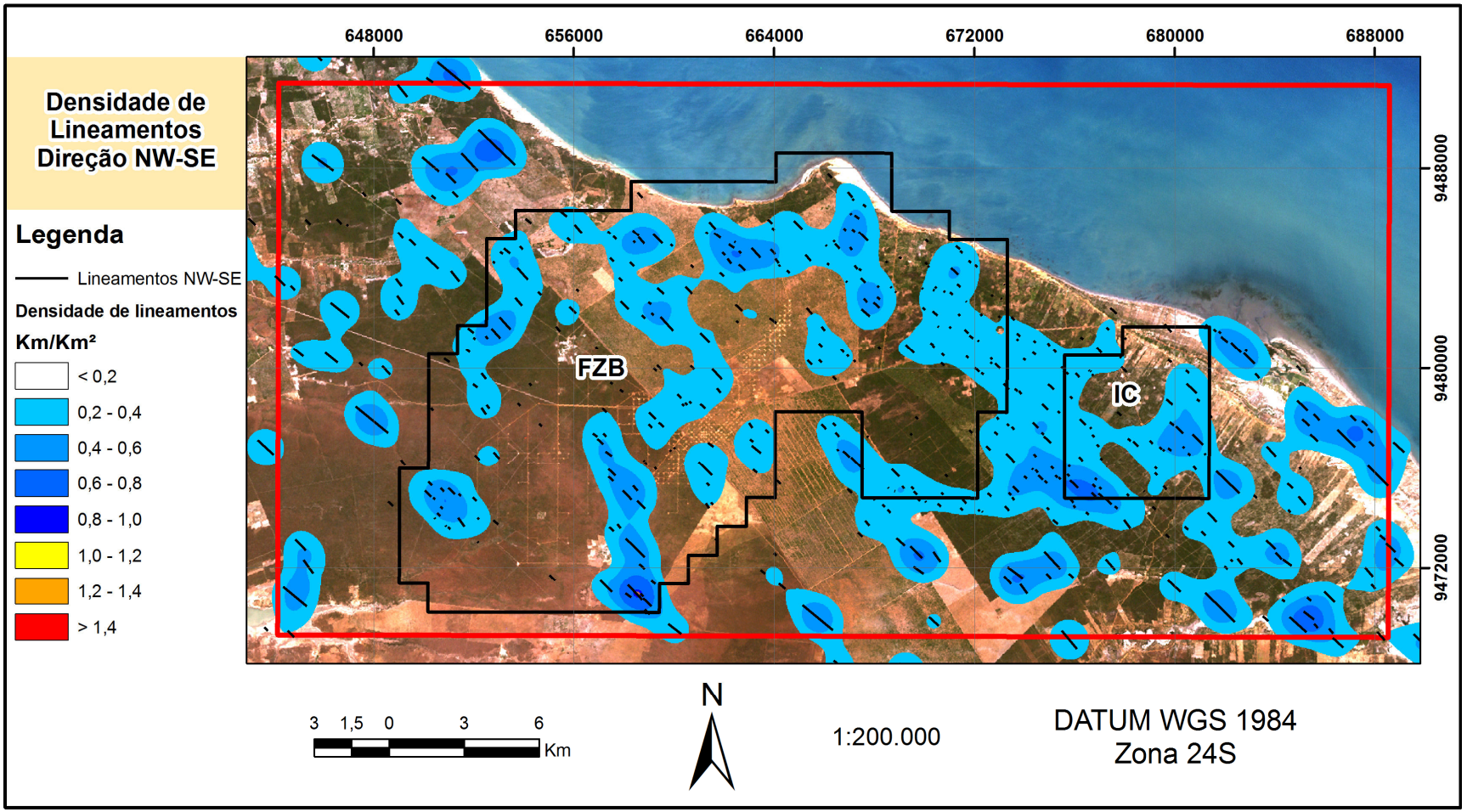

Figura 5.19 – Densidade de lineamentos de drenagem (Km de lineamento por Km²) filtrados na direção NW-SE sobre imagem LANDSAT. Limites dos campos de Fazenda Belém e Icapuí em preto.

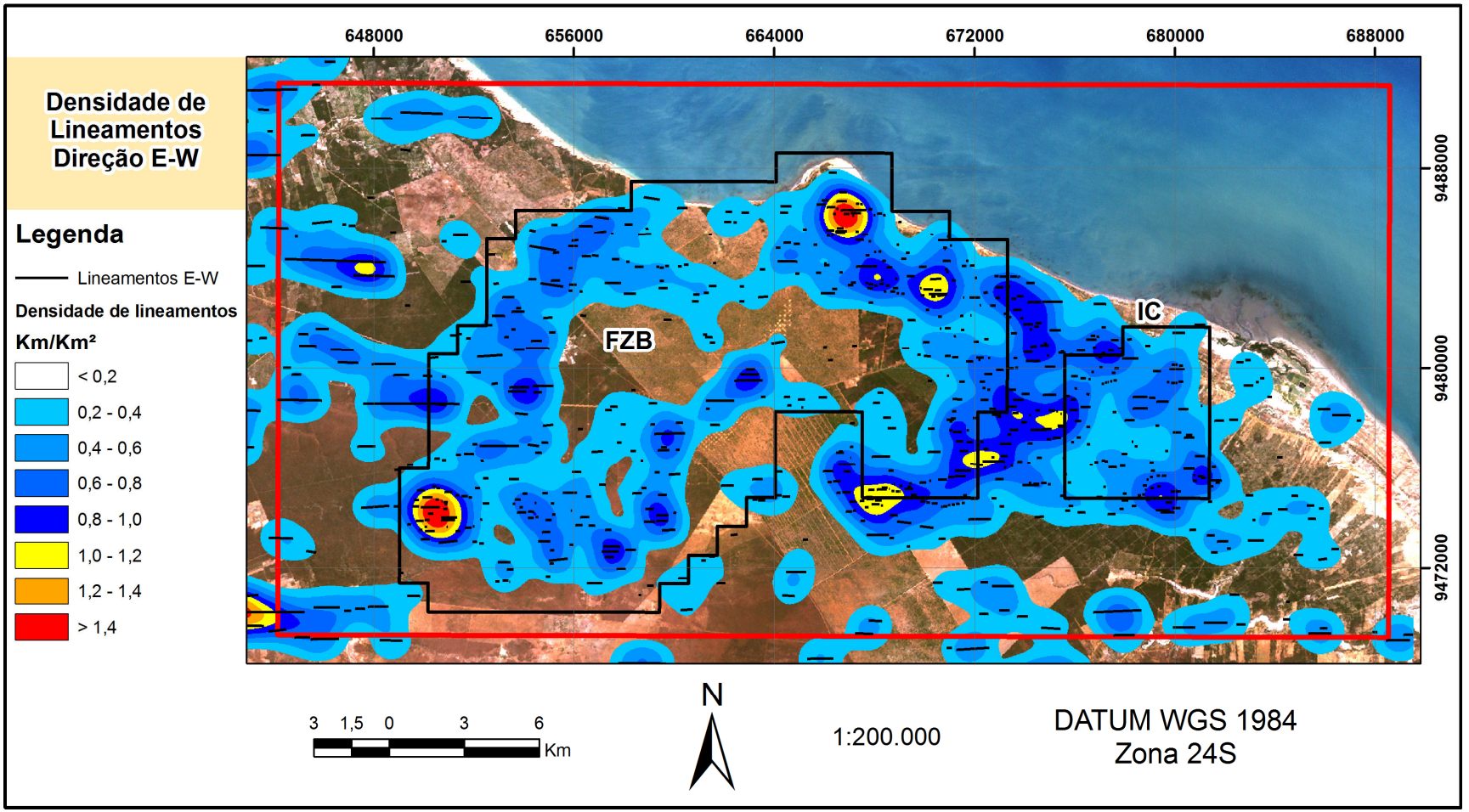

Figura 5.20 – Densidade de lineamentos de drenagem (Km de lineamento por Km²) filtrados na direção E-W sobre imagem LANDSAT. Limites dos campos de Fazenda Belém e Icapuí em preto. Foi a única das direções de lineamentos que apresenta mais de 1,4 km de lineamento por km² na janela de análise de 1500 m.

5.3.1 Gamaespectrometria

Os dados coletados em perfis podem ser visualizados na Tabela 5.4. Os valores encontrados foram relativamente baixos, com alguns pontos anômalos em relação a seus vizinhos.

O conteúdo de Th e U radiogênicos obtidos neste trabalho estão em sua maioria abaixo ou dentro dos valores para solos derivados de arenitos da Austrália (IAEA, 2003). O ponto com maior valor de contagem total foi o p101 que alcançou 29,38 cintilações por segundo (cps), o valor médio das medidas foi de 8,76 cps. Almeida Filho et al. (1998) encontraram valores em torno de 50 cps na anomalia gasométrica de Salgado do Melão.

Tabela 5.4 – Resultados da medição de radiação total e concentração de U, Th e K em cada um dos pontos amostrados.

Amostra	X	Y	Total [cps]	K [ppm]	U [ppm]	Th [ppm]	Dose [nGy/h]
p101	667014	9487235	29,38	2,03	3,09	7,34	63,04
p102	667129	9487071	22,60	1,47	2,19	6,47	48,59
p103	667243	9486907	9,82	0,35	1,36	0,46	13,14
p104	667396	9486734	9,51	0,57	1,47	0,9	17,81
p105	667473	9486579	13,61	1,04	1,41	3,63	30,99
p106	667587	9486416	10,01	0,78	0,43	3,01	20,64
p107	667702	9486252	6,74	0,38	0,07	2,66	12,48
p108	667817	9486088	7,57	0,44	0,66	1,87	14,35
p109	667931	9485924	7,27	0,45	0,85	1,88	15,61
p110	668046	9485760	8,82	0,6	0,3	2,36	15,81
p111	668161	9485596	9,51	0,68	0,16	3,28	18,58
p112	668275	9485432	7,48	0,4	0,49	2,2	13,85
p113	668390	9485269	7,72	0,35	1,16	1,07	13,75
p114	668505	9485105	6,38	0,27	0,92	0,5	9,83
p115	668619	9484941	6,76	0,1	1,05	0,36	7,93
p202	669391	9483544	6,93	0	0,73	0,2	4,51
p203	669366	9483327	6,45	0	0,66	0,21	4,12
p204	669327	9483131	5,73	0	0,54	0,58	4,48
p205	669287	9482935	5,73	0	0,84	0,2	5,08
p206	669247	9482739	8,43	0	1,2	0,3	7,31
p207	669207	9482543	5,06	0	0,72	0,45	5,13
p208	669168	9482347	5,23	0	0,91	0,2	5,46

Tabela 5.4 Conclusão

Amostra	X	Y	Total [cps]	K [ppm]	U [ppm]	Th [ppm]	Dose [nGy/h]
p209	669128	9482151	5,18	0	0,8	0,2	4,89
p210	669243	9481958	5,29	0	0,48	0,1	2,86
p211	669048	9481759	5,86	0	0,4	0,46	3,41
p212	669009	9481563	4,86	0	0,58	0,33	4,05
p213	669096	9481400	7,25	0	0,39	0,7	4,03
p214	668929	9481171	6,64	0,32	0,92	1,65	13,59
p215	668931	9481052	5,28	0,18	0,45	2,13	10,51
p303	667331	9479290	9,64	0,27	1,16	2,1	15,49
p304	667474	9479154	6,80	0,19	0,64	2,76	13,38
p305	667616	9479012	8,76	0,27	0,88	3,57	17,97
p306	667759	9478870	8,46	0,32	0,25	4,33	17,18
p307	667891	9478730	11,48	0,48	1,29	3,88	23,74
p308	668043	9478578	9,05	0,38	0,74	2,67	16,14
p309	668180	9478436	9,27	0,37	0,56	4,62	20,34
p310	668311	9478300	8,84	0,2	1,62	2,31	17,68
p311	668451	9478148	8,72	0,37	0,73	3,16	17,36
p312	668592	9478006	7,67	0,16	1,11	3,11	16,46
p313	668733	9477864	9,53	0	3,2	0,98	20,01
p314	668874	9477722	9,56	0	1,86	1,43	13,94
p315	669015	9477580	9,55	0,43	1,39	2,61	20,17
p402	670220	9477256	9,24	0,37	0,79	4,14	20,29
p403	670047	9477155	9,96	0,43	0,98	3,1	19,35
p404	669875	9477054	10,40	0,47	1,26	3,02	21,13
p405	669702	9476953	8,95	0,32	1,66	2,16	19,01
p406	669529	9476852	9,13	0,27	1,38	2,73	18,4
p407	669328	94767762	7,89	0,21	0,98	2,66	15,21
p408	669186	9476646	8,32	0,19	0,78	3,01	14,87
p409	669016	9476541	9,27	0,24	1,64	1,73	16,73
p410	668846	9476436	8,22	0,21	1,03	2,43	14,91
p411	668676	9476331	9,60	0,33	0,94	3,26	18,27
p412	668506	9476227	9,29	0,44	0,6	3,46	18,33
p413	668327	9476138	9,33	0,52	0,86	2,93	19,37
p414	668159	9476030	8,66	0,38	0,81	3,41	18,56
p415	667990	9475922	7,85	0,12	1,29	2,96	16,56
Média			8,76	0,33	0,99	2,22	15,66
Desvio Padrão			3,83	0,36	0,60	1,57	10,00

5.3.2 Susceptibilidade Magnética

As medidas de susceptibilidade magnética podem ser vistas na Tabela 5.5. Assim como as medidas de radiação total, tais valores também se mostraram muito baixos, na ordem de $0{,}02 \cdot 10^{-3}$ com algumas medidas atingindo o máximo $0{,}18 \cdot 10^{-3}$. Sua média foi de 0,029 com desvio padrão de 0,031.

As amostras p409 - p411 do perfil 4 estão posicionadas em local onde a vegetação foi queimada, existindo a possibilidade das medidas refletirem esta condição. Os outros perfis possuem comportamento homogêneo, com medidas em torno de $0{,}02 \cdot 10^{-3}$.

Tabela 5.5 – Resultados da medição de susceptibilidade magnética em cada um dos pontos/perfis amostrados. Pontos com – indicam que não houve visita/medição.

Amostra	Média (10^{-3} SI)	Amostra	Média (10^{-3} SI)	Amostra	Média (10^{-3} SI)	Amostra	Média (10^{-3} SI)
p101	0,02	**p201**	-	**p301**	-	**p401**	-
p102	0,02	**p202**	0,02	**p302**	-	**p402**	0,04
p103	0,00	**p203**	0,03	**p303**	0,01	**p403**	0,10
p104	0,00	**p204**	0,04	**p304**	0,01	**p404**	0,04
p105	0,01	**p205**	0,02	**p305**	0,02	**p405**	0,04
P106	0,02	**p206**	0,01	**p306**	0,03	**p406**	0,04
p107	0,00	**p207**	0,02	**p307**	0,04	**p407**	0,02
p108	0,01	**p208**	0,02	**p308**	0,03	**p408**	0,03
p109	0,01	**p209**	0,00	**p309**	0,02	**p409**	0,18
p110	0,03	**p210**	0,02	**p310**	0,03	**p410**	0,10
p111	0,02	**p211**	0,01	**p311**	0,03	**p411**	0,10
p112	0,02	**p212**	0,01	**p312**	0,02	**p412**	0,08
p113	0,04	**p213**	0,04	**p313**	0,02	**p413**	0,01
p114	0,01	**p214**	0,02	**p314**	0,01	**p414**	0,01
p115	0,01	**p215**	0,05	**p315**	0,03	**p415**	0,02
Média	0,015	**Média**	0,019	**Média**	0,025	**Média**	0,058
Desvio Padrão	0,012	**Desvio. Padrão**	0,011	**Desvio. Padrão**	0,012	**Desvio. Padrão**	0,048

5.3.3 Gasometria do solo

Os resultados apontaram valores de *background*, sem maiores anomalias, conforme sumarizado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Resultados da medição de gasometria de solos em cada um dos pontos amostrados.

Amostra	Metano	Etano	Eteno	ΣC2-C5	HCT	Etano/Eteno
p101	6,455	0,172	0,183	0,191	6,646	0,943
p102	5,327	0,197	0,210	0,212	5,539	0,939
p103	5,531	0,057	0,697	0,123	5,654	0,082
p104	6,636	0,228	0,070	0,344	6,979	3,280
p105	3,554	-	0,158	0,059	3,612	0,000
p106	3,583	0,023	0,182	0,123	3,705	0,125
p107	4,047	0,151	0,200	0,237	4,284	0,755
p108	7,932	0,292	0,218	0,435	8,367	1,340
p109	5,145	0,222	0,180	0,340	5,485	1,234
p110	5,757	0,137	0,156	0,232	5,989	0,877
p111	5,772	0,209	0,200	0,315	6,088	1,044
p112	5,122	0,153	0,223	0,240	5,362	0,687
p113	8,869	0,051	0,626	0,192	9,061	0,081
p114	4,387	0,099	0,126	0,178	4,565	0,783
p115	4,489	0,111	0,143	0,217	4,707	0,777
p303	4,856	0,111	0,146	0,204	5,060	0,764
p304	4,409	0,090	0,143	0,184	4,593	0,630
p305	9,569	0,346	0,046	0,528	10,097	7,522
p306	9,960	0,340	0,103	0,425	10,385	3,291
p307	4,886	0,119	0,144	0,200	5,086	0,825
p308	6,478	0,204	0,187	0,294	6,772	1,089
p309	6,322	0,212	0,128	0,301	6,623	1,657
p310	6,228	0,109	0,110	0,174	6,402	0,995
p311	5,836	0,184	0,266	0,274	6,109	0,693
p312	7,292	0,254	0,168	0,369	7,662	1,508
p313	3,775	0,141	0,134	0,199	3,975	1,048
p314	3,550	0,095	0,154	0,183	3,732	0,616
p315	22,496	0,022	0,445	0,123	22,620	0,050

Ferreira (2002) atenta para o fato que os mesmos valores de background podem ser encontrados tanto sobre bacias sedimentares como sobre zonas cristalinas devido à atividade biogênica. Tendo em vista que as exsudações ou microexsudações de óleo tendem a aumentar a razão entre hidrocarbonetos saturados *versus* insaturados, a razão etano/eteno pode ser um indicador de fonte termogênica de hidrocarbonetos no solo.

Montando um histograma com os valores obtidos na razão etano/eteno (Figura 5.21), pode-se determinar, empiricamente, que as amostras com valores maiores que 1,5

possuem um comportamento diferente das outras. Com isto, pode-se admitir que elas possuem um enriquecimento em hidrocarbonetos saturados em relação as demais com uma provável fonte termogênica.Estes pontos encontram-se destacados das demais amostras na Figura 5.22.

Apesar dos baixos valores obtidos com as análises de campo, sem evidenciar a presença de fenômenos marcadores de microexsudações de hidrocarbonetos, pode-se assumir que cinco das amostras de gases no solo possuem origem termogênica (p104, p305, p306, p309 e p312; Figura 5.23). Estas razões não deveriam ser encontradas naturalmente em solos. A geologia da superfície da área de estudo é compreendida principalmente por arenitos e seu respectivo solo quartzoso derivado (Figura 5.13). Desta forma, supõe-se escassez de constituintes necessários para a geração de assembleias minerais neoformadas. Outro ponto é que o reservatório de Fazenda Belém é composto por óleos mais pesados e com baixa pressão, onde sua extração é feita a partir de injeção cíclica de vapor, possuindo, portanto, um menor aporte de hidrocarbonetos gasosos alcançando a superfície. Isoladamente a maior parte dos testes de campo não foi capaz de confirmar a existência do fenômeno em estudo.

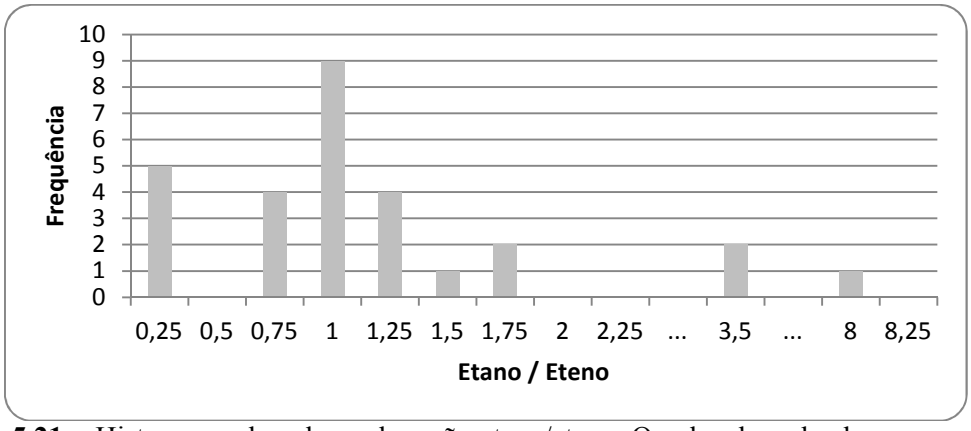

Figura 5.21 – Histograma de valores de razão etano/eteno. O valor de cada classe corresponde ao seu limite superior. Os intervalos de valores são de 0,25. Notar os valores acima de 1,5 com comportamento diferente das demais.

5.4 Integração de dados

Ao sobrepor as amostras gasométricas anômalas (razão Etano/Eteno maior que 1,5) com as anomalias tonais nas imagens, existe coincidência entre a anomalia da imagem TM

de 1993 com anomalias gasométricas do perfil 3 (Figuras 5.23 e 5.24). Comparando-se com o MDE LiDAR e SRTM, pode-se aventar que o platô no qual se encontra o perfil 3 (Figura 5.25) corresponde à expressão geomórfica de um paleoalto do embasamento, que pode funcionar como focalizador para a migração de hidrocarbonetos gasosos até a superfície (Ver Figura 3.3). Não existe relação aparente entre os lineamentos de drenagem e a presença das anomalias gasométricas para o perfil 3, devido à sua localização em região relativamente plana. A amostra anômala do perfil 1 foi uma ocorrência isolada, sendo improvável que ela represente alguma zona de ocorrência de microexsudações.

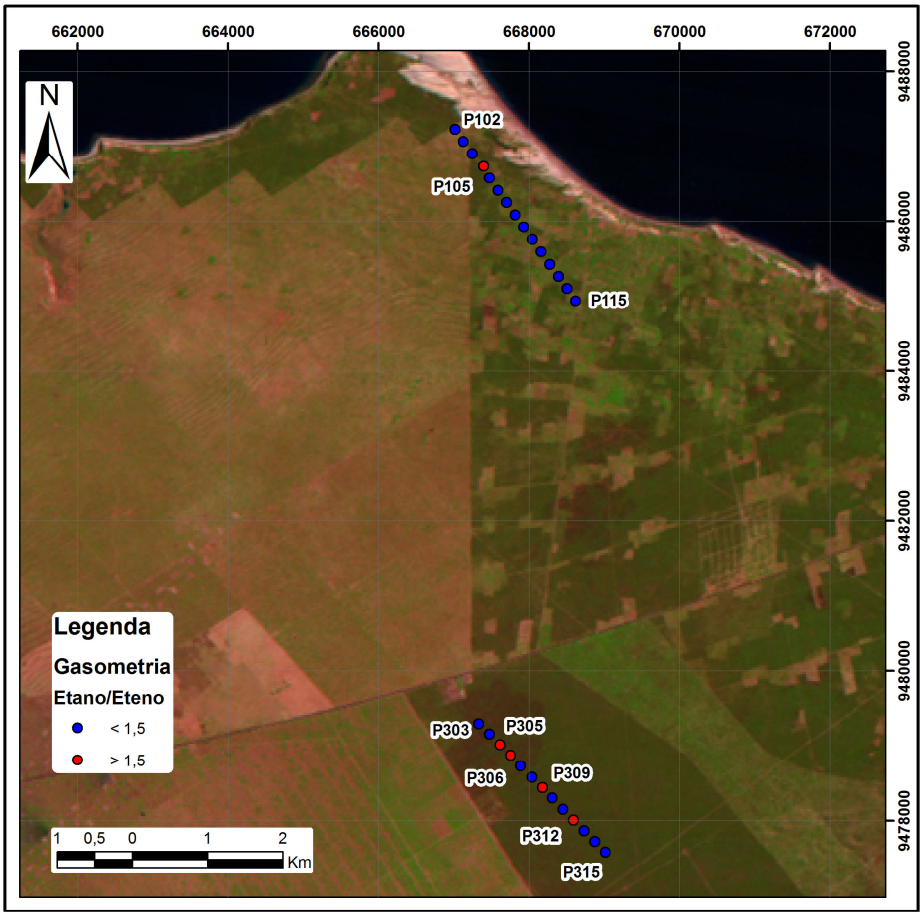

Figura 5.22 – Amostras anômalas (razão Etano/Eteno maior que 1,5) em destaque em relação aos perfis amostrados na área de estudo.

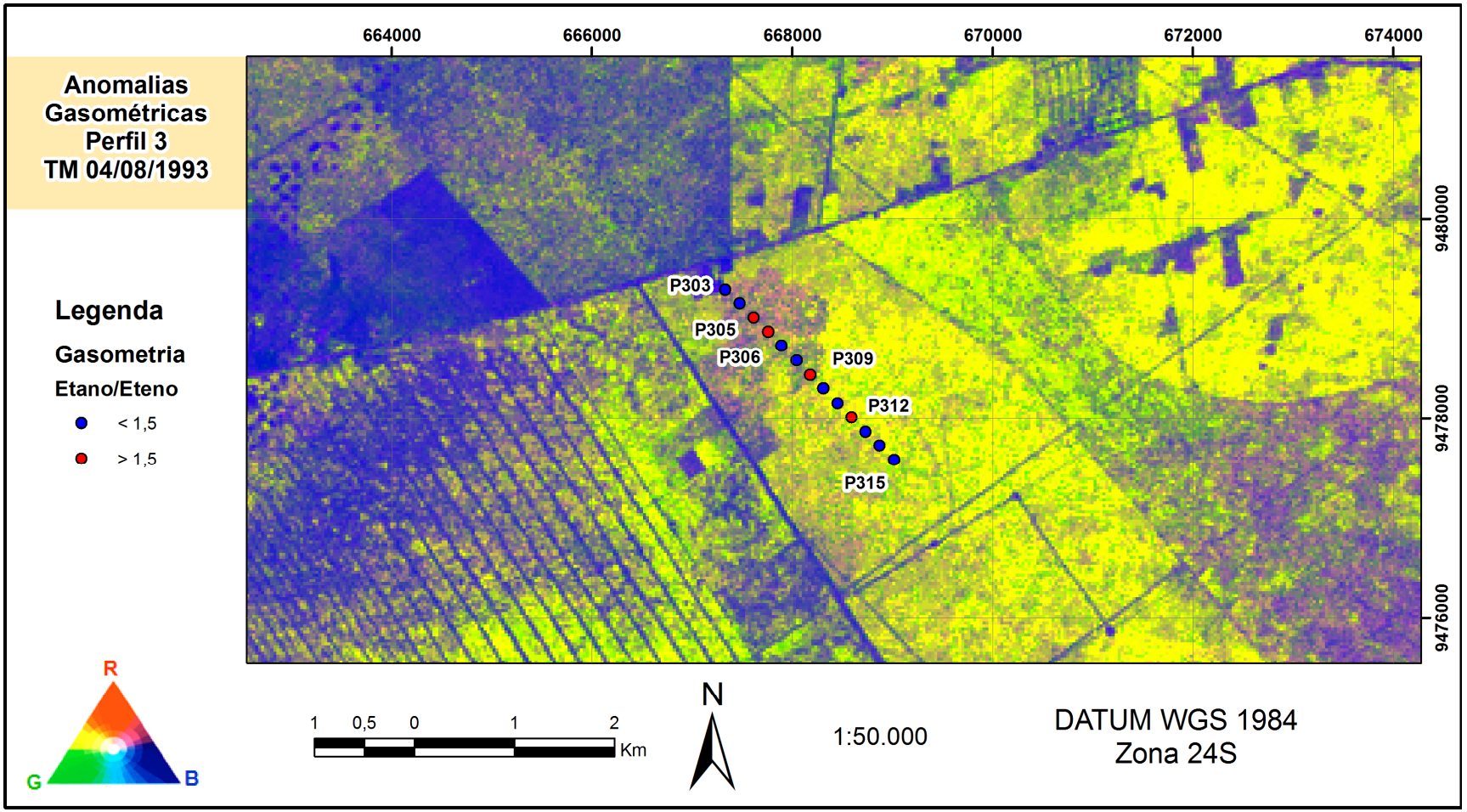

Figura 5.23 – Anomalias gasométricas x anomalias nas imagens para o perfil 3. Notar a presença de pontos com razão etano/eteno maior que 1,5 dentro de áreas em magenta na imagem. Composição colorida da Figura 5.5.

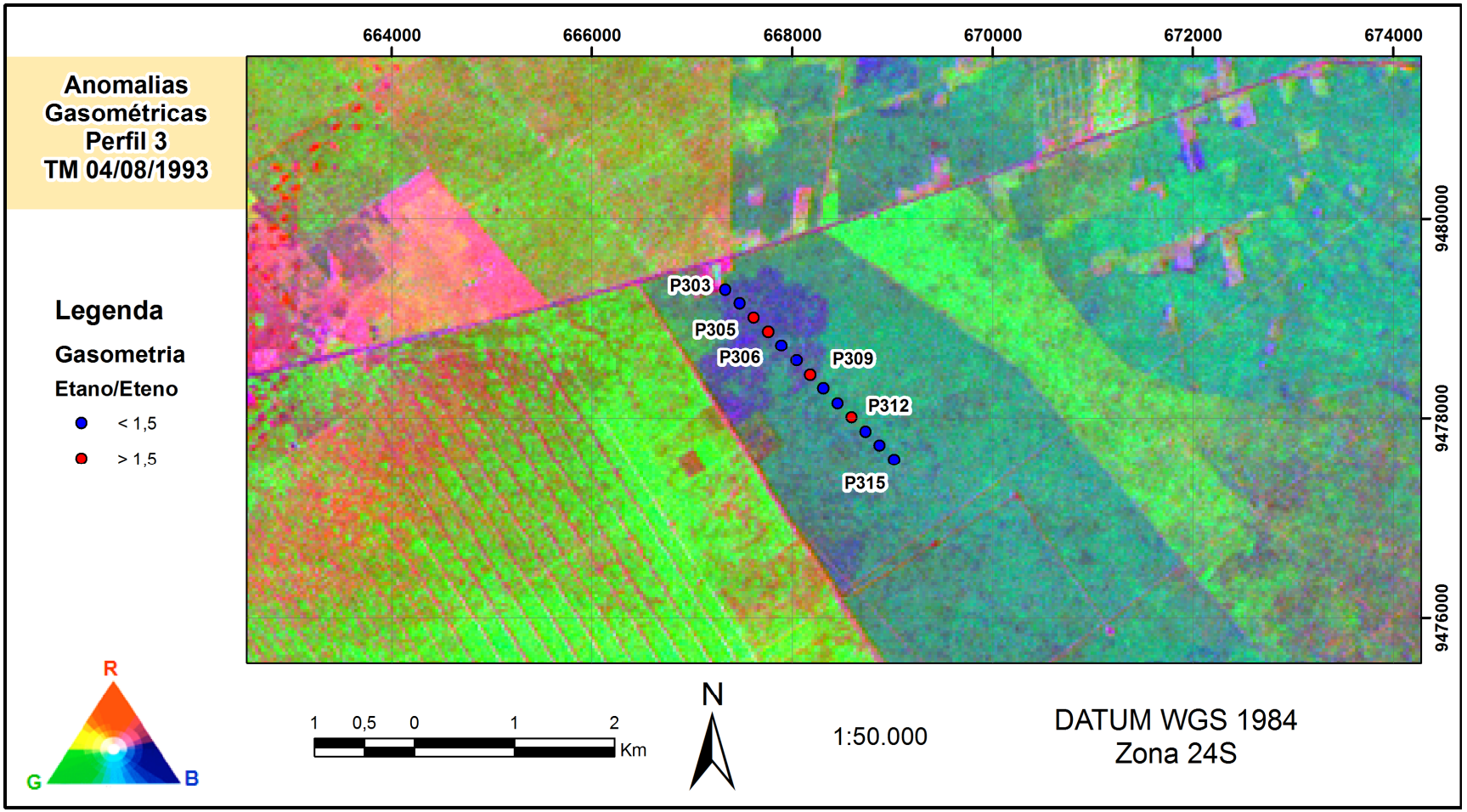

Figura 5.24 – Anomalias gasométricas x anomalias nas imagens para o perfil 3. Notar a presença de pontos com razão etano/eteno maior que 1,5 dentro de áreas em azul na imagem. Composição colorida da Figura 5.10.

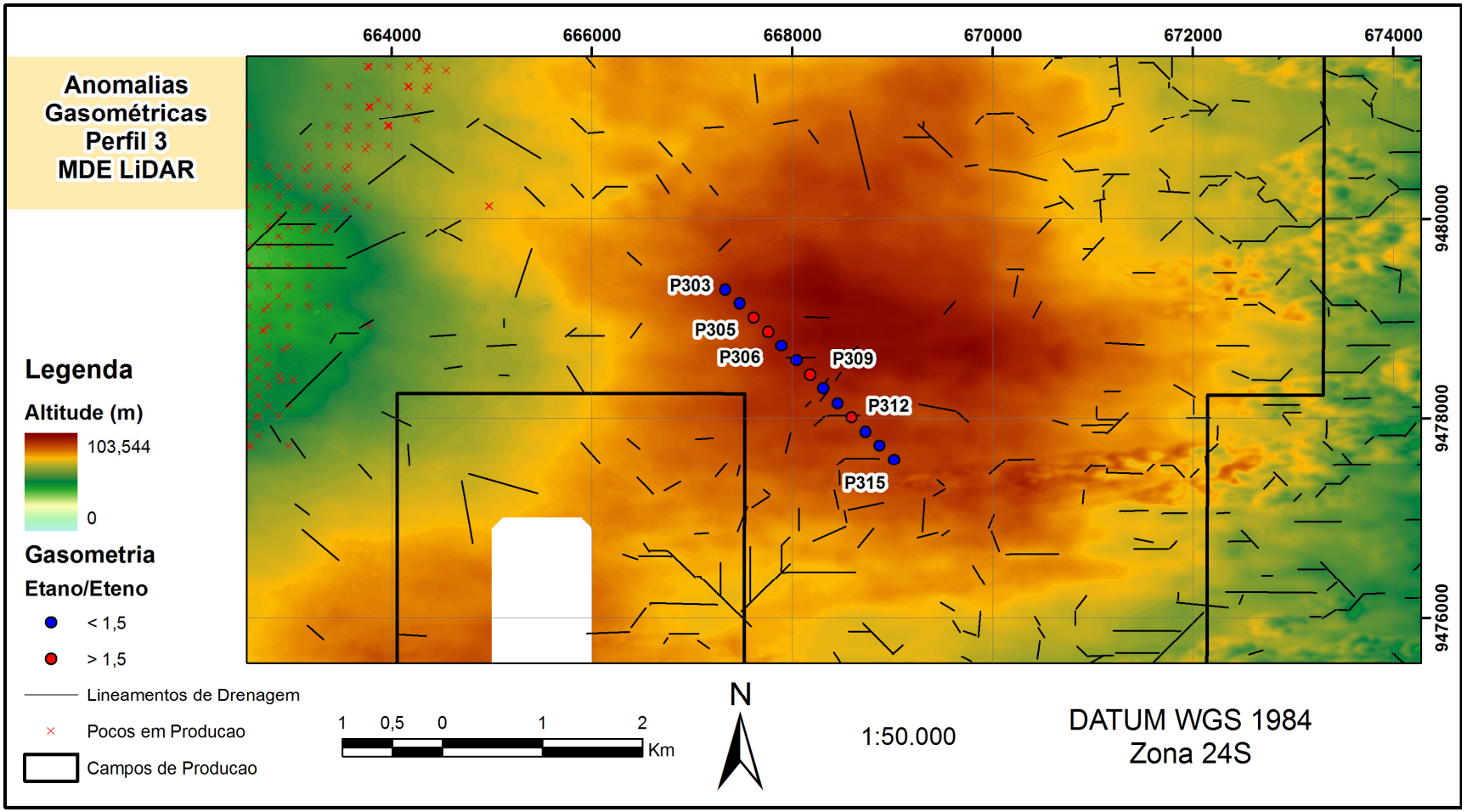

Figura 5.25 – Anomalias gasométricas x MDE LiDAR e lineamentos para o perfil 3. Notar que o perfil amostrado encontra-se num platô, sendo esta a zona mais elevada da área de estudo.

Com os dados obtidos neste trabalho, a principal evidência da existência de microexsudações na área de estudo foi a razão entre o etano e o eteno, que diz respeito à proveniência dos gases presentes no solo. As análises geofísicas de campo apresentaram valores baixos, onde não se confirma a presença de minerais radioativos ou magnéticos neoformados pelos processos que ocorrem na área. No entanto este resultado negativo não significa que não haja o processo, pois a falta dos elementos necessários para a geração desses minerais pode ser a causa da sua não ocorrência próximo à superfície. O caminho preferencial dos hidrocarbonetos esperado deveria ser os sets E-W de falhas e fraturas devido ao estudo atual de tensões na região. No entanto nenhuma relação evidente foi mostrada entre os dados de lineamentos e a possível ocorrência de feições de microexsudações.

6 CONCLUSÕES

Sobre a detecção de anomalias relacionadas às microexsudações de hidrocarbonetos

Algumas regiões apresentaram uma coloração magenta nas composições RGB 2/3, 4/3 e 5/7 e na 2/3, 4/3, 2/3-4/3 representando indícios da ocorrência de microexsudações de hidrocarbonetos na área de estudo. A lixiviação do óxido de ferro apresentou-se como principal alteração detectada que pode sugerir a ocorrência das microexsudações. Logo, a composição colorida mais indicada para uso, nesse caso, foi a utilizada por Almeida Filho *et al.* (1998) que leva em conta somente o fenômeno da lixiviação e a presença de vegetação. Todas as imagens MSS e TM de 1979, 1984 e 1993 apresentaram algumas zonas com a possível ocorrência do fenômeno de estudo, inclusive com zonas recorrentes entre as datas evidenciando um fenômeno contínuo.

O processamento por componentes principais seletivas mostrou resultado convergente ao resultado obtido com as razões entre bandas. Foram realçados alvos que denotam lixiviação, de ferro férrico dos solos, sem também denotarem indícios da presença de argilominerais e carbonatos influenciando áreas na imagem. Notadamente a composição colorida entre CP's 2 seletivas RGB 2/3, 4/3 e 5/7 resultante possui maior contraste e nitidez entre os alvos, propiciando uma melhor definição visual de zonas anômalas.

Sobre a comparação entre processamentos de realce

A composição colorida com as componentes principais se mostrou superior na definição de alvos, tornando-os menos ruidosos e mais facilmente interpretáveis. Dada a menor variância das respostas dos alvos do terreno, esta técnica pode ser muito favorável a uma classificação automática. Embora este método possua uma complexidade um pouco maior, exigindo mais atenção na sua aplicação, o uso de apenas duas bandas no processo facilita a interpretação dos autovalores e autovetores e dos resultados finais esperados para cada alvo da cena.

A composição colorida entre razões de bandas obteve resultados muito semelhantes aos das componentes principais. No entanto as imagens são mais ruidosas e possuem menor definição de alvos. Sua interpretação mais intuitiva a torna um pouco mais simples de utilizar. Visualmente, este método se mostrou um pouco inferior ao citado acima, sendo recomendado para uso exploratório inicial.

Sobre a influência dos lineamentos sobre as anomalias

Nenhuma influência direta foi observada entre as anomalias encontradas nas imagens e a presença de lineamentos de drenagem. Observou-se, através dos modelos de elevação, a existência de um provável paleoalto do embasamento que estaria se refletindo na sequência sedimentar sobrejacente, imprimindo um padrão anômalo na drenagem local (a e b da Figura 5.11). Este paleoalto parece funcionar como mecanismo focalizador das microexsudações e deve ser o causador das anomalias gasométricas identificadas no perfil 3.

Visualmente os lineamentos apresentaram uma forte componente E-W que foi confirmada como sendo a principal direção presente na área de estudo através da análise exploratória de lineamentos no aplicativo SPRING. Essa direção de fraturamento concorda com o campo atual de tensões na direção E-W sugerido por Milani *et al.* (2010) e Reis (2012). Assim como as outras direções preferenciais dos lineamentos podem ser explicadas pela sucessão de eventos indicada por Lima *et al.* (2009). Observando a densidade de lineamentos presente sobre os campos de Fazenda Belém e Icapuí, mais uma vez, os de direção E-W se destacam com maior comprimento/km². O campo de Icapuí possui uma maior presença de lineamentos de drenagem, o que sugere uma maior ação da tectônica recente sobre este campo em relação ao seu vizinho Fazenda Belém.

Sobre as análises geofísica e geoquímicas

As análises de gamaespectrometria e susceptibilidade magnética encontraram valores baixos nos perfis analisados. Os valores encontram-se sempre abaixo de valores de background descartando a presença de minerais magnéticos ou radioativos

neoformados. Este comportamento reflete a composição rica em quartzo dos arenitos e solos da área de estudo (Figura 5.14) e a escassez de elementos químicos nos solos que pudessem responder à ocorrência de microexsudações (principalmente S e U) e formar novas assembleias minerais.

Os resultados do teor de hidrocarbonetos no solo, assim como os resultados geofísicos, apresentaram valores muito baixos, considerados de background para solos. No entanto, ao se observar a razão entre hidrocarbonetos saturados/insaturados, observou-se que algumas das amostras possuem indícios de origem termogênica. Neste trabalho foram consideradas anômalas razões acima de 1,5 como indicadoras de fonte termogênica de hidrocarbonetos. Logo, observa-se que diretamente, as análises de campo não evidenciaram a presença de hidrocarbonetos gasosos no solo, mostrando apenas indícios de fontes termogênicas para algumas amostras analisadas.

Considerações finais

As amostras anômalas de gasometria encontradas no perfil 3 possuem sobreposição espacial com a anomalia tonal encontrada nas imagens na porção central do campo de Fazenda Belém. Embora não haja correspondência clara e direta entre nenhuma das outras variáveis com as anomalias tonais das imagens, ainda existem estes fortes indícios da ocorrência do fenômeno na área.

O campo de Fazenda Belém é um campo que está em produção há bastante tempo e faz uso de injeção cíclica de vapor d'água para aumentar a sua recuperação. É possível que sua menor pressão e sua composição majoritária de hidrocarbonetos pesados tenham grande influência num menor aporte de hidrocarbonetos gasosos na superfície o que dificultaria a detecção de fenômenos na superfície. Outro fator importante é a grande antropisação existente na área que pode mascarar feições superficiais geradas anteriormente ao uso atual da terra. Mesmo utilizando imagens mais antigas, ainda é notável a variação do uso do solo ao longo dos anos.

Este trabalho não foi capaz de afirmar com certeza a existência do fenômeno das microexsudações de hidrocarbonetos. O solo extremamente arenoso que não possuiu

feições minerais indicativas claras da existência de microexsudações além da lixiviação do óxido de Ferro, resultou em baixos valores de susceptibilidade magnética e radiação total. Observa-se que o método de confirmação empregado não é o ideal para o conjunto de condições encontradas na área de estudo, como o tipo de solo e o campo de óleo pesado senil. No entanto, foram encontradas algumas amostras de solos com a presença de gases possivelmente termogênicos (gerados por microexsudações) com sobreposição espacial com anomalias tonais de imagens TM e MSS e zonas de concentração de lineamentos detectados em MDE, sugerindo a existência do fenômeno (mesmo que em menor escala do que o esperado) e reafirmando a utilidade das imagens orbitais para este fim. As anomalias detectadas no perfil 3 são possivelmente geradas pela condução dos hidrocarbonetos gasosos através das bordas do paleoalto do embasamento até a superfície, lixiviando o ferro férrico e causando anomalias tonais ao longo da área de estudo.

Recomenda-se que trabalhos subsequentes avaliem a resposta espectral da vegetação sob a ação de um ambiente redutor gerado por microexsudações de hidrocarbonetos para que estes possam integrar, ou não, a análise em campos que possuam ambiente semelhante ao campo de Fazenda Belém.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Banco de dados de exploração e produção**. Rio de Janeiro: ANP, 2010. Disponível em: <http://www.bdep.gov.br>. Acesso em: 15/02/2012.

ALMEIDA FILHO, R.; MIRANDA, F. P.; YAMAKAWA, T.; OIKAWA, N. Uso de imagens LANDSAT-TM no mapeamento de áreas de alterações mineralógicas induzidas por microexsudação de hidrocarbonetos, Bacia Tucano Norte-BA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 9, 1998, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. Artigos, p. 339-348. ISBN 85-17-00015-3. (INPE-6899-PRE/2866). Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/02.08.10.57>. Acesso em: 30 set. 2013.

ALMEIDA FILHO, R.; MIRANDA, F.P.; GALVÃO, L.S.; FREITAS, C.C. Terrain chacteristics of a tonal anomaly remotely detected in an area of hydrocarbon microseepage, Tucano Basin, north-eastern Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23 n. 17, p. 3893-3898, 2002

ALMEIDA FILHO, R. Remote detection of hydrocarbon microseepage areas in the Serra do Tonã region, Tucano basin, Brazil. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 6, p. 750–757, 2002.

ALMEIDA FILHO, R.; IBANEZ, D. M.; MIRANDA, F. P. Interpretação morfoestrutural com dados SRTM no auxílio à exploração petrolífera: um exemplo na Bacia Sedimentar do Amazonas. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, n. 1, p. 89–98, 2010.

ARARIPE, P. T.; FEIJÓ, F. J. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 8, n. 1, p. 127-141, 1994.

AUGUSTO, V. A.; SOUZA FILHO, C. R.; ALMEIDA FILHO, R. Caracterização de Exsudações de Hidrocarbonetos na Bacia do São Francisco-MG Por Meio de Imagens ASTER. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 12, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 1733-1740. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12662-PRE/7954). Disponível em: <http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.21.25>. Acesso em: 30 set. 2013.

BAILEY, G. B.; ANDERSON, P. D. Applications of Landsat imagery to problems of petroleum exploration in Qaidam Basin, China. **AAPG Bulletin**, v. 66, n.9, p. 1348-1354, 1982.

BERTANI, R. T.; COSTA, I. G.; MATOS, R. M. D. Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e o habitat do petróleo na Bacia Potiguar. In: RAJA GABAGLIA G. P.; MILANI E. J. (Eds.). **Origem e evolução de bacias sedimentares**. Rio de Janeiro: Petrobras, 1990. p. 291-310.

BEZERRA, F. H. R. et al. Liquefaction-induced structures in Quaternary alluvial gravels and gravelly sediments, NE Brazil. **Engineering Geology**, v.76, p.191-208, 2005.

BROOKS, R. R. **Geobotany and biogeochemistry in mineral exploration**. New York : Harper and Row, 1972, 290p.

CAVALCANTE, J. C. **Atlas digital de geologia e recursos minerais do Ceará**: geologia, recursos, minerais, geoquímica, geofísica, geomorfologia. Fortaleza: CPRM, 2003.

CHAVEZ, P. S. Jr. KWARTENG, A. Y. 1989. Selective principal component analysis photogram. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 55, n. 9, p. 1163-1169, 1989.

EIDELWEIN, E. **Interação rocha-fluido na fase de recuperação suplementar e seus reflexos nas propriedades das rochas** – exemplos na Bacia Potiguar. 123 p. Dissertação (Mestrado em Geoengenharia de Reservatórios) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992.

EVERETT, J. R.; STASKOWSKI R. J.; JENGO C. Remote Sensing and GIS Enable Future Exploration Success. **World Oil**, v. 223, n. 11, p. 59-60, 2002.

FARR et al. The Shuttle Radar topography mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, 2007

FERREIRA, J. C. Light hydrocarbons in soils underlain by exclusively crystalline rocks and in sedimentary basins: exploratory implications. **Revista Latino Americana de Geoquímica Orgânica**, v.6, p. 31-39, 2002.

FRAGAL, E. H.;MONTANHER, O. C. Correções atmosféricas 6S e DOS na caracterização espectral de alvos naturais de Ilha Grande utilizando dados do sensor TM 5. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 15, 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. Artigos, p. 7456-7463. Disponível em:<http://urlib.net/3ERPFQRTRW/3A596DL>. Acesso em: 30 set. 2013.

FREEMAN, H., 2003. **Evaluation of the use of hyperspectral imagery for identification of microseeps near Santa Barbara, California:** Project 2 report. 26 p. Thesis (Master of Science in Geology) – West Virginia University, Morgantown, 2003.

FU, B.; et al. Mapping hydrocarbon-induced mineralogical alteration in the Northern Tian Shan Using ASTER multispectral data. **Terra Nova**, v. 19, n. 4, p. 225–231, 2007.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME). **Chuvas no Ceará**. Fortaleza: FUNCEME, 2010. *Home Page*. Disponível em: <http://www.funceme.br/produtos/script/chuvas/Grafico_chuvas_postos_pluviometricos/totalchuvas/index.htm>. Acesso em: 14/02/2012.

GALÁN, E. Genesis of clay minerals. In: BERGAYA, F.; THENG, B. K. G.; LAGALY, G. (Eds.). **Handbook of Clay Science**. Elsevier, 2006. v. 1, cap. 14, p. 1129–1162.

GATZIOLIS, D.; ANDERSEN, H. **A guide to LIDAR data acquisition and processing for the forests of the Pacific northwest**. Portland: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.2008. 32 p. (Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-768).

GIONGO, M. et al. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 231-244, ago/out 2010

HALBOUTY, M. T. Application of Landsat imagery to petroleum and mineral exploration. **AAPG Bulletin**, v. 60, n. 5, p. 745-793, 1976.

HUNT, G. R.; SALISBURY, J. W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I, silicate minerals. **Modern Geology**, v. 1, p. 283-300, 1970.

HUNT, G. R.; SALISBURY, J. W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: II, carbonates. **Modern Geology**, v. 2, p. 23-30, 1971.

HUNT, G. R.; SALISBURY, J. W.; LENHOFF, C. J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: VI, additional silicates. **Modern Geology**, v. 4, p. 85-106, 1973.

HUNT, G. A. 1991. **Geological applications of reflected and emitted multispectral data over lateritised Archean terrain in Western Australia**. 402 p. Tese (PhD em Sensoriamento Remoto) - Open University, Milton Keynes, United Kingdom.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data**. Vienna: IAEA. 2003. 179 p. (IAEA TEC-DOC-1363).

JONES, V.T.; MATTHEWS, M.D.; RICHERS, D.M. Light Hydrocarbons for Petroleum and Gas Prospecting. In: HALE, M. (Ed.). **Geochemical remote sensing of the subsurface**. Elsevier, 2000. v.7, cap. 5, p.133-212.

JONES, V. T.; THUNE, H. W., 1982. Surface detection of retort gases from an underground coal gasification reactor in steeply dipping beds near Rawlins, Wyoming. In: SPE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION, 1982, New Orleans. **Proceedings…** Society of Petroleum Engineers of AIME, 24 p. ISBN 978-1-55563-666-1.

KHAN, S. D., JACOBSON, S. Remote Sensing and Geochemistry for Detecting Hydrocarbon Microseepages. **Geological Society of America Bulletin**, v. 120, n. 1, p. 96–105, 2008.

LAMMOGLIA, T., SOUZA FILHO, C.R., ALMEIDA FILHO, R., 2008. Characterization of Hydrocarbon Microseepages in the Tucano Basin, (Brazil) through Hyperspectral Classification and Neural Network Analysis of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Data. In: ISPRS CONGRESS: SILK ROAD FOR INFORMATION FROM IMAGERY. 21, 2008, Beijing. **Proceedings...** Beijing: ISPRS, 2008. v. 37, n. B8, p. 1195-1200, 2008. ISSN 1682-1750.

LIMA, C. C. et al. The role of compressional horizontal stresses (σ1=SHmax) in the evolution of the Potiguar Basin (NE Brazil) and the age of trap formation for its main reservoir (Açu Fm) . In: AAPG INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION. 2009, Rio de Janeiro. **Search and Discover Article #90100,** AAPG, 2009.

LIU, X.; PETERSON, J.; ZHANG, Z. High-resolution DEM generated from LiDAR data for water resource management. In: MODSIM05: INTERNATIONAL CONGRESS ON MODELING AND SIMULATION: ADVANCES AND APPLICATIONS FOR MANAGEMENT AND DECISION MAKING. 2005, Melbourne. **Proceedings…** Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc, 2005 p. 1402–1408 ISBN 0-9758400-0-2

MAGOON, L. B.; DOW, W.G. The petroleum system, in: _____ (Eds.). **The Petroleum system:** from source to trap. Tulsa: AAPG Memoir 60, 1994. cap.1, p.3-24.

MARTINS, M. L. R. et al. Cobertura vegetal e antropismo no estado do Ceará: uma abordagem utilizando imagens TM LANDSAT-5. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7. 1993, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1993. v. 1, p. 181-187. ISBN 978-85-17-00052-2. (INPE-7842-PRE/3682). Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.20.00.22.38>. Acesso em: 30 set. 2013.

MATTHEWS, M. D. Effects of hydrocarbon leakage on earth surface materials. In: DAVIDSON M. J. (Ed.). **Unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas IV**. Dallas: Southern Methodist University Press, p. 27–44, 1986.

MILANI, E. J.; BRANDÃO J. A. S. L.; ZALÁN, P. V.; GAMBOA, L. A. P. Petróleo na margem continental brasileira: geologia, exploração, resultados e perspectivas. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 18, n. 3, 2000.

MOHAMMED, A., PALANIVEL, K., KUMANAN, C. J., RAMASAMY, S.M. Hyperspectral remote sensing and zone of degasification in Part of Sabatayn Basin-Yemen. **International Journal of Petroleum Science and Technology**, v. 5, n. 1, p. 19-32, 2011.

MOURA LIMA, E. N. et al. Sedimentação e deformação tectônica Cenozóicas na porção central da Bacia Potiguar. **Geol. USP, Sér. Cient.**, São Paulo, v. 10, n.1, p.15-28, março 2010.

NEVES, A. M. A. **Avaliação da concentração de metais pesados e hidrocarbonetos no solo do campo de petróleo Fazenda Belém nos municípios de Aracati e Icapuí no estado do Ceará**. 141 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

OLIVEIRA, W. J. 1998. **Caracterização das emanações gasosas de hidrocarbonetos na região do Remanso do Fogo (MG), através do uso integrado de sensoriamento remoto, geoquímica, geofísica, geologia estrutural e espectrometria de reflectância**. 239 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

PERRY, S. L.; KRUSE, F. A., 2011. Evidence of hydrocarbon seepage using multispectral satellite imagery, Kurdistan, Iraq. In: AAPG Annual Convention and Exhibition, Denver, 2009. **Search and Discovery Article #90090…** AAPG, 2011. Artigos. Disponível em: <http://www.searchanddiscovery.com/documents/2011/40694perry/ndx_perry.pdf>. Acesso em 03 mai. 2011.

PESSOA NETO, O. C. et al. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v.15, n.2. p. 357-369, 2007.

PETROVIC, A.; KHAN, S. D.; CHAFETZ, H. S. Remote detection and geochemical studies for finding hydrocarbon-induced alterations in Lisbon Valley, Utah. **Marine and Petroleum Geology,** v. 25, n.1, p. 696-705, 2008.

PHILP, R. P. Formation and geochemistry of oil and gas. In: HOLLAND, H. D.; TUREKIAN, K. K. (Eds.). **Treatise on Geochemistry.** Elsevier, 2003. v.7, cap. 7.09, p. 223-256.

PROJETO RADAMBRASIL. **Folhas SB. 24/25 Jaguaribe/Natal**: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1981. 744 p.

PROST G. Alteration mapping with airbone multiespectral scanners. **Economic Geology**. n. 75, v.1 p. 894-906, 1980.

REIS, A. F. C. **Orientação e magnitude de tensões na Bacia Potiguar:** implicações para evolução de bacias em margens passivas. 141 f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

ROSTRON, B. J.; TÓTH J. Ascending fluid plumes above Devonian Pinnacle Reefs: numerical modeling and field example from west-central Alberta, Canada. In: SCHUMACHER, D.; ABRAMS, M. A. (Eds.) **Hydrocarbon migration and its near surface expression.** Tulsa: AAPG Memoir 66, 1996, cap. 15, p. 185–201.

RUAN T.; FEI, Q. Gas geochemistry surveys for petroleum. In: HALE, M. (Ed.). **Geochemical Remote Sensing of the Subsurface**. Elsevier, 2000. v.7, cap. 6, p. 213-231.

SAUNDERS, D.F.; BURSON, K.R.; THOMPSON, C.K. Model for Hydrocarbon Microseepage and Related Near-surface Alterations. **AAPG Bulletin**, v. 83, n. 1, p. 170-185, 1999.

SCHUMACHER, D. Hydrocarbon-induced Alteration of Soils and Sediments. In: SCHUMACHER, D.; ABRAMS, M. A. (Eds.) **Hydrocarbon migration and its near surface expression.** Tulsa: AAPG Memoir 66, 1996, cap. 6, p. 71–89.

SEGAL, D., B.; MERIN, I. S. Successful use of Landsat Thematic Mapper data for mapping hydrocarbon microseepage-induced mineralogic alteration, Lisbon Valley, Utah. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, n. 75, v. 8 p. 1137-1145, 1989.

SIEGEL, F. R. **Applied Geochemistry**. New York: Wiley and Sons, 1974. 353p.

SOUSA, D. C. **Litoestratigrafia e deformação cenozóica na região de Icapuí, Ceará, e implicações para a estruturação de campos de petróleo na borda ocidental da Bacia Potiguar (NE do Brasil)**. 189 p. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

SOUTO FILHO, J. D.; CORREA, A. C. F.; SANTOS NETO E. V.; TRINDADE L. A. F.Alagamar-Açu petroleum system, onshore Potiguar Basin, Brazil: a numerical approach for secondary migration. In: MELLO M. R.; KATZ B. J. (Eds.). **Petroleum systems of South Atlantic margins**. Tulsa: AAPG Memoir 73, 2000. cap. 12, p.151-158.

SOUZA, Z. S. et al. 40Ar/39Ar geochronology of mesozoic and cenozoic magmatism in NE Brazil. In: South American Symposium on Isotope Geology, 4, 2003, Salvador. **Short Papers...** Salvador: CBPM, 2003. v. 2. p. 691-694.

SOUZA, Z. S. et al. Geocronologia e geoquímica do magmatismo cretácico a terciário do NE do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 42. 2004, Araxá. **Anais...** Minas Gerais: Sociedade Brasileira de Geologia, 2004.

SOUZA FILHO, C. R.; DRURY, S. A. Remote sensing strategies for lithological mapping of Pan African assemblages in arid environments – a case study in eritrea, NE Africa. **Geol. USP, Sér. Cient.**, São Paulo, 28, p. 1-22, 1997.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions of the American Geophysical Union**, n. 8,v. 6, p. 913-920, Dez 1957.

VALERIANO, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 12, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 3592-3602. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12739-PRE/8029). Disponível em: <http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/10.29.11.41>. Acesso em: 30 set. 2013.

VAN DER MEER, F.; et al. Hyperspectral Hydrocarbon Microseepage Detection and Monitoring: Potentials and Limitations. In: EARSEL WORKSHOP ON IMAGING SPECTROSCOPY, 2., 2000, Enschede. **Anais eletrônicos…** EARsel, 2000. Artigos. Disponível em: < http://www.earsel.org/workshops/imaging-spectroscopy-2000/papers/vandermeer4.PDF>. Acesso: 03 mai. 2011.

VAN DER MEER, F.; VAN DIJK, P.; VAN DER WERFF H.; YANG, H. Remote Sensing and Petroleum Seepage: a review and case study. **Terra Nova**, v. 14, n. 1, p. 1-17, 2002.

VERMOTE, E. F. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 3, p. 675-686, 1997.

WANG, Y.; DING, X. Hydrocarbon alteration characteristics of soils and mechanism for detection by remote sensing in east Sichuan area, China. **Natural Resources Research**, v. 9, n. 4, p. 295-305, 2000.

WILFORD, J.; CREASEY, J. Landsat Thematic Mapper. In: PAPP, É (Ed.). **Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration.** Bentley: CRC LEME, Open File Report 144, 2002, p. 6-12.

XAVIER NETO, P. **Processamento e interpretação de dados 2D e 3D de GPR:** aplicações no imageamento de feições kársticas e estruturas de dissolução no campo de petróleo de Fazenda Belém-CE. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

YANG, H.; VAN DER MEER, F. D.; ZHANG, J. Aerospace detection of hydrocarbon-induced alteration. In: HALE, M. (ed.). **Handbook of exploration geochemistry**. Elsevier, 2000. v.7. cap. 7, p.233-245.

YOUNG, S. A.; MCCOY, R. M. Association among Landsat TM data, hydrocarbon microseepage and geobotanical anomalies in the Uinta Basin, Utah. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 10. 1990, College Park. **Proceedings…** New York: IEEE, v.2. p. 975-978.