



**Universidade de Brasília
Instituto de Geociências**

***AEROGEOFÍSICA APLICADA NO MAPEAMENTO DE
MICROEXSUDAÇÕES DE HIDROCARBONETOS,
INTEGRADA A DADOS DE
SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL
- REGIÃO DO REMANSO DO FOGO (MG) -***

JULIA BARBOSA CURTO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº013
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS**

Brasília – Março/ 2011



**Universidade de Brasília
Instituto de Geociências**

***AEROGEOFÍSICA APLICADA NO MAPEAMENTO DE
MICROEXSUDAÇÕES DE HIDROCARBONETOS,
INTEGRADA A DADOS DE
SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL
- REGIÃO DO REMANSO DO FOGO (MG) -***

JULIA BARBOSA CURTO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº013

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

Orientador: Augusto César Bittencourt Pires

Co-orientadores: Adalene Moreira Silva

& Álvaro Penteado Crósta

Comissão Examinadora:

Augusto César Bittencourt Pires (UnB/IG) – Orientador

Carlos José Souza de Alvarenga (UnB/IG) – Examinador Interno

Wilson José de Oliveira (Petrobrás) – Examinador Externo

Brasília – Março/ 2011

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	i
ÍNDICE DAS FIGURAS.....	iii
ÍNDICE DE TABELAS.....	vi
LISTA DE EQUAÇÕES.....	vii
RESUMO & ABSTRACT.....	viii
AGRADECIMENTOS.....	xii

1 INTRODUÇÃO.....	1
--------------------------	----------

1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
1.3 ÁREA DE ESTUDO.....	2
1.3.1 Localização	2
1.3.2 Aspectos Fisiográficos.....	2
1.4 DADOS UTILIZADOS.....	5

2 GEOLOGIA REGIONAL DA BACIA DO SÃO FRANCISCO.....	6
---	----------

2.1 O CRÁTON.....	6
2.2 COBERTURA NEOPROTEROZÓICA – GRUPO BAMBUÍ.....	8
2.3 COBERTURA FANEROZÓICA - BACIA SANFRANCISCANA.....	12
2.4 CONTEXTO ESTRUTURAL DA BACIA DO SÃO FRANCISCO.....	13
2.5 EVOLUÇÃO TECTÔNICA DA BACIA DO SÃO FRANCISCO.....	16
2.6 POTENCIAL GEOLÓGICO PARA A OCORRÊNCIA DE HIDROCARBONETOS....	18

3 MICROEXSUDAÇÕES E TÉCNICAS DE EXPLORAÇÃO.....	20
--	-----------

3.1 HIDROCARBONETOS GASOSOS.....	21
3.1.1 A origem e trajetória.....	21
3.1.2 Alterações no meio.....	22
3.1.3 <i>Stress</i> Geobotânico.....	25
3.2 TÉCNICAS EXPLORATÓRIAS.....	26
3.2.1 Gasometria.....	26
3.2.2 Magnetometria.....	27
3.2.3 Gamaespectrometria.....	27
3.2.4 Sensoriamento Remoto.....	28

4 NATUREZA DOS DADOS, MÉTODOS UTILIZADOS E PROCESSAMENTO...	31
--	-----------

4.1 DADOS GEOFÍSICOS.....	31
4.1.1 Natureza dos dados.....	31
4.1.2 Pré-processamento e avaliação dos dados.....	32

4.1.3	Processamento dos dados gamaespectrométricos.....	34
4.1.4	Processamento dos dados magnéticos.....	36
4.2	DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL.....	42
4.2.1	Natureza das imagens.....	42
4.2.2	Pré-processamento das imagens.....	43
4.2.3	Processamento das imagens.....	43
4.3	DADOS AUXILIARES À INTEGRAÇÃO E VALIDAÇÃO	46
4.4	ANÁLISE ESPACIAL DOS DADOS UTILIZANDO LÓGICA <i>FUZZY</i>	47
<hr/>		
5	ANÁLISE DE MICROEXSUDAÇÕES ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO DE DADOS MULTIFONTE.....	49
<hr/>		
5.1	ANOMALIAS GAMAESPECTROMÉTRICAS.....	50
5.1.1	Anomalias de potássio.....	53
5.1.2	Comportamento do urânio residual e do DRAD.....	55
5.2	ANOMALIAS MAGNÉTICAS.....	59
5.2.1	Resolução espacial dos dados.....	59
5.2.2	Amplitude do sinal analítico de ordem 1.....	61
5.2.3	Gradiente horizontal da subtração de continuações ascendentes.....	63
5.3	ANÁLISE ESPACIAL DOS DADOS GEOFÍSICOS POR LÓGICA <i>FUZZY</i>	65
5.4	SENSORIAMENTO REMOTO.....	68
5.4.1	Áreas com concentração em caulinita.....	68
5.4.2	Anomalias geobotânicas.....	71
5.4.3	Anomalias de Fe ²⁺	73
<hr/>		
6	DISCUSSÕES E CONCLUSÕES.....	76
<hr/>		
6.1	ESTRATÉGIAS PARA A DEFINIÇÃO DE ÁREAS AFETADAS POR MICROEXSUDAÇÕES DE HIDROCARBONETOS.....	76
6.1.1	Seleção de áreas potenciais utilizando dados aerogeofísicos.....	76
6.1.2	Integração de áreas potenciais mapeadas pela aerogeofísica, utilizando dados de sensoriamento remoto, e sua validação pela geoquímica de superfície.....	81
6.2	ANALISE ESTRUTURAL E SUA RELAÇÃO COM AS MICROEXSUDAÇÕES.....	87
6.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	90
6.3	RECOMENDAÇÕES.....	91
<hr/>		
7	ANEXOS.....	94
<hr/>		
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96
<hr/>		

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

- FIGURA 1.1** Mapa de localização da área de estudo – Remanso do Fogo (MG) – e seu acesso pelas rodovias principais, com origem em Brasília-DF e Belo Horizonte- MG..... 3
- FIGURA 1.2** Área de estudo (Imagem Landsat ETM+, composição RGB:321)..... 4
-

CAPÍTULO 2 - GEOLOGIA REGIONAL DA BACIA DO SÃO FRANCISCO

- FIGURA 2.1** Mapa geológico simplificado da Bacia do São Francisco (Alkmin *et al.* 1993, Alkmim & Martins-Neto 2001)(...)..... 7
- FIGURA 2.2** Mapa geológico da área de estudo (Remanso do Fogo), segundo a classificação da folha SE-23-V-B-IV (Ribeiro 2003)(...)..... 10
- FIGURA 2.3** À esquerda: perfil e coluna estratigráfica simplificada do poço 1-RF-1-MG, posicionada na área de estudo (modificada de Fugita & Clark 2001). À direita: coluna estratigráfica resumida, baseada na descrição dos três poços locados pela Petrobrás na Bacia Sanfranciscana (modificada de Fugita & Clark 2001)(...)..... 11
- FIGURA 2.4** Traços gerais da deformação de coberturas proterozóicas e compartimentação tectônica da Bacia do São Francisco (Alkmin *et al.* 1993, Alkmim & Martins-Neto 2001)(...)..... 16
-

CAPÍTULO 3 – MICROEXSUDAÇÕES E TÉCNICAS DE EXPLORAÇÃO

- FIGURA 3.1** Diagrama esquemático de um perfil em subsuperfície, apresentando as principais alterações ocasionadas pela ação de hidrocarbonetos gasosos. Baseado no modelo proposto por Saunders *et al.* (1999, 2002)..... 25
- FIGURA 3.2** Comparação entre os espectros de uma vegetação sadia à severamente estressada. Ilustração retirada de Souza Filho *et al.* (2008)..... 30
-

CAPÍTULO 4 - NATUREZA DOS DADOS, MÉTODOS UTILIZADOS & PROCESSAMENTO

- FIGURA 4.1** Etapas do pré-processamento dos dados geofísicos, realizado pela Lasa Engenharia e Prospecções S.A (2006) (...)..... 33
- FIGURA 4.2** Fluxograma indicando as etapas de processamento dos dados gamaespectrométricos (...)..... 35
- FIGURA 4.3** Fluxograma indicando as etapas de processamento dos dados magnéticos..... 41
- FIGURA 4.4** Distribuição das bandas do sensor ASTER, com seus respectivos intervalos espectrais, ao longo das regiões do visível ao infravermelho termal..... 42
- FIGURA 4.5** Figura esquemática exemplificando o comportamento entre os dados de entrada (*Crisp Values*) e os valores de pertinência *fuzzy* para cada função definida para este estudo (ARCGIS 9.3)..... 48
- FIGURA 4.6** Fluxograma indicando as etapas da aplicação da lógica fuzzy para a detecção de microexsudações na região do Remanso do Fogo..... 48
-

CAPÍTULO 5 –ANÁLISE DE MICROEXSUDAÇÕES ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO DE DADOS MULTIFONTE

FIGURA 5.1	Figura esquemática exemplificando o perfil de uma bacia sedimentar (Adaptado de Gunn 1997c), (...)	49
FIGURA 5.2	A: Mapa geológico da área de estudo (Ribeiro 2003), comparado a figura B: imagem da concentração de eTh (%), considerado por ser o representante litológico ideal entre os radioelementos (Pires 1995)	51
FIGURA 5.3	Comparação entre as dispersões dos dados nas seguintes situações: A: Regressão linear do K vs Th para toda área de estudo. B: Regressão linear do K vs Th para a litologia NPbb2 (Exemplo)	52
FIGURA 5.4	Histograma do K residual e a disposição das classes, em linhas azuis, determinadas pela classificação por quebras naturais (...)	54
FIGURA 5.5	Mapa com as áreas caracterizadas por empobrecimento em K, marcadas com os pontos em vermelho, sobreposta ao mapa geológico da região de estudo	55
FIGURA 5.6	Histograma dos valores DRAD e a disposição das classes, em linhas azuis, determinadas pela classificação por quebras naturais (...)	56
FIGURA 5.7	Mapa com as áreas caracterizadas por alto DRAD, marcadas com os pontos em roxo, sobreposta ao mapa geológico da região de estudo	57
FIGURA 5.8	Mapa de anomalias radiométricas, caracterizadas pelos baixos valores de K residual e alto DRAD, marcadas com símbolos em vermelho e roxo, respectivamente (...)	58
FIGURA 5.9	Espectro de potência ponderado radialmente para o campo magnético anômalo. Os componentes regional, residual e do ruído podem ser observados. As principais faixas de profundidades são, aproximadamente: 2,25Km; 1,25Km; e 250m	60
FIGURA 5.10	Imagem da amplitude do sinal analítico de ordem 1. (...)	62
FIGURA 5.11	A: Figura esquemática em 2,5D que expõe a relação entre as assinaturas magnéticas presentes nas continuações ascendentes de 400m e 1200m e o produto de sua subtração. B: Resultado da subtração das continuações ascendentes, (...)	64
FIGURA 5.12	A: Figura esquemática em 2,5D que expõe as etapas gerais da lógica Fuzzy: (i) inserção dos grids de entrada: amplitude do sinal analítico, DRAD e K residual; (ii) fuzzificação (ii) utilização do operador AND nos resultados da fuzzificação. B: Mapa de favorabilidade para microexsudações, resultado da aplicação do operador Fuzzy AND nos três produtos gerados pela fuzzificação	66
FIGURA 5.13	Correlação do mapa de favorabilidade para microexsudações com as curvas de iso-concentração de hidrocarbonetos, de etano a pentano (C2-C5), e os registros de hidrocarbonetos em superfície	67
FIGURA 5.14	FIGURA esquemática em 2,5D da correlação entre o mapa de concentração de caulinita, gerada pela Técnica Crósta e com seus pixels mais claros realçados por manipulação do histograma, e o mapa de favorabilidade para microexsudações(...)	70
FIGURA 5.15	Imagem do NDVI da área de estudo	72
FIGURA 5.16	Figura esquemática em 3D das correlações entre as anomalias geobotânicas dos tipos AG1, à esquerda, e AG2, à direita, com o mapa de favorabilidade para microexsudações	73

FIGURA 5.17	Imagem do Fe^{2+} da área de estudo, com o contraste manipulado para o realce de pixels mais claros, marcados por maior presença desse elemento.....	74
FIGURA 5.18	Figura esquemática em 2,5D das correlações entre as anomalias de Fe^{2+} , apresentado em pixels mais claros, com o mapa de favorabilidade para microexsudações.....	75

CAPÍTULO 6 –DISCUSSÃO DOS RESULTADOS & CONSIDERAÇÕES FINAIS

FIGURA 6.1	Fluxograma ilustrando a primeira parte da metodologia, aplicada nos dados aerogeofísicos, para a detecção de microexsudações na região de Remanso do Fogo.....	77
FIGURA 6.2	Mapa das anomalias de K residual e DRAD, sobrepostos à amplitude do sinal analítico de ordem 1 (...)	79
FIGURA 6.3	A: Mapa de favorabilidade para microexsudações (...) B: Mapa de favorabilidade em 2,5D, sobreposto ao MDT(...)	80
FIGURA 6.4	Fluxograma ilustrando a segunda parte da metodologia, aplicada nos dados do sensor ASTER, para a detecção de microexsudações na região de Remanso do Fogo.....	81
FIGURA 6.5	Figura esquemática mostrando a relação de todos os indicadores encontrados na segunda área potencial selecionada (área 2), validados pelas curvas de iso-concentração de hidrocarbonetos (...)	83
FIGURA 6.6	Figura esquemática mostrando a relação de todos os indicadores encontrados na terceira área potencial selecionada (área 3), validados pelas curvas de iso-concentração de hidrocarbonetos (...)	84
FIGURA 6.7	Figura esquemática demonstrando a relação de todos os indicadores encontrados na terceira área potencial selecionada (área 4), validados pelas curvas de iso-concentração de hidrocarbonetos e ocorrências registradas de escape de gás em superfície.....	85
FIGURA 6.8	Figura esquemática mostrando a relação entre os lineamentos magnéticos em profundidade. A: amplitude do sinal analítico, expondo as estruturas mais rasas definidas neste estudo. B: GHS (Gradiente horizontal da subtração entre as continuações ascendentes de 1200 e 400m), (...)	86
FIGURA 6.9	Mapas em 2,5D indicando a correlação entre os lineamentos magnéticos em profundidade. A: amplitude do sinal analítico, expondo as estruturas mais rasas definidas neste estudo. B: GHS (Gradiente horizontal da subtração entre as continuações ascendentes de 1200 e 400m), expondo as estruturas geológicas intra-sedimentares. C: gradiente horizontal da continuação ascendente de 1200m, expondo as assinaturas geofísicas provenientes de fontes profundas, provavelmente do embasamento.....	89

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

TABELA 1.1	Coordenadas da área de estudo.....	2
-------------------	------------------------------------	---

CAPÍTULO 4 - NATUREZA DOS DADOS, METODOLOGIA E PROCESSAMENTO

TABELA 4.1	Principais atributos relacionados ao aerolevanteamento geofísico efetuado pela Engenharia & Prospecções S.A (2006).....	32
TABELA 4.2	Coordenadas e kilometragem linear de voo do aerolevanteamento geofísico.....	32
TABELA 4.3	Bandas do sensor ASTER e suas respectivas feições espectrais de interesse.....	43

CAPÍTULO 5 –RESULTADOS

TABELA 5.1	Comparação entre as médias das concentrações dos três radioelementos em unidades sedimentares, de diferentes regiões, sob condições intempéricas similares (...).	50
TABELA 5.2	Equações resultantes da análise de regressão para as relações eTh vs K e eTh vs eU, que definiram os valores de concentração ideal de K e eU para cada litologia da área de estudo, possibilitando o cálculo dos valores residuais e do valor DRAD.....	53
TABELA 5.3	Estatística descritiva da concentração do K original e K residual.....	54
TABELA 5.4	TABELA de auto-vetores da APC para o conjunto de bandas 1,4,6 e 7, onde está destacado em amarelo os auto-vetores que demonstraram maior contraste.....	69
TABELA 5.5	TABELA de auto-vetores da APC para o conjunto de bandas 1,4,5 e 7, onde está destacado em amarelo os auto-vetores que demonstraram maior contraste.....	69
TABELA 5.6	TABELA de auto-vetores da APC para a PC4a – resultante da APC para as bandas 1,4,6 e 7 – e PC4b - resultante da APC para as bandas 1,4,5 e 7. Está destacado em amarelo os auto-vetores que demonstraram menor contraste.....	69

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1.....	23	Equação 4.4.....	34
Equação 3.2.....	23	Equação 4.5.....	34
Equação 3.3.....	23	Equação 4.6.....	34
Equação 3.4.....	23	Equação 4.7.....	34
Equação 3.5.....	23	Equação 4.8.....	34
Equação 3.6.....	23	Equação 4.9.....	35
Equação 3.7.....	23	Equação 4.10.....	37
Equação 3.8.....	24	Equação 4.11.....	37
Equação 3.9.....	24	Equação 4.12.....	37
Equação 3.10.....	24	Equação 4.13.....	38
Equação 3.11.....	24	Equação 4.14.....	38
Equação 3.12.....	24	Equação 4.15.....	38
Equação 3.13.....	24	Equação 4.16.....	42
Equação 4.1.....	33	Equação 4.17.....	44
Equação 4.2.....	34	Equação 4.18.....	44
Equação 4.3.....	34		

RESUMO

Com o intuito de ampliar o emprego de métodos indiretos no mapeamento de hidrocarbonetos *onshore*, este estudo utilizou dados aerogeofísicos e de sensoriamento remoto para a detecção de microexsudações de hidrocarbonetos gasosos. O trabalho foi realizado na região do Remanso do Fogo - MG, caracterizada por apresentar escapes de gás em superfície e por ser objeto de campanhas exploratórias desde a década de 80. Dados de um levantamento geoquímico de superfície, conduzido pela Petrobrás em 1987, foram utilizados neste estudo para fins de validação dos resultados.

O levantamento aerogeofísico, composto pela gamaespectrometria e magnetometria, possui espaçamento de linhas de produção de 500m e altura de voo de 100m, o que o caracteriza como um levantamento aéreo de alta resolução, viabilizando o uso desta ferramenta para a detecção das microexsudações.

A técnica de normalização pelo tório foi aplicada aos dados gamaespectrométricos com o objetivo de detectar variações físico-químicas na superfície, potencialmente relacionadas à ação dos hidrocarbonetos, tais como a diminuição nas concentrações de potássio e urânio. O potássio se caracteriza por um empobrecimento mais acentuado que o de urânio e, por isso, foi utilizado o índice DRAD, resultado da subtração entre os valores residuais de urânio e potássio. Tanto os baixos valores de potássio residual, quanto os altos valores DRAD, tiveram uma forte correspondência com os dados de geoquímica e estão posicionados próximos a áreas onde são conhecidas ocorrências de gás.

A amplitude do sinal analítico de ordem 1 aplicada aos dados magnéticos foi selecionada para o mapeamento de acumulações de magnetita diagenética e estruturas geológicas rasas, que estariam potencialmente relacionadas com a condução de gases até seu escape em superfície. Sua correspondência com os resultados radiométricos e os elementos de validação é significativa.

O método relacionado à análise espacial por lógica *fuzzy* foi aplicado aos dados geofísicos, de modo a otimizar a seleção de áreas potenciais para a ocorrência de microexsudações.

Paralelamente ao estudo efetuado com a geofísica aplicada a pequenas profundidades, também foi feita a investigação de fontes magnéticas posicionadas desde o embasamento até a superfície. Dessa forma, foi possível caracterizar prováveis estruturas intra-sedimentares e sua relação com os hidrocarbonetos na área.

Os dados de sensoriamento remoto abrangem 9 bandas do sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), posicionadas nas regiões espectrais do visível ao infravermelho de ondas curtas, o que confere a capacidade de discriminação da caulinita, em meio a diversos argilominerais, como também a detecção de feições espectrais na vegetação e do íon Fe^{2+} . Estes elementos são indicadores das mudanças físico-químicas causadas pela ação dos hidrocarbonetos e foram encontrados na área de estudo.

Os resultados provenientes do sensoriamento remoto forneceu um conjunto de atributos adicionais às anomalias geofísicas encontradas, reforçando a possibilidade de ocorrências de microexsudações nestas áreas. Desse modo, a integração entre os resultados deste estudo permitiu a definição de áreas potenciais que apresentam até seis indicadores favoráveis à presença de hidrocarbonetos: (i) baixa concentração de potássio; (ii) altos valores DRAD; (iii) altos magnéticos; (iv) alta concentração de caulinita; (v) altas concentrações de Fe^{2+} ; (vi) anomalias geobotânicas. Algumas dessas áreas foram validadas pela geoquímica e pelas ocorrências registradas de gás na região.

Palavras-chave: microexsudações; geofísica; sensoriamento remoto

ABSTRACT

In order to expand the use of indirect methods to map onshore hydrocarbons, this study used techniques applied to airborne geophysical data and remote sensing data to detect hydrocarbon microseepages. The research was conducted in the Remanso do Fogo area – Minas Gerais State – which is characterized by leaks of gas on the surface and as an exploratory field since the 80s. The surface geochemistry, led by Petrobrás in 1987, was used in this study for validation of the results.

The airborne geophysics, comprised by magnetometry and gamma-ray spectrometry, has flight line spacing of 500m and nominal flight height of 100m, which characterizes it as a high resolution airborne survey, enabling the use of this tool for the microseepage detection.

The thorium normalization technique was applied to radiometric data in order to detect little physical and chemical changes on the surface, caused by the action of hydrocarbons, such as the decrease in potassium and uranium concentrations. Potassium depletion is stronger than uranium depletion. Therefore the DRAD index was used to map these variations and indicate positives values in affected areas. The results had a strong correlation with the geochemical data and are positioned close to the reported gas leaks.

The first order amplitude of the analytic signal was selected for mapping diagenetic magnetite accumulations and shallow geological structures that are potentially related with gas migration at the surface. It has an important correspondence with radiometric results and other validation elements.

Fuzzy logic was applied to geophysical data in order to optimize the selection of potential areas for microseepages occurrences.

Parallel to the study conducted with geophysics applied to small depths, magnetic sources from the basement to the surface were also investigated. Thus, possible intra-sedimentary structures and their relationship with the hydrocarbons passage were indentified in the area.

The remote sensing data are comprised of nine bands of the ASTER sensor (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), from the visible spectral region to short wave infrared, which provides the discrimination of kaolinite, among the most diverse clay minerals, and the detection of vegetation spectral features

and Fe^{2+} ion. These elements are indicators of physical and chemical changes caused by the influence of hydrocarbons.

The remote sensing results provided a set of additional attributes for the geophysical anomalies, reinforcing the possibility of microseepages occurrences in these areas. Therefore, the data integration of this study allowed the definition of potential areas that have up to six ideal indicators of the hydrocarbons presence: (i) low potassium concentration; (ii) high DRAD values; (iii) high magnetic values; (iv) high kaolinite concentration; (v) high Fe^{2+} concentrations; (vi) geobotanic anomalies. Some of these areas were validated by geochemistry and reported gas leaks in the region.

Keywords: microseepages, geophysics, remote sensing.

AGRADECIMENTOS

À Agência Nacional de Petróleo (ANP), por permitir o uso dos dados geofísicos para fins acadêmicos

Ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM), por disponibilizar o mapa geológico da região de Santa Fé –MG

À Petrobrás, por permitir o uso dos dados geoquímicos para fins acadêmicos;

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de incentivo à pesquisa

À Universidade de Brasília (UnB) e Instituto de Geociências (IG), por todo o apoio fornecido ao longo de minha formação acadêmica

Ao Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA/IG/UnB), pelo fornecimento de toda a infraestrutura de espaço físico, computadores e *software*

Ao Dr. Wilson Jose de Oliveira (Petrobrás), por fornecer materiais auxiliares ao trabalho

Ao meu orientador Prof.Dr.Augusto Pires, por ter compartilhado de seu precioso conhecimento e tempo comigo e por ter me apoiado em todas os momentos que precisei

Aos meus co-orientadores, Prof.Dra. Adalene Silva e Prof.Dr. Álvaro Crósta, por todo o apoio concedido ao longo deste trabalho e ao incentivo às minhas futuras realizações

Aos meus pais, Lavidson e Maria do Carmo, que sempre me passaram confiança nas minhas decisões e força nas minhas ações. Mesmo quando os resultados não eram os esperados, ambos me passaram equilíbrio e segurança para definir novas estratégias

À toda minha família, por criar essa esfera de carinho que não me deixa esquecer do realmente importa na vida

Ao meu querido namorado, Edson Ma, que sempre participou ativamente de todas as fases de minha formação acadêmica, sempre incentivando meus estudos e respeitando com amor meus vários momentos de intensa dedicação profissional

Aos meus amigos e companheiros de laboratório e escrivinhas, onde dividíamos nossas dúvidas e trocávamos experiências, que também ocorriam, eventualmente, nos *happy hours*

À todos aqueles que, em algum momento, me ajudaram a realizar essa conquista.

À Deus, pelas bênçãos que tenho recebido constantemente em minha vida.

**Sonho que se sonha só
É só um sonho que se sonha só
Mas sonho que se sonha junto
É realidade..."**

Raul Seixas - Prelúdio

A minha família

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O grande desafio dos tomadores de decisão é o de transformar dados em informação e informação em conhecimento (Angeloni 2003). A aerogeofísica aplicada à prospecção de hidrocarbonetos (HCs) ficou limitada, até a década de 90, a poucos estudos voltados à detecção de anomalias geofísicas rasas, diretamente relacionadas a acumulações de HCs em superfície. Sua aplicação concentrou-se na identificação da interface embasamento/bacia e de seu arcabouço estrutural geral. Porém, o desenvolvimento de técnicas e metodologias permitiu o maior aproveitamento dos dados aerogeofísicos e uma maior extensão de sua aplicabilidade (Saunders *et al.* 1993, LeShack & Van Alstine 2002). O sensoriamento remoto também acompanhou a demanda da indústria do petróleo pela utilização de métodos indiretos e agregou às suas técnicas a observação de características peculiares às ocorrências de HCs em superfície (Oliveira & Crósta 1996, Noomen *et al.* 2003).

1.2 OBJETIVOS

Com base no desafio apresentado, este estudo se desenvolveu com o objetivo geral de contribuir, de maneira acadêmica, com a indústria do petróleo em seu processo de definição de alvos por métodos indiretos para a prospecção *onshore* e, conseqüentemente, auxiliar na otimização de uma metodologia científica para esta área de aplicação. E para que fosse possível a definição de um objetivo específico, ocorreram as seguintes etapas: (i) busca pelo conhecimento do Estado da Arte na prospecção de hidrocarbonetos *onshore*; (ii) escolha da área de estudo com base em pesquisas anteriores e a disponibilidade de dados; (iii) e a especificação dos dados a serem utilizados, considerando fatores como: tempo, custo e eficiência. Dessa forma, o objetivo específico deste estudo foi o de utilizar dados de geofísica aérea, gamaespectrometria e magnetometria, integrados a dados de sensoriamento remoto multiespectral orbital, na detecção de microexsudações de hidrocarbonetos gasosos (HCs) e identificação de estruturas geológicas relacionadas, na região do Remanso do Fogo (MG).

1.3 ÁREA DE ESTUDO

A região do Remanso do Fogo - MG - foi escolhida para o desenvolvimento desta pesquisa devido a presença registrada de microexsudações e por ter sido área de campanhas exploratórias desde a década de 80, o que reuniu dados de geofísica aérea, geoquímica de superfície, poço e sísmica, apresentando-se como uma área de relativa importância econômica e, principalmente, científica (Babinski & Santos 1987, Oliveira 1998, Fugita & Clark Filho 2001).

1.3.1 Localização

Esta região está localizada na porção NW do estado de Minas Gerais (Tabela 1.1), onde ocorre a confluência dos rios Paracatu e São Francisco, que define o limite entre os municípios de Buritizeiro, Ponto Chique e Santa Fé de Minas (Figura 1.1). Abrange o vilarejo de Remanso do Fogo, o distrito de Cachoeira do Manteiga e a cidade Ponto Chique. Sua geologia está inserida ao sul do Cráton São Francisco e na porção centro-sul da Bacia do São Francisco.

A região pode ser acessada pelos seguintes trajetos sugeridos, seguindo a ordem a partir da cidade de Brasília (DF): BR-251, MG-181, MG-408, BR-365 e MG-161, ou BR-040, BR-365 e MG-161, totalizando as distâncias de 474Km e 531Km, respectivamente.

TABELA 1.1 – Coordenadas da área de estudo (Datum SAD-69).

	Geográfica	UTM (m)
Canto esquerdo superior	45°16'W & 16°30'S	471501E & 8175748N
Canto direito inferior	45°00'W & 16°46'S	500479E & 8145335N

1.3.2 Aspectos Fisiográficos

A região de estudo está disposta na confluência de dois grandes rios, São Francisco e Paracatu, os quais fazem parte da região hidrográfica do Médio São Francisco. Essas condições propiciam a acumulação de sedimentos e a formação de aluviões. A maior parte da área é dominada por estes sedimentos, apresentando relativo intemperismo e, conseqüentemente, a configuração de uma topografia plana.

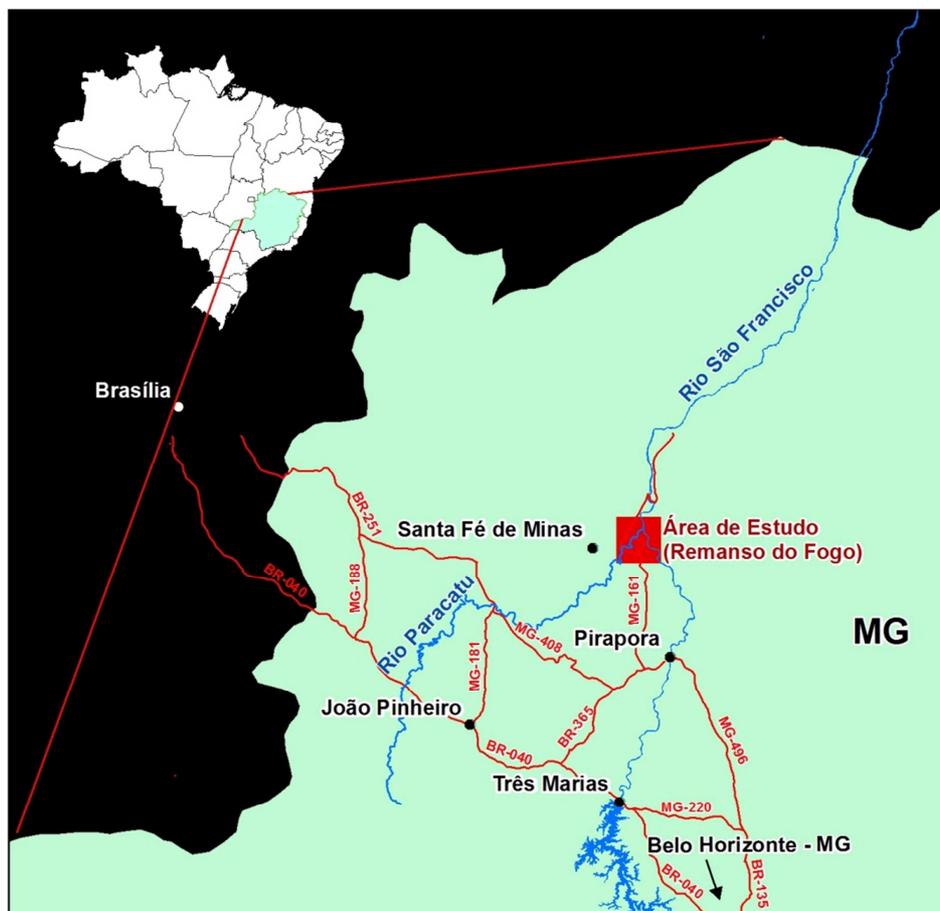


FIGURA 1.1 – Mapa de localização da área de estudo – Remanso do Fogo (MG) – e seu acesso pelas rodovias principais, com origem em Brasília-DF e Belo Horizonte-MG.

O terreno se torna mais elevado a SE da área, onde estão aflorando as unidades do Grupo Bambuí, com rochas carbonáticas, arenitos, siltitos e argilitos, mostrando uma suave declividade na direção NW (Figura 1.2). Esta porção é caracterizada por pequenas colinas de topos convexos e encostas retilíneas suavemente côncavas, evidenciando o caráter argiloso-siltico destes sedimentos (Oliveira 1998).

Os afluentes dos rios Paracatu e São Francisco possuem direção preferencial EW e NW/SE, no centro da área e à oeste do rio Paracatu, enquanto, à leste do rio São Francisco, a direção predominante é NE/SW. São também encontradas lagoas formadas em consequência das cheias anuais que ocorrem neste local. O clima predominante é o Tropical Quente, com o trimestre mais chuvoso entre novembro e janeiro e o mais seco entre junho e agosto (Patrus *et al.* 2001).

A área de estudo é caracterizada por apresentar poucos solos desenvolvidos, areias quartzozas, solos aluviais e, localmente, solos hidromórficos, solos com horizonte B latossólico (latossolo vermelho amarelo) e solos com horizonte B incipiente (solos

litólicos) (Oliveira 1998). Em análise por difratometria de raio-x, realizada por Campos (1996), em diversos pontos de solo na bacia, observou-se a predominância de caulinita e, na fração óxidos/hidróxidos, de goethita e lepidocrosita.

A vegetação predominante na região do Remanso do Fogo é a do tipo Cerrado (Veloza & Góes-Filho 1982), apresentando também matas de galeria ao redor dos rios. O centro desta região é caracterizado por possuir extensas áreas cobertas por plantações de eucaliptos.

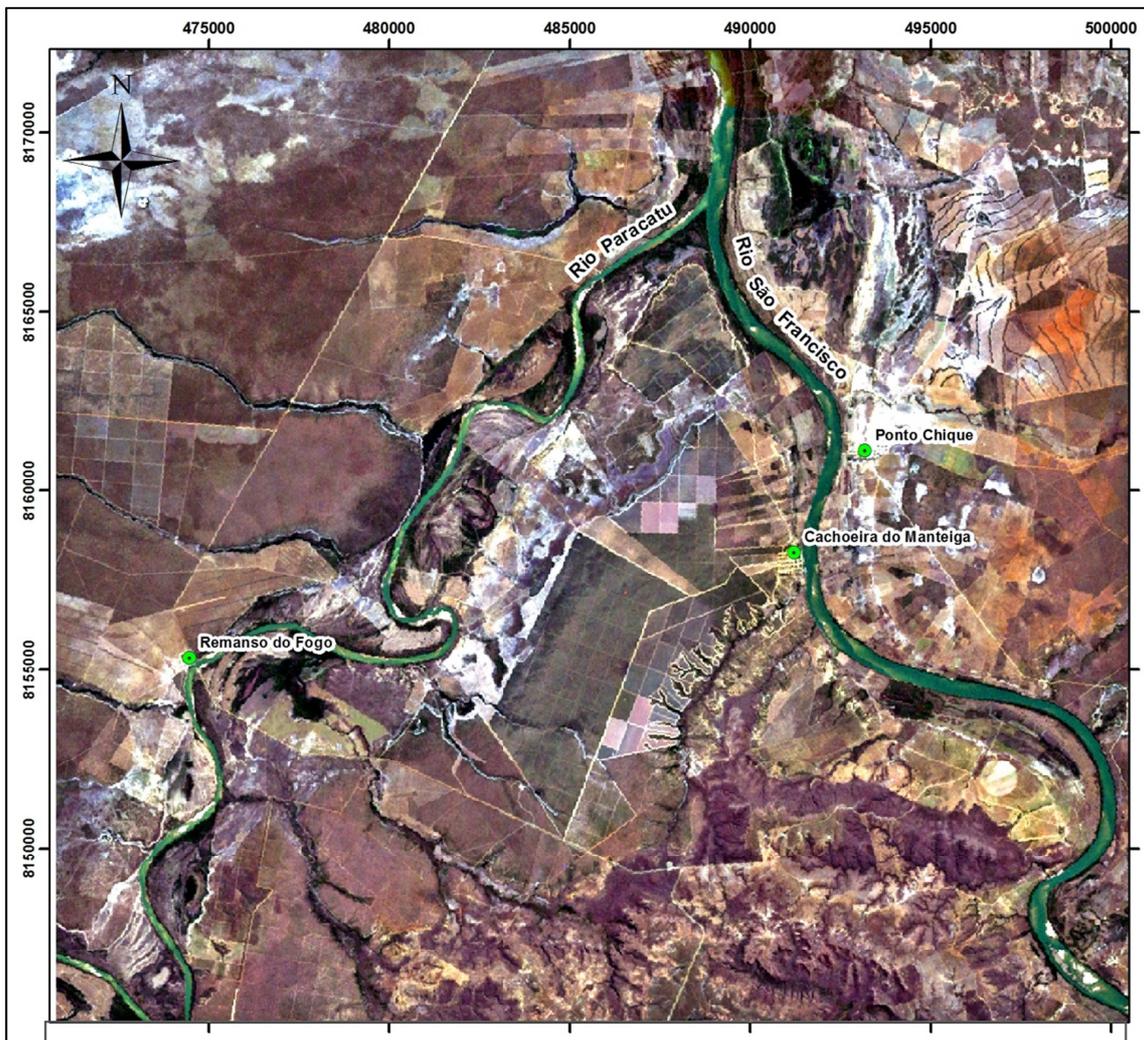


FIGURA 1.2 – Área de estudo (Imagem Landsat ETM+, composição RGB:321)

1.4 DADOS UTILIZADOS

A evidência direta da ocorrência de hidrocarbonetos *onshore* é o seu possível escape em superfície, denominado exsudação, em caso de presença de óleo, e microexsudação, no caso da presença de apenas hidrocarbonetos leves - gasosos. Uma vez identificados, um passo significativo terá sido feito no sentido de refinar a escolha dos alvos potenciais para a utilização de métodos prospectivos mais precisos e de alto custo. Este fenômeno pode ser detectado a partir das alterações químicas e físicas que ocorrem no meio em que se encontra e que causam efeitos na vegetação, solo e rochas, caracterizando-se como elementos indicadores para a geofísica e o sensoriamento remoto (Schumacher 1996), métodos utilizados neste estudo.

Foram adquiridos para esta pesquisa dados radiométricos e magnéticos do levantamento aerogeofísico realizado pela LASA Engenharia & Prospecções Ltda., efetuado no ano de 2006, e disponibilizados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Os dados de sensoriamento remoto multiespectral utilizados são provenientes do sensor Aster (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), operando a bordo do satélite Terra, e disponibilizados no *Land Processes Distributed Active Archive Center - LP DAAC* (lpdaac.usgs.gov).

Além dos dados primordiais ao estudo, foram utilizados dados auxiliares, como a carta geológica Santa Fé de Minas - SE.23-V-B-VI (Ribeiro 2003), na escala 1:100.000, disponibilizada pela Companhia Mineradora de Minas Gerais (CODEMIG). Como também, dados da campanha geoquímica de superfície, realizada por técnicos da Petrobrás em 1987, foram adquiridos na forma de curvas de iso-concentração, por intermédio de Oliveira (1998).

CAPÍTULO 2

GEOLOGIA REGIONAL DA BACIA DO SÃO FRANCISCO

UMA REVISÃO COM ÊNFASE NA REGIÃO DO REMANSO DO FOGO, MINAS GERAIS

A área de interesse está inserida na porção sudeste do Cráton São Francisco (Almeida 1977) e na porção centro-sul da Bacia do São Francisco (Alkmim & Martins-Neto 2001), a qual inclui as sequências proterozóicas do Supergrupo Espinhaço e Supergrupo São Francisco (Pflug & Ranger 1973, Dominguez 1993) e também os sedimentos fanerozóicos instalados a partir do final do ciclo Brasileiro (520 Ma) - Bacia Sanfranciscana (Campos 1996, Sgarbi *et al.* 2001). O embasamento da Bacia do São Francisco, de acordo com as propostas de Alkmim *et al.* (1993) e Alkmim & Martins-Neto (2001), inclui todas as rochas mais antigas que 1,8 Ga, bem como os depósitos pertencentes à tafrogênese estateriana (Brito Neves *et al.* 1995 e 1996).

O contexto geológico da área de estudo é constituído pelo arcabouço estrutural da Bacia do São Francisco e seu pacote sedimentar. Sua estratigrafia é composta pelo Grupo Bambuí - Neoproterozóico, Bacia Sanfranciscana - Fanerozóico e Formação Chapadão - Cenozóico (Campos 1996). O Grupo Macaúbas - unidade basal do Supergrupo São Francisco (Pflug & Ranger 1973) e Formação Carrancas (Martins-Neto & Alkmim 2001) são correlacionadas, neste estudo, à Formação Jequitaiá - unidade basal do Grupo Bambuí (Dardenne 2000).

2.1 O CRÁTON

O Cráton São Francisco foi definido por Almeida (1977) como uma porção da plataforma Sul-Americana, consolidada como segmento litosférico no Arqueano e moldada durante o ciclo Brasileiro (780 - 520 Ma). Foi geograficamente dividido na porção setentrional e meridional devido às diferenças em correlações litológicas e metamórficas. O limite que divide essas porções marca o aulacógeno Paramirim (Alkmim 2004). A área deste projeto está restrita ao contexto de sua porção meridional, delimitada pelas faixas

Capítulo 2 – Geologia Regional da Bacia do São Francisco

móveis Araçuaí, a leste; Brasília, a oeste; Rio Preto, a noroeste (Alkmim *et al.* 1993) (Figura 2.1). Seu embasamento arqueano-paleoproterozóico se caracteriza por terrenos gnaissificados e parcialmente migmatizados, juntamente com *greenstone belts*, granitóides e intrusões máficas e ultramáficas.

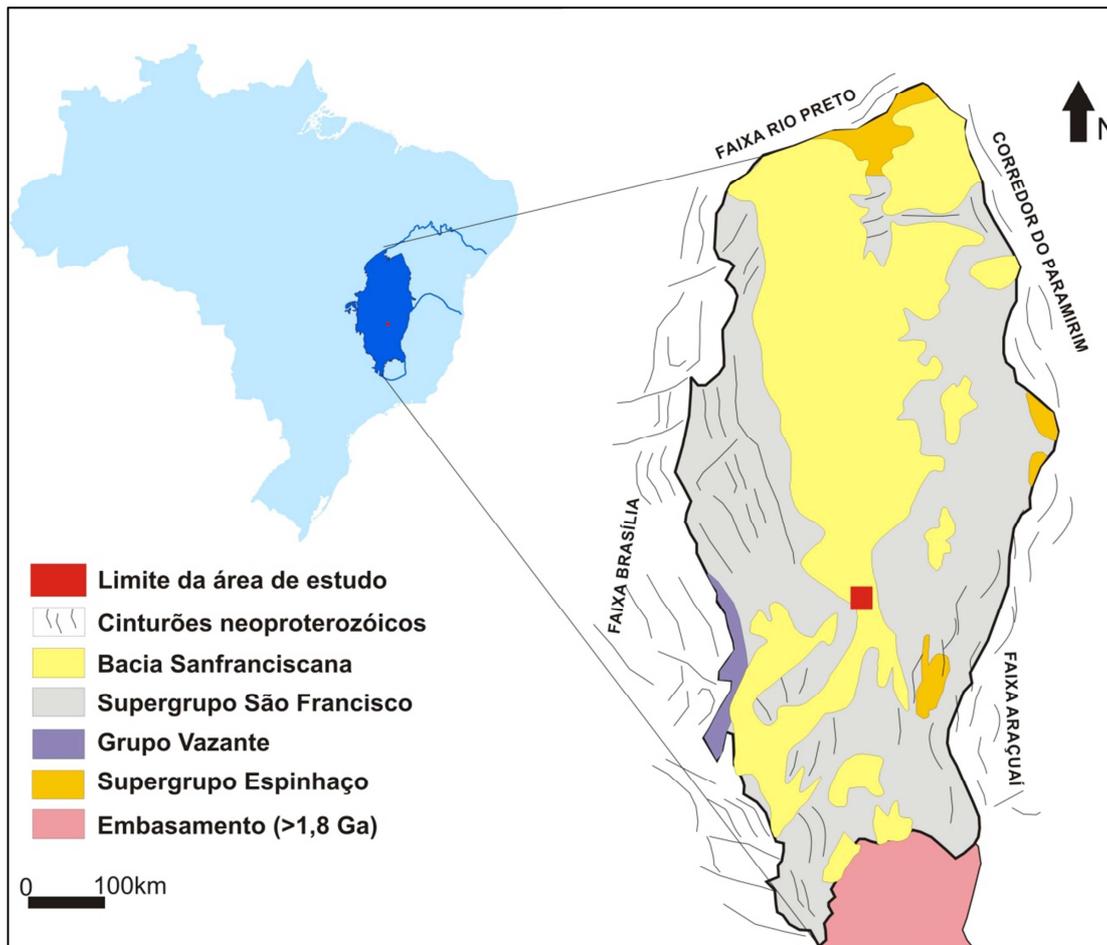


FIGURA 2.1 – Mapa geológico simplificado da Bacia do São Francisco (Alkmim *et al.* 1993, Alkmim & Martins-Neto 2001). Observa-se que a área de estudo está inserida sobre a Bacia Sanfranciscana e, em menor proporção, sobre o Supergrupo São Francisco, em uma área pouco afetada pelos cinturões neoproterozóicos.

2.2 COBERTURA NEOPROTEROZÓICA – GRUPO BAMBUÍ

O Grupo Bambuí, sequência neoproterozóica, formada no intervalo de 750-550 Ma, em ambiente de bacia tipo *foreland*, recobre a parte leste da Faixa Brasília e grandes áreas do Cráton São Francisco (Dardenne 1978a, b, 2000; Dardenne & Walde 1979; Dominguez 1993; Alkmim 2001; Alkmim & Martins-Neto 2001; Martins & Lemos 2007; e Martins-Neto 2009).

Adotou-se, para esta pesquisa, uma classificação estratigráfica a partir da compilação dos trabalhos de Dominguez (1993), Dardenne (2000), Fugita & Clark Filho (2001) e Martins & Lemos (2007). Assim, o Grupo Bambuí incluirá, da base para o topo, as seguintes formações: Jequitaiá, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias:

Formação Jequitaiá: marcadora de um posterior retrabalhamento de sedimentos da Glaciação Jequitaiá, estimada em 800 Ma (Martins & Lemos 2007), é caracterizada pela presença de diamictitos. Estes estão posicionados em paleodepressões associados a fluxos gravitacionais. Esta unidade foi seguida por uma sequência de três megaciclos transgressivos-progradacionais (Dardenne 1981) que deram origem às formações descritas a seguir. Nos trabalhos de Martins-Neto & Alkmim (2001), Fugita & Clark Filho (2001) e Sgarbi *et al.* (2001), em lugar de Formação Jequitaiá, são usadas as denominações Formação Carrancas e Grupo Macaúbas, as quais representariam dois períodos glaciais. Entretanto, segundo Dardenne (1978a, b, 2000) e Martins & Lemos (2008), a Formação Jequitaiá, ou Carrancas, é considerada como correlata ao Grupo Macaúbas, pois aquela seria uma extensão desta, porém em ambiente continental-marinho, mesmo que em períodos geológicos ligeiramente diferentes.

Formação Sete Lagoas: corresponde a uma transgressão em ambiente marinho de águas profundas após o derretimento do gelo, especificamente em sistema de trato de mar alto, quando no topo muda para mar baixo (Martins & Lemos 2007). Formada por calcilutitos pretos na base, passando a calcário e dolomito no topo (Dardenne 2000).

Formação Serra de Santa Helena: é composta por pelitos, com o pico deposicional coincidente com a linha de inundação máxima no trato de sistema transgressivo (Martins & Lemos 2007).

Formação Lagoa do Jacaré: consiste de calcário cinza escuro depositado em uma plataforma dominada por tempestades e correntes de maré (Dardenne 2000), onde predomina o trato de sistema de mar alto (Martins & Lemos 2007).

Formação Serra da Saudade: é formada por pelitos e arenitos depositados em plataforma, periodicamente sujeito a tempestades (Dardenne 2000). Esta unidade foi atravessada pelo poço 1-RF-1-MG, indicando 303 m de espessura na área de estudo (Fugita & Clark Filho 2001).

Formação Três Marias: ainda no trato de sistema de mar alto, num ambiente de baixa energia, essa formação foi depositada numa plataforma com fácies de maré e supramaré (Chiavegatto 1992), com presença de pelitos e arenitos.

Quando as fácies pelíticas não estão associadas a sucessões com calcários ou arcóseos, permitindo sua individualização, o conjunto é denominado como pertencente ao Subgrupo Paraopeba, segundo Dardenne (1978b) e Marini *et al.* (1984).

A folha geológica SE-23-V-B-IV (Ribeiro 2003), na escala de 1:100.000, foi utilizada como base geológica para as unidades aflorantes da área de estudo (Figura 2.2). Segundo a classificação de Ribeiro (2003), as unidades que se referem ao Grupo Bambuí pertencem, informalmente, ao trato de sistema de mar baixo (TSMB) e mar alto (TSMA). O TSMB, no topo do Grupo, corresponde à associação de fácies B, relacionada a depósitos de plataforma rasa e representada na região pela Formação Três Marias. E o TSMA, na posição intermediária do Grupo, é constituído pela associação de fácies C, caracterizados por depósitos de plataforma rasa, englobando sedimentos da Formação Lagoa do Jacaré e provavelmente parte dos sedimentos da Formação Serra de Santa Helena. Em geral, ocorrem na área de estudo siltitos associados a arenitos arcoseanos e calcarenitos finos a muito finos com siltitos e arenitos subordinados (Campos 1996, Ribeiro 2003).

No trabalho de Fugita & Clark Filho (2001), há um resumo estratigráfico baseado em três poços exploratórios locados estrategicamente pela Petrobrás em sítios com ocorrências de gás, sendo que um deles está localizado na área do Remanso do Fogo – poço 1-RF-1-MG (Figuras 2.2 e 2.3).

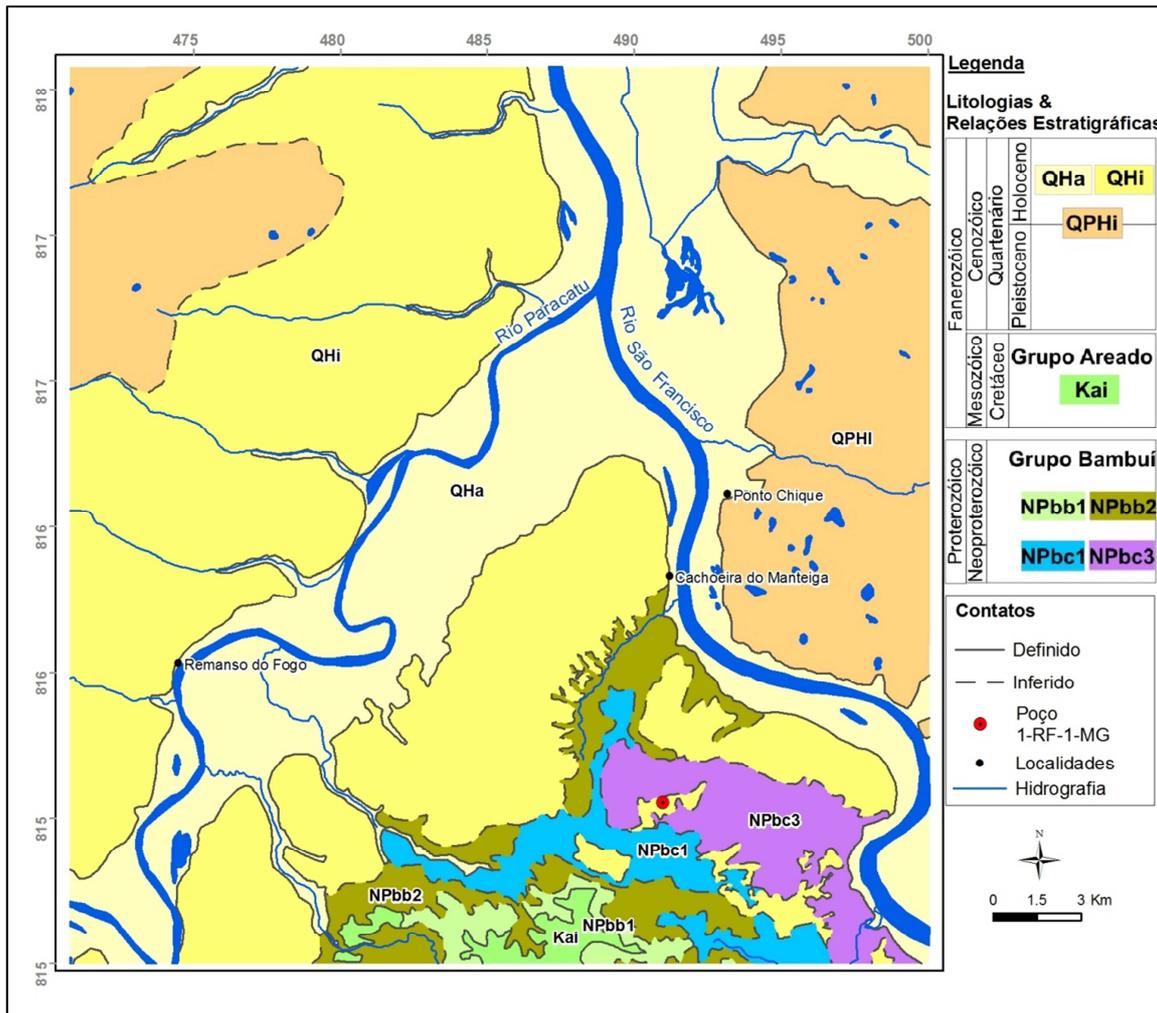


FIGURA 2.2 – Mapa geológico da área de estudo (Remanso do Fogo), segundo a classificação da folha SE-23-V-B-IV (Ribeiro 2003). **Grupo Bambuí - Formação Lagoa do Jacaré e Serra de Santa Helena:** NPbc3 - Domínios de siltitos com arenitos e argilitos subordinados, geralmente com cimento carbonático. Localmente, lentes de calcário; e NPbc1 - Domínio de calcarenitos finos a muito finos com siltitos e arenitos subordinados. **Grupo Bambuí - Formação Três Marias:** NPbb2 - Domínio de siltitos associados a arenitos arcoseanos; e NPbb1 - Domínio de arenitos arcoseanos cinza-esverdeados, siltitos e argilitos subordinados. **Grupo Areado:** Kai – Arenitos friáveis, com níveis de arenito calcítico e conglomerados. **Formação Chapadão:** QPHi – Coberturas Elúvio-Coluviais: sedimentos arenosos inconsolidados ocorrentes em área de grande incidência de lagoas e dolinas. QHi – Terraços Aluviais: sedimentos arenosos inconsolidados, resultantes do retrabalhamento de coberturas antigas e redistribuídos em terraços e planícies. QHa – Aluviões: sedimentos inconsolidados, de natureza arenosa, arenosa-argilosa, argilo-síltica, e localmente contendo seixos e matacões.

Capítulo 2 – Geologia Regional da Bacia do São Francisco

O poço 1-RF-1-MG atravessa em profundidade as formações Urucuia, Serra da Saudade, Lagoa do Jacaré, Serra de Santa Helena, Sete Lagoas, Carrancas, e Grupo Macaúbas, configurando uma seção sedimentar de 1775 m. As colunas apresentadas na figura 2.3 tiveram algumas modificações, nas cores e na junção de alguns níveis estratigráficos, a fim de serem correlacionadas de forma mais simplificada.

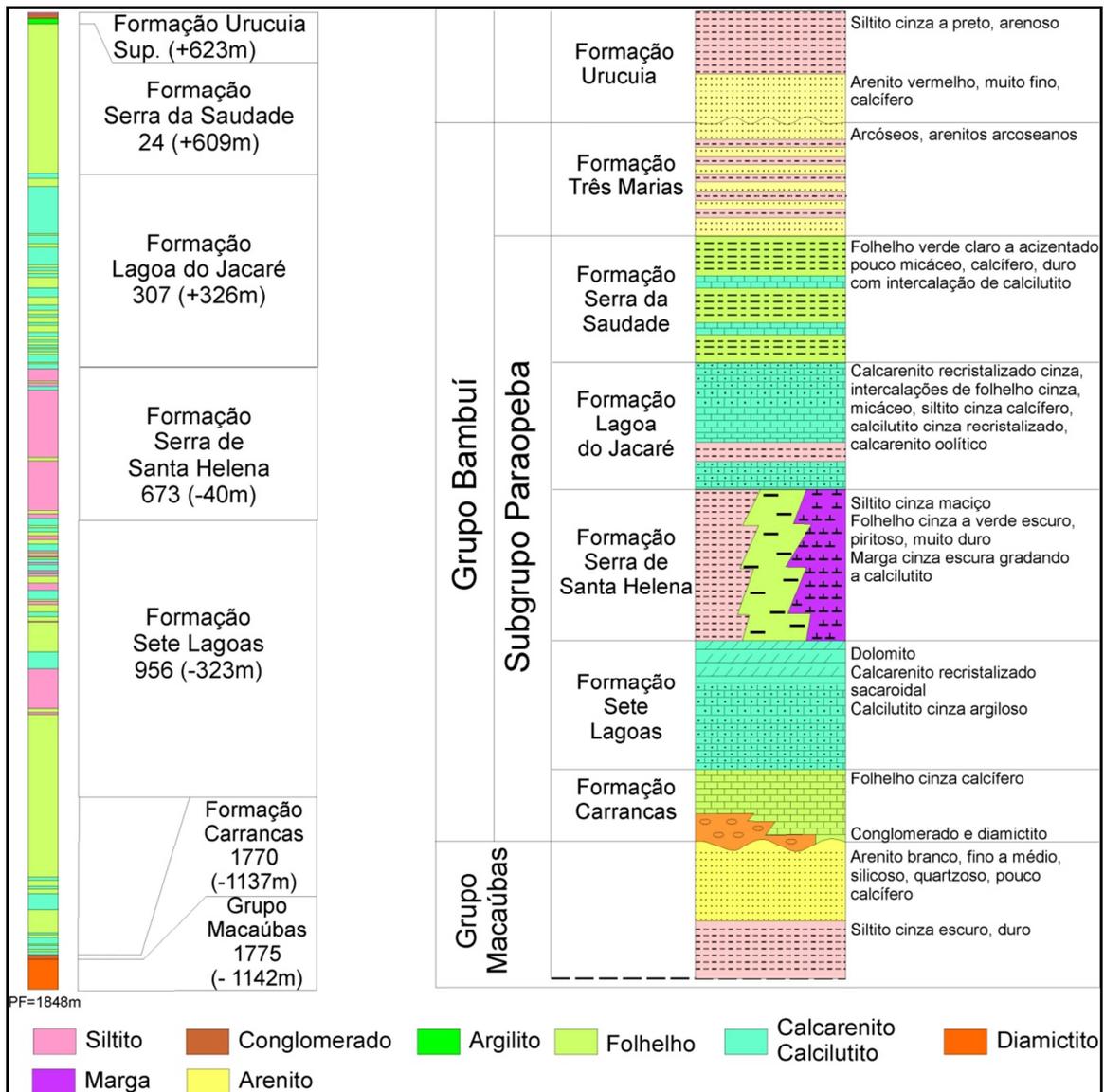


FIGURA 2.3 – À esquerda: perfil e coluna estratigráfica simplificada do poço 1-RF-1-MG, posicionada na área de estudo (modificada de Fugita & Clark Filho 2001). À direita: coluna estratigráfica resumida, baseada na descrição dos três poços localizados pela Petrobrás na Bacia Sanfranciscana (modificada de Fugita & Clark Filho 2001). Importante observar que a Formação Urucuia, descrita nestas colunas, é identificada em mapa, por Ribeiro (2003), como terraços aluvionares (Fig.2.2).

2.3 COBERTURA FANEROZÓICA – BACIA SANFRANCISCANA

Estudos sobre a Bacia Sanfranciscana vêm sendo desenvolvidos desde o final do século XIX, incentivados pela ocorrência de diamantes. Pesquisas mais recentes, tais como Seer *et al.* (1987, 1989), Seer & Moraes (1988), Sgarbi (1989), Sgarbi (1991), Sawasato (1995), Campos & Dardenne (1994,1997a,b), Campos (1996), Sgarbi *et al.*(2001) e Alkmim & Martins-Neto (2001), trouxeram informações importantes para este trabalho, principalmente ao que se refere ao empilhamento estratigráfico e estruturas associadas.

A área de estudo está posicionada sob uma elevação regional do embasamento, denominado de Alto Estrutural de Paracatu, que divide a Bacia Sanfranciscana em duas sub-bacias, Sub-bacias Abaeté e Urucuia. Dessa forma, a espessura dos sedimentos fanerozóicos nesta região não é superior a 200m (Campos & Dardenne 1997b) e o Grupo Bambuí é considerado como substrato rochoso desta bacia, aflorante na porção SE da área.

O início do preenchimento da Bacia Sanfranciscana está relacionado às glaciações do final do Paleozóico (Sgarbi *et al.* 2001), representado pelo sistema glacial do Grupo Santa Fé. Após o período glacial, um período de quiescência tectônica perdurou do Permo-Carbonífero até o início do Cretáceo (ca. 140 Ma), predominando um longo processo erosivo. O embaciamento que recebeu os sedimentos cretáceos da Bacia Sanfranciscana se consolidou no processo tectônico que levaria à separação do supercontinente Gondwana, juntamente com o magmatismo associado que deu origem a altos estruturais, como o Arco do Alto Parnaíba. A partir do Eocretáceo, foram formados os grupos, da base para o topo: Areado, Urucuia e Mata da Corda. As coberturas cenozóicas configuram o que é denominado de Formação Chapadão (Campos 1996). Portanto, a Bacia Sanfranciscana inclui, da base para o topo, as seguintes unidades:

Grupo Santa Fé (Campos *et al.* 1992; Campos & Dardenne 1994): é uma unidade neopaleozóica representada por sedimentos de origem glacial localizada em paleo-depressões do embasamento, prováveis paleo-vales glaciais. Composto pela Formação Floresta com seus diamictitos, folhelhos, arenitos e conglomerados; e Formação Tabuleiro com a presença de arenitos. Possui espessura média entre 60 e 80 metros (Campos 1996). Segundo Sgarbi *et al.* (2001), icnofósseis comprovam a idade permocarbonífera. Ainda de acordo com esses autores, existe a possibilidade da rota de passagem dos glaciares ter sido

Capítulo 2 – Geologia Regional da Bacia do São Francisco

a região da serra do Espinhaço, com a ocorrência de clastos de metaconglomerados, quartzitos verdes e itabiritos dobrados.

Grupo Areado (Costa & Grossi Sad 1968, Sgarbi *et al.* 2001): é uma unidade do Cretáceo Inferior representada por sedimentos de origem fluvial, lacustre, flúvio-deltaico e desértico. De acordo com Campos (1996), possui espessura máxima de 200 metros com acentuado adelgaçamento marginal e é composto pelas formações Abaeté com a presença de conglomerados e arenitos; Quirocó, composto por folhelhos, siltitos, arenitos em menor proporção, e restritamente, calcários e folhelhos pretos ricos em matéria orgânica; e Três Barras, formado por arenitos.

Grupo Mata da Corda (Grossi Sad *et al.* 1971, Hasui *et al.* 1975, Seer *et al.* 1989): unidade do Cretáceo Superior, representada por rochas vulcânicas alcalinas efusivas e piroclásticas, plutônicas alcalinas e sedimentares epiclásticas. Teve seu magmatismo em máxima intensidade entre 80 e 90 Ma (Sgarbi *et al.* 2001). Composto pelas formações Patos e Capacete, as quais possuem litotipos similares, porém a segunda é derivada do retrabalhamento da primeira (Campos 1996).

Grupo Urucua (Grossi Sad *et al.* 1971, Seer *et al.* 1989): formada no Cretáceo Superior, esta unidade é representada por sedimentos de ambiente desértico, subordinamente de sistemas eólicos e fluviais. Composta pelas formações Posse, constituído por arenitos; e Serra das Araras, com argilitos, microconglomerados e conglomerados. Possui espessuras de 25 a 200 metros (Campos 1996).

Formação Chapadão: cobre uma parte ampla da área de estudo e consiste de coberturas aluvionares cenozóicas e elúvio-coluviais, compostas basicamente por sedimentos inconsolidados, como cascalhos, areias e argilas.

2.4 CONTEXTO ESTRUTURAL DA BACIA DO SÃO FRANCISCO

O estado da arte que contempla os aspectos estruturais e a evolução tectônica do Cráton São Francisco é composta por Almeida (1977, 1981), Alkmin *et al.* (1993), Alkmin & Martins-Neto (2001) e Dardenne (2000). O estudo da bacia homônima se aprofundou a partir de análises sismoestratigráficas efetuadas nesta região desde a campanha exploratória

Capítulo 2 – Geologia Regional da Bacia do São Francisco

da Petrobrás no início da década de 90 (Martins & Lemos 2007, Coelho *et al.* 2008, Hercos *et al.* 2008).

De acordo com Alkmim & Martins-Neto (2001), a Bacia do São Francisco atuou como bacia em pelo menos quatro estágios distintos no tempo superior a 1,8 Ga, os quais tomaram parte os paleocontinentes Atlântica, Rodínia, São Francisco/Congo e Gondwana. Seu substrato rochoso é composto pela maioria de rochas arqueanas, com alguma contribuição paleoproterozóica, não envolvidas durante o evento Brasileiro (Almeida 1977 e 1981). Separada por uma forte discordância deste substrato, o Supergrupo Espinhaço representa a porção basal da Bacia do São Francisco, seguida pelo Supergrupo São Francisco e Grupos Santa Fé, Areado, Mata da Corda e Urucuia.

A configuração estrutural da Bacia do São Francisco se relaciona a diferentes níveis deformacionais, uma vez que a borda está sob os domínios das faixas neoproterozóicas Brasília, Rio Preto e Araçuaí; e o seu interior se encontra praticamente indeformado. Por esta razão, segundo Alkmim *et al.* (1993), foi possível dividir a porção a sul da bacia em três compartimentos principais; oeste, leste e central:

Compartimento oeste: corresponde à zona externa das faixas Brasília e Rio Preto. É representada por um cinturão de dobramentos e cavalgamentos, subdivido em dois segmentos, sul e norte, na altura do paralelo 19°. Em ambos os segmentos predominam falhas de empurrão, dobras e falhas transcorrentes com vergência e polaridade deformacional para leste. Sistemas de transcorrências destrais de orientação NE-SW, a norte, e sinistrais com orientação para NW-SW, a sul, controlam a direção preferencial das estruturas, com possíveis rotações, atribuídas ao Brasileiro (Dardenne 1978b, Dardenne 2000, Alkmim & Martins-Neto 2001).

Segundo Sawasato (1995), as unidades cretáceas possuem três famílias estruturais: (i) falhas normais e de reativação que coincidem com a fase de deposição da base do Grupo Areado; (ii) dobras e falhas normais, por vezes escalonadas, resultantes do magmatismo Mata da Corda, que afetam o pacote do Grupo Areado (Seer *et al.* 1989); e (iii) um sistema de falhas sinistrais orientadas na direção NE-SW correspondente a uma reativação das estruturas brasileiras.

Capítulo 2 – Geologia Regional da Bacia do São Francisco

A feição estrutural mais proeminente neste compartimento é o Arco do Alto Parnaíba, o qual define o limite na bacia a sudoeste e é representado por um arqueamento de direção NW-SE, originado por dois pulsos principais: Cretáceo Superior e Mioceno (Hasui *et al.* 1975).

Compartimento leste: é composto pelas extremidades da Faixa Araçuaí, com presença de falhas e dobras com vergência para oeste e polaridade deformacional, como o metamorfismo, para leste. As unidades pré-cambrianas foram isoladas do embasamento por um descolamento basal, configurando janelas estruturais ao longo de todo o limite sul (Magalhães 1988, Valeriano 1999).

Compartimento central: é representado por uma porção da bacia que não apresenta deformações significativas e sua distribuição é controlada por dois altos estruturais do embasamento, que a divide em dois segmentos, C1 e C2, separados por um baixo que hospeda uma espessura de até 5000 metros de sedimentos, o baixo de Pirapora (Alkimim & Martins-Neto 2001). De acordo com estes mesmos autores, na porção norte, a cobertura fanerozóica ocorre na forma de uma homoclinal mergulhante para leste. A área de estudo está localizada no segmento C1 (Figura 2.4).

Estudos recentes realizados com as linhas sísmicas 240-060 e 240-300, levantadas pela Petrobrás em 1992, englobam a interpretação sobre o arcabouço estrutural da região de estudo e arredores (Teixeira *et al.* 1993, Martins-Neto 2005, Coelho *et al.* 2008, Hercos *et al.* 2008). Hercos *et al.* (2008), que enfocam a região da serra da Água Fria, à leste da área do Remanso do Fogo, caracterizam a seção basal da bacia marcada pela presença de *horts* e grábens e separada, por uma discordância regional, de uma megasequência superior com estratos paralelos a sub-paralelos.

Em superfície, a região do Remanso do Fogo é escassa de informações estruturais, justificada, em parte, pela falta de feições aflorantes. Oliveira (1998) mapeou dobras assimétricas com eixo N20E e vergência para NW e juntas N40-60W, que truncam outras de direção N70E, N20E e NS, à SE da área de estudo. Também identificou, há 10km da cidade de Ponto Chique, direções de juntas N70W e NS e, nas proximidades de Santa Fé de Minas, planos de juntas N70-80W e N30E. Segundo este autor, o *trend* estrutural mais marcante na região é o N30-40E.

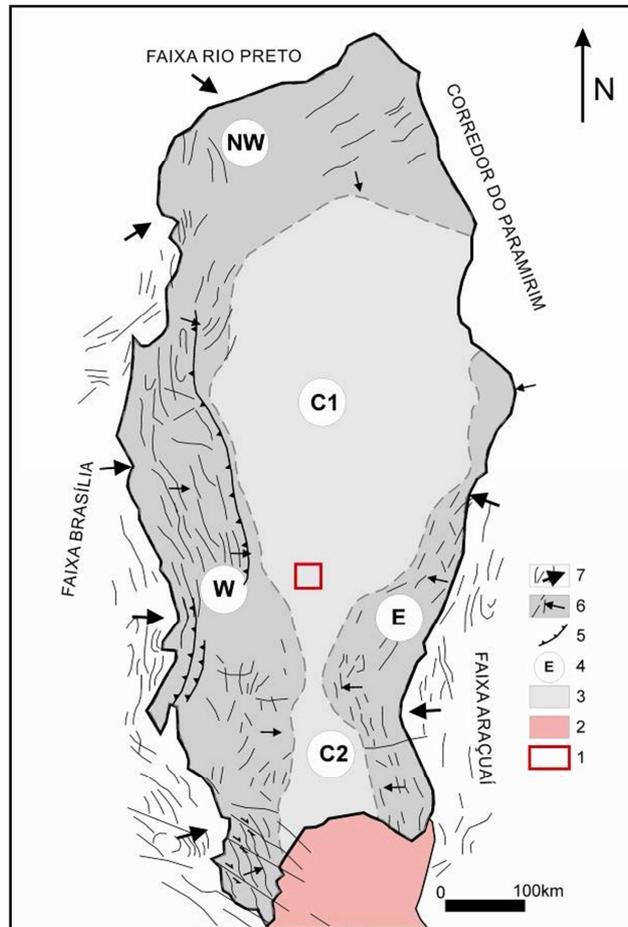


FIGURA 2.4 – Traços gerais da deformação de coberturas proterozóicas e compartimentação tectônica da Bacia do São Francisco (Alkmin *et al.* 1993, Alkmin & Martins-Neto 2001). As setas indicam sentido de movimento. 1: Limite da área de estudo. 2: Embasamento (> 1,8 Ga). 3: Zona indeformada. 4: Compartimentos tectônicos. 5: Zonas de empurrão. 6: Traços estruturais das zonas de cobertura deformada no interior do cráton. 7: Traços estruturais das faixas marginais. Observa-se que a área de estudo está posicionada no compartimento C1, representado por pouca deformação.

2.5 EVOLUÇÃO TECTÔNICA DA BACIA DO SÃO FRANCISCO

O processo que deu origem à supracitada compartimentação tectônica da Bacia do São Francisco, remonta ao Paleoproterozóico, quando as rochas mais antigas que 1,8 Ga, definidas como o embasamento, adquiriram estabilidade após o evento Transamazônico (2.16 - 2.0 Ga). Posteriormente a este evento, configuram-se os sítios deposicionais relacionados a momentos deformacionais, em quatro estágios distintos: a tafrogênese

Capítulo 2 – Geologia Regional da Bacia do São Francisco

Estateriana, glaciação Jequitaí, evento tectônico Brasileiro e rifteamento cretáceo (Alkmim & Martins-Neto 2001), inseridos na seguinte sequência cronológica:

Por volta de 1,75 Ga, ocorre no supercontinente Atlântica (Roger 1996), um processo de rifteamento associado a magmatismo bimodal, denominado tafrogênese Estateriana, que condicionou a deposição da porção basal do Supergrupo Espinhaço (Brito Neves *et al.* 1996).

Por volta de 1,3 Ga, ocorreria a inversão dos riftes e início de uma amalgamação que levaria a formação do Rodínia.

Por volta de 950 Ma, inicia-se a fragmentação do Rodínia, com ocorrência de rifteamentos e reativações existentes no Supergrupo Espinhaço, preenchidos por uma sedimentação glaciogênica, que deu origem ao Grupo Macaúbas e a porção basal do Grupo Bambuí - Formação Jequitaí (Dardenne 2000, Martins & Lemos 2007).

A partir de 790 Ma, um processo orogênico generalizado dá origem ao Gondwana Ocidental (Pimentel *et al.* 2000). Durante o evento, instala-se uma bacia tipo *foreland*, caracterizada por um comportamento flexural de antepaís que o interior cratônico passou a exibir como resposta à sobrecarga criada pelo desenvolvimento dos cinturões orogênicos brasileiros à sua volta (Alkmim & Martins-Neto 2001). Nesta bacia, ocorre a restante deposição dos sedimentos do Grupo Bambuí, onde o término se dá com o fechamento do continente (ca. 630 Ma; cf. Pimentel *et al.* 2000) e contribuição da Faixa Araçuaí no aporte de sedimentos da última unidade - Formação Três Marias (Chiavegatto 1992, Alkmim *et al.* 1993). Segundo Pimentel *et al.* (2000), as idades máximas e mínimas para o antepaís Bambuí são, respectivamente, 800 e 600 Ma.

Durante o Paleozóico, deu-se a fase de quiescência tectônica, quando se formou a calha sedimentar, por decompressão pós-orogênese, na qual se daria o início da deposição dos sedimentos da Bacia Sanfranciscana, primeiramente o Grupo Santa Fé, sotopostos a Formação Três Marias (Campos 1996). Segundo este mesmo autor, no Neopaleozóico a Eomesozóico, um soerguimento significativo por isostasia, da ordem de 150 a 200 metros, afetou a Bacia do São Francisco, causado pelo derretimento das geleiras, seguida de erosão da sucessão paleozóica. Esse evento acarretou na descontinuidade da porção centro-sul da Bacia Sanfranciscana, expondo rochas do Grupo Bambuí.

No Cretáceo Inferior, durante a principal fase extensiva do Atlântico Sul, caracteriza-se o primeiro registro de subsidência mecânica da Bacia Sanfranciscana, tendo sido responsável pela geração da depressão de Abaeté, que configurou hemigrabens originados por reativação de falhas, recebendo os sedimentos do Grupo Areado (Campos 1996, Alkmim & Martins-Neto 2001, Sgarbi *et al.* 2001). Segundo Hasui *et al.* (1975), um episódio tectono-magmático resulta na soergimento do Alto Parnaíba, associado ao magmatismo alcalino da Formação Mata da Corda e alojamento dos complexos alcalinos-carbonatíticos e kimberlíticos. Este magmatismo aproveitou-se principalmente das zonas de cisalhamento WNW e, de modo subordinado, de fraturas NNE, em que a direção predominante dos diques é NW-SE (Seer *et al.* 1989).

A partir do Terciário, dá-se início a fase correspondente à neotectônica registrada na Bacia Sanfranciscana, que provocou reativações de zonas de fraquezas de pequena magnitude, principalmente no fraturamento N50E-60E, que está bem marcado no Grupo Bambuí (Campos 1996).

2.6 POTENCIAL GEOLÓGICO PARA OCORRÊNCIA DE HIDROCARBONETOS

É possível efetuar a avaliação de um provável sistema petrolífero na Bacia do Francisco antes mesmo de considerar qualquer evidência direta ou indireta da presença de hidrocarbonetos, segundo uma análise de suas evidências geológicas e estruturais.

O Grupo Bambuí possui zonas ricas em matéria orgânica, composta de algas e microorganismos, em níveis de folhelho e siltitos pretos da Formação Lagoa do Jacaré. Esta unidade seria caracterizada como uma possível rocha geradora. As potenciais rochas-reservatório seriam representadas pelos carbonatos, com presença de fraturas sub-horizontais (Fugita & Clark Filho 2001). Segundo esses mesmos autores, o poço 1-RF-1-MG, próximo à área de estudo, mostrou uma seção de aproximadamente 283m de folhelho da Formação Serra da Saudade, recobrando a Formação Lagoa do Jacaré, e cerca de 283m de folhelho e siltitos da Formação Serra de Santa Helena sotoposta aos carbonatos da Formação Sete lagoas. Essa camada significativamente espessa de folhelhos poderia atuar como selante.

Capítulo 2 – Geologia Regional da Bacia do São Francisco

As trapas podem ser de diversas naturezas: estratigráfica, estrutural, estrutural/deposicional e/ou paleogeomórfica. No Grupo Bambuí, estão presentes: anticlinais tipo cabeça de cobra (Teixeira *et al.* 1993) e estruturas em flor em rampas laterais. Já os processos de migração, poderiam ocorrer por meios permoporosos como carbonatos e arenitos, e/ou estruturais, como falhas reversas e transtensionais. De acordo com Oliveira (1998), duas famílias de juntas posicionadas nas direções N30E e N40-60W, associadas ao *trend* de falhas de direção N30-40E, condicionam a passagem de gases na região de estudo.

A Bacia Sanfranciscana não apresenta características típicas de geração e trapeamento para hidrocarbonetos, marcadas pela ausência de folhelhos ricos em matéria orgânica e feições estruturais marcantes. Como indicativo de potencial para sistema petrolífero, estariam os arenitos com sua capacidade reservatória e os níveis pelíticos dos grupos Areado e Urucuia como selantes (Sgarbi *et al.* 2001).

CAPÍTULO 3

MICROEXSUDAÇÕES E TÉCNICAS DE EXPLORAÇÃO UMA REVISÃO COM ÊNFASE NA REGIÃO DO REMANSO DO FOGO, MINAS GERAIS

Sob condições geológicas favoráveis, a migração de hidrocarbonetos leves pode alcançar à superfície e revelar a presença de matéria orgânica matura em subsuperfície, a qual pode ser composta desde o metano ao óleo. Estas manifestações em superfície são denominadas de microexsudações. Uma definição comumente utilizada na literatura é a de Saunders *et al.* (1999), na qual as microexsudações constituem-se de micro-bolhas de gás em estado coloidal que percorrem sub-verticalmente o trajeto até a superfície através de uma rede de juntas, fraturas e/ou planos de acamamento, preenchida por águas subterrâneas. Esse fenômeno ocorre normalmente acima do depósito de hidrocarbonetos. O que dificulta a sua detecção direta é a sua própria natureza gasosa, a qual é perceptível ao olho humano somente nos casos em que ocorrem bolhas em áreas submersas, como nos rios, lagos, poços d'água e assoalhos oceânicos. Devido a isso, a utilização de métodos indiretos para a sua procura se torna ainda mais importante (Schumacher & Abrams 1996).

Os hidrocarbonetos, durante sua trajetória até a superfície, provocam uma série de alterações físico-químicas no meio, que constituem um conjunto de parâmetros de interesse para os métodos exploratórios indiretos. Trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de selecionar áreas de influência das microexsudações, utilizando sensoriamento remoto e gasometria (Shumacher 1996, Oliveira & Crósta 1996, Oliveira 1998, Augusto *et al.* 2005, Lammoglia *et al.* 2007, Noomen 2007, Souza Filho *et al.* 2008), gamaespectrometria (Saunders *et al.* 1993 e 2002, El Sadek 2002) e micro-magnetometria (LeShack & Van Alstine 2002). A magnetometria também pode ser introduzida para complementar o estudo na definição de aspectos estruturais (Berger *et al.* 2002). A maioria dos trabalhos desenvolvidos nesse contexto nas bacias brasileiras se concentra na utilização da gasometria e do sensoriamento remoto, enquanto a magnetometria e a gamaespectrometria são ainda ferramentas pouco exploradas para este fim.

3.1 HIDROCARBONETOS GASOSOS

Na confluência dos rios Paracatu e São Francisco (MG) ocorre uma quantidade expressiva de microexsudações, muitas em lagos, rios e poços para a extração de água, sendo assim visualmente observadas pelos aborbulhamentos causados. Essas ocorrências foram documentadas por Babinski *et al.* (1987), Oliveira (1998) e Fugita & Clark Filho (2001). Esta área é denominada de Remanso do Fogo, nome que reflete as manifestações dos gases quando entram em processo de combustão induzida, após aflorarem em sua superfície.

Apesar de possuir um histórico de investigações realizadas pela Petrobrás desde a década de 80, a região do Remanso do Fogo não possui o ritmo exploratório compatível com as faixas litorâneas, pois os indícios geológicos não caracterizam a Bacia do São Francisco como uma bacia típica para o desenvolvimento de sistemas petrolíferos (Fugita & Clark Filho 2001).

Estudos realizados a partir da década de 90, na área de estudo, têm fornecido cada vez mais informações a respeito da possível origem desses gases, tal como de seu deslocamento até a superfície. Porém, tratam-se ainda de hipóteses, merecendo o aprofundamento neste contexto.

3.1.1 A origem e trajetória

A existência de hidrocarbonetos na fase gasosa pode ter origem bioquímica ou termoquímica. A primeira ocorre quando o gás é produzido pela ação de bactérias sobre a matéria orgânica, enquanto a segunda é causada por sobrecarga e/ou evento térmico, que levará à maturação da matéria orgânica. Na região do Remanso do Fogo, já foi comprovada a origem termoquímica dos gases, constituídos, em amostragem no Poço do Jacarezinho, por 98,06% de metano (C1) e o restante por etano (C2), propano (C3), butano (C4), pentano (C5), hexano (C6) e mais pesados (Oliveira 1998). Segundo Harbert *et al.* (2006), a composição do gás diagnóstica de origem petrolífera é entre C2-C5 e, segundo Saunders *et al.* (1991), está entre C2-C4. Nestes dois trabalhos, o metano é retirado porque pode ser proveniente de fontes bioquímicas e gerar uma falsa anomalia. Ainda existe a origem por hidrocarbonetos mais pesados, já trapeados, que passaram para a fase gasosa através de

craqueamento térmico, causado por eventos posteriores. Porém, esta hipótese ainda não foi discutida para a região de estudo.

A migração do gás da rocha geradora até a superfície é possibilitada pela existência de falhas e fraturas, provenientes de eventos tectônicos de caráter rúptil, como também através de planos de acamamento. O mecanismo de ascendência pode ser por difusão, efusão, advecção por fluidos, expansão ou na forma de bolhas em estado coloidal (Price 1986). Estes mecanismos são extremamente lentos, de modo que ocorrem acumulações que ficam estagnadas em alguns locais por milhares de anos ao longo do processo de migração. Portanto, a fonte dos hidrocarbonetos pode ter se deslocado antes mesmo do gás atingir a superfície (Brown 2000).

A Bacia do São Francisco, por ter origem proterozóica e, conseqüentemente, uma trajetória longa de tectonismo, dificulta o entendimento a respeito de seu formato original e das condições favoráveis para a origem e a conservação dos hidrocarbonetos. A Formação Lagoa do Jacaré – Grupo Bambuí, com seus folhelhos pretos ricos em matéria orgânica, é apontada como uma possível rocha geradora dos hidrocarbonetos gasosos encontrados na região (Fugita & Clark 2001). O conhecimento acerca do arranjo estrutural regional da bacia já obteve um grande avanço (Alkmim *et al.* 1993, Alkmim & Martins-Neto 2001, Martins-Neto & Alkimim 2001), otimizado com a utilização de interpretações sísmo-estratigráficas (Coelho *et al.* 2008, Hercos *et al.* 2008). A integração destes dados e o mapeamento de campo possibilitam especulações sobre os possíveis caminhos utilizados pelos gases para atingir a superfície (Oliveira 1998).

3.1.2 Alterações no meio

Durante o processo de migração, as microexsudações modificam as condições de equilíbrio no meio, alterando fatores como Eh, pH e potencial redox. Essas alterações levarão a efeitos de instabilidade e mudanças na composição química do solo e das rochas, tal como modificações na mineralogia e na vegetação (Saunders *et al.* 1993, Schumacher 1996).

As alterações ocorrem de acordo com as condições originais da sequência lito-estratigráfica, como a sua geoquímica, porosidade e o grau de oxigenação (Oliveira 1998).

Capítulo 3 – Microexsudações e Técnicas de Exploração

Portanto, os efeitos serão diferenciados ao longo dos perfis. Seguindo o modelo proposto por Saunders *et al.* (1993, 2002) (Figura 3.1), há o predomínio de uma zona redutora em profundidade e uma zona oxidante mais próxima da superfície. As alterações gerais se apresentam da seguinte maneira:

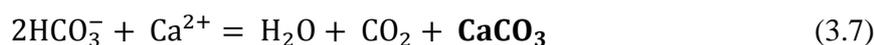
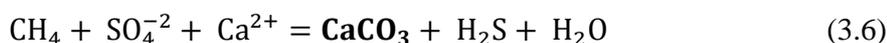
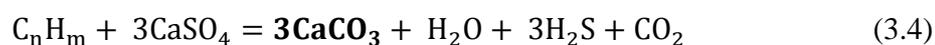
➤ quando as microexsudações alcançam a superfície, encontram condições oxidantes. As bactérias aeróbicas consomem os hidrocarbonetos leves e ocorre um decréscimo da oxigenação (Schumacher 1996) e a geração de dióxido de carbono (Equação 3.1):



➤ com o desenvolvimento de condições anaeróbicas, bactérias irão reduzir o sulfato para sulfeto de hidrogênio (Equação 3.2) e a oxidação do carbono orgânico formará o bicarbonato (Equação 3.3) (Saunders *et al.* 1993):



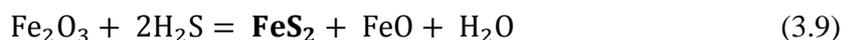
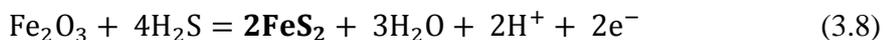
➤ carbonatos podem ser formados de diversas maneiras: (i) pela reação química de sulfatos de cálcio e hidrocarbonetos (Equação 3.4); (ii) com o cálcio disponível no meio e a oxidação de metano é possível a produção de carbonato por processo aeróbico (Equação 3.5) ou anaeróbico (Equação 3.6) (Schumacher 1996); (iii) quando a concentração de sulfato diminui, o pH se eleva e promove a precipitação de cimentos carbonáticos (Equação 3.7):



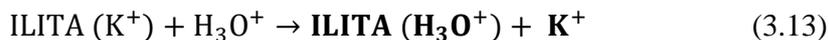
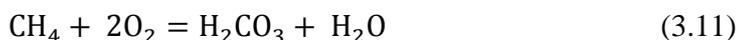
➤ os compostos de enxofre reduzido (Equação 3.2) são altamente reativos e se combinam com o ferro, presente na água subterrânea, nos sedimentos ou na forma de hematita. Essa reação gera sulfetos, como pirita e marcasita, e óxidos de ferro, como a magnetita e maghemita (Liu *et al.* 2004) (Equações 3.8, 3.9 e 3.10). O íon de ferro

Capítulo 3 – Microexsudações e Técnicas de Exploração

dominante passa a ser o ferroso ao invés do férrico. Este processo foi identificado em experimentos realizados com mudas de eucalipto da mesma espécie daquelas encontradas na região do Remanso do Fogo (Oliveira 1998).



➤ as condições redutoras propiciam a solubilização de potássio nos feldspatos, e também a sua substituição por H_3O^+ (Equações 3.11 e 3.12) ou outros cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+) nas camadas de ilita, onde em seguida o potássio será lixiviado (Equação 3.13) (El-Sadek 2002, Saunders *et al.* 2002). Com a continuidade da alteração, ocorrerá a formação de caulinita como produto final e, conseqüentemente, o empobrecimento de potássio (Klusman 2002). Se a exsudação de gás já tiver cessado, o equilíbrio pode ser reestabelecido e o potássio pode retornar na composição das argilas, e neste caso não haveria diferenças significativas em sua concentração final.



➤ quando o urânio se encontra no estado oxidado (UO_2^{2+}) é solúvel na água e, quando reduzido, se precipita como uraninita (UO_2) (Schumacher 1996, Saunders *et al.* 2002). Portanto, a mobilização de urânio pode contribuir para um empobrecimento deste elemento na zona de oxidação e um aumento com a precipitação de sais de urânio entre a zona de oxidação-redução, no limite da pluma de escape dos gases (Saunders *et al.* 1993 e 2002).

➤ o tório não é, ou é muito pouco, afetado por essas mudanças físico-químicas no meio, permanecendo fixo durante o processo e se comportando como um resistato (IAEA 2003).

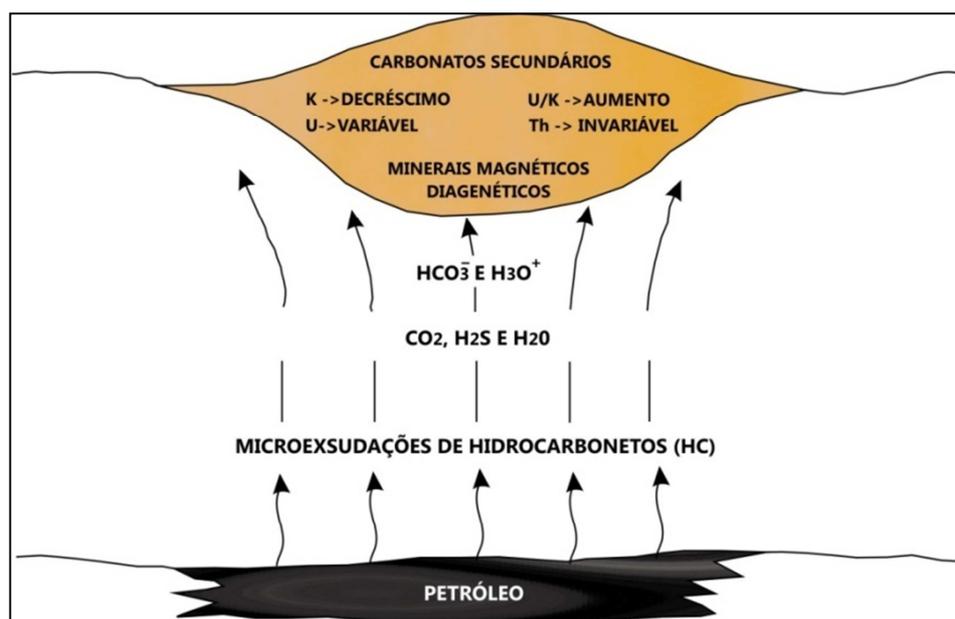


FIGURA 3.1 – Diagrama esquemático de um perfil em subsuperfície, apresentando as principais alterações ocasionadas pela ação de hidrocarbonetos gasosos. Baseado no modelo proposto por Saunders *et al.* (1999, 2002).

3.1.3 *Stress* geobotânico

Além da influência direta dos gases, as alterações no solo recorrentes das microexsudações podem afetar a vegetação local, gerando anomalias geobotânicas. O impacto do *stress* nas plantas depende de sua espécie e da composição dos gases. Plantas mais adaptadas às condições redutoras, como ambientes úmidos, conseguem se adaptar a solos ricos em metano (Flower *et al.* 1981).

Estudos apontam que dentro de quatro semanas, a influência direta dos gases nas plantas, principalmente do etano, provoca debilitação no crescimento das plantas (Noomen *et al.* 2004). Em experimento com eucaliptos da região do Remanso do Fogo, Oliveira (1998) observou que a germinação e o desenvolvimento dessas plantas foram comprometidos após a ação dos hidrocarbonetos.

Com a continuidade dos processos de alteração, o primeiro fator de *stress* observado nas plantas ocorre devido ao decréscimo de oxigênio no solo, causado pela maior concentração de CO₂ e pela diminuição da porosidade relacionada a uma provável cimentação carbonática (Donavan 1981). O segundo fator está relacionado às mudanças de

solubilidade de macro e micro nutrientes, que causarão deficiência nutricional, ou em excesso, nas plantas (Noomen *et al.* 2003).

Os principais efeitos do *stress* geobotânico na região do Remanso do Fogo são: crescimento debilitado das plantas, e mudanças na estrutura das folhas, variação na tonalidade, ressecamento, queda e atrofiação (Oliveira 1998, Augusto *et al.* 2005, Souza Filho *et al.* 2008).

3.2 TÉCNICAS EXPLORATÓRIAS

A geoquímica de superfície é utilizada como ferramenta principal para a análise direta da distribuição espacial dos gases, geralmente realizada anteriormente à utilização dos demais métodos prospectivos. Porém, ela também pode ser aplicada em alvos previamente definidos por estudos geofísicos e/ou de sensoriamento remoto, reduzindo o custo de operação (LeShack & Van Alstine 2002).

O aumento da resolução dos dados de geofísica e de sensoriamento remoto orbital possibilitou o desenvolvimento de pesquisas para a seleção de anomalias geoquímicas em solo, rocha e vegetação, características das microexsudações. Estes métodos estão sendo comumente aplicados na seleção de alvos para posterior prospecção de maior detalhe.

3.2.1 Gasometria

Dentre as categorias de métodos diretos para a medida de microexsudações, está o de gás livre, que consiste na coleta e medida de hidrocarbonetos leves (C1-C5) presentes nos poros do solo ou sedimentos, o qual pode ser realizado por meio de coleta instantânea (Klusman 2002).

O estudo composicional dos gases indica o nível de alteração que os mesmos podem causar no meio, principalmente na vegetação (Noomen *et al.* 2004). O cálculo de razões comparativas de metano, etano e propano podem determinar se os gases têm origem bioquímica ou termoquímica (Babinski & Santos 1987). De acordo com estes autores, em campanha realizada na região do Remanso do Fogo, o gás daquela área é composto por mais de 95% de metano e possui origem termoquímica.

3.2.2 Magnetometria

Os aerolevantamentos magnetométricos de alta resolução, particularmente para a exploração de petróleo, têm espaçamento entre as linhas de voo menor ou igual a 800m, com altura de voo menor ou igual a 150m, espaçamento de amostragem igual ou menor que 15m e acurácia instrumental melhor que 0,1nT (Glenn & Badgery 1998). Este conceito se adequa quando o objetivo é a definição do arcabouço estrutural geral da bacia, porém não é ideal para os casos em que os alvos possuem uma geometria por vezes menor que 100m, tal como ocorre na superfície de influência das microexsudações. Portanto, pesquisas apontam o sucesso na detecção de microexsudações através da utilização de espaçamento de linhas de produção menores que 500m (Grauch & Millegan 1998, LeShack & Van Alstine 2002).

A magnetometria contribui para a definição de estruturas do embasamento e intra-sedimentares (Gunn 1997c, Berger *et al.* 2002), as quais permitem a percolação de hidrocarbonetos até a superfície. Também é utilizada na análise das anomalias magnéticas caracterizadas pelas maiores concentrações de magnetita, maghemita e sulfetos de ferro causadas por influência das microexsudações, análise denominada de micro-magnetometria (LeShack & Van Alstine 2002). Porém, na região do Remanso do Fogo, Oliveira (1998) identificou menores concentrações de óxidos e hidróxidos de ferro nas áreas afetadas pelas microexsudações, devido aos processos supergênicos fortemente atuantes na região.

Anomalias de magnetita diagenética estão relacionadas com as zonas mais redutoras provocadas pelas microexsudações, centralizando-se acima da fonte dos gases. Um fato curioso ocorre quando colônias de bactérias se concentram nas zonas redutoras, havendo o consumo intenso de hidrocarbonetos, por vezes inibindo sua chegada em superfície. Como nesse ambiente poderão estar concentradas as magnetitas diagenéticas, as microexsudações em superfície estariam posicionadas ao redor das anomalias micro-magnéticas vistas em mapa (Saunders *et al.* 1991 e 2002).

3.2.3 Gamaespectrometria

O aerolevantamento gamaespectrométrico é realizado geralmente junto com a magnetometria e, portanto, possui as mesmas características de voo. Devido a esta dependência, os parâmetros que podem influenciar na otimização da qualidade dos dados

Capítulo 3 – Microexsudações e Técnicas de Exploração

radiométricos são o desenvolvimento da resolução do gamaespectrômetro (por ex. número de canais; volume e composição dos cristais) e a altura de voo (melhor quanto mais próxima ao solo) (Horsfall 1997, IAEA 2003).

O uso da gamaespectrometria para o estudo das microexsudações possui relação com a predominância de alterações geoquímicas que modificam parcialmente a composição da geologia em superfície. A capacidade de penetração deste método é inferior a 50 cm no solo e nas rochas (Dickson & Scott 1997). Portanto, as alterações provenientes das condições redutoras em maiores profundidades dificilmente serão detectadas por este método. Os parâmetros radiométricos mais utilizados para a definição de anomalias causadas por hidrocarbonetos são (Schumacher 1996, Saunders *et al.* 1993 e 2002):

- empobrecimento na concentração de urânio.
- empobrecimento mais acentuado na concentração de potássio.
- estabilidade na concentração de tório.

A geometria da anomalia radiométrica depende não somente do arranjo estrutural do perfil, mas também da dinâmica do intemperismo na região, influenciada por fatores como a declividade do terreno e a direção do fluxo das águas subterrâneas (Wilford *et al.* 1997). Parte das microexsudações na região do Remanso do Fogo, identificadas por Oliveira (1998), são influenciadas pelo fluxo de águas subterrâneas, posicionando-as nas áreas próximas as quebras de relevo e drenagens.

3.2.4 Sensoriamento remoto

O uso do sensoriamento remoto para a detecção das microexsudações leva em consideração tanto as mudanças físico-químicas dos solos e rochas, como também os danos causados à vegetação em função do ambiente redutor e da presença de elementos tóxicos solúveis (Cu, Pb, Zn, Ni, Co e U) – fenômeno denominado de *stress* geobotânico (Oliveira 1998). Alguns trabalhos foram realizados no Brasil utilizando o sensor Landsat/TM (Oliveira 1998, Almeida-Filho 2002) e ASTER (Augusto *et al.* 2005 e Souza Filho *et al.* 2008). Este último, o qual será utilizado no presente trabalho, é composto por 14 bandas espectrais, sendo três no visível/infravermelho próximo, seis bandas no infravermelho de ondas curtas e cinco no infravermelho termal. Desta forma, possui uma vantagem

significativa em relação ao sensor Landsat na discriminação minerais, em particular os argilominerais (Crósta *et al.* 2003, Ducart *et al.* 2006).

Na utilização do sensoriamento remoto para a seleção de anomalias geradas pela ação de hidrocarbonetos, alguns parâmetros são comumente observados:

➤ o solo pode apresentar descoloração (*bleaching*) devido à redução de óxi-hidróxidos férricos (Fe^{3+}) (hematita a limonita) para compostos ferrosos (Fe^{2+}), como a magnetita e a maghemita (Schumacher 1996). O íon ferroso possui bandas de absorção em 0,43; 0,45; 0,51 e 0,55 (μm), enquanto as do íon férrico estão em 0,44; 0,7 e 0,87 (μm) (Meneses & Ferreira Júnior 2001). Uma forma de detecção desta propriedade é pela observação do decréscimo do gradiente de reflectância na região do visível (Lammoglia *et al.* 2007).

➤ aumento da ocorrência de caulinita no solo, acompanhado ou não da lixiviação de outras argilas (ilitas-esmectitas), e na superfície de rochas constituídas por feldspatos (Conel & Ally 1985 *apud* Schumacher 1996). A caulinita é caracterizada por bandas de absorção em 1,40 -1,42 e 2,162 e 2,206 (μm), e outras acessórias em 2,312; 2,350 e 2,380 (μm) (Pontual *et al.* 1997). O fenômeno de *bleaching* pode ressaltar as feições de absorção da caulinita.

➤ a cimentação por carbonato diagenético pode ocorrer em concentrações acima da apresentada pelas condições geológicas originais. Pode ser detectado pelas seguintes características espectrais: duas grandes bandas de absorção: 2,50 – 2,55 (μm) e 2,3 – 2,35 (μm) (Meneses & Ferreira Júnior 2001); como também pelo alto topográfico resultante da maior resistência a erosão.

➤ a análise do *stress* geobotânico pode ser feita de duas formas complementares em imagens de sensoriamento remoto, relativas respectivamente a variações texturais e espectrais. As variações texturais estão relacionadas à deficiência no crescimento, atrofiação e/ou queda das folhas, de forma que a densidade da vegetação diminui nas áreas afetadas pelos hidrocarbonetos em relação a uma vegetação sadia (Augusto *et al.* 2005). Já as modificações no espectro eletromagnético estão divididas segundo um padrão nas regiões do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas (Meneses & Ferreira-Júnior 2001, Noomen 2007, Lammoglia *et al.* 2007) causadas pelas mudanças na

pigmentação, estrutura celular, e conteúdo de água das folhas, respectivamente. Na região do visível (VNIR: 0,4 – 0,7 μ m), a reflectância da vegetação saudável na luz visível é caracterizada pela absorção por pigmentos como a clorofila nas bandas 0,43; 0,46; 0,64 e 0,66 (μ m) (Noomen 2007). Quando a vegetação é exposta a um solo intoxicado, a deficiência em ferro afeta a clorofila, resultando na inibição do crescimento da vegetação e clorose parcial das folhas, resultando num aumento da reflectância nesta região (Oliveira 1998). No infravermelho próximo (NIR: 0,7 – 1,3 μ m), o comportamento típico apresentado pela vegetação nesta região é uma alta reflectância entre 0,8 e 1,1 (μ m), o qual é dependente da estrutura interna da folha e sua área (Gausman 1974). Após ser submetida ao *stress*, a vegetação apresentará uma menor reflectância nessa porção do espectro. A região do infravermelho de ondas curtas (SWIR: 1,3 – 2,5 μ m), possui três bandas principais de absorção pela água – 1,2; 1,4 e 1,94 (μ m) (Noomen 2007). Com o ressecamento das folhas, haverá um aumento de reflectância nesta região. O fato de a reflectância diminuir no NIR e aumentar no SWIR resulta em um deslocamento da inclinação entre o vermelho e o NIR – denominado de “posição *red edge*”- na direção de comprimento de ondas menores (Van der Meer *et al.* 2002). Augusto *et al.* (2005) e Souza Filho *et al.* (2008) detectaram algumas áreas, na região do Remanso do Fogo, que apresentaram anomalias geobotânicas.

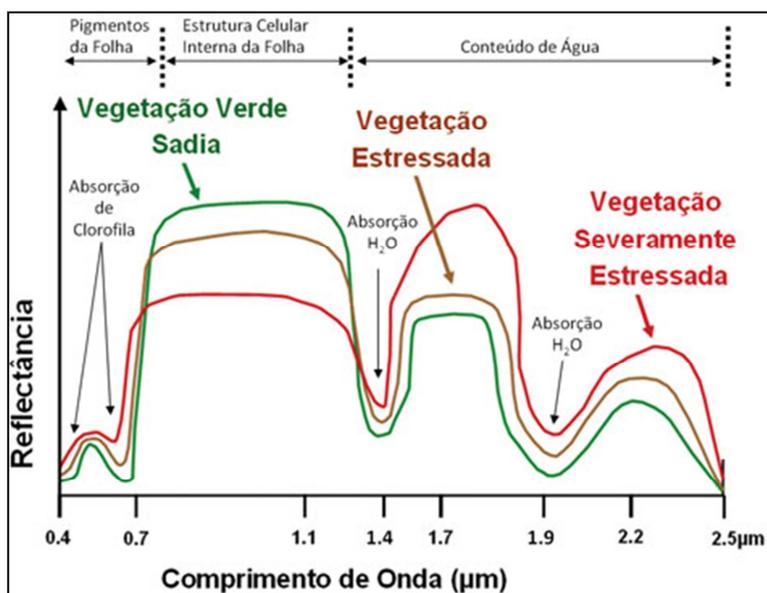


FIGURA 3.2 – Comparação entre os espectros de uma vegetação sadia à severamente estressada. Ilustração retirada de Souza Filho *et al.* (2008).

CAPÍTULO 4

NATUREZA DOS DADOS, MÉTODOS UTILIZADOS & PROCESSAMENTO

O foco adotado durante a etapa de processamento dos dados geofísicos foi o de minimizar ao máximo a interferência de fontes regionais nas variáveis locais de interesse. Dentre estas fontes, estão aquelas que ocorrem nos primeiros 25 cm da superfície e exercem influência nos sinais captados pela gamaespectrometria, tais como: unidades geológicas, hidrografia, aspectos geomorfológicos e influências antrópicas (IAEA 2003). Enquanto a magnetometria detecta fontes magnéticas em diferentes profundidades, sendo que, aquelas que exercem maior contribuição na Bacia do São Francisco provêm do embasamento arqueano/paleoproterozóico, o qual apresenta rochas tipicamente mais magnéticas do que aquelas que compõem a coluna sedimentar (Borges & Drews 2001). Portanto, nos dados geofísicos, foram aplicadas técnicas com o objetivo de realçar feições anômalas através da supressão desses dados regionais, os quais primeiramente foram utilizados para o maior entendimento do contexto geral da área de estudo.

No processamento dos dados de sensoriamento remoto, objetivou-se a extração de feições espectrais, indicadoras da ação dos hidrocarbonetos em objetos presentes em superfície, e a posterior integração com os dados geológicos e geofísicos.

O mapa geológico (Ribeiro 2003) e as curvas de iso-concentração, de etano e hidrocarbonetos mais pesados que etano (Petrobrás 1987 apud Oliveira 1998), foram utilizados na função de auxiliar o entendimento do contexto geológico geral da área e nas etapas de integração e interpretação dos resultados. Estes dados foram utilizados com eventuais adaptações e modificações ilustrativas.

4.1 DADOS GEOFÍSICOS

4.1.1 Natureza dos dados

Neste trabalho foram utilizados os dados de magnetometria e gamaespectrometria provenientes do levantamento aerogeofísico realizado pela Lasa Engenharia & Prospecções S.A, no período entre abril e agosto de 2006, e

disponibilizado, para esta pesquisa, pela Agência Nacional de Petróleo (ANP), juntamente com o relatório final de aquisição e processamento dos dados.

O levantamento total possui 81.237,12 km lineares de voo em uma área de aproximadamente 35.330Km², enquanto a área de estudo, que está localizada em seu extremo leste, possui cerca de 2041 Km lineares de voo em uma área de 881 Km². As linhas de voo estão dispostas no sentido NS e as linhas de controle em EW, com espaçamento de 500m e 4.000m, respectivamente (Tabelas 4.1 e 4.2). Possui altura de voo nominal de 100m e os valores do campo magnético total no centro da área, inclinação e declinação correspondem a 23.787,037nT, -21,524° e -26,098°, respectivamente.

TABELA 4.1 – Principais atributos relacionados ao aerolevanteamento geofísico efetuado pela Engenharia & Prospecções S.A (2006).

Período do levantamento	Abril-Agosto de 2006
Aeronaves utilizadas	Cessna, modelo 208B – Grand Caravan
Direção e espaçamento das linhas de produção	NS; 500 metros
Direção e espaçamento das linhas de controle	EW; 4000 metros
Altura nominal de voo	100 metros
Intervalo de amostragem da Magnetometria	0,01 segundos ou aprox. 0,75 metros
Intervalo de amostragem da Gamaespectrometria	1 segundo ou aprox. 75 metros
Magnetômetros	MMS-4 Inteligent Multisensor. Sensor Scintrex CS-3 de vapor de césio com resolução de 0,001 nT
Gamaespectrômetros	PICO ENVIROTEC, modelo GRS-410, com 512 canais.
Sistema de Coordenadas, projeção e datum	Coordenadas UTM; Datum SAD-69

TABELA 4.2 – Coordenadas e dimensões das áreas do estudo e do aerolevanteamento geofísico.

	Coordenadas Geográficas (Datum SAD-69)		Áreas (Km²)
	Canto esquerdo superior	Canto direito inferior	
Área do levantamento em sua totalidade	-16°00'00.00" -46°30'00.00"	-18°00'00.00" -45°00'00.00"	35.330
Poligonal da área de estudo	-16°29'59.03" -45°16'00.66"	-16°46'33.46" -44°59'40.65"	881

4.1.2 Pré-processamento e avaliação dos dados

Anteriormente a disponibilização dos dados pela ANP, a Lasa Engenharia e Prospecções S.A realizou um pré-processamento dos dados (Figura 4.1), fornecendo, ao banco de dados magnéticos, o canal do campo magnético anômalo micronivelado e, ao banco de dados radiométricos, os canais de concentração aparente (%) de K, eTh e eU. O software utilizado foi Oasis Montaj, versão 5.1.9, da Geosoft.

No início da etapa de processamento realizada no presente estudo, foram realizados testes de consistência dos dados. À priori, a observação atenta de perfis ao longo das linhas de voo e a análise estatística são procedimentos de rotina, porém eficientes na verificação de possíveis problemas. Os testes de diferença quarta e “parâmetro P” (Equação 4.1; Blum 1999), foram realizados para a verificação de *spikes*, ou picos ruidosos. Em toda a etapa de verificação dos dados, não foram observados erros.

$$P = \log(|x - \bar{x}| - |3 * \sigma|) \quad (4.1)$$

onde, P é o “pico”, x é o dado em questão, \bar{x} é a média dessa diferença nos dados e σ é desvio-padrão.

O processamento dos dados e as operações estatísticas foram realizadas nos *software* Oasis Montaj 7.1, SPSS 13.0 e ArcGis 9.3 (ESRI 2008), sendo que este último também foi utilizado para a integração dos dados.

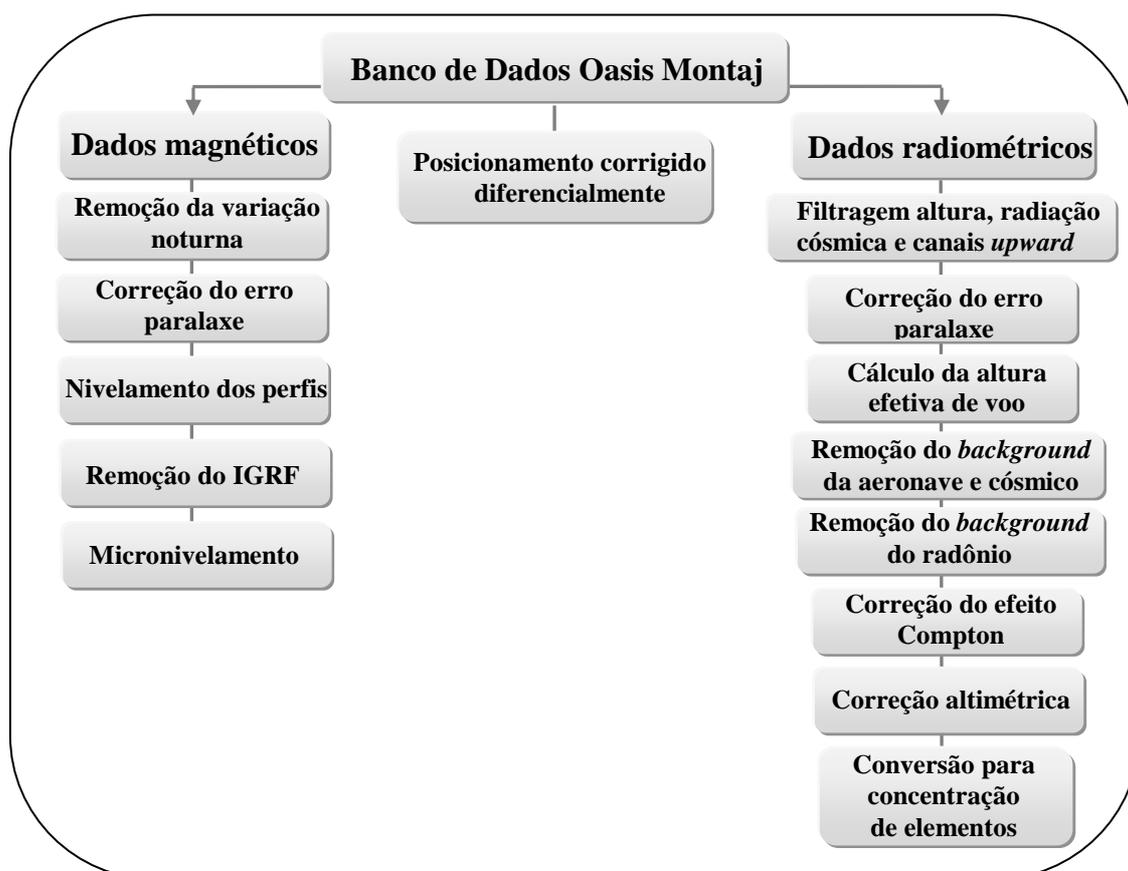


FIGURA 4.1 - Etapas do pré-processamento dos dados geofísicos, realizado pela Lasa Engenharia e Prospecções S.A (2006). Explicações detalhadas deste processamento foram disponibilizadas pela ANP, no relatório final de aquisição e processamento dos dados.

4.1.3 Processamento dos dados gamaespectrométricos

Diversas aplicações com dados de gamaespectrometria foram realizados com o intuito de realçar concentrações geoquímicas anômalas inseridas em um mesmo contexto litológico, na detecção de áreas mineralizadas ou com presença de hidrocarbonetos (Saunders *et al.* 1987, Saunders *et al.* 1993, Pires 1995, El-Sadek 2002, Le Shack & Van Alstine 2002, Saunders *et al.* 2002, Hoff *et al.* 2004 e Soares *et al.* 2004).

Segundo Pires (1995), áreas com ocorrência de alteração hidrotermal se caracterizam pela presença de concentrações anômalas de K, as quais podem ser detectadas através da aplicação da técnica de normalização pelo Th, cujo procedimento é definido em Saunders *et al.* (1987) e utilizado no presente trabalho.

Saunders *et al.* (1987) aprimora o processamento de dados geofísicos, na identificação de áreas com possíveis acumulações de hidrocarbonetos, utilizando a técnica de normalização pelo Th para a definição de concentrações anômalas de K e U. Esta técnica se resume na propriedade do tório de se manter estável sob diversos tipos de alterações físico-químicas no meio em que se encontra, sendo considerado como um “controlador litológico” que, utilizado na normalização, pode prever valores “ideais” de K e U, que por sua vez, se apresentam como elementos mais móveis.

Os valores de potássio e urânio ideais, K_i e U_i , podem ser determinados por análises de regressão, onde serão definidas as equações que melhor se ajustam aos conjuntos de dados (Saunders *et al.* 1987). Saunders *et al.* (1993) simplificam a técnica, onde estes valores são determinados pelas equações 4.2 e 4.3.

$$K_i = (\text{média}K_s/\text{média}Th_s) * Th_s \quad (4.2)$$

$$U_i = (\text{média}U_s/\text{média}Th_s) * Th_s \quad (4.3)$$

Onde K_i e U_i representam o valores ideais de cada radioelemento; e K_s , U_s e Th_s os valores originais, medidos em campo.

No presente trabalho, optou-se por definir funções lineares com o melhor ajuste aos dados, através do *software* SPSS 13.0 (Equações 4.4 e 4.5).

$$K_i = a + b * Th_s \quad (4.4)$$

$$U_i = a + b * Th_s \quad (4.5)$$

onde K_i e U_i representam o valores ideais de cada radioelemento; e K_s , U_s e Th_s os valores originais, medidos em campo.

As diferenças entre os valores ideais e os originais, medidos na aquisição, resultam nos valores residuais de potássio e urânio, KD e UD (Equações 4.6 e 4.7).

$$\mathbf{KD} = (K_s - K_i) \quad (4.6)$$

$$\mathbf{UD} = (U_s - U_i) \quad (4.7)$$

No trabalho de Saunders *et al.* (1993), o índice DRAD foi adicionado à técnica (Equação 4.8), o qual representa a diferença entre os valores de urânio e potássio residuais. Estes autores, assegurando-se de que, sob a influência de hidrocarbonetos, a concentração de potássio diminui e a de urânio diminui de forma menos acentuada quando comparada ao potássio, o índice DRAD deverá ter resultados positivos em áreas com a presença de hidrocarbonetos.

$$\mathbf{DRAD} = \mathbf{UD\%} - \mathbf{KD\%} \quad (4.8)$$

Portanto, o procedimento adotado no presente trabalho com os dados envolveu as etapas expostas fluxograma apresentado pela figura 4.2.

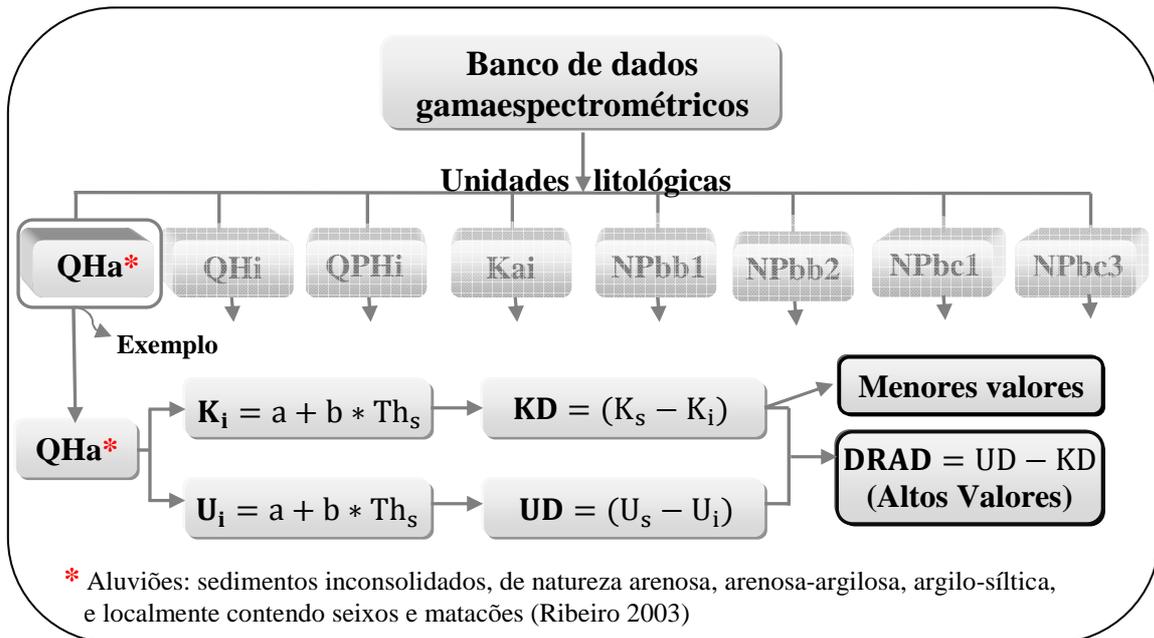


FIGURA 4.2 – Fluxograma indicando as etapas de processamento dos dados gamaespectrométricos. A técnica de normalização pelo tório foi aplicada aos dados, segundo suas respectivas unidades litológicas, exemplificadas no fluxograma pela unidade QHa. As siglas utilizadas são: K_i = K ideal; U_i = U ideal; Th_s , K_s e U_s são os valores originais dos três radioelementos; KD e o UD são os valores residuais de K e U. As demais siglas, referentes as unidades litológicas, estão conforme o mapa geológico (Ribeiro 2003), apresentado na figura 2.2, capítulo 2.

4.1.4 Processamento dos dados magnéticos

A análise dos dados magnéticos possui dois focos principais, a observação de possíveis acumulações de minerais magnéticos diagénéticos próximos à superfície e a detecção de assinaturas magnéticas provenientes do arranjo estrutural intra-sedimentar, nesta porção da bacia. Em ambos os casos, é necessário que a base para a geração dos produtos seja o campo magnético anômalo, ou seja, o campo magnético total sem o IGRF (*Internacional Geomagnetic Reference Field*), seguida da supressão da influência magnética do embasamento nos dados, a qual possibilitará a geração dos produtos magnéticos residuais (Nabighian *et al.* 2005).

Anteriormente à geração de imagens, foram realizados alguns procedimentos primordiais ao entendimento do comportamento do campo magnético na área de estudo, como a análise do espectro de potência (Davis 1986).

O espectro de potência foi efetuado neste estudo com o objetivo de analisar os principais conjuntos ou famílias de profundidades das assinaturas magnéticas. Consiste-se no cálculo do espectro 2D, no domínio da frequência, da energia ou potência dos dados, plotados em função dos diferentes comprimentos de onda presentes no campo anômalo. O *software* Oasis Montaj, versão 7.1, para facilitar a visualização, apresenta o gráfico da média radial da potência *vs* número de onda, o qual é o inverso do comprimento de onda (Reeves 2005).

A análise foi feita através da concepção de que grandes energias e comprimentos de onda provêm de corpos magnéticos profundos, onde a recíproca também é válida. Segundo Spector & Grant (1970), o logaritmo do espectro de potência tem um gradiente linear cuja magnitude depende da profundidade da fonte e, portanto, sua análise permite estimar profundidades e definir quantitativamente os componentes regionais e residuais. Comprimentos de onda muito pequenos, acima da frequência de *Nyquist* estabelecida, são usualmente caracterizados como ruído (Teorema da Amostragem; Davis 1986). A frequência de *Nyquist* foi calculada, segundo a equação 4.9.

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t} = 1 \text{ Km}^{-1} \quad (4.9)$$

onde f_N é a frequência de *Nyquist* e Δt é o intervalo de amostragem, o qual pode ser representado pela separação das linhas de voo (=0,5Km).

Interpolação dos dados

Para a interpolação dos dados magnéticos em grid, foi utilizado o *spline* bícúbico, ou bidirecional (Reeves 2005), realizado em um procedimento que envolve a interpolação dos dados ao longo da linha de voo e, sem seguida, perpendicularmente a ela. Com os dados utilizados neste estudo, este algoritmo abrangeu pontos com uma distância de até 1Km do nó da malha, respeitando a condição determinada pelo teorema da amostragem.

A dimensão da célula unitária, de acordo com o sugerido por Vasconcelos *et al.* (1990), deve ser de 1/4 a 1/8 do espaçamento da linha de voo. Neste estudo foi utilizado 125m para a célula unitária, ou seja, 1/4 de 500m (espaçamento das linhas de voo).

Redução ao polo

A técnica de redução ao polo (Baranov 1957 e Baranov & Naudy 1964) foi testada para o campo magnético da área de estudo, pois a centralização das respostas magnéticas em relação as suas fontes é de suma importância para estabelecer a relação entre as anomalias magnéticas e àquelas apontadas pela gamespectrometria e o sensoriamento remoto.

Para a aplicação desta técnica, é necessário o conhecimento da direção de magnetização, geralmente assumida como paralela ao campo magnético atual. Porém pode ocorrer a contribuição de remanescência, a qual pode estar desalinhada com o campo ambiente e tornar a utilização da técnica inviável (Nabghian *et al.* 2005).

Dados coletados em baixas latitudes magnéticas também configura ao operador da redução ao polo certa instabilidade, pois neste caso o azimute do corpo e a inclinação magnética se aproximam de zero (Nabghian *et al.* 2005). Avaliando-se no contexto de inclinações magnéticas, as mesmas geralmente são menores que 20° em baixas latitudes. Na área de estudo, os valores de inclinação e declinação magnética são de -21,524° e -26,098°, respectivamente.

Para superar este problema, foram desenvolvidos alguns algoritmos para realizar a redução ao polo em baixas latitudes, tal como Grant & Dodds (1972), apud MacLeod *et al.* (1993), e Phillips (1997). O primeiro mencionado desenvolveu o algoritmo (Equação 4.10), e o implementou no sistema de processamento MAGMAP do software Oasis Montaj (Equação 4.11), o qual faz uso de uma pseudo-inclinação I' definida pelo usuário, que deve ser maior que a inclinação absoluta e preferencialmente entre 20° e 30°, e é utilizada para controlar a amplitude do filtro em regiões próximas ao equador:

$$L(\theta) = \frac{1}{[\sin(I) \cdot \cos(I) \cos(D-\theta)^2]} \quad (4.10)$$

$$L(\theta) = \frac{[\sin(I) - i \cdot \cos(I) (D - \theta)]^2}{[\sin^2(I') + \cos^2(I') \cdot \cos^2(D - \theta)] \cdot [\sin^2(I) + \cos^2(I) \cdot \cos^2(D - \theta)]} \quad \text{se, } (|I'| < |I|), I' = I \quad (4.11)$$

onde θ é a direção do número de onda, I é a inclinação magnética, D é a declinação magnética e I' é a pseudo-inclinação.

Phillips (1997) incorpora a filtragem azimutal em procedimento FFT à redução ao polo com o objetivo de eliminar a amplificação de ruídos ao longo da direção da declinação, através do uso do seguinte fator:

$$S(\theta) = \sin^p \left(\frac{\pi|\theta - D \mp 90|}{2\beta} \right) \quad (4.12)$$

onde β é o ângulo relativo a declinação magnética; θ é a direção do número de onda; D é a declinação magnética; e o parâmetro exponencial p determina a taxa de declinação da suavização.

A filtragem azimutal funciona de forma similar a pseudo-inclinação, suprimindo a amplitude e a potência relacionadas com a direção da declinação, exceto que o primeiro suprime significativamente a potência ao redor da direção da declinação (até zero ao longo da direção da declinação) (Li 2008).

Os dois algoritmos, segundo Grant & Dodds (1972) e Phillips (2007), foram testados neste estudo e apresentaram certa instabilidade, de forma que as imagens geradas apresentaram ruídos na direção da declinação magnética. A qualidade da redução ao polo também foi analisada pela comparação deste produto com a amplitude do sinal analítico, a qual também tem por objetivo a centralização dos corpos magnéticos em suas fontes (Roest *et al.* 1992). Estas avaliações indicaram que este produto não apresentou confiabilidade necessária para ser apresentado como um resultado efetivo.

Amplitude do sinal analítico

A amplitude do sinal analítico foi utilizada com o objetivo de definir os limites dos corpos magnéticos e centralizá-los acima de suas fontes, e foi considerado como uma alternativa à redução ao polo (Roest *et al.* 1992).

Nabighian (1972) introduz o conceito do sinal analítico, ou gradiente total, realizado no domínio da frequência, o qual independe da direção de magnetização da fonte. Em 1984, este autor propõe a utilização deste conceito em ambiente 3D e Roest *et*

al. (1992) desenvolve aplicações práticas do sinal analítico na estimativa de características da fonte magnética, como geometria e profundidade. Dessa forma, passou a ser possível o uso do sinal analítico aos dados em malha (ou *grid*), utilizando-se a função de sua amplitude:

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2} \quad (4.13)$$

onde M é o respectivo campo magnético.

O sinal analítico possui originalmente ordem zero (Nabighian 1974), portanto quando ocorre a utilização das derivadas de segunda ordem, a denominação apropriada seria a amplitude do sinal analítico “de ordem 1”, e assim por diante. Com o aumento das ordens, haverá o maior predomínio de altas frequências, tal como de ruídos. Devido a presença da derivada vertical, a amplitude do sinal analítico é mais susceptível a ruídos do que o gradiente horizontal (Phillips 2000).

Gradiente Horizontal

O gradiente horizontal realça as posições horizontais dos contatos magnéticos apresentados em malha (Blakely and Simpson 1986) e foi utilizado neste estudo para realçar as feições e lineamentos magnéticos com maiores comprimentos de onda do que aqueles apresentados pela amplitude do sinal analítico de ordem 1. O gradiente horizontal é afetado pelos valores de inclinação e declinação do campo magnético e é, comumente utilizado, com a prévia redução ao polo (Phillips 2000). É determinado pela seguinte função:

$$|H(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2} \quad (4.14)$$

onde M é o campo magnético, preferencialmente reduzido ao polo.

Continuação Ascendente

A continuação ascendente suaviza as altas frequências em relação às baixas, que simula um aumento da altura de voo do levantamento, sendo utilizada em muitos casos para a eliminação de fontes mais rasas e ruídos (Milligan & Gunn 1997). A equação utilizada no domínio da frequência para produzir a continuação ascendente é (Reeves 2005):

$$F(\omega) = e^{-h\omega} \quad (4.15)$$

onde h é o valor a ser adicionado a partir do plano de observação.

Diferentes valores de continuações ascendentes foram testados e selecionados neste estudo, segundo objetivos distintos. Primeiramente, para permitir a observação de fontes magnéticas mais profundas, provenientes do embasamento e, posteriormente, para obter informações sobre estruturas intra-sedimentares, associada à técnica descrita a seguir.

Separação dos campos magnéticos regional e residual

No âmbito da geofísica aplicada à prospecção mineral, petróleo, gás, entre outras áreas, o campo magnético residual é, na grande maioria das vezes, a base para a geração dos produtos interpretativos que permitem a seleção de subáreas de interesse prospectivo (Glenn & Badgery 1998, Spaid-Reitz & Eick 1998 e Nabighian *et al.* 2005). A separação das assinaturas regionais e residuais pode ser efetuada de diversas maneiras, sendo a sua escolha dependente de certos parâmetros, como a profundidade de interesse (Spector & Grant 1970, Syberg 1972, Gunn 1997a, Guspi & Introcaso 2000, Phillips 2001 e Nabighian *et al.* 2005).

Na aplicação de dados geofísicos em bacias sedimentares, procura-se diferenciar as assinaturas magnéticas provenientes do embasamento (regionais) e aquelas da seção sedimentar (residuais) (Gunn 1997b,c). Além desta análise, é possível o realce das altas frequências na detecção de acumulações de minerais magnéticos próximos a superfície (LeSchack & Van Alstine 2002). Para que a distinção entre essas respostas magnéticas seja possível, podem ser realizados diversos procedimentos (Nabighian *et al.* 2005), sendo que alguns deles foram testados nesse trabalho:

- análise do espectro de potência para a estimativa das profundidades dos componentes residuais e regionais (Spector & Grant 1970);

- utilização da primeira derivada vertical e do gradiente vertical, sendo este equivalente a subtração das medidas de dois pontos sobrepostos verticalmente, dividida pela distância linear entre esses pontos (Milligan & Gunn 1997). Esse processo tem por objetivo acentuar as altas frequências e minimizar a influência do embasamento. Segundo esses autores, a segunda ordem da derivada vertical é mais eficiente no realce das altas frequências, porém é necessário dados de alta qualidade para que não ocorra a predominância de ruídos;

- as derivadas horizontais de segunda ordem também proporcionam o efeito de minimizar a influência do embasamento, como exposto no trabalho de LeSchack & Van Alstine (2002). Neste trabalho, as derivadas vertical e horizontais de segunda ordem

foram utilizadas de forma conjunta para gerar a amplitude do sinal analítico ordem 1, onde objetivou-se a detecção de assinaturas magnéticas próximas da superfície;

➤ análise de regressão polinomial para a retirada de uma superfície de tendência de 1º, 2º ou 3º ordem, proporcionando o realce de anomalias magnéticas locais (Landim 2004, Nabighian *et al.* 2005, Kearey *et al.* 2009);

➤ subtração de continuações ascendentes, utilizada a fim de se obter as assinaturas magnéticas provenientes de um intervalo de profundidade específico (Jacobsen 1987 e Spaid-Reitz & Eick 1998). Este procedimento se assemelha a aplicação de filtros como o passa-banda e *matched filtering* (Syberg 1972, Phillips 2001). O gradiente horizontal da subtração entre as continuações ascendentes de 1200m e 400m, denominado neste estudo de GHS, foi o procedimento adotado para a detecção de estruturas intra-sedimentares.

Portanto, após a análise do campo magnético da área de estudo e através da utilização das técnicas, mencionadas acima, foi definida a metodologia mais adequada, exposta no seguinte fluxograma:

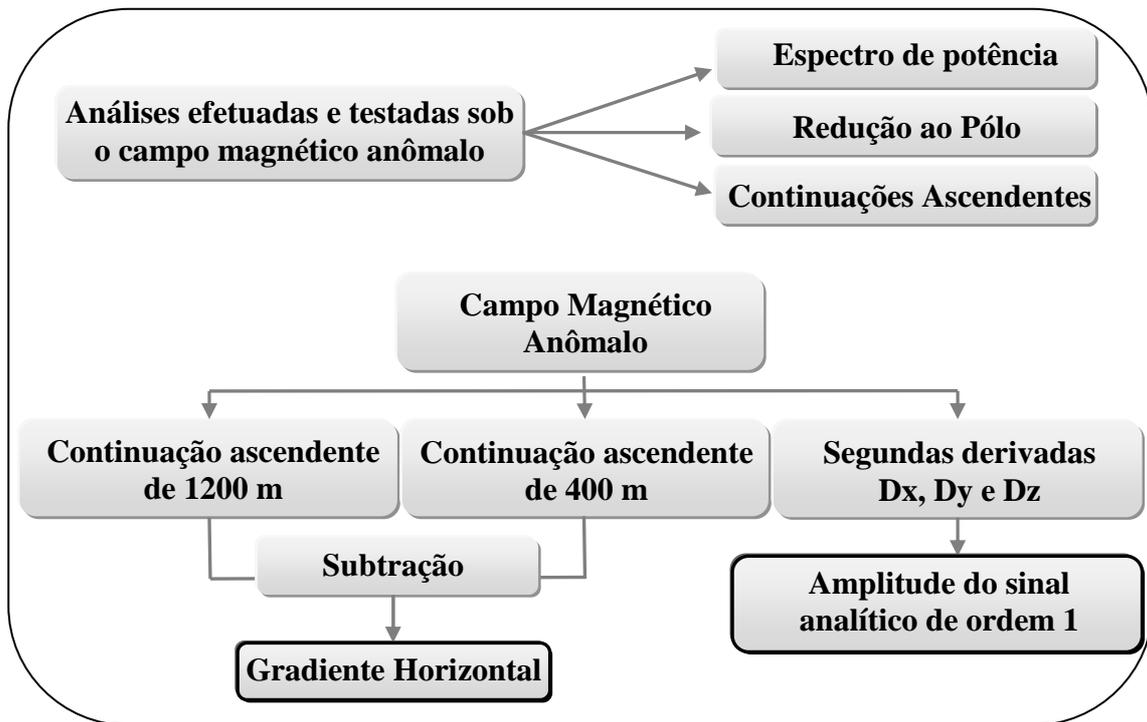


FIGURA 4.3 – Fluxograma indicando as etapas de processamento dos dados magnéticos.

4.2 DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL

4.2.1 Natureza das imagens

O ASTER é um sensor a bordo do satélite TERRA, lançado em 18 de dezembro de 1999, caracterizado por resolução espectral composta por 3 bandas na região do visível ao infravermelho próximo, 6 bandas na região do infravermelho de ondas curtas e 5 bandas na região do termal, com resolução espacial de 15m, 30m e 90m, respectivamente (Figura 4.4). As duas primeiras regiões apresentam nível de quantização de 8 bits, enquanto a terceira de 12 bits. A banda 3 possui duas direções de visada, a qual permite a realização de estereoscopia.

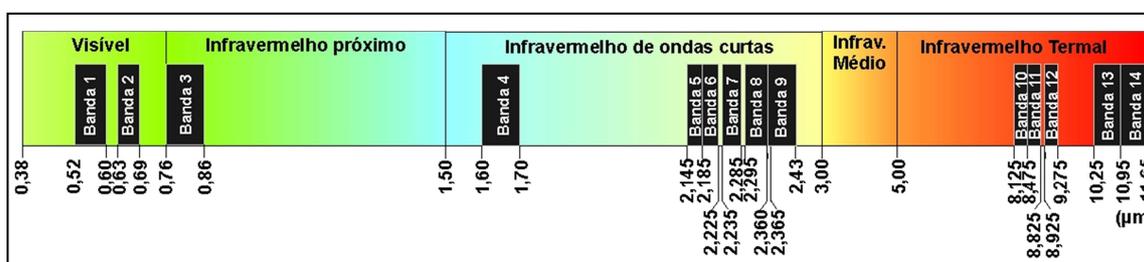


FIGURA 4.4 – Distribuição das bandas do sensor ASTER, com seus respectivos intervalos espectrais, ao longo das regiões do visível ao infravermelho termal.

As imagens ASTER foram obtidas para este estudo através do Centro de Arquivamento Ativo de Distribuição de Processos Terrestres (*Land Processes Distributed Active Archive Center - LP DAAC*) da Administração do Espaço e Aeronáutica Nacional (*National Aeronautics and Space Administration - NASA*) – lpdaac.usgs.gov. No mesmo local, também é possível obter o modelo digital de elevação global (GDEM), produto resultante da parceria entre a NASA e o Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (METI).

Para o presente estudo, foram obtidos o GDEM e as imagens nível 1B – caracterizadas por ter correção geométrica, georreferenciamento e valores de radiância reamostrados entre 0 e 255 - adquiridas em 17 de maio de 2006. Para a cobertura efetiva da área de estudo, foram utilizadas duas cenas do sensor ASTER, sendo que cada uma delas abrange uma área de 60x60Km.

As bandas 3B e aquelas pertencentes à região do infravermelho termal não foram utilizadas neste estudo.

4.2.2 Pré-processamento das imagens

A influência de gases e partículas na atmosfera ao longo do trajeto da radiação eletromagnética, entre o Sol e a superfície e entre este e o sensor, ocasiona a perturbação das respostas espectrais dos objetos (Novo 2008). Com a exigência de que os valores espectrais se aproximem ao máximo dos valores reais em superfície, principalmente quando se trata do cálculo de índices minerais e vegetais, é necessária a correção atmosférica das imagens.

Para realizar a correção atmosférica das imagens, foi utilizada a técnica denominada Logarithmic Residuals (Green & Craig 1985), demonstrada pela equação 4.16. Esta técnica é destinada à remoção dos efeitos de irradiância solar, transmitância atmosférica, efeitos do albedo e da topografia nos dados de radiância (ENVI 2005). Este processo leva à criação de uma imagem em pseudo-reflectância.

$$LOGRESID = \left(\frac{Espec_{entrada}}{media_{espectral}} \right) / (media_{espacial}) \quad (4.16)$$

onde, a média espectral é a média de todas as bandas para cada pixel, e a média espacial é a média de todos os pixels para cada banda (ENVI 2005).

4.2.3 Processamento das imagens

Com base no conhecimento prévio do comportamento típico das áreas afetadas por microexsudações de hidrocarbonetos, foram realizados dois tipos principais de abordagem no processamento das imagens de sensoriamento remoto: detectar ocorrências de caulinita, óxidos de ferro no estado ferroso (Fe^{2+}) e anomalias geobotânicas locais (Schumacher 1996). Em ambos os casos, utilizou-se de suas respostas espectrais diagnósticas inseridas em nas respectivas bandas do ASTER (Tabela 4.3).

TABELA 4.3 – Bandas do sensor ASTER e suas respectivas feições espectrais de interesse.

Características espectrais (Bandas Aster)*		
	Absorção	Reflectância
Caulinita	1,5,6 e 9	4 e 7
Fe²⁺	1 e 4	3 e 8
Vegetação sadia	1 e 2	3

* Dados obtidos pela compilação de Drury (2001), Meneses & Ferreira-Júnior (2001), Crósta *et al.*(2003), Rowan & Mars (2003), Ninomiya (2004), Kalinowski & Oliver (2004) e análise das curvas espectrais por meio das bibliotecas espectrais da USGS (Clark *et al.* 1993).

Detecção de caulinita

Para a identificação de possíveis ocorrências de caulinita na superfície, foram realizados dois procedimentos: índices de bandas (Hewson *et al.* 2005) e a Técnica Crósta (Loughlin 1991), conforme sua adaptação para o sensor ASTER proposta por Crósta *et al.* (2003); esta última consiste na aplicação da análise por principais componentes (APC) orientada por características espectrais do materiais superficiais (Crósta & Moore 1989).

O objetivo principal da análise por principais componentes é sumarizar o conteúdo dos dados originais e eliminar as informações redundantes (Meneses & Ferreira-Júnior 2001). Seu procedimento se consiste na análise de seus auto-vetores, os quais representam o comprimento dos eixos das principais componentes (PC) de uma imagem e são medidos em unidades de variância e, dessa forma, a quantidade de informação de cada PC é fornecida pelo seu respectivo vetor (Crósta 1992). De acordo com este autor, o ruído das imagens fica concentrado nas últimas PC's, porém nelas também poderão estar as informações de interesse particular.

Crósta & Moore (1989) desenvolveram uma técnica baseada na APC, com o objetivo de estabelecer uma relação entre as respostas espectrais dos alvos e os valores numéricos extraídos da matriz de auto-vetores resultantes das PC's. Uma etapa adicional a este procedimento, realizada por Loughlin (1991) e denominado por ele de Técnica Crósta, consiste-se na aplicação da APC separadamente aos conjuntos de bandas, selecionados previamente, que contenham a informação espectral de interesse, evitando que outros materiais se envolvam nos cálculos estatísticos das PC's (Crósta *et al.* 2003).

Portanto, a aplicação da Técnica Crósta neste estudo para a detecção de caulinita foi realizada segundo os seguintes passos:

- aplicação da APC em cada um dos dois conjuntos de bandas selecionados, compostos pelas bandas espectrais ASTER diagnósticas da caulinita: 1,4,6,7; e 1,4,5,7.
- escolha das duas PC's que apresentaram os maiores contrastes entre auto-vetores nas bandas de absorção e reflexão da caulinita.
- aplicação novamente de uma APC para o conjunto formado pelas duas PC's selecionadas anteriormente, porém neste caso o que se procura é a resposta comum às duas PC's.

Deteção do íon Fe²⁺

O mapeamento de concentrações de ferro em estado ferroso (Fe²⁺) consistiu-se da utilização de razão de bandas e índices minerais com o objetivo de amplificar os contrastes espectrais desses compostos (Drury 2001). O índice mineral e a APC são similares no sentido de que ambos são transformadas ortogonais de um dado multiespectral, mas a diferença fundamental entre os dois é que o primeiro define os eixos transformados a partir de coeficiente pré-determinados para representar as características espectrais de interesse, enquanto o segundo determina os eixos transformados matematicamente para maximizar a variância do dados multiespectrais (Yamaguchi & Naito 2003).

Rowan & Mars (2003) indicam um índice para o realce de Fe²⁺, determinado pela equação 4.17, utilizado nesse estudo.

$$Fe^{2+} = \frac{ASTER1}{ASTER2} + \frac{ASTER5}{ASTER3} \quad (4.17)$$

Deteção de anomalias geobotânicas

A análise de possíveis alterações anômalas na vegetação, causadas pelas microexsudações, se concentrou na observação do NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index* (Rouse *et al.* 1974, Rowan & Mars 2003). Este índice, determinado pela equação 4.18, é caracterizado pelo mapeamento da concentração da biomassa fotossinteticamente ativa (Drury 2001), sendo possível distinguir variações na densidade da vegetação.

$$NDVI = \frac{(NIR - VIS_{vermelho})}{(NIR + VIS_{vermelho})} = \frac{(ASTER3 - ASTER2)}{(ASTER3 + ASTER2)} \quad (4.18)$$

A análise deste índice é otimizada quando as imagens apresentam uma correção atmosférica eficiente (Teillet 1997).

4.3 DADOS AUXILIARES À INTEGRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Além dos dados geofísicos e de sensoriamento remoto, foram utilizados dados de geologia e de geoquímica de superfície. Ambos foram submetidos a manipulações em ambiente de sistema de informação geográfica- SIG.

Carta Geológica

O dado geológico utilizado se consiste de uma carta geológica, Santa Fé de Minas - SE.23-V-B-VI (Ribeiro 2003), na escala 1:100.000, executado pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM - e disponibilizada, em formato analógico não-georreferenciado (arquivo.pdf), pela Companhia Mineradora de Minas Gerais (CODEMIG). Para que fosse possível sua utilização em ambiente SIG, o mapa foi georreferenciado e vetorizado através do software ARCGIS 9.3. Através deste procedimento, foi possível realizar a separação dos dados radiométricos em função de suas respectivas unidades litológicas durante a etapa de processamento, como também realizar a integração das informações geológicas com os demais dados para fins interpretativos.

O mapa está exposto em capítulo anterior, referente a geologia da área de estudo (Capítulo 2).

Gasometria

Técnicos da Petrobrás conduziram uma campanha geoquímica de superfície, no ano de 1987, com o objetivo de identificar concentrações de hidrocarbonetos leves, como metano, etano, propano, pentano e hexano (HCs:C1-C6). Foram coletadas 566 amostras de solo em uma profundidade de 1m e a distribuição da amostragem foi controlada pelas vias de acesso, como as estradas de terra entre as plantações de eucalipto presentes na área de estudo. Em trabalho realizado por Oliveira (1998) na região do Remanso do Fogo, o autor apresentou estes dados em forma de curvas de iso-concentração, que inicia sua configuração espacial a partir de uma primeira curva representada pelo valor médio de um dos componentes gasosos (ex.: metano), seguida de curvas acrescidas de 0,5; 1; 1,5; 2; e 2,5 desvio-padrão, sucessivamente. Este procedimento foi realizado para os dados de metano, etano e hidrocarbonetos mais pesados que etano. Para o presente trabalho, foram obtidas as curvas para etano e hidrocarbonetos mais pesados que etano, através do trabalho de Oliveira (1998), as quais foram utilizadas para fins de validação.

4.4 ANÁLISE ESPACIAL DOS DADOS UTILIZANDO LÓGICA *FUZZY*

A seleção de locais de interesse prospectivo pode ser definida por um conjunto de critérios de peso, criando uma escala de favorabilidade (Bonham-Carter 1994). De acordo com este autor, a determinação dos pesos pode ser efetuada através de dois tipos de modelo: “guiado pelos dados” ou “guiado pelo conhecimento”. Como exemplo do segundo tipo, a lógica *fuzzy* (Zadeh 1965), ou lógica nebulosa, foi utilizada neste estudo e apresenta-se como um classificador não-supervisionado.

Na teoria clássica, a pertinência de um conjunto é definida por falso ou verdadeiro, 0 ou 1. No caso do conjunto *Fuzzy*, ela é expressa por um escala contínua entre 0 e 1 (Função de pertinência), ou seja, os resultados podem estar inseridos em um conjunto de “meio-termos”. O procedimento de disposição dos dados de entrada em uma escala de valores de pertinência *Fuzzy*, 0 a 1, é denominado fuzificação (Tsoukalas & Uhrig 1997). Após a obtenção dos valores de pertinência, é possível combiná-los através de operadores, como: fuzzy AND, fuzzy OR e fuzzy gamma (An *et al.* 1991).

Este estudo utilizou a lógica *fuzzy* com o objetivo de cruzar os resultados obtidos, contextualizados às respostas superficiais, como o K residual, o DRAD, a amplitude do sinal analítico de ordem 1, o NDVI e as imagens relativas às concentrações de caulinita e Fe^{2+} , e assim obter áreas favoráveis à presença de microexsudações.

Porém, devido aos testes realizados, optou-se pela aplicação deste procedimento somente aos dados geofísicos, que apresentaram resultados mais restritos e compatíveis com os elementos de validação. Os resultados do sensoriamento remoto foram posteriormente integrados às áreas de interesse apontadas pela lógica *fuzzy*.

Segundo o procedimento adotado, através do aplicativo ARC-SDM, inserido no pacote do software ARCGIS 9.3 (Sawatzky *et al.* 2004), dados de entrada devem ser imagens (*grids*), no formato GRD (ESRI 2008). Assim, como os resultados radiométricos não havia sido interpolados para análise, foi necessário interpolá-los, utilizando o algoritmo de curvatura mínima (Briggs 1974), com tamanho de célula de 125m. Porém, previamente ao início da fuzificação, os dados foram reclassificados, de forma a otimizar a análise.

Segundo o modelo utilizado neste estudo, guiado pelo conhecimento, as assinaturas geofísicas de interesse em áreas de microexsudações são os altos

magnéticos, baixos valores de K residual e valores positivos do DRAD, o que condicionou a utilização das funções de pertinência *MSLarge* e *Small*. A função *MSLarge* calcula a pertinência *fuzzy* baseada na média e desvio padrão do dado de entrada, onde os valores maiores serão desejados a ter pertinência próxima a 1 (Sawatzky *et al.* 2004). Enquanto que, a função *Small* calcula a pertinência *fuzzy* para os pequenos valores do conjunto de interesse. O comportamento dessas funções em relação a pertinência e os valores de entrada pode ser observado na figura 4.5. A metodologia definida para este estudo está demonstrada no fluxograma da figura 4.6.

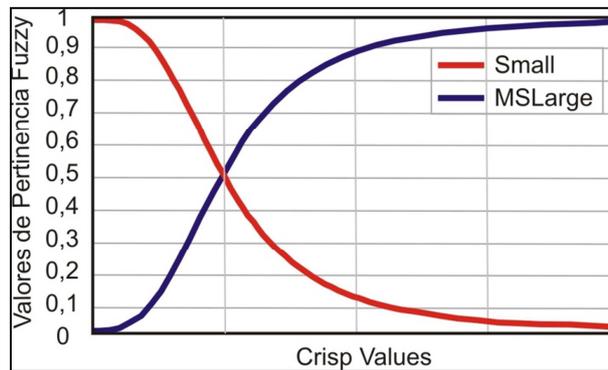


FIGURA 4.5 – Figura esquemática, exemplificando o comportamento entre os dados de entrada (*Crisp Values*) e os valores de pertinência *fuzzy* para cada função definida para este estudo. (Ilustração modificada de Sawatzky *et al.* 2004).

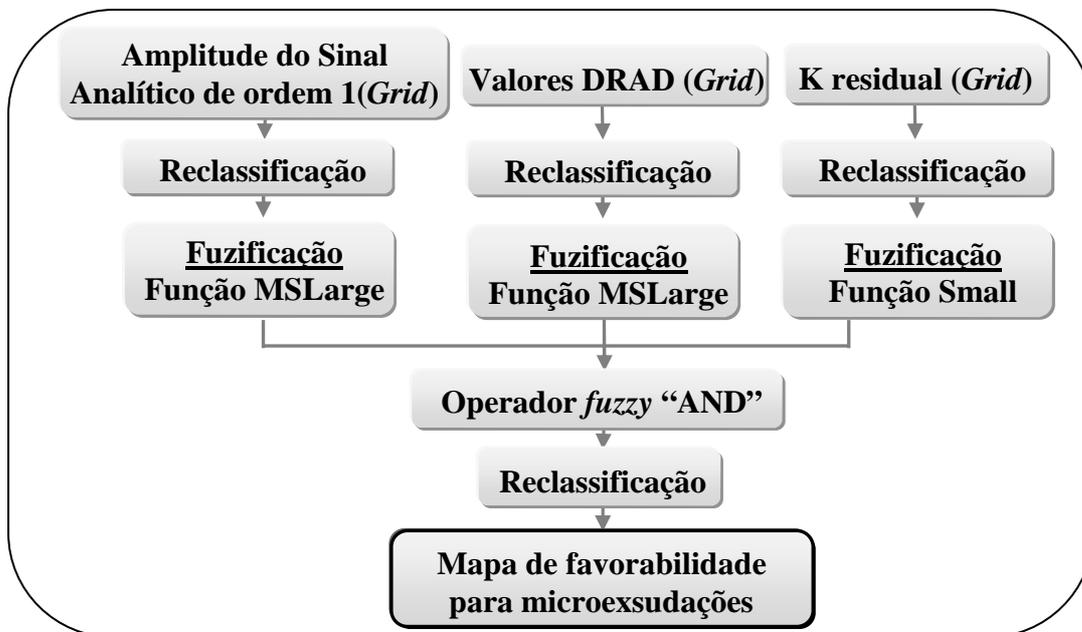


FIGURA 4.6 – Fluxograma indicando as etapas da aplicação da lógica *fuzzy* para a detecção de microexsudações na região do Remanso do Fogo.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DE MICROEXSUDAÇÕES ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO DE DADOS MULTIFONTE

O entendimento dos efeitos que hidrocarbonetos gasosos causam durante seu trajeto até a superfície permitiu a seleção de atributos que indicam a presença de microexsudações e que podem ser detectados pela aerogeofísica e o sensoriamento remoto, utilizados neste estudo. A figura 5.1 exemplifica uma bacia sedimentar em perfil, onde podem ser observados os campos de investigação dos métodos utilizados, o que auxiliou na condução das análises interpretativas.

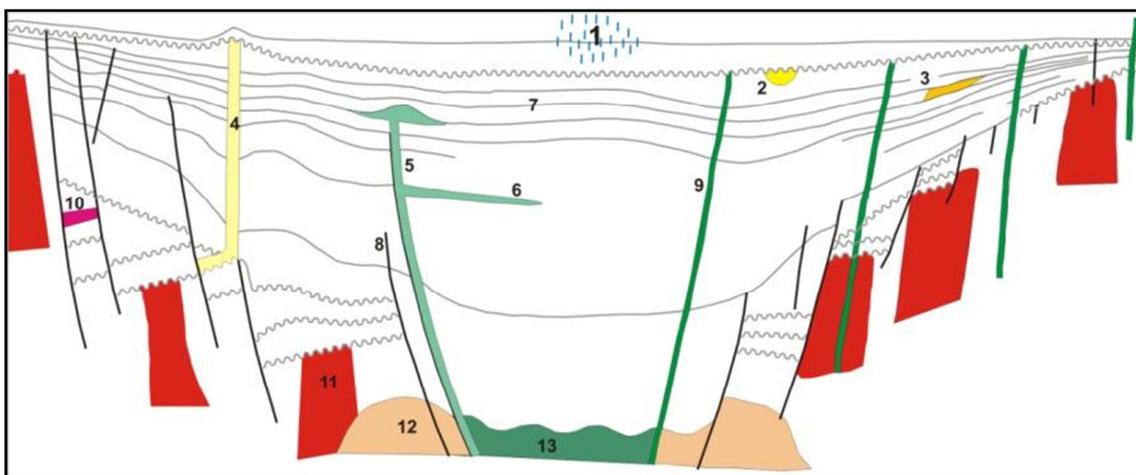


FIGURA 5.1 – Figura esquemática exemplificando o perfil de uma bacia sedimentar (Adaptado de Gunn 1997c), onde é possível observar os campos de investigação desse estudo. Alguns dos possíveis componentes de uma bacia e que podem ser detectados por métodos indiretos, enumerados da seguinte forma: 1- Microexsudações; 2,3- Minerais magnéticos precipitados em paleocanais e barreiras litorâneas; 4- Diápiro salino; 5- Vulcão soterrado; 6-Sill ígneo; 7,8- Estruturas sedimentares; 9 – Diques ígneos; 10- Depósitos magnéticos de sulfetos de Au-Cu-Ag-Pb-Zn maciço; 11- Corpos magnéticos do embasamento; 12- Intrusão crustal intra-bacinal; 13- Crosta oceânica.

A geração e interpretação dos produtos geofísicos tiveram como base três vertentes analíticas: (i) a identificação de possíveis microexsudações em superfície; (ii) o realce de feições magnéticas rasas e sua relação com estas microexsudações; e (iii) a observação de estruturas intra-sedimentares, ou seja, aquelas posicionadas entre o embasamento e a superfície, e que poderiam estar conectadas com a evolução geológica dos hidrocarbonetos, principalmente no que se refere a migração dos gases.

5.1 ANOMALIAS GAMAESPECTROMÉTRICAS

O estudo prévio das concentrações médias de K, Th e U na área de estudo foi essencial na definição da metodologia aplicada. Wilford *et al.* (1997) e Dickson & Scott (1997), em estudo realizado em diferentes regiões da Austrália, encontraram valores desses três radioelementos associados a unidades geológicas que apresentavam intemperismo em diferentes estágios (Tabela 5.1). Esses valores foram comparados com aqueles encontrados nos resultados gamaespectrométricos referentes a cada litologia da área do Remanso do Fogo.

TABELA 5.1 - Comparação entre as médias das concentrações dos três radioelementos em unidades sedimentares de diferentes regiões, porém sob condições intempéricas similares (1: Wilford *et al.* 1997; 2: Dickson & Scott 1997; 3: Área de estudo- Remanso do Fogo).

Fontes:	K (%)	eTh (ppm)	eU (ppm)
Areia em canais de rio (1)	4,83	14	2,0
Aluviões – areia e argila (1)	2,93	19	3,5
Areia de antigos terraços aluvionares (1)	0,46	16	5,5
Arenitos (Rocha/Solo) (2)	1,8/1,3	12/11	2,3/2,1
Carbonatos (Rocha) (2)	0,2	1,4	1,6
QHa – Aluviões (3)	1,39	9,25	0,98
QHi – Terraços aluvionares (3)	0,13	4,47	2,15
QPHi – Coberturas Elúvio-Coluviais (3)	0,49	5,46	0,22
Kai - Arenitos (3)	1,46	8,0	0,98
NPbb1 – Arenitos arcoseanos (3)	2,09	12,72	1,46
NPbb2 – Siltitos associados a arenitos arcoseanos (3)	1,50	9,74	1,06
NPbc1 – Calcarenitos com siltitos e arenitos subordinados (3)	2,10	11,56	1,27
NPbc3 – Siltitos com arenitos, argilitos e carbonatos (3)	2,64	12,05	1,52
Área total (3)	0,75	6,84	0,68

A tabela 5.1 apresenta uma boa correspondência entre os valores encontrados nas unidades litológicas da região do Remanso do Fogo e aqueles relacionados aos estudos citados. Portanto, ocorre um forte controle geológico no comportamento do K, eU e eTh, também demonstrado pela imagem de eTh, caracterizado por mapear litologias devido a pouco mobilidade (Figura 5.2). É possível observar na imagem de eTh que algumas regiões que apresentam respostas distintas não são diferenciadas no mapa geológico e podem estar indicando variações litológicas ainda não mapeadas, como por exemplo, na unidade QPHi (Ribeiro 2003).

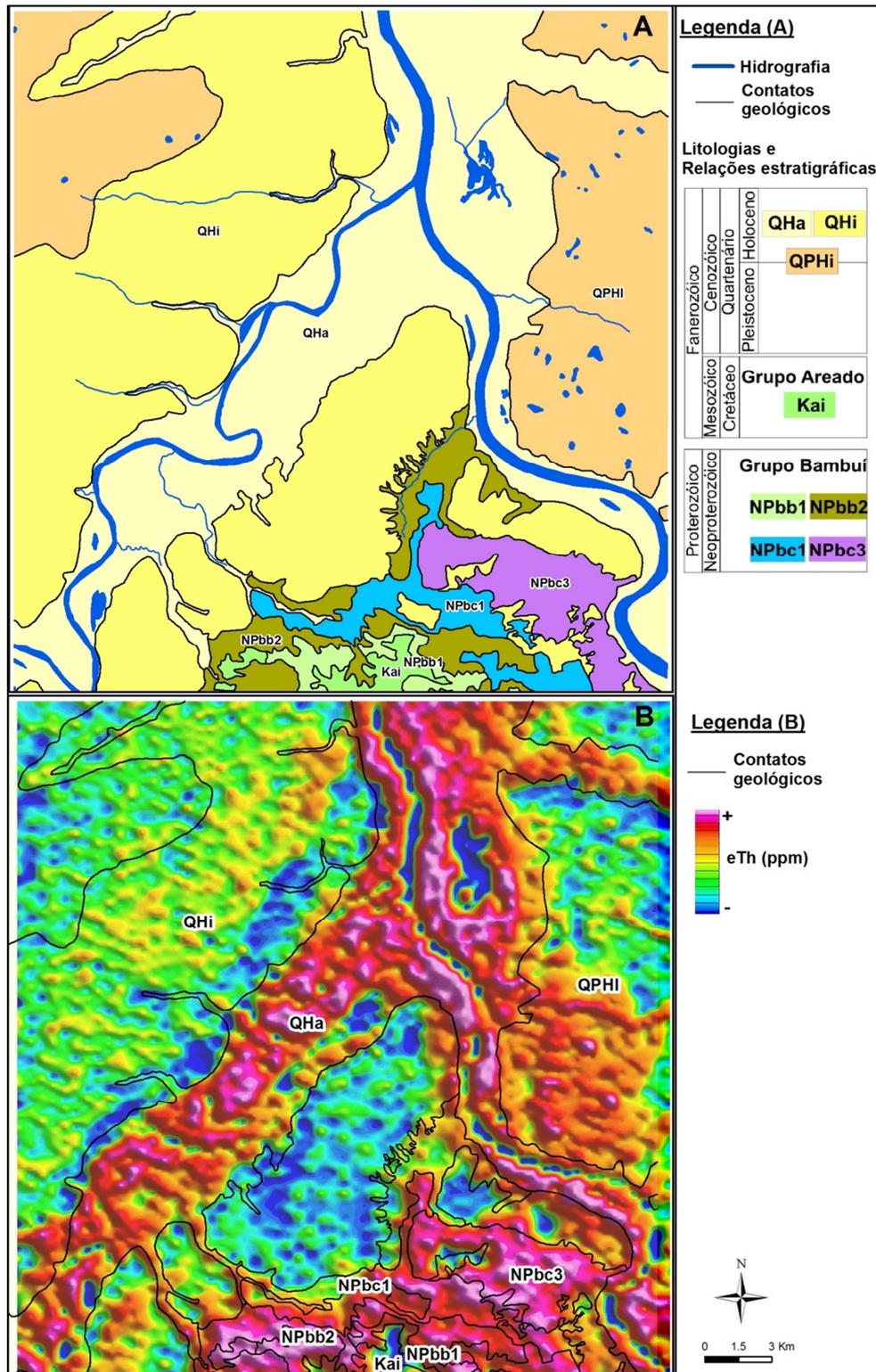


Figura 5.2 – A: Mapa geológico da área de estudo (Ribeiro 2003): NPbc3 - siltitos com arenitos, argilitos e carbonatos subordinados; NPbc1 - calcarenitos com siltitos e arenitos subordinados; NPbb2 - siltitos associados a arenitos arcoseanos; NPbb1 - arenitos arcoseanos; Kai – arenitos friáveis, com níveis de arenito calcítico e conglomerados; QPHi – coberturas elúvio-colúviais; QHi – terraços aluviais; e QHa – aluviões. **B:** imagem da concentração de eTh (ppm), considerado por ser o representante litológico ideal entre os radioelementos (Pires 1995). A comparação entre a geologia e a imagem de eTh demonstra forte correlação.

O *background* dos três radioelementos na área de estudo é significativamente baixo, o que resulta na presença de valores negativos, associados à margem de erro atribuída à calibração do espectromêtro. Estes valores, apesar de serem fisicamente impossíveis, não foram retirados dos dados com o intuito de evitar desvios na estatística. Apesar das baixas concentrações, algumas unidades geológicas apresentam contrastes mais acentuados em relação à média total e, considerando que um dos objetivos deste estudo foi o de detectar minuciosas variações nas concentrações de K e eU, a aplicação da técnica de normalização pelo eTh (Saunders *et al.* 1987) aos dados radiométricos, separados segundo suas respectivas unidades litológicas, foi essencial na obtenção de resultados satisfatórios.

As análises de regressão, realizadas através do software SPSS 13.0, foram aplicadas para as relações entre eTh vs K e eTh vs eU. Observa-se que a dispersão dos dados apresentada nas análises de regressão para cada litologia é mais acentuada em relação àquela apresentada na análise de regressão antes da separação dos dados. Isso proporciona a maior evidência dos valores anômalos para uma determinada litologia da área de estudo (Figura 5.3). Os demais gráficos de regressão serão apresentados nos anexos 1 e 2 deste trabalho.

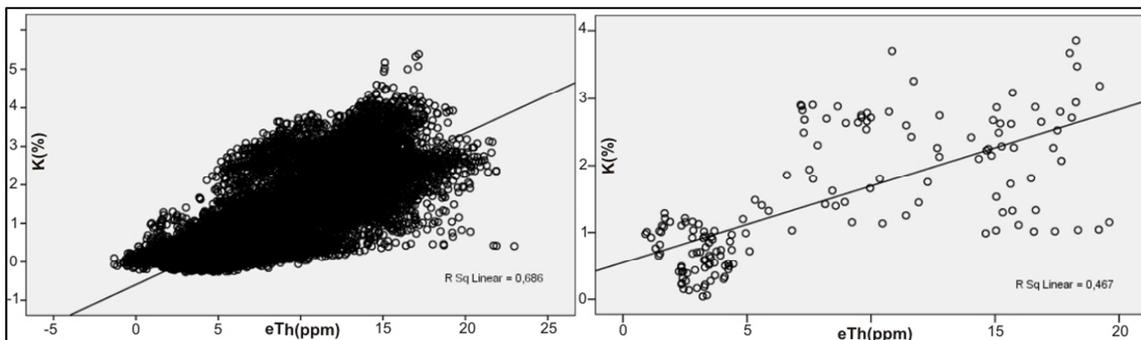


FIGURA 5.3 – Comparação entre as dispersões dos dados nas seguintes situações: **A:** Regressão linear do K vs Th para toda área de estudo. **B:** Regressão linear do K vs Th para a litologia Kai – arenitos friáveis, com níveis de arenito calcítico e conglomerados (Exemplo).

Após esse processo, os valores residuais foram calculados para a definição das anomalias de interesse (Tabela 5.2).

TABELA 5.2 – Equações resultantes da análise de regressão para as relações eTh vs K e eTh vs eU, que definiram os valores de concentração ideal de K e eU para cada litologia da área de estudo, possibilitando o cálculo dos valores residuais e do valor DRAD.

Litologias	Variáveis	Valores Ideais	Valores residuais = (Valores originais) – (Valores ideais) DRAD = Uresidual - Kresidual
Qha	eTh vs K	$K_{ideal} = -0,014 + 0,153eTh$	
	eTh vs eU	$U_{ideal} = -0,064 + 0,114eTh$	
QHi	eTh vs K	$K_{ideal} = -0,407 + 0,121eTh$	
	eTh vs eU	$U_{ideal} = -0,093 + 0,103eTh$	
QPHi	eTh vs K	$K_{ideal} = -0,217 + 0,081eTh$	
	eTh vs eU	$U_{ideal} = -0,098 + 0,110eTh$	
Kai	eTh vs K	$K_{ideal} = 0,564 + 0,115eTh$	
	eTh vs eU	$U_{ideal} = 0,256 + 0,090eTh$	
NPbb1	eTh vs K	$K_{ideal} = 1,219 + 0,068eTh$	
	eTh vs eU	$U_{ideal} = 0,307 + 0,090eTh$	
NPbb2	eTh vs K	$K_{ideal} = -0,729 + 0,229eTh$	
	eTh vs eU	$U_{ideal} = 0,056 + 0,103eTh$	
NPbc1	eTh vs K	$K_{ideal} = -0,353 + 0,212eTh$	
	eTh vs eU	$U_{ideal} = 0,066 + 0,105eTh$	
NPbc3	eTh vs K	$K_{ideal} = -0,815 + 0,287eTh$	
	eTh vs eU	$U_{ideal} = 0,473 + 0,087eTh$	

5.1.1 Anomalias de potássio

De acordo com o modelo proposto por Saunders *et al.* (1993), as microexsudações são marcadas por apresentar empobrecimento em K. Portanto, as anomalias de K neste estudo foram configuradas a partir dos menores valores de K residual. Estes valores foram definidos com base na análise da estatística descritiva e do histograma de distribuição dos dados (Tabela 5.3 e Figura 5.4). Foi utilizada a classificação dos dados segundo quebras naturais (otimização de Jenks; Jenks 1967), onde as classes são definidas em agrupamentos naturais inerentes aos dados. São identificados pontos de quebra entre conjuntos que agrupam os valores mais semelhantes entre si e maximizam as diferenças entre estes conjuntos. O classificador foi aplicado apenas aos valores menores que 0, que totalizam 54,28% dos dados. Os valores anômalos de interesse, indicativos de empobrecimento em K na área de estudo, estão contidos na classe 1, de um conjunto de 7 classes, compreendendo o intervalo de -1,22 a -2,21 de K residual(%), que totaliza 0,68% dos dados (Figura 5.4).

TABELA 5.3 – Estatística descritiva da concentração do K original e K residual.

Estatística Descritiva	Koriginal (%)	Kresidual (%)
Máximo	5,38	2,69
Mínimo	-0,28	-2,21
Média	0,75	-0,0014
Desvio-Padrão	1,00	0,45

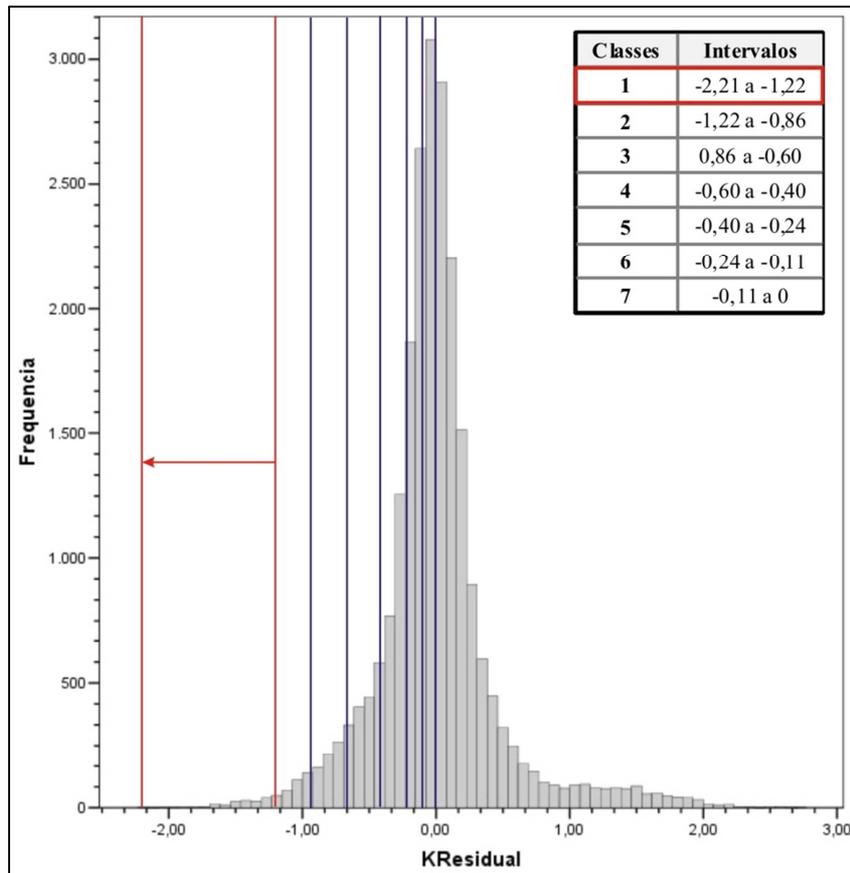


FIGURA 5.4 – Histograma do K residual e a disposição das classes, em linhas azuis, determinadas pela classificação por quebras naturais (otimização de jenkins; Jenks 1967). A classe destacada em vermelho representa o intervalo de interesse para a área de estudo, composto por valores anômalos de K residual, que indicam o empobrecimento deste elemento.

Estes valores anômalos são representados em mapa (Figura 5.5), dispondo áreas caracterizadas por apresentar empobrecimento em K, resultantes de possíveis efeitos da ação de hidrocarbonetos.

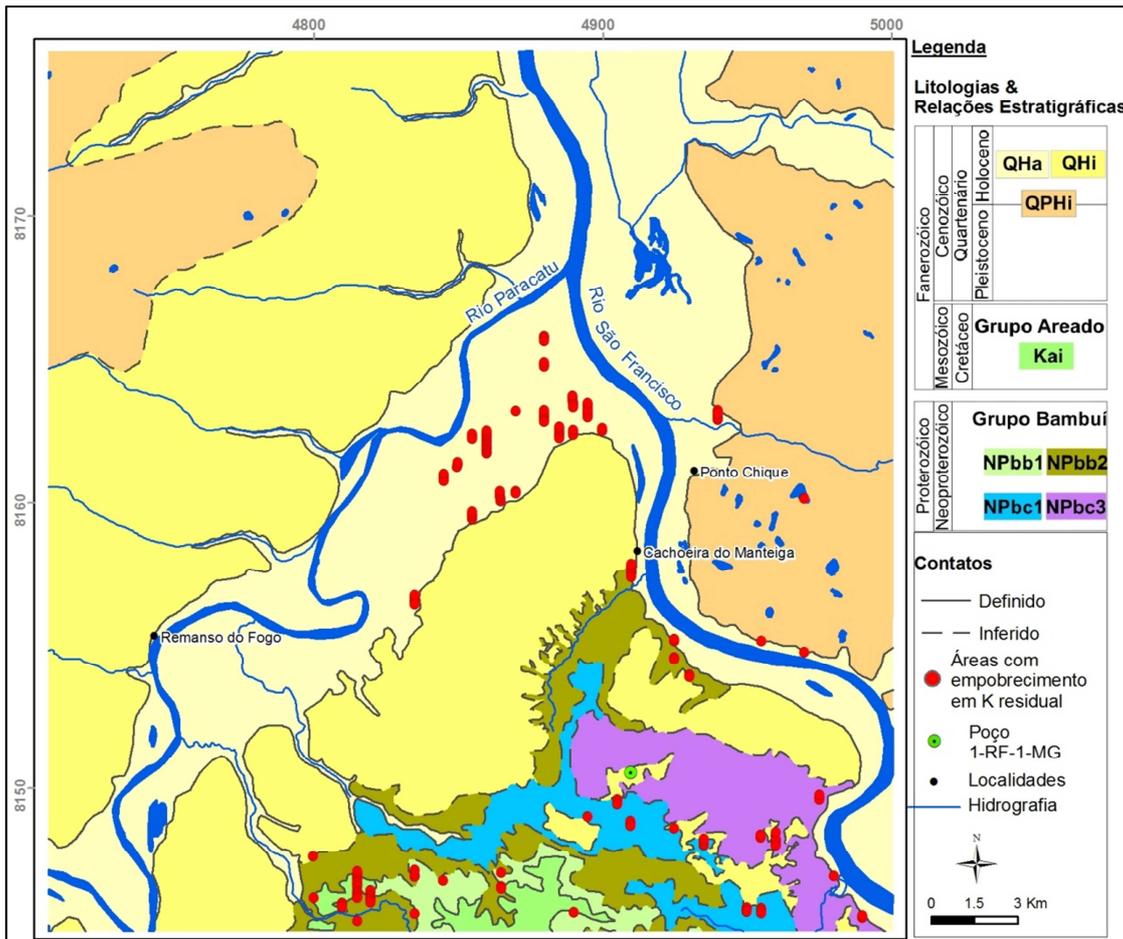


FIGURA 5.5 – Mapa com as áreas caracterizadas por empobrecimento em K, marcadas com os pontos em vermelho, sobreposta ao mapa geológico da região de estudo. NPbc3 - siltitos com arenitos, argilitos e carbonatos subordinados; NPbc1 - calcarenitos com siltitos e arenitos subordinados; NPbb2 - siltitos associados a arenitos arcoseanos; NPbb1 - arenitos arcoseanos; Kai – arenitos friáveis, com níveis de arenito calcítico e conglomerados; QPHi – coberturas elúvio-colúviais; QHi – terraços aluviais; e QHa – aluviões.

5.1.2 Comportamento do urânio residual e do DRAD (eUresidual – Kresidual)

De acordo com o modelo proposto por Saunders *et al.* (1993), as microexsudações são marcadas por apresentar uma diminuição na concentração de U, porém não de forma tão acentuada como ocorre com o K. O urânio possui um comportamento complexo, onde ele pode ser lixiviado das zonas oxidantes e se reprecipitar nas zonas redutoras (IAEA 2003). Além disso, a aquisição do eU é mais propícia a influência de ruídos, como a presença de radônio no solo e na atmosfera (Dickson & Scott 1997). Dessa forma, a investigação de possíveis anomalias isoladas de urânio não confere confiabilidade para este estudo. Porém, foi utilizado o DRAD (Saunders *et al.* 1993), o qual permite a análise da variação de eU residual

proporcionalmente à variação de K residual, onde os anomalias serão correspondentes aos maiores valores DRAD.

O procedimento adotado para a definição dos valores DRAD foi semelhante ao utilizado para o K. Foram definidas 5 classes, a partir somente dos valores DRAD maiores que zero, que totalizam 50,79% dos dados. Os valores anômalos de interesse, estão contidos na classe 5, compreendendo o intervalo de 1,36 a 3,10 do DRAD , que totaliza 1,53% dos dados (Figura 5.6).

Estes valores anômalos são representados em mapa (Figura 5.7), dispendo áreas caracterizadas por apresentar enriquecimento de U, proporcionalmente ao K, resultante de possíveis efeitos da ação de hidrocarbonetos. Ocorre uma correspondência espacial significativamente positiva entre estas anomalias e aquelas apresentadas pelo K residual (Figura 5.5).

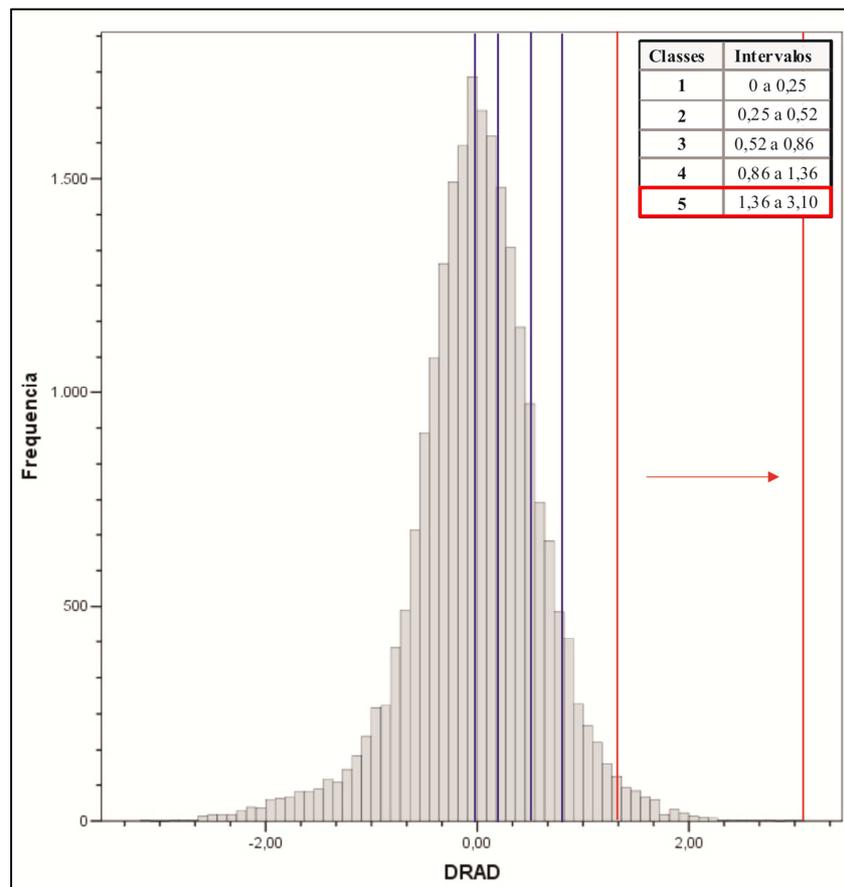


FIGURA 5.6 – Histograma dos valores DRAD e a disposição das classes, em linhas azuis, determinadas pela classificação por quebras naturais (otimização de Jenks; Jenks 1967). A classe destacada em vermelho representa o intervalo de interesse para a área de estudo, composto por valores anômalos de DRAD que indica variação positiva de U residual em relação ao K residual.

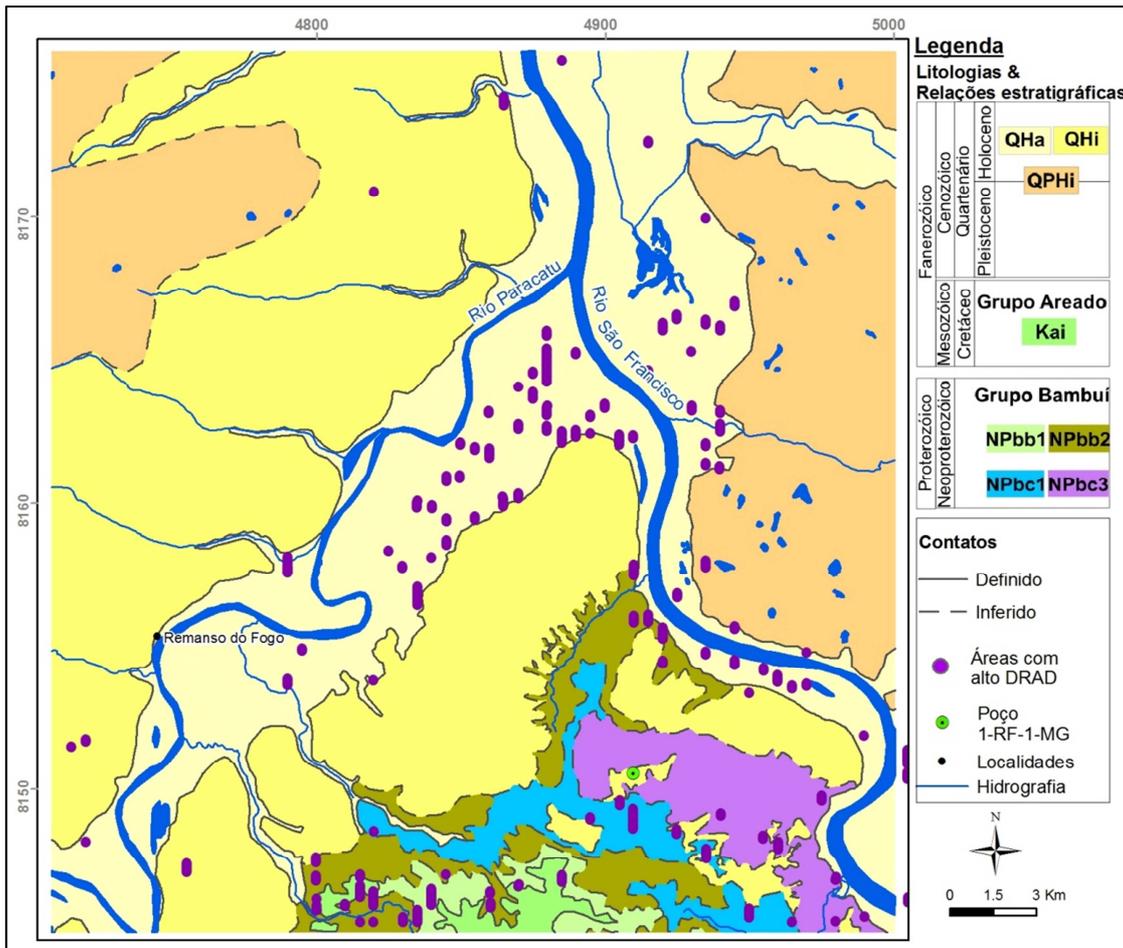


FIGURA 5.7 – Mapa com as áreas caracterizadas por alto DRAD, marcadas com os pontos em roxo, sobreposta ao mapa geológico da região de estudo. NPbc3 - siltitos com arenitos, argilitos e carbonatos subordinados; NPbc1 - calcarenitos com siltitos e arenitos subordinados; NPbb2 - siltitos associados a arenitos arcoseanos; NPbb1 - arenitos arcoseanos; Kai – arenitos friáveis, com níveis de arenito calcítico e conglomerados; QPHi – coberturas elúvio-coluviais; QHi – terraços aluviais; e QHa – aluviões.

Tanto as anomalias marcadas por empobrecimento em K, quanto aquelas caracterizadas por altos valores DRAD, estão fortemente correlacionadas com a distribuição das curvas de iso-concentração de hidrocarbonetos entre etano e pentano. A amostragem geoquímica não possui regularidade espacial, restringindo-se a estradas de terra e acessos às plantações de eucalipto. Já a amostragem do aerolevante geofísico é uniforme, demonstrando que a relação espacial entre os pontos amostrados é mais consistente do que aquela apresentada na geoquímica. Portanto, as anomalias radiométricas, encontradas neste estudo, que estão localizadas em áreas pobremente amostradas pela geoquímica, podem estar indicando novas ocorrências de microexsudações ou, até mesmo, provendo localizações mais precisas do que aquelas indicadas pelas curvas de iso-concentração (Figura 5.8).

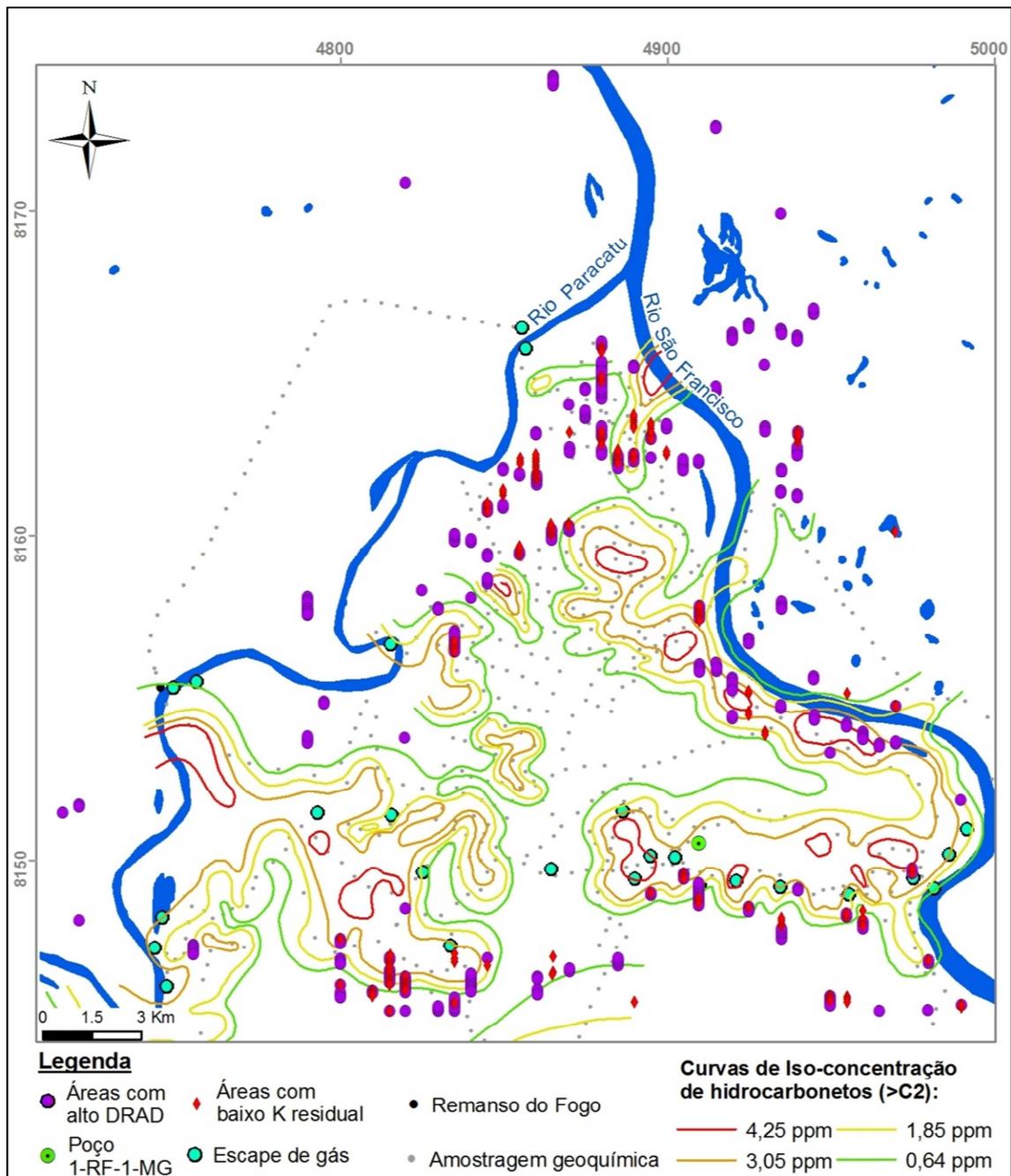


FIGURA 5.8 – Mapa de anomalias radiométricas, caracterizadas pelos baixos valores de K residual e alto DRAD, marcadas com símbolos em vermelho e roxo, respectivamente. Estão expostas as curvas de iso-concentração de hidrocarbonetos entre etano e pentano, validando a maior parte dos resultados gamaespectrométricos. Os pontos verdes são as ocorrências registradas de gás em rios, lagos e poços d’água, que também apresentam forte correlação com as anomalias radiométricas. Na distribuição da amostragem geoquímica, que está representada por pontos cinzas, podem ser observadas algumas áreas pobremente amostradas e que contêm relevantes concentrações de anomalias radiométricas.

5.2 ANOMALIAS MAGNÉTICAS

Este trabalho propõe a avaliação das respostas magnéticas provenientes de duas fontes distintas: as ocorrências de possíveis anomalias micro-magnéticas, causadas por minerais magnéticos diagenéticos normalmente presentes em áreas afetadas por microexsudações, bem como de estruturas intra-sedimentares próximas a superfície e ao longo da coluna sedimentar da bacia.

Devido à necessidade de se distinguir os principais conjuntos de respostas magnéticas, segundo suas respectivas profundidades, foram realizados a análise do espectro de potência e a separação dos principais intervalos.

5.2.1 Resolução espacial dos dados

Previamente à análise do espectro de potência, determinou-se a frequência de Nyquist (f_N), a qual representa o limite entre o ruído e os sinais magnéticos consistentes, segundo o teorema da amostragem (Davis 1986). O seu comprimento de onda (λ) pode ser calculado como: 2 vezes o espaçamento das linhas de voo, que resulta no valor de 1km. O número de onda também será 1Km^{-1} , visto que o mesmo é o inverso de λ . Ou seja, as anomalias com dimensão lateral menor que 1Km não são consideradas confiáveis para interpretação.

O espectro de potência foi gerado através do software Oasis Montaj 7.1 (GEOSOFT) e é apresentado pelo gráfico da média radial da potência vs número de onda (Figura 5.9). Foi possível a distinção de 3 componentes principais, determinados através das inclinações mais evidentes do espectro de energia, são eles: regional, residual e ruído. O gráfico permitiu a estimativa aproximada das três faixas de profundidades médias, as quais são, respectivamente: 2,25Km; 1,25Km; e 250m.

Assim, considerando os dados do poço exploratório 1-RF-1-MG, localizado na área de estudo, o qual apresentou profundidade de 1848m, e junto ao resultado da interpretação do espectro de potência, os dados de magnetometria possibilitaram resolução espacial suficiente para distinguir assinaturas magnéticas relacionadas à, pelo menos, três intervalos principais ao longo da bacia e que podem conter: (i) anomalias micro-magnéticas e feições geológicas rasas, (ii) estruturas intra-sedimentares e (iii) fontes provenientes do embasamento.

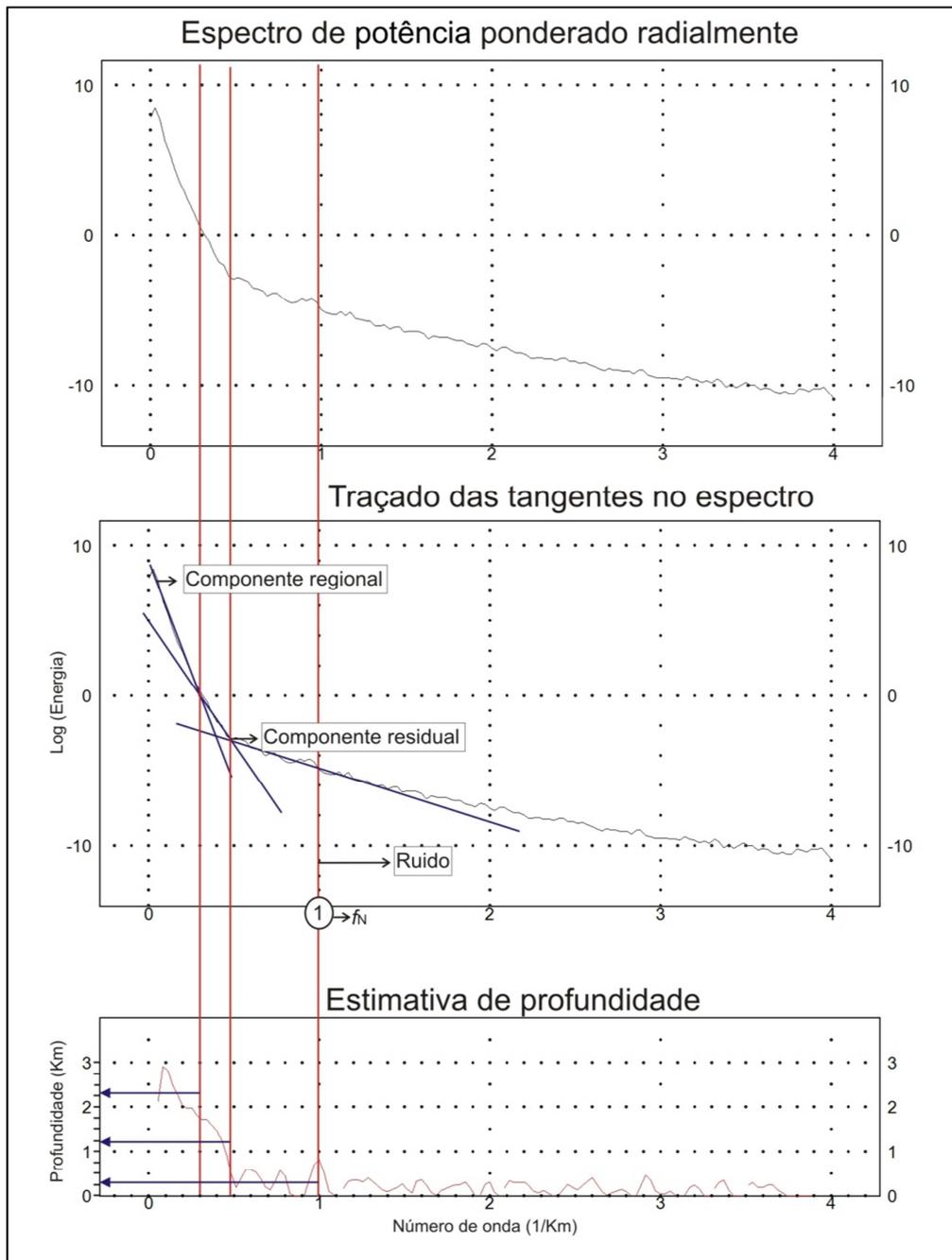


FIGURA 5.9 – Espectro de potência ponderado radialmente para o campo magnético anômalo. Os componentes regional, residual e do ruído podem ser observados. As principais faixas de profundidades são, aproximadamente: 2,25Km; 1,25Km; e 250m.

5.2.2 Amplitude do sinal analítico de ordem 1

A partir das segundas derivadas horizontais (Dx e Dy) e vertical (Dz), foi produzida a amplitude do sinal analítico de ordem 1, na qual se objetivou a detecção de estruturas geológicas rasas e possíveis acumulações de magnetitas diagenéticas associadas. Para realçar os valores mais altos, a imagem foi gerada com sombreado e distribuição de cor normalizada (Figura 5.10).

A imagem da amplitude do sinal analítico de ordem 1 se caracteriza pela predominância de lineamentos magnéticos rasos, com direção N70-75W e aproximadamente EW. Dessa forma, este produto realçou as assinaturas magnéticas inseridas no primeiro intervalo de profundidades, determinada na interpretação do espectro de potência: 250m. A baixa profundidade deste conjunto de lineamentos também é evidenciada por sua forte correspondência com alguns trechos do rio São Francisco, na direção N75W, e Paracatu, na direção EW, estabelecendo um aparente controle direto com o fluxo destes rios.

Estes lineamentos estão concentrados na porção leste e sul da área, dentro do “domínio” do rio São Francisco, possibilitando a seguinte interpretação: nestas porções a espessura de sedimentos é menor devido à presença de um alto estrutural, que resulta no afloramento de unidades sedimentares do Grupo Bambuí a SE da área de estudo, e que está limitado a oeste pelo rio Paracatu. Esta feição estrutural é denominada de Alto do Remanso, a qual está posicionada abaixo do poço exploratório 1-RF-1-MG, e foi determinada por meio de interpretações sísmicas, segundo Oliveira (1998) e Hercos *et al.* (2008).

O posicionamento de anomalias micro-magnéticas pode estar condicionada aos lineamentos magnéticos encontrados na amplitude do sinal analítico de ordem 1, os quais são relacionados a estruturas geológicas. Assim, a resolução dos dados não permitiu a separação e a interpretação de diferentes fontes magnéticas neste intervalo de profundidade e, portanto, as assinaturas rasas mais expressivas deste produto são consideradas como estruturas tectônicas que podem ou não estar potencialmente realçadas por acumulações de minerais magnéticos diagenéticos, provenientes da ação dos hidrocarbonetos.

Com os resultados radiométricos, validados pelas curvas de iso-concentração de hidrocarbonetos, foi possível correlacioná-los, de forma consistente, com a imagem da amplitude do sinal analítico de ordem 1 (Figura 5.10), pois ambos representam assinaturas geofísicas rasas e que podem estar associados à mesma fonte. Dessa forma,

os lineamentos magnéticos podem ser interpretados como estruturas tectônicas extensionais, as quais representam possíveis condutos para a passagem dos hidrocarbonetos até a superfície e permitindo sua expressão através das anomalias radiométricas.

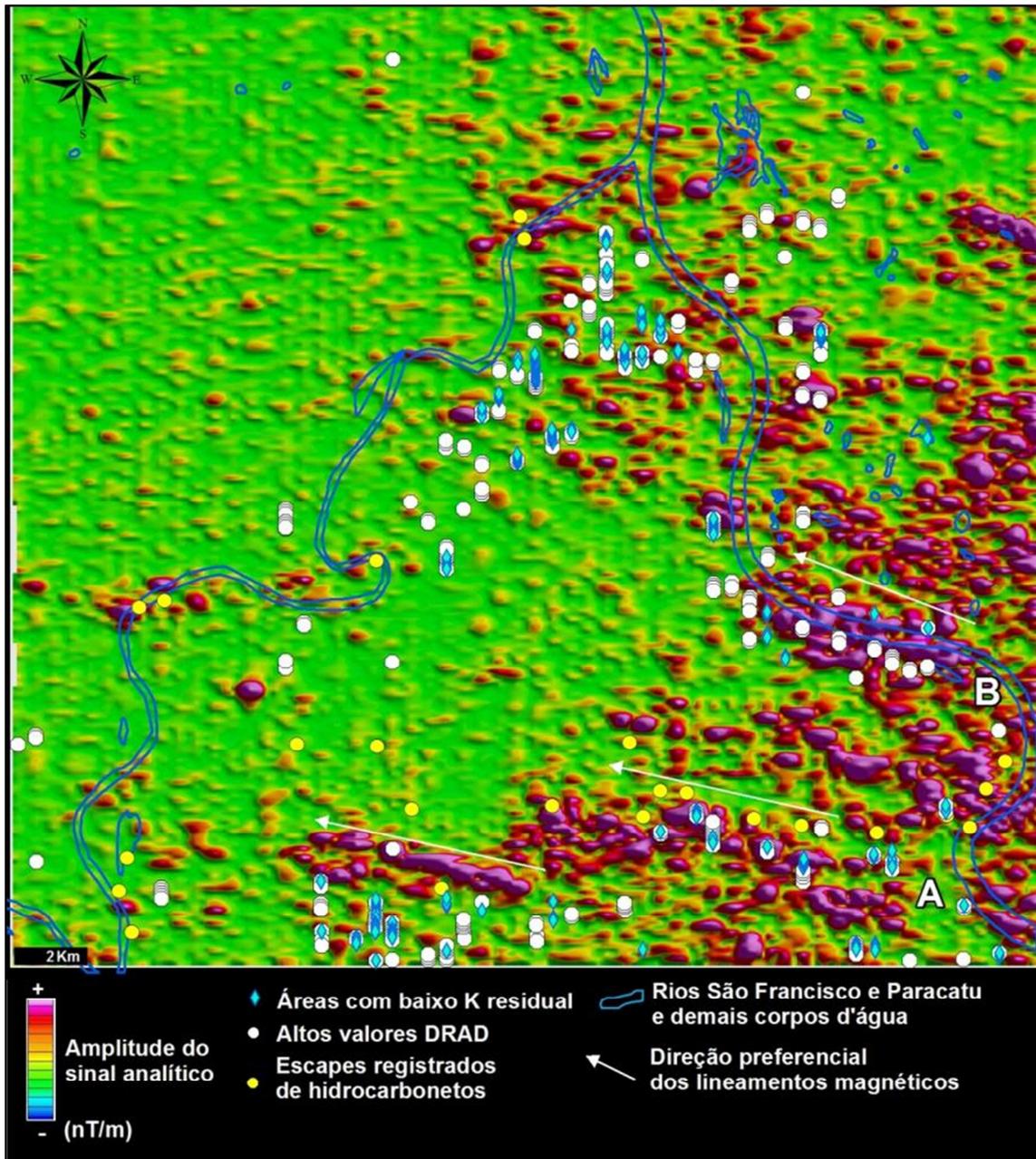


FIGURA 5.10 – Imagem da amplitude do sinal analítico de ordem 1. Sobreposta à imagem, estão apontadas as áreas caracterizadas por baixo K residual, alto DRAD e as ocorrências registradas de hidrocarbonetos em superfície. Todos estes elementos apresentam correlação significativamente positiva. As setas em branco mostram a direção preferencial dos lineamentos magnéticos, N75W. À leste, o rio São Francisco expõe relação direta com a mudança na direção exposta pelos lineamentos magnéticos.

5.2.3 Gradiente horizontal da subtração de continuações ascendentes

Com o intuito de investigar o comportamento estrutural da bacia ao longo de sua coluna sedimentar e complementar a interpretação obtida na amplitude do sinal analítico de ordem 1, foram observados os gradientes horizontais de diferentes valores de continuações ascendentes do campo magnético anômalo.

Um dos parâmetros observados nos diversos gradientes horizontais foi a continuidade das assinaturas magnéticas entre estes produtos. Observou-se que a continuação ascendente de 400m fornece assinaturas magnéticas de alta a média frequência, sem presença de ruídos, porém com certa influência de fontes magnéticas profundas, como o embasamento. Enquanto que na continuação ascendente de 1200m, predomina basicamente as fontes magnéticas mais profundas (Figura 5.11A). Com isso, o interesse do estudo foi o de realçar as altas e médias frequências da continuação ascendente de 400m, minimizando a influência do embasamento na imagem.

Para isso, efetuou-se a subtração da continuação ascendente de 400m daquela de 1200m (Figura 5.11, A e B). E a partir deste produto, foi gerado o gradiente horizontal, denominado, para fins práticos, de GHS. Este processo se assemelha ao realizado em filtros passa-banda e no *matched filtering*, os quais também objetivam o realce de assinaturas magnéticas de um determinado intervalo em profundidade.

Os lineamentos magnéticos identificados no GHS possui direções preferenciais EW, N70-75W, N30-40W, NS e N30E, sendo que as duas primeiras são coincidentes com aquelas identificadas na amplitude do sinal analítico de ordem 1. O rio Paracatu possui mudanças abruptas de N20-30E/NS para a direção EW marcada por lineamentos expressivos do GHS. A maioria dos afluentes dos dois grandes rios, que apresentam direções EW, N60-65W e N30-40W, também possui correlação espacial com os lineamentos magnéticos do GHS.

Algumas assinaturas magnéticas do GHS não apresentam comportamentos retilínios, sendo possível observar algumas feições sinuosas e semicirculares.

A correlação do GHS e dos resultados geofísicos próximos da superfície indica uma relação positiva, o que pode estar indicando uma continuidade de estruturas ao longo da coluna sedimentar até a superfície, interligando as unidades sedimentares e possibilitando a migração de gases. Como este produto não foi reduzido ao polo, este lineamentos apresentam algum deslocamento em relação as suas fontes, e esta característica teve de ser considerada na análise de suas relações com os resultados radiométricos e a amplitude do sinal analítico.

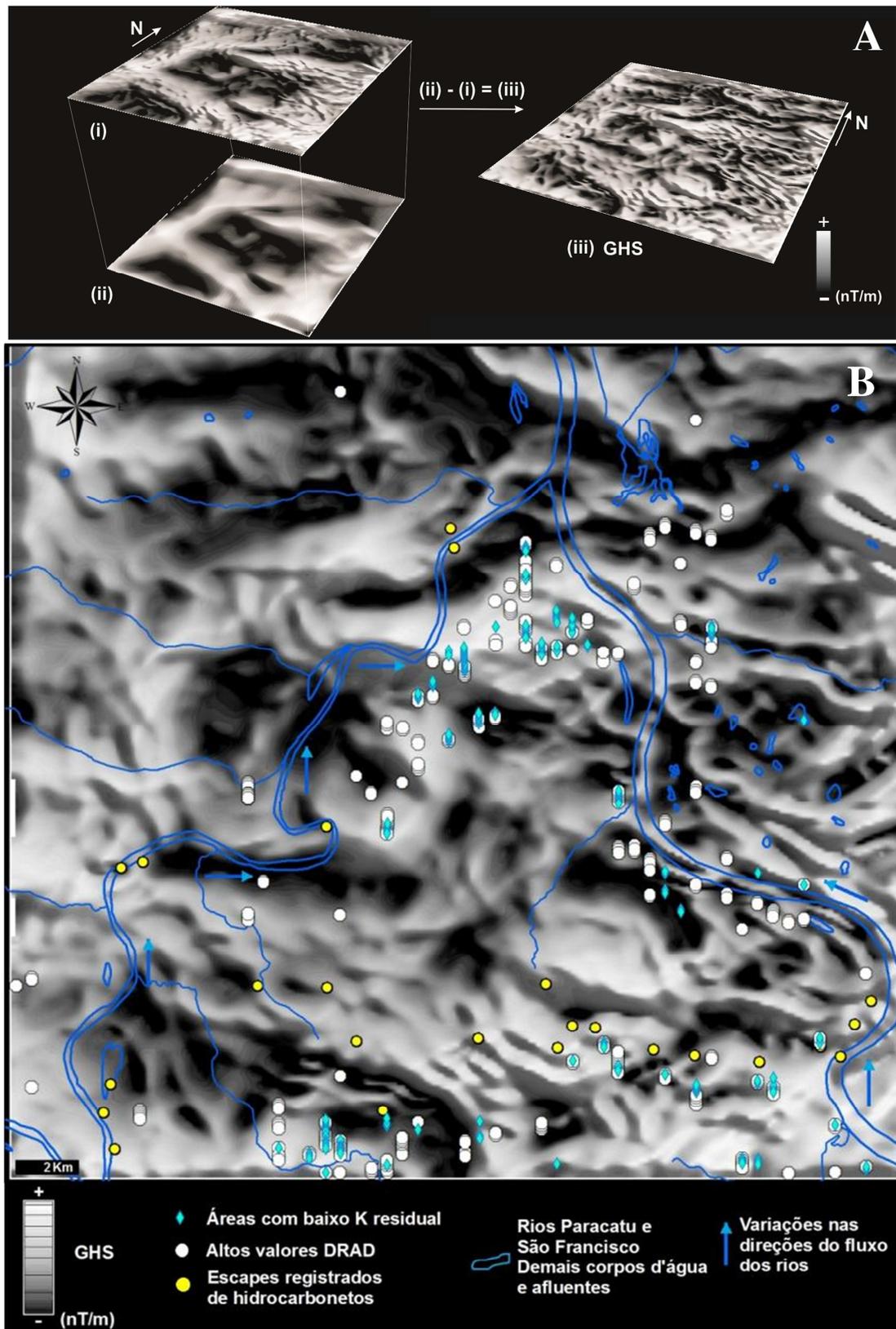


FIGURA 5.11 – A: Figura esquemática em 2,5D que expõe a relação entre as assinaturas magnéticas presentes no gradiente horizontal total das continuações ascendentes: (i) de 400m e (ii) 1200m; e (iii) o produto de sua subtração (GHS). **B:** Imagem do GHS, integrado aos resultados radiométricos e as ocorrências registradas de hidrocarbonetos em superfície. A mudança do fluxo do rio nas direções NW e EW estão indicadas na figura com setas azuis.

5.3 ANÁLISE ESPACIAL DOS DADOS GEOFÍSICOS POR LÓGICA FUZZY

A significativa correlação obtida entre os resultados radiométricos e a amplitude do sinal analítico de ordem 1, juntamente com os dados geoquímicos cedidos para este trabalho, permitiu a aplicação de técnicas estatísticas e a seleção de áreas favoráveis para microexsudações. Optou-se, em função do número e natureza das evidências, pela utilização da lógica *fuzzy*, realizada através do aplicativo ARC-SDM (Sawatzky *et al.* 2004).

O processo de fuzificação ressaltou as propriedades de interesse de cada um dos resultados, inseridos como dados de entrada. Os menores valores encontrados no K residual e os maiores valores da amplitude do sinal analítico e do DRAD obtiveram alto grau de pertinência *fuzzy* (Figura 5.12A).

Os maiores graus de pertinência *fuzzy* foram integrados a partir da aplicação do operador AND, que estabeleceu que as áreas favoráveis para as microexsudações deveriam conter, necessariamente, as características em comum apresentadas pelos três produtos.

O produto final *fuzzy* foi reclassificado em quatro classes pelo método de quebras naturais (otimização de Jenks; Jenks 1967), as quais foram denominadas de acordo com os seguintes níveis de favorabilidade: nenhuma, baixa, média e alta (Figura 5.12B). Em algumas porções, é possível observar a disposição dos graus de favorabilidade em formatos concêntricos e crescentes, de fora para dentro. Dessa forma, além da avaliação de áreas potenciais para a ocorrência de hidrocarbonetos, a continuidade entre essas classes permitiu uma interpretação qualitativa em relação a área de alcance dessas microexsudações e dos efeitos que elas causam no ambiente. A integração realizada somente pela disposição dos valores discretos de K residual e DRAD sobre as imagens da amplitude do sinal analítico em ambiente GIS não possibilitou, a princípio, a mesma profundidade de interpretação.

A correlação do mapa de favorabilidade e as curvas de iso-concentração de hidrocarbonetos é significativamente positiva. A figura 5.13 expõe esta relação. Podem ser observadas áreas com média favorabilidade, que foram marcadas pelas curvas de maior concentração de hidrocarbonetos (C2-C5), enquanto que áreas próximas, pouco amostradas pela geoquímica, apresentaram alta favorabilidade, e podem estar indicando novos pontos potenciais para *follow-up* e demais trabalhos de checagem de campo.

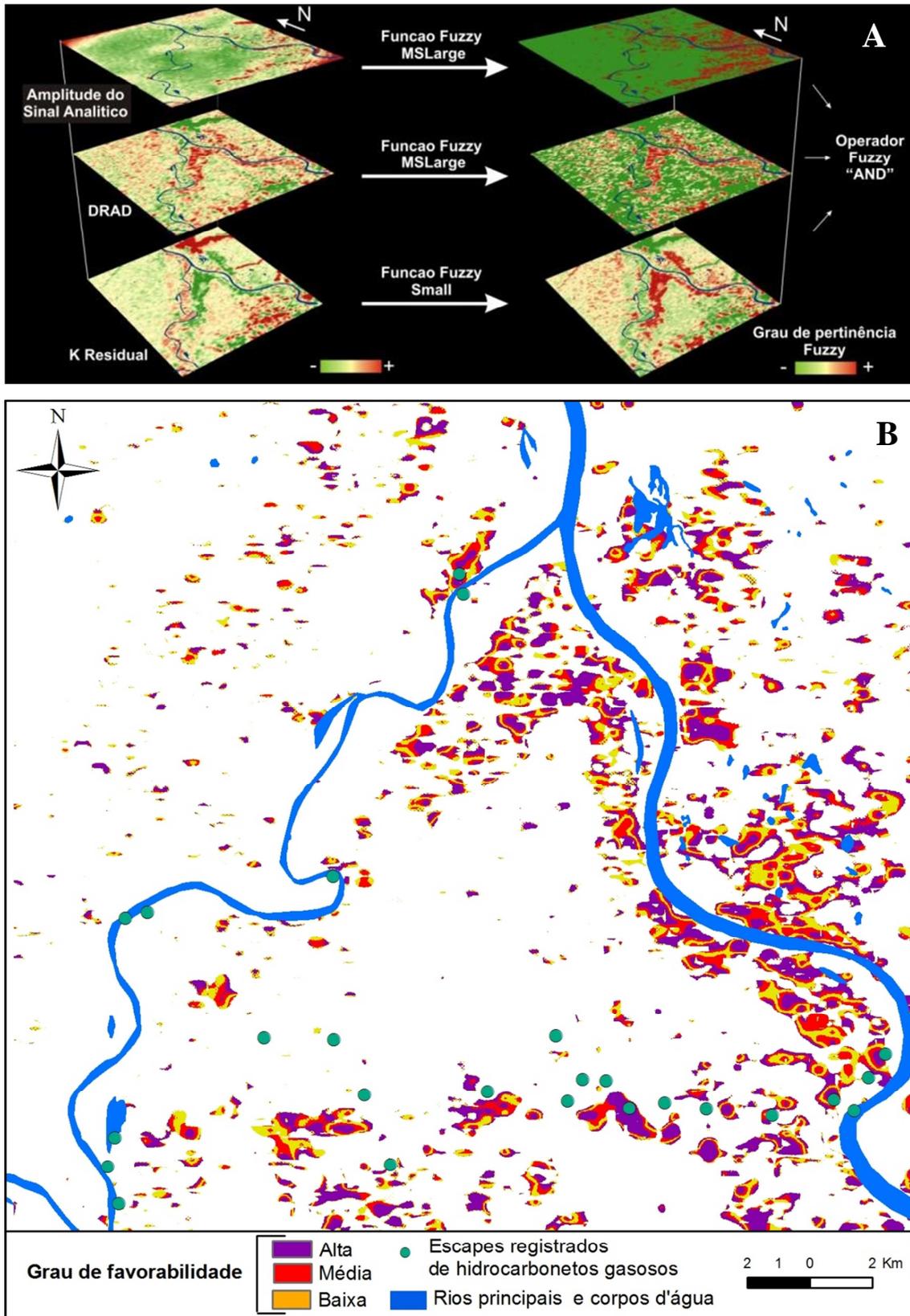


FIGURA 5.12 – A: Figura esquemática em 2,5D que expõe as etapas gerais da lógica Fuzzy: (i) inserção dos grids de entrada: amplitude do sinal analítico, DRAD e K residual; (ii) fuzzificação (ii) utilização do operador AND nos resultados da fuzzificação. **B**: Mapa de favorabilidade para microexsudações, resultado da aplicação do operador Fuzzy AND nos três produtos gerados pela fuzzificação.

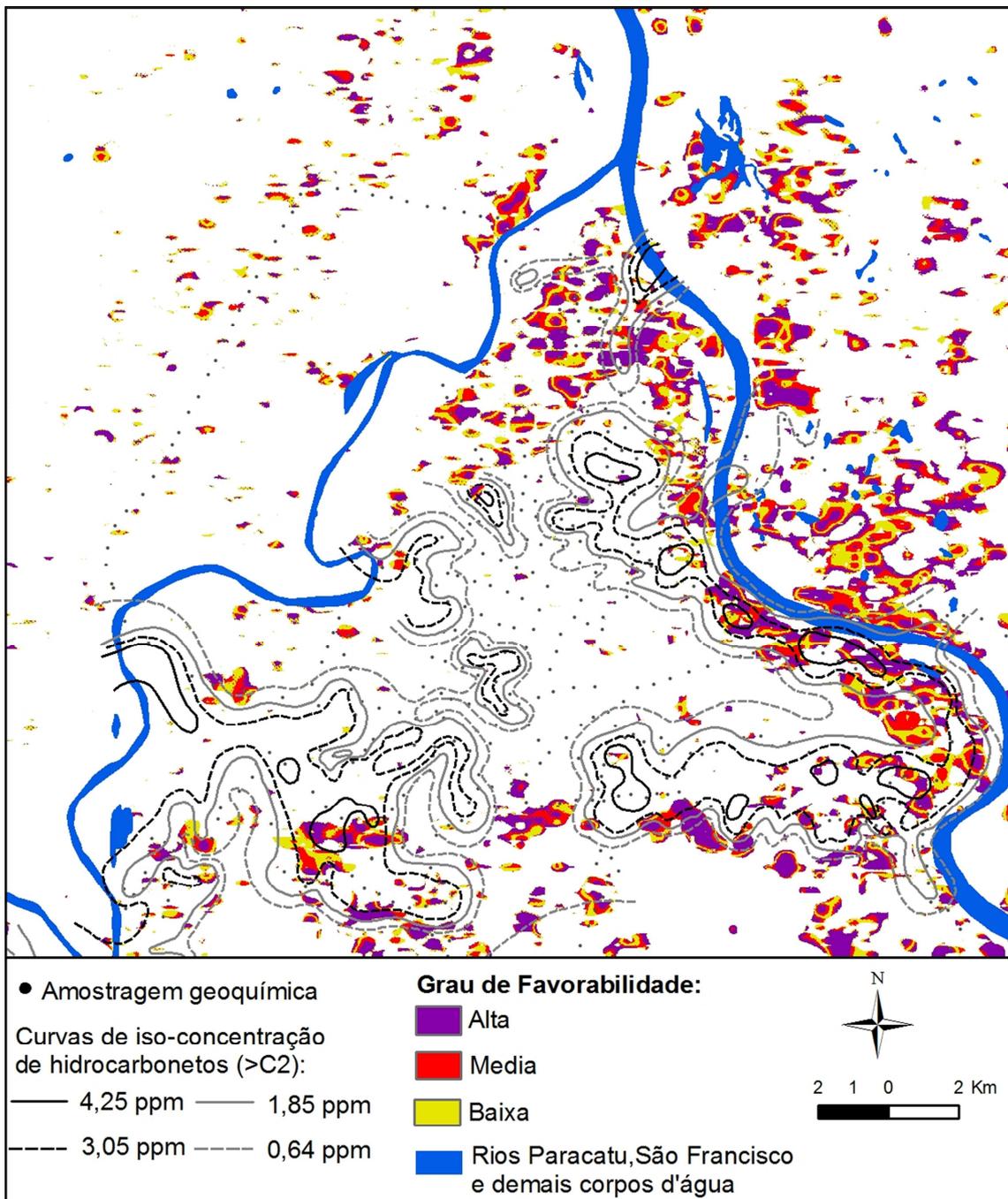


FIGURA 5.13 – Correlação do mapa de favorabilidade para microexsudações com as curvas de iso-concentração de hidrocarbonetos, de etano a pentano (C2-C5), e os registros de hidrocarbonetos em superfície.

5.4 SENSORIAMENTO REMOTO

A análise dos produtos finais, obtidos após o processamento das imagens ASTER, foi realizada em duas fases. A primeira fase se consistiu na detecção de alterações geobotânicas, acumulações de caulinita e Fe^{2+} na área de estudo como um todo. Porém, foi observado que as anomalias geofísicas apresentaram-se de forma mais restrita e concentrada do que as características de interesse encontradas no sensoriamento remoto que, em sua maioria, abrangiam áreas extensas e distribuídas em diferentes contextos. Dessa forma, o sensoriamento remoto não apresentou bons resultado na análise espacial por lógica *fuzzy*. Assim, numa segunda fase, a interpretação e a detecção de feições espectrais de interesse, diagnósticas de áreas afetadas por microexsudações, foram norteadas pelas anomalias superficiais definidas previamente pelo mapa de favorabilidade, gerado pela aplicação da lógica *fuzzy* nos dados geofísicos.

5.4.1 Áreas com concentração em caulinita

A aplicação da análise por principais componentes (APC), segundo a Técnica Crósta, para a detecção de caulinita, foi realizada para dois conjuntos de bandas: 1467 e 1457, onde a caulinita possui características espectrais de absorção nas bandas 1, 5 e 6 e de reflexão nas bandas 4 e 7. Anteriormente a aplicação deste procedimento, foi inserida uma máscara para as zonas de influência dos corpos d'água.

Nas tabelas 5.5 e 5.6, estão expostas as PC's para os dois conjuntos de bandas, onde observa-se que para ambos, a PC que mostrou maior contraste entre os auto-vetores foi a quarta. Para o conjunto 1467, o maior contraste se deu entre as bandas 6 e 7. Neste caso, a caulinita ficou marcada em pixels escuros, pois a banda 6 apresentou o auto-vetor maior em relação a banda 7 e, foi necessária a multiplicação deste resultado por -1, para que o pixels de interesse se tornassem claros. Para o conjunto 1457, o maior contraste de auto-vetores ocorreu entre as bandas 5 e 7, onde os pixels de interesse já são claros, pois o auto-vetor da banda 7 é maior que o da banda 5.

Utilizando-se das duas PC's obtidas para a caulinita, uma APC foi aplicada para estes dois produtos, com o objetivo de obter a informação em comum entre elas. Ou seja, foi selecionada a primeira PC, que, usualmente, apresentam as bandas com menor contraste entre seus auto-vetores (Tabela 5.6). Este foi o produto final para a detecção de caulinita na área de estudo.

TABELA 5.4 – Tabela de auto-vetores da APC para o conjunto de bandas 1,4,6 e 7, onde está destacado em amarelo os auto-vetores que demonstraram maior contraste.

	Banda 1	Banda 4	Banda 6	Banda 7
PC1	0.954165	0.28284	0.072279	0.065928
PC2	0.298842	-0.91792	-0.19831	0.1697
PC3	-0.01617	-0.2765	0.649462	0.708157
PC4	0.00109	-0.03135	0.730512	-0.68218

TABELA 5.5 – Tabela de auto-vetores da APC para o conjunto de bandas 1,4,5 e 7, onde está destacado em amarelo os auto-vetores que demonstraram maior contraste.

	Banda 1	Banda 4	Banda 5	Banda 7
PC1	0.954508	0.28285	0.067549	0.065934
PC2	0.297744	-0.92117	-0.18382	-0.17029
PC3	-0.01614	-0.26703	0.675278	0.687338
PC4	-0.00162	0.011414	-0.71109	0.703008

TABELA 5.6 – Tabela de auto-vetores da APC para a PC4a – resultante da APC para as bandas 1,4,6 e 7 – e PC4b - resultante da APC para as bandas 1,4,5 e 7. Está destacado em amarelo os auto-vetores que demonstraram menor contraste.

	PC4a	PC4b
PC1	-0.65878	-0.752339
PC2	-0.75234	0.658776

Na primeira fase de análises efetuadas com esse produto final, observou-se que as concentrações aparentes de caulinita abrangiam áreas extensas, provavelmente relacionadas com as próprias litologias da região de estudo e não com variações anômalas locais. Enquanto na segunda fase, constatou-se que, algumas áreas marcadas por anomalias geofísicas se caracterizavam por altas acumulações de caulinita, provavelmente apresentando relação com as microexsudações. Dessa forma, com o objetivo de otimizar a correspondência com as anomalias geofísicas, foram realçadas as maiores concentrações de caulinita, através da manipulação do histograma de distribuição do nível de cinza da imagem. Assim, foi gerado um mapa composto somente pelas maiores concentrações de caulinita e a sua relação com o mapa de favorabilidade de microexsudações se tornou significativa (Figura 5.14). A caulinita, presente no restante da área, que não está exposta neste mapa, provavelmente está relacionada com o intemperismo, muito comum, nas unidades litológicas da área de estudo.

A correlação entre o mapa de concentração de caulinita e as curvas de iso-concentração de hidrocarbonetos ficou inconsistente, pois além da porção SE não ter sido coberta pelo imageamento das duas cenas ASTER utilizadas, a porção centro-sul da área não apresentou concentrações significativas de caulinita.

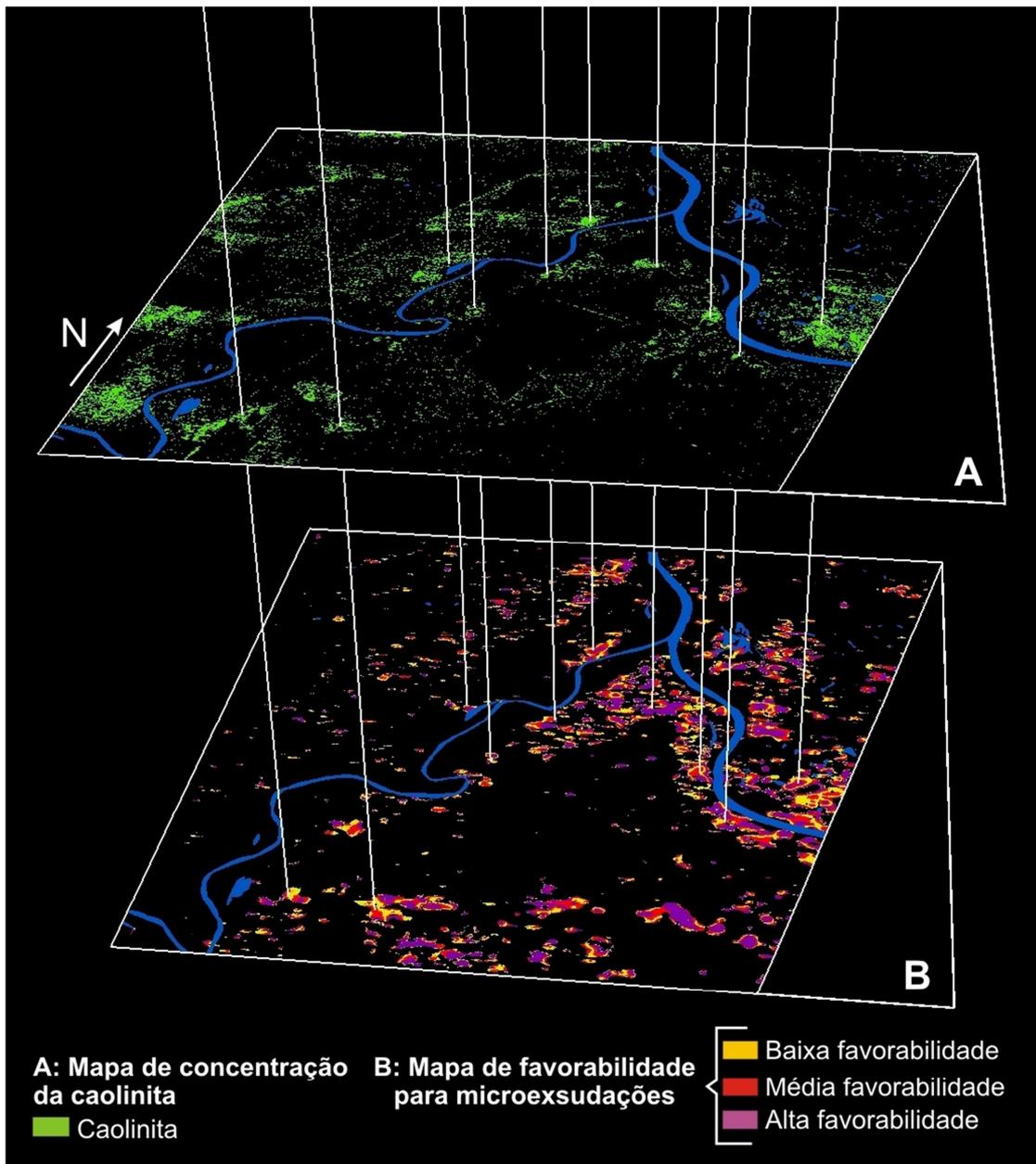


FIGURA 5.14 – Figura esquemática em 2,5D da correlação entre o mapa de concentração de caulinita, gerada pela Técnica Crósta e com seus pixels mais claros realçados por manipulação do histograma, e o mapa de favorabilidade para microexsudações. As linhas em branco atravessam os pontos entre os dois mapas que apresentam as correspondências mais evidentes. A porção NE/SE do mapa não apresenta respostas, pois, esta porção, não foi imageada pelas duas cenas ASTER utilizadas neste estudo.

5.4.2 Anomalias geobotânicas

A observação da vegetação na área de estudo foi realizada basicamente através do Índice de Vegetação Normalizado (NDVI). As características investigadas nesta imagem foram: diminuição da densidade da vegetação e mudanças atípicas em suas características espectrais.

Como a região de estudo é marcada por, pelo menos, três tipos de vegetação - cerrado, mata galeria e plantações de eucaliptos - a análise de pequenas variações espectrais e texturais no índice de vegetação deveria ser realizada em detalhe, para que não fossem confundidas com mudanças comuns causadas na passagem entre os diferentes tipos de vegetação, alterações sazonais e ações antrópicas.

Na primeira fase de análise, observaram-se os principais domínios dos diferentes tipos de vegetação, os quais não foram identificados de forma precisa, pois não houve pontos de controle confiáveis para gerar a classificação da imagem (Figura 5.15). Porém, a plantação de eucaliptos na área é evidente através do formato de suas glebas, predominantemente poligonais, sendo que algumas se apresentam uniformemente mais escuras, o que pode estar relacionado às ações antrópicas no manejo das plantações. As porções mais claras da área de estudo podem ser relacionadas à mata galeria e a maiores densidades de vegetação do tipo cerrado. As áreas mais escuras são identificadas como áreas com vegetação esparsa à nula, como os corpos d'água.

Portanto, na segunda fase, utilizou-se das anomalias geofísicas para detectar, em detalhe, as variações espectrais e texturais de interesse no NDVI. Na figura 5.15, podem ser observadas anomalias geobotânicas encontradas na área, que foram denominadas, para fins ilustrativos, em dois tipos: AG1 e AG2.

As anomalias AG1 estão inseridas no domínio da mata galeria e cerrado. Estas anomalias se caracterizam por pixels mais escuros, cercados pelos mais claros, que marcam o comportamento padrão desses tipos de vegetação na imagem.

As anomalias AG2 estão inseridas no contexto das plantações de eucalipto. Podem ser identificadas pelo seu formato, que ao contrário dos típicos formatos poligonais das glebas de eucalipto, apresentam formatos circulares e, algumas vezes, com variações concêntricas no albedo, com pixels mais escuros.

Ambos os tipos de anomalias apresentam uma redução do nível de cinza da imagem em relação ao domínio que se encontravam, representando uma menor densidade foliar local. Essas características podem significar mudanças bruscas nas condições mineralógicas e/ou nutricionais do solo e, como demonstrado pela sua relação

com as áreas de favorabilidade para microexsudações, provavelmente foram causadas pelos efeitos da ação de hidrocarbonetos (Fig. 5.16).

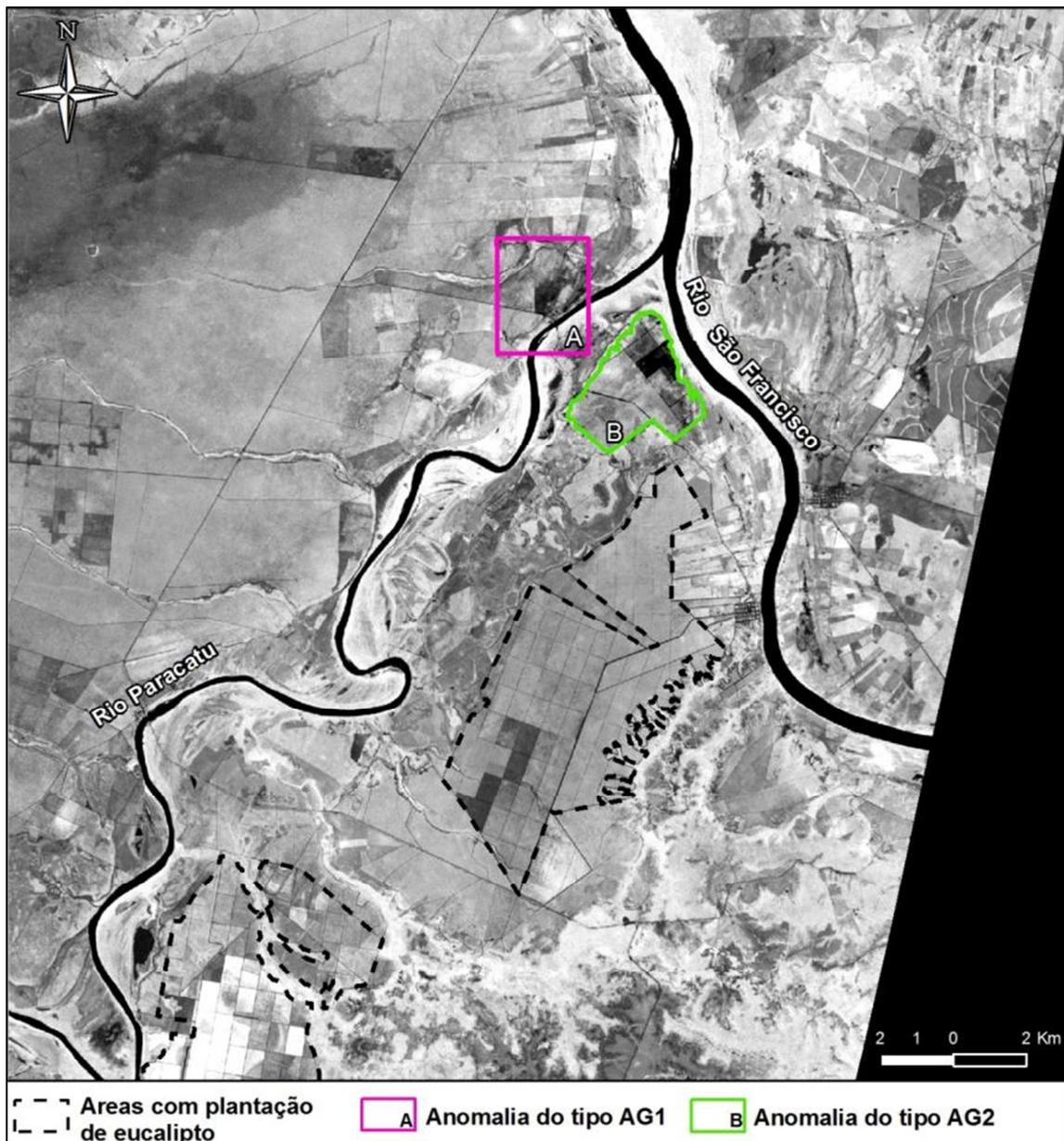


FIGURA 5.15 – Imagem do NDVI da área de estudo. O nível de cinza se torna mais claro quando a densidade foliar aumenta. Destacadas em linhas pontilhadas pretas, estão as áreas de plantações de eucaliptos. Estão realçadas em rosa e verde, as anomalias geobotânicas do tipo AG1 e AG2, respectivamente. Elas estão apresentadas em maior detalhe na figura 5.13.

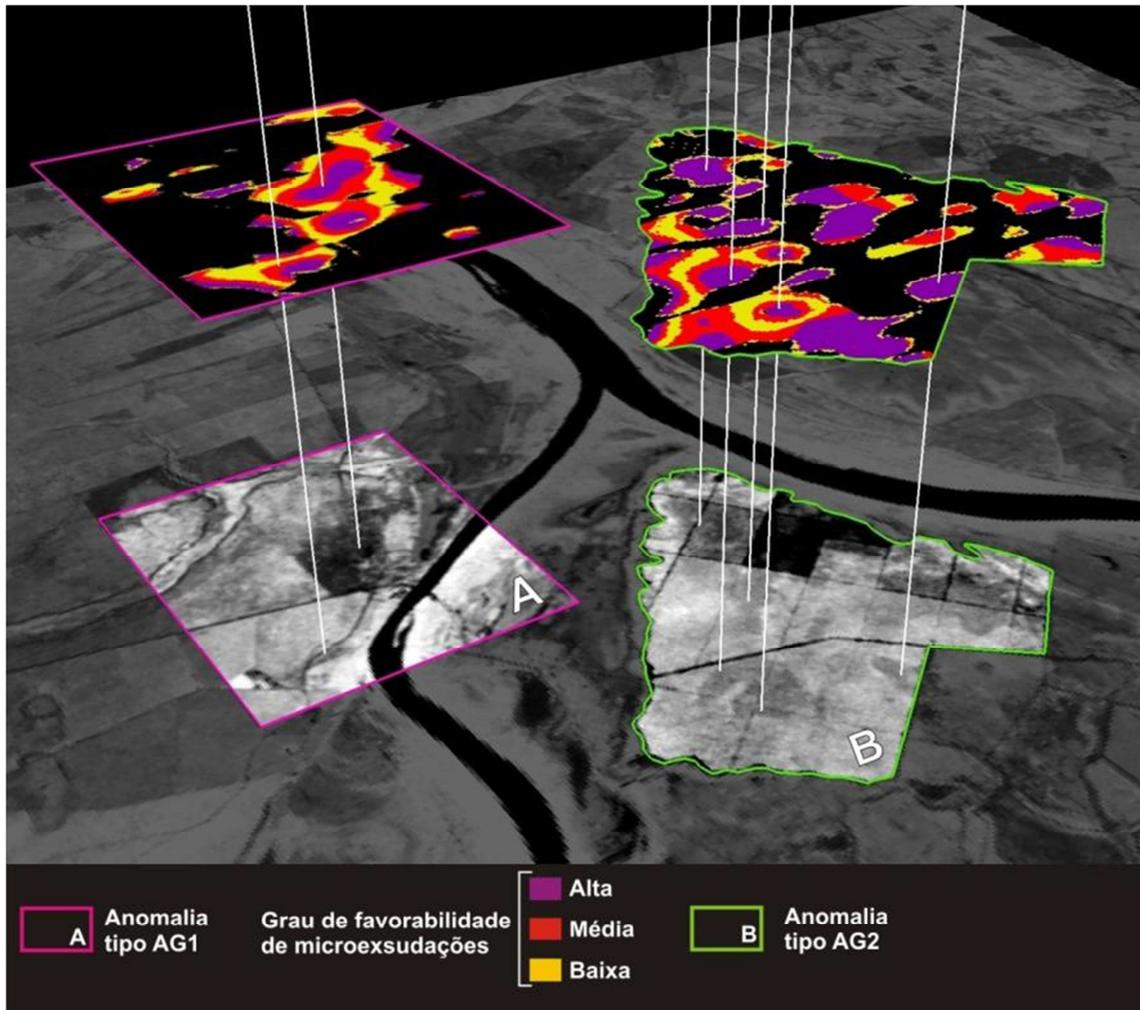


FIGURA 5.16 – Figura esquemática em 2,5D das correlações entre as anomalias geobotânicas dos tipos AG1, à esquerda, e AG2, à direita, com o mapa de favorabilidade para microexsudações. Os pixels mais escuros demonstram uma diminuição do índice e, provavelmente, uma menor densidade foliar. Estas variações foram constatadas em domínios de vegetação, ou seja, AG2 está localizada ao meio da plantação de eucaliptos e AG1 está entre a mata galeria.

5.4.3 Anomalias de Fe^{2+}

O procedimento realizado para a definição das anomalias de Fe-ferroso (Fe^{2+}) nas imagens ASTER foi similar aos anteriormente apresentados. Houve uma primeira fase, em que foi analisado o comportamento geral deste elemento na área de estudo. Na segunda fase, foi observada se suas maiores concentrações poderiam ter associação com as áreas caracterizadas por anomalias já definidas.

A imagem da distribuição Fe^{2+} na área de estudo, resultante da aplicação do índice definido por Rowan *et al.* (2003), obteve o contraste manipulado a favor do realce de áreas com níveis de cinza mais claros (Figura 5.17). Como este produto

também realçou os corpos d'água e as áreas inundadas pelas variações sazonais da drenagem, foi inserida uma máscara sobre estes objetos.

De acordo com a imagem, a presença do Fe^{2+} pode estar relacionada à geologia da área, como exposto na sua porção NW, como também pode ser associada às anomalias geofísicas e àquelas encontradas no mapa de concentração de caulinita e no NDVI. Nestes casos, foram investigadas variações atípicas sutis no comportamento espectral, que apresentavam pixels mais claros em relação ao contexto local em que se encontravam, onde algumas estão exemplificadas nas figuras 5.17 e 5.18.

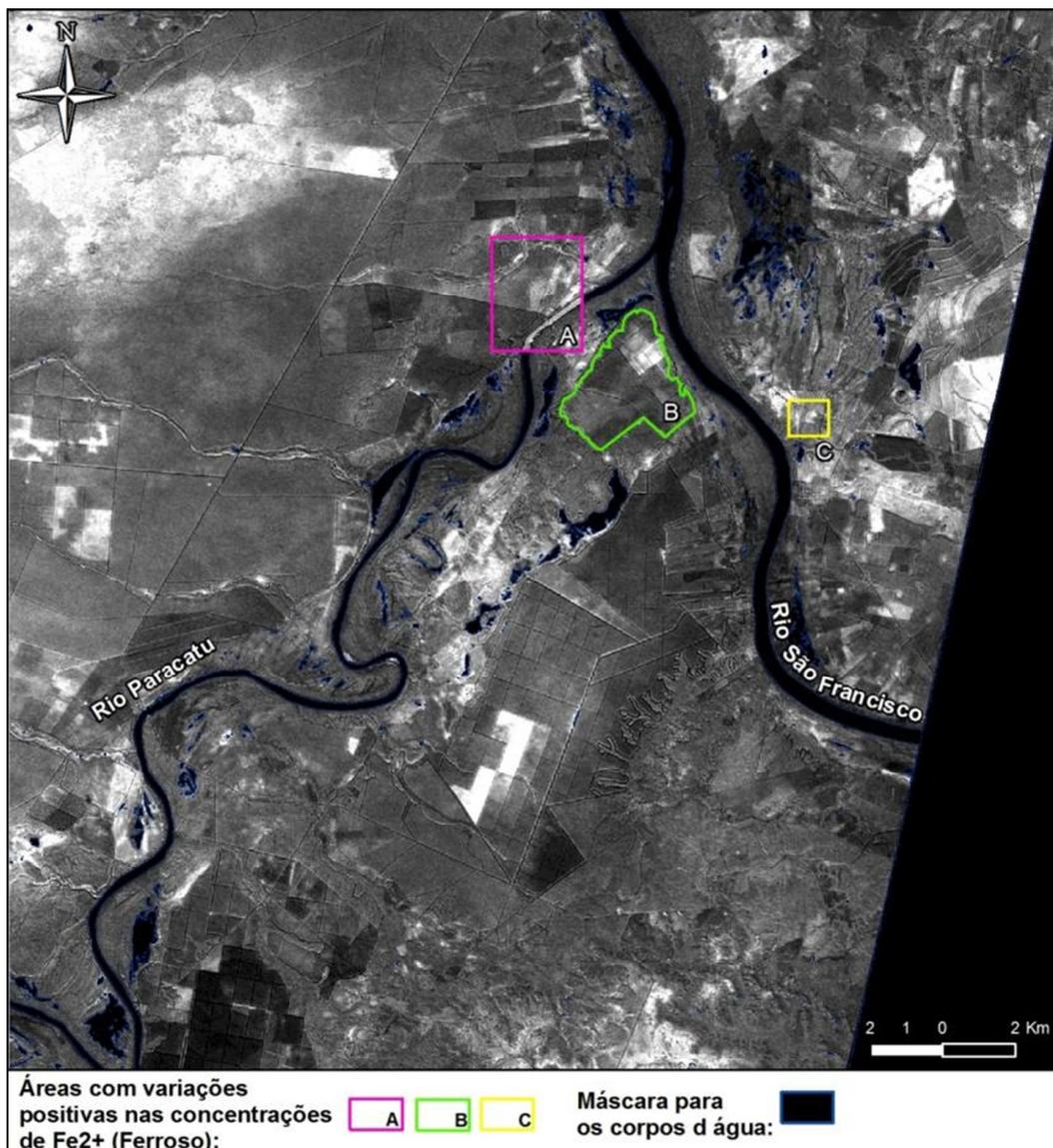


FIGURA 5.17 – Imagem do Fe^{2+} da área de estudo, com o contraste manipulado para o realce de pixels mais claros, marcados por maior presença desse elemento. Estão destacadas em polígonos, rosa, verde e amarelo, as áreas com variações anômalas. Elas estão apresentadas em maior detalhe na figura 5.18.

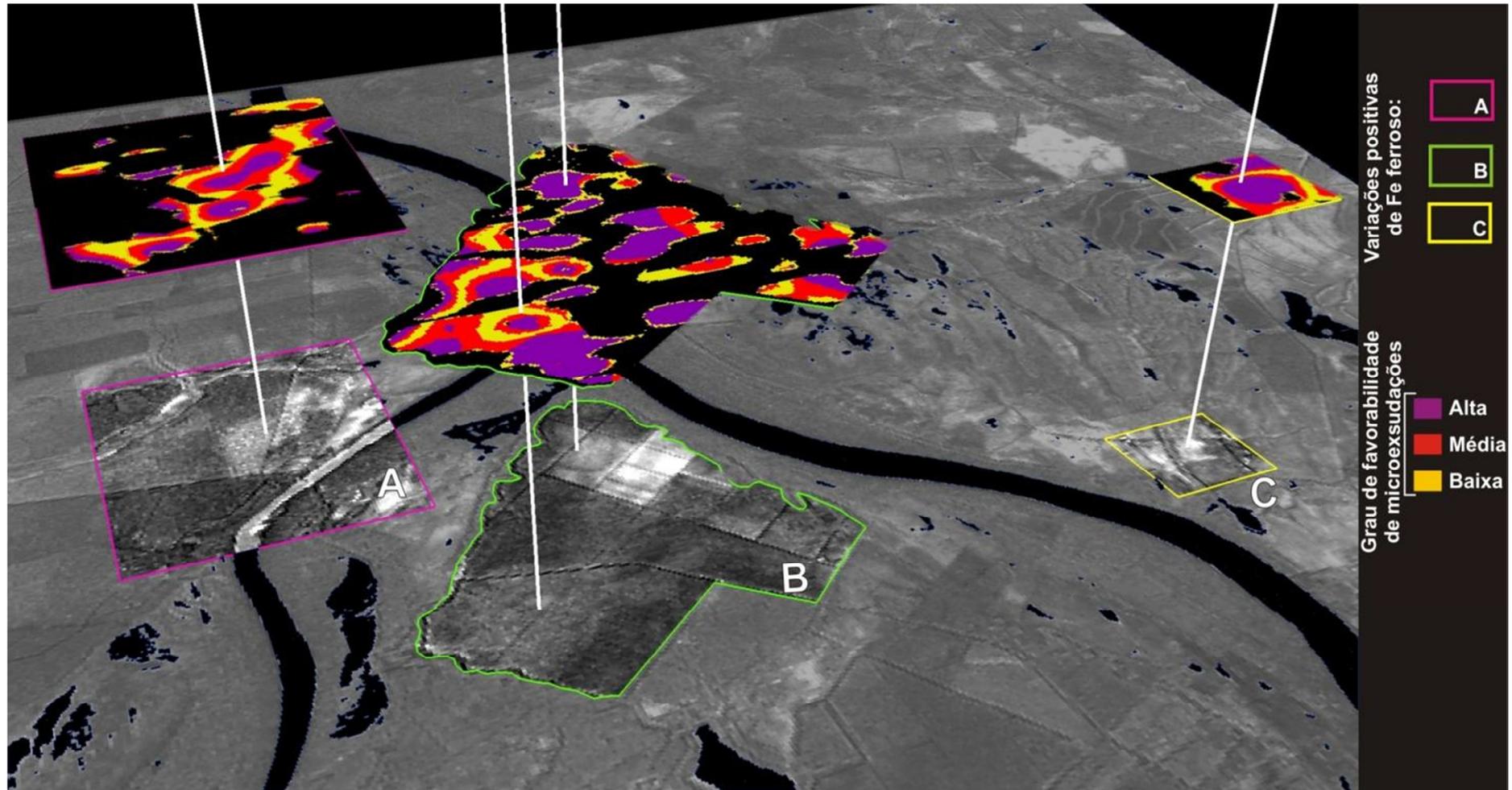


FIGURA 5.18 – Figura esquemática em 2,5D das correlações entre as anomalias de ferro ferroso (Fe^{2+}), apresentado em pixels mais claros, com o mapa de favorabilidade para microexsudações.

CAPÍTULO 6

DISCUSSÕES & CONCLUSÕES

6.1 ESTRATÉGIAS PARA A DEFINIÇÃO DE ÁREAS AFETADAS POR MICROEXSUDAÇÕES DE HIDROCARBONETOS

Os resultados obtidos nessa pesquisa, somado àqueles disponíveis na literatura (Saunders *et al.* 1993 e Schumacher 1999), contribuíram para a definição de uma metodologia aplicada na detecção dos efeitos que as microexsudações de hidrocarbonetos causam no meio em que se encontram. Essa metodologia é composta por procedimentos adotados para dados aerogeofísicos e de sensoriamento remoto orbital, o que gerou dois conjuntos de resultados neste estudo. Estes conjuntos foram integrados com o objetivo de somar o maior número de indicadores possíveis e apontar as áreas potenciais para microexsudações. Os resultados do levantamento geoquímico de superfície, realizado pela Petrobrás em 1987, confiabiliza a validação dessas áreas, configurando alvos para futuras investigações de maior detalhe.

6.1.1 Seleção de áreas potenciais utilizando dados aerogeofísicos

As áreas potenciais para microexsudações foram obtidas através da integração entre os seguintes produtos: K residual, DRAD¹ e amplitude do sinal analítico de ordem 1. O K residual e o DRAD mapearam as possíveis alterações mineralógicas causadas por microexsudações. A amplitude do sinal analítico de ordem 1 mostra altos magnéticos provenientes de estruturas tectônicas rasas, realçados pela presença de possíveis acumulações de minerais magnéticos diagenéticos, gerados pela ação de hidrocarbonetos (anomalias micro-magnéticas).

A análise estatística e as técnicas aplicadas nos dados gamaespectrométricos foram realizadas sem a utilização de interpoladores, na tentativa de otimizar a acurácia das operações estatísticas e observar variações sutis que, por vezes, não se apresentam de forma muito clara em uma malha obtida após a interpolação. Portanto, a definição dos valores anômalos foi baseada na análise minuciosa das estatísticas das variáveis e da leitura de seus histogramas. Os baixos valores de K residual e os altos valores DRAD

¹DRAD = U residual – K residual

obtiveram uma correspondência significativa entre si, demonstrando que na área de influência das microexsudações, o U possui concentrações maiores que o K, o qual, por sua vez, se apresenta com concentrações muito baixas. Esta característica é confirmada pelo modelo proposto por Saunders *et al.* (1993).

A resolução dos dados de magnetometria não permitiu a separação efetiva entre os altos magnéticos de estruturas geológicas próximas à superfície e aqueles relacionados às anomalias micro-magnéticas. A observação de acumulações rasas de minerais magnéticos diagenéticos pode ser possível através da análise das variações sutis de alta frequência, nos perfis ao longo das linhas de voo. Portanto, as assinaturas magnéticas, indicadas na imagem da amplitude do sinal analítico de ordem 1, foram interpretadas como estruturas geológicas rasas, com direção N70-75W e aproximadamente E-W.

Os resultados da integração entre os três produtos consistiram na formação de dois mapas para a interpretação de áreas potenciais para microexsudações (Figura 6.1): (i) mapa da sobreposição entre os valores anômalos do K residual e do DRAD sobre a imagem da amplitude do sinal analítico de ordem 1 (Figuras 6.2); e (ii) mapa de favorabilidade gerado por lógica *fuzzy* aplicada nas imagens referentes a estes três produtos (Figura 6.3).

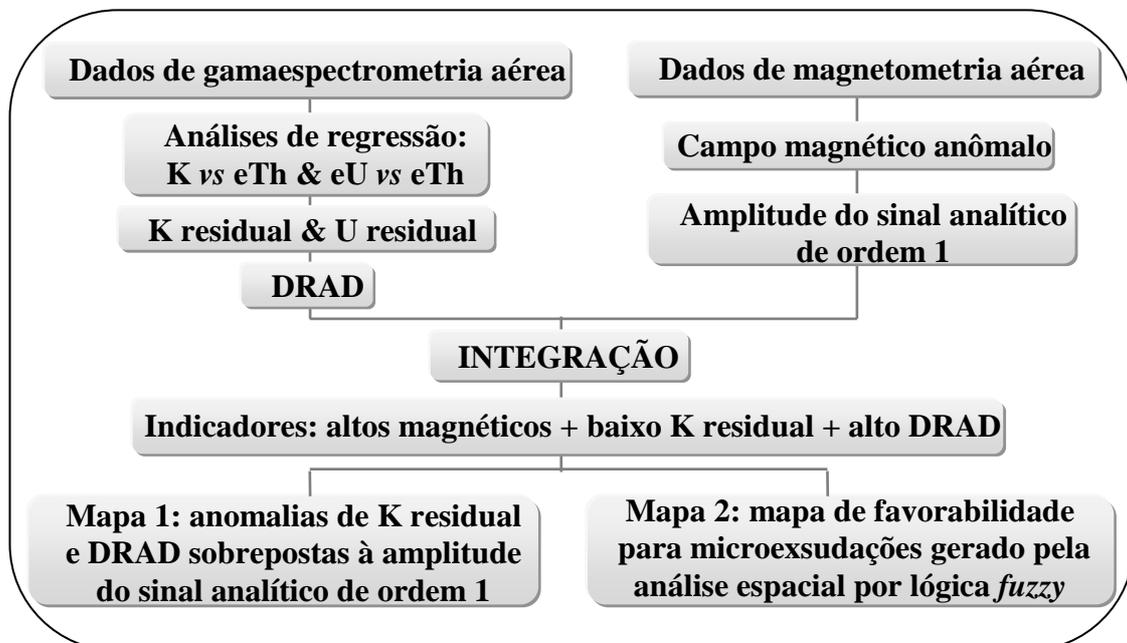


FIGURA 6.1 – Fluxograma ilustrando a primeira parte da metodologia, aplicada nos dados aerogeofísicos, para a detecção de microexsudações na região de Remanso do Fogo.

A distribuição discreta dos dados de K residual e DRAD (Figura 6.2) possui uma limitação visual de possíveis áreas potenciais para as microexsudações. Estas áreas podem ser realçadas quando se tem uma distribuição contínua dos dados e a gradação entre os diferentes graus de favorabilidade. Esta otimização foi concretizada através da aplicação da lógica *fuzzy* aos dados (Sawatzky *et al.* 2004). Assim, o primeiro mapa (Figura 6.2), quando comparado ao mapa de favorabilidade (Figura 6.3), se apresenta como um resultado mais acurado e restritivo, porém o segundo aponta um número maior de locais favoráveis, permitindo a visualização mais clara de algumas áreas potenciais ainda não observadas.

As áreas potenciais apresentadas pelo mapa de favorabilidade (Figura 6.3) possuem formatos concêntricos e com grau de pertinência crescente, a partir do centro. Estas características são típicas de áreas de alteração sob influências de microexsudações, denominados como *HIDA* (*Hydrocarbon-induced diagenetic aureole*) (Donavan 1974, Lilburn & Al-Shaieb 1983, LeSchack & Van Alstine 2002).

Ainda no mapa da figura 6.3, é possível observar que as áreas potenciais estão concentradas próximas aos rios e quebras de relevo, apresentadas pelo modelo digital de terreno (MDT). Esta característica indica que o fluxo hidrogeológico da área exerce influência na percolação dos gases e, ambos os processos, são controlados pelo sistema estrutural, indicado na amplitude do sinal analítico de ordem 1 (Figura 6.2).

Algumas áreas potenciais, observadas no mapa de favorabilidade (Figura 6.3), não foram observadas no primeiro mapa gerado (Figura 6.2). Esta característica pode indicar uma maior eficácia na determinação de áreas favoráveis. Porém, observa-se que, na porção NW da área de estudo, áreas potenciais apontadas pela lógica *fuzzy* foram baseadas principalmente em anomalias magnéticas, provenientes da imagem da amplitude do sinal analítico de ordem 1, enquanto o peso das variáveis radiométricas foi minimizado pelo algoritmo. Com o objetivo de verificar essas áreas, a imagem da amplitude do sinal analítico de ordem 1 foi analisada separadamente, e notou-se que essas anomalias magnéticas estão isoladas e foram geradas pela interpolação de pontos em um raio com menos que 1Km, o que não confiabiliza o resultado, de acordo com o teorema da amostragem. Dessa forma, a interpretação do mapa de favorabilidade deve ser sempre realizada em conjunto com os dados de entrada.

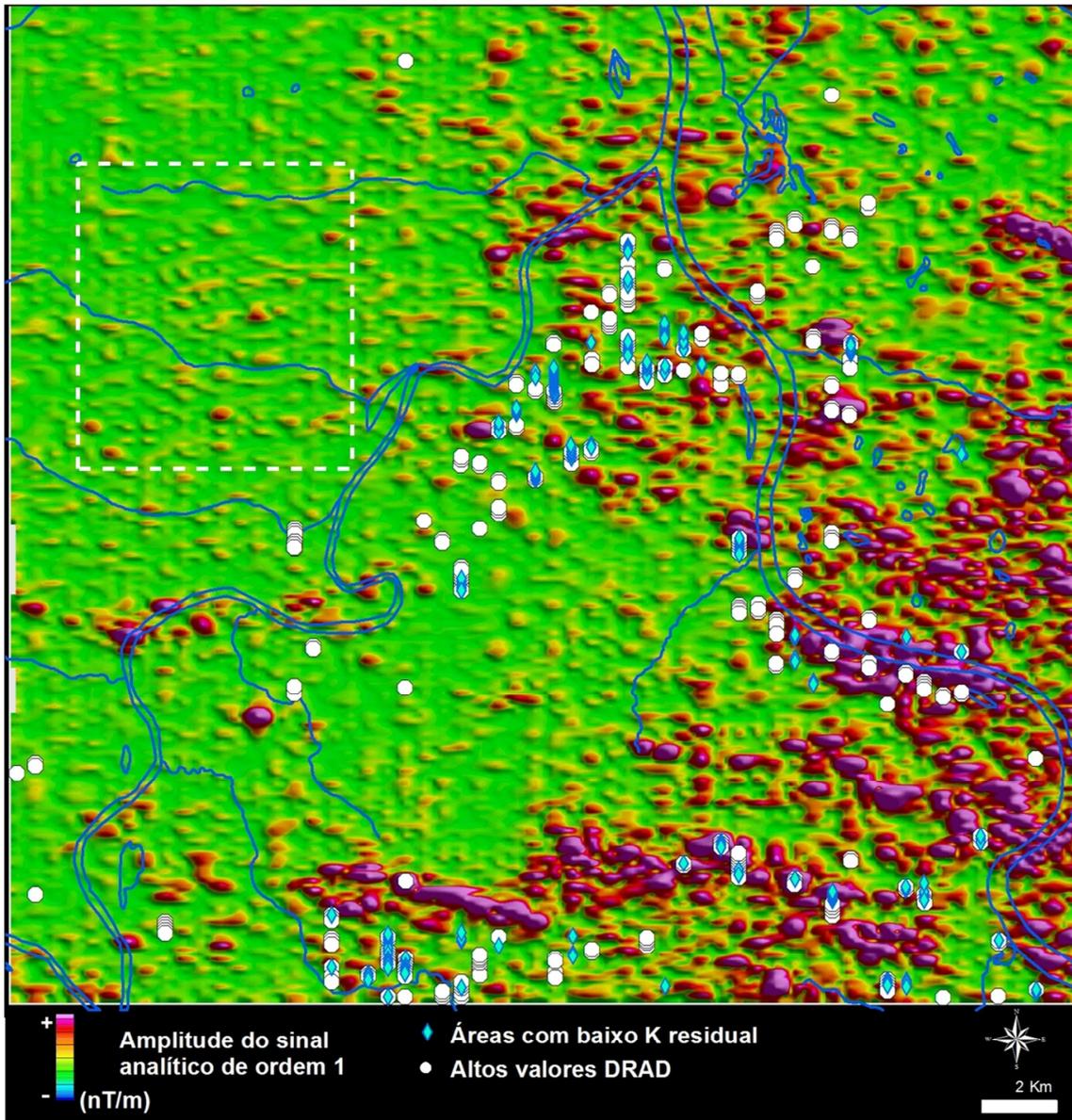


FIGURA 6.2 –Mapa das anomalias de K residual e DRAD, sobrepostos à amplitude do sinal analítico de ordem 1. Observa-se a forte relação entre os altos magnéticos e as respostas radiométricas. O polígono branco indica uma área com a presença de pequenos corpos magnéticos que possui dimensões menores do que a resolução indicada pela teoria da amostragem (1Km) e não possuem correspondência com as anomalias radiométricas. Portanto, de acordo com este mapa, esses locais não apresentam potencial para microexsudações, porém, no mapa de favorabilidade, são apontados como áreas favoráveis (Figura 6.3). Este fato ressalta a importância da análise concomitante desses dois mapas.

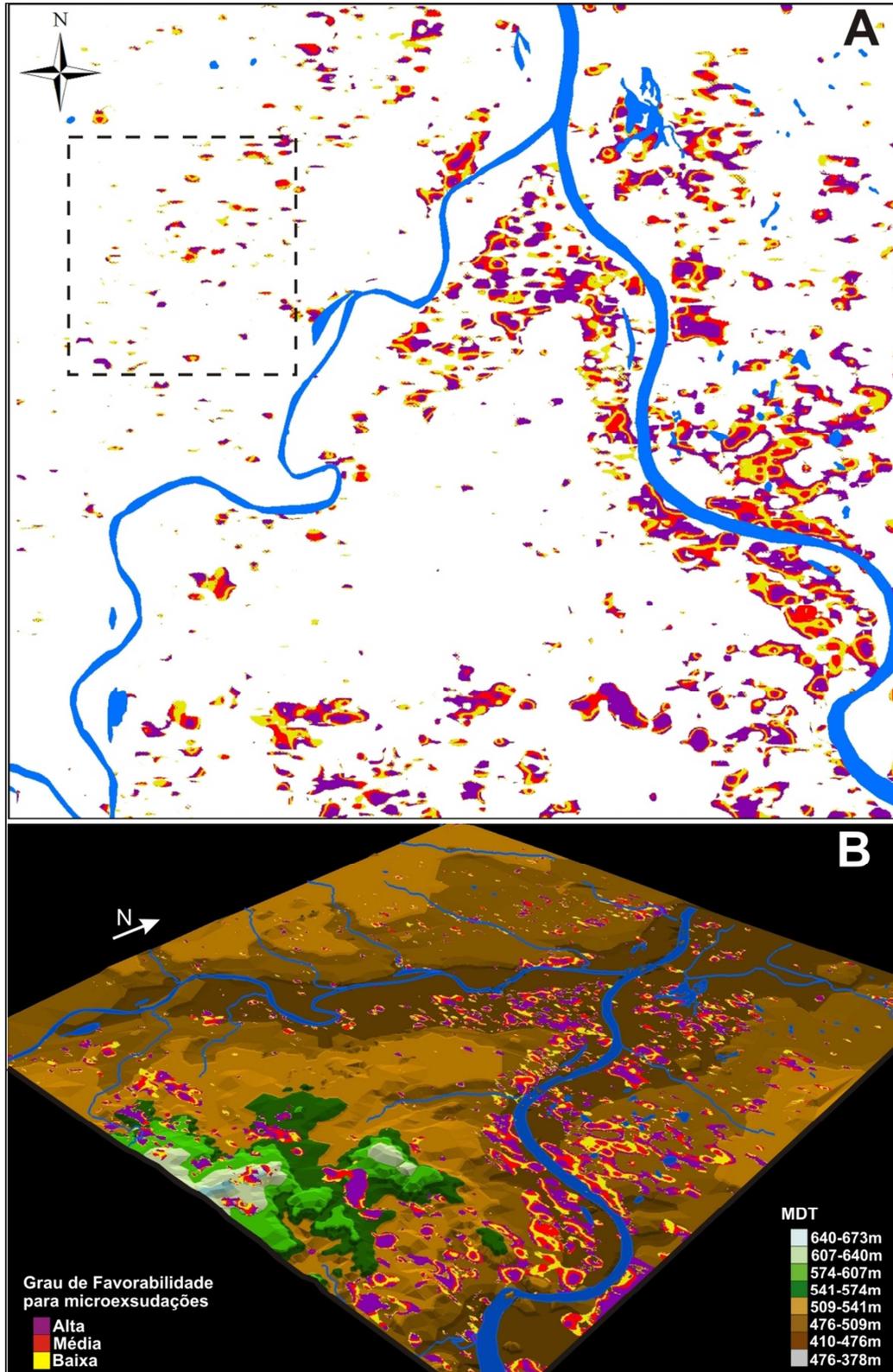


FIGURA 6.3 – **A**: Mapa de favorabilidade para microexsudações. O polígono tracejado em NW indica áreas potenciais, as quais não são definidas na análise do mapa da figura 6.2. **B**: Mapa de favorabilidade em 2,5D, sobreposto ao MDT (Exagero vertical: 5x). Observa-se o posicionamento da maioria das áreas potenciais nas quebras de relevo.

6.1.2 Integração das áreas potenciais mapeadas pela aerogeofísica, utilizando dados de sensoriamento remoto, e sua validação pela geoquímica de superfície.

A análise das imagens do NDVI, de caulinita e de Fe^{2+} não se mostrou tão eficiente quanto a geofísica na definição de alvos prospectivos na área de estudo, pois muitas porções da área de estudo eram compostas pelos elementos de interesse, sendo possivelmente caracterizadas por aspectos regionais e não por alterações locais causadas por microexsudações. Devido a isso, os dados de sensoriamento remoto não foram inseridos na análise espacial por lógica *fuzzy*. Dessa forma, o uso do sensoriamento remoto se mostrou efetivo no sentido de corroborar suas anomalias com as áreas potenciais pré-definidas pela integração dos dados geofísicos, utilizando-se das feições espectrais sugeridas por pesquisas efetuadas com microexsudações, tais como: anomalias geobotânicas, acumulações de caulinita e Fe^{2+} (Schumacher 1996, Noomen *et al.* 2004, Khan & Jacobson 2008) (Figura 6.4)

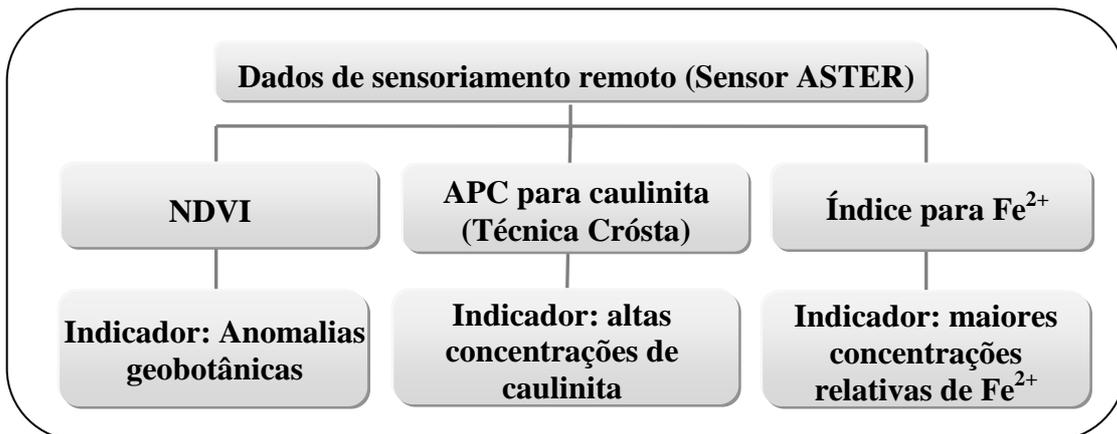


FIGURA 6.4 – Fluxograma ilustrando a segunda parte da metodologia, aplicada nos dados do sensor ASTER, para a detecção de microexsudações na região de Remanso do Fogo.

Algumas áreas potenciais indicadas pelo mapa de favorabilidade possuem uma correlação significativa com os aspectos investigados no sensoriamento remoto, sendo que, nem sempre, a associação ocorre com todos os indicadores presentes em uma mesma área.

Na porção centro-sul da área de estudo, a correlação entre as anomalias geofísicas e aquelas obtidas pelo sensoriamento remoto é muito pouco observada.

É evidente que quanto maior o número de características que apontam a existência da ação de hidrocarbonetos na superfície de um determinado local, maior será

a chance de se encontrar uma microexsudação. Portanto, foram escolhidas quatro áreas potenciais principais (Figuras 6.5 a 6.8), que ilustram a soma desses indicadores, gerados a partir do modelo proposto neste estudo:

- Baixos valores de K residual
- Altos valores de DRAD
- Altos magnéticos
- Médio a alto grau de pertinência Fuzzy
- Anomalias geobotânicas
- Alta concentração de caulinita
- Alta concentração de Fe^{2+} (Íon ferroso)

Estas quatro áreas potenciais estão validadas pelo levantamento geoquímico, composto pelas curvas de iso-concentração de etano (C2) e hidrocarbonetos mais pesados que etano (>C2), e/ou pelas ocorrências de gás registradas na região.

As curvas de iso-concentração de hidrocarbonetos estão concentradas na zona central, entre a confluência dos rios Paracatu e São Francisco, e estão distribuídas conforme a amostragem, que, por sua vez, foi limitada às vias de acesso. Dessa forma, apesar de haver uma correspondência significativa entre as áreas potenciais para microexsudações e os resultados geoquímicos, ocorre um pequeno deslocamento entre os centros das anomalias determinadas por cada um destes métodos, ou seja, em relação à posição exata de onde estariam localizadas as saídas do gás. Assim, considerando que o levantamento geofísico possui a amostragem uniformemente espaçada e abrange locais que não foram cobertos pela geoquímica, áreas com alta favorabilidade encontradas nesse estudo podem estar indicando novas ocorrências de microexsudações ou, até mesmo, reposicionando anomalias determinadas anteriormente pela geoquímica.

A predominância de sedimentos, a dinâmica dos processos físico-químicos na geologia da área, e a variedade de tipos de vegetação devem ser levados em conta na análise dos resultados.

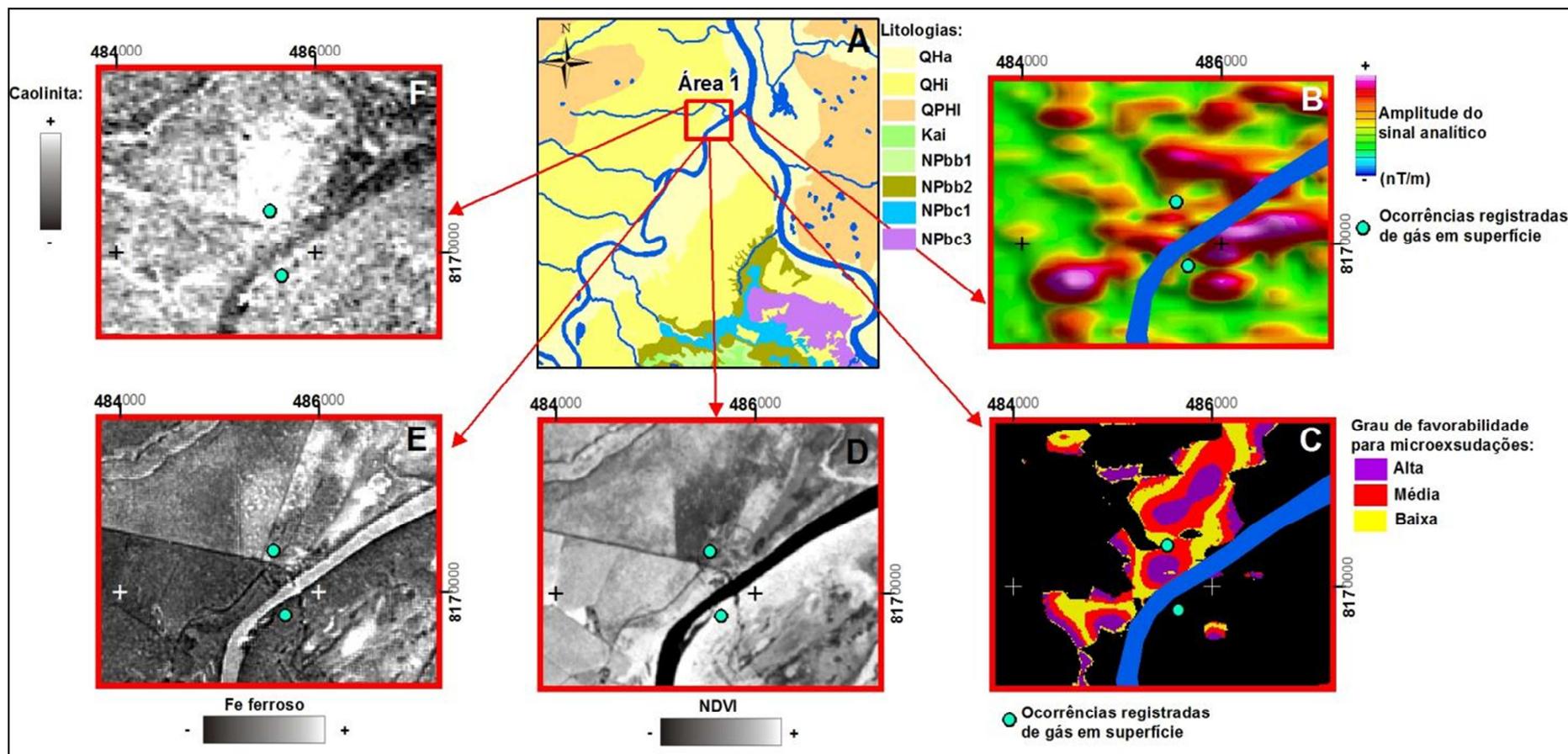


FIGURA 6.5 – Figura esquemática mostrando a relação de todos os indicadores encontrados na primeira área potencial selecionada (área 1), validados pela presença de escapes de gás registrados em superfície. **A:** mapa geológico da região de estudo, indicando a localização da área 1. **B:** amplitude do sinal analítico de ordem 1. Indicador: médio/altos magnéticos. **C:** classes de favorabilidade obtidos pela lógica Fuzzy. **D:** NDVI. Indicador: variações escuras dos pixels. **E:** Concentração de Fe^{2+} . Indicador: pixels claros. **F:** Concentração de caulinita. Indicador: pixels claros.

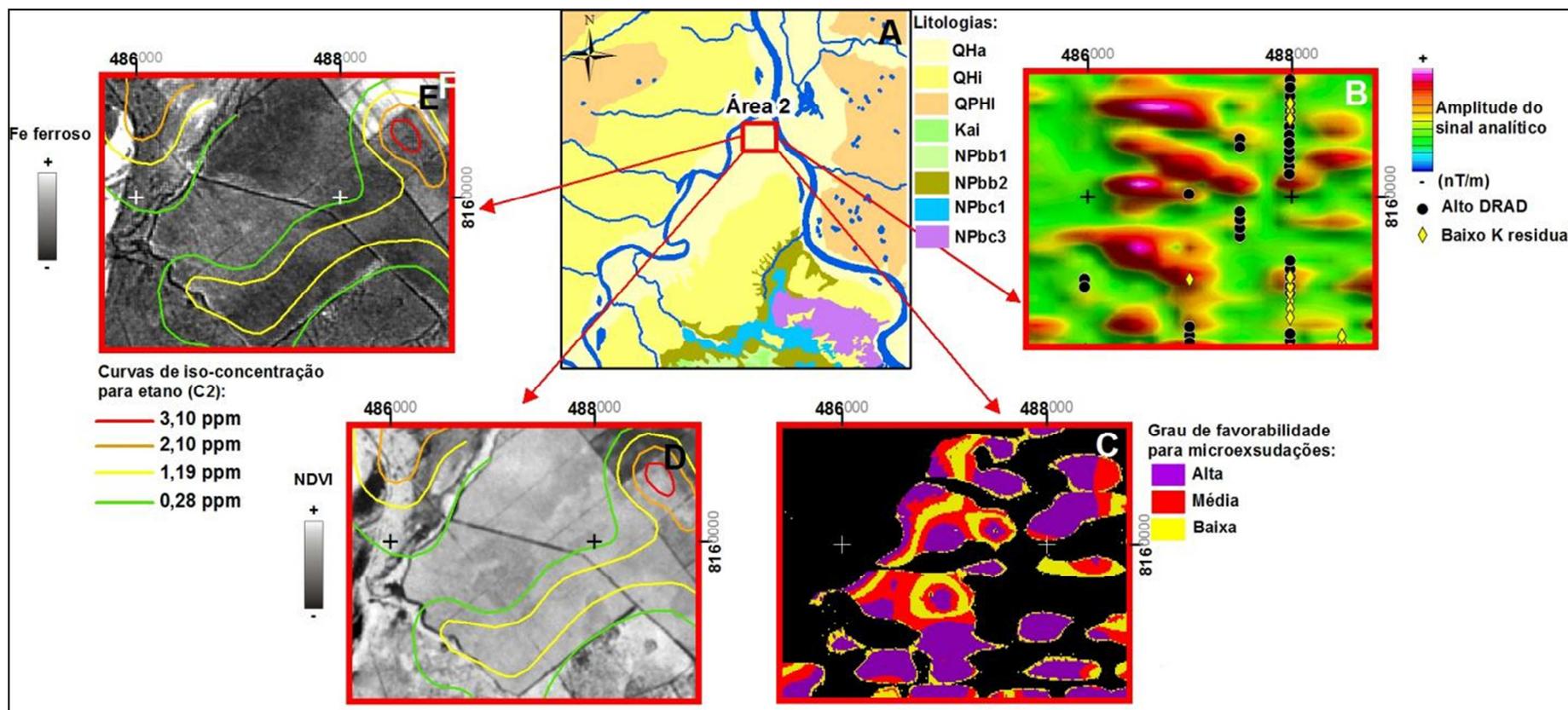


FIGURA 6.6 – Figura esquemática mostrando a relação de todos os indicadores encontrados na segunda área potencial selecionada (área 2), validados pelas curvas de iso-concentração de hidrocarbonetos. **A:** Mapa geológico da região de estudo, indicando a localização da área 2. **B:** Altos valores DRAD e baixo K residual, sobrepostos à amplitude do sinal analítico de ordem 1, cujo indicadores são médio/altos magnéticos. **C:** Classes de favorabilidade obtidos pela lógica Fuzzy. **D:** NDVI. Indicador: variações escuras dos pixels. **E:** Concentração de Fe^{2+} . Indicador: pixels claros.

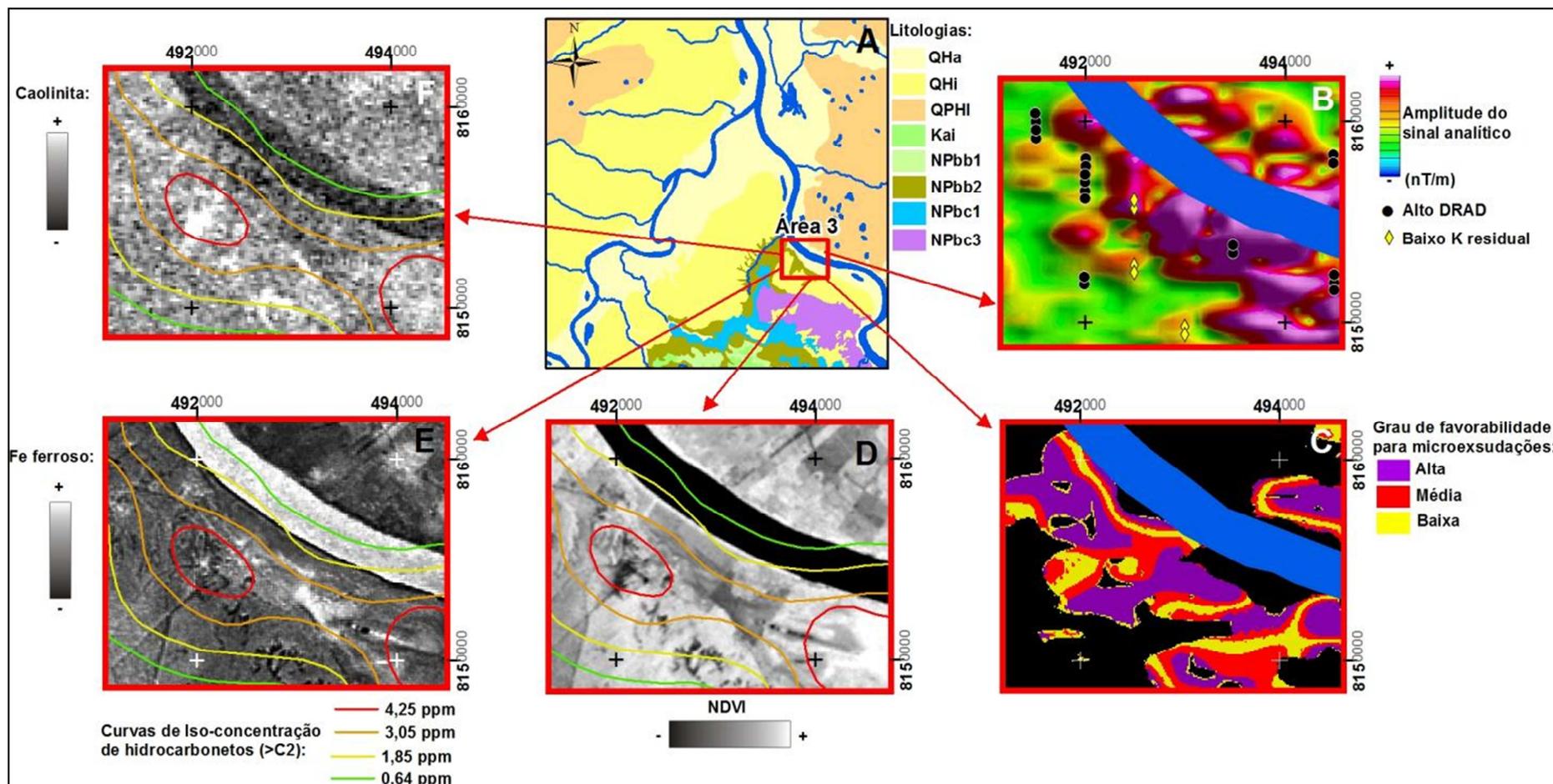


FIGURA 6.7 – Figura esquemática demonstrando a relação de todos os indicadores encontrados na terceira área potencial selecionada (área 3), validados pelas curvas de iso-concentração de hidrocarbonetos. **A:** Mapa geológico da região de estudo, indicando a localização da área 3. **B:** Altos valores DRAD e baixo K residual, sobrepostos à amplitude do sinal analítico de ordem 1, cujo indicadores são médio/altos magnéticos. **C:** Classes de favorabilidade obtidos pela lógica Fuzzy. **D:** NDVI. Indicador: variações escuras dos pixels. **E:** Concentração de Fe^{2+} . Indicador: pixels claros. **F:** concentração de caulinita. Indicador: pixels claros.

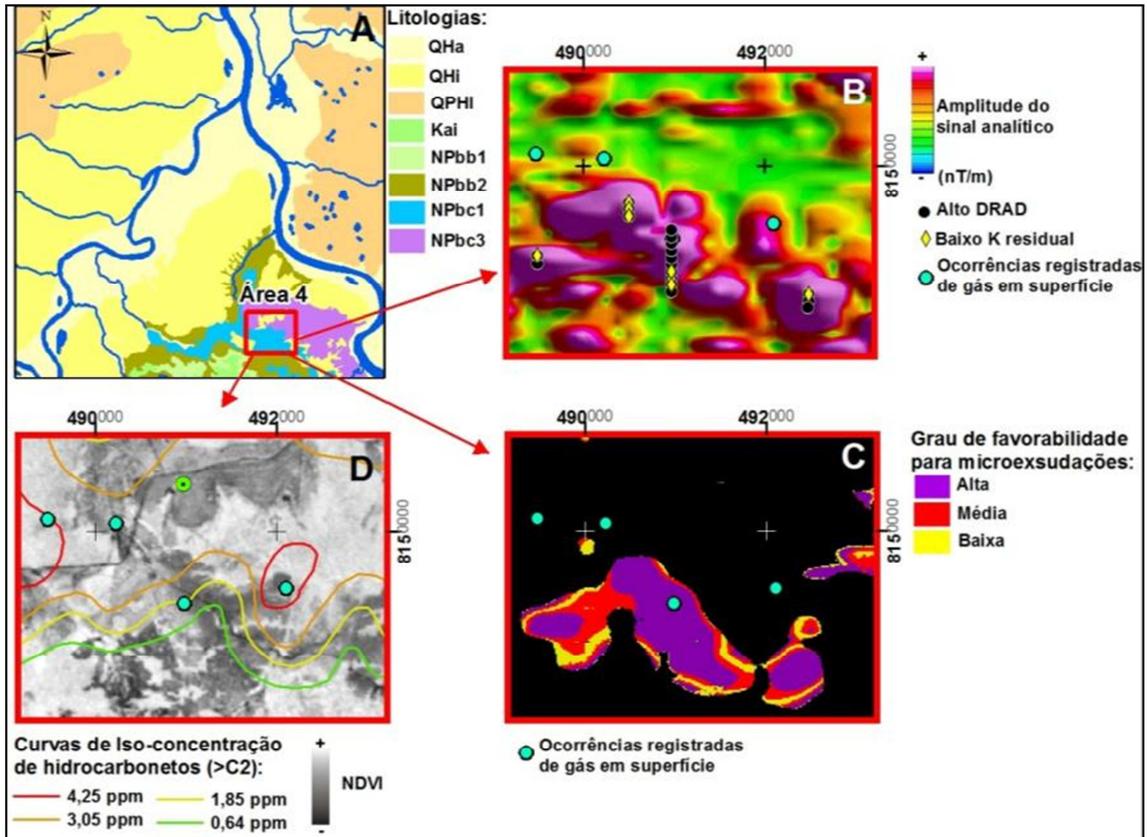


FIGURA 6.8 – Figura esquemática mostrando a relação de todos os indicadores encontrados na terceira área potencial selecionada (área 4), validados pelas curvas de iso-concentração de hidrocarbonetos e ocorrências registradas de escape de gás em superfície. **A:** Mapa geológico da região de estudo, indicando a localização da área 4. **B:** Altos valores DRAD e baixo K residual, sobrepostos à amplitude do sinal analítico de ordem 1, cujo indicadores são médio/altos magnéticos. **C:** Classes de favorabilidade obtidos pela lógica Fuzzy. **D:** NDVI. Indicador: variações escuras dos pixels.

6.2 ANÁLISE ESTRUTURAL E SUA RELAÇÃO COM AS MICROEXSUDAÇÕES

A identificação do conjunto de estruturações que podem estar relacionadas a percolação de hidrocarbonetos desde sua origem até a superfície é fundamental para a otimizar a compreensão das possíveis microexsudações definidas neste estudo.

A subtração entre as continuações ascendentes de 1200m e 400m mostra as assinaturas magnéticas provenientes da seção sedimentar entre o embasamento e a superfície. Este processo realizou a atenuação de grandes comprimentos de onda, provenientes de fontes mais profundas, realçando as respostas pertinentes somente à faixa de profundidade de interesse. Esta profundidade seria referente a uma estimativa em torno de 1,25km, fornecida pela interpretação do espectro de potência do campo magnético anômalo. O gradiente horizontal deste produto (GHS) mostrou relações importantes de continuidade com as estruturas tectônicas rasas observadas na amplitude do sinal analítico de ordem 1 e os sentidos dos rios Paracatu e São Francisco, permitindo a avaliação de possíveis estruturas intra-sedimentares que estariam interligando a fonte dos hidrocarbonetos e seu escape em superfície (Figura 6.8). Deslocamentos laterais entre as assinaturas destes dois produtos foram observados, justificados pela própria natureza do gradiente horizontal que, diferentemente da amplitude do sinal analítico, expõe os contrastes laterais dos corpos magnéticos e não centraliza suas assinaturas em relação às fontes, a não ser que seja reduzido ao polo (Phillips 2000).

A amplitude do sinal analítico de ordem 1 mostra lineamentos magnéticos próximos a superfície com direção preferenciais de N70-75W e aproximadamente EW, e que se correspondem com as direções de alguns trechos dos rios Paracatu e São Francisco e seus afluentes. Como foi mostrado ao longo desse trabalho, estas assinaturas possuem forte correspondência com as anomalias radiométricas, as curvas de iso-concentração de hidrocarbonetos e as observações registradas de gás na área. Portanto, é possível associar estes lineamentos como parte do sistema estrutural que controla a passagem e o escape de HCs. O GHS também contém assinaturas com essas direções, demonstrando a continuidade desses elementos ao longo da seção sedimentar.

A análise estrutural destes dados foi limitada devido à falta de informações provenientes de mapeamentos geológicos de campo na região, justificada pelo

predomínio da cobertura de sedimentos recentes. Porém, foi utilizado o trabalho de Oliveira (1998), que expõe medidas estruturais obtidas em trabalho de campo na área de estudo e arredores. As estruturas mapeadas por Oliveira (1998) que mais se aproximam dessas assinaturas magnéticas observadas são: (i) planos de juntas N70W, 10Km a leste de Ponto Chique; (ii) planos de junta N70-80W, nas proximidades de Santa Fé de Minas.

As direções NS e N30E também foram mapeadas por este mesmo autor nos afloramentos do Grupo Bambuí, a SE da área de estudo, e podem ser observadas somente na imagem do GHS. Isso indica que provavelmente estas estruturas são mais profundas e provavelmente mais antigas do que aquelas observadas na amplitude do sinal analítico de ordem 1. A estruturação N30E, é regionalmente paralela ao lineamento Transbrasiliano (Schobbenhaus *et al.* 1975), reflexo do evento orogênico Brasileiro (Strieder *et al.* 1994).

A imagem da continuação ascendente de 1200m (Figura 6.9) ilustra as assinaturas magnéticas relacionadas a grandes comprimentos de onda, provenientes de fontes profundas. Esta profundidade foi estimada, através da interpretação do espectro de potência, em 2,25Km. É possível observar uma compartimentação de altos e baixos magnéticos de baixa frequência, provenientes de fontes do embasamento, que marcam fortemente as direções N20E e N80W, mas que não podem ser diretamente interpretados como altos e baixos estruturais. Porém, segundo a interpretação sísmica realizada por Teixeira *et al.* (1993) e Hercos *et al.* (2008), que enfoca a serra da Água Fria, à leste da região de estudo, o embasamento da bacia é caracterizado por blocos escalonados separados por falhas (*horts* e grábens). Portanto, é possível associar essa compartimentação magnética de baixa frequência à feições estruturais de *horts* e grábens. Porém, é necessário um estudo sísmico de maior detalhe nesta porção da bacia para verificar essa possibilidade.

Algumas feições curvilíneas e circulares são observadas no GHS (Figura 6.9). Nos trabalhos de interpretação sísmica já realizados com a linha sísmica 240-060, que atravessa a região de estudo (Teixeira *et al.* 1993, Martins-Neto 2005, Coelho *et al.* 2008, Hercos *et al.* 2008), não foi detectado nenhum corpo intrusivo ou dobramentos apertados que configurariam uma resposta similar. Porém, a resolução do levantamento sísmico nessa região não é suficiente para se obter informações muito próximas da

superfície. Isso indica que, a região de estudo e o tema abordado neste tópico merecem uma continuidade, como por exemplo, com levantamentos geofísicos de maior detalhe.

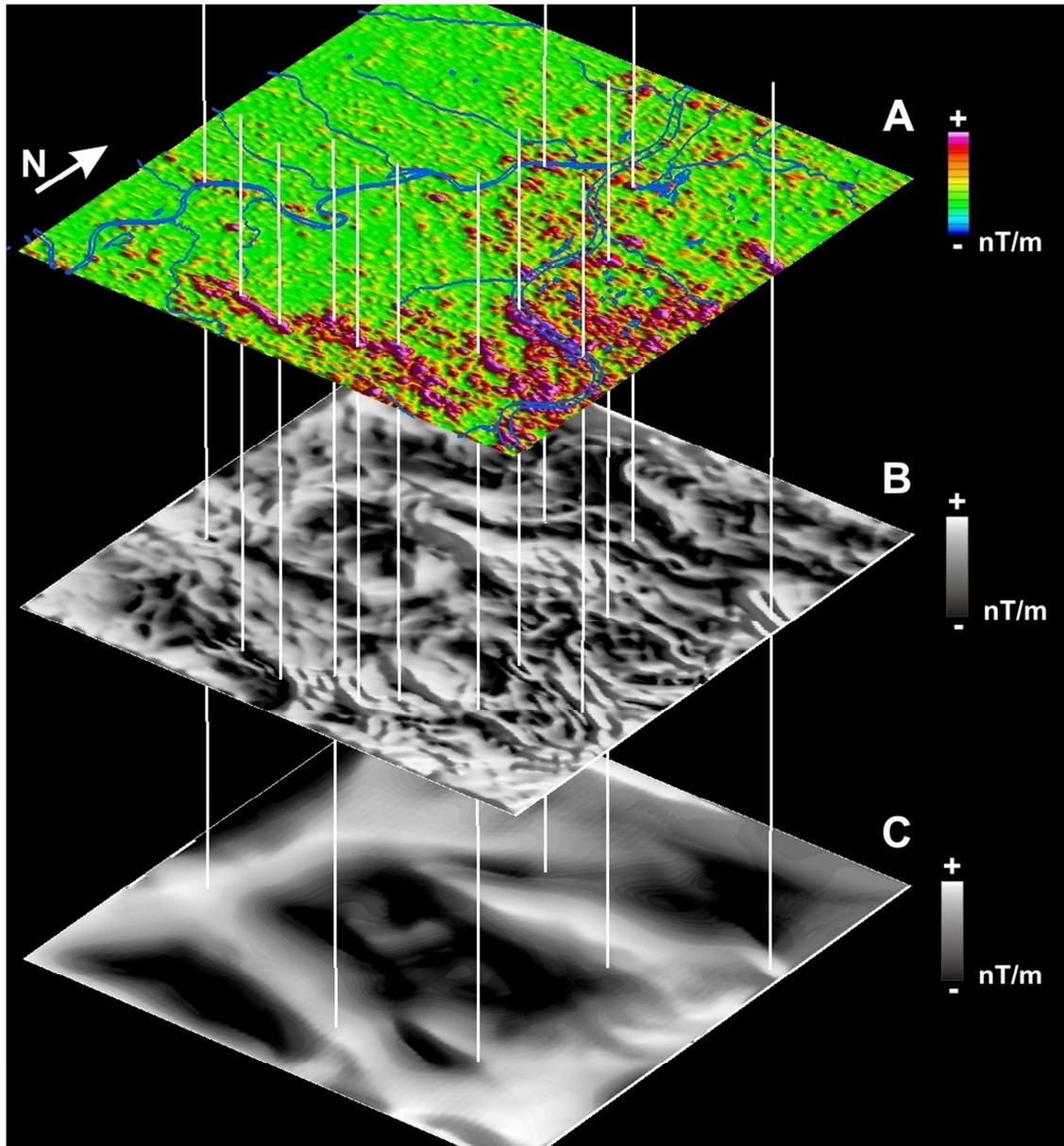


FIGURA 6.9 – Mapas em 2,5D indicando a correlação entre os lineamentos magnéticos em profundidade. **A:** amplitude do sinal analítico de ordem 1, expondo as estruturas mais rasas definidas neste estudo. **B:** GHS (Gradiente horizontal da subtração entre as continuações ascendentes de 1200 e 400m), expondo as estruturas geológicas intra-sedimentares. **C:** gradiente horizontal da continuação ascendente de 1200m, expondo as assinaturas geofísicas provenientes de fontes profundas, provavelmente do embasamento.

6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A detecção de microexsudações com a utilização da geofísica aérea foi significativamente eficiente diante aos dados geoquímicos que foram utilizados para a validação dos resultados. A metodologia adotada teve como base técnicas sugeridas na literatura, mas também englobou procedimentos complementares que foram desenvolvidos ao longo deste estudo e que otimizaram a qualidade dos produtos finais.

A utilização de dados gamaespectrométricos foi estratégico no sentido de apontar com certa precisão várias ocorrências já existentes de microexsudações, enquanto as demais devem ser alvos potenciais para investigações futuras de maior detalhe. A técnica da normalização pelo tório foi essencial na obtenção dos resultados de K residual e DRAD, onde foram detectadas variações sutis e locais, sem a influência de contextos regionais, tais como a geologia ou produtos de intemperismo.

A magnetometria levou à indicação de possíveis anomalias micro-magnéticas, mas que estariam mascaradas pelos lineamentos magnéticos próximos a superfície. De qualquer forma, estes lineamentos exercem suma importância na sua associação com estruturas tectônicas rasas, as que seriam os condutos dos hidrocarbonetos até o seu escape em superfície. Estes lineamentos mais rasos foram obtidos pela amplitude do sinal analítico de ordem 1, ou seja, seu posicionamento está centralizado em relação a fonte. Devido a isso, há uma grande correspondência entre essas respostas magnéticas e os resultados radiométricos. A partir dessa integração, já foi possível obter um mapa de áreas potenciais para as microexsudações. E a geração de um mapa de favorabilidade por lógica *fuzzy*, utilizando-se dessas variáveis geofísicas, apresentou-se como uma alternativa para a indicação de novas áreas potenciais e para a observação da dinâmica dos efeitos causados pelos hidrocarbonetos em superfície.

Os gradientes horizontais das continuações ascendentes de 1200m e 400m, e a subtração entre eles, forneceram uma maior compreensão sobre a natureza das estruturas geológicas, pouco mapeadas na região, e sua relação com a passagem de hidrocarbonetos.

As anomalias geobotânicas foram detectadas no NDVI em grande parte das áreas potenciais apontadas pela geofísica. A sua análise na área de estudo, como um todo, foi dificultada, devido a diversidade vegetal encontrada.

Da mesma forma, anomalias geofísicas apontaram maiores concentrações de caulinita e Fe^{2+} nas imagens ASTER processadas. Ou seja, as feições espectrais típicas, que foram propostas na literatura, foram encontradas de forma relevante nas áreas favoráveis para a ocorrência de microexsudações.

6.4 RECOMENDAÇÕES

Algumas recomendações, que poderão ser utilizadas futuramente, a fim de complementar e otimizar esta pesquisa, seguem descritas abaixo.

Resolução dos dados geofísicos

Para que os dados magnéticos forneçam resolução adequada para o realce de anomalias micro-magnéticas é necessário que o espaçamento das linhas de voo respeite o que é proposto pela teoria da amostragem (Davis 1986). Portanto, se a anomalia possuir cerca de 500m de extensão, em superfície, o espaçamento das linhas de voo deverá ter, no máximo, 250m de espaçamento.

Além da configuração das dimensões em 2D dessas anomalias, elas também são caracterizadas por altas frequências, o que ressalta a importância de aproximação do sensor em relação à superfície. Neste caso, os levantamentos terrestres possuem vantagens significativas.

Portanto, devido à natureza da anomalia micro-magnética, recomenda-se levantamentos aéreos ou terrestres, preferencialmente gradiométricos, com espaçamento de linhas de produção de 250m para a sua detecção efetiva.

Após a obtenção dos dados magnéticos, um procedimento que pode ser adotado para a análise minuciosa de altas frequências é a observação em perfil destas assinaturas ao longo de cada linha de voo. Porém, é importante ressaltar que quanto maior a resolução dos dados, melhor será a razão sinal/ruído e menor será a possibilidade de alguns picos ruidosos serem confundidos com respostas de interesse.

Redução ao polo

A redução ao polo foi testada neste estudo com o uso de dois algoritmos (Grant & Dodds 1972, Phillips 2007) e ambos resultaram em imagens com a presença de

ruídos coerentes com a direção da declinação magnética. Este fato pode ter sido causado pela anomalia de Pirapora, caracterizada por ser um grande corpo magnético profundo, com pelo menos 5000m de profundidade, e apresentar polaridade invertida (Borges & Drews 2001). Isso ilustra que o conteúdo de magnetização remanescente seria maior de que magnetização induzida, visto que os valores de inclinação e declinação não são tão baixos: $-21,524^\circ$ e $-26,098^\circ$, respectivamente.

Uma vez que, a análise de estruturas tectônicas rasas foi um dos focos deste estudo, a imagem da amplitude do sinal analítico de ordem 1 foi utilizada como produto principal para estabelecer a relação de lineamentos magnéticos e as microexsudações, já que este produto centraliza as anomalias em relação às suas fontes (Roest *et al.* 1992). Porém, para a análise de feições magnéticas nas continuações ascendentes do campo magnético anômalo, foram produzidos os gradientes horizontais destas imagens e estes produtos forneceriam assinaturas mais acuradas se a redução ao polo pudesse ser aplicada aos dados, também centralizando feições mais profundas em relação às suas fontes.

Assim, enfatiza-se a importância para que, em estudos posteriores, algoritmos mais robustos sejam testados na tentativa de posicionar anomalias sobre as fontes causadoras.

Trabalho de campo

Recomenda-se o trabalho de campo nas áreas potenciais indicadas neste estudo. Este trabalho pode ser composto por: (i) coleta geoquímica para a gasometria e validação dos alvos; (ii) amostragem geoquímica de solo e rocha para a verificação das anomalias indicadas pelas anomalias gamaespectrométricas e de sensoriamento remoto; (iii) detalhamento geofísico para a caracterização de anomalias micro-magnéticas; (iv) e o mapeamento de estruturas geológicas e a verificação das principais direções apontadas pelos lineamentos magnéticos.

Levantamentos sísmicos

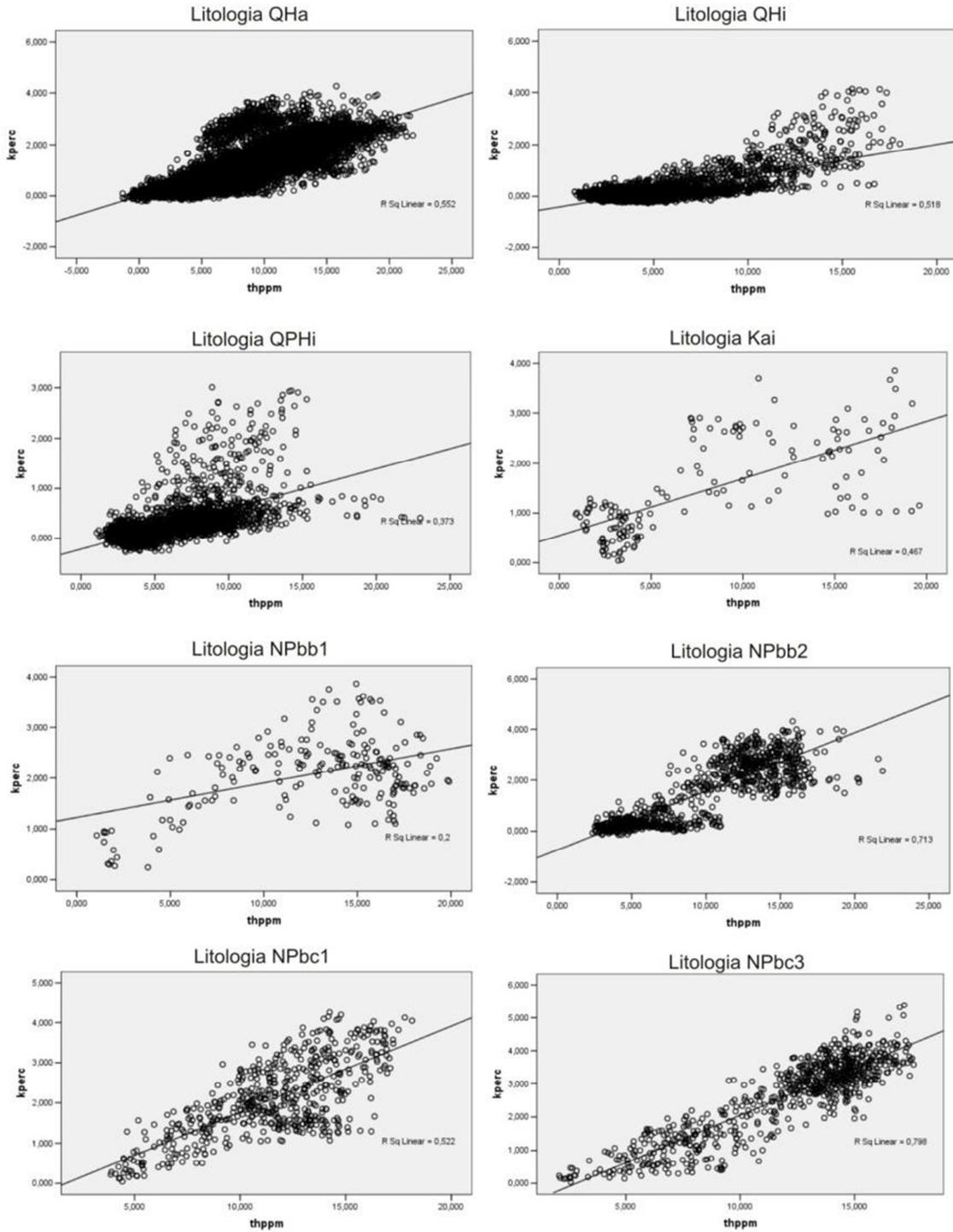
A linha sísmica que atravessa a área de estudo, 240-060, possui direção NW e possui resolução ideal para o mapeamento de estruturas relativas ao embasamento da bacia (Hercos *et al.* 2008). De acordo com as principais direções das estruturas

Capítulo 6 – Discussões e Conclusões

tectônicas observadas nos resultados desse estudo, a direção preferencial para o levantamento de uma linha sísmica na área de estudo seria de aproximadamente N10E.

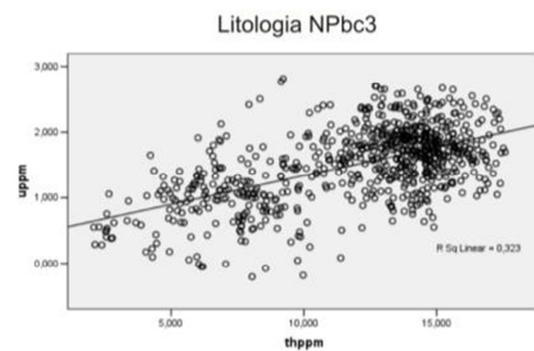
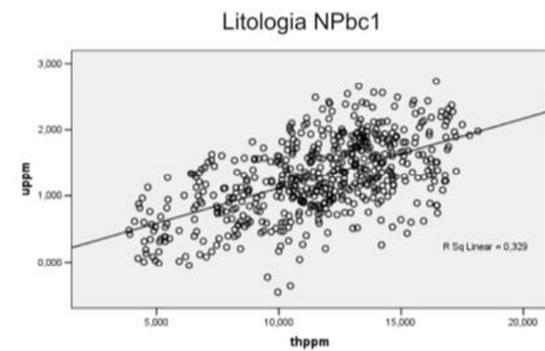
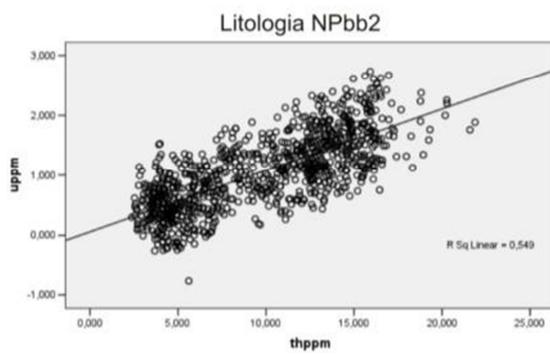
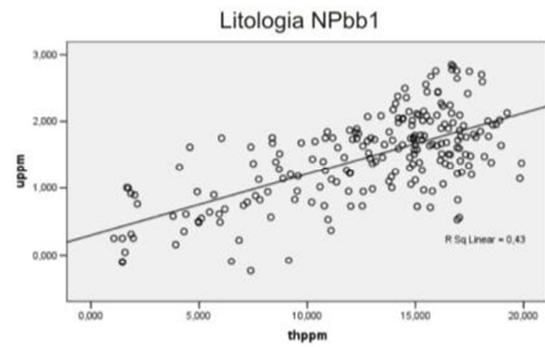
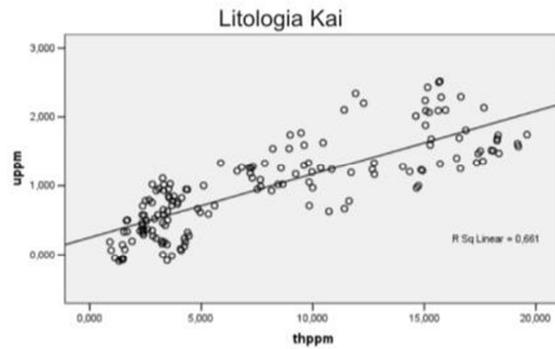
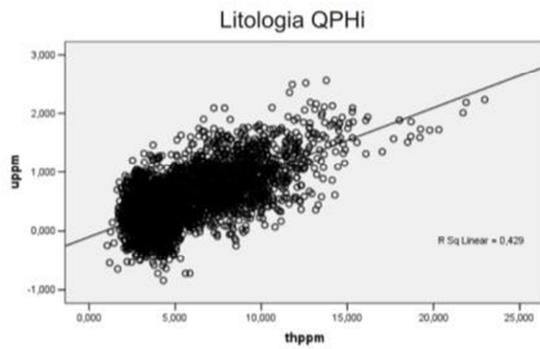
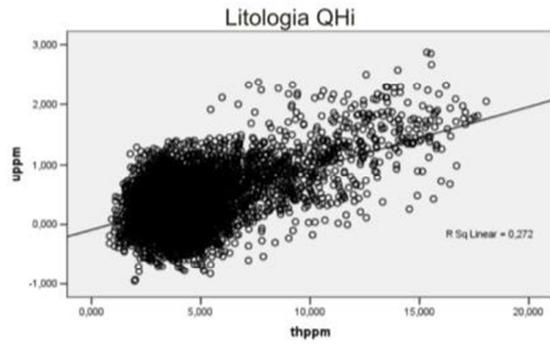
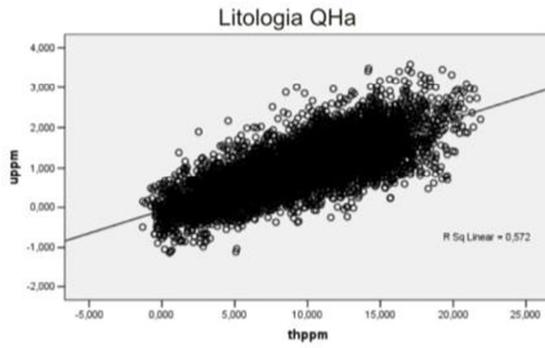
ANEXO 1

Gráficos de regressão linear de K vs eTh para cada litologia da área de estudo



ANEXO 2

Gráficos de regressão linear de eU vs eTh para cada litologia da área de estudo



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A

- Alkmim F.F., Brito Neves B.B., Castro Alves J.A. 1993. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco – Uma Revisão. *In: Dominguez, J.M.L. & Misi, A. (ed.) O Cráton do São Francisco*. Salvador, SBG/Núcleo BA/SE, p.45-62.
- Alkmim F.F. & Martins-Neto M.A. 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. *In: Pinto C.P. & Martins-Neto M. A. (ed.) A Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Naturais*. SBG/Núcleo MG, p.9-30.
- Alkmim F.F. 2004. O que faz de um cráton um cráton? O cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. *In: Mantesso-Neto V. et al. (ed.) Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, p.17-34.
- Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Rev.Bras.Geoc.*, **7**: 285-295.
- Almeida F.F.M. 1981. O Cráton do Paramirim e sua relação com o do São Francisco. *In: SBG/Núcleo BA/SE, Simp. do Cráton São Francisco e suas Faixas Marginais*. Salvador, *Anais*, p.1-10.
- Almeida-Filho R. 2002. Remote detection of hydrocarbon microseepage areas in the Serra do Tonã region, Tucano basin, Brasil. *Can.J.Remote Sensing*, **28**(6): 750-757.
- An P., Moon W.M., Rencz A. 1991. Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, **27**: 1-11.
- Angenoli M.T. 2003. Elementos intervenientes na tomada de decisão. *Ci. Inf.*, **32** (1): 17-22.
- Augusto V.A., Souza Filho C.R., Almeida-Filho R. 2005. Caracterização de exsudações de hidrocarbonetos na Bacia do São Francisco-MG por meio de imagens ASTER. *In: Congr. Bras. de Sensoriamento Remoto, 12, Goiânia, Anais*, p.1733-1740

B

- Babinski N.A & Santos R.C.R. 1987. Caracterização geoquímica das exsudações de Buritizeiro – MG, Bacia do São Francisco – Avaliação Preliminar. *Rel. Int. Rio de Janeiro – Petrobrás/Cenpes/Segeq*, 1-12.
- Baranov V. 1957. A new method for the interpretation of aeromagnetic maps: pseudogravimetric anomalies. *Geophysics*, **22**:359-383.
- Baranov V. & Naudy H. 1964. Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics*, **29**: 67-79.
- Berger Z., Davies J., Thompson R.T. 2002. Integrated analysis of high-resolution aeromagnetic (HRAM) and RADARSAT-1 imagery for exploration in mature and frontier basins. *In: D. Schumacher & L.A LeShack (ed.) Surface Exploration Case Histories. Applications of geochemistry, magnetics, and remote Sensing*. A.A.P.G studies en Geology N° 48 and SEG geophysical references series N°.11, Tulsa, p. 345-360.

- Blakely R.J. & Simpson R.W. 1986. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, **51**:1494-1498.
- Blakely R.J. (eds.) 1996. *Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications*. Cambridge University Press, 441p.
- Blum, M.L.B. 1999. *Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil Central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral*. Tese de Doutorado 30, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 229 p. Publicado na internet no endereço <http://www.unb.br/ig/posg/dout/tese030/> e disponível em 14/06/2008.
- Bonham-Carter G.F. & Graeme F. (eds.) 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Pergamon Press, Tarrytown, N.Y., 398p.
- Borges A.J. & Drews M.G.P. 2001. Características Magnetométricas da Bacia do São Francisco em Minas Gerais. In: Pinto C.P. & Martins-Neto M. A. (ed.) *A Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Naturais*. SBG/Núcleo MG, p.55-66.
- Briggs I.C. 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, **39**: 39-48.
- Brito Neves B.B., Van Schmus W.R., Santos E.J., Campos Neto M.C., Kozuch, M. 1995. O evento Cariris Velhos na província Borborema: integração de dados, implicações e perspectivas. *Rev.Bras.Geoc.*, **25**: 279-296.
- Brito Neves B.B., Sá J.M., Nilson A.A., Botelho N.F. 1996. A tafrogênese estateriana nos blocos paleoproterozóicos da América do Sul e processos subsequentes. *Geonomos*, **3**: p. 1-21.
- Brown A. 2000. Evaluation of possible gas microseepage mechanisms. *AAPG Bulletin*, **84** (11): 1775-1789.

C

- Campos J.E.G. 1996. Estratigrafia, sedimentologia, evolução tectônica e geologia do diamante na porção centro-norte da Bacia Sanfranciscana. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 204p.
- Campos J.E.G., Dardenne M.A., Gonzaga G.M., 1992. Registros da glaciação permo-carbonífera na região de Canabrava e Santa Fé de Minas, MG. *Rev.Esc.Min.*, **6** (45): 109-111.
- Campos J.E.G. & Dardenne M.A. 1994. A glaciação neopaleozóica na porção meridional da Bacia Sanfranciscana. *Rev.Bras.Geoc.*, **24** (2): 65-76.
- Campos J.E.G. & Dardenne M.A. 1997a. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. *Rev.Bras.Geoc.*, **27** (3): 269-282.
- Campos J.E.G. & Dardenne M.A. 1997b. Origem e evolução tectônica da Bacia Sanfranciscana. *Rev.Bras.Geoc.*, **27** (3): 283-294.
- Chiavegatto J.R.S. 1992. *Análise estratigráfica das sequências tempestísticas da Form. Três Marias (Proterozóico Sup.), na porção meridional da Bacia do São Francisco*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 196p.

- Clark R.N., Swayze G.A., Gallagher A.J., King T.V.V., Calvin W.M. 1993. The U.S. Geological Survey, Digital Spectral Library: Version 1: 0.2 to 3.0 microns. U.S. Geological Survey Open File Report 93-592, 1340p.
- Coelho J.C.C., Martins-Neto M.A., Marinho M.S. 2008. Estilos estruturais e evolução tectônica da porção mineira da bacia proterozóica do São Francisco. *Rev.Bras.Geoc*, **38** (2): 149-165.
- Costa M.T. & Grossi Sad J.H. 1968. O Cretáceo em Minas Gerais. *In: SBG, Cong. Bras. Geol. Belo Horizonte, 22. Resumo das Comunicações.*
- Ribeiro J.H. 2003. Belo Horizonte (MG): Projeto São Francisco. SE.23-V-B-VI, mapa geológico, escala 1:100.000. Disponível em: <http://www.comig.com.br>.
- Crósta, A.P (ed.) 1992. *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. Campinas, SP IG/UNICAMP, 170 p.
- Crósta A.P. & Moore J.M. 1989. Enhancement of Landsat thematic mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: A prospective case history in greenstone belt terrain. *In: Proceedins of the 7th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*, Calgary, Canada, Environmental Research Institute of Michigan, v. 2, p. 1173–1187.
- Crósta A.P., Souza Filho C.R., Azevedo F., Brodie C. 2003. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, **24**: 4233–4240.
- D**
- Dardenne M.A. 1978a. Zonação tectônica na borda ocidental do Cráton São Francisco. *In: SBG, Congr.Bras.Geol.*, 30, *Anais*, v.2, p.299-308.
- Dardenne M.A. 1978b. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. *In: SBG, Congr.Bras.Geol.*,30, *Anais*, v.2, p. 597-610.
- Dardenne M.A & Walde D.H.G. 1979. A estratigrafia dos grupos Bambuí e Macaúbas no Brasil Central. *In: SBG, Simp.Geol.MG*, 1, *Atas*, p.45-53.
- Dardenne M.A. 1981. Os grupos Paranoá e Bambuí na Faixa Dobrada Brasília. *In: SBG, Simpósio de Cráton São Francisco e suas Faixas Marginais*, 1, *Anais*, p.150-157.
- Dardenne M.A 2000. The Brasilia Fold Belt. *In: Cordani U.G., Milani A.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. (ed.) Tectonic evolution of South America*. Rio de Janeiro, Brazil, p.231-264.
- Davis J.C. (ed.) 1986. *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley & Sons, 2. ed., U.S.A., 646p.
- Dickson B.L & Scott K.M. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17** (2): 187-200.
- Dominguez J.M.L. 1993. As coberturas do Cráton São Francisco: uma abordagem do ponto de vista da análise de bacia. *In: Dominguez J.M.L. & Misi A. (ed.) O Cráton do São Francisco*. Salvador. SBG/ Núcleo BA/SE, p.137-159.

Donovan T. J. 1974. Petroleum microseepage at Cement, Oklahoma—evidence and mechanisms. *AAPG Bulletin*, **58**: 429–446.

Donovan T.J. 1981. Geochemical prospecting for oil and gas from orbital and suborbital altitudes. In: Gottlieb B.M. (ed.) *Unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas II*. Dallas, Texas, Southern Methodist University Press, p.96-115.

Ducart D.F., Crósta A.P., Souza Filho C.R., Coniglio J. 2006. Alteration mineralogy at the Cerro La Mina epithermal prospect, Patagonia, Argentina: Field mapping, shortwave infrared spectroscopy, and ASTER images. *Economic Geology*, **101**: 981–996.

Drury S. (ed) 2001. *Image Interpretation in Geology*. Blacwell Science. Reino Unido, 290p.

E

El Sadek M.A. 2002. Application of thorium-normalized airborne radio-spectrometric survey data of Wadi Araba area, North-eastern Desert, Egypt, as a guide to the recognition of probable subsurface petroleum accumulations. *Applied Radiation and Isotopes*, **57**: 121-130.

ENVI Online Help 2005. Basic Tools. Disponível em http://geol.hu/data/online_help/Basic_Tools.html. Acessado em 05 de abril de 2010.

F

Flower F.B., Gilman E.F., Leone I.A. 1981. Landfill gas, what does to trees and how its injurious effects may be prevented. *Journal of Aboriculture*, p. 43-52.

Foote R. S. 1987. Correlations of borehole rock magnetic properties with oil and gas producing areas. *Association of Petroleum Geochemical Explorationists Bulletin*, **3**: 114–134.

Foote R.S.1992. Use of magnetic field aids oil search. *Oil and Gas Journal*, May 4, p.137-142.

Foote R.S. 1996. Relationship of near-surface magnetic anomalies to oil- and gas-Producing areas. In: D. Schumacher & M.A. Abrams (ed.) *Hydrocarbon migration and its near surface expression*. A.A.P.G Memoir 66, p. 111-126.

Fugita A.M. & Clark Filho J.G. 2001. Recursos Energéticos da Bacia do São Francisco: Hidrocarbonetos Líquidos e Gasosos. In: Pinto C.P. & Martins-Neto M. A. (ed.) *A Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Naturais*. SBG/Núcleo MG, p.265-284.

G

Gausman H.W. 1974. Leaf reflectance of near-infrared. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **40**: 183-192.

GEOSOFT 2009. *OASIS Montaj 7.1*. GEOSOFT, Inc., Toronto.

Glenn W.E & Badgery R.A. 1998. High resolution aeromagnetic surveys for hydrocarbon exploration: prospect scale interpretation. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, **34**(1,2): 97-102.

Grant F.S. & Dodds J. 1972. MAGMAP FFT processing system development notes, Paterson Grant and Watson Limited.

- Grauch V.J.S. & Millegan P.S. 1998. Mapping intrabasinal faults from high-resolution aeromagnetic data. *The Leading Edge*, **17**(1):53-55.
- Grossi Sad J.H., Cardoso R.N., Costa M.T. 1971. Formações cretácicas em Minas Gerais: uma revisão. *Rev.Bras.Geoc*, **1** (1): 2-12.
- Gunn P.J. 1997a. Quantitative methods for interpreting aeromagnetic data: A subjective review. AGSO. *Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2): 105-113.
- Gunn P.J. 1997b. Regional magnetic and gravity responses of extensional sedimentary basins. AGSO. *Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2): 115-131.
- Gunn P.J. 1997c. Application of aeromagnetic surveys to sedimentary basin studies. AGSO. *Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2): 133-144.
- Guspi F. & Introcaso B. 2000. A sparse spectrum technique for gridding and separating potential field anomalies. *Geophysics*, **65**: 1154-1161.
- Green R. O. & Craig M. D. 1985. Analysis of aircraft spectrometer data with logarithmic residuals. In: Green R.O. (ed.). *Summaries of the First JPL Airborne Earth Science Workshop*. Pasadena: NASA/JPL; p.111-119 (JPL Publication, 85-41).

H

- Harbert W., Jones V.T., Izzo J., Anderson T.H. 2006. Analysis of light hydrocarbons in soil gases, Lost River region, West Virginia: Relation to stratigraphy and geological structures. *AAPG Bulletin*, **90** (5): 715-734.
- Hasui Y., Sadowski G.R., Suguio K., Fuck G.F. 1975. The Phanerozoic tectonic evolution of the Western Minas Gerais State. *Anais Academia Brasileira Ciências*, **47**: 431-438.
- Hasui Y. & Haralyi N.L.E. 1991. Aspectos lito-estruturais e geofísicos do soerguimento do Alto Parnaíba. *Geosciências*, **10**: 57-77.
- Hercos M.C., Martins-Neto M.A., Filho A.D. 2008. Arcabouço estrutural da Bacia do São Francisco nos arredores da Serra da Água Fria (MG), a partir da integração de dados de superfície e subsuperfície. *Rev.Bras.Geoc*, **38** (2): 197-212.
- Hewson R.D., Cudahy, T.J., Mizuhiko S., Ueda K., Mauger, A.J. 2004. Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill-Curnamona province of Australia. *Remote Sensing of Environment*, **99** (1-2): 159-172.
- Hewson R.D., Cudahy T.J., Mizuhiko S., Ueda K. & Mauger A.J. 2005. Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill-Curnamona Province of Australia. *Remote Sensing of Environment*, **99**: 159-172.
- Hoff H., Rolim S.B.A., Neto A.C.B. 2004. Mapeamento Aerogamespectrométrico da Alteração Hidrotermal Associada à Mineralização no Distrito Fluorítico de Santa Catarina, Brasil. *Rev.Bras.Geof.*, **22**(1): 45-55.
- Horsfall K.R. 1997. Airborne magnetic and gamma-ray data acquisition. *Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2): 23-30.

I

IAEA 2003. *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. Austria, 173p.

J

Jacobsen B. 1987. A case for upward continuation as a standard separation filter for potential field maps. *Geophysics*, **52**: 1138–1148.

Jenks George F. 1967. The Data Model Concept in Statistical Mapping. *International Yearbook of Cartography*, **7**: 186-190

K

Khan S. D. & Jacobson S. 2008. Remote sensing and geochemistry for detecting hydrocarbon microseepages. *Geological Society of America Bulletin*, **120**(1-2): 96-105.

Kalinowski A.A. & Oliver S. 2004. *ASTER processing manual*. Remote Sensing Applications, Geoscience Australia, internal report, 39 p.

Kearey P., Brooks M., Hill I. (ed.) 2009. *Geofísica de Exploração*. Oficina de Textos, São Paulo, 438p.

Klusman R. W. 2002. Interpretation and display of surface geochemical data. In: D. Schumacher & L.A. LeShack (ed.) *Surface Exploration Case Histories. Applications of geochemistry, magnetics, and remote Sensing*. A.A.P.G Studies in Geology N° 48 and SEG Geophysical References Series N° .11, Tulsa, p.1-24.

L

Lammoglia T., Souza Filho C.R., Almeida-Filho R. 2007. Caracterização de microexsudações de hidrocarbonetos na Bacia do Tucano do Norte (Ba) por geoestatística, classificação hiperspectral e redes neurais. *Rev.Bras.Geoc.*, **37**(4):798-811.

Landim P.M.B. (ed.) 2004. *Análise estatística de dados geológicos*. UNESP. São Paulo, 256p.

LeShack L.A. & Van Alstine D.R. 2002. High-resolution ground-magnetic (HRGM) and radiometric surveys for hydrocarbon exploration: Six case histories en western Canada. In: D. Schumacher & L.A. LeShack (ed.) *Surface exploration case histories. applications of geochemistry, magnetics, and remote Sensing*. A.A.P.G Studies en Geology N° 48 and SEG Geophysical References Series N° .11, Tulsa, p.: 67-156.

Li X. 2008. Magnetic reduction-to-the-pole at low latitudes: Observations and considerations. *The Leading Edge*, **27**(8): 990-1002.

Lilburn R. A. & Al-Shaieb Z. 1983. Geochemistry and isotopic composition of hydrocarbon-induced diagenetic aureole (HIDA), Cement, Oklahoma. *Oklahoma City Geological Society Shale Shaker*, pt. I, **34** (4): 40–56.

Liu Q., Chan L., Liu Q., Li H., Wang F., Zhang S., Xia X., Cheng T. 2004. Relationship between magnetic anomalies and hydrocarbon microseepage above the Jingbian gas field, Ordos Basin, China. *AAPG Bulletin*, **88** (2): 241-251.

Loughlin W.P. 1991. Principal component analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **57**: 1163–1170.

M

Macleod, I. N., Vierra, S., Chaves, A. C. 1993. Analytic signal and reduction-to-the-pole in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. *In*: SBGf, 3th Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, *Anais*, p.830-835.

Magalhães L. 1988. *Análise estrutural qualitativa dos sedimentos do Grupo Bambuí, região sudeste da Bacia do São Francisco (Faixa Sete Lagoas – Serra do Cipó)*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 109p.

Marini O.J., Fuck R.A., Danni J.C., Dardenne M.A., Loguercio S.O., Ramalho R. 1984. As faixas de dobramento Brasília, Uruaçu e Paraguai-Araguaia e o Maciço Mediano de Goiás. *In*: Schobbenhaus C., Diógenes A.C., Derge G.R., Asmos M.G (ed.). *Geologia do Brasil*. DNPM, p. 251-303.

Martins M. & Lemos V.B. 2007. Análise Estratigráfica das sequências neoproterozóicas da Bacia do São Francisco. *Rev.Bras.Geoc*, **37** (4): 156-167.

Martins-Neto M.A. 2005. A Bacia do São Francisco: Arcabouços estratigráfico e estrutural com base na interpretação de dados de superfície e subsuperfície. *In*: SBG, 3rd Simpósio de Cráton São Francisco, Salvador, 1, *Anais*, p.283-286.

Martins-Neto M.A. 2009. Sequence stratigraphic framework of Proterozoic successions in eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, **26**: 163-176.

Martins-Neto M.A & Alkmim F.F 2001. Estratigrafia e evolução tectônica das bacias neoproterozóicas do paleocontinente São Francisco e suas margens: Registro da quebra do Rodínia e Colagem do Gondwana. *In*: Pinto C.P. & Martins-Neto M. A. (ed.) *A Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Naturais*. SBG/Núcleo MG, p.31-54.

Meneses P.R. & Ferreira Júnior L.G. 2001. Comportamento espectral de minerais e rochas. *In*: P.R Meneses & J.S. Madeira Neto J.S. (ed.) *Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais*. Brasília, DF: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 63-123.

Milligan P.R. & Gunn P.J. 1997. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. *AGSO - Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2): 63-75.

N

Nabighian M.N.1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, **37**:507-517.

Nabighian M.N.1974. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, **39**: 85-92.

Nabighian, M. N. 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: fundamental relations. *Geophysics*, **49**, 780-786.

- Nabighian M.N., Grauch V.J.S., Hansen R.O., LaFehr T.R., Li Y., Peirce J.W., Phillips J.D., Ruder M.E. 2005. The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, **70**(6): 33-61.
- Ninomiya Y. 2004. Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. *In: Proceedings of SPIE, International Society for Optical Engineering*, 5234, p.180-190.
- Noomen M.F., Skidmore A.K., Van der Meer F.D. 2003. Detecting the influence of gas seepage on vegetation, using hyperspectral remote sensing. Presented in the 3th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Herrsching.
- Noomen M. F., Skidmore A.K., Van der Meer F.D., Smith M.K.L, Steven M.D., Colls J.J. 2004. The Influence of Gas Pipeline Leakage on Plant Development and Reflectance. *In: Proceedings of Asian Conference on Remote Sensing, ACRS 2004 Silver jubilee, Chiang Mai, Thailand, 25, p. 637-642.*
- Noomen M.F. 2007. *Hyperspectral reflectance of vegetation affected by underground hydrocarbon gas seepage*. Tese de Doutorado, ITC, Enschede, the Netherlands (ITC), 167p.
- Novo E.M.L. de M. (ed.) 2008. *Sensoriamento Remoto. Princípios e Aplicações*. Blucher, 363p.

O

- Oliveira W.J. 1998. *Caracterização das Emissões 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*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 239p.
- Oliveira W.J. & Crósta A.P. 1996. Detection of hydrocarbon seepage in the São Francisco Basin, Brazil, through Landsat TM, soil geochemistry and airborne spectrometry data integration. *In: Proceedings of the 17th Thematic Conference and Workshops on Applied Geologic Remote Sensing, Las Vegas, Nevada, v.1, p.155-165.*

P

- Patrus M.L.R.A., Santos A.C.S dos., Figueiredo V.L.S., Matos, A.R., Menezes I.C.R. 2001. Parcela mineira da bacia do rio São Francisco: caracterização hidroclimática e avaliação dos recursos hídricos de superfície. Pinto C.P. & Martins-Neto M. A. (ed.) *A Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Naturais*. SBG/Núcleo MG, p. 285-326
- Phillips J.D. 1979. ADEPT, A program to estimate depth to magnetic basement from samples magnetic profiles: U.S. Geological Survey Open File Report No. 79-367.
- Phillips J.D. 1997. Potential Field Geophysical Software for the PC, version 2.2. U.S. Geological Survey Open File Report No. 97-725.
- Phillips J.D. 2000. Locating magnetic contacts: A comparison of the horizontal gradient, analytic signal, and local wavenumber methods. *In: 70th Annual Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 402-405.
- Phillips J.D. 2001. Designing matched bandpass and azimuthal filters for the separation of potential-field anomalies by source region and source type. *In: 15th Geophysical*

Conference and Exhibition, Australian Society of Exploration Geophysicists, *Expanded Abstracts*, CD-ROM.

Phillips J.D. 2007. Geosoft eXecutables (GX's) developed by U.S Geological Survey, version 2.0, with notes on GX development from Fortran code: U.S. Geological Survey Open-File Report 2007, 1355p.

Pimentel M. M., Fuck R.A., Jost H., Ferreira Filho C.F., Araújo S.M. 2000. The basement of the Brasília Fold Belt and the Goiás Magmatic Arc. *In: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. (ed.) Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, p.195-230.

Pires A.C.B. 1995. Identificação Geofísica de Áreas de Alteração Hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Rev.Bras.Geoc*, **25**(1): 61-68.

Pflug R. & Renger F. 1973. Estratigrafia e evolução geológica da margem sudeste do Cráton Sanfranciscano. *In: SBG, Congr.Bras.Geol., Aracaju, 27. Anais*, 1 (2): p.5-19.

Pontual S., Merry N. & Gamson P. 1997. *Spectral Interpretation Field Manual*. G-MEX. AusSPpec International, 169 pp.

Price L. C. 1986. A critical review and proposed working model of surface geochemical exploration. *In: Davidson M.J. (ed.) Unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas IV*. Dallas, Southern Methodist University Press, p. 245–304.

R

Roger J.J.W 1996. A history of the continents in the past three billion years. *Journal Of Geology*, **104**: 91-107.

Rowan L.C. & Mars. J.C. 2003. Lithologic mapping in the Montain Pass, California area using Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radimeter (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, **84**: 350-366.

Reeves C. (ed.) 2005. *Aeromagnetic Surveys. Principles, Practice & Interpretation*. Geosoft., 155p.

Roest W.R., Verhoef J., Pilkington M. 1992. Magnetic interpretation using 3D analytic signal. *Geophysics*, **57**: 116-125.

Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., Harlan J.C. (ed.) 1974. *Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation*. Pasadena: JPL Publication (NASA/GSFC), 151 p.

S

Saunders D.F., Terry A.S., Thompson C.K. 1987. Test of National Uranium Resource Evaluation gamma-ray spectral data in petroleum reconnaissance. *Geophysics*, **52** (11): 1547-1556.

Saunders D.F., Burson K.R., Thompson C.K. 1991. Observed relation of soil magnetic-susceptibility and soil-gas hydrocarbon analyses to subsurface hydrocarbon accumulations. *AAPG Bulletin*, **75**: 389-408.

- Saunders D.F., Burson K.R., Branch J.F., Thompson C.K. 1993. Relation of thorium-normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations. *Geophysics*, **58**(10):1417-1427.
- Saunders D.F., Burson K.R., Thompson C.K. 1999. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations. *A.A.P.G. Bulletin*, **83**: 170-185.
- Saunders D.F., Burson K.R., Brown J.J., Thompson C.K., 2002. Combined geologic and surface geochemical methods used to discover Agaritta, Brady Creek, Selden, and New Year'95 fields, Concho Country, Texas, U.S.A. In: D. Schumacher & L.A. LeShack (ed.) Surface exploration case histories. *Applications of geochemistry, magnetics, and remote Sensing*. A.A.P.G Studies en Geology N° 48 and SEG Geophysical References Series N° 11, Tulsa, p. 209-242.
- Sawasato E.Y. 1995. *Estruturação da porção meridional da Bacia Alto-Sanfranciscana - Cretáceo do oeste de Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado. UFOP. Ouro Preto. 127pp.
- Sawatzky D.L., Raines G.L., Bonham-Carter G.F., Looney C.G. 2004. Spatial Data Modeller (SDM): ArcMAP 9.3 Geoprocessing tools for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural networks. <http://www.ige.unicamp.br/sdm/ArcSDM3/>.
- Schumacher D. 1996. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments, In: D. Schumacher & M.A. Abrams (ed.) *Hydrocarbon migration and its near surface expression*. A.A.P.G Memoir 66, p. 71-89.
- Schumacher D. & Abrams M.A. (ed.) 1996. *Hydrocarbon migration and its near surface expression*. A.A.P.G Memoir 66. The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, 441p.
- Seer H.J., Moraes L.C., Fogaça A.C.C 1987. Faciologia e estruturação tectônica dos metassedimentos com diamictitos e jaspilitos da região de Lagoa Formosa, MG (Grupo Bambuí?). In: SBG, Simp. Geol. Minas Gerais, 4, *Atas*, p.199-213.
- Seer H.J. & Moraes L.C 1988. Estudo petrográfico das rochas ígneas alcalinas da região de Lagoa Formosa, MG. *Rev.Bras.Geoc.*, **18** (2): 134-140.
- Seer H.J., Moraes L.C., Fogaça A.C.C 1989. Roteiro Geológico para a região de Lagoa Formosa – Chumbo – Carmo do Paranaíba – MG. Belo Horizonte, *SBG, Boletim* 9, 58p.
- Sgarbi G.N.C. 1989. *Geologia da Formação Areado: Cretáceo Inferior a Médio da Bacia Sanfranciscana, oeste do estado de Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, UFRJ, 342p.
- Sgarbi P.B.A. 1991. Petrography and general chemical features of potassic mafic to ultramafic alkaline volcanic rocks of Mata da Corda Formation, Minas Gerais state, Brazil. In: International Kimberlite Conference, 5, *Extended Abstracts*, p.359-360.
- Sgarbi G.N.C., Sgarbi P.B.A., Campos J.E.G., Dardenne M.A., Penha U.C. 2001. Bacia Sanfranciscana: o registro fanerozóico da Bacia do São Francisco. In: Pinto C.P. & Martins-Neto M. A. (ed.) *A Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Naturais*. SBG/Núcleo MG, p.93-138.

- Schobbenhaus Filho C. 1975. *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Folha Goiás (SD22)*. DNPM, Brasília.
- Soares M.S., Koppe J.C., Costa J.F.C.L., Rolim S.B. 2004. Interpretação das anomalias de potássio hidrotermal e parâmetro F da região do complexo da Bossoroca, São Sepé, RS. *Rev.Esc.Minas*, **57**(1): 39-44.
- Souza Filho C.R., Augusto V., Oliveira W.J, Lammoglia T. 2008. Detecção de exsudações de hidrocarbonetos por geobotânica e sensoriamento remoto multi-temporal: estudo de caso no Remanso do Fogo (MG). *Rev.Bras.Geoc.*, **38**(2-suplemento):228-243.
- Spaid-Reitz M.K. & Eick P.M. 1998. HRAM as a tool for petroleum system analysis and trend exploration: a case of the Mississippi Delta survey, southeast Louisiana. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, **34** (1,2): 83-96.
- Spector A. & Grant F.S. 1970. Statistical models for interpreting magnetic data. *Geophysics*, **35** (2): 293-302.
- Strieder A.J., Gottardo E., Cunha F.S.S., Binotto R.B. & Mesquista M.J.M. 1994. O significado tectônico dos Lineamentos Transbrasilianos no processo colisional Neoproterozóico da Província Estrutural do Tocantins: uma hipótese de trabalho. *In:SBG, Cong. Bras. Geol.*, 38, Balneário Camboriú, *Resumos Expandidos*, p. 267-269.
- Syberg F.J.R. 1972. A Fourier method for the regional-residual problem of potential fields. *Geophysical Prospecting*, **20**: 47-75.

T

- Teillet. P.M. 1997. A status overview of earth observation calibration/validation for terrestrial applications. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **23** (4): 291-193.
- Teixeira L.B., Martins M., Braun O.P.G. 1993. Evolução geológica da Bacia do São Francisco com base em sísmica de reflexão e métodos potenciais. *In: SBG, Simp. Craton São Francisco*, 2, Salvador, *Atas*, 179-181.
- Thruston J.B. & Smith R.S. 1997. Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI(TM) method. *Geophysics* **62**(3):807-813.
- Tsoukalas L.H. & Uhrig R.E. (ed.) 1997. *Fuzzy and neural approaches in engineering*. New York, John Wiley and Sons, Inc., 587 p.

V

- Valeriano C.M. 1999. *A Faixa Brasília Meridional com ênfase no segmento da Represa de Furnas: Estado atual do conhecimento e modelos de evolução tectônica*. Tese de Livre Docência, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, 93p.
- Van der Meer F., Van Dijk P., Van der Werf H., Yang H. 2002. Remote Sensing and Petroleum Seepage: a review and case study. *Terra Nova*, **14**(1):1-17.
- Vasconcelos R.M., Metelo M.S., Mota A.C., Gomes R.D. 1990. *Geofísica em levantamentos geológicos*. Rio de Janeiro, DIGEOF-CPRM.

Veloso H.P. & Góes-Filho J. 1982. Fitogeografia brasileira - classificação fisionômico-ecológica da vegetação neotropical. *Boletim Técnico do Projeto RADAMBRASIL*, Série Vegetação 1:1-80.

W

Wilford J.R., Bierwirth P.N., Craig M.A. 1997. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2): 201-216.

Y

Yamaguchi Y. & Naito C. 2003. Spectral indices for lithologic discrimination and mapping by using the ASTER SWIR bands. *International Journal of Remote Sensing*, **24**(22): 4311-4323

Z

Zadeh L.A. 1965. Fuzzy Sets. *Information and Control*, **8**: 338-353.

Zadeh L.A. 1983 A computational approach to fuzzy quantifiers in natural languages. *Computers and Mathematics with Applications*, **9**: 149-184.