



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG

*CONTRIBUIÇÃO DAS IMAGENS R99SAR
E DE DADOS GEOFÍSICOS PARA O
MAPEAMENTO GEOLÓGICO DO RIFTE
ARAÍ, NORDESTE DE GOIÁS*

TATI DE ALMEIDA

TESE DE DOUTORADO N° 94

BRASÍLIA

2009



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG

*CONTRIBUIÇÃO DAS IMAGENS R99SAR
E DE DADOS GEOFÍSICOS PARA O
MAPEAMENTO GEOLÓGICO DO RIFTE
ARAÍ, NORDESTE DE GOIÁS*

TATI DE ALMEIDA

Tese de doutorado elaborado junto ao curso de Pós graduação em Geologia (Área concentração de processamento dados em Geologia e Análise Ambiental), do Instituto de Geociências (IG) da Universidade de Brasília (UNB) para a obtenção do Título de Doutor em Geologia

ORIENTADOR: PAULO ROBERTO MENESES

BRASÍLIA

2009



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG

*CONTRIBUIÇÃO DAS IMAGENS R99SAR
E DE DADOS GEOFÍSICOS PARA O
MAPEAMENTO GEOLÓGICO DO RIFTE
ARAÍ, NORDESTE DE GOIÁS*

TATI DE ALMEIDA

Banca Examinadora

Prof. Dr. Paulo Roberto Meneses

Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (UFPA)

Prof. Dra. Silvia Beatriz Alves Rolim (UFRGS)

Prof. Dr. Edson Eyji Sano (EMBRAPA)

Prof. Dr. Nilson Francisquini Botelho

DAS PEDRAS

Ajuntei todas as pedras
Que vieram sobre mim
Levantei uma escada muito alta
E no alto subi.
Teci um tapete floreado
e no sonho me perdi.

Uma estrada,
um leito,
uma casa,
um companheiro.
Tudo de pedra.

Entre pedras
cresceu a minha poesia.
Minha vida...
Quebrando pedras
e plantando flores (...)

Cora Coralina

A Cora e a Nina, minhas princesas
e ao meu companheiro Carrera

AGRADECIMENTOS

Tenho muitas pessoas a agradecer. Mas inicialmente agradeço ao meu mestre e orientador Prof. Dr. Paulo Roberto Meneses por ser uma pessoa tão querida e tão solícita que me ensinou tanto em relação à vida, à pesquisa e ao trabalho em uma universidade, muito obrigada!

Agradeço ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro a este projeto e ao COMGAR/ FAB e a Superintendência de Geologia e Mineração da Secretaria de Indústria e Comércio de Goiás por disponibilizar os dados processados R99SAR e Geofísicos, respectivamente.

Muitos amigos me conduziram ao doutorado e agradeço especialmente ao Elton Dantas e a Adalene Moreira por terem me resgatado para a academia em 2002.

Fiz muitos amigos na UNB entre alunos, ex-alunos, professores e funcionários, todos contribuíram para esta tese ser concretizada e agradeço do fundo do meu coração. Nesta fase final, a amizade da Tatiana Diniz, Paulo Henrique Bretanha, Henrique Roig, Sérgio Paulo, Luciano Soares, Poliana e Liz Mattos foram essenciais para o término deste doutorado.

Agradeço em especial o Geólogo Msc. Marcus Chiarini, que processou os dados geofísicos da área de estudo.

Finalmente agradeço a minha família pela compreensão e pela ausência em tantas horas. Muito obrigada, a minha mãe, a minha vó, minha irmã e meu cunhado que me ajudaram no dia-a-dia com as rotinas de casa e criança. A Meire que cuidou e cuida da minha casa e das minhas princesas. A Maria Thereza e a Luzia que me ajudaram com as crianças nesta fase final. Em especial ao meu companheiro Carrera que sempre acreditou nos meus sonhos e me ajudou a concretizá-los.

Todo o meu carinho e meu agradecimento a Cora que participou das duas etapas de campo, esperou a qualificação para nascer e compartilhou o tempo da mãe dela, desde a maternidade, com esta pesquisa e a Ninoca que aprendeu a falar “UNB” em uma de suas primeiras palavras. Eu amo vocês...

Sumário

Sumário	i
Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	x
Resumo	xi
Abstract	xii
<i>Capítulo 1 – Introdução</i>	01
1.1 Apresentação	01
1.2 Justificativas e Objetivos	03
1.3 Etapas do trabalho	04
1.4 Projeto SIPAM	07
1.4.1 Histórico	07
1.4.2 Estrutura	09
1.4.2.1 Aeronaves de Sensoriamento Remoto	10
<i>Capítulo 2 – Área de Estudo</i>	12
2.1 Apresentação	12
2.2 Seleção da Área	13
2.2.1 Localização da Área	14
2.3 Descrição fitofisiográfica da área	16
2.3.1 Geomorfologia	16
2.3.2 Hidrografia	19
2.3.3 Vegetação	20
2.3.4 Solo	22
2.4 Geologia Regional e Local	24
2.4.1 Província Tocantins – Faixa Brasília	24
2.4.2 Rifte Araí	26
2.4.2.1 Formação Ticunzal (PP1tz)	27
2.4.2.2 Suíte Aurumina (PP2γ2au)	29
2.4.2.3 Quartzo Diorito Nova Roma (PP2γ3nr)	30
2.4.2.4 Suíte Pedra Branca (PP4γ4pb)	30

2.4.2.5 Grupo Araí (PP4)	31
2.4.2.6 Formação Jequitai (NP12jt)	33
2.4.2.7 Grupo Bambuí (NP2)	34
2.4.3 Geologia Estrutural	34
2.4.3.1 Sistema Cavalcante-Teresina de Goiás	36
2.4.3.2 Sistema Teresina de Goiás - Nova Roma-Monte Alegre de Goiás-Campos Belos	36
2.4.3.3 Sistema Campos Belos – Arraias	37

Capítulo 3 – Fundamentação teórica SAR e aerolevanteamento R99SAR Nova Roma

3.1 Conceitos de radiação Eletromagnética	38
3.2 Sistema Radar	40
3.2.1 RAR x SAR	44
3.2.2 Imagem SAR	46
3.2.2.1 Parâmetros do sistema	47
3.2.2.2 Parâmetros do alvo	51
3.2.3 Ruído <i>Speckle</i>	55
3.2.4 Calibração do sistema SAR	56
3.3 Dados R99SAR do Rifte Araí	59
3.3.1 Métodos do pré-processamento	61
3.3.1.1 GSP x PROSAR	62
3.3.1.2 Mosaicagem de frames e junção das polarizações	64
3.3.1.3 Correção do padrão de antena	64
3.3.1.4 Ortorretificação e Mosaicagem dos segmentos	67
3.3.1.5 Filtragem dos dados	71

Capítulo 4 – Análise e Interpretação das imagens R99SAR Aerolevanteamento Nova Roma

4.1 Análise dos dados multipolarizados R99SAR	73
4.2 Processamento dos dados R99SAR	79
4.2.1 Técnicas de Realce das imagens	79
4.2.2 Classificação das imagens	83

4.3 Discussão dos métodos aplicados a interpretação geológica utilizando SAR.....	85
4.3.1 Identificação dos elementos de imagem	86
4.3.2 Análise dos elementos de imagem	86
4.3.3 Interpretação dos elementos de texturais	88
4.4 Interpretação geológica de dados R99SAR	91
4.4.1 Drenagens	92
4.4.2 Relevo	95
4.4.3 Tonalidade	97
4.4.4 Integração dos elementos de fotoanálise das imagens SAR	100
4.5 Análise das informações multipolarimétrica PALSAR versus multipolarizada R99SAR	104
4.5.1 Pré processamento das imagens ALOS/ PALSAR: Região Cavalcante	105
4.5.2 Comparação entre as s PALSAR e R99SAR: Região Cavalcante	111

Capítulo 5 – Informações Multifontes: a análise de banco de dado geológico para o Rifte Araí

5.1 Sistema de Informação Geográfica	117
5.2 Mapeamentos Geológicos Anteriores	117
5.3 Dados de geofísica e sensoriamento remoto	124
5.3.1 Dados Aerogeofísicos de Alta Densidade	125
5.3.1.1 Magnetometria	127
5.3.1.2 Gamaespectrometria	132
5.3.1.3 Discussão dos produtos gerados	137
5.3.2 Dados Orbitais Landsat ETM+	143
5.3.3 Dados SRTM	143
5.4 Fusão de Dados	144
5.5 Interpretação dos dados	146

Capítulo 6 – Arcabouço estrutural do Rifte Araí com base nas informações do banco de dados

6.1 Os Domínios Geotectônicos	157
-------------------------------------	-----

6.1.1 Domínio Geotectônico I	158
6.1.2 Domínio Geotectônico II	158
6.1.3 Domínio Geotectônico III	159
6.1.4 Domínio Geotectônico IV	160
6.2 Análise das informações do Banco de Dados Geológicos do Rifte Arai	160
6.2.1 Bloco Oeste	161
6.2.2 Bloco Leste	164
6.3 Dados de geofísica e sensoriamento remoto	16
<i>Capítulo 7 – Conclusão</i>	174
7.1 Quanto às imagens R99SAR	179
7.2 Quanto às imagens geofísicas	176
7.3 Quanto à geologia	177
<i>Capítulo 8 – Referências Bibliográficas</i>	179

Índice de Figuras

Figura 1: Fluxograma dos métodos que serão empregados nesta pesquisa. Os números em vermelho correspondem às etapas a serem cumpridas listadas na página 05.	06
Figura 2: Esquema de aquisição, tratamento e visualização de dados no Sistema de Proteção da Amazônia.	09
Figura 3: Aeronave de sensoriamento remoto utilizada pelo SIPAM com identificação dos sistemas de aquisição de imagens.	11
Figura 4: Área de cobertura com imagens R99SAR entre os anos de 2003 e 2007 (fonte: 2°/6°GAV).	11
Figura 5: Localização do aerolevantamento Nova Roma com principais vias, drenagens, divisão municipal e perímetros urbanos (fundo imagem SRTM).	15
Figura 6 Articulação das folhas 1:100.000 e 1:250.000 da área de estudo.	15
Figura 7: Mapa da geomorfologia da área de Nova Roma- Cavalcante – Monte Alegre de Goiás sobreposto a imagem SRTM (Adaptado de Latrubesse <i>et al.</i> , 2005).	17
Figura 8: Superfície de pedimentação associada ao pedimonte da Serra Branca na porção leste da área imageada. Na foto A observa-se a Serra da Pedra Branca que coalesce e se integra a SRAIV; na foto B observa-se a quebra de relevo entre a escarpa desta mesma serra e a superfície horizontal do pedimento (Foto: Almeida, 2005)	18
Figura 9: Mapa da distribuição da rede de drenagens e das bacias hidrográficas presentes na área de Nova Roma- Cavalcante – Monte Alegre de Goiás. Fonte: http://www.sieg.go.gov.br/	19
Figura 10: Mapa da distribuição vegetal da área de Nova Roma- Cavalcante – Monte Alegre de Goiás sobreposto a imagem SRTM. Fonte: http://www.sieg.go.gov.br/	21
Figura 11: Fotos de fisionomias presentes na região de Nova Roma – Monte Alegre – Cavalcante na época de seca. Em A Fisionomia de Savana Parque (Campo sujo rupestre), aqui com espécie de gramínea, endêmica na região. Em B Associação Savana Gramíneo-Lenhosa + Savana Parque, com floresta-de-galeria. Em C Savana Parque (Campo Sujo Rupestre – Campo de Velozias).	22
Figura 12: Mapa de solos da área de Nova Roma- Cavalcante – Monte Alegre de Goiás sobreposto à imagem SRTM. Fonte: http://www.sieg.go.gov.br/	23
Figura 13: Esboço geológico da Província Tocantins (Fuck <i>et al.</i> , 1993).	24
Figura 14: Coluna estratigráfica das unidades geológicas presentes nas folhas Monte Alegre de Goiás, Cavalcante e Nova Roma <i>in</i> Alvarenga <i>et al.</i> , 2007.	27
Figura 15: Correlações entre as diferentes colunas estratigráficas propostas para o Gr. Araí (Martins, 1999).	32
Figura 16: Onda eletromagnética composta por campos elétrico (E) e magnético (M), ortogonais entre si. Fonte: Soares, 2008.	39
Figura 17: a) Propagação do pulso de radar indicando a frente de onda (linhas sólidas) e o pulso retroespalhado pelos objetos (linhas pontilhadas) b) medida do tempo e intensidade do pulso de retorno da casa e da árvore. Fonte Lillesand & Kiefer (1994).	41
Figura 18: Onda eletromagnética com mesma frequência, comprimento de onda, amplitude e diferente fase. Fonte: Soares, 2008.	42
Figura 19: Espectro eletromagnético e bandas da região de microondas (Dallemand <i>et al.</i> , 1993 <i>in</i> Freitas <i>et al.</i> , 2007.	43
Figura 20: Geometria de imageamento de um SLAR. Fonte: adaptada de Trevett (1986) <i>in</i> Freitas <i>et al.</i> (2007). Sendo l-tamanho físico da antena, h-altura da plataforma, α -ângulo de incidência do	

feixe de microondas, R: alcance inclinado, β - largura do feixe em azimute, θ - ângulo de visada, p_a e p_r , resoluções em azimute e em <i>range</i> , respectivamente.....	44
Figura 21: (a) Efeitos de encurtamento e (b) inversão topográfica nas imagens de radar. Fonte: Sabins (1996)	50
Figura 22: Curvas da constante dielétrica de solos. Fonte Ulaby <i>et al.</i> (1986).	52
Figura 23: Influência do ângulo de incidência no retroespalhamento médio de superfícies lisas, intermediárias e muito rugosas. FONTE: NASA (1996, p.114 in Rabelo, 2007).	54
Figura 24: Refletores de canto (Sabins, 1996).	55
Figura 25: Esquema dos sete segmentos imageados pelo R99SAR na região de Nova Roma. A linha em vermelho indica a trajetória do vôo e em azulas larguras das faixas imageadas no terreno.60	
Figura 26: Fluxograma das etapas de pré processamento dos dados R99SAR.....	61
Figura 27: Localização das áreas de estudo de comparação das imagens GSP e PROSAR. Área 1 em amarelo e área 2 em magenta.	63
Figura 28: Área 1: região sem desníveis topográficos significativos, de 400 x 400 pixels. Processada pelos softwares GSP à direita e PROSAR à esquerda	63
Figura 29: Área 2: região com desníveis topográficos significativos, processadas pelos <i>softwares</i> GSP à direita e PROSAR à esquerda.....	64
Figura 30: Etapas de processamento dos dados R99SAR(mosaicagem de frames e correção de padrão de antena)	66
Figura 31: Gráficos demonstrando média do retroespalhamento em range com o polinômio de 5º grau correspondente para a correção do padrão de antena nas faixas de 1 a 7.	68
Figura 32: Imagem indicando as regiões de sombra utilizadas para a extração das informações estatísticas que constam na tabela 6.	69
Figura 33: Extratos das imagens LANDSAT e R99SAR arranjado segundo o geoposicionamento das mesmas.....	71
Figura 34: Imagem em amplitude com polarização HH do aerolevanteamento Nova Roma utilizando o sensor R99SAR.....	74
Figura 35: Imagem em amplitude com polarização HV do aerolevanteamento Nova Roma utilizando o sensor R99SAR.....	74
Figura 36: Imagem em amplitude com polarização VH do aerolevanteamento Nova Roma utilizando o sensor R99SAR.....	75
Figura 37: Imagem em amplitude com polarização VV do aerolevanteamento Nova Roma utilizando o sensor R99SAR.....	75
Figura 38: Extrato da junção entre os segmentos 2 e 3 do aerolevanteamento Nova Roma com indicação das áreas de coleta dos dados estatísticos para avaliação dos padrões de retroespalhamento no <i>near</i> e <i>far</i> range.....	77
Figura 39: Extrato da junção entre os segmentos 6 e 7 do aerolevanteamento Nova Roma com indicação das áreas de coleta dos dados estatísticos para avaliação dos padrões de retroespalhamento no <i>near</i> e <i>far</i> range.....	77
Figura 40: Imagem do aerolevanteamento Nova Roma com indicação das áreas de coleta para análise estatística de correlação demonstrada na tabela.	78
Figura 41: Composição colorida RGB entre as polarizações HH/HV/VV ao aerolevanteamento Nova Roma.	80
Figura 42: Imagens resultantes das divisões entre polarizações HH/ HV em pseudocor.....	81
Figura 43: Imagem falsa-cor combinando informações entre a primeira e segunda principal componente.	82

Figura 44: Resultado da primeira etapa de segmentação e geração dos objetos de um frame da imagem.....	84
Figura 45: Processo de análise das propriedades dos elementos de drenagens proposta por Santos <i>et al.</i> (2000).....	87
Figura 46: Processo de análise das propriedades dos elementos texturais de relevo proposta por Santos <i>et al.</i> (2000).	87
Figura 47: Fluxograma das etapas realizadas para a confecção do modelo fotointerpretativo do aerolevante R99SAR, Nova Roma (GO).....	91
Figura 48: Rede de drenagens da área de estudo extraída utilizando produto radar RGB HH/HV/VV e SIEG/GO.....	92
Figura 49: Feições lineares de drenagens (em verde) sobrepostas ao alinhamento de drenagens (em vermelho) da área estudada obtida do mapa de rede de drenagens.....	93
Figura 50: Zonas homólogas obtidas através do mapa de rede, feições lineares e alinhamentos de drenagens	94
Figura 51: Quebras de relevo positivas (em azul) e negativas (em vermelho) da área estudada obtida através da análise da imagem RGB HH/HV/VV.....	95
Figura 52: Lineações de relevo da área estudada obtida através da análise da imagem RGB HH/HV/VV.....	96
Figura 53: Alinhamento das feições de relevo da área estudada obtida através da análise da imagem RGB HH/HV/VV e da análise do traçado de feições de relevo.	97
Figura 54: Zonas homólogas obtidas através do mapa de quebras positivas e negativas, feições lineares e de alinhamentos de relevo.....	98
Figura 55: Mapa de lineamentos estruturais integrando quebras positivas e negativas, feições lineares e de alinhamento e lineações de relevo e de drenagem.....	100
Figura 56: Mapas de zonas homólogas de drenagens e de relevo	101
Figura 57: Mapa de unidades radargeológica obtidas a partir da análise dos mapas de zonas homólogas de relevo, drenagem e tonalidade.	102
Figura 58: Área de recobrimento da imagem PALSAR em relação ao aerolevante Nova Roma R99B	105
Figura 59: Esquema de pré-processamento da imagem PALSAR: calibração dos dados e ortorretificação utilizando dados SRTM.....	107
Figura 60: Composição colorida entre as polarizações HH/HV/VV (ALOS PALSAR)	108
Figura 61: Resultado da redução de ruído <i>speckle</i> após processamento da imagem	109
Figura 62: Resultado da filtragem utilizando filtro Lee 3x3 da imagem polarimétrica PALSAR Região de Cavalcante – GO.	110
Figura 63: Imagens com o mesmo recobrimento geográfico resultantes dos processamentos aplicados aos dados PALSAR (a esquerda) e aos dados R99SAR (a direita) da região norte de Cavalcante – GO.	112
Figura 64: Gráfico demonstrando os valores mínimos, máximos, média e desvio padrão de regiões especificadas na imagem com litologias distintas	113
Figura 65: Gráficos demonstrando os valores de médias normalizadas das unidades radar geológicas para as polarizações HH e VV nos dados R99SAR (a cima) e PALSAR (a baixo).....	114
Figura 66: Gráficos demonstrando os valores de médias normalizadas das unidades radar geológicas para as polarizações HH e VV nos dados R99SAR (a cima) e PALSAR (a baixo).....	115
Figura 67: Dados que compõe o Banco de dados geológico do Rife Araí.....	118
Figura 68: Recobrimento dos mapeamentos sistemáticos anteriores realizados na área de imageamento	119

Figura 69: Mapa geológico integrado das folhas de Cavalcante (Botelho <i>et al.</i> , 2007), Nova Roma (Alvarenga <i>et al.</i> , 2007) e Monte Alegre de Goiás (Dardenne <i>et al.</i> , 2007).....	120
Figura 70: Mapa Final apresentado pelos alunos de trabalho final do curso de graduação em geologia, ano 2005 (sem fidelidade de escala).....	122
Figura 71: Inconformidade Dardenne <i>et al.</i> (2007) e TF2005 na definição faciológica da Suíte Aurumina.	123
Figura 72: Localização das áreas do Projeto Levantamento Geofísico do Estado de Goiás.	125
Figura 73: Imagem do campo magnético anômalo na área de estudo.	128
Figura 74: Imagem da primeira derivada vertical na área de estudo.....	129
Figura 75: Imagem da Amplitude do Gradiente Horizontal Total com derivadas nas direções 45e 135 graus da área de estudo.....	130
Figura 76: Imagem da amplitude do sinal analítico na área de estudo.	131
Figura 77: Imagem da inclinação do sinal analítico na área de estudo.	132
Figura 78: Intervalo de energia captado pelo canal da contagem total.	133
Figura 79: Imagem gamaespectrométrica do canal da contagem total na área de estudo.	133
Figura 80: Imagem gamaespectrométrica do canal de potássio na área de estudo.	134
Figura 81: Imagem gamaespectrométrica do canal do tório na área de estudo.	135
Figura 82: Imagem gamaespectrométrica do canal do urânio na área de estudo.....	135
Figura 83: Imagens demonstrando as razões entre os dados de Th/K (A), U/Th (B) e U/K (C)...	136
Figura 84: Imagem ternária CMY entre os canais de K,Th e U.	138
Figura 85: Amplitude do Sinal Analítico com as subdivisões dos grandes domínios magnéticos. ...	139
Figura 86: Perfis da contagem total e do seu gradiente (derivada). Mostra os limites do dado gama bem marcado como picos no perfil do gradiente.....	140
Figura 87: Imagem do gradiente do canal da contagem total.	141
Figura 88: Perfil indicando as mudanças ocorridas na imagem processada para o canal do tório. A linha em vermelho (Th_1) apresenta os dados originais, a linha em verde os dados “recortados” para os valores superiores a 12ppm e a linha em azul os dados amplificados ao quadrado. ...	142
Figura 89: Imagem do canal do Tório filtrada para valores superiores a 12ppm.).....	142
Figura 90: Imagem do gradiente horizontal do canal do Tório filtrada para valores superiores a 12ppm.	144
Figura 91: Imagens resultantes do processamento das imagens ETM+ do satélite Landsat. (A) Imagem falsa cor RGB entre as bandas 5/4/3; (B) Imagem NDVI sobreposta a banda 4; (C) Imagem falsa cor RGB entre as bandas obtidas pelo processamento por principal componente PC1/PC2/PC3.....	144
Figura 92: Visualização 3D falsa cor dos dados (A) Landsat PC1/PC2/PC3 e (B) R99 HH/HV/VV.....	145
Figura 93: Imagens resultantes da fusão dos dados R99SAR e geofísica.....	147
Figura 94: Interpretação dos dados mag e gama para a área de estudo sem o conhecimento prévio da mesma.....	148
Figura 95: Detalhe do Granito Soledade (PP4γPb1), na porção centro sul da imagem, com aparência de um sigmóide de orientação NE.....	151
Figura 96: Mapa geológico compilados dos projetos Cana Brava – Porto Real, Botelho <i>et al.</i> (2007), Alvarenga <i>et al.</i> (2007), Dardenne <i>et al.</i> (2007), TF 2005 e TF 1998 utilizando informações das imagens R99SAR.....	154
Figura 97: Foliações e lineações cadastradas no Banco de dados geológico do Rife Araí.....	155

Figura 98: Lineamentos radargramétricos e interpretados pela gamaespectrometria cadastrados no Banco de dados geológico do Rifte Araí	156
Figura 99: Imagem R99SAR sobreposta a subdivisão entre os blocos oeste e leste	161
Figura 100: Alinhamentos de drenagem no bloco oeste e diagrama de roseta.	162
Figura 101: Alinhamentos (azul) e feições lineares (vermelho) de relevo do bloco oeste e diagrama de roseta.	163
Figura 102: Alinhamentos gamaespectrométricos do bloco oeste e diagrama de roseta.	163
Figura 103: Contatos e estruturas extraídos do mapa geológico do bloco oeste e diagrama de roseta	164
Figura 104: Traçados dos alinhamentos de drenagem no bloco leste com diagrama de roseta	165
Figura 105: Traçados de feições lineares (vermelho) e de alinhamentos (azul) de relevo no bloco leste da área de estudo com diagrama de roseta.	165
Figura 106: Traçados da interpretação dos dados gamaespectrométricos presentes no bloco leste da área de estudo com diagrama de roseta de frequência e direção dos alinhamentos.	166
Figura 107: Traçados da interpretação dos dados gamaespectrométricos presentes no bloco leste da área de estudo com diagrama de roseta de frequência e direção dos alinhamento.....	167
Figura 108: Estereogramas das foliações S_n (a) e Milonítica (b) das unidades sin e pós Rifte (Grupo Araí e Suíte Pedra Branca). Medições realizadas trabalho final de formatura de 2005 e por Alvarenga <i>et al.</i> (2007).....	167
Figura 109: Estereogramas das foliações S_n (a) e Milonítica (b) das unidades pré Rifte (Suíte Aurumina e Formação Ticunzal). Medições realizadas pelos alunos de graduação do trabalho final de formatura 2005 e por Alvarenga <i>et al.</i> (2007).	168
Figura 110: Imagem do gradiente horizontal do canal do tório do centro da área de estudo realçando a estruturação presente na área que aflora a Suíte Aurumina	170
Figura 111: Imagem do espalhamento matemático para as baixas concentrações do canal do tório com locação dos pontos visitados em campo	171
Figura 112: Foto de típica foliação SC em rocha da Suíte Aurumina (ponto 12). A foliação C caracteriza-se por zonas sub-milimétricas de material ultrafino que desloca (em milímetros) a foliação S.....	172
Figura 113: Foto de injeção de granito pegmatítico tardi- deformacional em rocha da Suíte Aurumina com orientação NE (ponto 2). Indicadores cinemáticos neste ponto possuem caráter dextral.	173
Figura 114: Foto de injeção de granito pegmatítico tardi- deformacional em rocha da Suíte Aurumina com orientação NE (ponto 19). Indicadores cinemáticos neste ponto possuem caráter dextral.....	173

Índice de Tabelas

Tabela 1 Quadro esquemático dos eventos deformacionais e estruturas associadas relacionadas aos domínios geotectônicos individualizados (Alvarenga et al., 2007).....	35
Tabela 2 Parâmetros do sistema e do alvo que influenciam no sinal de retorno do radar.....	47
Tabela 3 Sensores Orbitais Radargramétricos (Mendonça, 2008).....	48
Tabela 4 Características da região de Nova Roma –Cavalcante- Monte Alegre e implicações nos parâmetros de aerolevanteamento.....	61
Tabela 5 Estatísticas das polarizações do aerolevanteamento Nova Roma para os softwares de pré-processamento PROSAR e GSP	65
Tabela 6 Estatística básica das regiões de interesse em áreas sombreadas. As localizações das mesmas encontram-se demonstradas na figura 32.....	69
Tabela 7 Estatística da imagem R99SAR	76
Tabela 8 Correlação em porcentagem das áreas 1 e 2 demonstradas na figura 18 para avaliação dos padrões de retroespalhamento no <i>near</i> e <i>far</i> range	77
Tabela 9 Estatística das áreas 3 e 4 demonstradas na figura 19 para avaliação dos padrões de retroespalhamento no <i>near</i> e <i>far</i> range.....	77
Tabela 10 Taxa de correlação entre as polarizações nas áreas indicadas na figura 38	79
Tabela 11 Interpretações geológicas das propriedades dos elementos texturais de drenagens, adaptado de Rabello (2008) e Santos <i>et al.</i> (2000).....	89
Tabela 12 Interpretações geológicas das propriedades dos elementos texturais de relevo adaptado de Rabello (2008) e Santos <i>et al.</i> (2000)	90
Tabela 13 Interpretações geológicas das propriedades das formas de drenagens e relevo adaptado de Rabello (2008) e Santos <i>et al.</i> (2000)	90
Tabela 14 Características que definem as zonas homólogas obtidas através do traçado da rede de drenagens, feições lineares e alinhamentos das drenagens e demonstradas na figura 50.....	94
Tabela 15 Características que definem as zonas homólogas da figura 54 obtidas através do mapa de quebras positivas e negativas, feições lineares e de alinhamentos de relevo	98
Tabela 16 Correlações entre zonas homólogas obtidas na análise da rede de drenagens e do relevo.....	101
Tabela 17 Descrição das propriedades das zonas homólogas apresentadas na figura 57.	103
Tabela 18 Estatística da imagem PALSAR	109
Tabela 19 Coluna geológica das folhas de Cavalcante (Botelho <i>et al.</i> , 2007), Nova Roma (Alvarenga <i>et al.</i> , 2007) e Monte Alegre de Goiás (Dardenne <i>et al.</i> , 2007), representadas na figura 68.....	121
Tabela 20 Estrutura das camadas de mapeamentos anteriores que compõe o SIG do Rifte Araí ...	122
Tabela 21 Atributos do aerolevanteamento geofísico do Bloco 3	126
Tabela 22 Especificações das imagens Landsat ETM+ utilizadas na área	143

Resumo

Nos últimos seis anos a comunidade científica brasileira vem obtendo acesso a dados SAR com múltiplas polarizações e alta resolução espacial através das plataformas aéreas R99 pertencentes ao Sistema de Proteção a Amazônia (SIPAM). No entanto ainda existe uma carência em relação ao corpo técnico no país, limitando a disseminação nas diferentes áreas da ciência no uso destas imagens, incluindo a geologia. Esta pesquisa demonstra que a possibilidade de configuração da geometria de aquisição de dados, do modo de operação, da data de imageamento e processador para a geração das imagens são as maiores vantagens deste sistema. No entanto, a falta de parâmetros do sistema sensor possibilita a plena capacidade do R99SAR em termos de multipolarimetria somente mediante alto custo e logística própria. Mesmo assim, para mapeamento geológico o processamento das imagens das múltiplas polarizações permite excelente interpretação, sendo a análise baseada em adaptações de métodos convencionais de fotointerpretação. Esta capacidade foi comprovada na região representativa do Rifte Araí, entre as cidades de Cavalcante, Monte Alegre de Goiás e Nova Roma, nordeste do Estado de Goiás. Essa região foi alvo de campanhas de mapeamentos geológicos sistemáticos da Universidade de Brasília em escalas de 1:50.000. Nesta região, a extração das feições de relevo e drenagem e a tonalidade das imagens permitiram a diferenciação e delimitação de trinta e quatro zonas homólogas que apresentam alta correlação aos mapas prévios e que podem acrescentar novas informações de cunho litológico e estrutural. Nas áreas onde as feições radarinterpretativas de relevo foram nulas e a densidade de drenagem muito baixa, foram utilizadas, para complementar as informações, as imagens obtidas na terceira etapa do Levantamento Aerogeofísicos do Estado de Goiás. A concepção de um banco de dados, em um sistema de informação geográfica, onde foram cadastradas informações de natureza completamente distintas, provenientes de observações de campo, interpretações de imagens radargramétricas e aerogeofísicas e mapeamentos pretéritos mostrou-se favorável para a identificação de unidades geológicas de mapeamentos. Este trabalho coloca novas perspectivas de reinterpretções geológicas para uma área, de tal modo que possam vir a contribuir para um melhor entendimento da evolução geológica e estrutural e das potencialidades prospectivas. De outra forma, a inclusão das informações em bancos de dados georreferenciados, além de organizar e facilitar a consulta e visualização da maioria dos dados levantados em uma área, é uma das formas mais seguras de preservar o acervo geológico brasileiro.

Abstract

During the last six years the Brazilian scientific community has gotten access to multi-polarized and high spatial resolution SAR data, obtained by the R99 platforms, a equipment of the Amazon Protection System (SIPAM). It is important to say that there is still a lack concerning to the technical people on the country, limiting the dissemination and the use of those images in different areas of the science, including geology. The possibility of configuring the geometry of data acquisition, operating mode, image date and processor used for imaging generation are the main advantages of this system. However, the lack of parameters of the sensor system allowed the maximum capacity of the R99SAR in terms of multi-polarimetry only if a high budget and and adequate logistic are available. Thus, for geological mapping purposes the image processing of the multi-polarizations allow an excellent interpretation capacity, being the analysis based on adaptations of the conventional photo-interpretation methods. This capacity was proven on the region of the Arai Rift, located between the cities of Cavalcante, Monte Alegre de Goiás and Nova Roma, on the northeast portion of the Goiás State. This region was a target for a systematic 1:50.000 geological mapping, carried out by the University of Brasília. On that region, the extraction of the relief and drainage features and the tonality difference on the images allowed the differentiation and delimitation of homologue zones, which showed a high correlation to the former maps and can add new and important information in terms of lithology and structure to the region regional geology. On those áreas where the relief radar-interpreted features were null and the drainage density is too low, aero-geophysical data, surveyed during the third stage of the Goiás State Aero-Geophysical Survey, were used to complete the information. The conception of a data base, on a geographical information system (GIS) format was successful on the identification of geological unities for mapping. Different information were registered on this system, as for instance field data, interpretation of radar images, interpretation of geophysical images and former maps. This survey bring a new perspective of geological reinterpretation for a named area, helping on a better understanding of its geological and structural evolution and on the evaluation of its prospective potential. In addition, the inclusion of information on a geo-referenced data base, besides to organize and facilitate the visualization and consultation of the data, is one of the most secure manners of preserving the Brazilian geological records.

Capítulo 1

Introdução

1.1. Apresentação

O investimento em políticas públicas para o mapeamento cartográfico e temático do território nacional tem recebido destaque do governo brasileiro, nos últimos cinco anos. Projetos como a Retomada do Programa de Levantamento Geológico Básico, orientado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM); a Cartografia da Amazônia, sob a coordenação do Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM); o Monitoramento do Desmatamento da Amazônia (PRODES e DETER), a cargo do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), são exemplos dessas ações governamentais em âmbito nacional, que promovem a geração de dados e difusão de informações nas áreas de geociências, cartografia e meio ambiente, básicas para a gestão dos recursos naturais no território nacional.

O ponto em comum de todos esses projetos é a utilização e aplicação de ferramentas de geotecnologias – sistema de informação geográfica, sensoriamento remoto e geofísica, para a aquisição, análise, compilação e integração de dados gerados em formato digital. Por exemplo, o projeto de cartografia geológica básica, coordenado pela CPRM, não objetiva unicamente a publicação de mapas impressos das folhas geológicas mas, principalmente, o acesso a um banco de dados completo georreferenciado, que permita ao tomador de decisão uma fácil interação para a busca das informações de seu interesse. Se por um lado a geração, tratamento e organização da informação asseguraram maior confiabilidade no uso e interpretação dos dados, por outro lado, eles requerem a formulação e o desenvolvimento de métodos para aplicações às diferentes regiões geológicas ou geoambientais do território nacional.

As fontes de alimentação de dados dos geobancos são as mais diversas possíveis porém, quase todos os projetos incluem a utilização de imagens obtidas por sensores remotos orbitais ou aerotransportados, por serem a principal forma de obtenção da referência espacial do terreno. Por isso, vê-se o interesse do país em definir políticas nacionais para a detenção e aprimoramento da tecnologia de sensoriamento remoto, como são exemplos os programas já estabelecidos e consagrados CBERS (satélite sino-brasileiro de sensoriamento remoto de média resolução espacial) e SIPAM (sensores

aeropoportados de altas resoluções espaciais e espectrais) e em desenvolvimento MAPSAR (convênio firmado com a Alemanha para a construção de um satélite radar na banda L). Instituições governamentais como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) também tiveram abertura para aliar-se a agências ou empresas estrangeiras a fim de disponibilizar imagens de satélite de sensoriamento remoto (ALOS) a preço bastante acessível (cerca de 100 dólares/cena).

Na geologia, outra importante fonte de dados foram os levantamentos aerogeofísicos de gamaespectroscopia e magnetometria de alta densidade realizados pelos governos federais e estaduais nos estados de Mato Grosso, Pará, Minas Gerais, Pernambuco, Piauí, Amazonas, Roraima, Amapá e Goiás.

O trabalho aqui apresentado aproveitou a oportunidade advinda de uma parcela desses investimentos, para formular uma pesquisa metodológica de avaliação da nova tecnologia de radar multipolarimétrico aerotransportado R99SAR na banda L, para fins de mapeamento geológico - estrutural. No Brasil, o uso geológico de informações de imagens de radar foi muito explorado. Deve-se citar o Projeto RADAMBRASIL e, a título de referência, trabalhos como os de Lima (1995), Carvalho (1997), Crósta *et al.* (2001, 2007), Paradella *et al.* (2000, 2005) que, entre outros, demonstraram o sucesso na utilização de dados dos radares aerotransportados e orbitais na exploração mineral e no mapeamento geológico-estrutural. No entanto, ainda são raros os trabalhos geológicos (Rabello, 2007; Rabello *et al.* 2007; Knust *et al.*, 2007) que exploraram imagens de diferentes polarizações SAR, como os obtidos pelas plataformas R99 do SIPAM, PALSAR do satélite ALOS e RADARSAT 2, não havendo ainda respostas a questões sobre a eficiência das diferentes polarizações cruzadas e paralelas da onda eletromagnética na detecção e discriminação das feições do terreno.

Em uma segunda etapa desta pesquisa, as informações obtidas pela interpretação dos dados SAR foram complementadas com dados magnetométricos, gamaespectrométricos e de sensoriamento remoto óptico e, em conjunto com a análise dos mapeamentos geológicos pré-existentes, possibilitaram a montagem de um banco de dados que contribuiu para o entendimento da geologia e do arcabouço estrutural da área de trabalho. A espacialização, organização e compatibilização de escalas e de natureza das informações visam ao dinamismo das tomadas de decisão e são fundamentais à gestão e ao planejamento do uso sustentável do território nacional. Em regiões onde o conhecimento é baixo e as informações são esparsas como, por exemplo, a região amazônica, a possibilidade de mapeamentos geológicos utilizando a

integração de dados de diferentes naturezas e escalas pode se tornar uma alternativa economicamente viável.

1.2. Justificativas e Objetivos

No Brasil, a utilização do sensoriamento remoto para a geologia tem como marco fundamental o início da década de 1970. Nesse período foi executado o Projeto RADAMBRASIL, com recobrimento inicial para a área amazônica e, posteriormente, estendido para todo o território nacional. Esse programa foi o maior levantamento de radar aerotransportado já realizado no mundo (Reis *et al.*, 2007). Os dados gerados foram essenciais para a evolução do conhecimento geológico do país, pois, a partir da criação de uma linha metodológica para interpretação das imagens, foram elaborados os primeiros mapeamentos geológicos sistemáticos do Brasil (Lima, 1995).

Atualmente, o Brasil tem uma oportunidade única de se tornar um dos maiores centros de excelência em radar, pois os sensores brasileiros R99SAR e, futuramente, o MAPSAR, juntamente com os dados comercializados pelo IBGE, do sensor PALSAR, sintetizam todas as características possíveis para as tecnologias de radar atuais. Observa-se, no entanto, que apesar do domínio que temos dessas tecnologias, ainda existe uma carência de corpo técnico no país, o que limita a disseminação do uso e desenvolvimento de aplicações do radar (Almeida *et al.*, 2007; Almeida *et al.*, 2008a; Reis *et al.* 2007).

Grandes esforços vêm sendo empregados pelos renomados e tradicionais centros de sensoriamento remoto do país para a aplicação, interpretação, análise e aplicabilidade desses tipos de dados, resultando não somente em geração de informações nas mais diversas áreas do conhecimento, mas em formação de pesquisadores de alto nível. A segunda reunião relativa às atividades de sensoriamento remoto do Sistema de Proteção da Amazônia e a primeira reunião de trabalho R99SAR, realizadas em Brasília em novembro de 2006 e em agosto de 2008, respectivamente, contaram com a exposição de trabalhos que estão sendo realizados no INPE, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Universidade de Brasília (UnB), Empresa Brasileira de Pesquisa agropecuária (Embrapa), Instituto de Estudos Avançados (IEAv) e IBGE e demonstram algumas das aplicabilidades do sistema R99SAR e PALSAR.

O Instituto de Geociências da UnB, anteendo a necessidade de acesso aos dados provenientes do aerolevanteamento R99SAR para pesquisas geológicas, firmou convênio junto ao Comando Geral de Operações Aéreas no ano de 2005, com vista à continuidade de pesquisas metodológicas relacionadas a radares de abertura sintética, desenvolvidas pelo instituto e por Chaves *et al.* (2006), Meneses *et al.* (2000), Meneses & Marques (1999), Meneses & Santa Rosa (1999); Carvalho & Meneses (1996); Meneses & Carvalho (1994). Esse convênio possibilita as especificações não somente da localização geográfica das áreas de interesse a serem imageadas, mas também dos parâmetros de imageamento, tais como direção de voo, direção de visada, ângulo de visada, tamanho de pixel e número de segmentos, modo de operação do aerolevanteamento, quantidade de visadas e sobreposição entre segmentos para área teste, e do modo de processamento para a geração da imagem (GSP x PROSAR).

A presente Tese de Doutorado, fruto desse convênio, tem como principal objetivo desenvolver métodos para a interpretação de imagem de radar multipolarizado no mapeamento geológico, aproveitando-se, porventura, de outras fontes de dados para concepção de um banco de dados geográficos que venha a orientar a solução de questões geológicas. Para tanto, tem-se como objetivos específicos: (i) avaliar estatisticamente os dados das polarizações cruzadas e paralelas do sensor R99SAR; (ii) interpretar as imagens multipolarizadas do sensor R99SAR a fim de verificar os seus desempenhos no mapeamento geológico; (iii) analisar as semelhanças e diferenças das polarizações dos sensores R99SAR com as imagens orbitais do sensor ALOS/PALSAR; (iv) analisar e interpretar os dados geofísicos disponíveis para gerar informações complementares aos dados R99SAR sobre a área de estudo; (v) construir um banco de dados geográficos para a área de estudo, agregando a maior quantidade de dados de interesse geológico; e (vi) contribuir para o melhor entendimento da geologia e das relações estruturais da área de estudo utilizando dados de diferentes naturezas.

1.3. Etapas do trabalho

Para a consecução dos objetivos deste trabalho foi necessário cumprir as etapas de trabalho abaixo descritas e diagramadas no fluxograma da figura 1.

1. Avaliação das características fisiográficas e geológicas de diferentes áreas com base na especificação do sensor R99SAR para seleção da região de estudo.

2. Definição dos parâmetros do aerolevanteamento R99SAR: tamanho da área, modo de operação do sistema, direção de linha de voo, direção de visada, tamanho de pixel, recobrimento entre segmentos, número de *looks* e ângulo de incidência.
3. Testes entre os programas de processamento PROSAR e GSP para a geração de imagem.
4. Pré-processamento das imagens R99SAR: mosaicagem de *frames*, correção de padrão de antena, mosaicagem de segmentos georreferenciamento/ortorretificação, utilizando dados SRTM, e filtragem.
5. Processamento das imagens R99SAR: composições coloridas, divisão de bandas, técnicas de principais componentes, visualização 3D e fusão com dados geofísicos e multiespectrais.
6. Extração e análise dos elementos de drenagem e de relevo das imagens multipolarizadas R99SAR.
7. Pré-processamento e processamento das imagens ALOS/PALSAR: ortorretificação, utilizando dados SRTM, calibração para coeficiente de retroespalhamento (σ^0) e filtragem.
8. Comparação das polarizações HH, HV e VV dos sensores R99SAR e PALSAR.
9. Estruturação de um banco de dados sobre as informações geológicas para a área do Rife Araí obtidas de mapeamentos geológicos, dados geofísicos e de radar.
10. Fusão entre os dados magnetométricos e gamaespectrométricos, ópticos, altimétricos e R99SAR.
11. Elaboração de um mapa geológico fotoradarinterpretado utilizando as informações do banco de dados georreferenciado com informações geológicas do Rife Araí.
12. Contribuição com novos dados e novas informações para a análise regional dos processos deformacionais e cinemáticos da região de estudo.

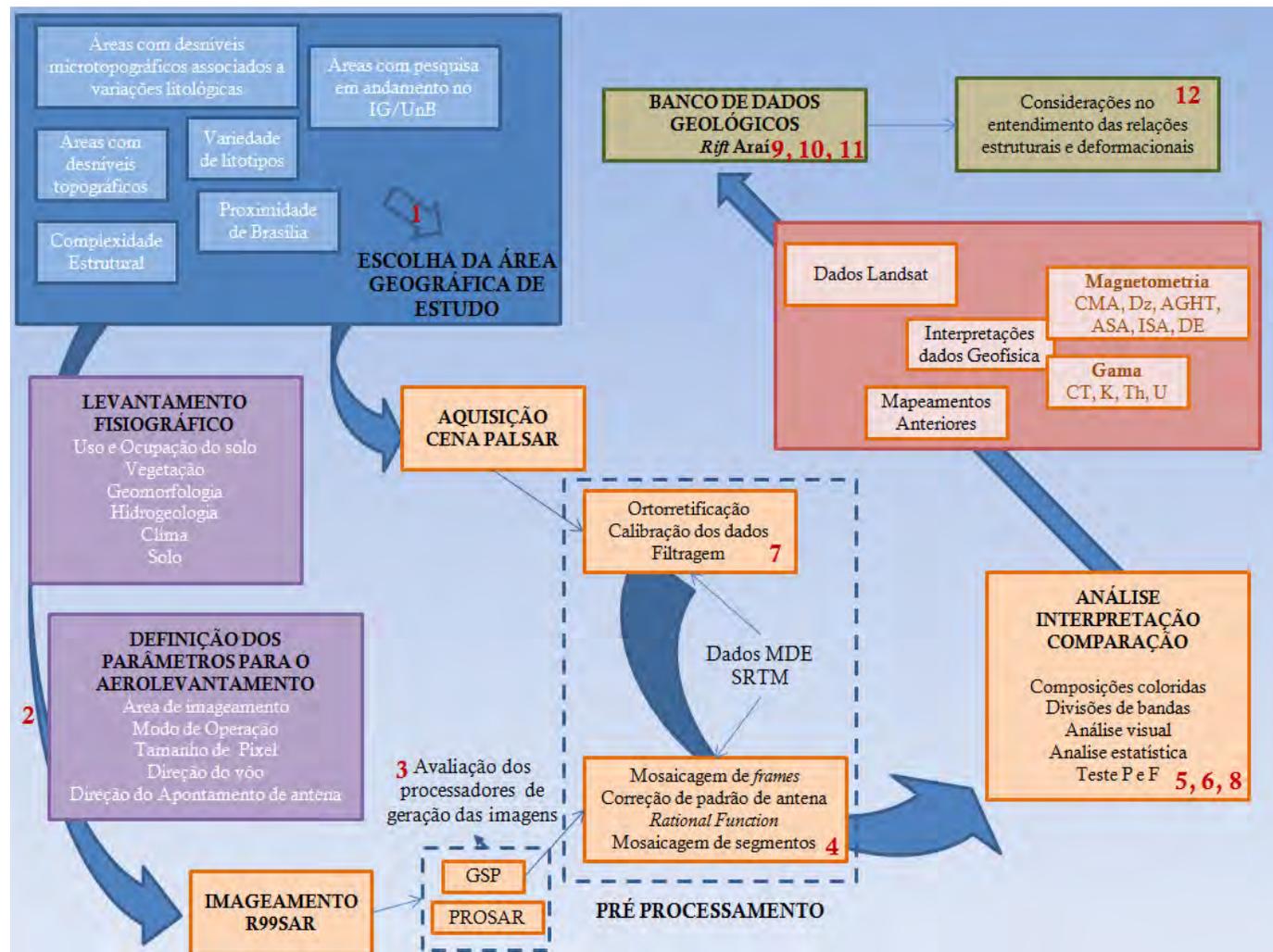


Figura 1: Fluxograma dos métodos que serão empregados nesta pesquisa. Os números em vermelho correspondem às etapas a serem cumpridas listadas na página anterior.

1.4. Projeto SIPAM

O Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM) tem o intuito de integrar informações e gerar conhecimento atualizado para articulação, planejamento e coordenação de ações globais de governo na Amazônia Legal brasileira, visando à proteção, à inclusão social e ao desenvolvimento sustentável da região. O custo total do projeto é de cerca de 1,4 bilhões de dólares (Lourenção, 2003).

As informações relacionadas ao processo de instalação, operação e funcionamento do SIPAM são escassas e difusas (Falconi, 2005; Silva & Menezes, 2008 e FAB, 2008). Mesmo assim, procurou-se compor uma síntese a partir das informações coletadas no decorrer desta pesquisa, para demonstrar a arquitetura do sistema operante nos dias atuais.

1.4.1. Histórico

O Sistema de Vigilância da Amazônia (SIVAM) foi constituído devido à necessidade de um programa de governo que permitisse a promoção do desenvolvimento da Região Amazônica com harmonia entre as necessidades humanas e ambientais. Segundo Beker *et al.* (1990):

“A Amazônia não é mera questão regional, mas sim uma questão nacional. Seu imenso patrimônio natural pouco conhecido e inadequadamente utilizado é um desafio à ciência nacional e mundial, foco de conflitos quanto à sua apropriação que afetam a face interna da soberania brasileira e também instrumento de pressão externa e de negociação do Brasil para adesão ao “norte” no contexto internacional. Várias tentativas desastrosas e descoordenadas de projetos para a região foram executadas, e esta foi ficando cada vez mais vulnerável aos interesses internacionais, como por exemplo, o contrabando de madeiras nobres e de animais silvestres, bens minerais, o uso de rotas, plantações e laboratórios clandestinos pelo narcotráfico”.

Historicamente, os planejamentos, programas ou projetos de desenvolvimento regional que se referiam à atual Amazônia Legal sempre foram permeados e determinados por condutas de ordem estratégica e militar (Falconi, 2005).

Em setembro de 1990, o então presidente Fernando Collor de Mello, por meio de um estudo realizado pela extinta Secretaria de Assuntos Estratégicos (SAE) e pelo Ministério da Justiça, criou a concepção do SIPAM. Os fatos marcantes da

implementação e origem do atual sistema encontram-se listados abaixo (Silva & Menezes, 2008):

- ❖ Em 1992, foi criada a Comissão Coordenadora do Sistema de Vigilância da Amazônia (CCSIVAM), sob a responsabilidade do Ministério da Aeronáutica (atualmente Comando da Aeronáutica), para coordenar o desenvolvimento das ações relativas à implantação do SIVAM, e cooperar com a Secretaria de Assuntos Estratégicos (SAE) na implantação do SIPAM.
- ❖ No primeiro semestre de 1993, a SAE constituiu a Comissão de Implantação do Sistema de Proteção da Amazônia (CISIPAM) e, ainda, por recomendação dessa secretaria e do Conselho de Defesa Nacional, dispensou-se de licitação a empresa brasileira que teria por função gerenciar o SIVAM e desenvolver um *software* para isso. A secretaria intermediou diretamente a relação entre o governo e a empresa estrangeira de implementação do sistema sob a justificativa da segurança nacional.
- ❖ No segundo semestre de 1993, foi criada uma força tarefa entre a SAE, Banco Central, Polícia Federal, ministérios da Aeronáutica, da Justiça, da Agricultura, da Marinha, do Exército e do Meio Ambiente, entre outros, para definir os termos que iriam vigorar para regular a concorrência entre os interessados na licitação. No final desse semestre, foi anunciada a empresa brasileira vencedora: Engenharia de Sistemas de Controle e Automação (ESCA).
- ❖ Em 1994, foi escolhido o consórcio de empresas, comandado pela empresa norte-americana *Raytheon*, para a implantação do SIVAM.
- ❖ Já em 1995, a empresa ESCA foi excluída do processo de instalação do SIVAM por irregularidades. Em seu lugar, foi contratada a Embraer e, posteriormente, a Aplicação de Tecnologias Críticas (ATECH). A missão da ATECH era a de garantir a autonomia brasileira na operação, manutenção e evolução tecnológica da inteligência do SIVAM após o término do contrato de implantação com a *Raytheon*.
- ❖ Em 2002, após o período de implementação, a Secretaria Executiva do Conselho Deliberativo do Sistema de Proteção da Amazônia (SECONSIPAM) foi transferida do Ministério da Defesa para a Casa Civil da Presidência da República, alterando sua denominação para Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM).

A partir de 2004, o SIVAM passou por um período de transição, em que a CCSIVAM (na época sob responsabilidade da Aeronáutica) foi extinta, e o Sistema passou a ser controlado totalmente pelo CENSIPAM, dirigido pela Casa Civil da Presidência da República. Nessa nova fase, com a integração do SIVAM e SIPAM, o Sistema passa a ser designado somente como SIPAM.

1.4.2. Estrutura

O SIPAM atua de forma articulada e otimizada a partir de um Centro de Coordenação Geral (CCG), localizado em Brasília, interligado diretamente aos centros regionais que dividem a Amazônia em três áreas de jurisdição, denominadas Centros Técnicos e Operacionais (CTO), localizados nas cidades de Belém, Manaus e Porto Velho (figura 2).

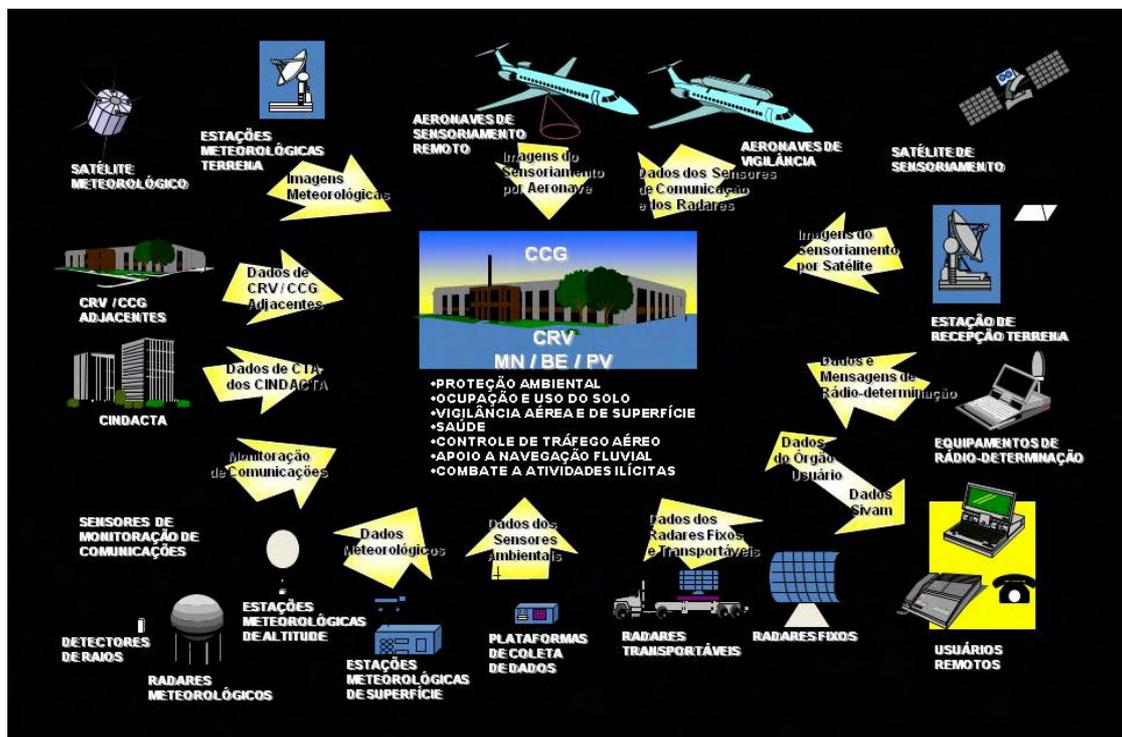


Figura 2: Esquema de aquisição, tratamento e visualização de dados no Sistema de Proteção da Amazônia.

O SIPAM é subdividido em três subsistemas: Aquisição de Dados, que através de uma rede de sensores busca dados do ecossistema, das condições hídricas e climatológicas, dos recursos minerais, dos movimentos aéreos e de superfície, das atividades ilícitas e das comunicações clandestinas, entre outros; o de telecomunicações, em que por intermédio de um conjunto de equipamentos permite o trânsito de textos, voz, dados e imagens e o de Tratamento e Visualização de Dados e Imagens, que por

meios de recursos computacionais integra e interpreta as informações coletadas, constituindo-se na inteligência artificial do sistema (Fedozzi, 2003).

1.4.2.1. Aeronaves de Sensoriamento Remoto

O subsistema de aquisição de dados conta com equipamentos de sensoriamento remoto orbital e aéreo, sensores meteorológicos, plataforma de coleta de dados, radiodeterminação, rede de exploração de comunicação e rede de detecção radar. O sensoriamento remoto aéreo do CENSIPAM dispõe de um aparato tecnológico único no país e conta com dados obtidos por quatro sensores aerotransportados a bordo das aeronaves R99 e R95-B (SIPAM, 2008).

As plataformas de sensoriamento remoto R99, utilizando as aeronaves EMBRAER 145-R99 (figura 3), possibilitam a observação do terreno com três sensores distintos: OIS (câmera que obtém dados em tempo real), SAR (radar multipolarimétrico) e MSS (sensor multiespectral com 31 bandas distribuídas na região do espectro eletromagnético do visível e infravermelho próximo). Especificamente, os dados obtidos pelo sensor SAR tornam-se estratégicos para aplicações no trópico úmido, onde a presença de chuvas, nuvens e fumaça impõem restrições ao imageamento óptico, pois tais sensores praticamente independem de condições atmosféricas, iluminação solar e revisita.

O sensor R99SAR, anteriormente denominado R99B, foi fabricado pela *MacDonald Dettwiler* em Vancouver (Canadá) e opera na banda L com multipolarimetria e na banda X com polarização HH e interferometria. As imagens da banda L podem cobrir uma faixa no terreno de 10 a 120 km (faixa útil 20-90 km) com resolução espacial de 3, 6 e 18 metros. Na banda X, o sensor é capaz de gerar imagens com resolução de até 1,8m. Sínteses sobre características técnicas desse sensor e os modos de operação encontram-se em Andrade & Santa Rosa (2007a, 2007b).

A capacidade de aquisição de dados em quase todos os tipos de condições climáticas permitiu, nos últimos cinco anos de operação dessas aeronaves, o imageamento de mais de 70% da região da Amazônia Legal (figura 4), o que não foi realizado com a série de Satélite Landsat 1-7 em operação há mais 35 anos nessa região.



MSS	OIS	SAR
28 CANAIS VIS/NIR	1 CÂMARA INFRAVERMELHO	1 RADAR BANDA XHH INTERFEROMÉTRICO
2 CANAIS SWIR	1 CÂMARA TV "ZOOM"	1 RADAR BANDA L MULTIPOLARIMÉTRICO
1 CANAL TERMAL OIS		

Figura 3: Aeronave de sensoriamento remoto utilizada pelo SIPAM com identificação dos sensores de aquisição de imagens.

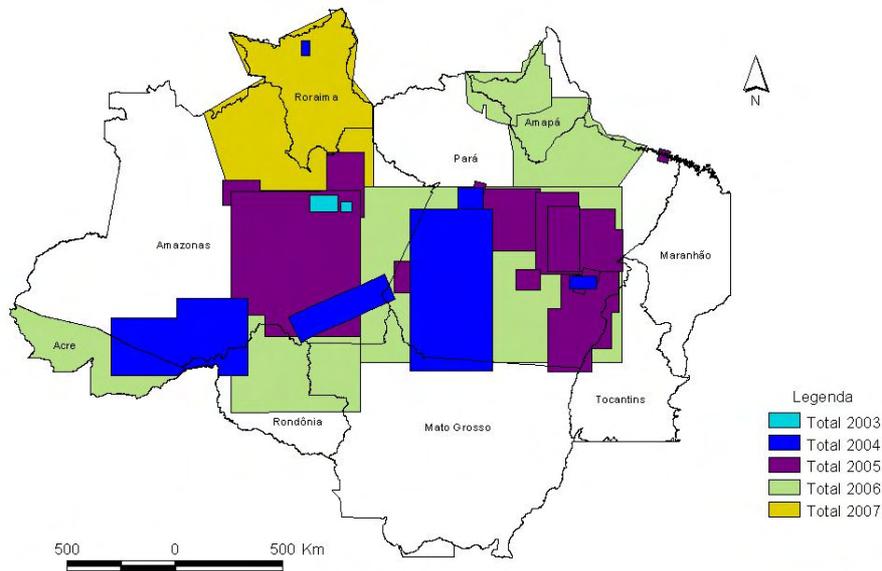


Figura 4: Área de cobertura com imagens R99SAR entre os anos de 2003 e 2007 (fonte: 2°/6°GAV).

Capítulo 2

Área de estudo

2.1. Apresentação

A aplicação de dados de sensores remotos em diversas áreas do conhecimento demonstra o poder de interdisciplinaridade presente nas pesquisas que utilizam este tipo de dado como principal meio de extração de informação do alvo. Sendo assim, para a correta avaliação de cada tipo de sensor em relação a qualidades e deficiências nas diferentes áreas de atuação, tais como geologia, oceanografia, cartografia, meio ambiente, torna-se necessário que o local geográfico tenha características que permitam fazê-la.

Nessas últimas três décadas foi observada uma revolução no desenvolvimento tecnológico de construção de sensores remotos orbitais e aerotransportados. Viu-se o advento de sensores dos mais diversos tipos e para as mais diversas aplicações de cunhos militar e civil. O ramo de construção de sensores foi resumido na busca constante de melhores resoluções espectrais, temporais e espaciais, sempre com a “barreira” da capacidade de aquisição do sistema, armazenamento e transmissão dos dados.

No Brasil, as limitações de mapeamento do território nacional estão intimamente relacionadas à dificuldade de obtenção de dados utilizando imageamentos fotográficos ou sensores orbitais da faixa óptica, devido à alta frequência de cobertura de nuvens. Existem regiões brasileiras que apesar do grande número de imagens disponíveis nos últimos 30 anos, poucas são as sem cobertura de nuvens. A fonte de dados alternativa para essas regiões que cobrem cerca de 40% do território brasileiro é a imagem radar. A aplicabilidade de dados SAR em território brasileiro foi bastante explorada durante a década de 1970, no RADAMBRASIL, que gerou informações geológicas, fitofisionômicas, geomorfológicas, hidrográficas e de toponímia, utilizando dados de imagens de radar aerotransportado na banda X.

Este capítulo apresenta a área de estudo de pesquisa e os elementos que foram julgados favoráveis para uma análise detalhada do sensor aerotransportado R99SAR, com suas múltiplas polarizações para a área de conhecimento da geologia.

2.2. Seleção da área

Especificamente para esta pesquisa, considerou-se que a escolha da área para estudo com o uso de tecnologia de sensoriamento remoto de radar R99SAR, com fins de mapeamento geológico, deveria possuir as seguintes premissas:

1. *Área próxima a Brasília:* a fim de facilitar a logística de operação da aeronave, sediada em Anápolis (GO), e as realizações de campanhas de campo para verificação das respostas de radar.
2. *Área com pesquisas em andamento no IG:* para aliar uma maior quantidade de dados ao projeto e assegurar uma melhor avaliação e interpretação dos dados SAR.
3. *Área com variações topográfica expressivas:* verificar o desempenho do modo de imageamento e da resolução espacial na caracterização das formas de relevo.
4. *Área com variações texturais associada à variação litológica:* determinar a capacidade da utilização da multipolarização na distinção litológica de semi-detalle.
5. *Área com complexidade estrutural:* estudar a potencialidade das imagens de radar para estabelecer e compreender as relações estruturais dos eventos deformacionais ocorridos.
6. *Área de extensão máxima de 5000 km²:* para efetuar uma pesquisa na escala regional a fim de comparar com os mapeamentos geológicos prévios na escala 1:100.000.

Com essas premissas, e visando à escolha da área de estudo, foram analisados os dados de altimetria gerados pela *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de algumas regiões dos estados de Goiás e Tocantins. Essa missão mapeou o globo terrestre com dados de radar interferométrico e gerou informações que possibilitam, uma precisão cartográfica na escala 1:250.000 em relação ao Padrão de Exatidão Cartográfica Classe A do IBGE (Rabus *et al.*, 2003; Sun *et al.*, 2003; Rao, 2004; Miliarensis & Paraschou, 2005; Pinheiro, 2006; Santos *et al.*, 2006; e Almeida *et al.*, 2009).

Outras fontes de dados utilizadas para guiar a escolha da área de trabalho foram os dados do sensor ETM+ do satélite Landsat 7, sensor multiespectral com uma precisão cartográfica compatível com a escala de 1:100.000, segundo os trabalhos de Almeida *et al.* (2009) e da metodologia aplicada ao programa da CPRM de Retomada do Levantamento do Mapeamento Geológico no Brasil. Esses dados, conjuntamente com os dados do Sistema de Informação Geográfico (SIG) com dados geológicos da

CPRM na escala 1:1.000.000 (Bizzi *et al.*, 2002), permitiram a definição de quatro áreas possíveis de estudo segundo os critérios preestabelecidos: (i) Terreno Almas-Dianópolis (TO); (ii) Arco Magmático de Mara Rosa (GO); (iii) Arco Magmático Arenópolis (GO); e (iv) Rifte Araí (GO).

Dentre essas quatro possíveis áreas de interesse selecionadas, elegeu-se uma porção da região do Rifte Araí (GO), de idade Paleoproterozóica. Uma bacia tipo rifte é definida como sendo um ambiente de fragmentação continental com subsidência de bacia e separação de placas em uma complexa estruturação, estreita e alongada (Gotzinger *et al.*, 2006). Segundo esses autores, este processo gera espessas sucessões de rochas sedimentares e também de rochas ígneas extrusivas e intrusivas, compondo um cenário de gama litológica bastante ampla, satisfazendo assim os itens 4 e 5.

Essa área é foco de pesquisa geológica do corpo docente e discente do Instituto de Geociências da UnB que, desde 1995, vem mapeando nas escalas 1:50.000 e 1:25.000.

2.2.1. Localização da área

A região escolhida como a mais representativa do Rifte Araí localiza-se no nordeste do Estado de Goiás, fronteira com o Estado do Tocantins (figura 5), abrangendo uma área de 5200 km² de parte dos municípios de Arraias e Paranã no Estado do Tocantins e Nova Roma, Teresina de Goiás, Cavalcante e Monte Alegre no Estado de Goiás. Distancia-se aproximadamente 350 km da cidade de Brasília (DF), e a rodovia GO-118 é a principal via de acesso da capital federal à área. Várias vias vicinais (GO 112, GO 241, GO 576), a maioria não pavimentada, cortam a área, possibilitando o acesso a praticamente todos os seus quadrantes.

O recobrimento da área de aerolevanteamento foi delimitado entre as coordenadas de latitude -13°10'S e -13°50'S e longitude -46°50'W e -47°30' (40'x 40', aproximadamente 5.200Km²) e incluem em seus limites as cidades de Nova Roma, Monte Alegre de Goiás, Cavalcante e Teresina de Goiás (figura 5).

2.3. Descrição fitofisiográfica da área

Os elementos que compõem a paisagem de uma área a ser mapeada são fontes de informações extremamente importantes para o mapeamento geológico. Esse fato torna-se ainda mais decisivo quando o método empregado para a identificação é o imageamento da área por sensor remoto. Sabe-se que a radiação eletromagnética captada pelos sensores óticos e de radar mais utilizados para mapeamentos geológicos interagem com o alvo mapeado, mas a energia eletromagnética envolvida no processo possui pouca penetrabilidade, demonstrando assim as características dos primeiros milímetros (no caso de sensores óticos) ou, no máximo, centímetros (no caso de sensor radar) da área de contato da onda eletromagnética com a superfície.

No Brasil, devido ao clima tropical, às superfícies de aplainamento regionais e à “estabilidade” geológica, é bastante comum nos mapeamentos geológicos por sensoriamento remoto o uso de informações indiretas, tais como geomorfologia, hidrografia, vegetação e solos. Assim, nesse item serão apresentadas as características fisiográficas da área de imageamento do sensor R99SAR, que servem de base para as discussões apresentadas nos capítulos seguintes.

O governo do Estado de Goiás, por meio da Secretaria de Indústria e Comércio e da Superintendência de Geologia e Mineração, editou e lançou, em 2006, a *Série Geologia e Mineração*, que conta com um banco de dados georreferenciados, com diversos temas e livros que descrevem a hidrogeologia (série um, Almeida *et al.*, 2006a), geomorfologia (série dois, Latrubesse *et al.*, 2005) e a caracterização climática (série três, Silva *et al.*, 2006) do estado na escala 1:250.000. Esses trabalhos serviram de base para a descrição deste item.

2.3.1. Geomorfologia

Segundo o mapa geomorfológico do Estado de Goiás, publicado pelo Governo do Estado de Goiás – escala 1:250.000- (Latrubesse *et al.*, 2005), a área de trabalho possui três sistemas geomorfológicos distintos (figura 7). Predominam, tal qual o observado para a totalidade do Estado de Goiás, as Superfícies Regionais de Aplainamento (SRA) que são consideradas unidades denudacionais, geradas pelo arrasamento e/ou aplainamento dentro de uma cota topográfica. Esse sistema possui relativa independência em relação a controles geológicos regionais, como litologias e estruturas e, na área de estudo, é subdividido em três diferentes grupos:

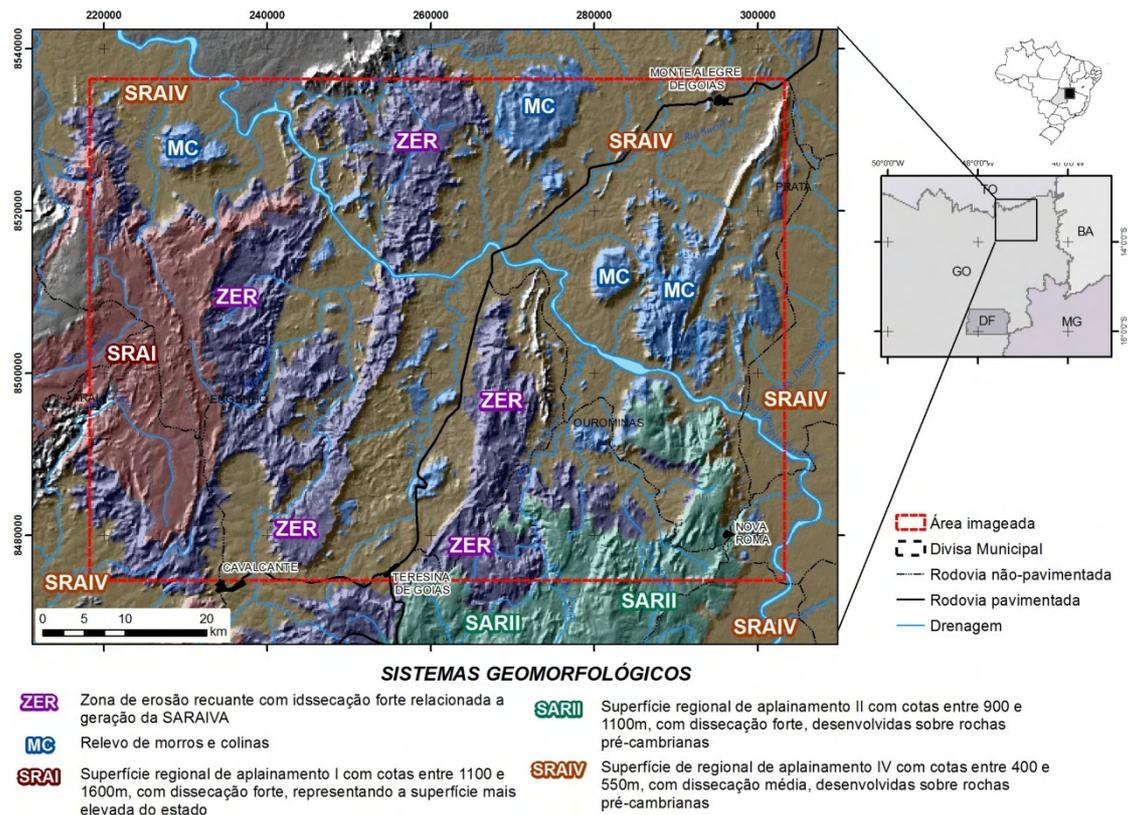


Figura 7: Mapa da geomorfologia da área de Nova Roma- Cavalcante – Monte Alegre de Goiás sobreposto a imagem SRTM (Adaptado de Latrubesse *et al.*, 2005)

- ❖ SRAI: situado no extremo oeste com abrangência menor que 5% da área de imageamento; resulta de uma superfície de aplainamento mais antiga, provavelmente cenozóica, desenvolvida em rochas metassedimentares. Possui cota topográfica entre 1250 e 1600 metros, com falésias imponentes e abruptas nas bordas dos chapadões que ocorrem entre essas e a unidade SRAIV.
- ❖ SARII: situado na porção sudeste da área de trabalho, com menos de 7% de abrangência, normalmente possui níveis intermediários entre as superfícies de aplainamentos, entre SRAI e SRAIV, com cotas topográficas com variações entre 900 a 1.250 metros em rochas proterozóicas menos resistentes. O padrão de dissecção dessa unidade é médio.
- ❖ SRAIV: predomina entre as superfícies de aplainamento na área estudada, com abrangência de 70% da área imageada. Com cotas que variam entre 400 e 500 metros, apresenta padrões de dissecção fraco e superfícies de pediplanação que se articulam tanto com SARII quanto com o escarpamentos das serras (figura 8). Está principalmente associada às rochas do embasamento na região e ao Grupo Bambuí.

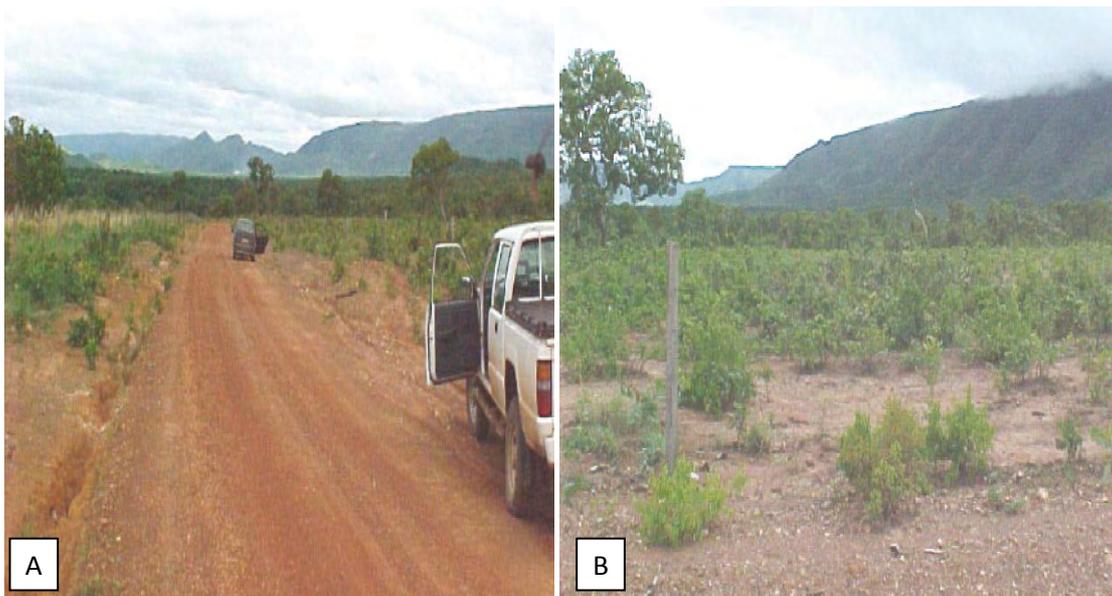


Figura 8: Superfície de pedimentação associada ao pedimonte da Serra da Pedra Branca na porção leste da área imageada. Na foto A, observa-se a Serra da Pedra Branca que coalesce e se integra à SRAIV; na foto B, observa-se a quebra de relevo entre a escarpa dessa mesma serra e a superfície horizontal do pedimento.

O segundo domínio geomorfológico encontrado na área do imageamento, segundo Latrubesse *et al.* (2005, figura 7), são as Zonas de Erosão Recuantes (ZER) que perfazem cerca de 15% da área e estão intimamente relacionadas às Superfícies Regionais de Aplainamento. Grandes reentrâncias marcam a erosão das superfícies de aplainamento antigas, a partir de um nível de base inferior (local ou regional), associado à rede de drenagem que evolui por erosão recuante, dissecando as superfícies de aplainamento e gerando outras SRAs. Essas áreas identificadas como Zonas de Erosão Recuante (ZER), freqüentemente passam transicionalmente para a SRA, que atua como nível de base local, dificultando o mapeamento exato dos contatos entre esses dois domínios geomorfológicos.

À medida que a ZER cresce, uma paisagem de morros e colinas se constrói, iniciando um novo estágio evolutivo, embora incipiente, para a geração de uma SRA situada numa cota inferior. Este domínio ocupa o terceiro em ocorrência (figura 7) e apresenta destaque por possuir cotas elevadas diante de uma superfície regional de cota topográfica inferior. Está associado às rochas com um forte controle estrutural, ou mesmos às rochas granitóides resistentes a erosão, de formatos esferoidais e de alta inclinação denominados de *Inselbergs*.

2.3.2. Hidrografia

A área imageada pelo sensor R99SAR faz parte da Bacia Hidrográfica do rio Tocantins. Esta bacia hidrográfica pode ser subdividida em uma série de microbacias entre elas a do rio Paranã (figura 9).

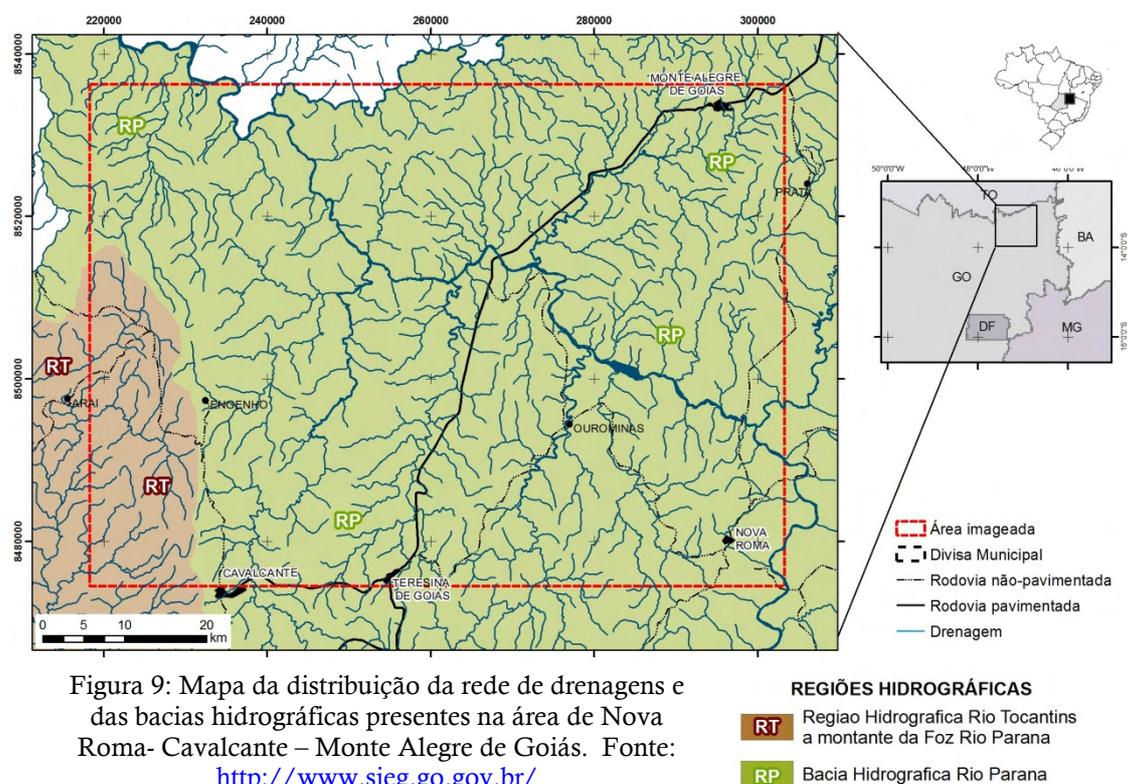


Figura 9: Mapa da distribuição da rede de drenagens e das bacias hidrográficas presentes na área de Nova Roma- Cavalcante – Monte Alegre de Goiás. Fonte: <http://www.sieg.go.gov.br/>

O principal rio da região é o Paranã, que cruza a área imageada de sudeste para noroeste. Esse rio apresenta curso perene, com ocorrências localizadas de meandros. Os seus principais tributários possuem características distintas a leste e a oeste da área de estudo. Na porção centro-leste possuem direção NNE com sinuosidade mista, angulosidade média, e tropia bidirecional e com maior densidade quando comparada com a região noroeste da área de estudo. De uma forma ampla, acompanham a direção preferencial do relevo nessa região e ocupam o terreno intermontano; são cursos de água na maioria intermitentes com pouca presença de massa d'água, conforme denominação de Almeida *et al.* (2006). Os canais que abastecem esses tributários do Paranã nesta porção da área de estudo são, em grande maioria, perenes com tropia pouco estruturada, sinuosidade retilínea e angularidade média. Normalmente, possuem nascente nas cotas mais elevadas do terreno (serra) e apresentam ângulo de 90° em relação às serras alinhadas NNE. A densidade é mais alta quando comparada com a porção noroeste da área.

Ainda no domínio da bacia hidrográfica do Paranã, porém na porção noroeste da área de estudo, observamos a falta de alinhamento dos tributários diretos do rio Paranã.

2.3.3. Vegetação

Em termos fitológicos, os municípios de Monte Alegre, Nova Roma, Cavalcante e Teresina de Goiás localizam-se na região de cerrado no Planalto Central Brasileiro. O cerrado é uma unidade típica de zona tropical, caracterizada por uma vegetação de fisionomia e flora própria e abrange aproximadamente 23% do território brasileiro. A disponibilidade dos nutrientes nos horizontes do solo, na maioria das vezes determina a composição florística do bioma, que se caracteriza pela presença de três estratos: arbóreo, arbustivo e gramíneo ou herbáceo. A proporção entre esses três estratos é o critério mais amplamente utilizado na classificação de suas fitofisionomias (Loebmann, 2008).

No mapa da cobertura do solo (uso e ocupação), de escala 1:250.000 (*shapefile* disponibilizado pela Agência Ambiental do Estado de Goiás, 2007, <http://www.sieg.go.gov.br/>), observa-se que menos de 3% da área de trabalho é antropizada pela presença de pastagens e/ou agricultura (figura 10).

A grande porção preservada é coberta por três tipos principais de vegetação com predomínio de savana arborizada (cerrado típico/ denso), savana florestada (cerradão) e a savana parque (cerrado ralo/cerrado rupestre/campo sujo/campo rupestre). A nomenclatura utilizada neste mapa de uso e ocupação do solo é uma adequação do manual técnico do IBGE (1992) proposta por Ribeiro & Walter (1998).

❖ Savana arborizada: caracterizada como subgrupo de formação natural ou antropizado que formam fisionomias ora mais abertas (campo cerrado), ora mais adensadas (cerrado “propriamente dito”). A composição florística é bastante semelhante à da savana florestada. Para Ribeiro & Walter (1998), a savana arborizada pode ser dividida em dois subtipos: cerrado denso, predominantemente arbóreo com cobertura de 50% a 70% e altura média de 5 a 8 metros; e o cerrado típico, predominantemente arbóreo arbustiva, com cobertura arbórea de 20% a 50% e altura média de três a seis metros. Trata-se de uma forma comum e intermediária entre o cerrado denso e o cerrado ralo. Segundo Dambros *et al.* (1994), na Folha de Campos

Belos essa tipologia está associada diretamente às encostas íngremes e a altas cotas topográficas presentes nessa folha (figura 10), perfazendo 20% da área de estudo.

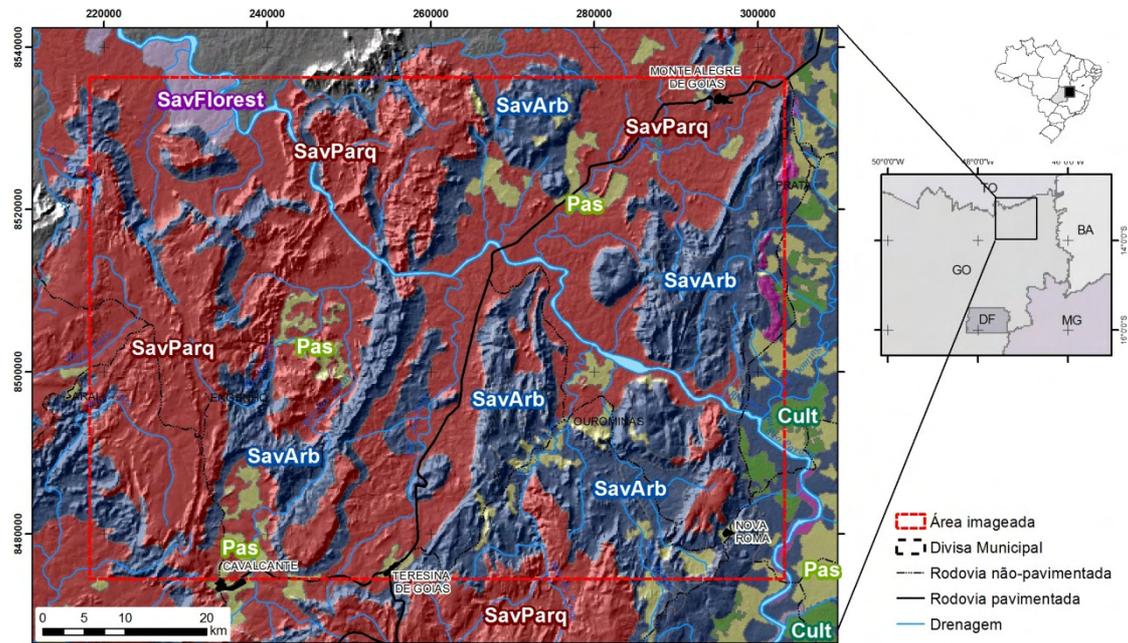


Figura 10: Mapa da distribuição vegetal da área de Nova Roma- Cavalcante – Monte Alegre de Goiás sobreposto a imagem SRTM. Fonte: <http://www.sieg.go.gov.br/>

DISTRIBUIÇÃO VEGETAL

SavParq	Savana parque (cerrado ralo/cerrado rupestre/ campo sujo seco. campo rupestre)
SavArb	Savana Arborizada (cerrado típico/ cerrado denso)
SavFlorest	Savana florestada (cerradão)
Cult	Cultura Anual
Pas	Pastagem

❖ Savana parque (figura 11): é predominante na área de estudo, recobrando quase 80% e presente nas regiões planas e de baixas altitudes. Na conceituação do IBGE (1992), trata-se de um subgrupo de formação constituído essencialmente por um estrato graminóide e com presença esparsas de arbustos. Nos terrenos bem drenados, caso da área de estudo, essa formação equivale aos subtipos definidos por Ribeiro & Walter (1998) como cerrado ralo e cerrado rupestre, e às vezes como campo sujo seco e o campo rupestre. Para esses autores, o cerrado ralo é um subtipo de vegetação arbóreo-arbustiva, com cobertura arbórea entre 5% e 20% e altura média de dois a três metros, apresentando uma florística semelhante aos cerrado denso e cerrado típico, embora estruturalmente diferente. O cerrado rupestre (figura 11A e 11C) é definido como um subtipo de vegetação arbóreo-arbustiva que ocorre em ambientes rupestres (litólicos ou rochosos). Possui cobertura arbórea entre 5% e 20%, altura média de dois a quatro metros e estrato arbustivo-herbáceo também destacado. As espécies arbóreas-arbustivas concentram-se nas fendas das rochas, sendo muitas delas endêmicas. O Parque de Cerrado é definido como uma formação savânica caracterizada pela presença de

árvores agrupadas em pequenas elevações do terreno. As árvores possuem altura média de três a seis metros e formam uma cobertura arbórea de 5% a 20%. Dambros *et al.* (2004) descreveram as características geoambientais da carta Campos Belos, recorte 1:250.000, que abrange a totalidade da área imageada, como feições savânicas bem abertas, geralmente com predomínio de Savana Parque com ou sem floresta-de-galeria.

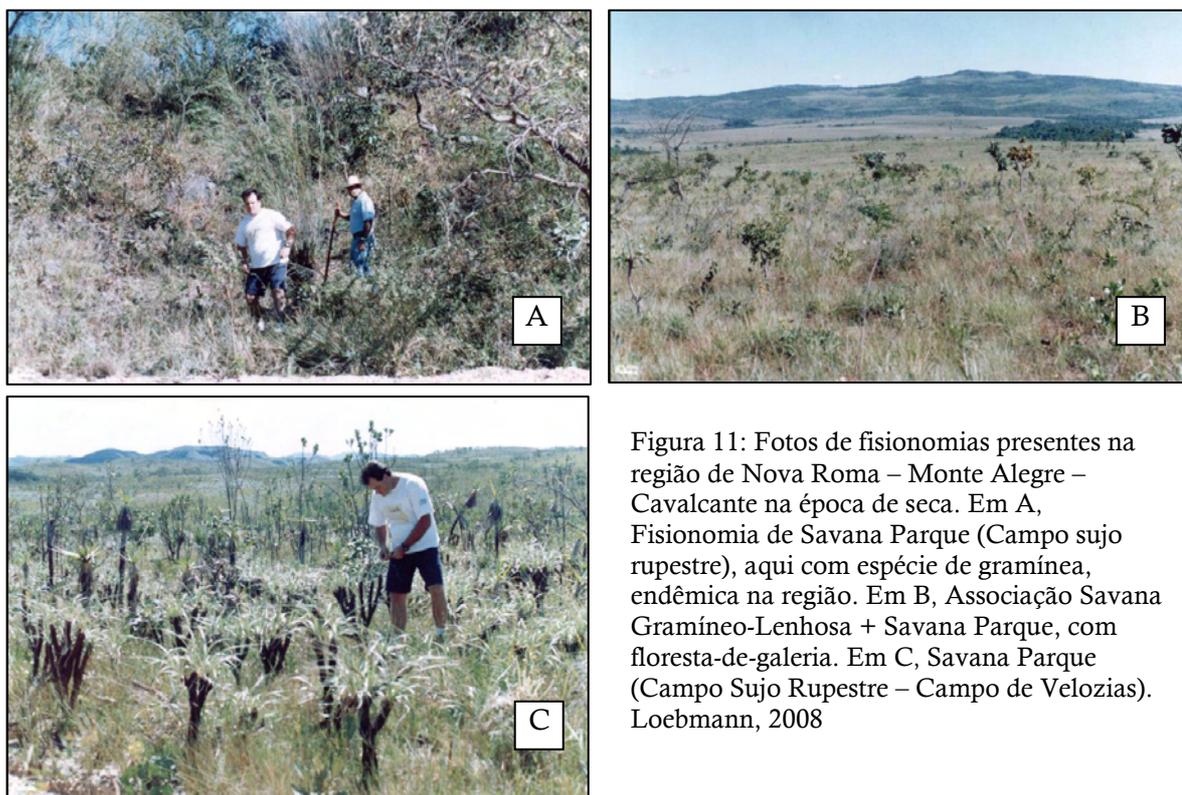


Figura 11: Fotos de fisionomias presentes na região de Nova Roma – Monte Alegre – Cavalcante na época de seca. Em A, Fisionomia de Savana Parque (Campo sujo rupestre), aqui com espécie de gramínea, endêmica na região. Em B, Associação Savana Gramíneo-Lenhosa + Savana Parque, com floresta-de-galeria. Em C, Savana Parque (Campo Sujo Rupestre – Campo de Velozias). Loebmann, 2008

2.3.4. Solos

A base de dados geográfica do Estado de Goiás, na escala 1:250.000, estabelece quatro classes distintas de solos para a região imageada pelo sensor R99SAR: plintossolos, neossolos, latossolos e cambisolos (figura 12) (Calil, 2003). As principais características de cada classe são (Embrapa, 2006; Hermuche *et al.*, 2009):

❖ Latossolos: são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, dentro de 200 cm da superfície do solo. Os latossolos, na área de estudo, estão sendo utilizados para culturas e pastagens por serem profundos, porosos, bem drenados, bem permeáveis, mesmo quando muito argilosos, friáveis e de fácil preparo. Estão associados

diretamente a alterações de rochas do embasamento granito-gnáissico nas cotas topográficas mais baixas e de relevo bastante plano.

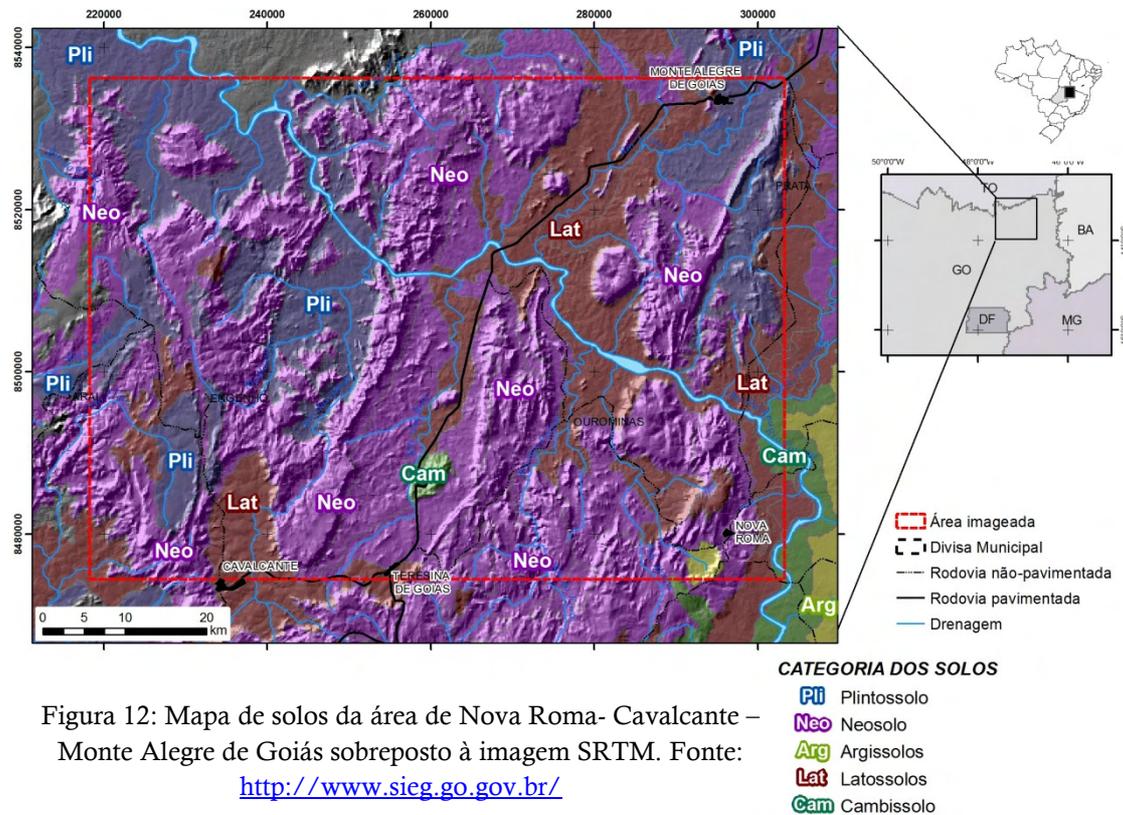


Figura 12: Mapa de solos da área de Nova Roma- Cavalcante – Monte Alegre de Goiás sobreposto à imagem SRTM. Fonte: <http://www.sicg.go.gov.br/>

❖ Cambissolos: são solos de ocorrência bastante restrita na área de trabalho (menos de 3% do total), com pedogênese pouco avançada evidenciada pelo desenvolvimento da estrutura do solo e ausência ou quase ausência da estrutura da rocha. Sua posição topográfica na paisagem é em relevo ondulado e suave ondulado, possivelmente no terço médio de encosta com declividade inferior a 5°.

❖ Neossolos: solos novos, pouco desenvolvidos, com reduzida atuação de processos pedogenéticos ou por características inerentes ao material originário. Possui teores de matéria orgânica, no entanto, são de baixa aptidão agrícola. Esses solos são muito suscetíveis à erosão e quando ocupam as cabeceiras de drenagem, em geral, dão origem a grandes voçorocas. Na área de estudo são interligados às cotas topográficas mais altas, associadas às encostas e às serras, perfazendo cerca de 70% da área total de imageamento.

❖ Plintossolos: ocorrem na porção noroeste da área de trabalho, em áreas de relevo plano. Compreendem solos minerais, formados sob condições de restrição à

percolação da água, sujeitos ao efeito temporário de excesso de umidade, de maneira geral, imperfeitamente ou mal-drenados.

2.4. Geologia Regional e Local

2.4.1. Província Tocantins – Faixa Brasília

A área de estudo está inserida na porção nordeste da Província Estrutural Tocantins onde afloram unidades da cobertura cratônica e do embasamento da Faixa Brasília (figura 13).

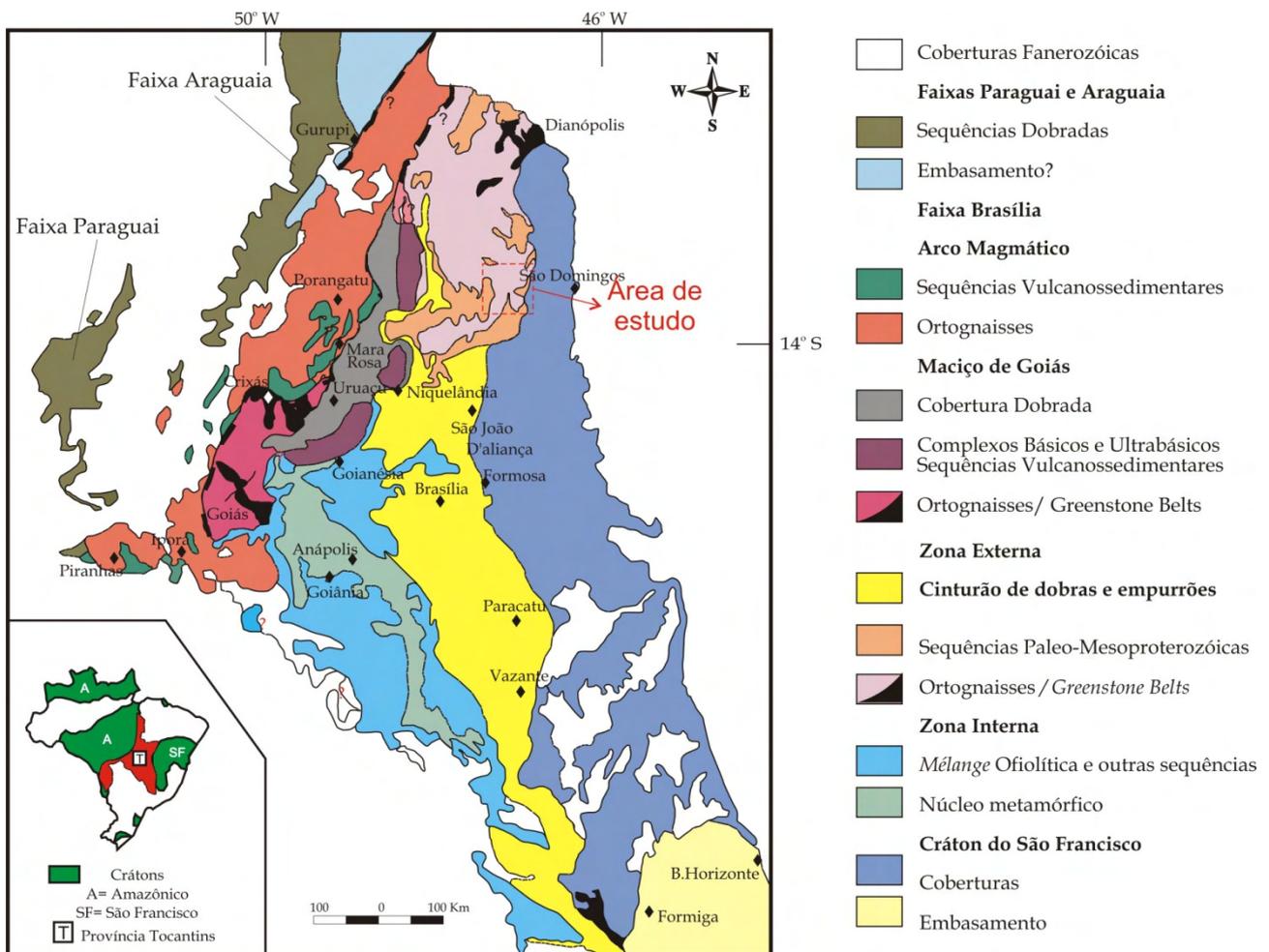


Figura 13: Esboço geológico da Província Tocantins (Fuck *et al.*, 1993)

A Província Tocantins (Almeida *et al.*, 1977, 1981) localiza-se na porção central do Brasil e é considerada como um sistema de orógenos brasileiros caracterizados por cinturões de dobras e empurrões denominados de Faixa Brasília, Paraguai e Araguaia.

Esses cinturões são resultado da colisão de três blocos continentais (os crátons Amazônico a noroeste, Paranapanema a sudoeste e São Francisco a leste) durante o neoproterozóico (Dardenne, 2000; Schobbenhaus & Brito Neves, 2004).

Essa zona orogenética neoproterozóica, que constitui a Província Tocantins, pode ser dividida nos setores ocidental e oriental, de direção aproximadamente N-S (Valeriano *et al.*, 2004). O setor oriental da província, onde se encontra inserida a área de trabalho, foi subdividido por Fuck *et al.* (1993; 1994) em: (i) Zona Cratônica, (ii) Faixa Brasília, (iii) Maciço de Goiás, (iv) Arco Magmático de Goiás e (v) Faixa Paraguai – Araguaí (figura 13).

A Zona Cratônica corresponde à porção mais oriental da Província Tocantins. É constituída por exposições restritas do embasamento, cobertas pelas sequências sedimentares proterozóicas dos grupos Paranoá (sedimentos terrígenos) e Bambuí (sedimentos carbonáticos), típicos de ambientes de margem passiva (Valeriano *et al.*, 2004), expostos ao longo de falhas inversas (Alvarenga & Dardenne, 1978). Esta zona apresenta dobras amplas e suaves, que se tornam mais apertadas próximas ao cráton. O limite entre essa zona e o cráton é dado por falhas de empurrão, que por vezes são truncadas por sistemas transcorrentes (Fuck, 1994; Massucato, 2003).

A Faixa de Dobramento Brasília (FDB), desenvolvida na margem oeste do Cráton do São Francisco, estende-se por mais de 1100 km na direção N-S (Dardenne, 2000). Foi denominada originalmente de Geossinclíneo Brasília por Almeida (1967). Era entendida como um miogeossinclínio desenvolvido durante o Proterozóico Superior, adjacente à “plataforma” do São Francisco e sobreposta em grande parte às estruturas Araxaídes, desenvolvidas no evento Uruçuano (Almeida, 1968). Dardenne (1978, 1981); Fuck *et al.* (1994); e Fuck (1994) subdividiram a FDB em duas zonas: uma externa e outra interna.

A zona externa da Faixa Brasília, na qual se insere este projeto, consiste em exposições do embasamento e coberturas meso-neoproterozóicas, estruturadas em dois braços de estilos metamórficos, associações de rochas e regimes deformacionais distintos que se encontram formando a Megaflexura dos Pirineus (Araújo Filho, 1999). As exposições do embasamento dessa porção são representadas, na área de trabalho, pelas unidades que compõem as bacias intracontinentais Paleo-Mesoproterozóica (Grupo Araí e Suíte Pedra Branca) e cinturões paleoproterozóicos (Fm. Ticunzal e Suíte Aurumina) (Moreira *et al.*, 2007). As rochas meso-neoproterozóicas são representadas pelos grupos Minaçu, Paracatu, Canastra, Ibiá e pela Formação Vazante.

A zona interna da Faixa Brasília é representada por mica xistos dos grupos Araxá e Serra da Mesa e áreas expostas de embasamento, em boa parte granulitizados.

O Maciço de Goiás é um fragmento continental formado por rochas arqueanas a mesoproterozóicas (Valeriano *et al.* 2004). Revisões mais detalhadas sobre essa unidade podem ser encontradas em Marini *et al.* (1981), Fuck *et al.* (1994) e Valeriano *et al.* (2004).

O Arco Magmático de Goiás está localizado entre o Maciço de Goiás e as faixas Araguaia e Paraguai. Este domínio abrange terrenos ortognáissicos e seqüências vulcanossedimentares neoproterozóicas, metamorfasadas em fácies xisto verde e anfíbolito. Revisões sobre esta unidade podem ser encontradas em Fuck *et al.* (1994), Fuck (1994), Pimentel *et al.* (2000) e Valeriano *et al.* (2004).

Uma outra subdivisão dos domínios tectônicos da Província Tocantins foi proposta por Delgado *et al.* (2002). Esses autores reuniram as informações de Lacerda Filho *et al.* (1999), Dardenne (2000) e Pimentel *et al.* (2000) e subdividiram os domínios tectônicos da Província Tocantins em: (i) Terrenos Granito *Greenstone* Arqueanos e domos TTG, (ii) Domínio Porto Nacional – Nova Crixás, (iii) Faixa Móvel Paleoproterozóica Dianópolis – Silvânia, (iv) Complexo máfico-ultramáficos acamadados de Goiás, (v) Bacia Rife Paleoproterozóica (grupos Araí- Serra da Mesa), (vi) remanescentes de crosta oceânica, (vii) Orógenos Brasileiros (faixas Paraguai, Araguaia e Brasília e arco magmático de Goiás) e (viii) terreno de significado duvidoso. A subdivisão mais aceita e citada para os trabalhos da Província Tocantins e aqui adotada é a proposta por Fuck *et al.* (1993, 1994).

2.4.2. Rife Araí

A área de estudo, com cerca de 65 x 80Km, encontra-se inserida em dois domínios tectônicos distintos: Zona Cratônica e Embasamento da Faixa de Dobramento Brasília – Zona Externa (compartimentação de Fuck *et al.*, 1993 e Fuck, 1994) ou Bacia Rife Paleoproterozóica e Orógenos Brasileiros (compartimentação de Delgado *et al.*, 2002) (figura 13).

As cartas geológicas 1:100.000 desta área (Alvarenga *et al.* 2007b; Botelho *et al.* 2007; Dardenne *et al.* 2007; ANEXO 1) distinguem as seguintes unidades estratigráficas na região do Rife Araí (Alvarenga *et al.*, 2007a): (i) Formação Ticunzal, (ii) Suíte Aurumina, (iii) Quartzo Diorito Nova Roma, (iii) Suíte Pedra Branca, (iv) Grupo Araí,

(Alvarenga *et al.*, 2007a). A unidade inferior dessa formação é composta, principalmente, por biotita gnaisses finos a médios, freqüentemente bandados, com intercalações de muscovita quartzo-xisto e grafita mica xisto com biotita, granada e feldspato, que se tornam dominantes rumo ao topo da seqüência (Duarte, 2002). Nas folhas de Cavalcante, Monte Alegre de Goiás e Nova Roma (Botelho *et al.*, 2007; Dardenne *et al.*, 2007; Alvarenga *et al.*, 2007b), onde está parcialmente incluído este projeto, foram mapeados somente dois litotipos diferentes para esta formação:

- Quartzo muscovita xisto (PP1tzx): restritas porções em faixas do sopé das escarpas formadas pelas rochas do Gr. Araí, com coloração branca a creme, composição monótona (quartzo + mica branca) e opacos (subsidiariamente), granulação fina a média, com textura granolepidoblástica a lepidoblástica (Massucato, 2003).
- Paragnaisses (PP1tzp): compostos essencialmente de quartzo, K-feldspato e mica branca com ocorrência de plagioclásio, opacos e carbonatos. Coloração cinza-esverdeada, textura granoblástica e granulação fina a média (Massucato, 2003).

Estas rochas são polideformadas e polimetamórficas com cristalização da grafita em fácies anfíbolito alto (zona da sillimanita) e retrometamorfismo assinalado por paragênese de fácies xisto verde baixo com porfiroblastos reliquiares (Botelho & Portela, 2005).

As idades modelo Sm-Nd (T_{DM}) apontam a idade mínima deposicional entre 2.7 e 2.8 G.a. (Fuck *et al.*, 2002). Os granitos da Suíte Aurumina, com feições intrusivas nessa unidade, estabelecem a idade máxima de 2.129 ± 26 Ma (Sparrenberger & Tassinari, 1998).

Mineralizações de urânio estão relacionadas principalmente aos grafita-xistos, com concentração de fluidos hidrotermais ao longo de zonas de cisalhamento de idade Transamazônica (Andrade *et al.*, 1985 *in* Giustina & Barbosa, 2005; Dardenne & Schobbenhaus, 2001).

2.4.2.2. *Suíte Aurumina (PP2γ2au)*

Essa suíte foi considerada por muito tempo como parte do complexo granito-gnáissico e da suíte dos granitos anorogênicos. As rochas pertencentes à Suíte Aurumina foram inicialmente identificadas por Botelho (1992) e atribuídas a uma nova suíte peraluminosa, denominada de γ_2 , em 1995, durante os mapeamentos sistemáticos do trabalho finais de graduação da UnB Projeto Nova Roma- Porto Real. Segundo Alvarenga *et al.* (2007a), nas regiões das cartas Cavalcante, Nova Roma e Monte Alegre o contato da Suíte Aurumina com as rochas metassedimentares da Formação Ticunzal é intrusivo sendo, portanto, entendido como posterior às mesmas.

A seção tipo dessa suíte ocorre entre o povoado de Aurumina e o Rio Paranã a oeste do Maciço Pedra Branca. As principais litologias são representadas por ortognaisses de composição tonalítica a granodiorítica metamorfisados e bastante deformados, intrudidos no embasamento granito-gnáissico e na Formação Ticunzal (Botelho *et al.*, 1999). A mineralogia característica consiste em quartzo-microclíneo pertítico, biotita e muscovita magmática, com altos teores de TiO_2 . Minerais acessórios são apatita, monazita, torita, ilmenita e fluorita e resultam nas intensas anomalias radiométricas nos canais de Th e K observadas nessas rochas (Botelho *et al.*, 1999; Giustina & Barbosa, 2005).

Devido à característica peraluminosa ($ISA > 1$) a Suíte Aurumina pode representar um evento de fusão crustal (Pimentel & Botelho, 2001) ou ainda magmatismo sin-colisional (Pimentel *et al.*, 2000; 2004).

Datações K-Ar indicam idade de $2,196 \pm 26$ Ma para pegmatitos peraluminosos da região de Monte Alegre. A mineralização estanífera associada a essas rochas apresenta idades U-Pb de 2,023 Ma e 2,277 Ma (Sparrenberger & Tassinari, 1998).

Alvarenga *et al.* (2007a) subdividem a Suíte Aurumina em seis fácies incluindo rochas graníticas sin-, tardi- e pós-tectônica: (i) muscovita granito (PP2γ2au1), (ii) biotita–muscovita granito (PP2γ2au2), (iii) tonalito (PP2γ2au3), (iv) biotita granito (PP2γ3au4), (v) migmatitos e (vi) turmalina – muscovita granito. Dessas fácies, apenas as quatro primeiras foram cartografadas nas folhas Monte Alegre de Goiás, Cavalcante e Nova Roma.

A Suíte Aurumina hospeda depósitos de ouro, associados a sulfetos de cobre, chumbo e zinco, disseminados em veios de quartzo e milonitos grafitosos, com orientação NE (Dardenne & Schobbenhaus, 2001).

2.4.2.3. Quartzo Diorito Nova Roma (PP2γ3nr)

Essa unidade foi muito pouco estudada e ocorre em áreas restritas nas folhas de Cavalcante e Nova Roma, na região situada entre a Serra da Pedra Branca e a cidade de Nova Roma. É representada por rochas pouco deformadas, associadas às áreas mais ou menos arrasadas de latossolo vermelho. A composição mineralógica apresenta, como minerais essenciais, plagioclásio An₃₅₋₄₀ (55-65%), hornblenda (10-20%), biotita (5-10%) e quartzo (10-15%). Como acessórios são encontrados apatita, zircão, allanita e ilmenita. Os minerais secundários principais são clorita, epidoto, zoisita-clinozoisita, carbonato e muscovita (Alvarenga *et al.*, 2007a).

A relação de contato com a Suíte Aurumina (tonalito PP2γ2au3) é intrusiva e o Quartzo Diorito Nova Roma possui idade também em torno de 2,15 Ga (2.140 ± 7 Ma, U-Pb zircão). O TDM de 2,48 Ga e εNd(T=2,14) de -3,9 são semelhantes àqueles de granitos da Suíte Aurumina. Entretanto, a natureza quartzo diorítica metaluminosa dessa litofácies não sugere relação petrogenética com os granitos PP2γ2au3, peraluminosos da Suíte Aurumina, o que justifica sua individualização como uma unidade (Alvarenga *et al.*, 2007a).

2.4.2.4. Suíte Pedra Branca (PP4γ4pb)

A Suíte Pedra Branca foi proposta para designar os granitos, ou parte deles, conhecidos anteriormente como granitos estaníferos de Goiás (Marini & Botelho 1986), granitos tipo A g1 e g2 (Botelho, 1992) e Suíte Paranã (Lacerda Filho *et al.* 1998). Ocorrem dois grupos de granitos quimicamente distintos na Suíte Pedra Branca (*e.g.* Pimentel *et al.*, 1999; Teixeira, 1998; Botelho & Moura, 1998; Moura & Botelho, 2000), denominados por Alvarenga *et al.* (2007a) de PP4γ4pb1 e o PP4γ4pb2. Ambos foram incluídos na suíte de idade estateriana entre 1.74- 1.77 Ga.

Os granitos PP4γ4pb1 são predominantes e representados por biotita granito com texturas rapakivíticas e granofíricas. Os granitos PP4γ4pb2 são associados aos processos mineralizadores que deram origem aos depósitos de estanho nesta suíte; são representados por leucogranitos com mica litinífera.

A ascensão destes plútons graníticos deu-se cogeneticamente à instalação do Rife Arai, de idade aproximada de 1.77Ga (U-Pb), datados por Pimentel *et al.* (1991) em riolitos da base do Grupo Arai. Idade TDM de 2.5 e 2.6 Ga em corpos graníticos

associados à Suíte Pedra Branca e a basaltos de unidades basais do Grupo Araí confirmam a associação de uma mesma fonte magmática para as rochas plutônicas e vulcânicas, ou seja, os magmas têm sua origem a partir de uma mesma câmara magmática.

2.4.2.5 Grupo Araí (PP4)

O Grupo Araí foi proposto por Barbosa *et al.* (1969) e corresponde a um conjunto de rochas vulcânicas e rochas metassedimentares essencialmente depositadas em sistema de Rife que ocorrem entre os paralelos 13° e 14° Sul, no norte de Goiás (Valeriano *et al.*, 2004), metamorfasadas em facies anquimetamórfica a xisto verde baixo (Alvarenga *et al.*, 2007a). As rochas vulcânicas félsicas intercaladas na base da seqüência foram datadas em 1,77Ga (Pimentel *et al.*, 1991), indicando sua contemporaneidade com o Supergrupo Espinhaço, no Cráton do São Francisco, ambos relacionados ao importante evento tafrogenético do Estateriano (Brito Neves *et al.*, 1995). Esse evento também é responsável pela colocação dos granitos estaniníferos da Suíte Pedra Branca no embasamento do Grupo Araí (Valeriano *et al.*, 2004).

Dyer (1970) propôs a primeira divisão litoestratigráfica para o Grupo Araí: (i) unidade basal denominada de Formação Arraias e composta por rochas metassedimentares psamíticas e quartzitos, lentes de metassiltitos e corpos descontínuos de metaconglomerados; e (ii) unidade de topo denominada de Formação Traíras constituída por uma seqüência pelito-carbonatada. Outras subdivisões foram propostas por Araújo & Alves (1979), Bhaun (1980) e Martins (1999). As correlações entre elas estão sumariadas na figura 15.

Dardenne *et al.* (1997, 1999) definiram três seqüências tectono-estratigráficas principais para este grupo:

- Seqüência continental pré-rifte: sedimentação predominantemente continental em sua maioria eólica e de leques aluviais.
- Seqüência rife: contribuição de rochas vulcânicas bi - modais relacionadas à abertura do rife e depósitos em ambiente predominantemente fluvial.
- Seqüência pós-rifte: de origem marinha transgressiva com camadas pelíticas, lentes de carbonatos (dolomitos e calcários) e com espessas camadas de

quartzitos; depósitos relacionados a plataformas dominadas por mares e tempestades.

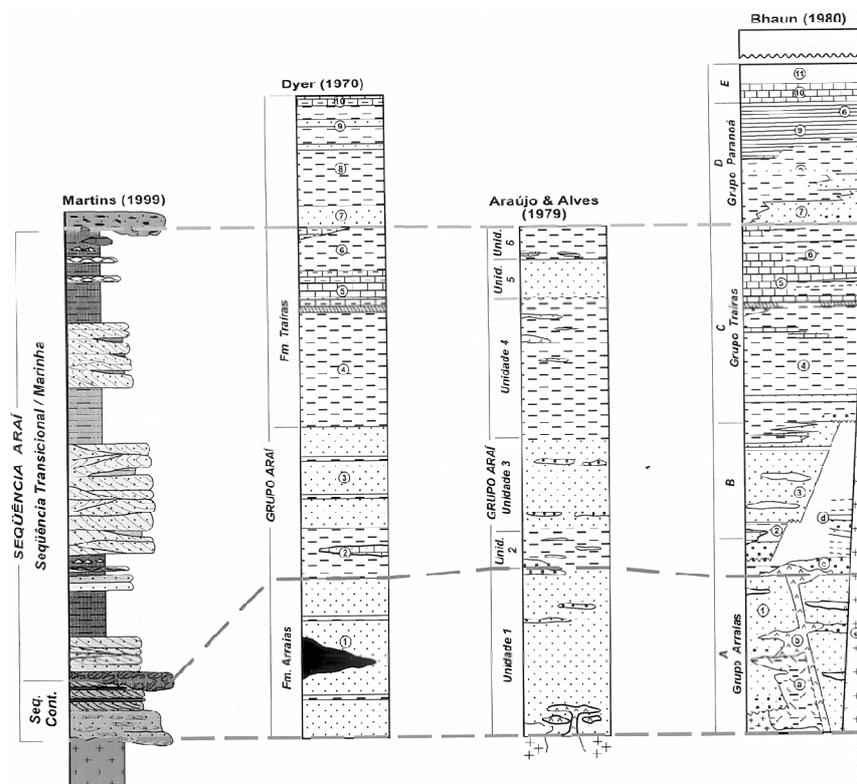


Figura 15: Correlações entre as diferentes colunas estratigráficas propostas para o Grupo Araí (Martins, 1999).

A Formação Arraias (PP4a, Alvarenga *et al.*, 2007a) é formada por rochas metassedimentares e rochas vulcânicas depositadas em um ambiente tectonicamente ativo (sin-rifte) (Dardenne *et al.*, 1997); são depósitos fluviais e eólicos intercalados com rochas vulcânicas ácidas, piroclásticas e basaltos (Alvarenga *et al.*, 2007a). As unidades litológicas presentes nessa formação não correspondem a um empilhamento rigoroso, mas a um conjunto de litofácies que podem ocorrer em qualquer posição da seqüência sedimentar continental. Esse fato não permite correlações laterais de grandes distâncias, e ilustra imbricação e interdigitação das fácies continentais nesse ambiente de leques aluviais e rios entrelaçados da fase sin-rifte (Alvarenga *et al.*, 2007a).

Na base dessa formação dominam arenitos grossos a conglomeráticos, com intercalações de siltitos, arenitos arcoseanos, arcósios e conglomerados com estruturas sedimentares de marcas onduladas, estratificações cruzadas acanaladas e tabulares de grande porte e laminações plano-paralelas (Dardenne *et al.*, 1999). Nessa mesma

porção ainda ocorre o vulcanismo bi-modal com os termos ácidos representados por vulcânicas e vulcanoclásticas de composição dacítica a riolítica e os termos básicos por basaltos, posteriores ao vulcanismo félsico, e com tendência alcalina (Lacerda Filho *et al.*, 1999).

Para o topo predominam arenitos grossos maciços com estratificações cruzadas acanaladas e lentes de conglomerados, interpretado como depósitos de rios entrelaçados (Martins, 1999; Dardenne *et al.*, 1999).

A Formação Traíras (PP4t, CPRM 2007) representa um megaciclo transgressivo (Dardenne *et al.*, 1997), subdividido por Martins (1999) em três ciclos internos. A base consiste de arenitos grossos a conglomeráticos finos, com estratificações cruzadas bi-modal de paleocorrentes, interpretados como depositados em ambiente transicional de plataforma rasa (Dardenne *et al.*, 1999). A porção superior dessa formação é predominantemente síltica, freqüentemente carbonosa, com intercalações de arenitos com estruturas de *hummocky* e *swales*. No topo tem-se lentes de calcários e dolomitos. É relacionada ao ambiente marinho de plataforma aberta, afetado por tempestades esporádicas (Martins, 1999; Dardenne *et al.*, 1999).

2.4.2.6. Formação Jequitai (NP12jt)

A Formação Jequitai é constituída por diamictitos e arenitos líticos, bem como siltitos e argilitos vermelhos que podem conter fragmentos de rochas (Dardenne *et al.*, 1978; Guimarães, 1997). O diamictito, principal rocha da formação, é composto por clastos angulosos de dimensões variáveis de quartzito, arcósio, *chert* e dolomito, imersos em matriz síltico-argilosa (Guimarães, 1997).

A origem dessa formação é interpretada como decorrente de fluxos gravitacionais em ambiente glácio-marinho (Dardenne *et al.*, 1978; Ulhein *et al.*, 2004). A fase continental está representada por pavimentos estriados, encontrados na região da cidade de Jequitai que indicam movimento de geleira de oeste para leste (Isotta *et al.*, 1969; Karfunkel *et al.*, 2003; Cukrov *et al.*, 2005).

Dados de U-Pb SHRIMP em zircão detrítico evidenciam distribuição bi-modal de idades, com contribuição Paloproterozóica (1.9~2.2Ga) e Mesoproterozóica (1.75~1.55Ga), essa última provavelmente associada à erosão do Grupo Araí. O zircão mais jovem (900 Ma) estabelece a idade máxima para a Formação Jequitai (Pimentel *et al.*, 2002).

2.4.2.7. Grupo Bambuí (NP2)

O Grupo Bambuí, definido por Branco e Costa (1961), foi individualizado em três megaciclos regressivos, cada um representado por um período de transgressão, seguido de subsidência da bacia e por fim regressão marinha (Dardenne, 1981; 2000). O primeiro megaciclo inclui a Formação Sete Lagoas, consistindo de calcários, dolomitos, margas e siltitos calcíferos que em vários locais recobrem diretamente os diamictitos glaciais. Os arenitos finos e ritmitos pelíticos da Formação Serra de Santa Helena, seguidos pelos calcários e margas da Formação Lagoa do Jacaré, constituem o segundo megaciclo. O último megaciclo caracteriza-se por argilitos que compõem a Formação Serra da Saudade que gradacionam para os siltitos arcoseanos e arcósios finos da Formação Três Marias.

A resposta flexural aos processos orogenéticos iniciados na Faixa Brasília foi a formação de uma bacia tipo *foreland*, na qual se depositaram os sedimentos que compõem o Grupo Bambuí. Idades modelos Sm-Nd (TDM) dos pelitos variam entre 1.4 a 1.9 G.a. e indicam que os sedimentos são provenientes do orôgeno recém instalado a oeste da Bacia do Bambuí. Datações Pb- Pb em carbonatos indeformados da Formação Sete Lagoas evidenciam uma idade de 740 ± 22 Ma (Babinski & Kaufman, 2003), sugerindo que os diamictitos subjacentes sejam relacionados à Glaciação Stuartiana (~750 Ma).

2.4.3. Geologia Estrutural

A área do Rifte Araí insere-se no domínio norte da Zona Externa da Faixa Brasília (Fonseca & Dardenne, 1995), no domínio de uma tectônica tipo *thick-skinned*, onde o embasamento foi envolvido tanto em sistemas transcorrentes quanto compressivos frontais (Fonseca *et al.*, 1995).

Massucato (2003) caracterizou três distintos eventos deformacionais de caráter compressivo na região de Cavalcante (GO): dois de idade pré-brasiliana, possivelmente transamazônica, e um último, de idade brasiliana (entre 750 e 630Ma). O evento 1 é aparentemente derivado de um encurtamento crustal NS, que desenvolve foliações (S_1) de direção EW e metamorfismo em fácies anfíbolito baixo com temperaturas variando entre 450 e 500°C. O evento 2 é derivado de encurtamento crustal de direção EW responsável pela geração de foliações (S_2) de direção NS a N20E/subverticais e grau metamórfico semelhante ao evento 1. O evento 3 é também responsável por um

encurtamento crustal de direção EW que gera três foliações principais: S_{B1} (de direção NS), S_{B2} (de direção NE) e S_{B3} (de direção aproximada NW). Segundo Massucato (2003), a geração das foliações S_{B2} e S_{B3} está intimamente relacionada à formação de zona de cisalhamento dextrais e sinistrais, respectivamente, e são interpretadas como pares conjugados.

Fonseca *et al.* (1995), Giustina & Barbosa (2005) e Alvarenga *et al.* (2007a) sugerem somente dois eventos compressivos, um Transamazônico e outro Brasileiro, sendo intercalados por uma fase distensiva rúptil do Estateriano (~1.7Ga) (tabela 1).

A existência de uma foliação principal S_n de direção NS e alto ângulo de mergulho ($> 70^\circ$), com variações para NE e NW, observada no mapeamento sistemático do Trabalho Final de Graduação da UnB de 2005 levantam algumas discussões em relação à teoria de formação da mesma. Segundo Giustina & Barbosa (2005), duas hipóteses podem ser aplicadas nesse caso: (i) situação compressiva horizontal intensa com desenvolvimento de dobras, isoclinais em escala quilométricas e com eixo horizontal que desenvolveria foliação de alto ângulo paralela ao plano axial da dobra; e (ii) uma foliação precedente S_{n-1} verticalizada em algum momento da história geológica balizaria o desenvolvimento de S_n com alto mergulho.

Tabela 1: Quadro esquemático dos eventos deformacionais e estruturas associadas relacionadas aos domínios geotectônicos individualizados (Alvarenga *et al.*, 2007a).

Idade	Evento deformacional	Fase	Deformação	Domínios Geotectônicos e seus elementos estruturais				Metamorfismo
				IV Qtzo Diorito Nova Roma, Suíte Aurumina, Fm Ticunzal	III Granito Intraplaca	II Rifte Gr. Araí	I Sinéclise Antepaís	
NP	Orogênese Brasileira (E3)	D2	Distensiva Rúptil	Falhas e Fraturas				Anquizona
		D1	Compressiva Rúptil-dúctil	S_{n+1} L1 Sn	S_{n+1} L1 Sn	S_{n+1} L1 Sn	L1 Sn	Fácies Xisto Verde Baixo
PP/MP	Rifte Araí (E2)	Rifte Pós-rifte	Distensiva Rúptil + Subsidência flexural	Falhas	-	S0	-	Diagênese
PP	Orogênese Transamazônica (E1)	Dn	Compressiva Dúctil	S_{n-1}	-	-	-	Fácies Anfibolito Alto

Regionalmente, a região do Rifte Araí apresenta com bastante evidência sistemas de falhas e fraturas de alto ângulo com orientações entre NE e NW, que por vezes individualizam zonas de cisalhamento (Alvarenga *et al.*, 2007a). Esses sistemas

transcorrentes foram individualizados regionalmente por Fonseca (1996) em: (i) Cavalcante- Teresina de Goiás, (ii) Campos Belos – Arraias e (iii) Teresina de Goiás – Nova Roma – Monte Alegre de Goiás – Campos Belos.

2.4.3.1. Sistema Cavalcante-Teresina de Goiás

O sistema Cavalcante-Teresina de Goiás compreende um conjunto de falhas transcorrentes verticais que afetam os terrenos do embasamento e rochas do Grupo Araí . Segundo Alvarenga *et al.* (2007a), essas falhas geram foliação S_1 de direção NE/SW com mergulho de alto ângulo. As lineações minerais são normalmente *strike-slip*.

Os efeitos geomorfológicos da ação do sistema são significativos, sendo visualizadas na região escarpas com 300 a 500m de desnível, onde a proeminente foliação vertical se destaca como plano axial das dobras que afetam as rochas do Grupo Araí. Essas estruturas decorrem de zonas de cisalhamento verticais, descontínuas, que ao truncarem o embasamento, determinam domínios de maior ou menor magnitude de deformação. Os indicadores cinemáticos, notadamente *ponds* assimétricos com estruturas S/C e *slickensides*, indicam movimentação dextral. O sistema Cavalcante-Teresina de Goiás se articula ao norte com o sistema Teresina de Goiás-Nova Roma, com inflexão das estruturas para o norte, assumindo geometria frontal (Alvarenga *et al.*, 2007a).

2.4.3.2. Sistema Teresina de Goiás - Nova Roma-Monte Alegre de Goiás-Campos Belos

As estruturas do Sistema Teresina de Goiás-Nova Roma são essencialmente falhas reversas frontais de direção NS e alto ângulo que colocam terrenos do embasamento sobre o Grupo Araí, e, mais a leste, o Grupo Araí sobre o Grupo Bambuí (Fonseca *et al.*, 1995). Entre os conjuntos de falhas principais, extensivos dobramentos assimétricos F_1 ocorrem com xistosidade S_1 em alto ângulo como plano axial. A xistosidade de plano axial possui direção NNE e mergulhos elevados para oeste e NW. As charneiras das dobras mostram-se orientadas preferencialmente NS e NNE. As lineações minerais têm caimento dominante para oeste, sendo quase sempre *down-dip*.

O Sistema Teresina de Goiás- Nova Roma se prolonga descontinuamente seguindo a direção meridiana NS até Monte Alegre e a região de Campos Belos, onde é observada claramente a interferência do Sistema Campos Belos - Arraias de direção NW.

2.4.3.3. Sistema Campos Belos - Arraias

O Sistema Campos Belos - Arraias, situado mais ao norte, é um exemplo típico de sistema reverso oblíquo que justapõe o embasamento à seqüência epimetamórficas do Grupo Arai. As falhas possuem direção N30~40W, alto ângulo de mergulho e movimentação preferencialmente sinistral. Esse sistema afeta os granitóides do embasamento e as rochas do Grupo Arai (Fonseca *et al.*, 1995).

Essas falhas transcorrentes truncam as falhas NS e NE do Sistema Santa Teresinha de Goiás -Nova Roma - Monte Alegre de Goiás – Campos Belos de Goiás, estabelecendo assim uma relação cronológica entre os diferentes tipos de falhas: as falhas frontais (NS-NNE) são anteriores às falhas transcorrentes sinistrais NW (Alvarenga *et al.*, 2007a).

Capítulo 3

Fundamentação Teórica SAR e aerolevanteamento

R99SAR Nova Roma

3.1. Conceitos de Radiação Eletromagnética

Os sensores são instrumentos responsáveis pela conversão da energia eletromagnética radiada, emitida ou retroespalhada pelos objetos em função das suas propriedades físicas, químicas, biológicas e geométricas (Novo, 2008). Os sensores podem ser subdivididos em relação ao intervalo espectral que abrangem em ópticos, termais e das micro-ondas.

De acordo com a dualidade da natureza da radiação eletromagnética (REM), uma onda eletromagnética se propaga no espaço transportando corpos de energia (fótons) expressas pelas seguintes equações físicas:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

(Eq. 1)

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

(Eq. 2)

sendo: E = energia; h = constante de Planck ($6,624 \times 10^{-34}$ Joules); λ = comprimento de onda
 c = velocidade da luz e f = frequência

Dessas equações, deduz-se que nos menores comprimentos de onda, tais como o no visível e no infravermelho de ondas curtas a REM possui alta energia que é suficiente para interagir com os níveis de energia quânticos dos átomos e moléculas. Neste processo de trocas de interação da energia contida na REM e na energia contida nos materiais, a intensidade da reflectância é uma resposta dependente, principalmente, da composição dos materiais, desde que nos pequenos comprimentos de onda todas as superfícies podem ser consideradas difusoras. Diz-se desse processo como interação microscópica.

No intervalo dos grandes comprimentos de onda, tais como em microondas, onde a quantidade de energia não é suficiente para causar excitações dos níveis de energia, a reflectância corresponde principalmente à resposta de um processo de

interação comandado pela relação do tamanho da onda incidente e, às variações texturais do alvo. Diz-se deste processo como interação macroscópica. Ou seja, a resposta não depende da composição do material, mas sim da sua forma.

Uma onda eletromagnética é, por natureza, um vetor composto pelos campos elétrico (E) e magnético (M), que oscilam perpendicularmente entre si e se propagam no espaço e em certos meios gasosos numa direção transversal à direção de vibração dos dois campos (figura 16). Todas as ondas eletromagnéticas decaem em magnitude quando se afastam da fonte emissora, devido ao espalhamento esférico.

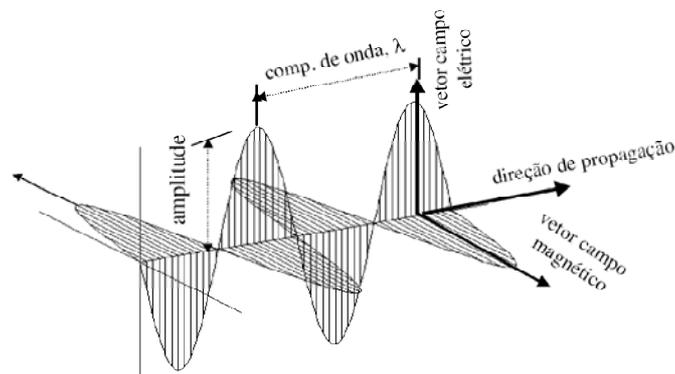


Figura 16: Onda eletromagnética composta por campos elétrico (E) e magnético (M), ortogonais entre si. Fonte: Soares (2008).

Diz-se de comprimento de onda (λ) o comprimento de um ciclo de onda que pode ser medido pela distância entre duas cristas. A frequência (f) refere-se ao número de ciclos que a onda passa por um ponto por unidade de tempo, de forma harmônica. A amplitude da onda está ligada à intensidade que determina a potência que está sendo transportada pela onda. No mesmo meio, vácuo, a onda se propaga à velocidade da luz.

Na prática pode-se afirmar que nas imagens adquiridas no intervalo óptico do espectro eletromagnético como as dos satélites Landsat, Spot e CBERS, as diferenças de reflectância dos alvos estão intrinsecamente relacionadas às variações composicionais dos alvos imageados por meio da intensidade da radiação. Nos sensores radar a resposta medida pelo sensor e definida como parâmetro de retroespalhamento depende de fatores macroscópicos e geométricos como forma, textura e estrutura e de propriedades dielétricas do material (Dobson *et al.*, 1985).

Os sensores radar possuem propriedades bem distintas dos sensores ópticos e termais, possibilitando formas de imageamento da superfície terrestre que para algumas

situações minimizam as deficiências. Essa é uma das principais razões que justifica o crescente interesse e investimentos na construção de sensores radares para o uso no levantamento e monitoração dos recursos naturais e do meio ambiente.

Outra característica que difere os sensores radar e ópticos é que o primeiro possui fonte de radiação própria (sensor ativo), permitindo imageamento tanto diurno quanto noturno aumentando, assim, a capacidade de observação terrestre. Além disto, por operarem na região das microondas, o sensor radar pode observar um terreno com condições meteorológicas mais desfavoráveis do que um sensor óptico, isto é, com presença de nuvens, fumaças, neblinas e chuvas fracas a moderadas.

3.2. Sistema Radar

RADAR é um acrônimo de *Radio Detection And Ranging* (Detecção e Medida de Distância por Rádio) e, basicamente, é um sistema eletrônico para a detecção e localização de alvos na faixa do espectro de rádio frequência. Seu princípio de funcionamento baseia-se na medição do tempo de propagação que uma REM, com comprimento de onda entre 1mm ~ 100cm, emitida por meio de uma antena pelo próprio radar, leva para atingir o alvo e retornar (figura 17a). A posição do alvo é determinada convertendo-se o tempo de propagação em distância radial e assumindo sua direção como a de apontamento da antena (figura 17b, Veiga & Andrade, 2005).

Como a energia se propaga à velocidade da luz, a distância de um objeto medida no plano inclinado é dada por (Ulaby *et al.*, 1982):

$$SR = \frac{ct}{2}$$

(Eq. 3)

Onde SR= alcance inclinado (*slant range*), c = velocidade da luz e t = duração de tempo do pulso emitido.

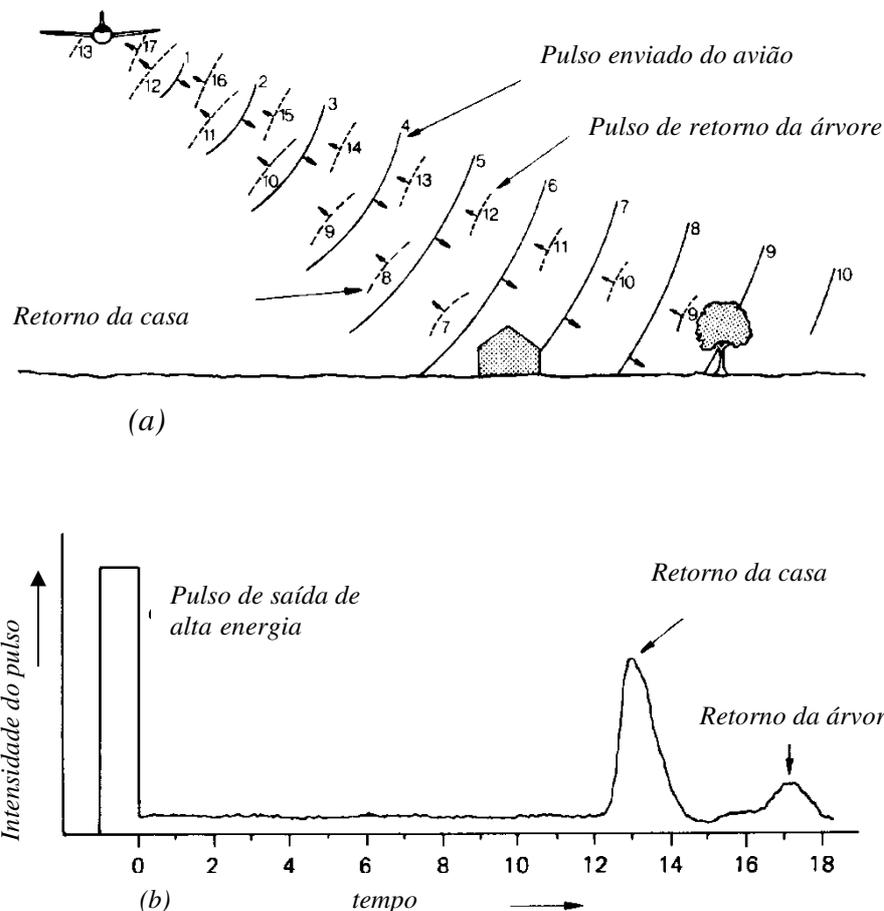


Figura 17: a) Propagação do pulso de radar indicando a frente de onda (linhas sólidas) e o pulso retroespalhado pelos objetos (linhas pontilhadas) b) medida do tempo e intensidade do pulso de retorno da casa e da árvore. Fonte: Lillesand & Kiefer (1994)

O tempo é medido pela fase da onda que tem sua referência a partir do ponto de partida relativo a certo tempo arbitrário, isto é, quando cada pulso é emitido. Como uma onda é um fenômeno cíclico, a fase normalmente é dada em graus onde 90 graus representam $\frac{1}{4}$ de um ciclo e 360 graus um ciclo completo. A fase do sinal de retorno é comparada com a fase do sinal emitido e o tempo de retorno do sinal é calculado determinando-se a sua posição em relação ao do terreno. Assim, dois pulsos emitidos de ondas eletromagnéticas podem ter igual comprimento de onda, frequência e amplitude, mas diferente fase (figura 18).

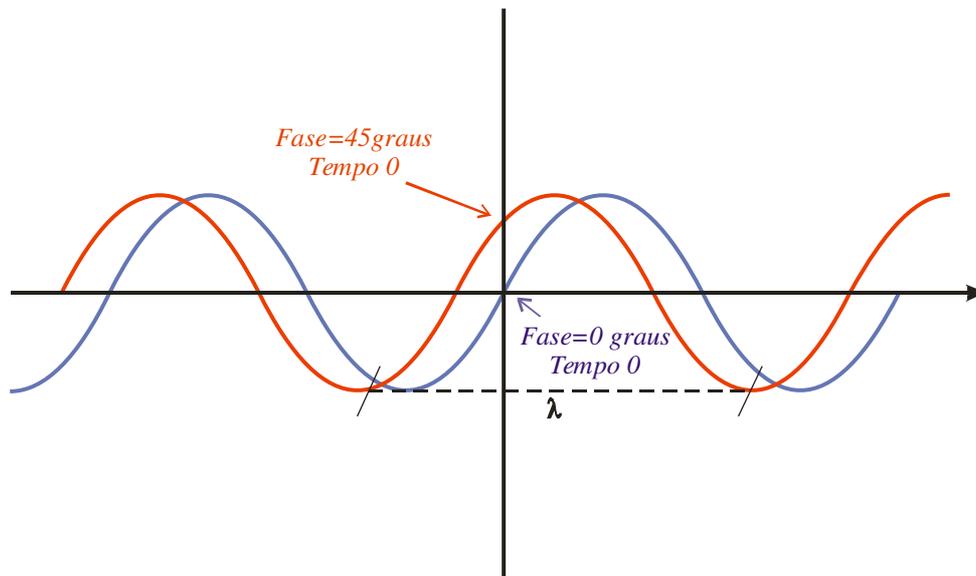


Figura 18: Onda eletromagnética com mesma frequência, comprimento de onda, amplitude e diferente fase. Fonte: Soares, 2008.

Além da fase, a polarização é outro elemento que pode ser mensurado e traz importantes informações relativas ao alvo. Refere-se ao alinhamento e regularidade dos componentes elétricos e magnéticos da onda, num plano perpendicular à direção de propagação. Esta orientação pode ser linear, circular ou elíptica (Pinto, 2007). A polarização é dita linear quando a orientação do campo elétrico varia segundo uma linha reta, que pode ainda ser horizontal ou vertical. A onda eletromagnética é dita horizontalmente polarizada quando o vetor do campo elétrico é perpendicular ao plano de incidência da onda (plano que contém o vetor normal à superfície e o vetor de propagação da onda) ou de maneira geral, quando o vetor do campo elétrico é paralelo à superfície imageada. Usualmente, os sistemas de radar utilizam polarizações lineares paralelas (HH e VV) ou cruzadas (HV e VH), onde a primeira letra refere-se à polarização da onda transmitida e a segunda à polarização da onda recebida pela antena de radar (Freitas *et al.*, 2007).

Em sensoriamento remoto, a região das micro-ondas é subdividida em pequenos intervalos de comprimentos de onda denominados bandas que são diferenciadas de acordo com a frequência ou comprimento da onda (figura 16) (Henderson & Lewis, 1998). Por convenção, as bandas das micro-ondas são nomeadas pelas letras Ka, K, Ku, X, C, S, L e P, que não possuem nenhum significado. São frutos de uma tentativa nos anos de 1940 de manter segredo das faixas espectrais de operação dos primeiros sistemas radar que foram utilizadas para detecção de alvos militares (figura 19).

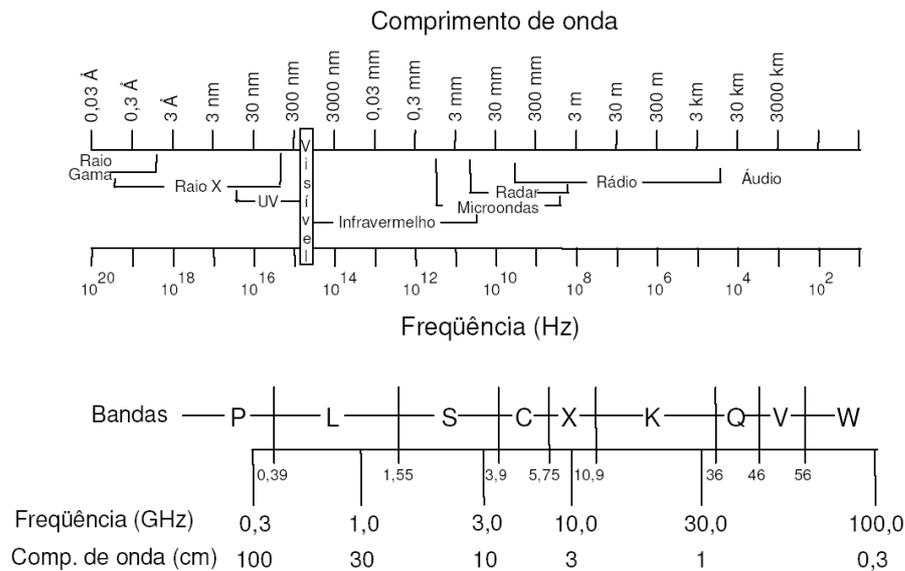


Figura 19: Espectro eletromagnético e bandas da região de micro-ondas (Dallemand *et al.*, 1993 *in* Freitas *et al.*, 2007).

As bandas mais utilizadas nos radares imageadores de observação do terreno são a X, amplamente usada nas operações de reconhecimento militar e comercialmente em levantamentos de terrenos, empregada nos sensores GEMS do projeto RADAMBRASIL, CV-580 SAR do CCSR e no R99SAR da FAB; a C, empregada em muitos SAR's orbitais como o ERS-1 e RADARSAT; a S, empregada no Almaz; a L, empregada no SEASAT, JERS-1 e PALSAR, R99SAR e a P (empregada no JPL AirSAR da NASA) (Paradella, 2006).

O tamanho da onda radar influencia diretamente na imagem resultante; quanto maior o comprimento de onda dentro da faixa das micro-ondas maior poderá ser a penetração na superfície (Lillesand & Kiefer, 1987). Por exemplo, imagens obtidas utilizando a banda P sobre áreas florestadas fornecem mais informações sobre a superfície de fundo (extrato inferior) do que imagens obtidas utilizando a banda X (Moreira, 2001).

As antenas em um sistema radar funcionam como uma fonte de radiação eletromagnética e como receptora da radiação de retorno. A emissão dos pulsos e a recepção podem ser feitas utilizando a mesma antena (sistemas monoestáticos) ou uma segunda antena (sistemas biestáticos) (Ulaby *et al.*, 1986).

3.2.1. RAR x SAR

Os radares imageadores necessariamente trabalham com visada lateral por causa da ambigüidade que seria gerada pela emissão do pulso na direção vertical (Veiga & Andrade, 2005). Esses radares são subdivididos em radares de abertura real (RAR) e radares de abertura sintética (SAR). Os dois tipos trabalham em um arranjo geométrico no qual são definidas duas dimensões básicas e dois ângulos: distância em linha de visada inclinada (*slant range*), distância horizontal no solo (*ground range*), ângulo de depressão (φ) e ângulo de visada (θ) (Pinto, 2007).

A diferença principal entre os dois é que no de abertura real a resolução espacial depende da distância do alvo e do tamanho físico da antena, enquanto que no de abertura sintética o sistema cria uma antena virtual centenas de vezes maior que o seu tamanho físico, permitindo obter resoluções muito melhores e independentes da distância dos alvos (Veiga & Andrade, 2005).

Na geometria de imageamento de um RAR (figura 20) destacam-se os parâmetros de: ângulo de incidência (α), ângulo de visada (θ), resoluções espaciais em *ground range* (ρ_r direção no solo perpendicular à direção do voo) e em *slant range* (ρ_a direção oblíqua perpendicular à direção do vôo), área imageada, largura do feixe etc. (Freitas *et al.*, 2007).

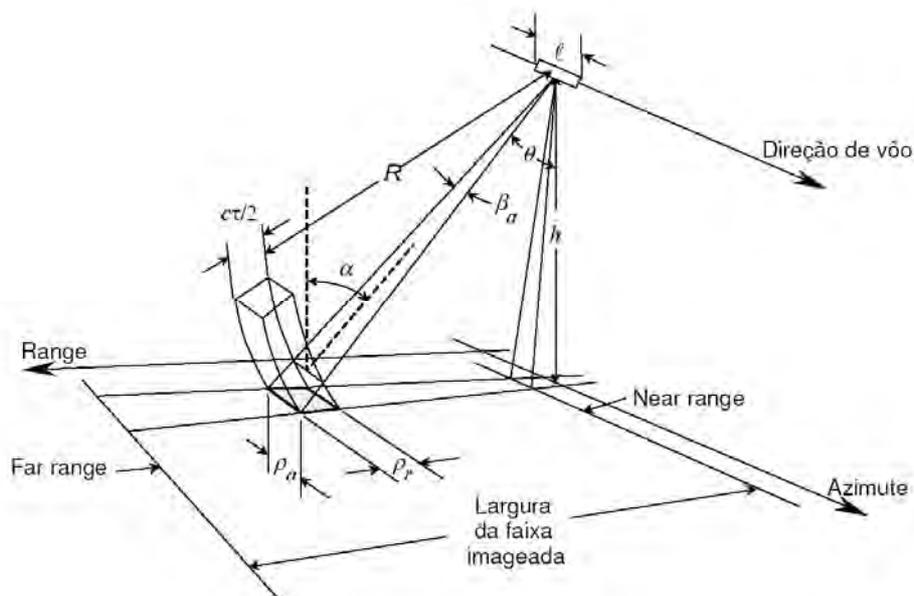


Figura 20: Geometria de imageamento de um SLAR. Fonte: adaptada de Trevett (1986) *in* Freitas *et al.* (2007). Sendo l -tamanho físico da antena, h -altura da plataforma, α -ângulo de incidência do feixe de microondas, R -: alcance inclinado, β_a - largura do feixe em azimuth, θ - ângulo de visada, ρ_a e ρ_r , resoluções em azimuth e em *range*, respectivamente.

No radar de abertura real, a resolução em azimute (ρ_a) é igual ao arco correspondente a βa , na distância da linha de visada (R) e é calculada pelas equações 2 e 3. Assim, quanto mais distante estiver o sensor, maior será o arco correspondente e, conseqüentemente, pior a resolução espacial em azimute.

$$\rho_a = R \times \beta a \quad (\text{Eq. 4})$$

como $R = \frac{h}{\cos \theta}$, tem-se

$$\rho_a = \frac{\beta a \times h}{\cos \theta} \quad (\text{Eq. 5})$$

A resolução transversal ou em *range* (ρ_r) é a porção de terreno plano contida na célula de resolução, e é dada pela equação 5. Assim, quanto mais curta for a duração do pulso, melhor será a resolução transversal. No entanto, quanto menor o tempo, maior é a potência de pico exigida para o sistema.

$$\rho_r = \frac{c\tau}{2 \sin \theta} \quad (\text{Eq. 6})$$

De acordo com as equações 3 e 4, as resoluções em azimute e transversal (ρ_a e ρ_r , respectivamente) são funções do ângulo de visada (θ) e, conseqüentemente, da linha de visada. A resolução em azimute é degradada nas distâncias maiores enquanto a resolução transversal (ou em *range*) é degradada em distâncias menores. Isso faz com que as imagens sejam alongadas na direção transversal (*cross-track*) para pequenas distâncias e na direção longitudinal (*along-track*) para longas distâncias (Raney, 1998).

O radar de abertura sintética (SAR), desenvolvido nos anos de 1950, resolve os problemas do RAR, uma vez que a resolução azimutal desse sistema independe da distância entre o radar e o alvo, podendo operar a bordo de uma plataforma móvel como aeronaves ou satélites (Lillesand & Kiefer, 1987). O aumento da resolução em *range* é conseguido com a técnica de compressão de pulsos, sendo esses normalmente modulados linearmente em frequência (processo conhecido como *chirp*). O SAR utiliza a informação de uma seqüência inteira de pulsos ao longo da direção azimutal (e não apenas um pulso como no RAR) para produzir uma simples faixa imageada e, ainda, usa o efeito Doppler (baseado no deslocamento da plataforma) e o histórico das

mudanças de fase a ele associado, para simular uma antena cujo comprimento é muitas vezes maior que o da antena real. Esse processo é obtido eletronicamente, daí o termo "abertura sintética".

A resolução azimutal no SAR é independente da largura do pulso transmitido e é aproximadamente igual à metade do tamanho físico da antena (equação 6).

$$\rho_a = \frac{\ell}{2} \quad (\text{Eq. 7})$$

Dessa forma, considerando-se um mesmo tamanho físico da antena, o SAR possui resolução azimutal superior a do RAR. Contudo, aquele é mais complexo, tanto em termos de sua construção quanto em termos de processamento do sinal (Ulaby *et al.*, 1982).

3.2.2. Imagem SAR

A habilidade do radar em obter informações está diretamente ligada às características intrínsecas ao sensor de imageamento e a quantidade de sinais retroespalhado pelos alvos. As imagens são construídas pela integração de vários pulsos retroespalhados; o brilho de cada elemento da imagem amostral (área imageada à qual corresponde cada pixel após o processamento) traduz a percentagem de energia retroespalhada pela área no terreno correspondente (Soler, 2000).

Basicamente, a relação fundamental entre as características do sistema de radar, do alvo e dos sinais emitido e recebido pode ser resumida na equação radar, que para um sistema monoestático, é definida como:

$$\mathcal{P}_r = \frac{[P_t A^2 \sigma]}{[(4\pi)^3 \times R^4]}, \quad (\text{Eq. 8})$$

sendo: \mathcal{P}_r potência recebida; P_t potência transmitida; A : Área efetiva de coleta da antena de recepção; σ : coeficiente de retroespalhamento (ou *backscattering*) e R : distância entre a antena e o alvo.

O coeficiente de retroespalhamento é uma função complexa de parâmetros físicos do alvo. É adimensional e exibe intervalo dinâmico amplo de magnitude, usualmente expresso em decibéis (equação 8; JPL, 1986).

$$\sigma^0 \text{ (dB)} = 10 \log \sigma^0 \text{ (m}^2 \cdot \text{m}^2) \quad (\text{Eq. 9})$$

A potência recebida fornece informações que estão intrinsecamente relacionadas às características geométricas (rugosidade de superfície, declividade, forma e orientação) e elétricas (constante dielétrica) da superfície, bem como às características do sistema sensor: comprimento de onda (λ), fase (ϕ), ângulo de incidência (α) e polarização da onda incidente (tabela 2).

Tabela 2 – Parâmetros do sistema e do alvo que influenciam no sinal de retorno do radar

Parâmetros do Sistema	Parâmetros do Alvo
Comprimento de Onda ou Freqüência	
Azimute de Visada	
Resolução Espacial	Rugosidade da Superfície
Ângulo de Incidência	Constante Dielétrica
Fase	Inclinação e Orientação
Polarização	

Fonte: Lewis & Henderson (1998).

3.2.2.1. Parâmetros do sistema

Os parâmetros do sistema sensor são características importantes a serem analisadas na pesquisa geológica, seja para mapeamento geológico ou para a prospecção mineral. No entanto, as opções de variações desses parâmetros são restritas devido à concepção dos sensores orbitais e aerotransportados (Tabela 3). Esses parâmetros são os principais responsáveis pela caracterização do padrão tonal e textural das imagens (Henderson & Lewis, 1998).

Atualmente, os comprimentos de onda que têm sido mais utilizados nos mapeamentos terrestres são os da banda C ($\lambda = 3,85-7,5\text{cm}$) e banda L ($\lambda = 15\sim 30\text{ cm}$) empregados nos sensores Radarsat 1 e 2, Envisat e ERS (banda C) e JERS, ALOS – PALSAR (banda L). No Brasil, também há a disponibilidade de dados da década de 1970 obtidos na banda X ($\lambda = 2,4\sim 3,8\text{cm}$), polarização HH, obtidos no programa RADAMBRASIL, que imageou quase completamente o território nacional utilizando resolução espacial de 16 metros e escala original de mapeamento de 1:400.000.

Os efeitos das diferenças dos comprimentos de onda são observados em superfícies com variação de rugosidade em escala centimétrica, pois nesse tipo de superfície o sinal pode, por exemplo, se comportar como rugoso para a banda X e liso para banda L (Ford *et al.*, 1998).

As variações relativas aos azimutes de visada são possíveis somente em sensores aerotransportados. Em sensores orbitais esse azimute pode variar de acordo com a

órbita do satélite, que normalmente é epipolar ($\approx 98^\circ$ em relação à linha do equador), sendo as opções de visada possíveis, descendentes e ascendentes (ora para direita, ora para esquerda).

Tabela 3: Sensores Orbitais Radargramétricos (Mendonça, 2008)

<i>Sistemas</i>	<i>Seasat</i>	<i>Almaz</i>	<i>ERS-1 e 2</i>	<i>JERS-1</i>	<i>LACROSSE</i>	<i>RADARSAT</i>	<i>RADARSAT 2</i>	<i>PALSAR</i>
<i>País</i>	EUA	Rússia	Europa	Japão	EUA	Canadá	Canadá	Japão
<i>Início</i>	jun/78	mar/91	Jun/91 Abr/95	Fev/92	Dez/88	1996	Dez/07	2006
<i>Vida útil</i>	3 meses	1,5 ano	2-3 anos	2 anos	-	5 anos	7 anos	5 anos
<i>Banda/ Frequência (GHz)</i>	L (1,2)	S (3)	C (5,3)	L (1,2)	X (9,5)	C (5,3)	C (5,4)	L (1,27)
<i>Polarização</i>	HH	HH	VV	HH	HH	HH	HH/HV VH/VV	HH/HV/VH /VV
<i>Âng. Incid.</i>	23°	30° - 60°	23°	39°	Variável	10° - 60°	10° - 60°	8° - 30°
<i>Comp. Onda</i>	23 cm	10 cm	5,6 cm	23 cm	3 cm	5,6 cm	5,5 cm	23 cm
<i>Res (y)</i>	25 m	15 m	26 m	18 m	>1 m	9-100 m	3 m	3 m
<i>Res (x)</i>	25 m	15 m	28 m	18 m	>1 m	10-100 m	3 m	3 m
<i>Altura Voo (km)</i>	800	300	785	568	275	800	798	692
<i>Larg. de Faixa (Km)</i>	100	20 – 45	100	75	Variável	Variável	500	20 – 65
<i>Antena (m)</i>	10	15	10	12	8 x 2	15	15 x 1,5	-

Várias características naturais e antrópicas do terreno possuem uma orientação preferencial, expressa em linhas nas imagens (por exemplo, estradas, linhas de alta tensão, fraturas, etc.). A geometria entre a direção preferencial e o azimute de visada do radar influencia altamente na assinatura dessas feições, pois quando tais direções são paralelas, essas feições são praticamente suprimidas das imagens (Sabins, 1996).

Na geologia, a orientação estrutural preferencial da área a ser imageada, representada por foliações, fraturas, falhas, contatos e topografia deve ter, de

preferência, para o seu realce ângulo ortogonal, a direção de visada para o realce das mesmas. Assim, por exemplo, uma crista de relevo orientada na direção N-S terá a sua forma de relevo mais bem caracterizada quando a iluminação dos feixes de radar tiver uma orientação E-W.

Se a iluminação é ortogonal à crista, a face voltada frontalmente ao pulso será intensamente iluminada e deverá ter um alto retorno do sinal, registrando um tom de cinza claro na imagem. Ao contrário, a face oposta será bem menos iluminada ou quase nada iluminada, não havendo quase nenhum retorno de sinal, e o registro será de uma imagem com tom de cinza escuro ou preto. É gerado, portanto, um par claro/escuro, que é a condição ideal para que o olho humano perceba o relevo em suas formas.

O ângulo de incidência sobre o terreno (α) determina os efeitos da imagem em relação à orientação do alvo imageado. Sua magnitude tem uma relação direta com o sombreamento e inversa com os efeitos de distorção e deslocamento do relevo. Este parâmetro, quando o relevo é plano, é complementar ao ângulo de visada (θ).

Normalmente, busca-se um ângulo de incidência que resulte nos menores efeitos possíveis de deslocamento do terreno (*forshortening* e *layover*) e ao mesmo tempo a menor perda de informação devido ao sombreamento. A tendência nos sistemas SAR é que esse ângulo seja variável tanto em relação à resolução espacial como em relação à escolha das polarizações.

Em terrenos de relevo baixo é desejável que o radar adquira imagens com alto ângulo de incidência para produzir grande contraste entre os alvos; em terrenos de alto relevo quanto menor este ângulo menor será a área sombreada e, portanto, maior será a informação presente na cena. Quando interpretamos uma imagem de radar precisamos lembrar que, diferentemente dos sensores ópticos, a largura do sombreamento dessa imagem não é constante em toda a cena (Sabins, 1996).

Para regiões com qualquer tipo de elevação, todas as vertentes (rampas) voltadas para o radar apresentam a distorção conhecida como encurtamento (figura 21a). Essa distorção é maior para aquelas vertentes com maior ângulo de inclinação. A inversão, que é um caso extremo do encurtamento, acontece quando a onda eletromagnética refletida de elementos da parte superior de um alvo imageado retorna ao radar antes da refletida pelos elementos da parte inferior, causando na imagem uma

inversão do alvo. Para pequenas distâncias alvo-sensor e pequenos ângulos de incidência, o efeito da inversão é mais intenso (figura 21b) (Freitas *et al.*, 2007).

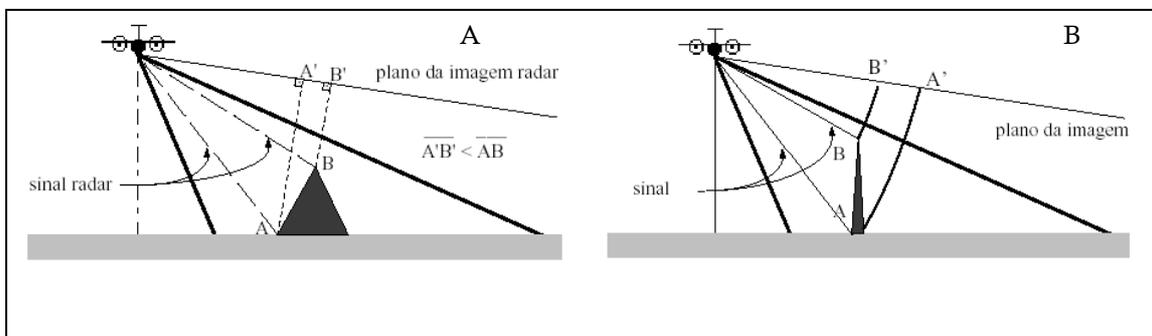


Figura 21: (a) Efeitos de encurtamento e (b) inversão topográfica em imagens radar, *in* Sabins (1996).

Esse fato, inerente ao imageamento SAR, torna-se, por vezes, impeditivo à análise de uma imagem, pois em áreas com grandes variações topográficas a presença constante de encurtamento, sombreamento e inversão topográfica é tão freqüente que a interpretação não é possível. No aerolevanteamento RADAMBRASIL, Lima (2008) indica as áreas que apresentaram esse tipo de problema no Brasil, em larga escala, tais como: Serra do Mar e da Mantiqueira, Serra do Imeri (Amazonas) e Pico da Neblina.

Outro parâmetro do sistema radar a ser considerado é a polarização da onda. Os alvos da superfície da terra comportam-se de maneira singular em relação à polarização; há materiais que refletem mais as polarizações horizontais, outros mais as verticais e, ainda, os que despolarizam a onda incidente, como é o caso da vegetação. A despolarização é causada pela variedade da estruturação física dos alvos, as quais são responsáveis pela variação do espalhamento da onda emitida pelo radar. Assim, imagens de polarização cruzada podem discriminar informações da superfície de modo distinto ao das polarizações paralelas (Ford *et al.*, 1998).

Há uma tendência mundial de investimento em sistemas radares polarimétricos (PALSAR, RADARSAT 2), que possibilitam a extração de assinaturas polarimétricas de um determinado alvo, pois cada material presente na natureza teria uma assinatura de retroespalhamento única. O sistema R99SAR possui capacidade polarimétrica, no entanto, devido a problemas relacionados à calibração do sistema, possibilita somente a utilização desse sensor como multipolarizado. Estudos orientados à construção de algoritmos que possibilitem essa calibração estão sendo desenvolvidos por Veiga & Monteiro (2009) e Andrade *et al.* (2007).

Geralmente, para qualquer superfície, a polarização VV possui resposta melhor ou igual à polarização HH. Altos retornos na polarização VV são esperados caso a orientação do espalhador (alvo) seja em um plano vertical (por exemplo, postes, troncos, milho e arroz); caso a orientação do espalhador seja em um plano horizontal, esperam-se retornos maiores para a polarização HH.

As polarizações cruzadas HV e VH apresentam respostas sempre inferiores às paralelas HH e VV. Isso se deve ao fato de que, para a mudança do estado de polarização, há a necessidade de pelo menos duas ou mais reflexões no alvo antes que a onda retorne para a antena e, a cada reflexão, a amplitude do sinal é reduzida. Dobson *et al.* (1992) afirmaram que a polarização cruzada é muito adequada para a detecção do teor de umidade dos solos.

Em superfícies compostas por solos e rochas espera-se que as polarizações paralelas sejam praticamente iguais e maiores que as polarizações cruzadas e que ambos os tipos de polarizações decresçam com o aumento do ângulo de incidência (Paradella, 2006).

Em relação às superfícies compostas por árvores, acredita-se que, tal qual ocorre com os solos e rochas, as polarizações paralelas sejam praticamente iguais e maiores que as polarizações cruzadas. No entanto, na banda L os coeficientes de retroespalhamentos das polarizações paralelas e cruzadas não decaem significativamente com o ângulo de incidência devido à dominância do espalhamento volumétrico (Paradella, 2006).

3.2.2.2. Parâmetros do alvo

Os parâmetros do alvo são: (i) rugosidade da superfície, (ii) constante dielétrica, (iii) inclinação e (iv) orientação.

A constante dielétrica é uma propriedade física do alvo que influencia a interação entre matéria e energia eletromagnética, especialmente nos comprimentos de onda do radar. Está intrinsecamente relacionada à permissividade do alvo, densidade específica e conteúdo interno de água. Alvos com altas constantes dielétricas têm altas intensidades de retorno como, por exemplo, as folhas das árvores. A umidade superficial pela água livre ou adsorvida na matéria também exerce o mesmo efeito na interação, o que faz com que solos com alta umidade tenham alto retroespalhamento e solos secos, baixa intensidade (figura 22) (Ulaby *et al.*, 1982).

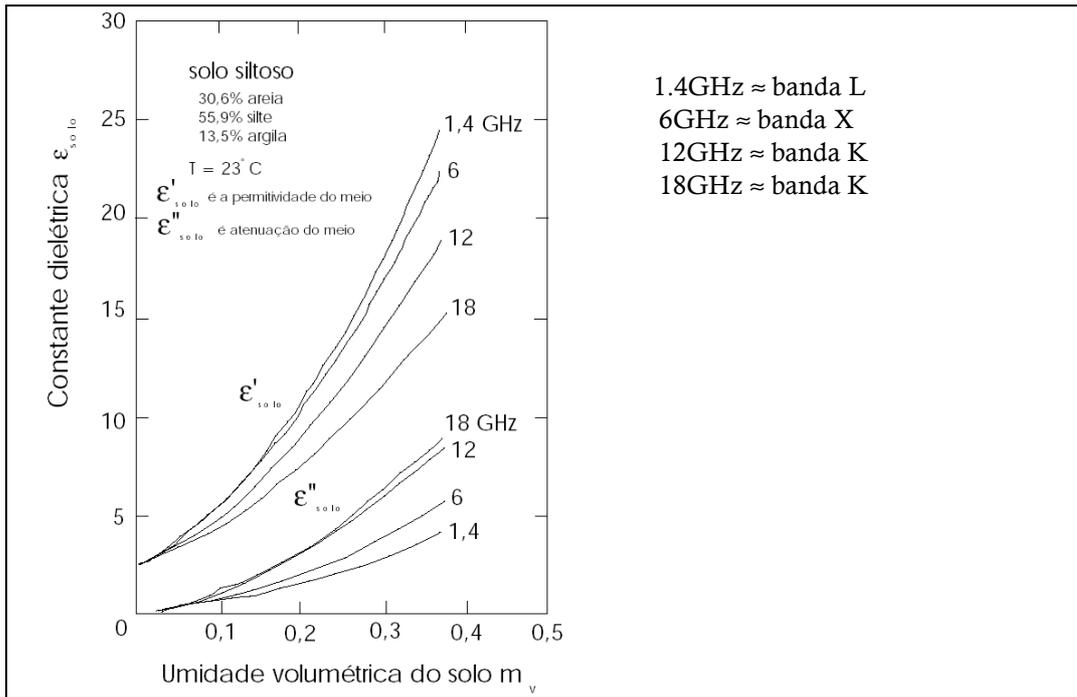


Figura 22: Curvas da constante dielétrica de solos (Ulaby *et al.*, 1986).

Ulaby *et al.* (1982) definiram a constante dielétrica (ϵ) de um material como sendo um número complexo, constituído de uma parte real (ϵ') e uma parte imaginária (ϵ''). A parte real é chamada de permissividade do material e a parte imaginária é denominada de fator de atenuação do meio. Matematicamente, a constante dielétrica é descrita como sendo:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (\text{Eq. 10})$$

sendo $j = \sqrt{-1}$

Em sensoriamento remoto, os alvos podem ser classificados em três classes distintas, segundo seu comportamento dielétrico: a) substâncias homogêneas, b) soluções eletrolíticas, e c) misturas heterogêneas. Na categoria de substâncias homogêneas, tem-se a água pura e o gelo com valores que podem variar de 3 a 80 (Ulaby *et al.*, 1982). Soluções eletrolíticas têm comportamento intermediário entre os materiais homogêneos e os heterogêneos; são exemplos desse comportamento o material intracelular de plantas e solos com alto teor de umidade. As misturas heterogêneas são representadas pelo gelo marinho, neve, solo seco e dosséis de culturas. As rochas e solos possuem uma baixa constante dielétrica, entre três a oito, enquanto a água, presente nas estruturas das folhas de árvores ou como umidade nos solos, tem um valor em torno de 80. Por causa disso, as vegetações apresentam tons de

cinza claro nas imagens de radar, o mesmo acontecendo para as superfícies de solos úmidos.

Dentre todas as propriedades, a rugosidade superficial do terreno é sem dúvida a mais importante. A REM na faixa das microondas apresenta baixa energia, por isso é que as suas interações com os alvos são dominadas por processos macroscópicos. A rugosidade superficial pode possuir relação direta com o substrato geológico e as estruturas geológicas podem ser identificadas por sutis variações da rugosidade observáveis em imagens SAR. Processos intempéricos, variação de composição das rochas e textura de horizontes superficiais de solos ou associações de coberturas vegetais tendem a causar variações na rugosidade do terreno (Nasa, 1996 *in* Rabelo, 2007).

A maioria das feições nas imagens de radar é determinada pela componente macro do relevo topográfico. Porém, a componente de pequena escala também modula intensamente o brilho das imagens. Isso faz com que as imagens de SAR sejam úteis para inferir as variações dos padrões texturais e estruturais das litologias aflorantes (microtopografia).

A sensibilidade do radar aos padrões texturais da topografia pode ser determinado pelo critério de *Rayleigh* (equação 10), que é considerado rugoso quando maior e liso quando menor:

$$RMS(h) > ou < \frac{\lambda}{8 \sin \theta} \quad (\text{Eq. 11})$$

sendo h a altura média das variações da superfície, λ é o comprimento de onda, θ é o ângulo de visada.

Uma superfície rugosa apresenta espalhamento difuso da energia emitida pelo radar e conseqüentemente exibe um alto brilho nas imagens SAR; já uma superfície lisa apresenta um espalhamento especular e exibe baixo brilho. No entanto, o critério de Rayleigh não considera as superfícies intermediárias (entre uma superfície lisa e uma rugosa). Assim, Peake & Oliver (1971) *apud* Sabins (1978) *in* Rabelo (2007), estabeleceram um critério, definindo limites em que uma superfície pode ser considerada lisa (Equação 12), rugosa (Equação 13) ou intermediária (entre esses dois valores).

$$h < \frac{\lambda}{25 \sin \theta} \quad (\text{Eq. 12})$$

$$h > \frac{\lambda}{4,4 \sin \theta} \quad (\text{Eq. 13})$$

Experimentos realizados utilizando um comprimento de onda constante demonstraram que pequenas mudanças no ângulo de incidência, menores que 20° a 25°, resultam em mudanças relativamente grandes na intensidade do retorno (figura 23). Para ângulos acima de 25°, a variação e magnitude do retroespalhamento são relativamente pequenas.

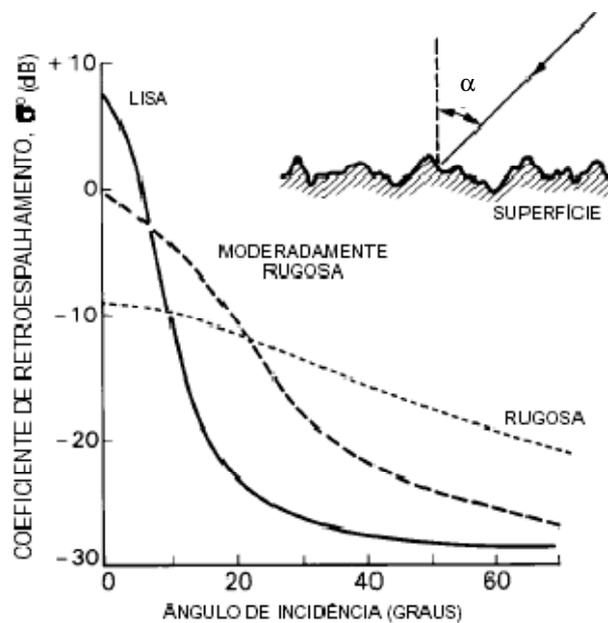


Figura 23: Influência do ângulo de incidência no retroespalhamento médio de superfícies lisas, intermediárias e muito rugosas. Fonte: NASA (1996, p.114 in Rabelo, 2007).

Objetos pequenos podem aparecer extremamente brilhantes nas imagens de radar, independente da rugosidade e constante dielétrica. Nesse caso, a inclinação e orientação do objeto em relação à onda incidente podem ocasionar o retorno muito forte, como é o caso de refletores de cantos diédricos ou triédrico (figura 24), utilizados com frequência para calibração polarimétrica e geométrica de sensores SAR.

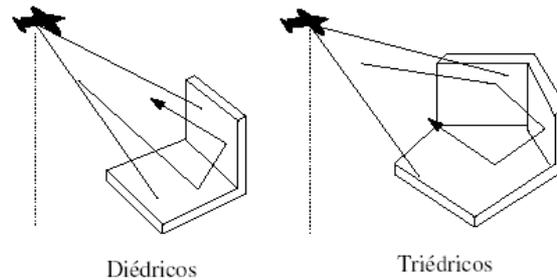


Figura 24: Refletores de canto (Sabins, 1996)

Os refletores de cantos mais comuns encontrados em cenas de radar são estruturas tais como pontes e edifícios, que combinados com o reflexo do terreno geram esse tipo de configuração geométrica (Paradella, 2006).

3.2.3. Ruído *Speckle*

O SAR é um sistema de imageamento que exibe um tipo de ruído intrínseco a sistemas coerentes, denominado *speckle*. O efeito desse tipo de ruído causa um aspecto granuloso às imagens, semelhante à textura “sal e pimenta”. É mais comum em imagens de alta resolução espacial, dificultando a interpretação visual e automática (MacFarlane & Thomas, 1984; Li & Bryan, 1983).

No radar de abertura sintética, a amplitude e fase do sinal de retorno são resultantes de uma soma vetorial (coerente) dos sinais de retorno de vários difusores contidos em cada célula de resolução. A fase de cada difusor está relacionada à distância entre o difusor e o sensor. Se o sensor se move, as fases dos difusores mudarão, acarretando alteração na amplitude total. Então, observações sucessivas da mesma área quando o sensor se move resultarão em diferentes valores de amplitude. Descrições mais detalhadas sobre a caracterização e formação deste ruído podem ser encontradas em Ulaby *et al.* (1982, 1986), Ulaby & Dobson (1989), Sant'Anna & Mascarenhas (1996).

Para a redução do *speckle* são utilizadas principalmente técnicas de filtragem e processamento *multilook*. A filtragem é realizada no processamento das imagens. Segundo Nepomuceno (2004), “diversos filtros espaciais redutores de *speckle* têm sido propostos a fim de aumentar a relação sinal/ruído das imagens SAR, bem como preservar os detalhes finos existentes nas mesmas. Estes filtros podem ser divididos em pontuais e convolucionais, podendo ser adaptativos ou não. No grupo dos filtros pontuais encontram-se os filtros de ordem, filtros desenvolvidos por Lee (1980), Kuan *et al.*, (1987) e Nathan & Curlander (1987). No grupo dos filtros convolucionais

encontram-se o filtro da média e o desenvolvido por Frost *et al.* (1982). Várias linhas de pesquisas têm conduzido a outros tipos de filtros, tais como, o homomórfico (Arsenault e Levesques, 1984), o geométrico (Crimmins, 1985), os sob o critério de maximum a posteriori – MAP (Kuan *et al.*, 1987 e Lopes *et al.*, 1990), o filtro de pesos ponderados (Martin e Turner, 1991) e os robustos (Frery&Santa’Anna, 1993)”.

O processamento *multilook* consiste em dividir a abertura sintética em visadas e, portanto, também corrobora para redução de *spckle*. A imagem final é composta pelas médias das imagens geradas em cada visada. Essa técnica melhora a relação sinal-ruído da imagem, reduzindo a resolução em azimute, uma vez que as imagens em cada *look* possuem um comprimento de antena sintética menor que o comprimento máximo (ℓ). A resolução em azimute pode ser escrita em termos da largura da faixa como:

$$\rho_a = \frac{nl \times \ell}{2} \quad \text{(Eq. 14)}$$

sendo nl número de looks. A resolução em azimute se torna nl vezes pior que a imagem de visada única (Ulaby *et al.*, 1982).

3.2.4. Calibração do sistema SAR

Uma das etapas mais importantes no estudo da polarimetria é a calibração do sistema radar, porque a maioria das informações geradas por ele deve-se à amplitude e à diferença do ângulo de fase entre o retroespalhamento das polarizações recebidas. Se a calibração do sistema não for exata, os mecanismos de espalhamento podem ser interpretados erroneamente, e as vantagens do uso da multipolarimetria são perdidas (CCSR, 2007).

Normalmente, a calibração combina os parâmetros do sistema radar com a análise dos dados recebidos. Os parâmetros do sistema radares são obtidos com o fabricante do sistema e, em sua maioria, são implementados em *softwares* comerciais de processamento de imagem. Já os dados recebidos, isto é, a amplitude e a fase do sinal, o *crosstalk* (“escape” de energia de um canal para outro) e o ruído do sistema, podem ser mensurados utilizando alvos específicos da cena (refletores de canto, *transponders* ativos, sombras de radar).

A calibração radiométrica das imagens radar polarimétricas, dependendo das aplicações, engloba a fase de correção do padrão da antena, correção das distorções do sistema (calibração polarimétrica) e obtenção dos valores de retroespalhamento médio (σ) dos alvos (calibração absoluta). A calibração polarimétrica compreende a determinação das amplitudes e das fases relativas entre as distorções dos canais do sistema PolSAR (*channel imbalance*) e a determinação da contaminação de um canal polarimétrico em outro (*cross-talk*), constituindo uma tarefa essencial para uma melhor extração da informação neste tipo de dado SAR (Mura *et al.*, 2007).

Uma das dificuldades comuns é que os parâmetros de calibração tendem a variar com o ângulo de elevação do feixe, por causa das propriedades da antena, e com o ângulo da incidência devido a propriedades de retroespalhamento do terreno, o que significa que o procedimento da calibração varia dentro de uma única cena (CCSR, 2007).

Pode-se relacionar o retorno e o valor do pixel numa cena SAR como:

$$\sigma = \mathcal{K}(\mathcal{P}_D) \tag{Eq. 15}$$

sendo \mathcal{P}_D a média dos valores de retroespalhamento dos pixels de uma área de interesse. Os valores são proporcionais à potência como visto na equação radar (item 3.3.1.) e \mathcal{K} é uma constante multiplicativa (Soares, 2007).

Calibração relativa significa que a constante \mathcal{K} é a mesma em qualquer sub-região da cena, ainda que seu valor real seja desconhecido. Calibração absoluta implica determinar o valor de \mathcal{K} , de modo que o retorno de qualquer objeto da cena possa ser comparado ao retorno de objetos de outras cenas, tomadas em outras datas e locais (Soares, 2007).

Em resumo, a calibração consiste de três etapas: (i) remoção de ruído termal aditivo; (ii) correção de efeitos multiplicativos; e (iii) determinação do valor de \mathcal{K} . Os passos (i) e (ii) constituem a calibração relativa (são associados aos efeitos que ocorrem em *range*), e o passo (iii) à calibração absoluta. A utilidade da calibração relativa é que ela permite que razões entre os retornos de objetos possam ser determinadas, ou contrastes sejam definidos entre vários objetos numa mesma cena (Soares, 2007).

Existem duas maneiras de realizar a calibração relativa de uma cena: usando dados de estatística ou de engenharia da própria cena. No primeiro modo, o ruído termal é fornecido como dado auxiliar ou medido numa porção da cena (processada)

com o transmissor desligado. A correção aplicada é aditiva e varia em *range*. Para utilização de dados estatísticos, é necessário encontrar regiões de retorno desprezíveis bem distribuídas em *range*, de maneira que o ruído termal e sua variação em *range* possam ser determinados. Sombras e corpos d'água podem ser usados em muitos casos. Entretanto, nem todas as cenas apresentam regiões com tais características, de forma que o uso de dados de engenharia é geralmente o recomendado (Soares, 2007).

Existem quatro efeitos multiplicativos que causam variações sistemáticas no brilho da imagem: (i) fator de perda com a distância ($1/R^3$ para SAR); (ii) padrão da antena; (iii) decréscimo do retorno do alvo com o aumento do ângulo de incidência e (iv) decréscimo do tamanho da célula de resolução.

Os efeitos (i) e (iv) são facilmente corrigidos, visto que requerem apenas dados de geometria de aquisição. O padrão da antena é mais difícil. Normalmente, o padrão da antena é determinado na fase de qualificação do sistema e documentado para ser usado na fase de calibração de cenas. Existem fatores que podem invalidar as medidas de laboratório. Se o padrão da antena é conhecido e confiável, os efeitos (i), (ii) e (iv) podem ser corrigidos simultaneamente e o efeito (iii) pode ser estudado.

Se os efeitos (i), (ii) e (iv) não podem ser corrigidos usando dados confiáveis de engenharia do sistema, ainda assim, pode-se realizar uma calibração relativa da cena, através da correção do padrão da antena descrita anteriormente, para regiões homogêneas da cena (em termos de cobertura). Neste caso, o efeito (iii) é também removido.

Calibração absoluta é realizada mais facilmente se o valor de \mathcal{K} (que varia no tempo) é fornecido pelos engenheiros do sistema. Se esse valor não é fornecido, em princípio, uma cena pode ser calibrada a partir da utilização de refletores de canto distribuídos no terreno durante a aquisição da cena pelo sensor. Caso isto não seja realizado, há uma limitação da utilização do sistema em relação a medidas quantitativas (Soares, 2007).

Os atuais satélites polarimétricos comerciais ALOS/PALSAR e RADARSAT 2 apresentam os parâmetros do sensor necessários para calibração absoluta instalados em programas que otimizam esse tipo de correção. Em contraponto, as imagens obtidas utilizando as quatro polarizações do sensor R99SAR pertencente ao SIPAM não apresentam tais características, o que torna necessário, para a calibração desse sensor, a utilização de refletores de canto nas cenas que foram imageadas (item 3.2.2.3).

3.3. Dados R99SAR do Rifte Arai

Como discutido anteriormente, as características de uma imagem obtida na região das micro-ondas têm relações diretas entre os parâmetros do sistema e do alvo, bem como a geometria entre esses dois componentes. Assim, a possibilidade da definição desses parâmetros e, principalmente, da geometria de imageamento, é essencial para uma correta avaliação dessa tecnologia e sua aplicação na geologia.

O convênio entre a UnB e o Comando Geral do Ar (COMGAR) permitiu a definição dos parâmetros do sensor aerotransportado R99SAR para o aerolevanteamento de Nova Roma. Tais elementos foram definidos com base nos modos de operação do sensor R99SAR (Capítulo 1) e nas características fisiográficas da área estudada (Capítulo 2).

O alinhamento preferencial, tanto do relevo quanto das estruturas da região, de direção NS, determinou que as linhas de voo desse aerolevanteamento fossem NS com visada para oeste. Os desníveis topográficos que ocorrem nessa região são bastante intensos com variações por vezes próximas a 1000m. Portanto, para diminuir a quantidade de sombreamento e de encurtamento e/ou inversões de relevo, foi definido que o ângulo de visada mais adequado para essa região seria entre 35~45 graus. No entanto, devido a limitações de teto mínimo e máximo de voo, o mesmo foi fixado entre 45~75 graus.

Devido ao cenário pouco antropizado na região de Nova Roma, com unidades em superfície superando a escala de dezenas de metros, optou-se pelo imageamento da região com pixel de 6 metros, com 8 *multilook*, na tentativa de diminuir o ruído *Speckle* inerente a qualquer sistema SAR. Também se optou por sobreposições entre as faixas de imageamento em torno de 50%, na tentativa de diminuir a deformação em *range*, característica de sensores aerotransportados. O cálculo da planilha de voo obtida resultou em um aerolevanteamento com sete faixas de largura de 40Km, aproximadamente (figura 25).

A solicitação com os parâmetros do aerolevanteamento (tabela 4) foi remetida à aeronáutica em meados do 2º semestre do ano de 2005, e o voo foi realizado em 27 de outubro de 2005. Parte desse aerolevanteamento (os três primeiros segmentos) foi entregue à UnB em dezembro de 2005. Os outros quatro segmentos somente foram entregues em meados de fevereiro de 2007.

O processo de geração da imagem (pré-processamento dos dados brutos) foi realizado pela Unidade Aérea (2°/6° GAV) utilizando os dois programas disponíveis: GSP- *Ground SAR Processor* e o PROSAR, ao todo gerando aproximadamente 80Gb de dados. Os dados recebidos já estavam transformados para *ground range*, mas em *frames* dentro de uma única faixa; para leitura dos arquivos foi utilizado programa de linguagem IDL, otimizado no programa ENVI 3.6 pela Força Aérea Brasileira (FAB).

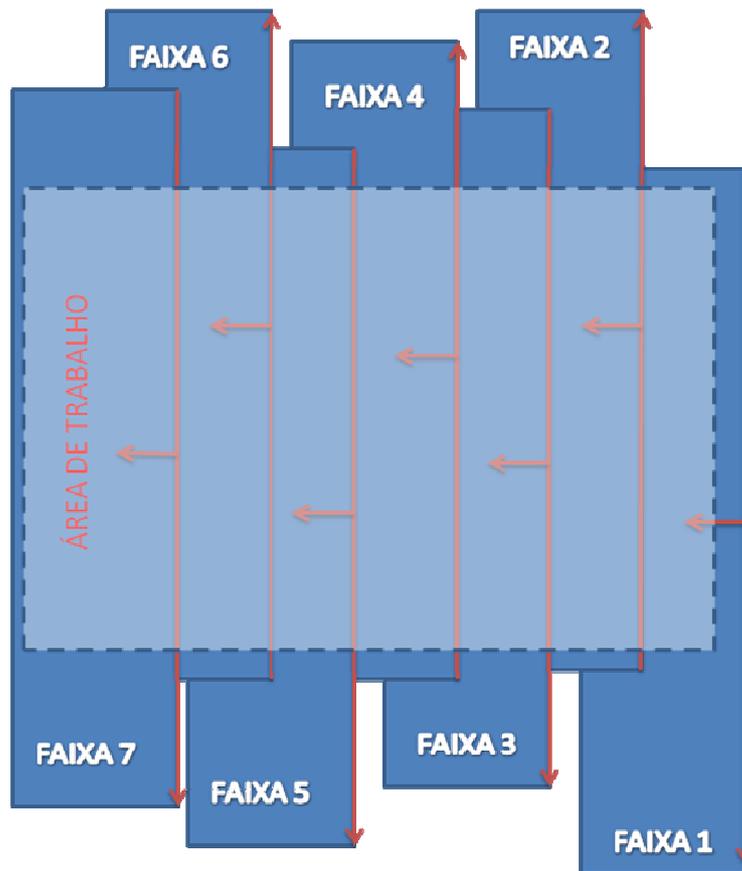


Figura 25: Esquema dos sete segmentos imageados pelo R99SAR na região de Nova Roma. A linha em vermelho indica a trajetória do voo e em azul as larguras das faixas imageadas no terreno.

Tabela 4: Características da região de Nova Roma –Cavalcante- Monte Alegre e implicações nos parâmetros de aerolevantamento

Informações da área necessárias para definição do aerolevantamento	Inf. da Região Nova Roma	Fatores determinados	Definições do aerolevantamento
Direção preferencial das estruturas da região de Nova Roma	N-S	Direção de voo	N-S
		Direção de visada	W
Desníveis topográficos	800 m	Ângulo de visada	45-75 graus
Variações litológicas	Dezenas de metros	Tamanho de pixel	6 metros
Tamanho total da área	80 x 60Km	Numero de segmentos	7
		Modo de operação do aerolevantamento	QUAD L + X
		<i>Multilok</i>	8
		Menor deformação em <i>range</i>	Sobreposição de 50% entre os segmentos imageados

3.3.1. Métodos do pré- processamento

O pré- processamento da imagem SAR foi considerado neste trabalho como todas as etapas que antecederam a análise e interpretação das imagens R99SAR. Os processos de avaliação de processadores GSP e PROSAR, preparação da imagem (mosaico de *frames* e faixas, correções radiométricas de padrão da antena, recorte da imagem e ortocorreção) e a filtragem fizeram parte dessa etapa seguindo o fluxo apresentado na figura 26.

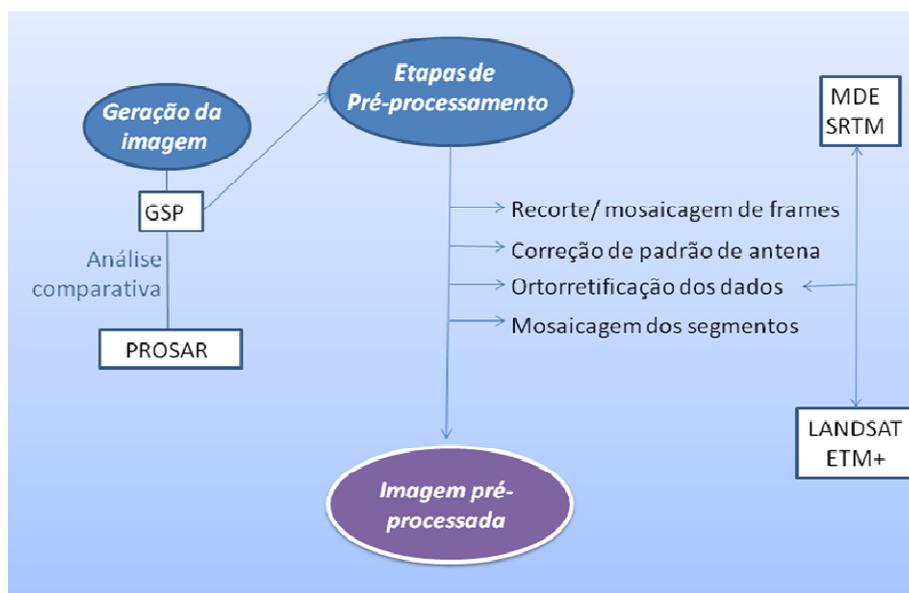


Figura 26: Fluxograma das etapas de pré -processamento dos dados R99SAR

3.3.1.1. GSP x PROSAR

A informação relativa aos processadores de geração da imagem SAR obtida pelo R99SAR é bastante restrita. O sistema GSP (*Ground Control Processor*) foi concebido pelo próprio fabricante do sensor de origem canadense que, segundo Veiga (2004), apresenta os seguintes problemas: (i) o desempenho dos processadores SAR fornecidos ao SIPAM é inferior às necessidades operacionais do mesmo; (ii) as imagens SAR produzidas pelo sistema não são co-registradas automaticamente, requerendo um considerável esforço humano para realizar essa tarefa; (iii) a arquitetura de processamento SAR adotada possui alto custo de manutenção e atualização; (iv) o processador não permite a programação de rotinas, necessitando a presença constante de um operador do sistema; (v) e o que torna mais complicada a utilização desse programa é a falta de informação dos códigos fontes do sistema fazendo com que o mesmo seja uma “caixa-preta”.

Nesse sentido, o IAV/ITA (Instituto de Tecnológico de Aeronáutica) vem desenvolvendo, em um processo contínuo de atualização, o programa PROSAR, desde meados de 2000. Esse programa pretende, utilizando tecnologia nacional, solucionar algumas questões do GSP, tais como: desenvolver sistema de processamento SAR das bandas X+L para ser utilizado em computadores de baixo custo do tipo PC, ambiente Windows; desenvolver um sistema de processamento SAR capaz de utilizar o tempo de CPU ocioso em computadores PC para realizar as tarefas de processado SAR, em paralelo, melhorando seu desempenho a um custo reduzido; e desenvolver um sistema de catálogo de missões e produtos que permitam a clientes remotos efetuar consultas sobre a disponibilidade de dados e acompanhamentos de missão em “*web-browser*” (Veiga, 2004).

Na área de trabalho, esses dois processadores foram testados utilizando os parâmetros estatísticos básicos de Mínimo, Máximo, Média e Variância para análise dos dados. Foram utilizadas imagens de mesmo recobrimento geográfico obtidas pelos programas GSP e PROSAR, sendo que a versão do PROSAR de 2007 (ano que foram processados os dados deste aerolevante) não apresentava correção de compensação da trajetória, otimizada somente no final de 2008.

As áreas escolhidas para a comparação estatística são próximas ao *near range* da faixa dois (figura 27) e com distintas características de relevo: área 1 sem desníveis topográficos significativos, de dimensão pequena (400x400 pixels) e com ausência de

sombra (figura 28), e (ii) área 2 com escarpas topográficas, média (2000x2500 pixels) e com presença de sombra (figura 29) (Almeida *et al.*, 2007).

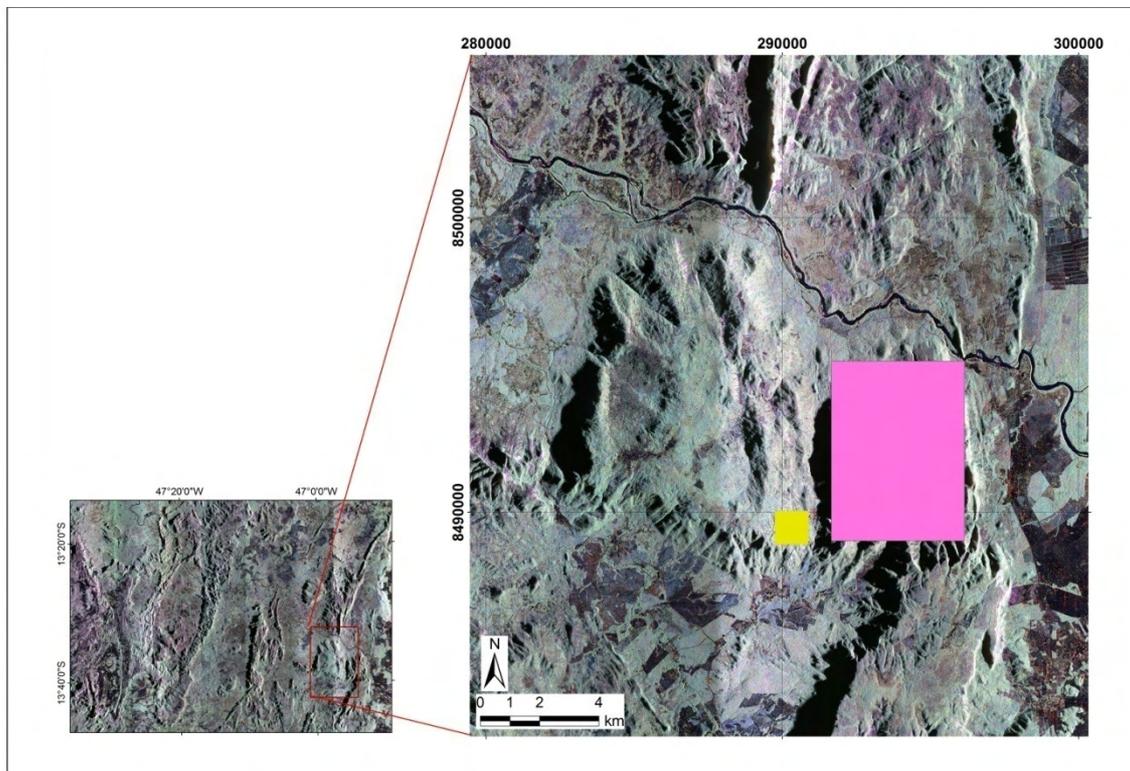


Figura 27: Localização das áreas de estudo de comparação das imagens GSP e PROSAR

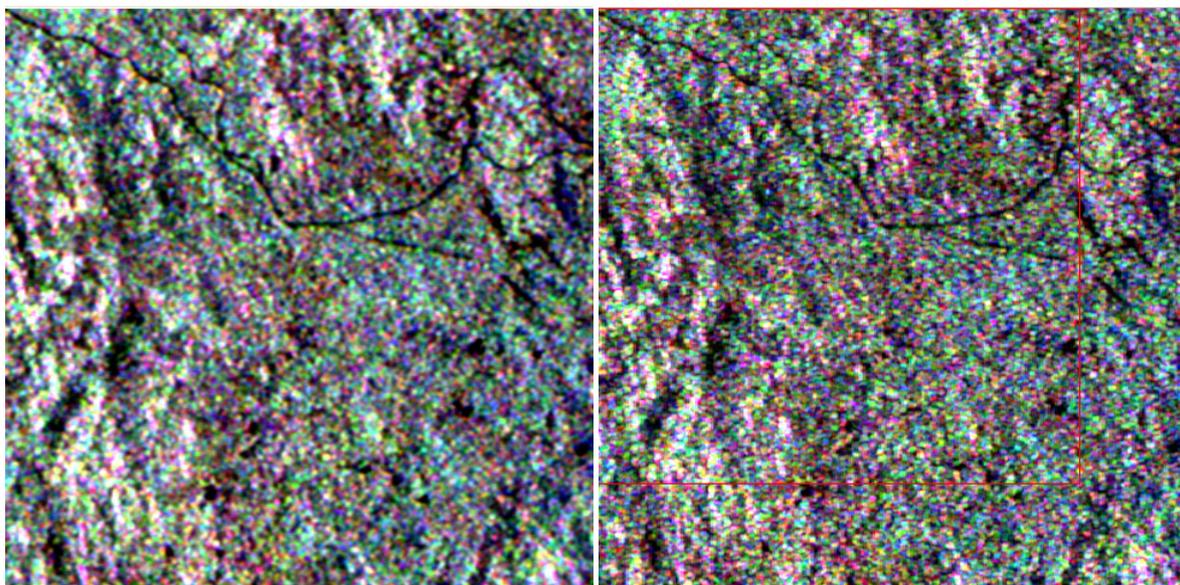


Figura 28: Área 1 sem desníveis topográficos significativos (400 x 400 pixels) com análise estatística para os softwares GSP (à direita) e PROSAR (à esquerda).

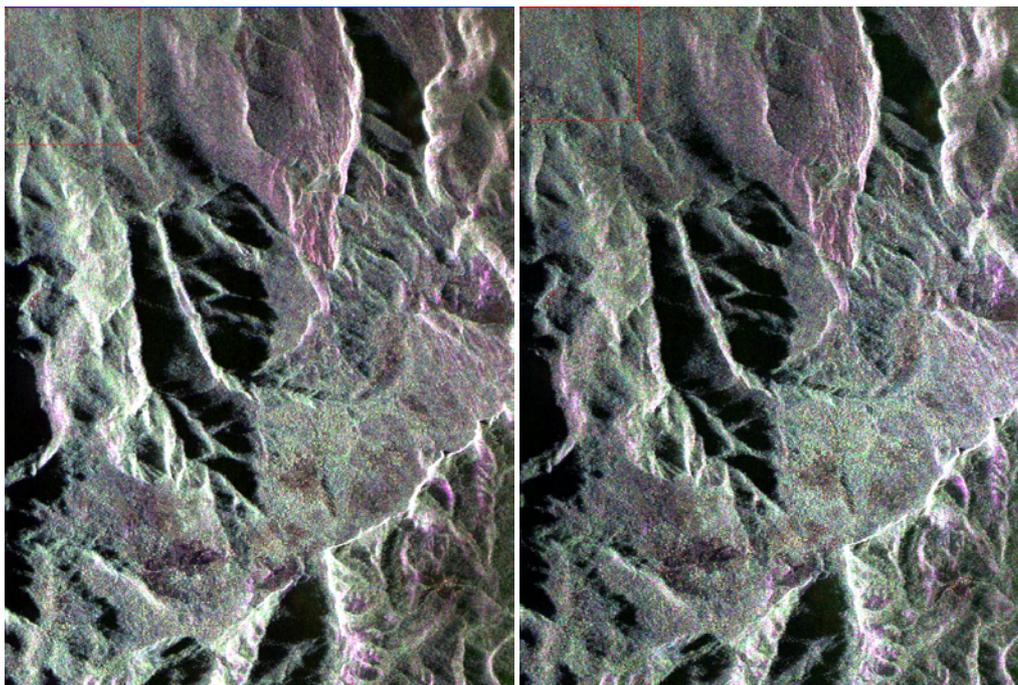


Figura 29: Área 2 desníveis topográficos significativo, maior em relação à área 1 com análise estatística para os softwares GSP (à direita) e PROSAR (à esquerda).

Visualmente, as áreas processadas por ambos os programas (GSP e PROSAR) são similares, quando analisadas com realce de histograma 2%. Porém, a estatística (valores de mínimo, máximo, média e desvio padrão) das polarizações demonstra resultados bastante distintos (tabela 5). O software GSP, apesar de processar o dado com 16 bits (65536 níveis de cinza), apresentou para todos os *subsets* e polarizações médias e desvios padrões compatíveis com 12 ou no máximo 13 bits. Em relação ao PROSAR, os *subsets* apresentam maior retroespalhamento quando comparado ao GSP (tanto em relação aos valores máximos quanto em relação à média e o desvio padrão). No entanto, a condição esperada das respostas em áreas vegetadas entre as polarizações paralelas HH e VV são bastante próximas e superiores em relação às polarizações cruzadas, não é respeitada nesse processador.

Devido à escassa documentação acessível para a análise dos algoritmos na época de processamento dessas imagens, optou-se pelo processamento dos dados utilizando o *software* GSP. Essa decisão foi tomada levando em consideração as informações referidas no 2º Encontro de Usuários de Imagens R99SAR ocorrido em novembro de 2006, no CCSIVAM, a sede do SIPAM em Brasília, e as informações informais dos demais pesquisadores na área.

Tabela 5: Estatísticas das polarizações do aerolevanteamento Nova Roma para os *softwares* de pré-processamento PROSAR e GSP.

	Pol	Mínimo		Máximo		Média		Desvio Padrão	
		GSP	PROSAR	GSP	PROSAR	GSP	PROSAR	GSP	PROSAR
Área 1	HH	347	1907	4935	55341	1697	15173	407	4378
	HV	232	2494	2092	42903	876	15508	196	4263
	VV	419	2732	4656	55293	1562	15391	339	4151
	Pol	Mínimo		Máximo		Média		Desvio Padrão	
		GSP	PROSAR	GSP	PROSAR	GSP	PROSAR	GSP	PROSAR
Área 2	HH	58	324	10090	65535	1065	14432	614	8838
	HV	46	570	3883	65535	273	14413	273	7926
	VV	46	257	9771	65535	980	14980	562	9083

3.3.1.2. Mosaicagem de frames e junção das polarizações

Os dados de saída do programa GSP são pequenos “quadrados”, denominados de *frames*, de aproximadamente 5000x5000 pixels. No aerolevanteamento Nova Roma foram tomadas aproximadamente 7 a 8 *frames* para cada faixa (figura 30). Esses extratos de imagens foram mosaicados no aplicativo ENVI e, após essa etapa, as polarizações foram agrupadas em um único arquivo, a fim de gerar apenas arquivos de faixas com quatro bandas/ polarizações (HH, HV, VH e VV).

Os segmentos 1, 3, 5 e 7 foram rotacionados para o norte verdadeiro e, quando necessário, foram desespelhados.

3.3.1.3. Correção do padrão de antena

Após essa primeira etapa, foi aplicada a correção de padrão de antena em cada segmento, a fim de possibilitar a calibração relativa do sistema. Nesse processamento, objetivou-se a correção das imagens de acordo com o padrão de ganho do sensor utilizado e a redução da influência da variação do ângulo de incidência no retroespalhamento dos alvos (Silva *et al.* 2007). Para o aerolevanteamento estudado foi utilizado o modelo multiplicativo, por meio de uma função de ajuste obtida a partir de áreas homogêneas da imagem que se estendiam do alcance próximo ao alcance distante. Essas correções foram realizadas no software ENVI 4.4 e em todos os sete segmentos foram utilizados polinômios de 5º grau para ajuste da curva aos dados (figura 31). Apesar desse ajuste polinomial, optou-se pelo recorte da parte inicial das

sete faixas próximo à coluna 2600, desprezando assim cerca de 30% do dado do *near range*.

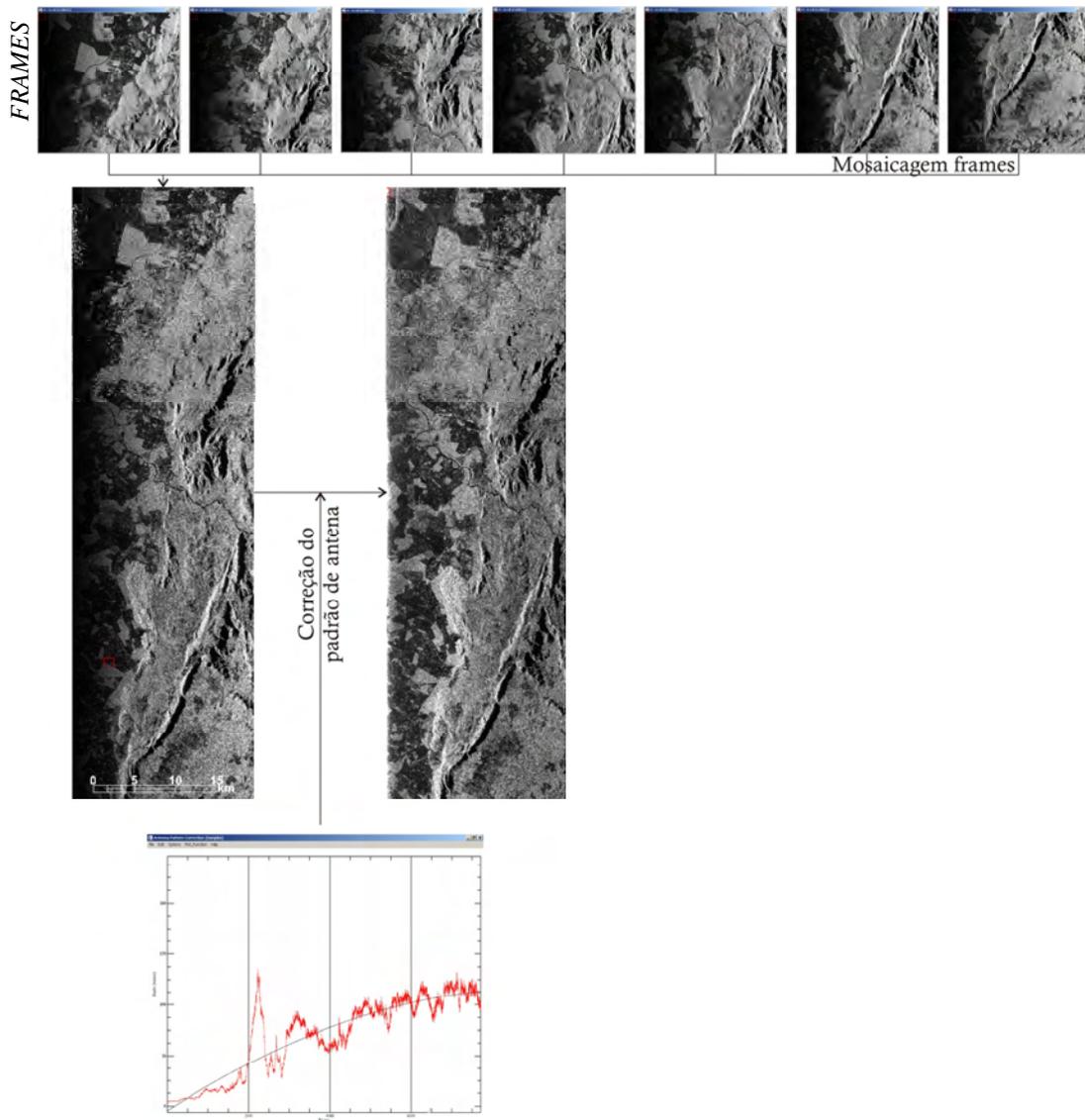


Figura 30: Etapas de processamento dos dados R99SAR(mosaicagem de frames e correção de padrão de antena)

Ainda em termos de calibração relativa do sistema, a tentativa de remoção do ruído termal aditivo utilizando respostas de áreas com retorno desprezíveis (Soares, 2007) não obteve sucesso. Devido ao alto ângulo de incidência do sensor R99SAR, as imagens das faixas imageadas possuem áreas sombreadas onde não é possível extrair informações relevantes dos alvos. Algumas amostragens de valores digitais por regiões (figura 32) foram realizadas para essas áreas sombreadas que ocorrem em toda a extensão da imagem. A média obtida foi de 96,25 com desvio padrão de 18,4 para a

polarização HH, de 64,4 e 12,1 (para HV) e de 85,3 e 15,5 para VV. Observa-se que os valores digitais de média e desvio padrão dessas áreas que deveriam ter valores nulos variam em relação às polarizações e à localização da área na imagem. As estatísticas separadas para cada área encontram-se demonstradas na tabela 6. A falta de uma tendência nos dados, a fim de modelar o efeito aditivo inerente aos dados SAR, fez com que eles não fossem corrigidos.

A calibração absoluta do sistema, que necessita da definição do valor \mathcal{K} (item 3.2.4), também não foi realizada neste estudo devido à falta de refletores de canto na hora do aerolevantamento. Assim, os dados utilizados nesta pesquisa não podem ser classificados como multipolarimétricos, devido à falta de uma função de transferência dos dados para σ^0 , sendo classificados, portanto, como multipolarizados e os seus valores demonstrados em números digitais.

A correção de padrão de antena foi bem-sucedida na área imageada, com exceção de entre o primeiro e o segundo segmento, próximo à coluna $2,34 \times 10^7$ da imagem pré-processada e, entre os segmentos 1 e 2, que apresentam falsas bordas sem correlação com os padrões de retroespalhamento dos alvos; fato esse que deverá ser levado em consideração quando analisada a imagem.

3.3.1.4. Ortoretificação e Mosaicagem dos segmentos

A forma em imagens SAR é um importante elemento no processo de interpretação e, por isso, principalmente em áreas acidentadas como é a região de estudo, é imprescindível a redução das distorções geométricas por meio de correção. As distorções da imagem são causadas pela plataforma (posição, velocidade e orientação), pelo sensor (orientação, tempo de integração) e pela terra (geóide, elipsóide e relevo).

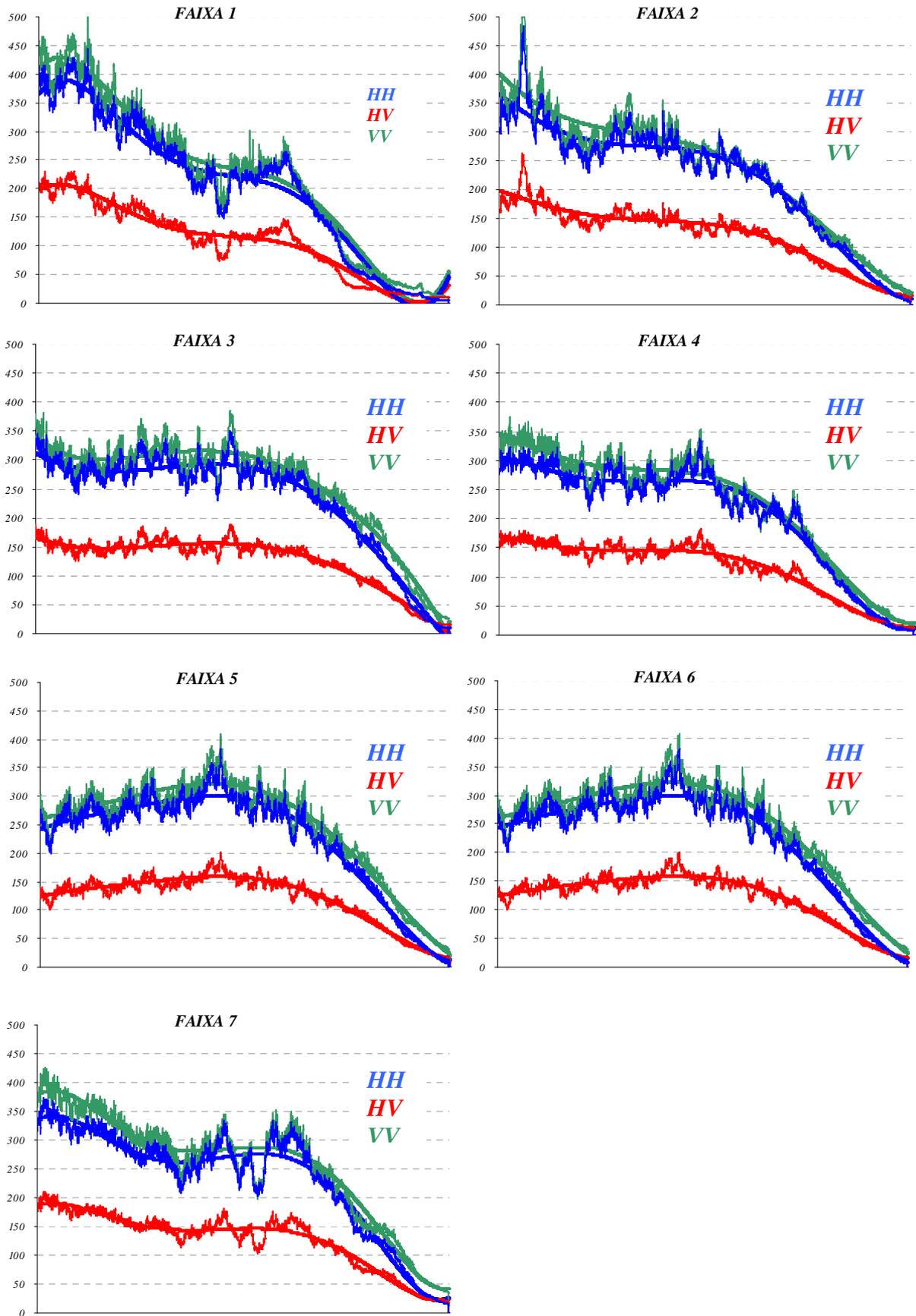


Figura 31: Gráficos demonstrando média do retroespalhamento em range com o polinômio de 5º grau correspondente para a correção do padrão de antena nas faixas de 1 a 7.

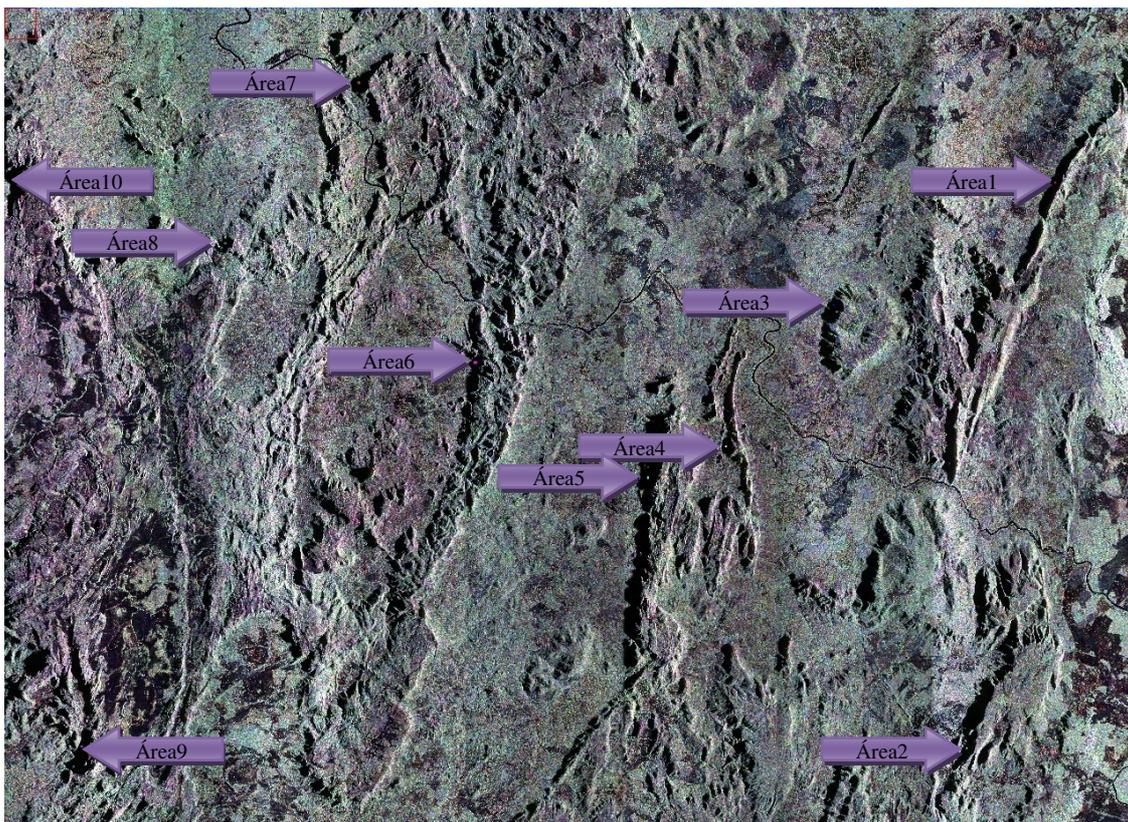


Figura 32: Imagem indicando as regiões de sombra utilizadas para a extração das informações estatísticas que constam na tabela 6.

Tabela 6: Estatística básica das regiões de interesse em áreas sombreadas. As localizações das mesmas encontram-se demonstradas na figura 32.

	Min	Max	Med	Desv	
Área1	43	149	88	17	
	25	91	56	11	
	50	141	88	17	
Área2	81	212	135	24	
	49	167	92	18	
	59	178	99	17	
Área3	58	182	109	20	
	39	122	73	14	
	43	139	81	15	
Área4	44	150	92	17	
	26	82	53	10	
	33	113	69	12	
Área5	37	116	73	13	
	20	85	48	8	
	32	106	60	11	
Área6	45	147	88	16	HH
	30	101	60	12	HV
	30	119	72	13	VV
Área7	42	171	99	18	HH
	34	108	65	12	HV
	47	176	96	17	VV
Área8	67	197	129	23	HH
	35	99	60	10	HV
	47	171	105	19	VV
Área9	56	174	104	19	HH
	35	129	70	14	HV
	43	146	89	17	VV
Área10	42	165	98	17	HH
	32	116	67	12	HV
	43	160	94	17	VV

Existem três modelos básicos de correção: Polinomial, *Rational Function* e Rigoroso. O mais preciso entre os três é o último, mas para ser usado necessita de informações da plataforma e do sensor, permitindo a correção das distorções através da realidade física da geometria de visada completa e das distorções da plataforma. O modelo polinomial é o mais simples, pois não considera a elevação do terreno e as informações sobre a posição da plataforma ou do sensor. A função racional (*Rational Function*) possui muitas características do modelo polinomial, porém, envolve uma razão de transformações polinomiais, além de considerar a elevação do terreno. Nesse método, também não são necessárias informações do sensor e da plataforma, mas é preciso uma razoável quantidade de pontos de controle que não eliminam completamente as distorções entre os pontos (Toutin & Cheng, 2002 *in* Pinheiro, 2003, Hu & Croitoun, 2004).

Os dados do imageador R99SAR não possuem as especificações da plataforma e do sensor, sendo inviável a correção pelo método rigoroso. Assim, os dados do aerolevante Nova Roma foram corrigidos pela Função Racional otimizada no módulo *OrthoEngine* do PCI Geomatics. As imagens foram projetadas para o sistema de coordenada UTM zona 23 sul, datum WGS 84 e tamanho de pixel de saída de seis metros. Foram estabelecidos entre quinze a vinte pontos de controle por segmento, com RMS entre cinco e sete.

As bases de dados para a coleta de pontos de controle foram as imagens GEOCOVER (<http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml>), e como base altimétrica foi utilizado o modelo digital de terreno do SRTM. A base GEOCOVER foi priorizada de acordo com as normas da CPRM, Serviço Geológico do Brasil, para os novos levantamentos geológicos básicos. Em relação aos dados do SRTM, os estudos de Gouvea *et al.* (2005), Pinheiro (2006), Higa *et al.* (2006), Santos *et al.* (2006), Barros & Cruz (2007), Santos *et al.* (2007), Almeida *et al.* (2009) demonstraram que esses dados apresentam erros de aproximadamente sete metros, que são inferiores aos da carta topográfica 1:100.000 (base de maior escala existente na região).

A correção posicional das imagens utilizando o *Rational Function* demonstrou que as faixas estavam comprimidas na direção de range. A etapa conseguinte (mosaicagem dos dados) permitiu a verificação da qualidade e regularidade em relação ao posicionamento da imagem. Os desvios em x e y são imperceptíveis quando comparados ao dado LANDSAT ETM+ da mesma área (figura 33).

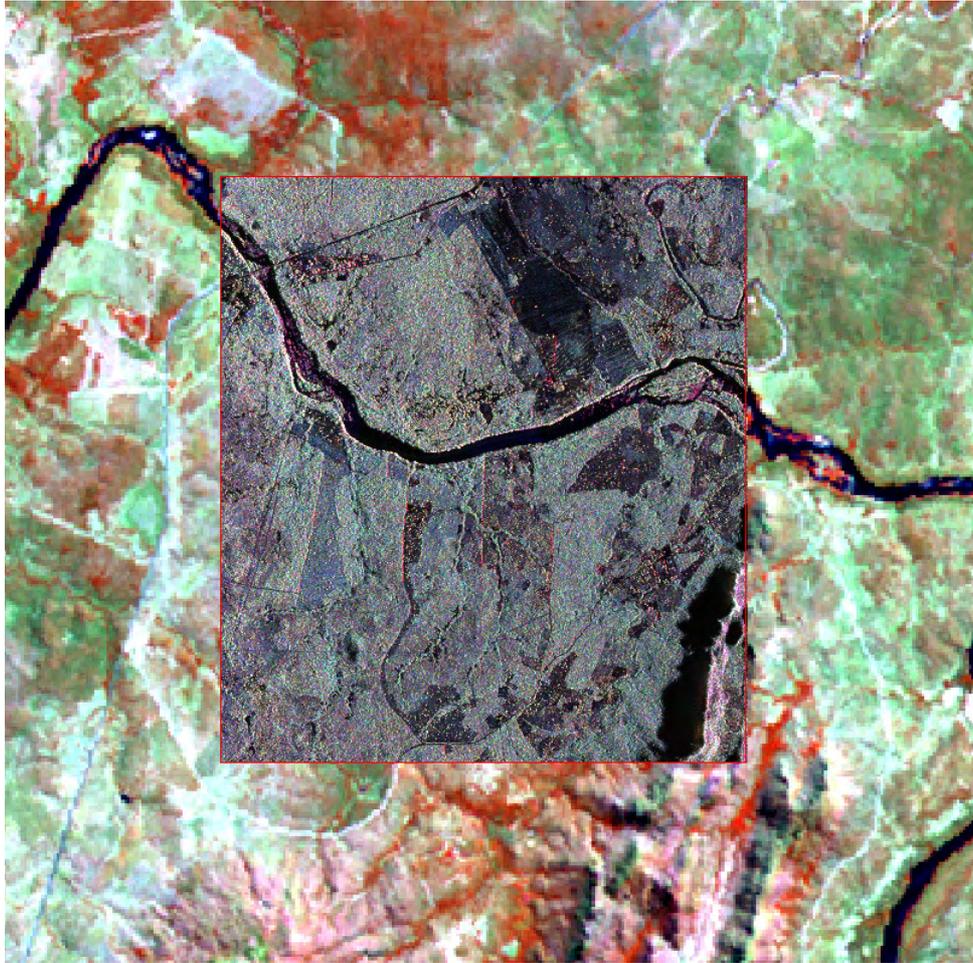


Figura 33: Extratos das imagens LANDSAT e R99SAR arranjado segundo o geoposicionamento das mesmas.

3.3.1.5. Filtragem dos dados

Os dados R99SAR foram processados nesse aerolevanteamento em oito *multilooks*, resultando em uma imagem visualmente sem ruído e com distribuição gaussiana dos dados. Apesar de nitidamente sem *speckle*, optou-se por utilizar o filtro de média, janela 3x3, que se adequou melhor a esse tipo de distribuição.

Capítulo 4

Análise e Interpretação das imagens R99SAR

Aerolevanteamento Nova Roma

O nível do conhecimento atual do subsolo do território brasileiro situa-se num patamar de escala macrorregional quanto à evolução geológica e geocronológica das unidades geotectônicas cratônicas e de faixas de dobramentos. A geologia básica e o potencial mineral ainda são insuficientemente conhecidos, devido à falta de mapeamentos geológicos sistemáticos, modelos e métodos exploratórios adequados às características de cada região. Hoje, somente cerca de 40% do território estão mapeados na escala de 1:100.000. Apesar dessas limitações, em algumas regiões onde a diversidade geológica foi detalhada, grandes potenciais minerais foram encontrados apresentando destaques internacionais para as regiões da Serra de Carajás, Quadrilátero Ferrífero e a Província Mineral do Tapajós. Parte desse problema está associado às dificuldades de obtenção de imageamentos fotográficos, ou sensores orbitais, na faixa óptica de uma grande extensão do território nacional devido à alta frequência de cobertura de nuvens. Existem regiões brasileiras que, apesar do grande número de imagens disponíveis nos últimos 30 anos, poucas são sem cobertura de nuvens.

A principal fonte de dados alternativa para essas regiões são as imagens de radar. O uso geológico de imagens SAR foi bastante explorado no projeto RADAMBRASIL, durante a década de 1970, que objetivou o imageamento de todo o território nacional de imagens de radar aerotransportado na banda X com polarização HH e resolução espacial de 16 metros. A linha metodológica para interpretação geológica nesse projeto ficou conhecida como “Sistema de Elementos Radargráficos” (Lima, 1995; Lima, 2008).

Com o encerramento do projeto, somente na década de 1990 e, mais recentemente, retornou-se ao uso das imagens de radar na geologia, a partir, principalmente, do lançamento dos sensores orbitais JERS e Radarsat como demonstram os trabalhos de Carvalho (1997), Crósta *et al.* (1998), Paradella *et al.* (2000, 2005). As técnicas de análise e interpretação dos dados SAR para investigações geológicas desse período tendem a ter ênfase qualitativa, isto é, nas informações relativas à amplitude do sinal retroespalhado (brilho). Assim, a abordagem foi

realizada somente com foco nas avaliações visuais, similar às técnicas utilizadas em fotointerpretação (Paradella *et al.*, 2005).

Mais recentemente, com o advento dos radares polarimétricos, tais como R99SAR, ALOS/PALSAR e RADARSAT 2, as técnicas de análises obrigatoriamente têm que levar em consideração as informações relativas à fase e à polarização da onda (Paradella *et al.*, 2005; Rabelo, 2007). Esses “novos” sensores abriram perspectivas para a utilização de uma abordagem mais quantitativa, utilizando as informações dos dados referentes à amplitude, fase e polarização das ondas retroespalhadas. Alguns trabalhos envolvendo interpretações de imagens multipolarizadas e/ou multipolarimétricas com enfoque geológico merecem destaque, entre eles Daily *et al.* (1978); Evans *et al.* (1996); Abdelson & Stern (1996); Schaber *et al.* (1997); Rabelo (2007), Rabelo *et al.* (2006, 2007); Almeida *et al.* (2007, 2008a, 2008b).

Para o aerolevanteamento da região do Rifte Araí, os métodos de processamento e interpretação das imagens R99SAR, com diferentes polarizações, foram desenvolvidos utilizando os softwares ENVI e ARCGIS e serão apresentados nos tópicos seguintes.

4.1. Análise dos dados multipolarizados R99SAR

A etapa de pré- processamento dos dados R99SAR, onde as correções relativas aos ruídos *speckle*, as distorções de terreno e de padrão de antena foram amenizadas com grau razoável de sucesso, resultou na geração das imagens multipolarizadas HH, HV, HV e VV (figuras 34, 35, 36 e 37, respectivamente).

A estatística básica e a correlação entre polarizações estão listadas na tabela 7. A alta taxa de correlação entre as polarizações, aproximadamente 85%, pode ser notada pela análise visual das imagens (figura 34 a 37) e confirmada nos dados estatísticos da imagem. Até mesmo entre polarizações paralelas e cruzadas não há grande diferença entre essas taxas. A polarização VH foi descartada devido a sua alta taxa de correlação entre a polarização HV (99,98%, aproximadamente), demonstrando que o sistema está corrigido para *crosstalk* (Rabelo *et al.*, 2007; Andrade *et al.*, 2007b).

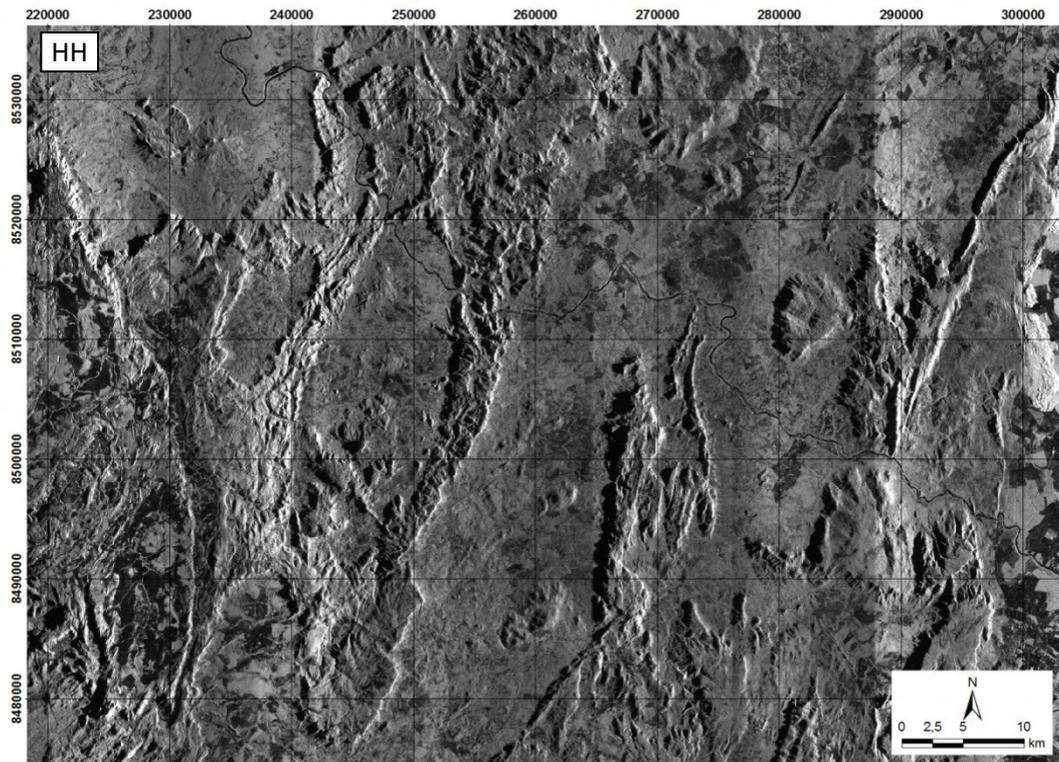


Figura 34: Mosaico em amplitude com polarização HH do aerolevante Nova Roma utilizando o sensor R99SAR

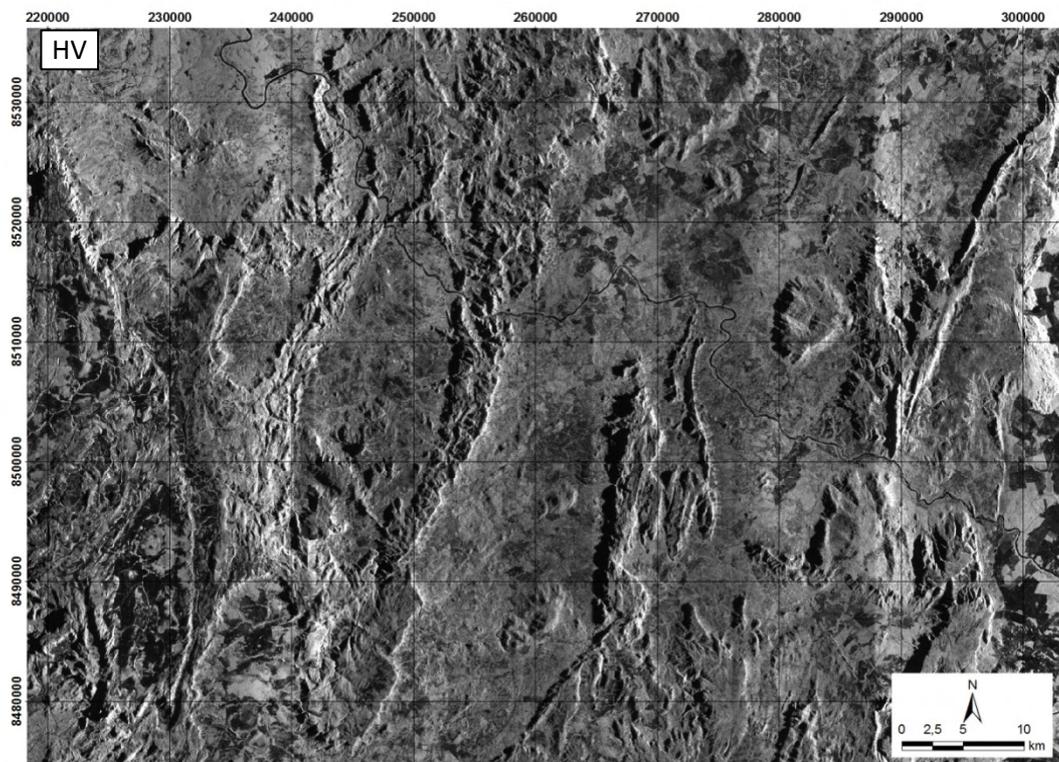


Figura 35: Mosaico em amplitude com polarização HV do aerolevante Nova Roma utilizando o sensor R99SAR

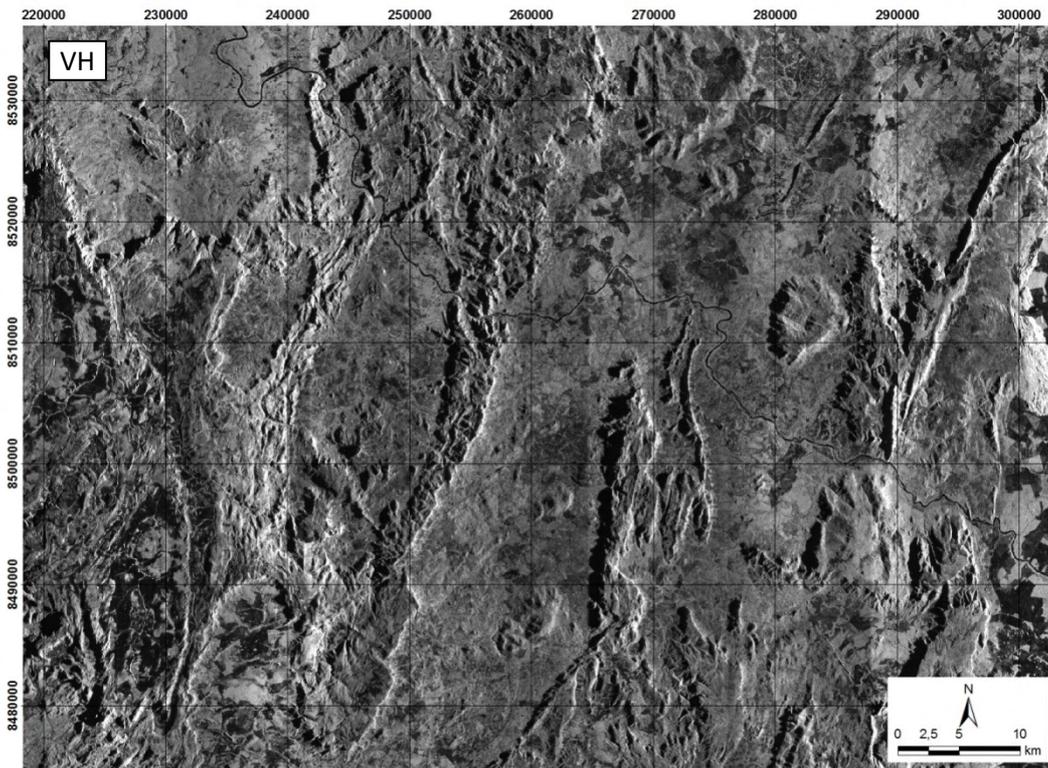


Figura 36: Mosaico em amplitude com polarização VH do aerolevante Nova Roma utilizando o sensor R99SAR

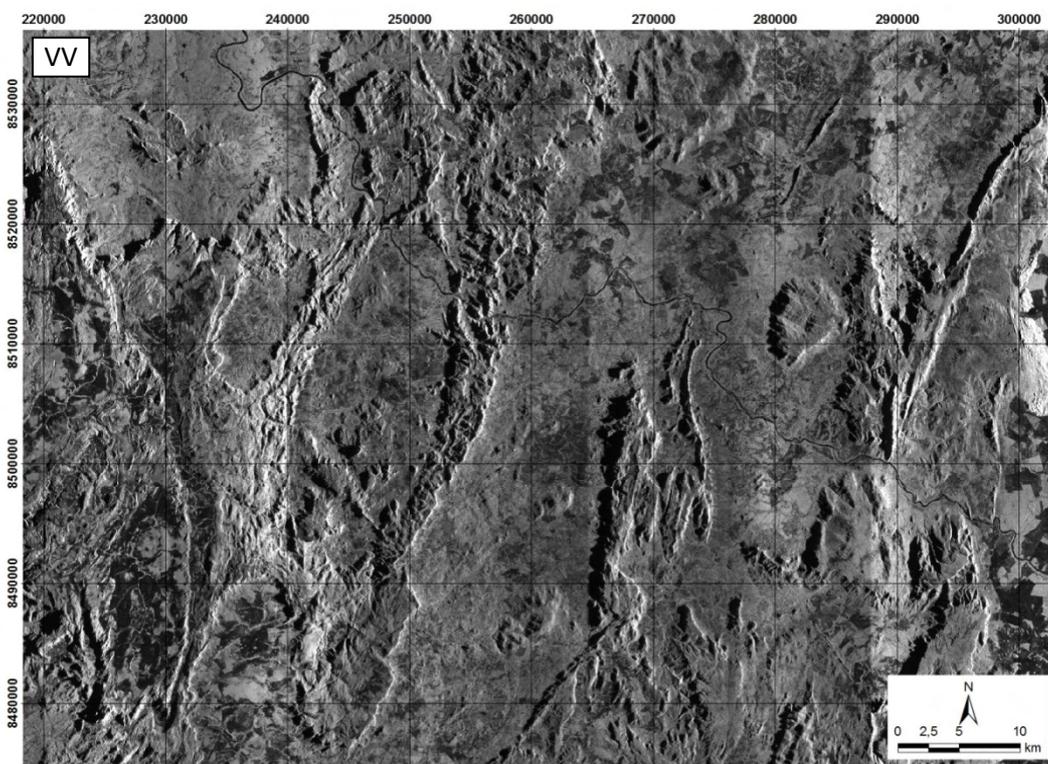


Figura 37: Mosaico em amplitude com polarização VV do aerolevante Nova Roma utilizando o sensor R99SAR

Tabela 7: Estatística da imagem R99SAR

Polariz	Min	Max	Med	Desv	Correlação	HH	HV	VV	
HH	0	53741	1444	922		1			
HV	0	11298	715	436		0,8399	1		
VH	0	12080	720	444		0,8410	0,9998		
VV	0	45511	1341	803		0,8583	0,8426	1	

Levando em consideração a média e o desvio padrão, ocorre, tal qual observado na escolha entre os dados gerados pelos processadores PROSAR e GSP (capítulo 3, item 3.3.1.1), a compressão dos dados em 11 *bits*. No entanto, nestas imagens completas, os valores máximos de amplitude das polarizações paralelas chegam próximo ao esperado para imagens com resolução radiométrica de 16 *bits* (65.536).

A alta correlação e a compressão dos dados não foram restritas a esse aerolevanteamento, segundo as apresentações dos palestrantes presentes ao 2º Encontro de Usuários de Imagens R99SAR, em 2006, no CCSIVAM. Algumas hipóteses nesta fase inicial na análise da imagem: (i) a alta correlação entre as polarizações é devida ao alto ângulo de incidência do sensor R99SAR?; (ii) a alta correlação está interligada à ocorrência de áreas sombreadas que “igualam” o retroespalhamento das três polarizações?; ou (iii) é devido a falta de calibração do sistema?

As duas primeiras hipóteses foram testadas e analisadas nesta tese; no entanto, a terceira hipótese não pôde ser analisada devido à impossibilidade de calibração do sistema, como exposto no item 3.3.1.3.

Para a primeira hipótese, foram realizados testes em relação aos padrões de retroespalhamento em uma mesma área no *near* e no *far* range de diferentes faixas imageadas. Sabe-se que a maioria dos sensores radar a bordo de aeronaves e/ou satélites possuem ângulos de incidência menor do que o apresentado no sensor a bordo do R99SAR (tabela 3, capítulo 3), que varia entre 45° no *near* range e 75° no *far* range.

As quatro regiões escolhidas para esta análise foram de aproximadamente 5000 pixels e com pequena influência do arranjo espacial textural, sendo duas entre as faixas 2 (representando dados no *far* range,) e 3 (representando dados no *near* range) (figura 38, tabela 8) e duas entre as faixas 6 (*far* range) e 7 (*near* range) (figura 39, tabela 9).

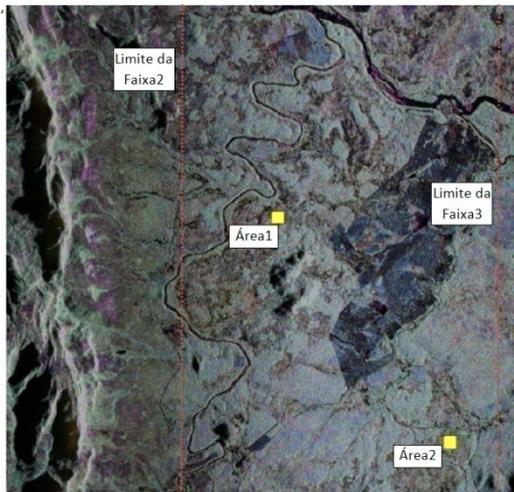


Figura 38: Extrato da junção entre os segmentos 2 e 3 do aerolevante Nova Roma com indicação das áreas de coleta dos dados estatísticos para avaliação dos padrões de retroespalhamento no *near* e *far* range.

Tabela 9: Estatística das áreas 3 e 4 demonstradas na figura 19 para avaliação dos padrões de retroespalhamento no *near* e *far* range.

		HH	HV	VV	
Correlação (%)	Área 1	1	80/78	75/77	HH
			<i>Near/far</i>	<i>Near/far</i>	HV
			1	74/76	VV
Correlação (%)	Área 2	1	59/61	63/63	HH
			<i>Near/far</i>	<i>Near/far</i>	HV
			1	55/55	VV
			1	VV	

Tabela 8: Correlação em porcentagem das áreas 1 e 2 demonstradas na figura 18 para avaliação dos padrões de retroespalhamento no *near* e *far* range.

		HH	HV	VV	
Correlação (%)	Área 1	1	72/74	72/75	HH
			<i>Near/far</i>	<i>Near/far</i>	HV
			1	76/73	VV
Correlação (%)	Área 2	1	51/54	53/53	HH
			<i>Near/far</i>	<i>Near/far</i>	HV
			1	58/56	VV
			1	VV	

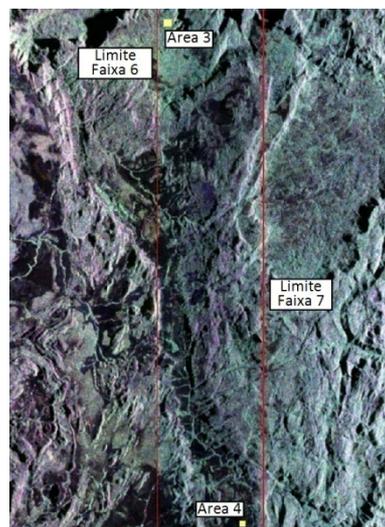


Figura 39: Extrato da junção entre os segmentos 6 e 7 do aerolevante Nova Roma com indicação das áreas de coleta dos dados estatísticos para avaliação dos padrões de retroespalhamento no *near* e *far* range.

Segundo as estatísticas obtidas, o campo de visada no *near* e *far* range influencia pouco na correlação dos dados, cerca de 2 a 3 pontos em porcentagem. Nota-se que, na maioria, os dados no *near* range possuem menor taxa de correlação e que o menor ângulo de incidência do feixe acarreta maior quantidade de informação relacionada ao alvo. Assim, a hipótese levantada contribui para a correlação das polarizações, mas pode não ser a única razão da mesma.

A segunda hipótese levantada para a alta correlação dos dados está intrinsecamente ligada à primeira. A premissa era de que o alto ângulo de incidência em áreas com alinhamento de relevos expressivos pudesse acarretar áreas sombreadas que aumentassem a taxa de correlação entre as polarizações, já que o retorno dessas áreas é constante e inexpressivo, independente da polarização da onda incidente e recebida. Para a confirmação dessa hipótese foram coletadas as taxas de correlação em quatro diferentes áreas, sendo duas com variações topográficas e duas com relevos mais constantes (figura 40, tabela 10).

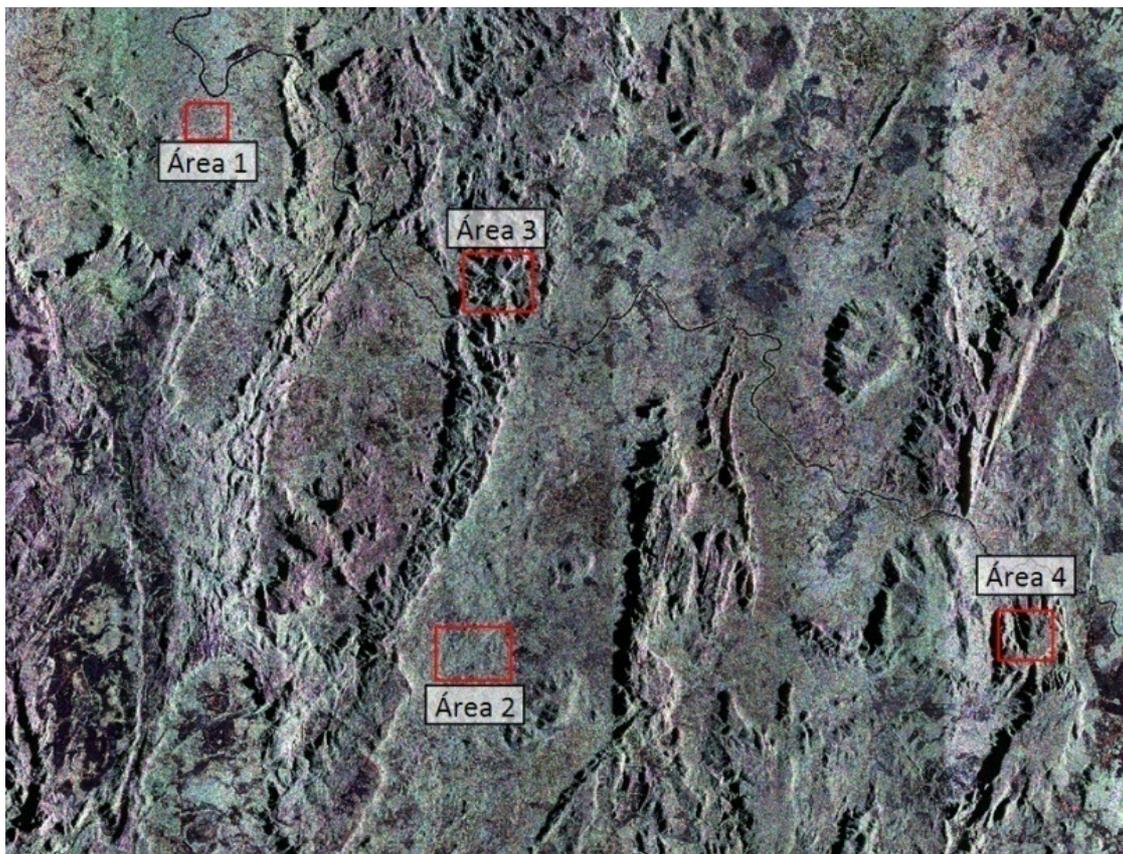


Figura 40: Imagem do aerolevanteamento Nova Roma com indicação das áreas de coleta para análise estatística de correlação demonstrada na tabela 10.

Tabela 10: Taxa de correlação entre as polarizações nas áreas indicadas na figura 38.

Correlação	ÁREA 1	HH	HV	VV	ÁREA 2	HH	HV	VV
		1	68	67		1	73	73
			1	67			1	72
			1			1		
ÁREA 3	HH	HV	VV	ÁREA 4	HH	HV	VV	
	1	89	92		1	90	91	
		1	89			1	90	
		1				1		

As áreas 1 e 2, que não apresentam macrotopografia com variações acentuadas, apresentam graus de correlação entre as polarizações menores em aproximadamente 20 pontos em relação às áreas 3 e 4, que possuem variações macrotopográficas. Neste sentido, podemos afirmar que para o aerolevante Nova Roma a alta correlação entre as bandas está interligada com a geometria de imageamento do R99B em conjunto com as características do terreno imageado.

4.2. *Processamento dos dados R99SAR*

Conceitualmente, o objetivo do processamento digital de imagens consiste em melhorar o realce visual de certas feições do terreno para o analista e em fornecer subsídios à interpretação, gerando produtos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos, por exemplo, classificação (Crósta, 1993).

Assim, o processamento das imagens SAR foi subdividido em duas etapas. A primeira etapa constou dos processamentos mais usuais de realce e que tradicionalmente são realizados em imagens de radar. A segunda etapa tentou obter padrões das imagens utilizando técnica de classificação voltada ao objeto.

4.2.1. *Técnicas de Realce das imagens*

Devido à alta taxa de correlação entre as polarizações HH, HV e VV obtidas para a imagem do aerolevante Nova Roma, optou-se por não fazer uma interpretação geológica separada das polarizações. Construiu-se, para agregar as informações de três polarizações, uma composição colorida RGB, demonstrada na figura 41.

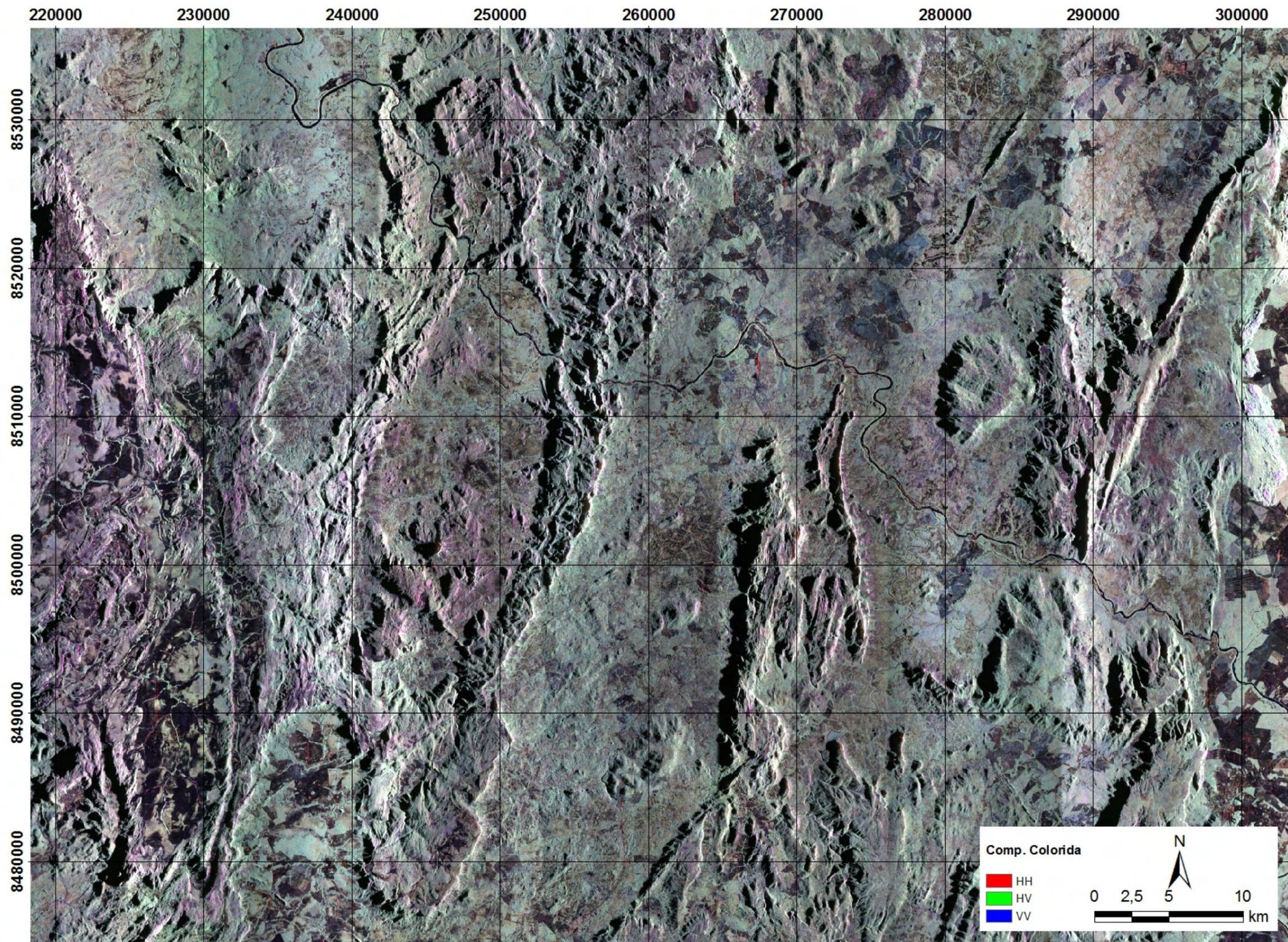


Figura 41: Composição colorida RGB entre as polarizações HH/HV/VV ao aerolevante Nova Roma.

Nessa composição colorida (figura 41), é notável a relação entre as variações de amplitude da imagem e as variações topográficas da área. Para suprimir esse efeito, a fim de analisar as informações nas polarizações, foram testadas divisões entre a HH/HV e HH/VV (figura 42). Segundo Daily *et al.* (1978), as razões entre imagens polarizadas paralelamente (HH/VV ou VV/HH) são pouco sensíveis à rugosidade superficial e, entre as polarizações paralelas e cruzadas, a informação da declividade é subtraída.

As imagens resultantes das divisões não apresentaram nenhum resultado satisfatório e não foi confirmada a expectativa mencionada por Daily *et al.* (1978).

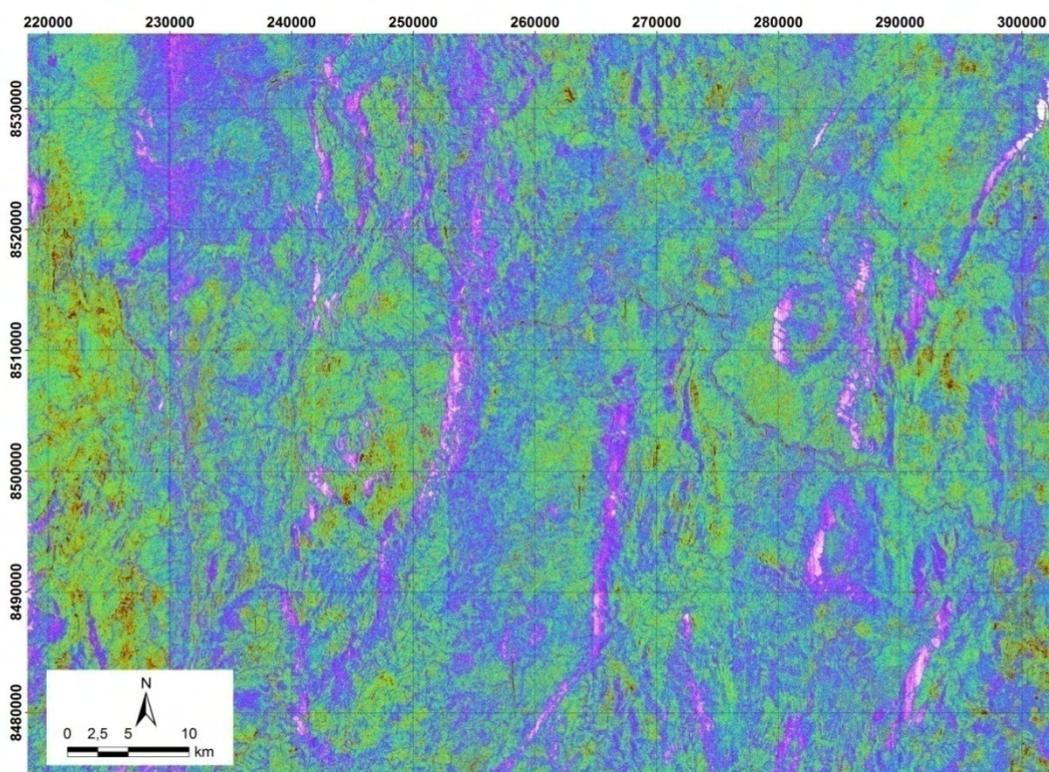


Figura 42: Imagens resultantes das divisões entre polarizações HH/ HV em pseudocor.

Outra possibilidade testada foi a transformação por principais componentes que têm por princípio uma transformação linear ortogonal e que pretende a compressão da informação e a eliminação da redundância entre canais (Oliver & Quegan, 1998). No imageamento radar por sensor multipolarizado, essa redundância é ocasionada, principalmente devido à questão de iluminação e sombreamento que, em sua grande maioria, são ocasionados pela topografia da área. Assim, espera-se que nesse processamento toda a informação relativa à macrotopografia seja concentrada na primeira principal componente.

No entanto, há limitações relacionadas à utilização desse tipo de processamento em dados radar multipolarizados, pois os vetores de valores (*eigenvalues*) são resultado da frequência e os dados SAR medem a intensidade média do alvo (Oliver & Quegan 1998). Outro fator limitante para a utilização desse tipo de processamento em imagens SAR é que não existe ganho em relação à supressão do ruído na utilização dessa técnica em imagens SAR, pois nesse tipo de sensor o ruído possui caráter multiplicativo em contraposição ao efeito aditivo que ocorre nas imagens óticas, onde esse método é empregado com sucesso.

Isso foi confirmado na figura 43, através de uma composição colorida, utilizando as principais componentes 1 e 2. Esta imagem demonstra que a técnica foi bastante sensível à variação do ângulo de incidência e/ou correção do padrão de antena. A PC1 (primeira componente principal) reuniu as informações relativas ao *near range* das faixas, enquanto a PC2 reuniu as informações relativas ao *far range*.

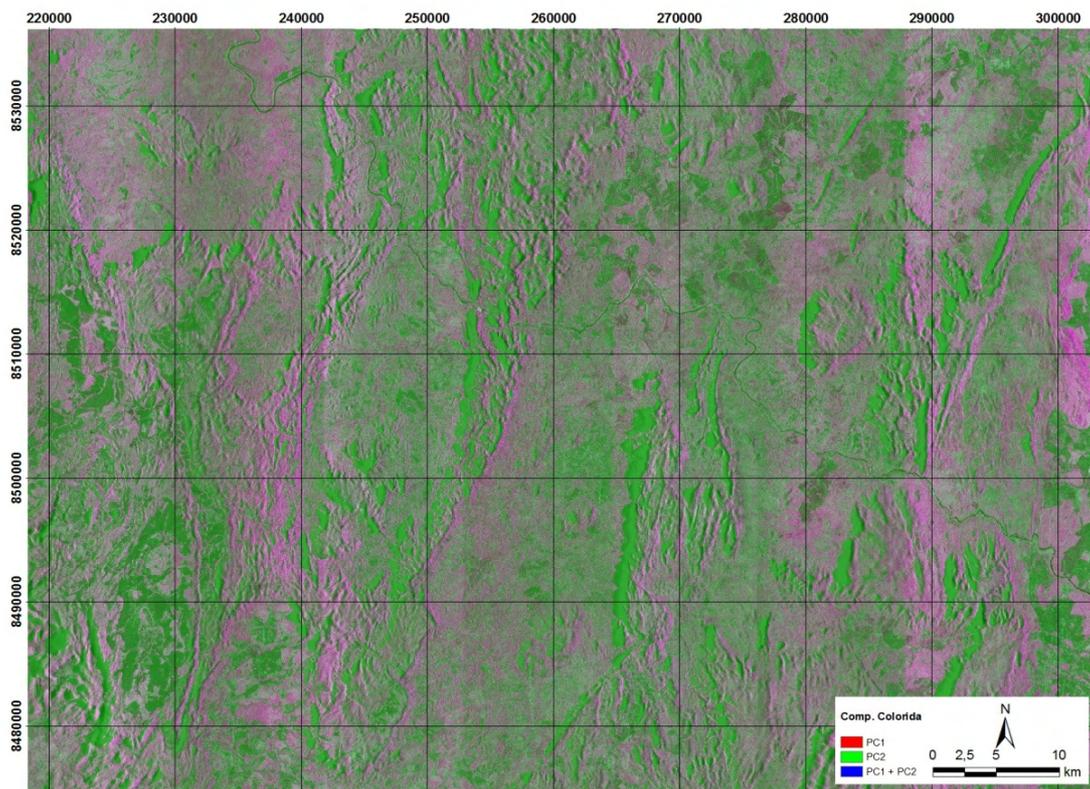


Figura 43: Imagem falsa-cor combinando informações entre a primeira e segunda principal componente.

4.2.2. Classificação das imagens

As técnicas de processamento de imagens digitais do tipo *segmentação e classificação* ou de *classificação voltada ao objeto* são utilizadas com frequência em dados multiespectrais de alta a média resolução (Macri *et al.*, 2002). Segundo Gonçalves *et al.* (2001), existem duas justificativas para adoção da classificação orientada ao objeto: (i) o processamento de imagens está mais próximo dos processos cognitivos humanos do que as classificações baseadas somente em *pixels* e (ii) as informações contextuais com significado podem ser incorporadas mais facilmente numa abordagem voltada ao objeto, do que numa abordagem “*pixel a pixel*”.

Como a interpretação de imagem SAR está intrinsecamente relacionada às formas do alvo e é necessária a análise das informações contextuais para a classificação correta dos alvos, a técnica de segmentação foi testada para a imagem do R99. A metodologia neste processamento seguiu duas etapas: (i) criação de objetos por segmentação; e (ii) classificação dos objetos. A primeira etapa consiste na subdivisão da imagem em zonas ou regiões homogêneas e uniformes em função de um determinado atributo da imagem. A segunda etapa consiste na classificação das áreas segmentadas (Santos, 2006).

O *software* comercial ENVI Zoom na versão (4.5) adotou a classificação voltada ao objeto com o nome comercial de ENVI *Feature Extraction* (FX), que permite a segmentação seguida de classificação baseada em “regras” ou em regiões de interesse.

Nesse *software*, o primeiro passo para o processo de segmentação nas imagens do R99SAR foi a adequação dos parâmetros para a escala de trabalho (1:100.000) e a geração de segmentos com o objetivo de mapeamento litológico. Essa primeira etapa de segmentação, no entanto, forneceu uma série de incoerências (figura 44), dividindo alvos contínuos em pequenos objetos, ou mesmo diferenciando objetos que são frutos de problemas de correção de padrão de antena, sombreamento ou de posicionamento do objeto na faixa imageada (*near* ou *far range*).



↓ Segmentação

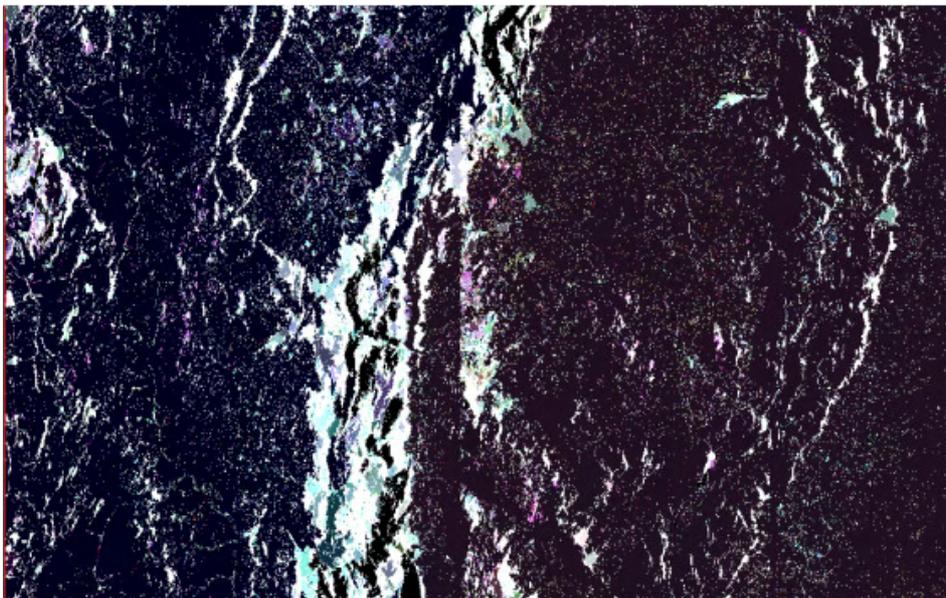


Figura 44: Resultado da primeira etapa de segmentação e geração dos objetos de um frame da imagem.

O processo de segmentação foi incoerente e a continuidade do processo de segmentação foi incoerente.

Com os resultados não satisfatórios dessas técnicas, a interpretação das imagens na escala 1:100.000 foi realizada com o produto de composição colorida das três polarizações RGB HH/HV/VV.

4.3. *Discussão dos métodos aplicados à interpretação geológica utilizando SAR*

A interpretação dos dados de sensoriamento remoto sob a forma digital ou analógica busca a identificação de feições impressas nessas imagens e a determinação do seu significado. A interpretação de imagens consiste em um processo de obtenção de mapas temáticos que retratem com confiabilidade a imagem do objeto. Nesses termos, a interpretação de imagens tem que ser vista não como um processo completo em si mesmo, mas apenas como um passo para a construção de um mapa de uma dada região, posto que as informações extraídas das imagens necessitam ainda ser conferidas através de dados de campo.

Tal qual ocorre com as fotografias aéreas, para a interpretação de imagens SAR a análise é realizada a partir de informações baseadas nas propriedades das formas dos objetos. Destacam-se as propostas de fotointerpretação geológica pelos métodos comparativos e de análise lógica. O primeiro baseia-se na definição de padrões comparativos (chaves) que podem ser visuais ou descritivos. As limitações na utilização do mesmo residem na subjetividade devido à falta de regras sistemáticas (Santos *et al.*, 2000).

No método de análise lógica, a interpretação fotogeológica é baseada nas variações texturais e estruturais do relevo e da drenagem que, portanto, constituem as propriedades fundamentais na análise da imagem, pois permitem separar feições com significados diferentes ou associar feições com o mesmo significado (Soares & Pio Fiori, 1976).

Santos *et al.* (2000) desenvolveram um método de interpretação visual de dados SAR que pode ser considerado uma adaptação do método lógico e sistemática de interpretação de fotografias aéreas em geologia. Essa metodologia define três etapas principais: (i) definição do tipo de análise (mono, estéreo ou produtos integrados); (ii) definição das características dos dados SAR (ângulos de incidência, do azimute de iluminação, estereoscopia, resolução espacial, áreas de cobertura e de superposição, banda de radar e polarização); e (iii) interpretação geológica, sendo essa a etapa de extração dos elementos e interpretação dos elementos de análise, já que as anteriores são dependentes das características dos dados disponíveis. A etapa de interpretação geológica é subdividida em três fases: identificação, análise e interpretação das feições na imagem, descritas a seguir.

4.3.1. *Identificação dos elementos de imagem*

Na interpretação geológica, utilizando dados SAR, é fundamental a identificação dos elementos naturais de paisagem, em especial aqueles que definem a morfologia do terreno, isto é, o relevo e a drenagem. Além disso, a tonalidade de radar está relacionada, em muitos casos, a importantes feições da paisagem (naturais ou não).

4.3.2. *Análise dos elementos de imagem*

Esta etapa consiste no estudo da disposição e ordenamento dos elementos identificados na imagem. O menor elemento de imagem, identificável e passível de repetição, é denominado de elemento textural. A textura de uma imagem de radar é dada, portanto, pelo arranjo dos elementos texturais. A estrutura de uma imagem fotográfica estabelece a lei de organização que exprime a disposição espacial ordenada ou não dos elementos texturais. Por fim, a forma define o espaço onde estão agrupados os elementos texturais. Assim, as formas de relevo e drenagem são definidas por conjuntos específicos de propriedades.

Em relação às propriedades dos elementos texturais das drenagens, devem ser definidos: (i) frequência; (ii) lineações; (iii) alinhamentos; (iv) tropia; (v) assimetria; e (vi) homogeneidade. Através dessas definições, são estabelecidas as propriedades das formas: (i) frequência textural; (ii) estrutura; (iii) grau de estruturação; e (iv) ordem de estruturação (figura 45).

O elemento textural de relevo é definido como qualquer feição positiva ou negativa, contínua e homogênea, delimitada por rupturas de declive e identificável na imagem. Diferentemente da drenagem, este elemento é definido tridimensionalmente, o que torna mais difícil a interpretação em imagens de radar. Assim, os elementos texturais de relevo definidos para essa análise são: (i) frequência; (ii) lineações; (iii) alinhamentos; (iv) tropia; (v) quebras positivas e negativas; (vi) assimetria; (vii) forma das vertentes; e (viii) homogeneidade. A partir da análise dos elementos texturais de relevo se estabelece o quadro das propriedades das formas: (i) frequência textural; (ii) estrutura; (iii) grau de estruturação; e (iv) ordem de estruturação (figura 46).

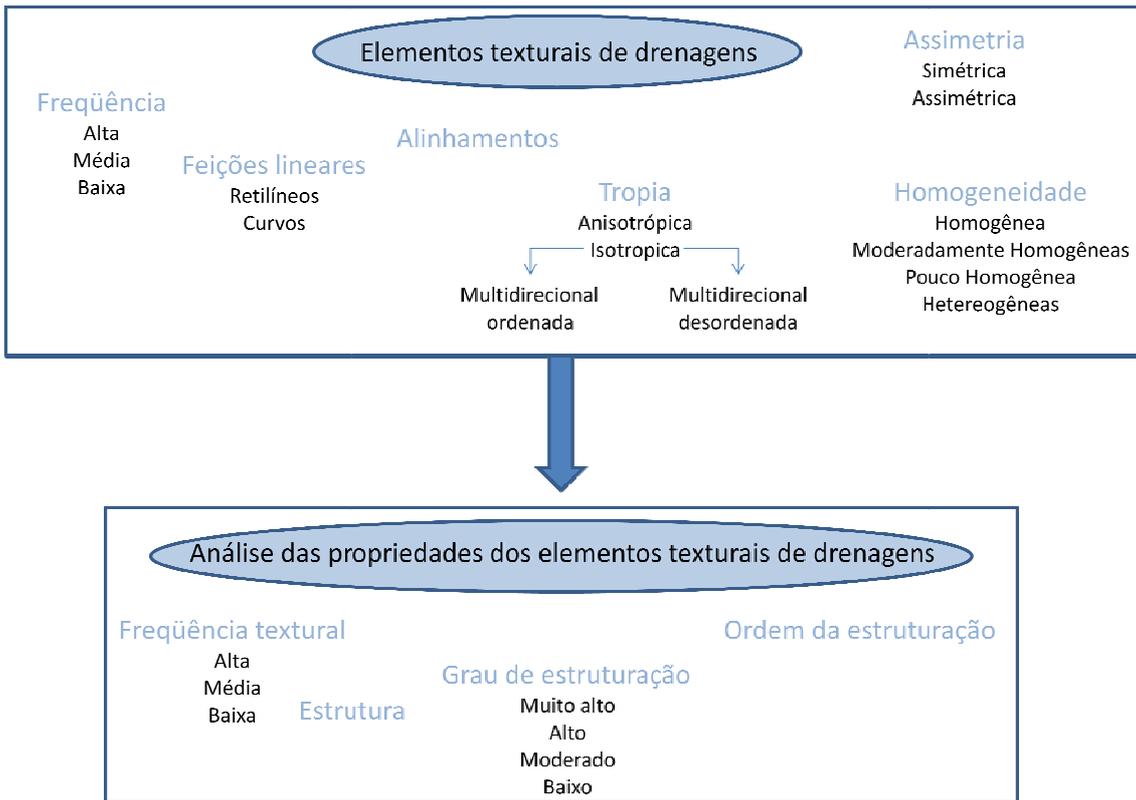


Figura 45: Processo de análise das propriedades dos elementos de drenagens proposta por Santos *et al.* (2000).

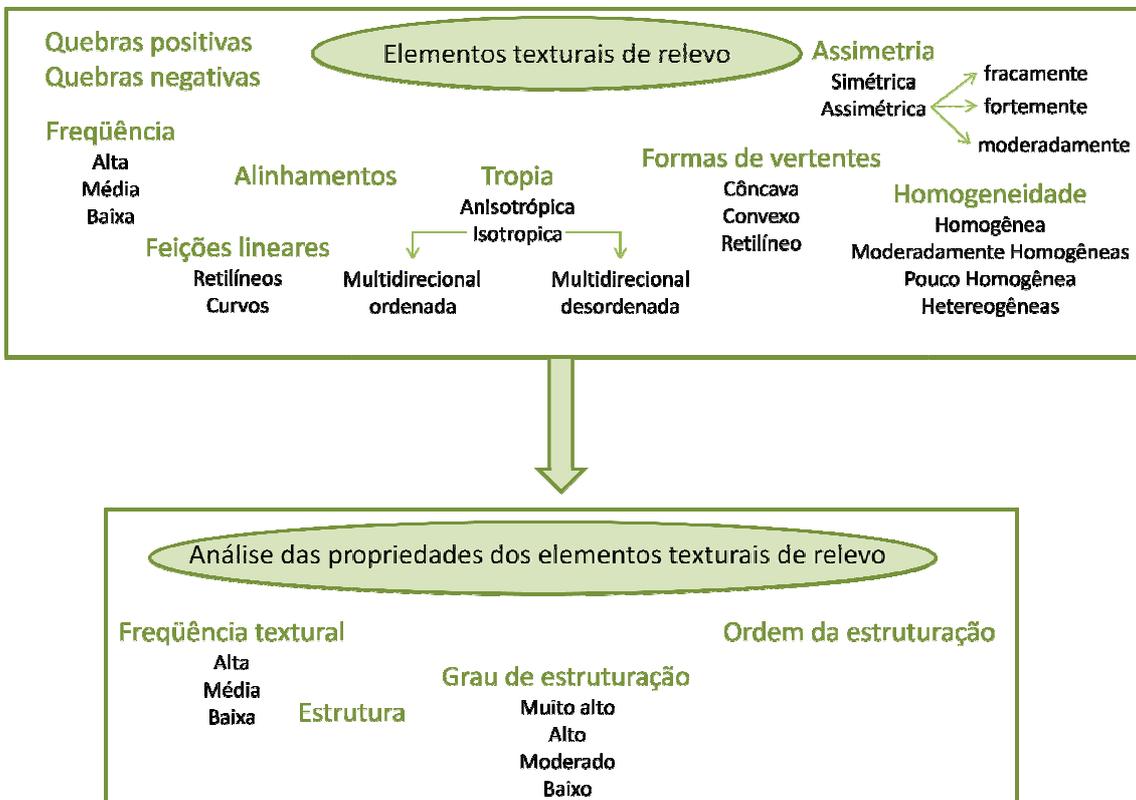


Figura 46: Processo de análise das propriedades dos elementos texturais de relevo proposta por Santos *et al.* (2000).

Além dos elementos de relevo e de drenagem, o elemento tonalidade, resultado direto da interação entre a REM, do comprimento das micro-ondas e das características superficiais dos alvos, também deve ser analisado no processo interpretativo.

Em uma última etapa, utilizando as descrições e análise das propriedades de forma (drenagem e relevo) e tonalidade existentes nas imagens, procede-se à organização e repartição da imagem em zonas homólogas, formadas pela repetição dos elementos texturais e com as mesmas propriedades de textura e estrutura. Assim, são definidos os mapas preliminares de zonas homólogas de drenagem e relevo e que devem ser comparados e integrados em um único mapa de zonas homólogas.

4.3.3. Interpretação dos elementos texturais

A interpretação geológica dos dados SAR é desenvolvida a partir dos resultados da etapa anterior (análise dos elementos texturais de relevo e drenagem e tonalidade da cena). O objetivo dessa fase é associar um significado geológico às propriedades dos elementos de imagem analisados e suas relações de associação que definem uma forma ou padrão fotogeológico das unidades de mapeamentos. Essa associação é possível, pois as propriedades de textura e estrutura, que definem as formas de relevo e de drenagem, são controladas principalmente por fatores litológicos, deformacionais e morfogenéticos (Rabello, 2008).

Cada uma das propriedades que caracterizam uma forma permite interpretações sobre o material superficial imageado, definindo com a sua somatória a caracterização de zona fotolitológicas que represente área cujas rochas apresentam propriedades comuns (Rabello, 2008).

Estão apresentadas nas tabelas 11 e 12 as relações entre os elementos de drenagem e relevo e suas interpretações geológicas, respectivamente. A tabela 13 sintetiza as interpretações geológicas para as relações das propriedades das formas de relevo e de drenagem.

Tabela 11: Interpretações geológicas das propriedades dos elementos texturais de drenagens, adaptado de Rabello (2007) e Santos *et al.* (2000)

Interpretação Geológica das propriedades dos elementos texturais de drenagem	
Frequência	É inversamente proporcional à permeabilidade dos tipos litológicos superficiais. Essa propriedade permite a avaliação sobre a permeabilidade relativa das rochas das diferentes zonas fotolitológicas de uma determinada área.
Feição linear	Representa a interseção de planos estruturais dos corpos rochosos, de origem tectônica (foliações e fraturas) ou não (acamamentos), com a superfície do terreno. As foliações (xistosidade, bandamento, foliação milonítico-cataclástica) são dadas pela disposição fortemente anisotrópica das feições lineares, constituindo tendências estruturais bem definidas, normalmente paralelas ou subparalelas ao plano de (as)simetria da drenagem. Os sistemas de juntas também constituem tendências estruturais, porém bi a multidirecionais e sem uma relação necessária de paralelismo com o plano de (as)simetria da drenagem. Os acamamentos são definidos principalmente pelas assimetrias e feições lineares de relevo.
Alinhamento	Representa traços associados aos planos estruturais de maior magnitude dos corpos rochosos, ou seja, zonas de cisalhamento rúptil ou rúptil-dúctil ou dúctil e descontinuidades. A disposição e a forma do alinhamento de drenagem e a sua relação com as zonas homólogas adjacentes são elementos indicativos do tipo de descontinuidade. Uma falha normal é representada na imagem por um alinhamento de drenagem, normalmente retilíneo em relevos planos, tornando-se ondulado quando a topografia é acidentada, devido ao alto ângulo de mergulho do plano estrutural. As estruturas com movimento direcional (falhas transcorrentes, zonas de cisalhamento) aparecem como alinhamentos de drenagem com traçado retilíneo ou sinuoso, em que os principais aspectos diagnósticos do sentido da movimentação direcional são as feições de arrasto (cisalhamento dúctil e rúptil-dúctil) e o deslocamento lateral de zonas homólogas equivalentes (cisalhamento rúptil), em ambos os lados do alinhamento. Em zonas de cisalhamento com movimento inverso ou oblíquo o alinhamento de drenagem é, normalmente, arqueado. Esse arqueamento é mais pronunciado nos empurrões do que nas estruturas inversas e oblíquas, por apresentarem menor ângulo de mergulho.
Tropia	Fornecer importantes informações sobre as propriedades físicas das rochas. Uma drenagem com tropia predominantemente unidirecional pode indicar o caráter fortemente anisotrópico do substrato rochoso. A drenagem com tropia predominantemente multidirecional pode indicar o caráter isotrópico da litologia onde se instalou, ou uma superposição de eventos deformacionais.
Assimetria	Fornecer informações sobre a atitude (direção e mergulho) dos planos estruturais (acamamento e foliação) das rochas. Ao se analisar uma assimetria de drenagem observa-se que o canal de ordem superior indica, aproximadamente, a direção do plano estrutural, enquanto que o sentido de seus afluentes mais longos (em relação aos da margem oposta) indica o mergulho.
Homogeneidade	Significa o nível de persistência das propriedades texturais comuns a uma zona homóloga.

Tabela 12: Interpretações geológicas das propriedades dos elementos texturais de relevo adaptado de Rabello (2007) e Santos *et al.* (2000)

Interpretação Geológica das propriedades dos elementos texturais de relevo	
Frequência	Fornecer indicações sobre o grau de dissecação do terreno analisado. O aumento da frequência indicará o predomínio progressivo dos processos erosivos, que estão diretamente ligados à resistência dos maciços rochosos.
Feição linear	Indicam a interseção de planos de foliações, fraturas e acamamentos com a superfície. O critério de identificação do tipo de estrutura é o mesmo descrito para as feições lineares de drenagem.
Alinhamento	Juntamente com os alinhamentos de drenagem, são os principais indicadores das estruturas planares de maior grandeza: zonas de cisalhamento dúcteis, rúptil-dúcteis e dúcteis e descontinuidades.
Quebras Positivas	Formas salientes do relevo (cristas), lineares e fortemente estruturados, e são importantes elementos na caracterização da assimetria do relevo.
Quebras negativas	São as mais importantes feições indicativas do limite entre diferentes maciços rochosos. As quebras negativas constituem limites definidos entre zonas fotolitológicas (zonas homólogas de relevo).
Assimetria	Tal qual a assimetria nas drenagens, fornece importantes informações sobre a atitude (direção e mergulho) de acamamentos e, subordinadamente, de foliações das rochas.
Forma das vertentes	Está diretamente relacionada à resistência à erosão (intemperismo físico e químico) dos maciços rochosos.
Homogeneidade	É diretamente relacionada ao grau de persistência das propriedades físico-químicas dos tipos litológicos, em uma determinada zona homóloga. Quanto às propriedades das formas de relevo, a estrutura, o grau de estruturação e a ordem de estruturação do relevo têm papéis semelhantes aos descritos para a drenagem.

Tabela 13: Interpretações geológicas das propriedades das formas de drenagens e relevo adaptado de Rabello (2007) e Santos *et al.* (2000)

Interpretação Geológica das propriedades das formas de drenagens e relevo	
Estrutura da drenagem	Reflexo direto de um determinado condicionamento geológico/geomorfológico. Por exemplo, uma drenagem com estrutura radial pode estar associada a um alto estrutural, que é refletido na morfologia atual pelo condicionamento dos canais de drenagem em uma disposição radial.
Grau de estruturação	Essa propriedade dá maior (fortemente estruturado) ou menor (fracamente estruturado) consistência à lei que define a estrutura da drenagem e subsidia, na mesma proporção, à interpretação do controle geológico. Uma drenagem, com disposição radial fortemente estruturada, dá indicações mais confiáveis do que uma drenagem radial fracamente estruturada, na caracterização da lei que define a estrutura da drenagem e na interpretação geológica do alto estrutural.
Ordem de estruturação	Descreve a complexidade de organização de seus canais, ou seja, a complexidade da lei ou das leis (no caso de superposição de diferentes controles) que definem a sua estrutura. De uma maneira geral, quanto maior a ordem de estruturação, mais evidente é o controle geológico na ordenação dos canais de drenagem.

O resultado final da análise e da interpretação dos elementos de uma imagem de radar é a definição de um modelo fotointerpretativo para a área estudada. Neste modelo fotointerpretativo é cartografado o conjunto de interpretações realizadas sobre os dados SAR, levando à definição das principais unidades fotolitológicas e seu empilhamento estratigráfico relativo, das estruturas geológicas, de aspectos evolutivos

etc. Essas interpretações são verificadas em campos e comparadas e adicionadas ao conhecimento existente sobre a área, chegando-se, finalmente, ao Mapa Fotogeológico.

4.4. Interpretação geológica de dados R99SAR

A interpretação geológica da imagem R99SAR no aerolevante Nova Roma foi baseada na metodologia proposta por Santos *et al.* (2000), como mostra o fluxograma da figura 47. Assim, foram extraídos a rede de drenagem, lineações e alinhamentos, e as zonas homólogas foram caracterizadas utilizando padrões de frequência textural, estrutura, grau de estruturação e ordem de estruturação. O mesmo procedimento foi realizado para os elementos texturais e estruturais de relevo com a extração de lineações, alinhamentos e quebras positivas e negativas, estabelecendo as associações e posterior repartição de zonas homólogas.

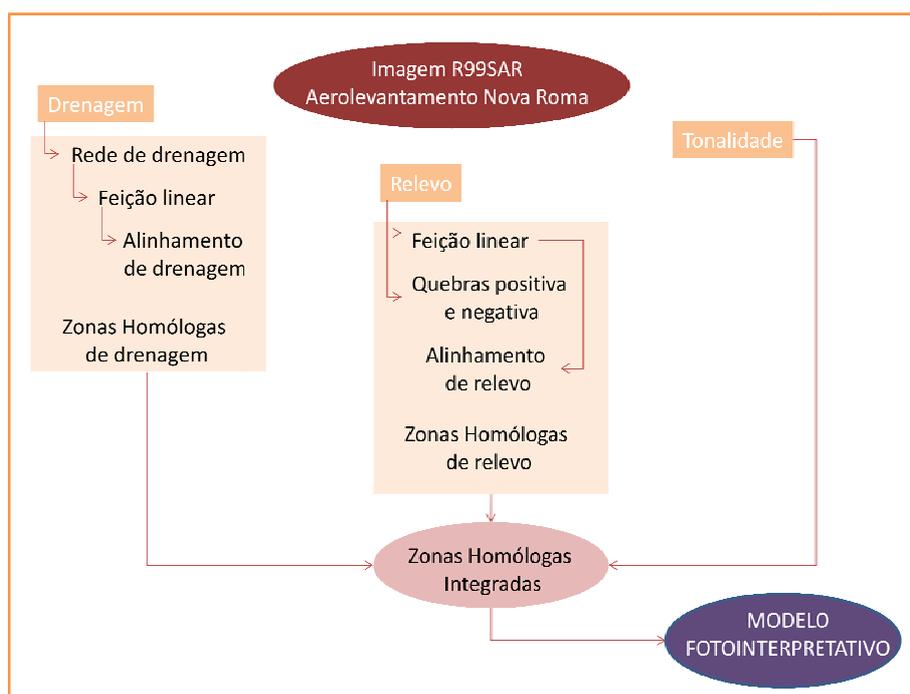


Figura 47: Fluxograma das etapas realizadas para a confecção do modelo fotointerpretativo do aerolevante R99SAR, Nova Roma (GO)

Para avaliar a real qualidade do sensor R99SAR no mapeamento geológico-estrutural em escala 1:100.000, um dos objetivos desta tese, os dados SAR não foram integrados com nenhum outro dado como, por exemplo, geofísicos ou multiespectrais. A discussão neste capítulo é realizada somente com os dados obtidos do

aerolevanteamento do R99SAR e, posteriormente, nos capítulos 5 e 6, são apresentados os produtos de integração desses dados, interpretações e considerações finais sobre a geologia da área.

Em um primeiro momento, a rede de drenagem disponibilizada pelo site <http://www.sieg.go.gov.br> foi complementada com as informações das imagens R99SAR, e foi gerado um mapa de rede de drenagem. Em uma segunda etapa, foram obtidos os mapas de lineações e de alinhamentos de drenagem da área de estudo. Em termos das feições dos elementos de relevo foram obtidos os mapas de quebras positivas e negativas, lineações e alinhamentos descritos em termos de frequência, tropia, assimetria e homogeneidade para conclusões relativas à frequência textural, estrutura, grau de estruturação e ordem de estruturação do relevo.

A análise textural da tonalidade foi analisada como um critério auxiliar na delimitação das zonas homólogas de relevo e drenagem.

Todas as informações obtidas nesta fase do trabalho foram cadastradas num banco de dados geológico georreferenciado utilizando o *software* ARCGIS.

4.4.1. Drenagens

O mapa da rede de drenagem está demonstrado na figura 48.

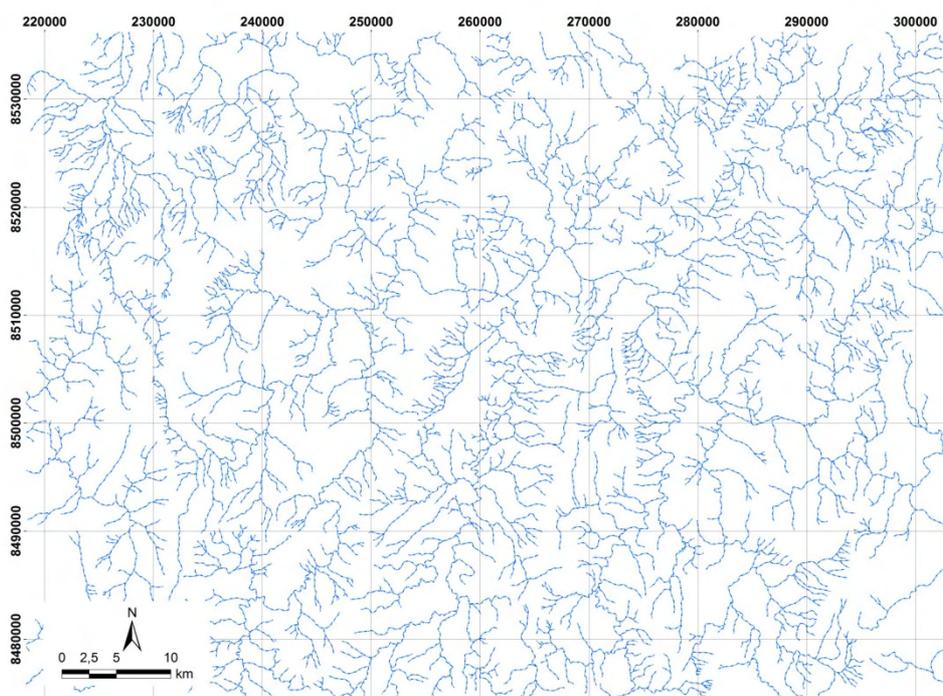


Figura 48: Rede de drenagens da área de estudo extraída utilizando produto radar RGB HH/HV/VV e SIEG/GO.

A identificação dos cursos de água perene é facilitada pelo efeito do retroespalhamento especular. Essa resposta é bastante similar nas três polarizações. Uma segunda forma de identificação da drenagem é provavelmente relativa ao contraste de umidade nas linhas de canais e com os terrenos secos.

A identificação mais comum dos canais de drenagem é relativa ao conceito de escoamento de águas pluviais através de sulcos no relevo, que normalmente são classificadas como de 1º, 2º e 3º ordem. São identificadas por inferência na análise do relevo, pois não possuem assinatura de retroespalhamento característico. Nos altos topográficos, no entanto, essas drenagens possuem destaque, principalmente, pela questão do contraste entre alto retroespalhamento das encostas e o sombreamento devido aos desníveis do terreno.

A partir dessas redes de drenagens foram obtidas as feições lineares com forma, retilíneas ou ligeiramente curvas, para a imagem SAR e, posteriormente, um mapa de alinhamentos de drenagens, ambos demonstrados na figura 49.

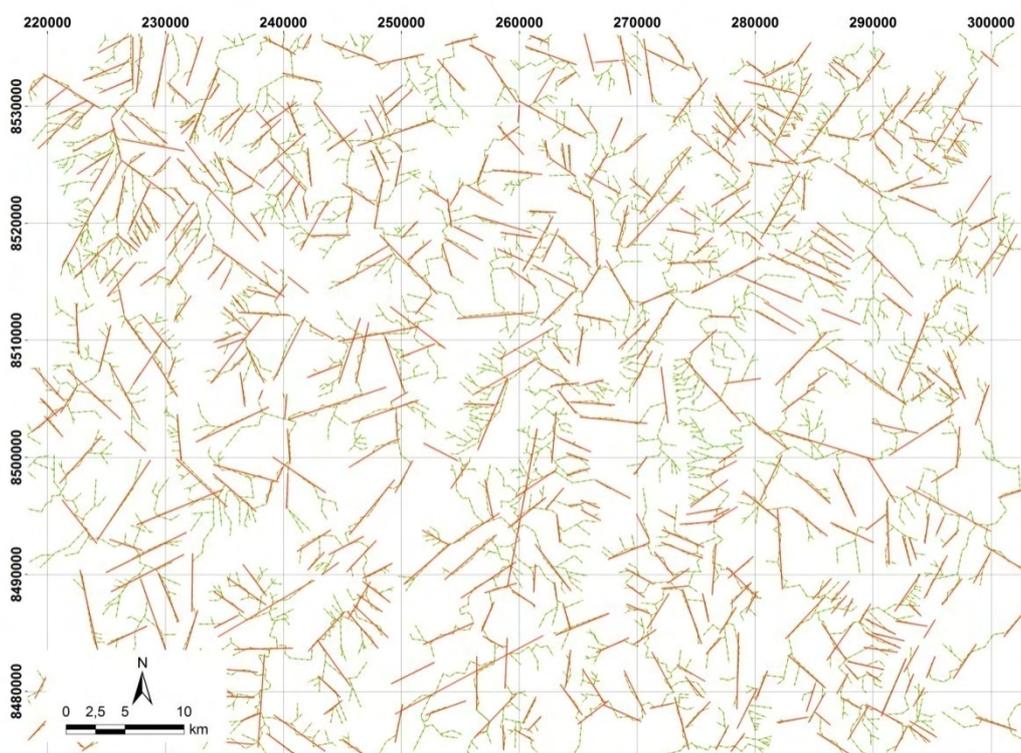


Figura 49: Feições lineares de drenagens (em verde) sobrepostas ao alinhamento de drenagens (em vermelho) da área estudada obtida do mapa de rede de drenagens.

Com base nesses três produtos (mapas de drenagens, feições lineares e alinhamentos) foi confeccionado o mapa de zonas homólogas para a rede de drenagens

(ZHD) (figura 50). O traçado da rede de drenagem utilizado permitiu a individualização de nove zonas homólogas, em grande maioria orientada na direção NE e descrita na tabela 14.

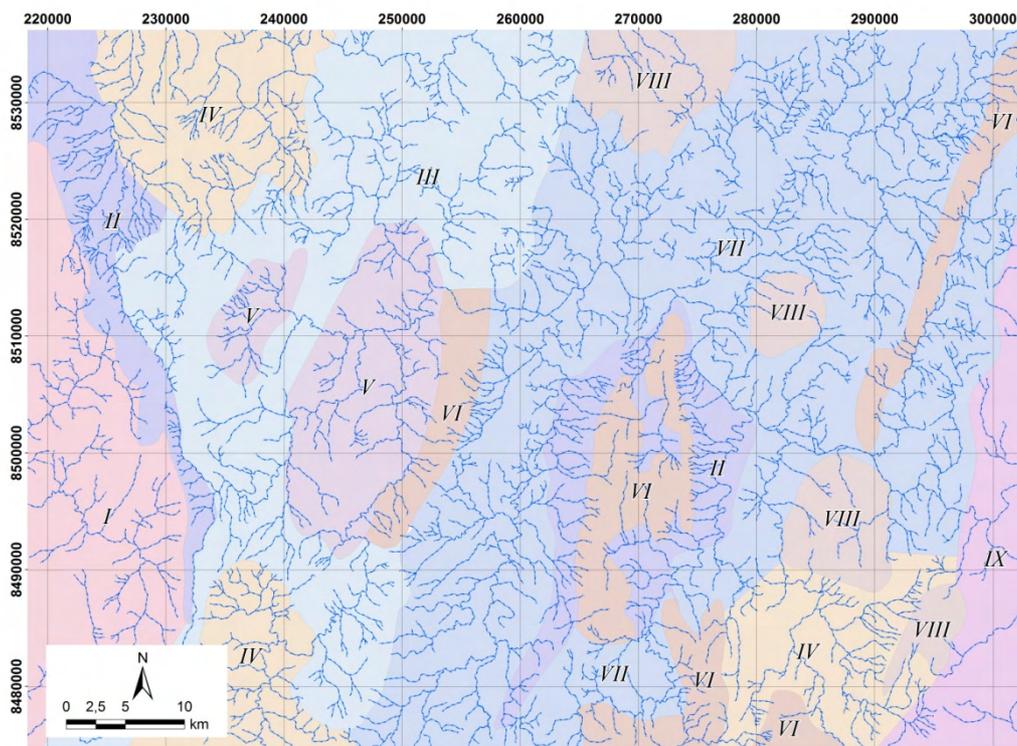


Figura 50: Zonas homólogas obtidas através do mapa de rede, feições lineares e alinhamentos de drenagens.

Tabela 14: Características que definem as zonas homólogas obtidas através do traçado da rede de drenagens, feições lineares e alinhamentos das drenagens demonstradas na figura 50.

Zonas Homólogas Drenagem (ZHD)	Cor associada	Descrição
	I	Média a baixa densidade com sinuosidade mista e baixa angularidade. Tropia Multidirecional.
	II	Rede de drenagem paralela com forte estruturação, densidade alta unidirecional; drenagens normalmente classificadas como de primeira e segunda ordem.
	III	Rede de drenagens paralelas, baixa densidade, sem orientação principal e assimétrica, com ocorrências quarta e quinta ordem.
	IV	Rede de drenagens dentríticas/ retangular com maior dissecação que as classificadas como III.
	V	Rede de drenagens dentrítica com baixa densidade com orientação preferencial para NW/SE.
	VI	Zona de drenagens nulas e zonas de interflúvio.
	VII	Rede de drenagens dentríticas com tropia NE com alta densidade, forte estruturação e assimetria baixa a média.
	VIII	Drenagens com padrão radial fracamente estabelecido e orientação principal NW.
IX	Zona com fraca concentração de drenagens, baixa orientação e drenagens de quarta e quinta ordem.	

4.4.2. Relevo

O relevo da área imageada pelo sensor R99B é bastante movimentado, com alinhamento norte-sul e variações para NNE e NNW. O mapa com quebras positivas e negativas foi traçado em escala 1:100.000 e o resultado está representado na figura 51.

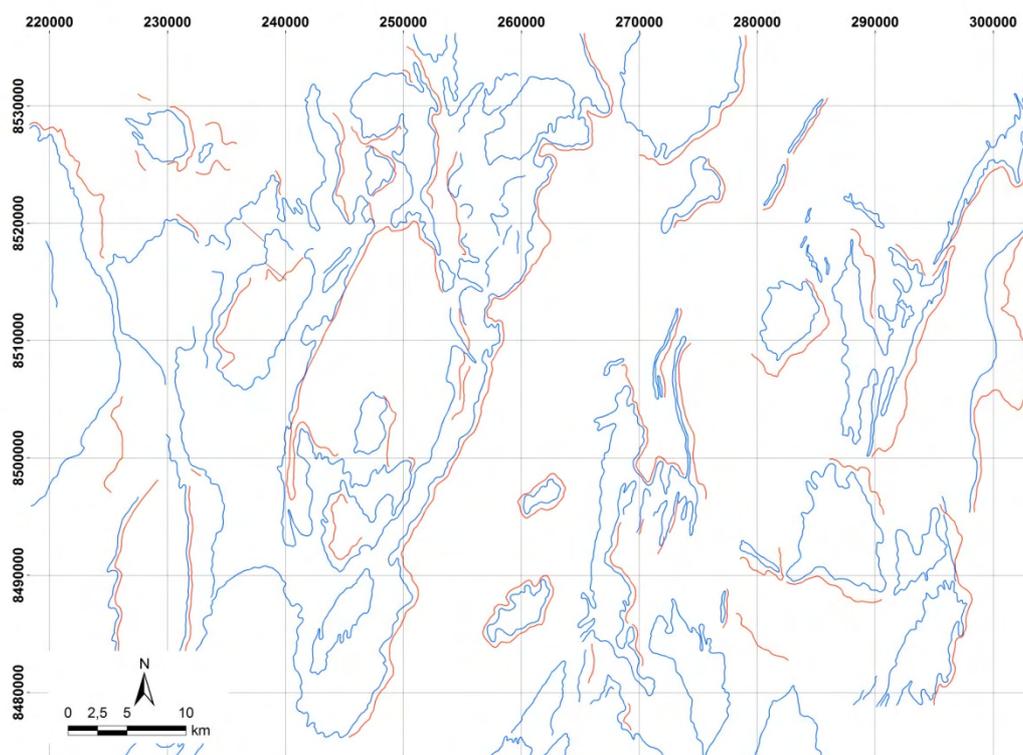


Figura 51: Quebras de relevo positivas (em azul) e negativas (em vermelho) da área estudada, obtida através da análise da imagem RGB HH/HV/VV.

Na porção leste da área as quebras positivas na imagem estão caracterizadas por um alto retorno relacionado a vertentes íngremes frontais à direção de iluminação do pulso de radar. Na maioria são quebras contínuas e com baixa frequência, alta tropia e direcionamento principal N/S, NNW ou NNE; algumas quebras contínuas demonstram formato curvos semicirculares. Por sua vez, as quebras negativas não são observadas com tanta clareza, e posicionam-se muito próximas e com traçado paralelo à quebra positiva. Todas as quebras negativas a oeste das encostas íngremes alinhadas NNE não puderam ser traçadas devido à presença de sombra, resultante da geometria de imageamento.

Na porção centro norte a interpretação das quebras positivas e negativas são de alta frequência, anisotrópica e com alinhamento preferencial NNE. Algumas cristas

possuem alto retroespalhamento pela frontalidade das escarpas, embora não seja regra geral. Devido ao problema de sombreamento e frequência, as quebras negativas são de difícil identificação. Assim, foi possível identificar apenas algumas porções dessas quebras, tornando o traçado das mesmas não contínuo.

Na porção sudoeste observa-se um “arqueamento” das quebras positivas e negativas que variam na direção NNW, NS e NNE. As quebras positivas são contínuas e de baixa frequência. Tal qual ocorre na porção leste, as quebras negativas apresentam paralelismo em relação a quebras positivas e são bem definidas pela frontalidade das escarpas.

As lineações de relevo, apesar de serem na teoria menos diagnósticas que as feições lineares de drenagens (Rabelo, 2007), apresentam um bom arcabouço das estruturas da região, conforme é observado na figura 52. Tal qual ocorre com as quebras de relevo e com as feições extraídas da rede de drenagens, a área subdivide-se em pequenas porções. Os alinhamentos de relevo traçado na figura 53 demonstram os padrões já observados nas lineações e quebras.

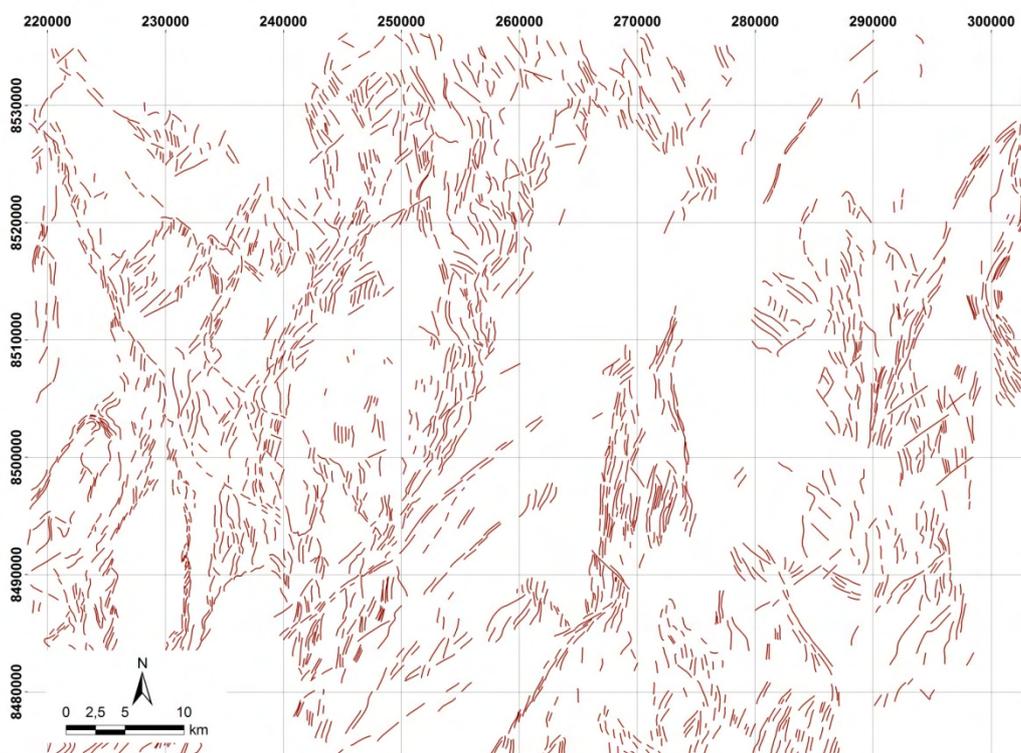


Figura 52: Lineações de relevo da área estudada obtida através da análise da imagem RGB HH/HV/VV.

A análise integrada de todas as informações relativas às quebras positivas e negativas, alinhamentos de relevo, feições lineares e da própria imagem resultou na delimitação de vinte e nove zonas homólogas (ZHR). Esse produto é apresentado na figura 54; na tabela 12 estão sumariadas as descrições de cada uma das zonas homólogas.

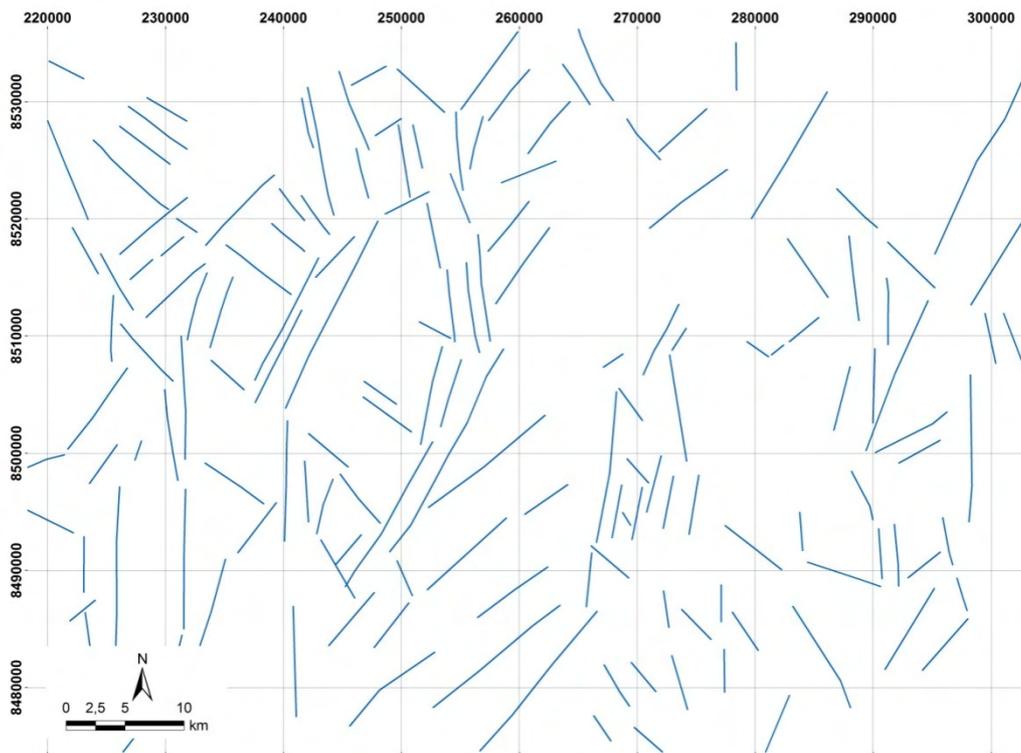


Figura 53: Alinhamento das feições de relevo da área estudada obtida através da análise da imagem RGB HH/HV/VV e da análise do traçado de feições de relevo.

4.4.3. Tonalidade

As tonalidades das imagens de polarizações HH, HV e VV estão intrinsecamente relacionadas ao retroespalhamento da onda incidente. As cenas são, em sua grande maioria, homogêneas, com níveis de cinza próximos entre as polarizações quando observado com realce histográfico de 2%. O padrão tonal das imagens varia com o tipo de retroespalhamento predominante: difuso, de canto e especular. A região é bastante preservada e, com a presença de cobertura vegetal tipo cerrado, há o predomínio de retroespalhamento difuso.

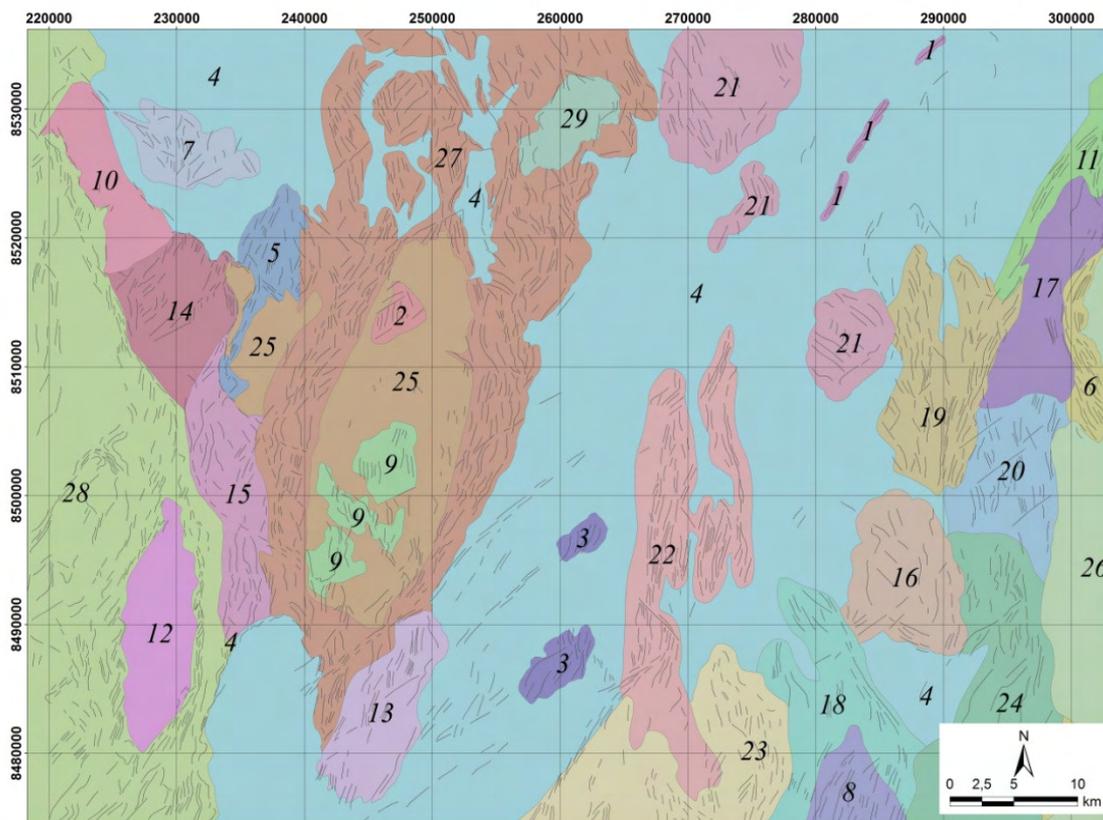


Figura 54: Zonas homogêneas obtidas através do mapa de quebras positivas e negativas, feições lineares e de alinhamentos de relevo.

Tabela 15: Características que definem as zonas homogêneas da figura 54, obtidas através do mapa de quebras positivas e negativas, feições lineares e de alinhamentos de relevo.

	Cor associada	Descrição
Zonas Homôlogas Relevo (ZHR)	1	ZH com quebras positivas e negativas muito próximas e paralelas aos alinhamentos; forte alinhamento assimétrico NNE. Localização restrita.
	2	ZH delimitada pela alta frequência de feições lineares nas direções NS e NE. Área restrita;
	3	ZH com formatos elipsoidais, quebras +/- muito próximas, alta frequência de lineações de direções que variam de NNE a NNW e forte alinhamento NE.
	4	ZH predominante, baixa frequência de lineações e alinhamentos de relevo, homogênea. Restritos alinhamentos de relevo na direção NE.
	5	ZH delimitada por quebra + associada a intercepções de alinhamentos de relevo NE e NW. Lineações predominantemente NE.
	6	ZH situada na porção leste da área de estudo caracterizada pelo curvamento das lineações e quebras negativas bem caracterizadas.
	7	ZH alinhada na direção NW com formato semicircular, com quebra - facilmente definida devido ao contraste com o ZH4, que a circunda.
	8	ZH delimitada pela quebra + e forte lineações de direção NNE. Formato de cunha sendo delimitada por fortes alinhamentos de relevo NE e NW.
	9	ZH com área restrita, representada por três corpos em alinhamentos NW e com lineações NS a NNE.
	10	ZH com área restrita, provável rampa de colúvio, com alinhamentos interligados à direção de drenagens NE; sendo traçado um incipiente alinhamento NW.
	11	ZH com alta simetria e forte alinhamento NNE, quebras positivas e negativas muito próximas e paralelas entre si na porção. Alto grau de estruturação.
	12	ZH com formato circular, altíssima homogeneidade e baixo grau de estruturação.

Zo	Cor associada	Descrição
	13	ZH delimitada por alinhamentos NE e NW, com lineações predominantes NNE, médio grau de estruturação e baixa frequência textural.
	14	ZH em formato de cunha delimitada por alinhamentos NE/NW, com alinhamentos predominantes NE, médio grau de estruturação e baixa frequência textural.
	15	ZH orientada junto ao alinhamento de relevo NS, com lineações de mesma direção, e separada em sua porção central por forte alinhamento NW.
	16	ZH em formato semicircular (quebra+), baixo grau de estruturação e lineações de direção NE e NW.
	17	ZH de balizada por quebras negativas de direção NNE e baixo grau de estruturação, alta homogeneidade.
	18	ZH com limite leste delimitado por forte alinhamento NW e curvamento das lineações para essa direção. Média estruturação e frequência textural.
	19	ZH com forte alinhamento de relevo e lineações NNE, alto grau de estruturação e quebras +/- muito próximas. Baixa homogeneidade.
	20	ZH muito próxima a ZH17 (contato norte) com diferenças em relação ao mais alto grau de estruturação e lineações NE e NW.
	21	Corpos semicirculares alinhados na direção NW, com direção predominante NW de lineações. Quebras positivas bem delimitadas.
	22	ZH com forte alinhamento de relevo NS, quebras +/- muito próximas, alta frequência de feições lineares.
	23	ZH interceptada na sua porção oeste por forte alinhamento de relevo na direção NNE, com lineações ora NNE ora NNW, com alta frequência de quebras +.
	24	ZH de direção NS, com feições lineares que variam entre NNE e NS; proeminente quebra positiva.
	25	ZH com formato elipsoidal com eixo principal na direção NS, baixa estruturação, circundada em grande maioria pela ZH27.
	26	ZH com área restrita à porção leste da área alinhada em seu contato oeste, na direção NS e com baixo grau de estruturação.
	27	ZH de alto grau de estruturação, frequência textural, anisotrópica, alinhamento predominando NS, variando para NNE, localmente.
	28	ZH com médio grau de estruturação e “difícil” delimitação de quebras negativas, alinhamentos predominantes na direção NNE a NNW.
	29	ZH com área restrita circundada pela ZH 27 difere da ZH 25 devido à textura.

As únicas regiões que apresentam variações no retroespalhamento, sem ligação com feições de relevo e drenagem, estão concentradas na ZHR 4 (figura 53). Essas regiões possuem pequena extensão, baixo retroespalhamento e forma retangular indicando áreas antropizadas, provavelmente relacionadas a áreas agrícolas ou de pastagem.

Apesar de não terem sido individualizadas zonas homólogas para o padrão de tonalidade, a análise da tonalidade será utilizada para identificar, diferenciar ou mesmo definir unidades no mapa fotogeológico final dessa área.

4.4.4. Integração dos elementos de fotoanálise das imagens SAR

O mapa da figura 55 reúne, sob o nome de mapa de lineamentos estruturais, as informações obtidas a partir da fotoanálise de drenagem e relevo. Os mapas das figuras 56A, B das zonas homólogas de drenagem e de relevo, respectivamente, representam as unidades geológicas de mapeamentos. Observa-se que as zonas homólogas têm seus limites definidos com bastante proximidades entre si. A tabela 16 mostra as correlações dessas zonas homólogas de relevo e drenagem.

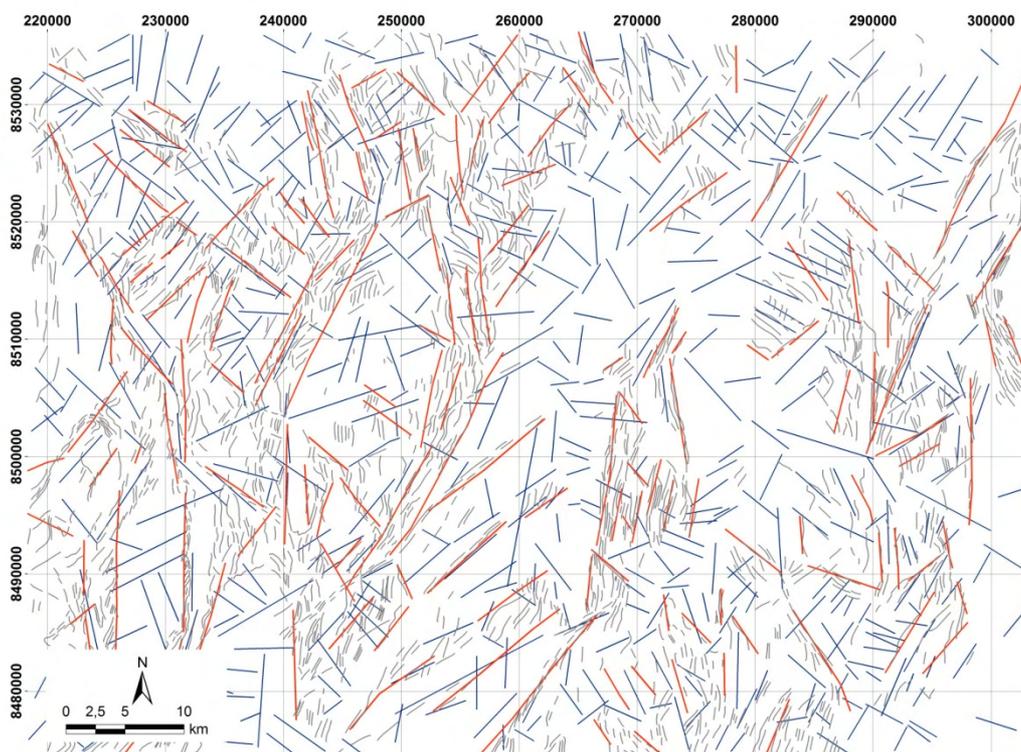


Figura 55: Mapa de lineamentos estruturais integrando quebras positivas e negativas, feições lineares e de alinhamento e lineações de relevo e de drenagem.

Integrando o mapa de lineamentos com os mapas das zonas homólogas de drenagem (figura 56A) e relevo (figura 56B) obteve-se um mapa final integrado de fotoanálise (figura 57) com trinta e quatro unidades radargeológica (URG).

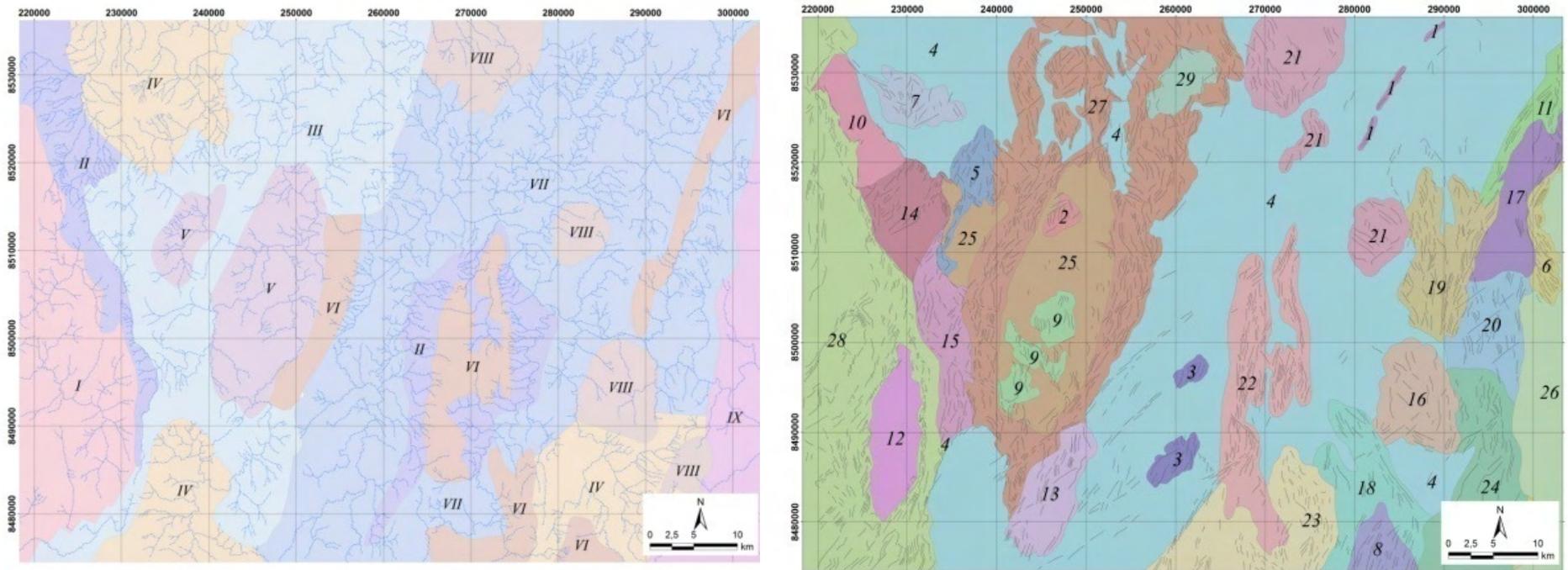


Figura 56: Mapas de zonas homólogas de drenagens e de relevo.

Tabela 16: Correlações entre zonas homólogas obtidas na análise da rede de drenagens e do relevo

ZHD	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
ZHR	12;28	4;10	5;13;14;15; 27; 29	4;7;18; 23;24	2;9; 25	11;19;22	1;3;8;17; 20;23	16;21; 23;24	6;26

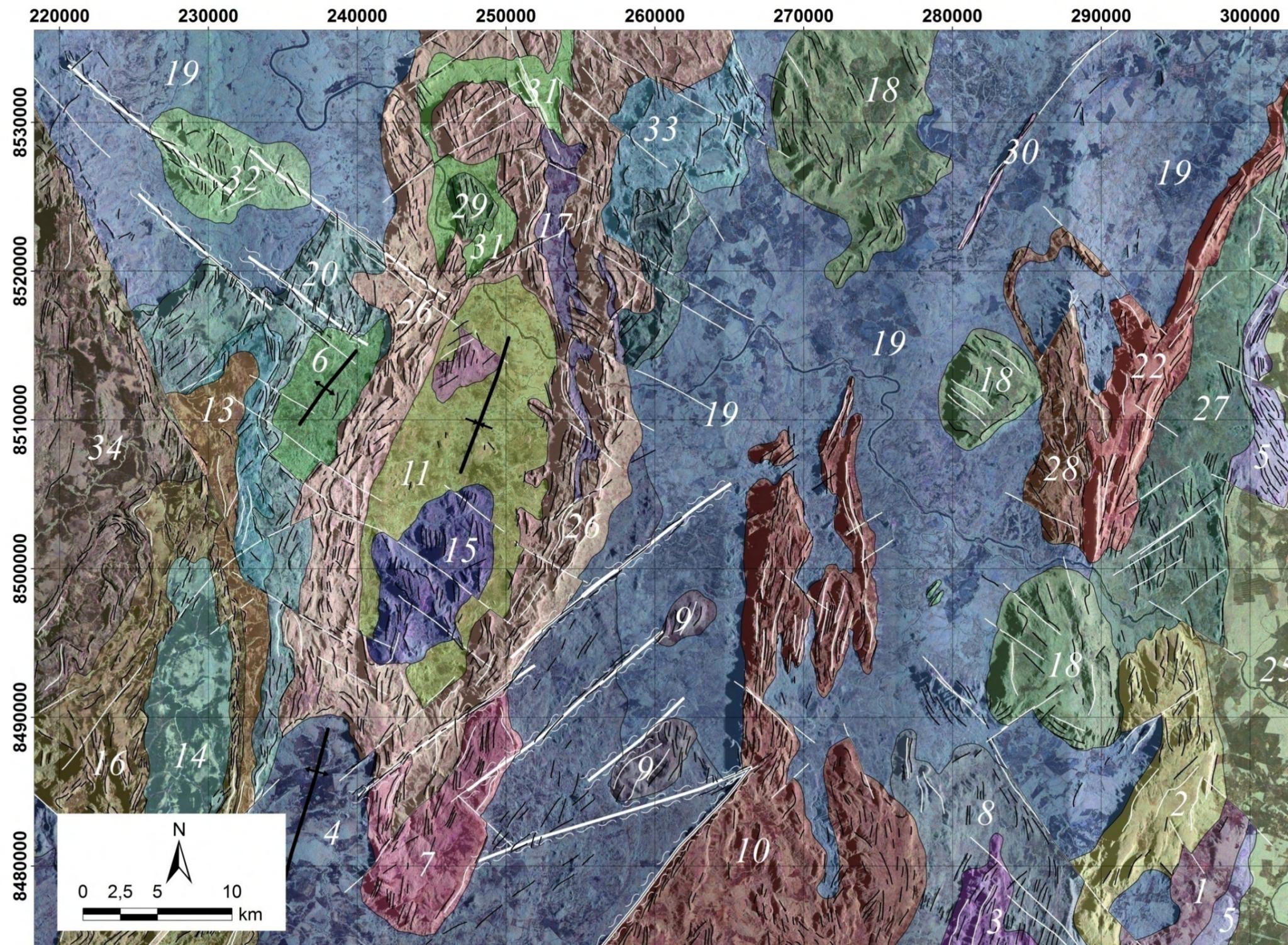


Figura 57: Mapa de unidades radargeológica obtidas a partir da análise dos mapas de zonas homólogas de relevo, drenagem e tonalidade

Cor associada	Descrição
1	URG delimitada por quebra positiva com ausência de fraturas.
2	URG delimitada pela ZHR 24, tendo sido redesenhada para adequação aos falhamentos. Fracamente simétrica, fraturada e cisalhada em sua porção central na direção NE.
3	URG delimitada pela ZHR 8 e redesenhada para adequação aos falhamentos. Contato por falha NW na porção NE do corpo com foliação NNE de alto mergulho.
4	URG definida pela diferença de tonalidade mais clara dentro da ZHR 4; marca o anticlinal na porção sudoeste da imagem, e comporta-se de maneira plástica nas zonas de cisalhamento NE que as cortam.
5	URG definida pela ZHR 5 com tonalidade muito clara quando comparada às demais, mergulhos de camada sub-horizontal com contatos de orientação NS e fortes lineações.
6	URG definida pela ZHR 25 e redesenhada com a análise da tonalidade escura e o entendimento de uma estruturação tipo anticlinal.
7	URG definida pela ZHR 13, sendo reformulada após o entendimento do fechamento de um possível sinclinal. O contato leste dessa unidade é por falha de alto ângulo NS e com comportamento rúptil relacionado ao cisalhamento NE que corta esta zona.
8	URG definida pela ZHR 18, redesenhada para adequação aos falhamentos. Contato por falha NW na porção NE do corpo com foliação NNE de alto mergulho; com menor ruptibilidade quando compara à URG 3.
9	URG definida pela ZHR 3.
10	URG definida pela junção entre as ZHR 22 e 23 pelo entendimento da diferença somente de comportamento estrutural dessas zonas homólogas de relevo. Corpo com alta simetria (mergulho sub-vertical) na porção norte e alinhamento NS, passando gradativamente para uma moderada simetria.
11	URG definida pela ZHR 25 associado ao entendimento da estruturação de um sinclinal com eixo NNE.
12	Pequenos corpos em meio ao embasamento com lineamentos de direção NW.
13	URG delimitada pela tonalidade escura observada na ZHR 28, alinhada NS, assimétrica.
14	URG definida pela ZHR 12 e redesenhada com a análise da tonalidade escura e o entendimento de uma estruturação tipo sinclinal.
15	URG definida pela ZHR 9, sendo reformulada após a análise estrutural. Corpo com lineações NS e “quebrados” por falhamentos NW.
16	URG delimitada pela tonalidade mais clara observada na ZHR 28, fortemente fraturada.
17	URG delimitadas pela percepção de tonalidades mais claras, com alta permeabilidade e baixa tropia e poço resistente aos processos erosivos em meio à unidade fortemente resistente à erosão e bastante fraturada.
18	URG delimitada pela ZHR 21 e 16, alinhadas na direção NW com fraturamento radial e formato de domo (resistente a erosão). Os corpos mapeados diferenciam-se em relação ao fraturamento.
19	URG delimitada pela ZHR4, pouco resistente à erosão, alta permeabilidade, ao pouco fraturamento e praticamente sem alinhamentos de relevo.
20	URG definida pela questão de tonalidade e características estruturais da área, alinhada NS, sendo que na porção norte possui contato tectônico de direções NW.
21	URG definida pela questão de tonalidade e características estruturais da área, dobra (?) com eixo NS/ NNE.
22	URG definida pela questão de tonalidade e características estruturais da área, alinhada NNE, com alta simetria na porção norte do corpo.
23	URG definida pela ZHR 2.
24	URG definida pela questão de tonalidade e características estruturais da área, alinhada NNE, com médio fraturamento e cortado por falhas NW que deslocam o contato.
25	URG definida pela ZHR 26.

Cor associada	Descrição
26	URG definida pela ZHR 27, sendo a unidade com maior fraturamento da área que circunda a maioria dos dobramentos na porção oeste, bastante resistente à erosão, alinhada na direção NS com camadas moderadamente simétricas.
27	URG definida pela ZHR 17 e 20, com fraturamento NE proeminente na porção sul e alinhamento NS, moderadamente assimétrico.
28	URG definida pela alta resistência à erosão e alta ruptibilidade.
29	URG definida pelo formato semicircular de área bastante fraturada na direção NE.
30	URG definida pela ZHR1 com forte simetria (mergulhos superior a 75°), alinhada na direção NNE.
31	URG pouco resistente à erosão, com inexistência de fraturas e classificada como ZHR4.
32	URG definida pela ZHR 7, com forte alinhamento NW e fortemente assimétrica, baixo fraturamento e bastante resistente à erosão.
33	URG definida pela ZHR 29 e ampliada devido a percepção tonal da unidade e da estruturação da região aflorante.
34	URG definida pela ZHR 28, definida pela variação tonal existente, com fraca simetria, indicando baixo ângulo de mergulho das camadas e demarcada por forte falhamento NS NNW no contato leste do corpo.

Tabela 17: Descrição das propriedades das zonas homólogas apresentadas na figura 57.

4.5. *Análise das informações multipolarimétrica PALSAR versus multipolarizada R99SAR*

Os atuais satélites polarimétricos comerciais ALOS/PALSAR e RADARSAT 2 apresentam os parâmetros de sensor necessários para calibração absoluta, instalados em programas comerciais que otimizam esse tipo de correção. Já as imagens do R99SAR não possuem os parâmetros de sistema para calibração absoluta e necessitam de refletores de canto posicionados durante o aerolevantamento para que exista a possibilidade de calibração. Esse processo de colocação de refletores de canto foi realizado com sucesso para os aerolevantamentos realizados do R99SAR, cujo objetivo era a simulação do MAPSAR (satélite orbital em estudo, para ser lançado pelo Brasil em 2015). A logística, o alto custo e a sincronicidade necessária para a colocação desses triédros em campo, faz com que grande parte dos aerolevantamentos do R99SAR não possa ser calibrado.

As imagens coletadas pelo R99SAR calibradas no projeto de simulação do MAPSAR foram avaliadas utilizando análises estatísticas, tais como análise de regressão linear e de separabilidade, com o objetivo de identificar assinaturas polarimétricas de alvos de mais diferentes tipos (Rabelo, 2007; Fernandez, 2007; Knust, 2007; Silva, 2007).

Devido à falta de uma calibração absoluta do imageamento R99SAR na região de Nova Roma (GO), essa tese restringiu-se a comparar através de médias normalizadas os dados multipolarimétricos do sensor PALSAR e multipolarizados do R99SAR.

4.5.1. Pré-processamento das imagens ALOS/ PALSAR: Região Cavalcante

Foi obtida uma imagem PALSAR da região norte de Cavalcante (GO), que recobre parte da área de estudo (figura 58), na data de 7 de maio de 2007, pela plataforma A3 do satélite ALOS no modo polarimétrico- banda L e resolução de aproximadamente 12,5 metros. A imagem foi processada pelo fornecedor no nível 1.5G, o que significa que a imagem foi processada em *multilook*, projetada para coordenadas cartográficas com pixels alinhados com a grade da projeção UTM e disponibilizada com coordenadas nessa projeção. O ângulo de visada dessas imagens polarimétricas é de 21,5°. Essa imagem possui extensão de, aproximadamente, 60x20 km, com inclinação em relação ao norte de aproximadamente 20° para oeste.

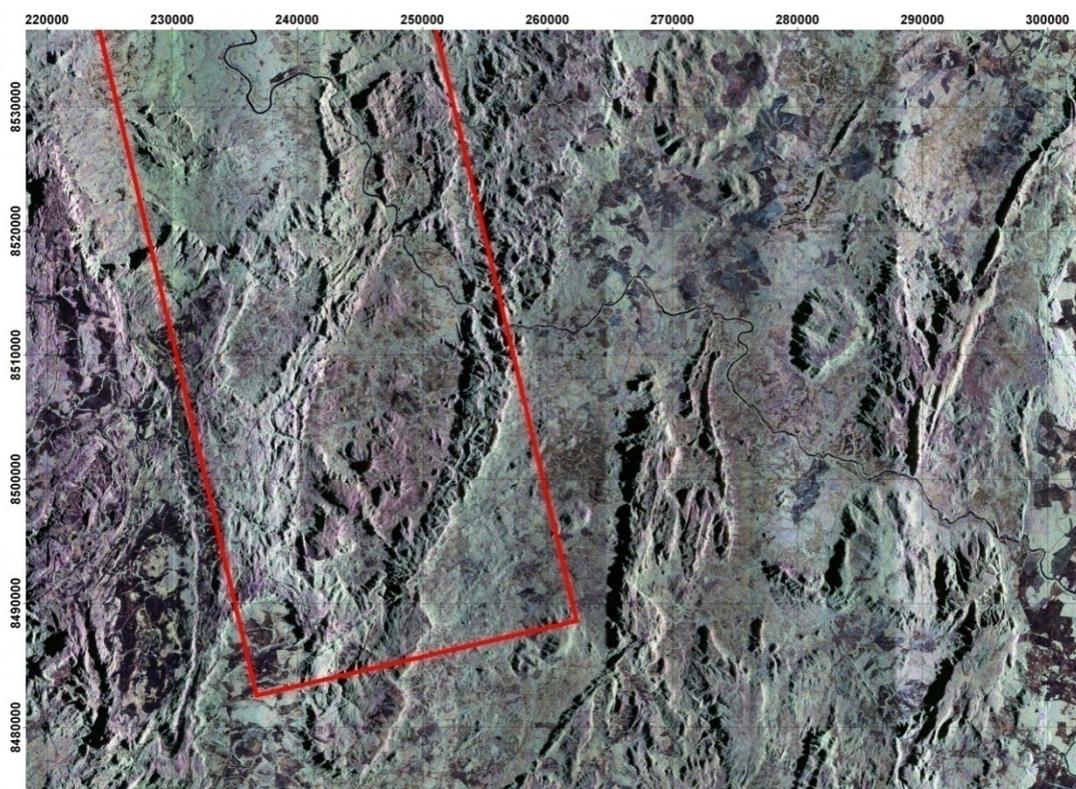


Figura 58: Área de recobrimento da imagem PALSAR em relação ao aerolevante Nova Roma R99B.

O arquivo recebido (formato CEOS) foi processado utilizando o software ASF MapReady 2.1., gratuito e disponibilizado pela *Alaska Satellite Facility*. <http://www.asf.alaska.edu/sardatacenter/?q=softwaretools>, que apresenta as funções de pré-processamento para as imagens do satélite ALOS. Especificamente para o sensor PALSAR, esse programa permite transformações radiométricas dos dados para beta, gama, amplitude e potência, sendo que as três primeiras opções de processamento permitem que a escala de saída dos dados seja em decibéis (dB) e, também, correções relativas a variações de terreno (ortorretificação dos dados).

O arquivo recebido foi processado e transformado para σ^0 e a escala de saída dos dados foi em decibéis. A ortorretificação da imagem foi realizada utilizando os dados do modelo digital de elevação do SRTM, tal qual utilizado para as imagens R99SAR. O formato geográfico de saída dos dados foi de projeção UTM z.23 Sul, sendo o datum o WGS-84. Desse processamento foram gerados quatro arquivos com as diferentes polarimetrias (HH, HV, VH e VV) (figura 59) e uma composição colorida com as polarizações HH/HV/VV (figura 60).

Devido à topografia acidentada da região, que possui desníveis entre 600 a 800 metros e ao “baixo” ângulo de incidência do sensor, aproximadamente 21,5°, as imagens apresentam distorções de relevo por inversão topográfica e encurtamento de rampa. Tentativa para minimizar esses efeitos foram feitas com o programa ASF MapReady 2.1., que oferece opções de suavização e interpolação das áreas de inversão topográfica e sombreamento (figura 61). O resultado não foi suficientemente satisfatório, visto que boa parte da imagem continuou a apresentar esses efeitos de distorções. A obtenção de imagem ALOS com ângulos de incidência maiores exige pré-agendamento junto a JAXA (*Earth Observation Research Center*).

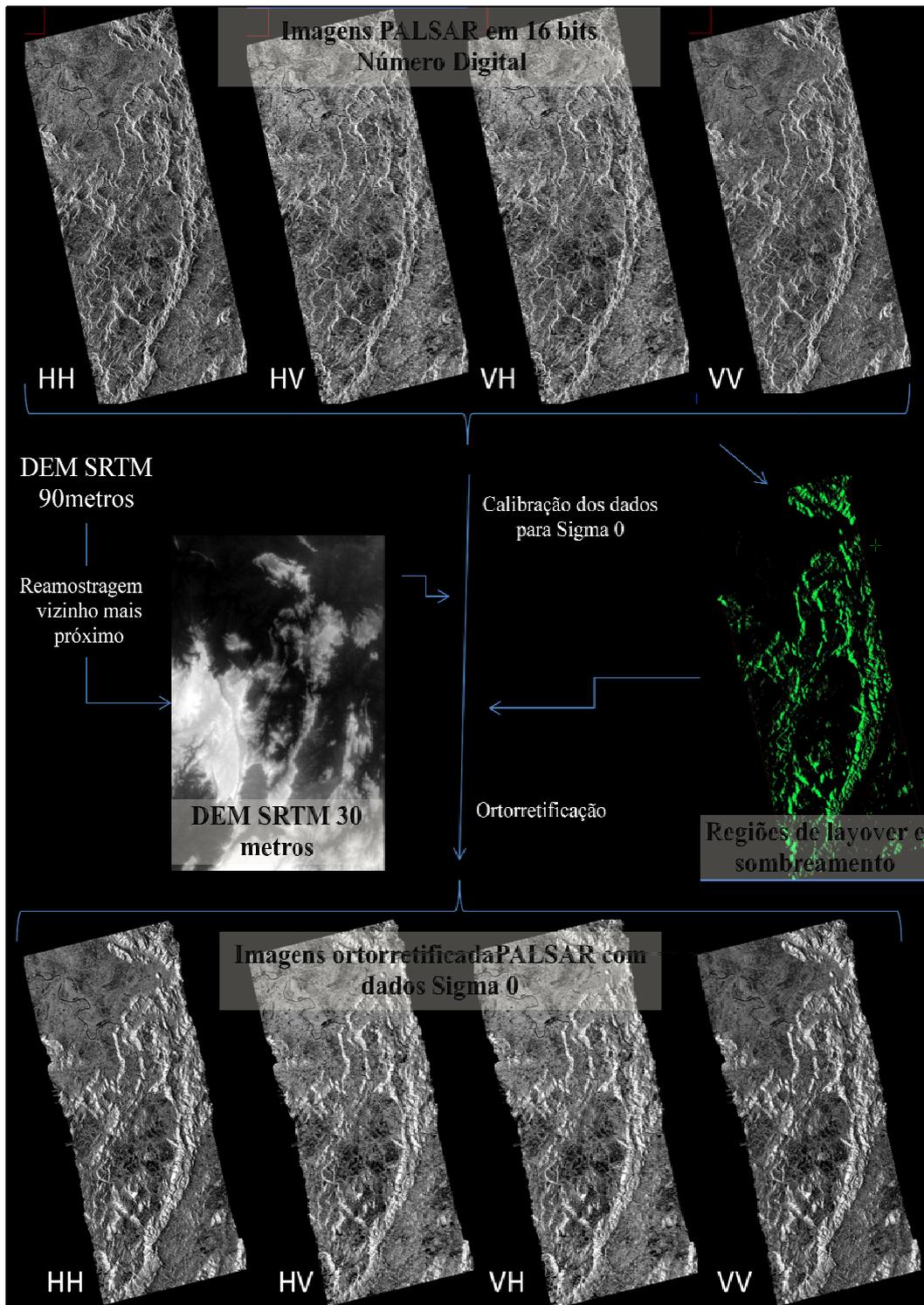


Figura 59: Esquema de pré-processamento da imagem PALSAR: calibração dos dados e ortorretificação utilizando dados SRTM.

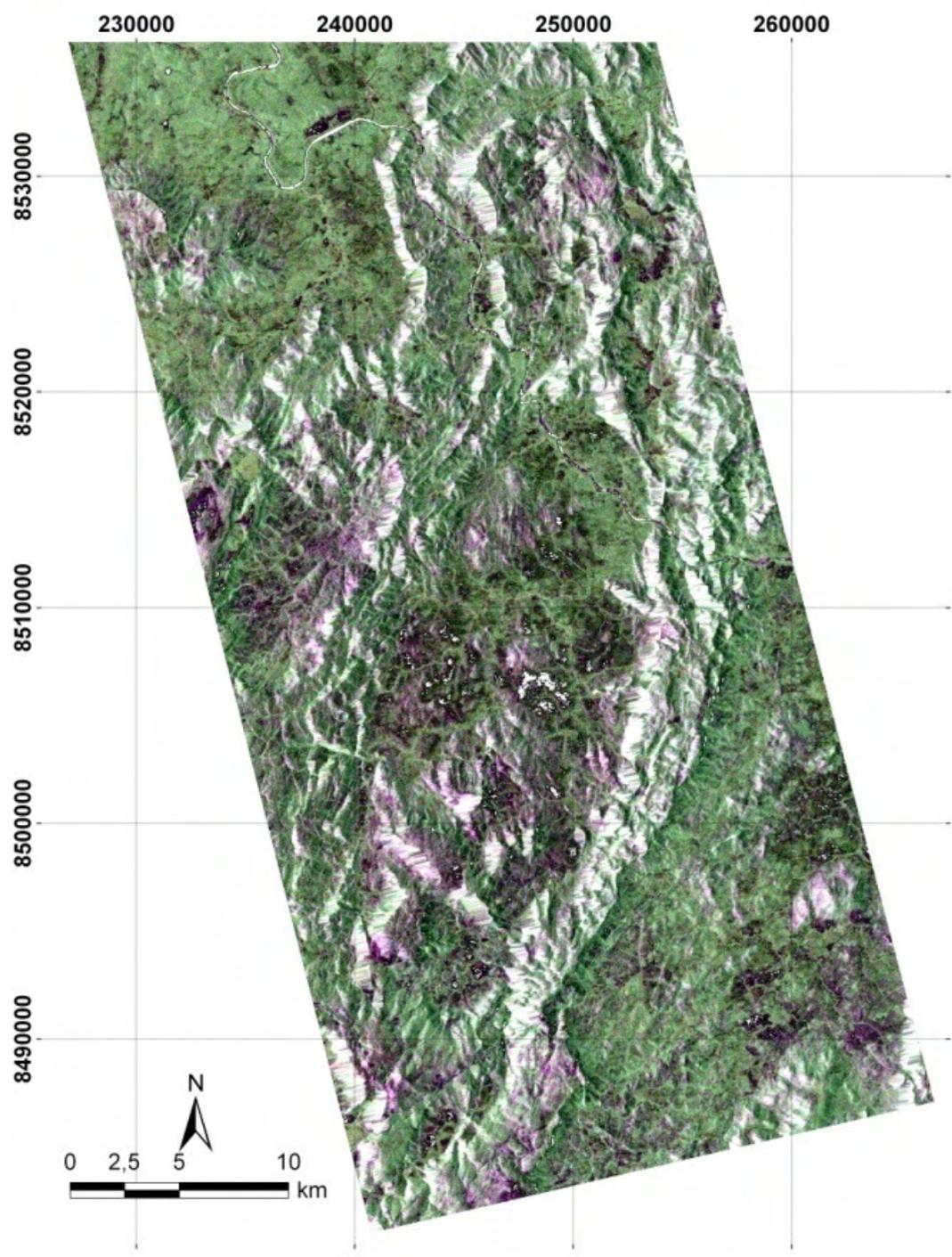


Figura 60: Composição colorida entre as polarizações HH/HV/VV (ALOS PALSAR).

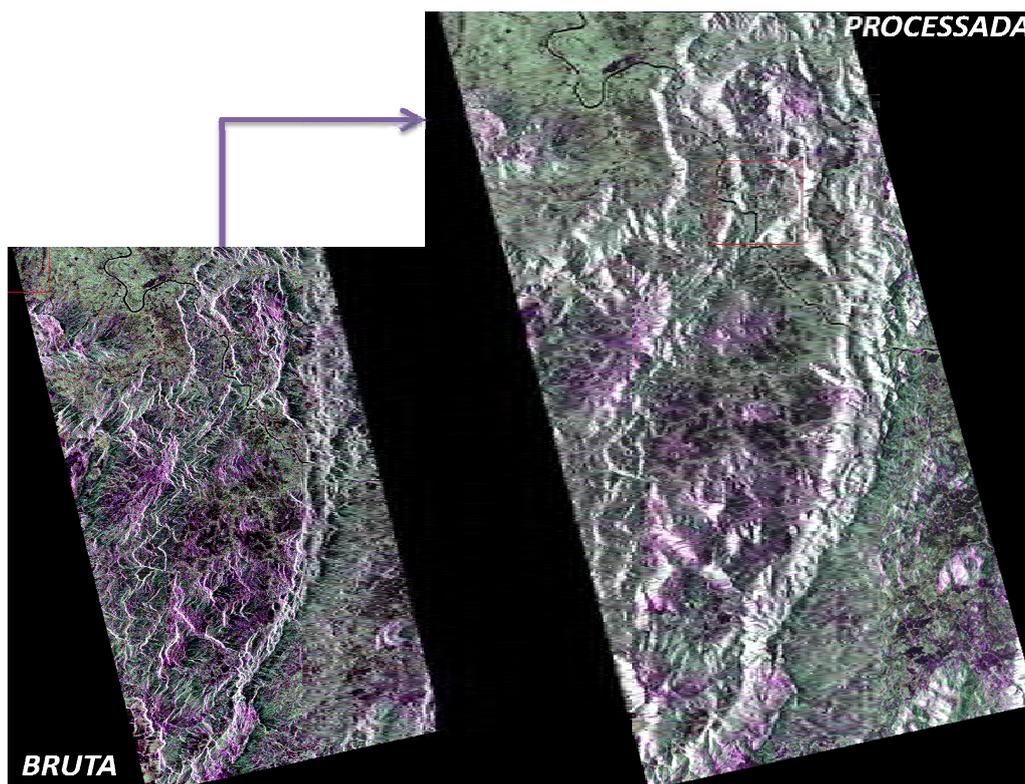


Figura 61: Resultado da redução de ruído *speckle* após processamento da imagem.

As áreas livres dos efeitos de inversão e encurtamento de relevo apresentam ruídos tipo sal- pimenta que puderam ser suavizados utilizando filtros *passa baixa* Lee e Frost com janelas 3x3 (figura 62).

Os valores obtidos para a estatística da imagem PALSAR (tabela 18), após a filtragem, indica que os dados obtidos pelas polarizações apresentam alta correlação. As polarizações cruzadas HV e VH apresentam correlações de aproximadamente 99%, esperado para um sistema onde não ocorra *crosstalk*. O que reduz a informação útil há apenas três polarizações (HH, HV e VV).

Tabela 18: Estatística da imagem PALSAR

Polariz	Min	Max	Med	Desv		HH	HV	VH	VV
HH	-29,23	8,93	-9,09	3,56	Correlação	1	0,8587	0,8591	0,9435
HV	-29,91	1,006	-15,95	3,19			1	0,9892	0,8558
VH	-29,85	0,62	-16,11	3,16				1	0,8562
VV	-29,13	8,89	-9,85	3,64					1

As correlações superiores a 85% entre as bandas HH, HV e VV indicam a pouca presença de informação relativa aos alvos orientados. Os valores máximos e mínimos entre as polarizações paralelas HH e VV são quase iguais e superiores aos dados da polarização HV.

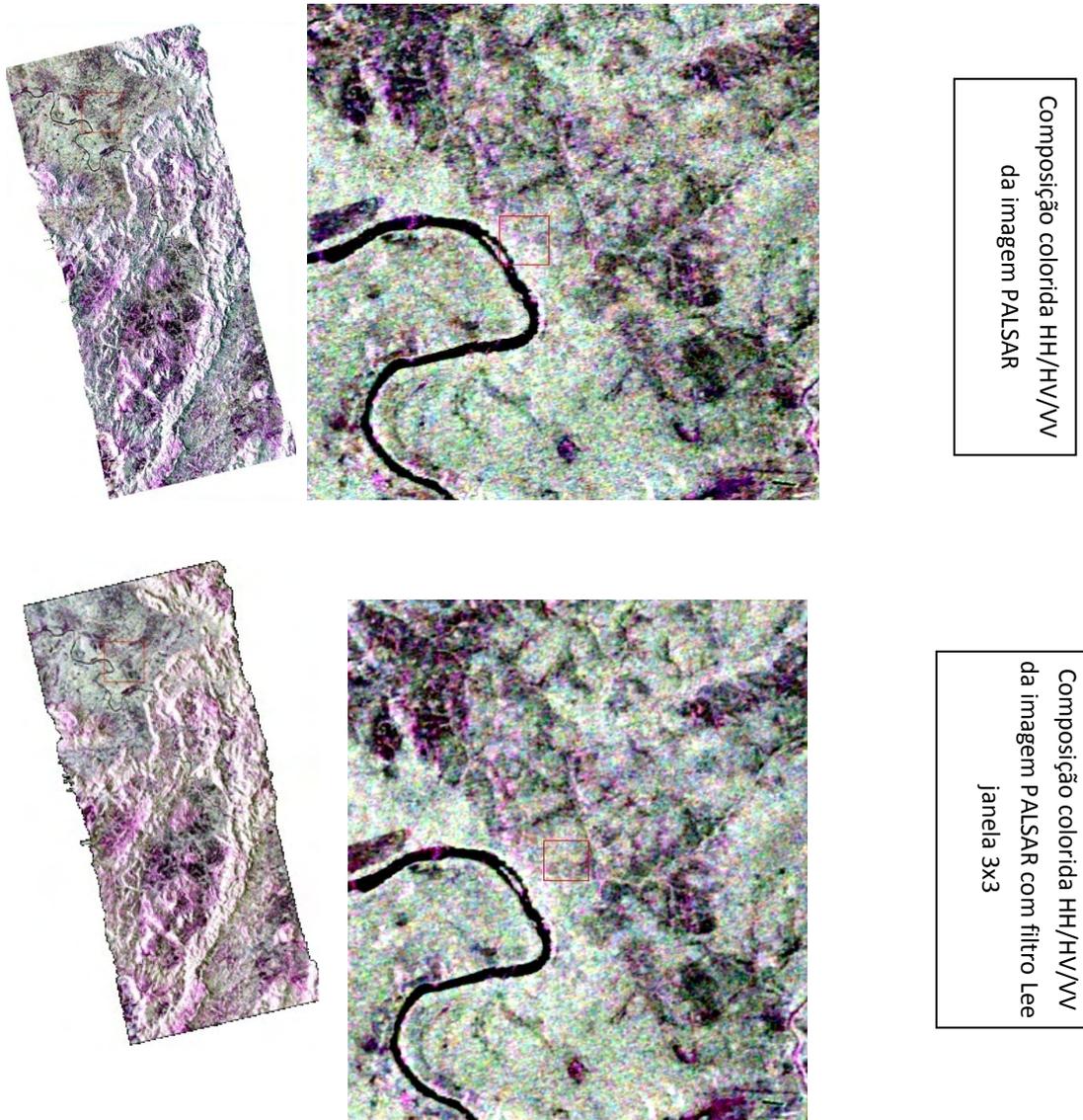


Figura 62: Resultado da filtragem utilizando filtro Lee 3x3 da imagem polarimétrica PALSAR Região de Cavalcante – GO.

4.5.2. Comparação entre as imagens PALSAR e R99SAR: Região Cavalcante

Por ser uma área ambientalmente preservada, o retroespalhamento dos sensores PALSAR e R99SAR está diretamente relacionada à resposta da vegetação existente ou à textura/ estrutura da litologia aflorante. Influências relativas a variações da constante dielétrica dos materiais devido à aquisição das imagens, em diferentes épocas sazonais, podem também contribuir de forma distinta para o retroespalhamento da onda incidente (figura 63).

Os dados PALSAR da área analisada, apesar de possuírem uma qualidade radiométrica e de calibração superior ($\Sigma 0$) em relação aos dados R99SAR, apresentam recorrentes efeitos de inversão e encurtamento na maioria das encostas, o que é inerente aos dados SAR com baixo ângulo de visada em áreas topograficamente acidentadas, prejudicando o processo de radarinterpretação. Por sua vez, as imagens do sensor R99SAR, apesar de não apresentar qualquer tipo de calibração, mostram com clareza os elementos texturais de drenagem e relevo, que em um mapa radargeológico apresentam maior detalhamento de elementos que os presentes nos mapas geológicos disponíveis para a região de escala 1:100.000 (figura 57).

A visualização das imagens multipolarizadas HH, HV, VH e VV do sensor aerotransportado demonstram o retroespalhamento bastante uniforme para os alvos que as compõem. Dados estatísticos de áreas uniformes de 50 por 50 pixel mapeadas como unidade radargeológica demonstram valores muito próximos entre as polarizações paralelas HH e VV e valores menores para a polarização cruzada HV (figura 64). No entanto, a grande variância em torno da média impossibilita o processo de padronização de respostas para as diferentes polarizações do R99SAR. Os valores de retroespalhamento dos dados orbitais para as mesmas regiões observadas nos dados R99SAR também demonstram valores entre polarizações paralelas bastante semelhantes e maiores que os da HV; no entanto, os desvios padrões apresentam valores muito menores (figura 58). Assim, o retroespalhamento medido para as imagens PALSAR possibilita a distinção de classes com diferentes padrões para as polarizações HH, HV e VV.

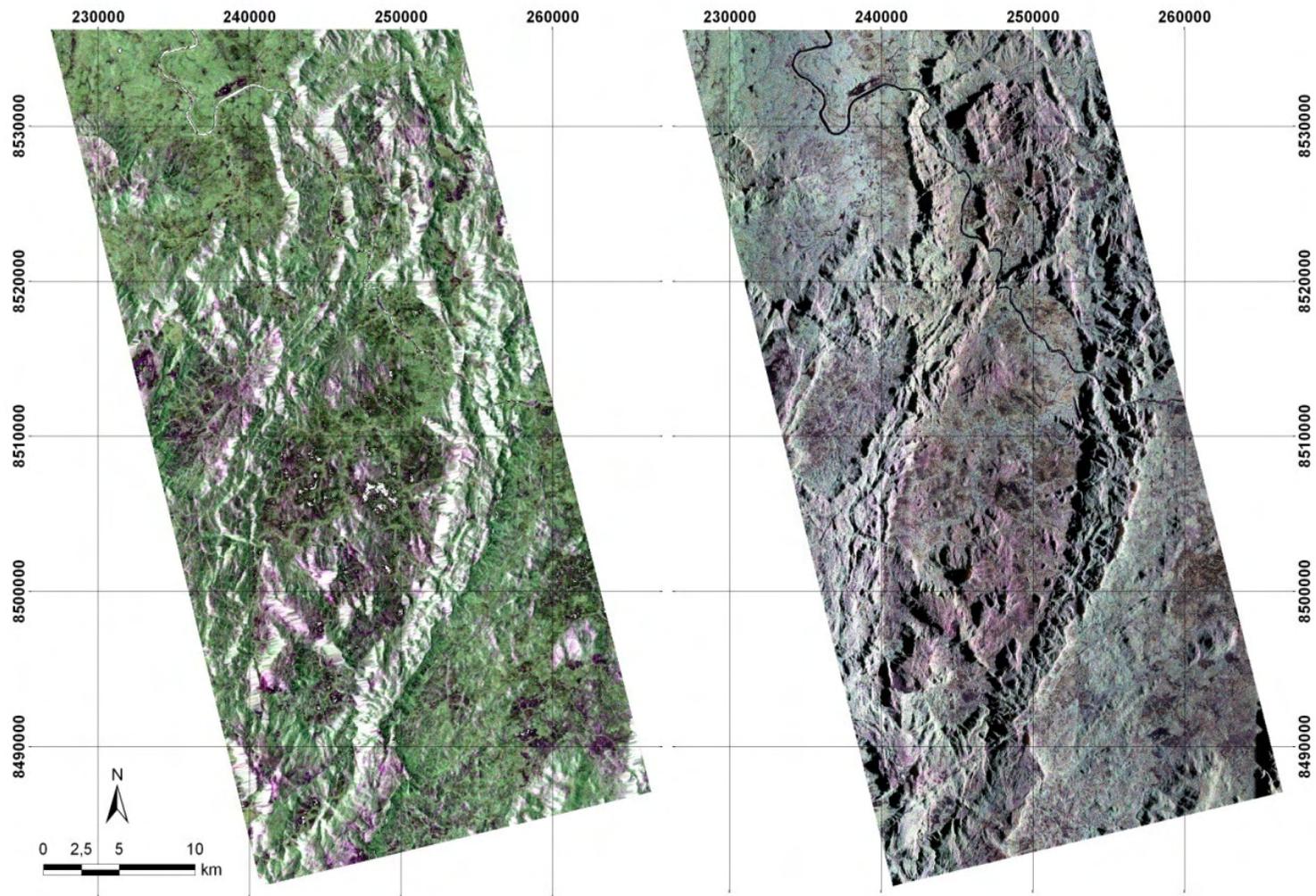


Figura 63: Imagens com o mesmo recobrimento geográfico resultantes dos processamentos aplicados aos dados PALSAR (à esquerda) e aos dados R99SAR (à direita) da região norte de Cavalcante – GO.

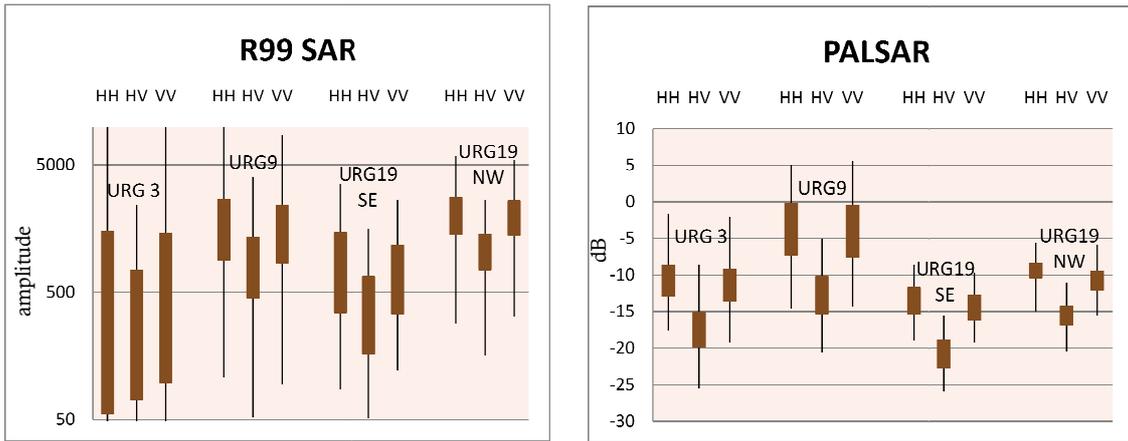


Figura 64 Gráfico demonstrando os valores mínimos, máximos, média e desvio padrão de regiões especificadas na imagem com litologias distintas.

Outra análise realizada foi a comparação em regiões de números similares de pixels em ambas as imagens, utilizando médias das classes obtidas das unidades radargeológica (figura 57). Para que as regiões de coleta ocupassem a mesma cobertura do terreno, a imagem do R99SAR foi degradada para a resolução espacial de 12,5 metros (similar a do PALSAR). Esses métodos de análise foram aplicados com sucesso na discriminação de fitofisionomias no cerrado brasileiro por Sano *et al.* (2005), Fagundes (2006) e Hermuche *et al.* (2009).

Foram coletadas cinco amostras de cada zona homóloga que ocorre na região com 10x10 pixels. Não foram coletadas amostras em regiões com sombreamento, encurtamento e inversão de relevo. Após esse processo, as amostras foram normalizadas para uma escala entre 0 e 1.

As unidades radargeológica URG9, 11, 17, 19 e 23 dos dados PALSAR e R99SAR foram comparadas em relação às polarizações HH x VV e HH x HV e os resultados estão apresentados nas figuras 65 e 66. A alta correlação entre os dados das diferentes polarizações torna-se evidente nos resultados obtidos, tanto para imagens PALSAR como para as imagens R99SAR, aproximando o gráfico de saída de uma reta. Tal qual era esperado, a nuvem ocasionada pelo espalhamento de uma única URG é menor e melhor definida nos dados polarimétricos PALSAR que nos dados R99SAR. Sendo os resultados provenientes entre as polarizações paralelas HH x VV superiores em relação à distinção quando comparados com HV x HH.

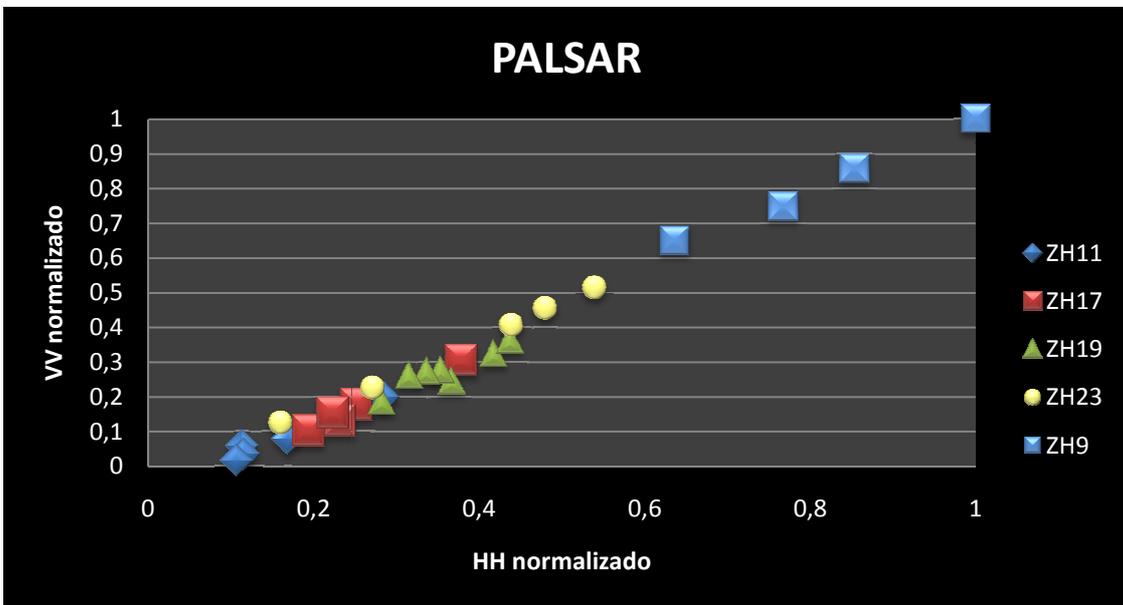
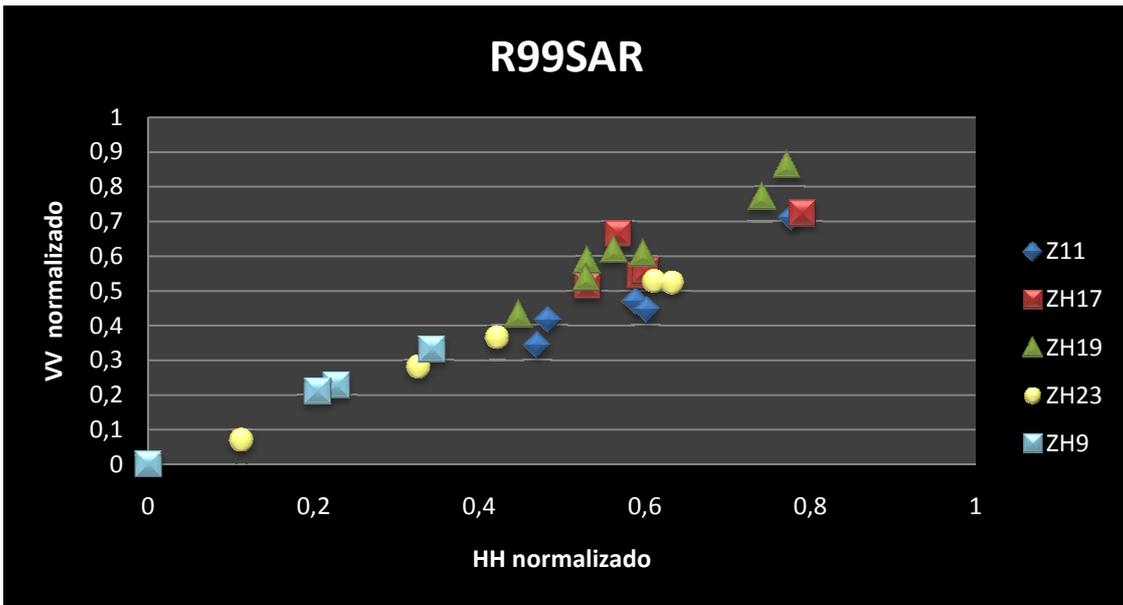


Figura 65: Gráficos demonstrando os valores de médias normalizadas das unidades radar geológicas para as polarizações HH e VV nos dados R99SAR (a cima) e PALSAR (a baixo).

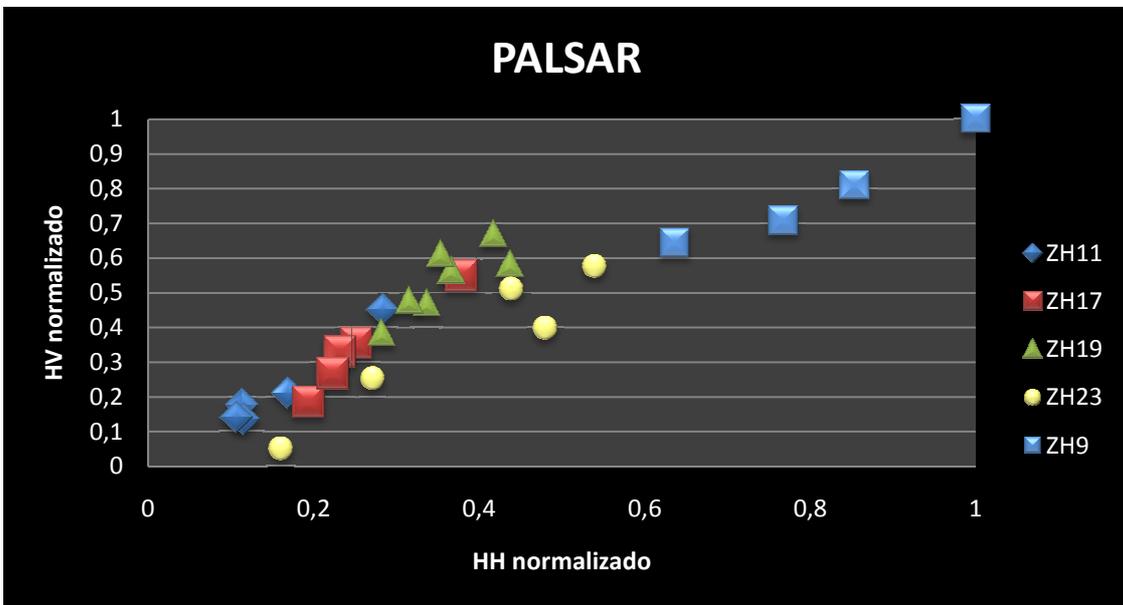
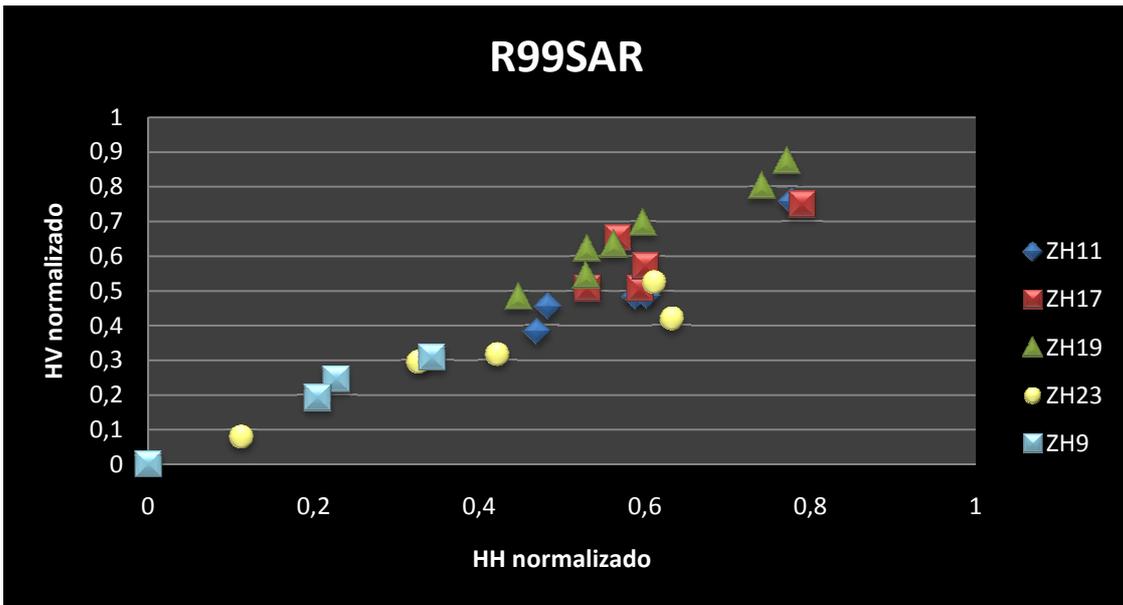


Figura 66: Gráficos demonstrando os valores de médias normalizadas das unidades radar geológicas para as polarizacoes HH e VV nos dados R99SAR (acima) e PALSAR (abaixo).

Capítulo 5

Informações multifontes: a análise do banco de dados geológicos do Rifte Araí

A utilização de dados multifontes para mapeamentos geológicos está sendo largamente empregada nos programas governamentais de cartografia geológica do território nacional nesta última década (CPRM, 2003; CPRM, 2005; UFMG/CODEMIG, 2005; CPRM/SIC-FUNMINERAL, 2008). Mapeamentos realizados no passado têm sido objeto de atualização de órgãos governamentais utilizando dados recentemente adquiridos ou que atualmente são economicamente viáveis, tais como geofísica de alta densidade, imagens de sensoriamento remoto multiespectral e radargramétrica e modelos digitais de elevação de terreno. A utilização de imagens das mais diversas fontes em mapeamento geológico e estrutural objetiva ressaltar qualidades e minimizar os problemas inerentes a cada método de imageamento (Chaves *et al.*, 2003).

Modelos de integração desses dados são objetos de estudos metodológicos tais como os apresentados por Veneziani *et al.* (2004), Chaves *et al.* (2003), Carneiro *et al.* (2006), Moura (2007) e Chiarinni (2007). Todos convergem para a concepção de dados multifontes organizados em um banco de dados geográficos em ambiente SIG. Neste ambiente, os dados pré-existentes e os adquiridos são espacializados, organizados e compatibilizados a fim de esclarecer ou apresentar idéias sobre o entendimento da geologia da região.

Para dados georreferenciados, as principais vantagens da utilização de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) são o dinamismo e a facilidade de entrada, o abastecimento de dados e a visualização. Dados novos e de diversas fontes podem ser cadastrados e analisados em conjunto com dados pré-existentes, agilizando o processo da informação geológica.

Nessa tendência, este capítulo demonstra que a espacialização dos resultados obtidos pela interpretação das imagens multipolarizadas do sensor aerotransportado R99SAR e da geofísica de alta densidade magnetométrica e gamaespectrométrica, em conjunto com o cadastro dos dados de geologia de campo de trabalhos realizados na região do Rifte Araí, apresentam novas possibilidades tanto para auxiliar a atualização dos conhecimentos e do mapeamento geológico, quanto para um melhor entendimento

da complexa geologia estrutural dessa área. Esse processo foi realizado com o uso do aplicativo ARCGIS e o banco de dados geográficos com informações geológicas resultado das análises e interpretações dos dados processados e compilados está apresentado no formato ARCREADER em CD em anexo (ANEXO 2). O projeto foi desenvolvido em sistema de coordenada UTM, zona 23, hemisfério sul e na escala 1:100.000 com o datum WGS84.

5.1. Sistema de Informação Geográfica

Um sistema de informação geográfica requer uma metodologia adequada para permitir a otimização de procedimentos. O ponto de partida de um SIG é a organização de um banco de dados robusto e planejado (Silva, 2003). É uma ferramenta importante no processo de organização, sistematização e análises das informações (Câmara *et al.*, 2004).

A manipulação eficiente de uma base de dados espacial e temporal é fundamental na produção e validação de modelos espaciais. Goodchield (1992), Burrough & McDonnell (1998) e Silva (1999) entre outros autores, têm demonstrado que no que tange à sua eficiência, abrangência e capacidade de expansão do sistema, a falta de um modelo de dados adequados é um dos principais fatores do insucesso de muitos projetos baseados em SIG (Roig, 2005).

Nesse sentido, o banco de dados geográficos com informações geológicas que compõe esta tese foi estabelecido a partir dos resultados e das análises das informações obtidos dos trabalhos de mapeamentos geológicos anteriores; das imagens de sensoriamento remoto (R99SAR, ALOS/PALSAR, Landsat, SRTM) e dos dados aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria) (Figura 67).

5.2. Mapeamentos Geológicos Anteriores

A região nordeste do Estado de Goiás possui trabalhos de mapeamento geológico sistemáticos que foram organizados para a confecção das cartas Cavalcante, Monte Alegre de Goiás e Nova Roma, escala 1:100.000, do Programa Geologia do Brasil (PGB/LGB) coordenadas por Botelho *et al.* (2007), Dardenne *et al.* (2007) e Alvarenga *et al.* (2007b), respectivamente (ANEXO 1).

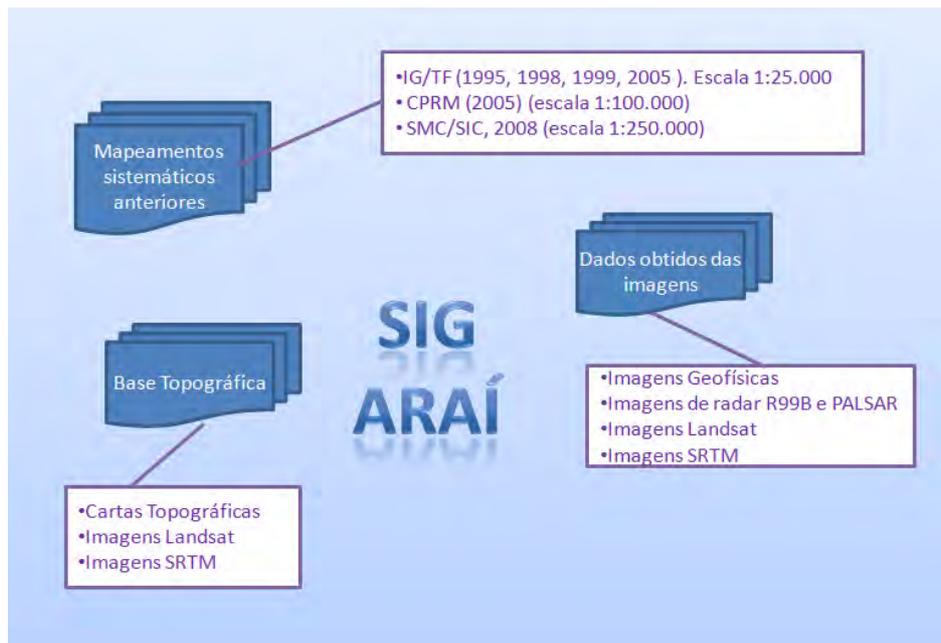


Figura 67: Dados que compõe o banco de dados geográficos com informações geológicas do Rifte Araí.

Dentre os mapeamentos sistemáticos, recebem destaque o trabalhos final de graduação (IG/TF) na escala 1:25.000, realizados pelos alunos de graduação do curso de geologia do Instituto de Geociências (IG) da Universidade de Brasília (UnB) nos anos de 1995, 1998, 1999 e 2005. Outros importantes trabalhos de mapeamento regional desenvolvidos nesta área são os projetos Brasília (Barbosa *et al.*, 1969) e Cana Brava- Porto Real (Araújo & Alves, 1979), e os trabalhos de Botelho (1992), Dardenne *et al.* (1998) e Massucato (2003).

As cartas geológicas organizadas do projeto da CPRM (Botelho *et al.*, 2007; Alvarenga *et al.*, 2007b; Dardenne *et al.*, 2007) abrangem cerca de 55% da área total do presente trabalho e, conjuntamente com os mapas IG/TF 1998 e 2005 e do Projeto Cana Brava- Porto Real (Araújo & Alves, 1979), completam o recobrimento de mapeamento geológico na área de estudo (figura 68).

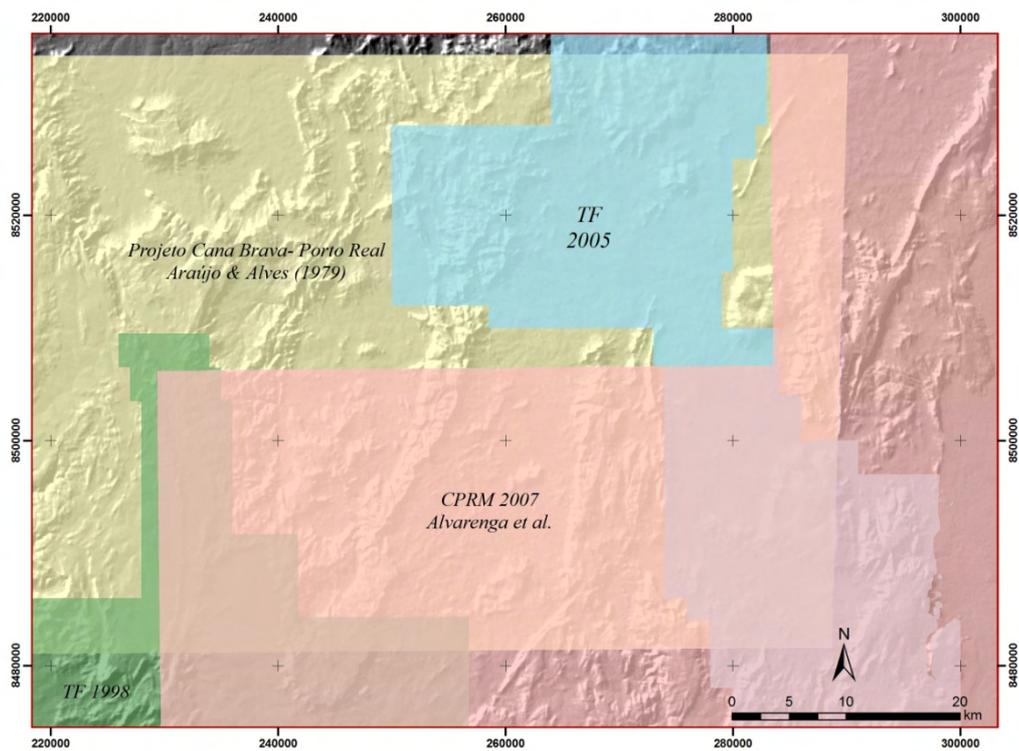
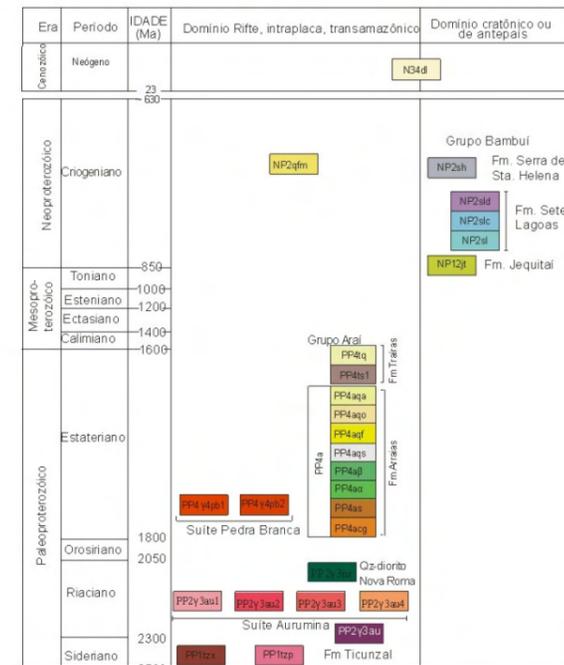
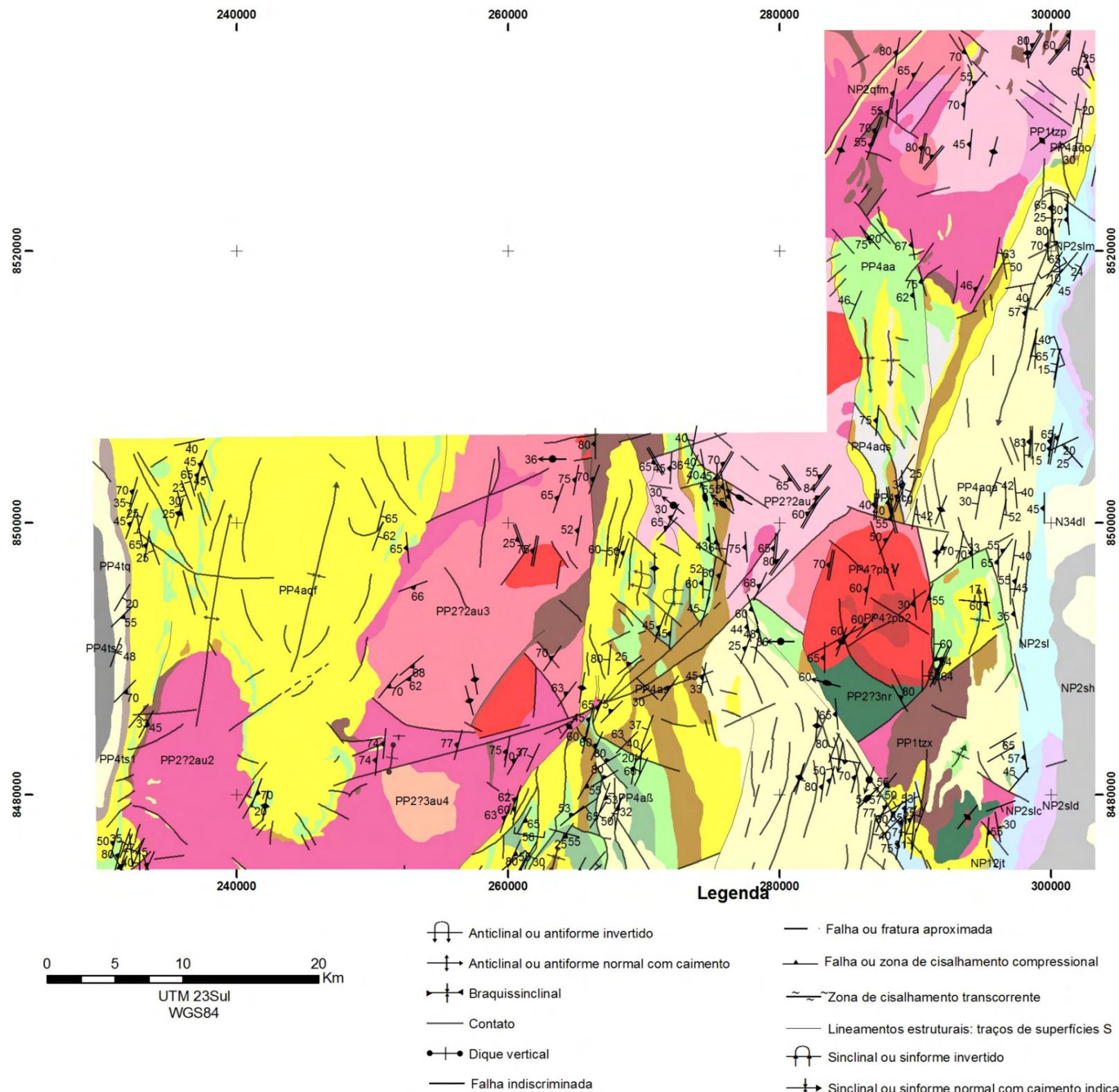


Figura 68: Recobrimento dos mapeamentos geológicos sistemáticos anteriores realizados na área de imageamento.

Para padronização da informação dos mapeamentos geológicos foram utilizados como base os mapas de Botelho *et al.* (2007), Alvarenga *et al.* (2007b) e Dardenne *et al.* (2007) por estes serem compilação em escala 1:100.000 e terem as informações mais atuais relacionadas à proposta estratigráfica da área. Foram compiladas em *shapefile* as informações das litologias e das estruturas “lineares” e “pontuais” das folhas cartografadas pelo projeto (figura 69, tabela 19).



CENOZOICO NEÓGENO (NQ)

NEOPROTEROZOICO (NP)

Grupo Bambuí
 Formação Serra de Santa Helena: Siltito argiloso laminado cinza esverdeado quando fresco. Ritmitos finos com intercalações de laminais de siltito maciço e arenito muito fino com mica branca detritica.
 Formação Sete Lagoas: Dolomito: Dolomito laminado, dolarenito, brecha dolomítica e dolomito maciço. Esta fácies está geralmente recristalizada e venulada, mascarando as estruturas primárias.
 NP2sh: Calcário: Calcário e calcário argiloso cinza com intercalações subordinadas de margas.
 NP2sl: Margas: Margas e siltito calcífero com calcário e calcário argiloso subordinado.

Grupo Arai
 Formação Traíras: Siltito e metassiltito
 PP4q: Quartzito: Quartzito arenoso laminado e em bancos com estratificações cruzadas.
 Siltito um: Siltito e metassiltito maciço e laminado com marcas onduladas e laminações cruzadas.
 Formação Araias: Quartzito arenoso: Quartzito arenoso em bancos internamente laminados com ocasionais marcas onduladas e estratificações cruzadas decimétricas a métricas.
 PP4aqo: Ortoquartzito: Ortoquartzito médio a grosso com grãos bem arredondados e esféricos com frequentes estratificações cruzadas superiores a um metro.
 PP4aqf: Quartzito feldspático: Quartzito médio a grosso feldspático. Ocasionalmente dominam ortoquartzitos na base da unidade.
 PP4aqg: Quartzito seixoso: Quartzito feldspático muito grosso a grosso com seixos esparsos e lentes centimétricas de conglomerados.
 Metabasaltos: Metabasaltos com amígdalas ocasionais.
 Metavulcânicas ácidas: Metariorito rosa a esbranquiado com feições de fluxo magmático, fenocristais de Kf e de quartzo idiomórfico. Metarioridito cinza escuro com fenocristais de plagioclásio e raros quartzo. Metaproclástica com predominância de metatufos, metalajillito e metapiroclástica. São comuns intercalações de quartzitos.
 Siltito: Alternância de metassiltitos com quartzitos finos.
 Conglomerado: Metaconglomerado suportado por matriz ou clasto. Inclui seixo de granito, metavulcânica ácida, quartzo e quartzito. Camadas de quartzito ocorrem intercaladas.

Suíte Pedra Branca
 Monzogranito: Biotita monzogranito, biotita sienogranito com fácies rapakivi e granofíricas.
 Sienogranito: Biotita sienogranito, Li-siderofilita, zinwaldita-Li-albita-topázio granito portadores de zonas albitizadas e ougreisenizadas e depósitos de Sn, F e I.
 Quartzio-diorito Nova Roma: Biotita-anfibólio-quartzio diorito.

Suíte Aurumina
 Biotita Sieno-granito
 Tonalito: Leucotonalito, granada-biotita tonalito, muscovita-biotita tonalito com raro anfibólio.
 Monzogranito: Biotita-muscovita ou muscovita-biotita sieno monzogranito com monzita.
 Sienogranito: Biotita-muscovita sienogranito com domínios mais jovens de turmalina-muscovita-albita granito, pegmatitos e albitos com Sn e Ta.

Formação Ticunzal
 Xisto: Biotita-muscovita-quartzio xisto, muscovita-clorita-quartzio xisto, com grafita e granada.
 Paragneisse: paragneisse com bandas claras ricas em quartzo e feldspato e as bandas máficas ricas em biotita, alterando para clorita e fengita; ilmenita passando para titanita e minerais opacos

Figura 69: Mapa geológico integrado das folhas de Cavalcante (Botelho *et al.*, 2007), Nova Roma (Alvarenga *et al.*, 2007b) e Monte Alegre de Goiás (Dardenne *et al.*, 2007).

A estrutura dos campos de informações relativos a cada *shapefile* foi diferente da proposta da CPRM e segue o padrão estabelecido por CPRM/SIC-FUNMINERAL (2008) (tabela 20). Considerou-se que o padrão adotado pela CPRM era muito complexo e não se adequava ao tipo de análise a ser feita nesta tese.

Tabela 20: Estrutura das camadas de mapeamentos anteriores que compõe o SIG do Rifte Araí.

	<i>Feature Dataset</i>	<i>Shapefile</i>	<i>Field</i>		
Database	Botelho <i>et al.</i> (2007) Alvarenga <i>et al.</i> (2007b) Dardenne <i>et al.</i> (2007) IG/TF (1998) Araújo & Alves (1979)	Geologia	Unidade Sigla Hierarquização Idade Modelo Litologias Ambiente Tectônico		
		Estruturas “pontuais”	Tipo da foliação Direção de foliação Mergulho da foliação	Tipo de Lineação Direção de Lineação Mergulho da lineação	Fraturas Direção de fratura Mergulho de fratura
	Estruturas “lineares”	Evento deformacional correlacionável Tipo Nome da estrutura			

Os trabalhos finais de graduação realizados pelo Instituto de Geociências da Universidade de Brasília são realizados, em sua maioria, na escala 1:50.000, com densidade de 16 pontos por km². A metodologia adotada nestes trabalhos consiste de: (i) fase pré-campo com confecção de relatório contendo a revisão bibliográfica da geologia regional e local existente e a interpretação fotogeológica da área a ser mapeada; (ii) fase campo, que concentra em um único mês a aquisição de dados estruturais e geológicos *in loco* e adequação das interpretações fotogeológicas a fim de, no término desta etapa, ter-se um esboço do mapa geológico da região e (iii) etapa final com análises petrográficas e geoquímicas, e interpretações dos dados adquiridos com objetivo de confecção de um mapa geológico e relatório final.

O mapa final do trabalho final de graduação do ano de 2005 foi apresentado em formato Arcview 3.1 (figura 70). Para a adequação das suas informações ao banco de dados geográficos com informações geológicas do Rifte Araí, foram utilizados os *shapefiles* das informações de geologia e de estruturas pontuais e lineares deste projeto. As informações deste projeto tiveram de ser adequadas à nova proposta estratigráfica de Alvarenga *et al.* (2007a). Devido às diferenças de escala, algumas unidades de pequena representação foram “englobadas” nas unidades maiores durante o processo de união. A indiscriminação dos tipos de falhas, fraturas e/ou lineamentos do trabalho de graduação dificultou a integração com os dados de Botelho *et al.* (2007), Alvarenga *et al.* (2007b) e Dardenne *et al.* (2007).

Os mapas de Alvarenga *et al.* (2007b), Botelho *et al.*(2007), Dardenne *et al.* (2007) e do IG/TF 2005 (figuras 69 e 70, respectivamente) mostram-se muito semelhantes, com pequenos problemas de deslocamento dos contatos, devido à diferença de escala, 1:100.000 e 1:50.000, respectivamente. A única diferença das unidades mapeadas ocorre na região nordeste da área de estudo relativa às fácies da Suíte Aurumina. No mapa de Dardenne *et al.* (2007), a unidade mapeada é PP2γ2au2 e PP2γ2au3, enquanto no mapa do IG/TF 2005 a unidade é mapeada como PP2γ2au1 (figura 71).

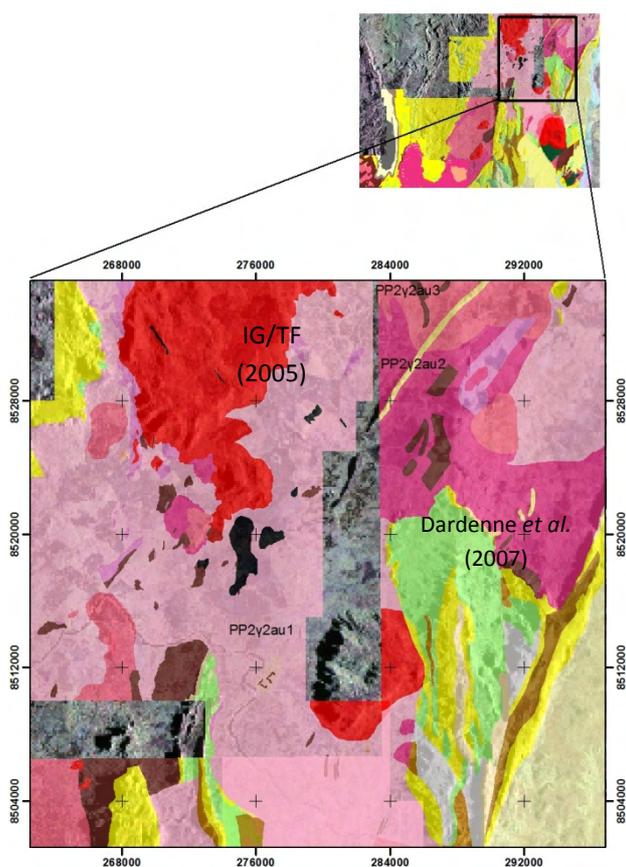


Figura 71: Conflito entre o mapeamento de Dardenne *et al.* (2007) e IG/TF 2005 na definição faciológica da Suíte Aurumina.

O mapa do trabalho final de graduação de 1998 apresentou problemas de digitalização para inclusão no banco de dados geográficos com informações geológicas do Rifte Araí devido à falta de informação de *datum* e sistema de coordenada. O procedimento adotado foi adequá-lo visualmente ajustando-o às imagens de sensoriamento remoto utilizando a rede de drenagens e outras características fisiográficas da região. A compatibilização entre a legenda deste mapeamento e o de Botelho *et al.* (2007) foi realizado com referência à escala 1:100.000. As informações de

estruturas lineares estavam classificadas como: dique, falha/fratura definida e falha/fratura indefinida. As medidas de foliações e lineações não foram recuperadas.

O Projeto Cana Brava- Porto Real (Araújo & Alves, 1979) abrangeu o mapeamento dessas duas cartas na escala 1:100.000. O mapa foi *scaneado* e digitalizado utilizando o aplicativo ARCSAN do ARCGIS 9.3. As informações compiladas foram analisadas e utilizadas na complementação do mapa desta tese, com adequação para a atual proposta estratigráfica. Este mapeamento não detalha as unidades geológicas limitando-se apenas em distinguir os quartzitos do Grupo Araí, alguns corpos de rochas metavulcânicas ácidas e rochas granito-gnáissicas da Suíte Aurumina. No entanto, a maior contribuição deste mapa é na porção oeste da área de estudo onde ocorrem as unidades estratigráficas mais novas do Grupo Araí (Formação Traíras: PP4ts2, PP4tq, PP4ts1). As medidas estruturais pontuais, tais como foliações, lineações e acamamento, extraídas deste mapeamento são poucas, indicando que provavelmente parte deste mapeamento foi realizada utilizando fotointerpretação.

5.3. Dados de geofísica e sensoriamento remoto

As imagens R99SAR, como visto nos capítulos 3 e 4, apresentam padrões texturais e estruturais das litologias aflorantes no região do Rifte Araí de excelente valor para interpretação geológica e estrutural. A exceção está nas áreas arrasadas onde afloram as rochas da Suíte Aurumina que praticamente perfazem 50% da área objeto de estudo (figura 57- URG19).

Neste sentido, para o melhor entendimento das relações lito-estruturais presentes nesta zona arrasada, e que são decisivas para a análise regional dos processos geológicos e estruturais da região de estudo, foram incorporadas ao banco de dados geográficos com informações geológicas do Rifte Araí, as imagens provenientes de aerolevantamentos geofísicos de gamaespectroscopia e magnetometria e imagens óticas dos sensores Landsat ETM+. Estas imagens, como será demonstrado nas próximas seções, “preenchem” essa área de informações e permitem a observação de elementos essenciais para a interpretação.

5.3.1. Dados Aerogeofísicos de Alta Densidade

A Superintendência de Geologia e Mineração da Secretaria de Indústria e Comércio de Goiás, com a participação da Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral do Ministério de Minas e Energia e o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) investiram entre 2004 e 2007 em campanhas de aerolevantamentos geofísicos magnetométrico e o gamaespectrométrico de alta resolução em todo o Estado de Goiás. O programa denominado de Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás foi dividido em três etapas e cinco blocos (LASA 2006, Figura 72). A terceira e última etapa deste programa, denominada de Paleo-neoproterozóico do Nordeste de Goiás, recobriu parte da área estudada. As especificações desse aerolevantamento estão listadas na tabela 21.

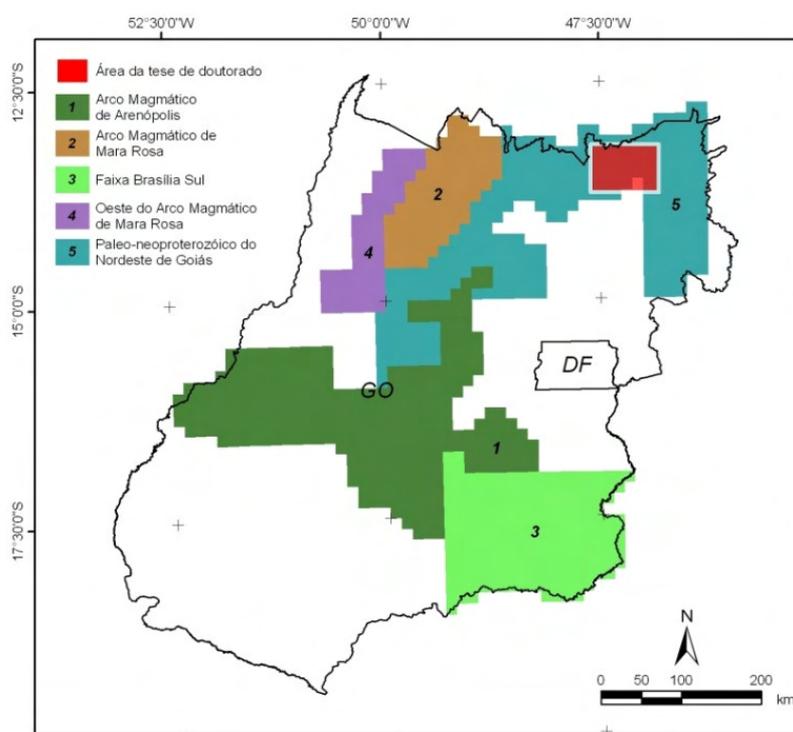


Figura 72: Localização das áreas do Projeto Levantamento Geofísico do Estado de Goiás.

Algumas das rotinas de pré-processamento dos dados foram realizadas pela própria empresa Lasa, responsável pelo aerolevantamento. Nas medidas magnéticas foram efetuadas a correção altimétrica, a remoção do IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*), a remoção da variação diurna do campo magnético terrestre e a remoção do erro de paralaxe do sistema e nivelamento. Em relação à gamaespectrometria, foram realizados a correção do *dead-time*, a correção do efeito *Compton*, de *background* e altimétrica, a correção de temperatura e pressão, o

nivelamento radiométrico, a correção do erro de paralaxe, a conversão das contagens em elementos de concentração, cálculo do fator de sensibilidade e conversão do dado em CPS para unidade de concentração (K%, U-Th - ppm e CT $\mu\text{R}/\text{h}$) (Chiarini, 2007).

Tabela 21: Atributos do aerolevanteamento geofísico do Bloco 3.

Aerolevanteamento BLOCO III	
Área Total (km ²)	50.440 km ²
Época de levantamento	01/05/2006 a 01/09/2006
Aeronave	Modelo 404 - Titan / Cessna
Direção de linhas de produção	NS (geográfico)
Espaçamento entre linhas de produção	500 metros
Direção das linhas de amarração	EW
Espaçamento das linhas de amarração	5000 metros
Altura média de voo	100 metros
Intervalo entre medições geofísicas	0,1s (mag) e 1,0s (gama)
Coordenadas métricas	UTM 23 S, <i>datum</i> SAD 69

As etapas de processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos foram realizadas pelo Geólogo Msc. Marcos F. N. Chiarini, CPRM- Goiânia e envolveram a análise da distribuição espacial e da consistência dos dados, seguida da definição do método de interpolação e célula unitária e geração de imagens magnéticas e gamaespectrométricas. Os dados foram processados no *Oasis Montaj GEOSOFT* versão 5.1.7 utilizando o mesmo método aplicado por Chiarini (2007) e Moura (2007) e seguindo as rotinas aplicadas no Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA) do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. As primeiras etapas de processamento foram comuns aos dois métodos: interpolação, geração de malha regular, determinação de célula unitária e micronivelamento. Os testes de consistência para os dados magnetométricos demonstraram problemas pontuais, em pequeno número, sem comprometimento.

O algoritmo de interpolação escolhido para o dado de magnetometria foi o *Bigrid*, método que leva em conta a tendência linear de aquisição dos dados geofísicos. Este processo de interpolação se dá em duas etapas: a primeira consiste na interpolação ao longo da linha original de levantamento, no caso NS, e a segunda etapa consiste na interpolação perpendicular às linhas de vôo (EW). Quanto ao dado Gama, este foi

interpolado segundo o algoritmo Curvatura Mínima, cujo resultado corresponde à superfície suavizada com valores próximos aos dados de origem (Keckler, 1994).

A utilização de célula unitária quadrática deve ter entre $1/4$ e $1/8$ do espaçamento da linha de voo, a fim de evitar a perda de informação e aparecimento do efeito *aliasing* ou incorporação de frequências altas sem solução nas baixas frequências (Vasconcelos *et al.*, 1990). Com linhas de voo de 500 metros, o valor de 125 m ($1/4$ da linha de voo) forneceu os melhores resultados.

Para realizar o micronivelamento foi utilizada a sub-rotina *microlevel.gs*. Para eliminar o efeito da amostragem anisotrópica, aplicam-se filtros distintos em direções ortogonais (paralela e perpendicular a linha de voo) (Minty, 1991; Blum, 1999).

5.3.1.1. Magnetometria

A magnetometria é um método potencial que se baseia nas variações locais do campo magnético em rochas que apresentam susceptibilidade magnética. Nas rochas, a magnetização pode ser induzida ou remanescente. Segundo Gunn (1998), a indução magnética é o produto da interação do campo magnético da terra com os minerais magnéticos das rochas, resultando em um momento magnético. A medida é diretamente proporcional a susceptibilidade magnética do material e tem o mesmo sentido do campo magnético terrestre. A magnetização remanescente é ocasionada por ações de processos termais, químicos e físicos sobre os materiais que podem desenvolver alinhamentos permanentes do magnetismo nos grãos minerais. Essa magnetização independe da direção do campo magnético terrestre e pode diferir significativamente em magnitude e direção do momento magnético induzido.

Gunn *et al.* (1997) sintetizaram essas possíveis transformações da intensidade magnética a partir da alteração de fatores da função do campo magnético. Estes fatores relacionam-se à profundidade das fontes, forma dos corpos, direção de magnetização e latitude magnética. Utilizando esta conceituação os seguintes produtos foram gerados para a área de estudo:

- (i) Campo Magnético Anômalo (CMA, figura 73): trata-se do campo resultante da concentração de minerais magnéticos nas rochas e é produto base para a geração dos demais. A resposta deste produto possui caráter bipolar e embora não auxilie na interpretação das anomalias nos corpos causativos, auxilia na interpretação do arranjo estrutural profundo;

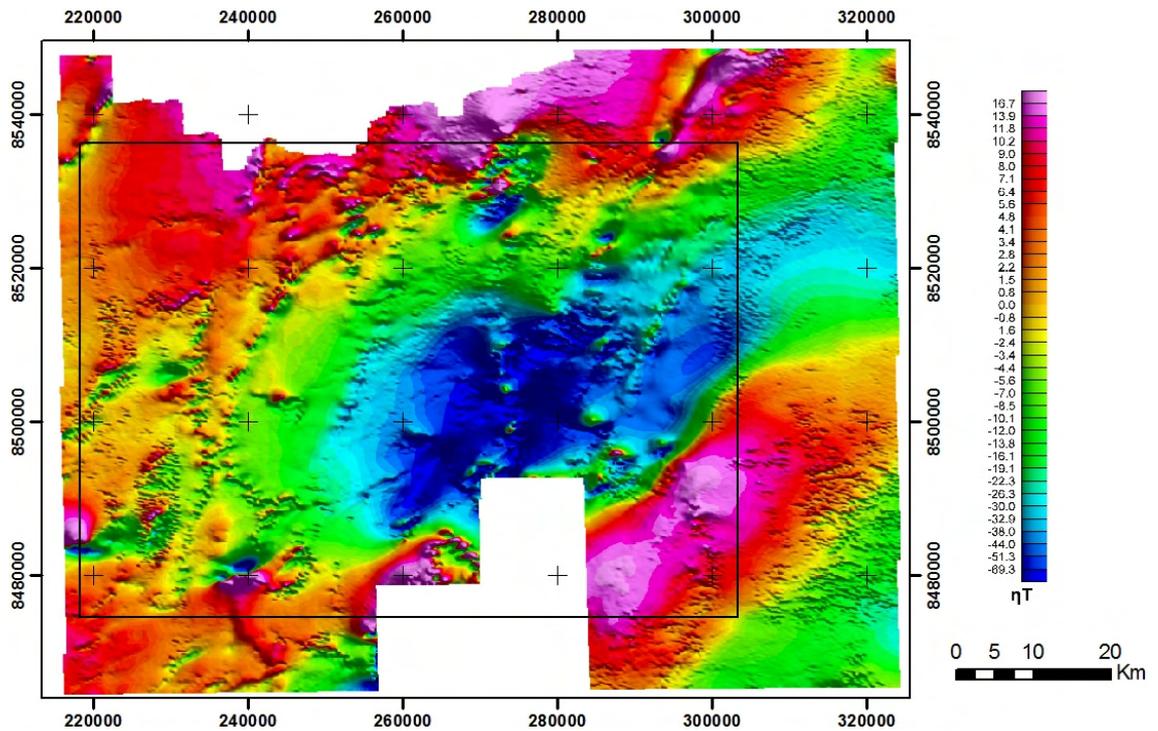


Figura 73: Imagem do campo magnético anômalo. O retângulo preto indica o posicionamento da área de estudo.

- (ii) Primeira Derivada Vertical (Dz, figura 74): trata-se de uma técnica para o estudo das informações de alta frequência que existem nas fontes mais superficiais, em função da eliminação das baixas frequências regionais (Blakely, 1996). Comumente localiza os limites dos corpos magnéticos e os limites entre as anomalias destes corpos. É dada por:

$$\frac{\partial}{\partial z} G(x, y, z) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{G(x, y, z) - G(x, y, z - \Delta z)}{\Delta z}$$

(Eq.16)

onde, $G(x, y, z) - G(x, y, z - \Delta z)$ são valores do campo potencial em dois pontos distintos e Δz é a distância vertical entre estes dois pontos;

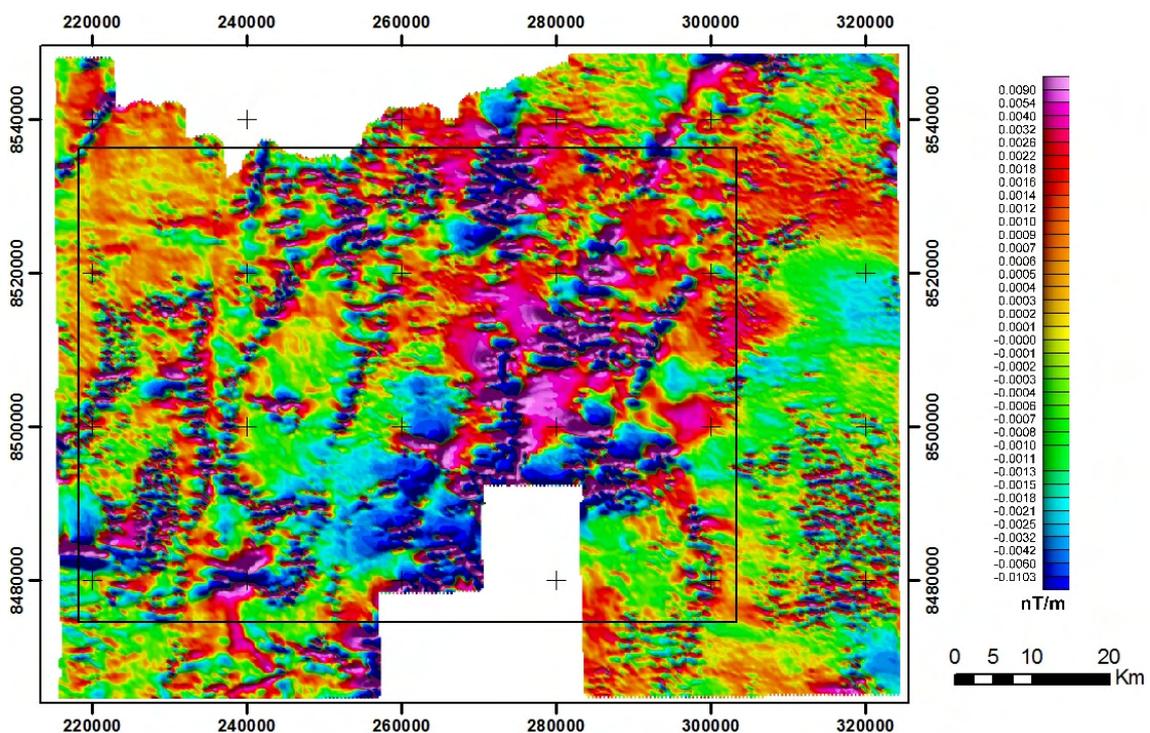


Figura 74: Imagem da primeira derivada vertical. O retângulo preto indica o posicionamento da área de estudo.

(iii) Amplitude do Gradiente Horizontal Total (AGHT, figura 75): segundo Nabighian (1984), realça as regiões com gradiente magnético mais elevado, delimitando melhor os contatos e estruturas magnéticas lineares. O Gradiente Horizontal de uma anomalia de campo potencial indica mudanças laterais abruptas de propriedade física, sendo a magnitude do gradiente horizontal resumida na seguinte formulação matemática:

$$h(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial G(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G(x, y)}{\partial y}\right)^2}$$

(Eq.17)

onde: ∂x = derivada na direção x, ∂y = derivada na direção y, D = campo magético medido;

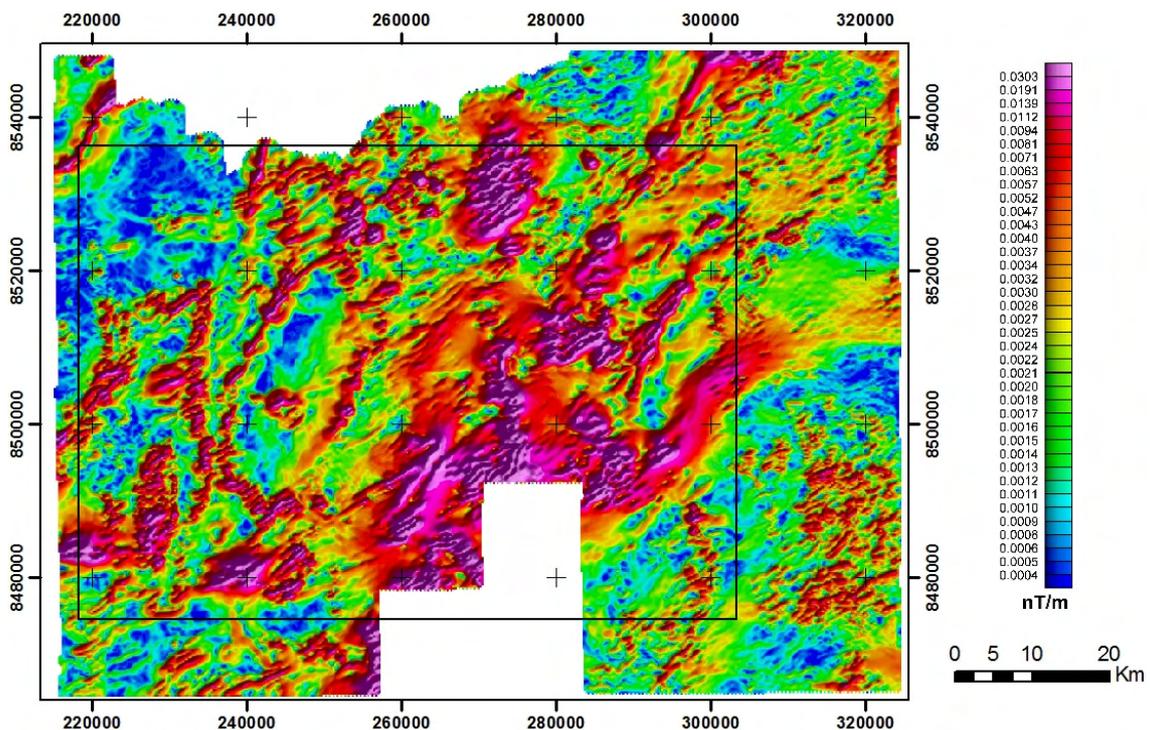


Figura 75: Imagem da Amplitude do Gradiente Horizontal Total com derivadas nas direções 45e 135 graus. O retângulo preto indica o posicionamento da área de estudo.

- (iv) Amplitude do Sinal Analítico (ASA, figura 76): com este processamento o posicionamento das fontes magnéticas torna-se coincidente com a amplitude máxima da anomalia, o que resulta em assinaturas complexas monopulares e contatos magnéticos melhor representados (MacLoad *et al.*, 1993). É dada por:

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

(Eq.18)

onde: $\frac{\partial G}{\partial x}$, $\frac{\partial G}{\partial y}$ e $\frac{\partial G}{\partial z}$, são derivadas horizontais nas direções x, y e verticais em z;

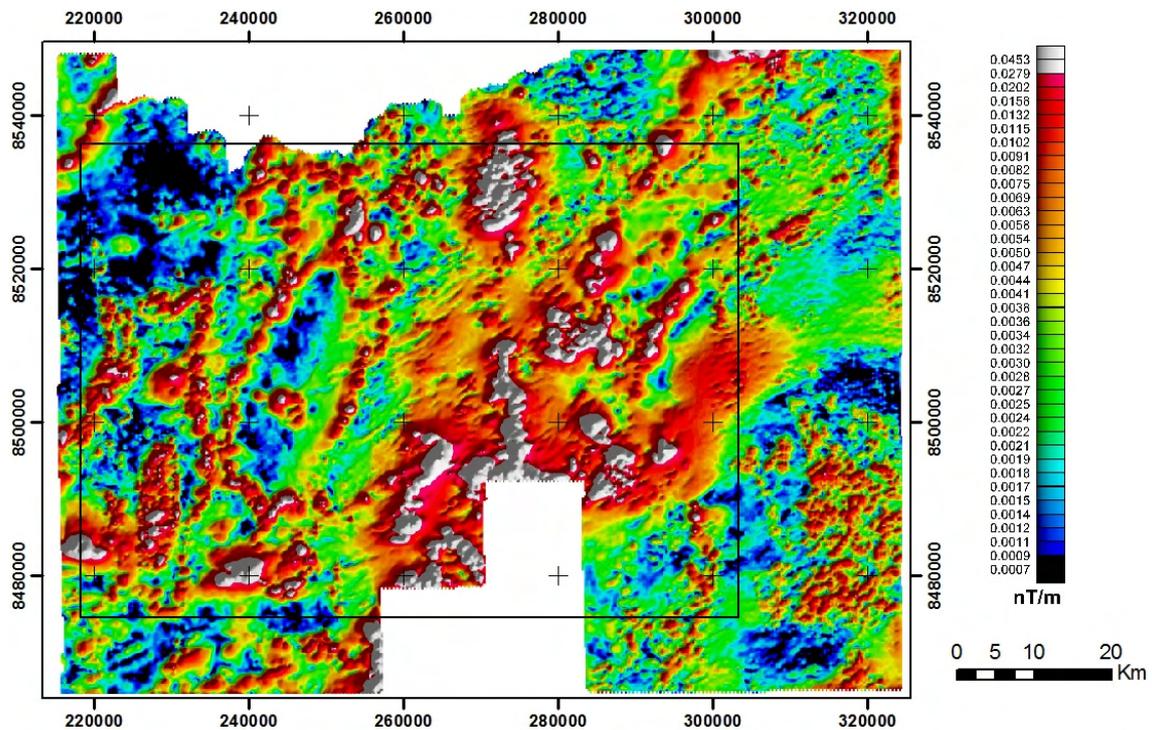


Figura 76: Imagem da amplitude do sinal analítico. O retângulo preto indica o posicionamento da área de estudo.

- (v) Inclinação do Sinal Analítico (ISA, figura 77): mostra a variação do relevo magnético, realçando principalmente lineamentos e foliações magnéticas. O cálculo é dado pelo arcotangente da razão entre a derivada vertical e o gradiente horizontal conforme a equação:

$$ISA = \text{ArcTan} \frac{D_z}{AGHT}$$

(Eq.19)

onde: D_z = derivada na direção x, $AGHT$ = amplitude do gradiente horizontal total;

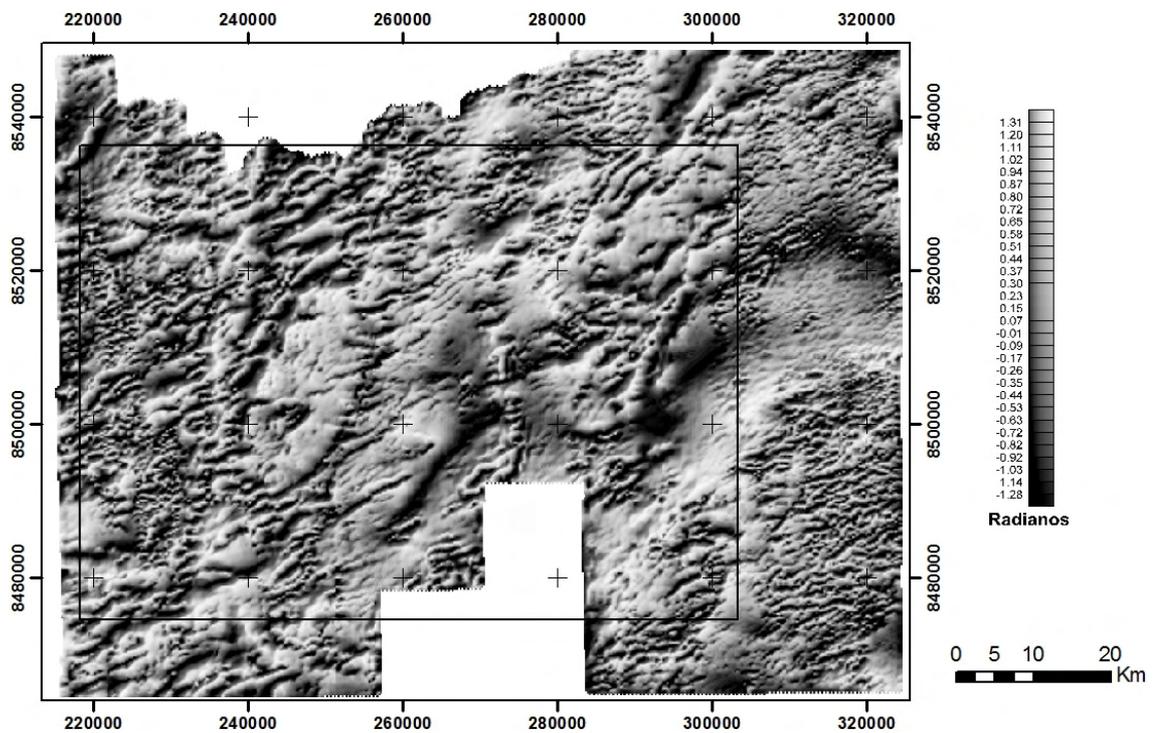


Figura 77: Imagem da inclinação do sinal analítico. O retângulo preto indica o posicionamento da área de estudo.

5.3.1.2. Gamaespectrometria

A radiação gama detectada próximo à superfície terrestre resulta da desintegração de elementos radioativos decorrentes da instabilidade no núcleo do átomo radioativo que libera energia pela emissão das partículas α , β e γ . Embora vários elementos tenham isótopos radioativos, somente o potássio (K) e as séries de decaimento do urânio (U) e do tório (Th) possuem radioisótopos que produzem raios gama com energia e intensidade suficientes para serem medidos (Minty, 1997).

A gamaespectrometria é obtida através da captação da energia na janela energética de 0,41 a 2,81 MeV, estabelecida pela contagem total, e em subjanelas centradas em 1,46, 1,76 e 2,61 MeV para os elementos K, Th e U, respectivamente (figura 78). Os produtos gerados para estes dados foram:

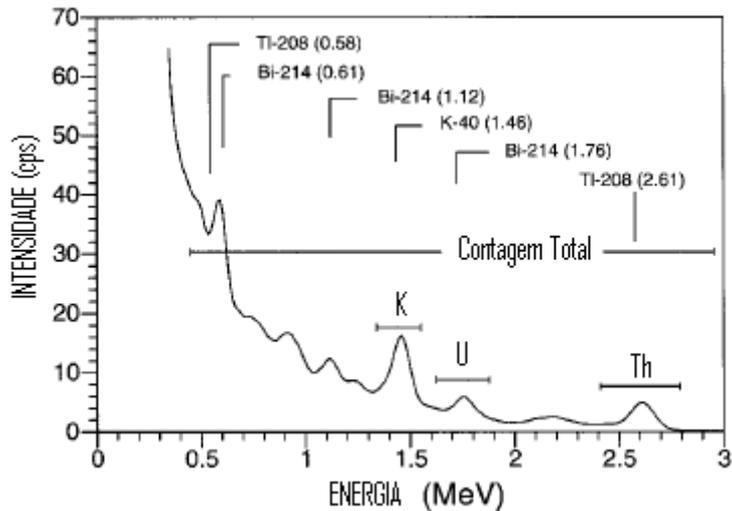


Figura 78: Intervalo de energia captado pelo canal da contagem total.

- (i) Canal de Contagem Total (CT, figura 79): define os domínios com maior emissão de radiação gama de interesse das Geociências;

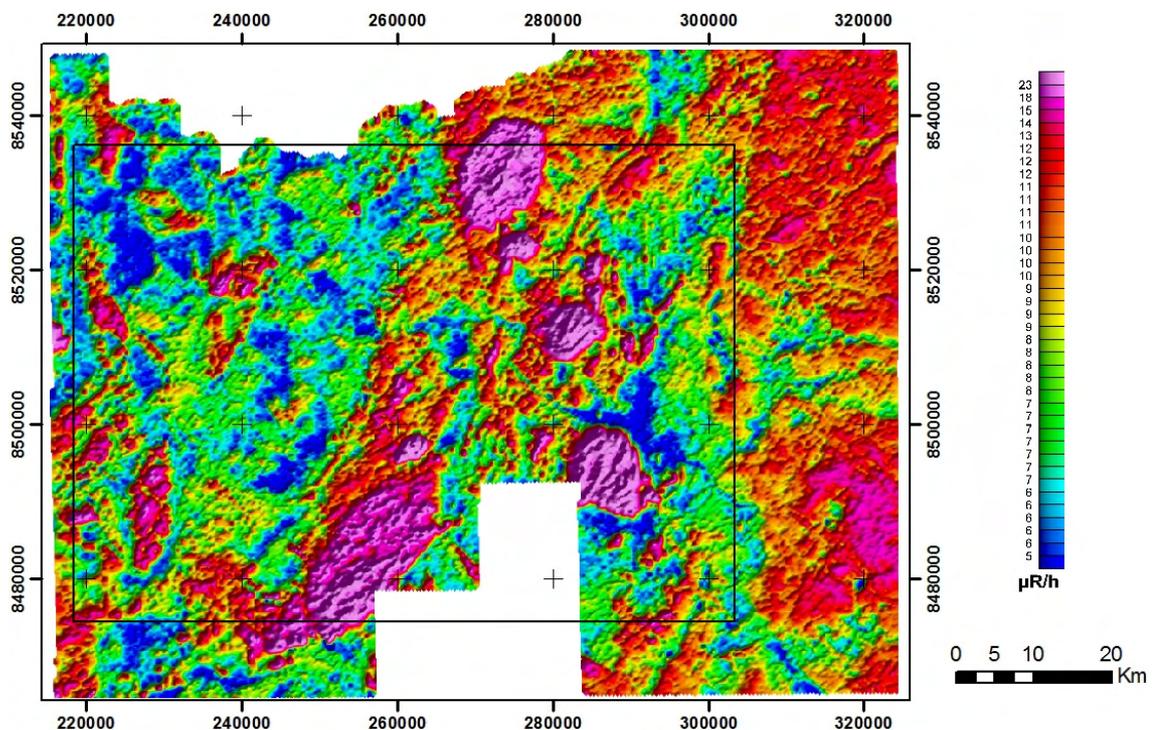


Figura 79: Imagem gamaespectrométrica do canal da contagem total. O retângulo preto indica o posicionamento da área de estudo.

- (ii) Canal do Potássio (K, figura 80): o potássio é um componente abundante na crosta terrestre com concentração média de 2,5%. A maior parte do K ocorre em álcali-feldspato (principalmente ortoclásio e microclínio) e micas (biotita e muscovita) em rochas félsicas, principalmente granitóides. Em rochas máficas e ultramáficas possuem concentrações bem menores (Sordi, 2007). Pode ser transportada na forma de argilominerais para aluviões e vales;

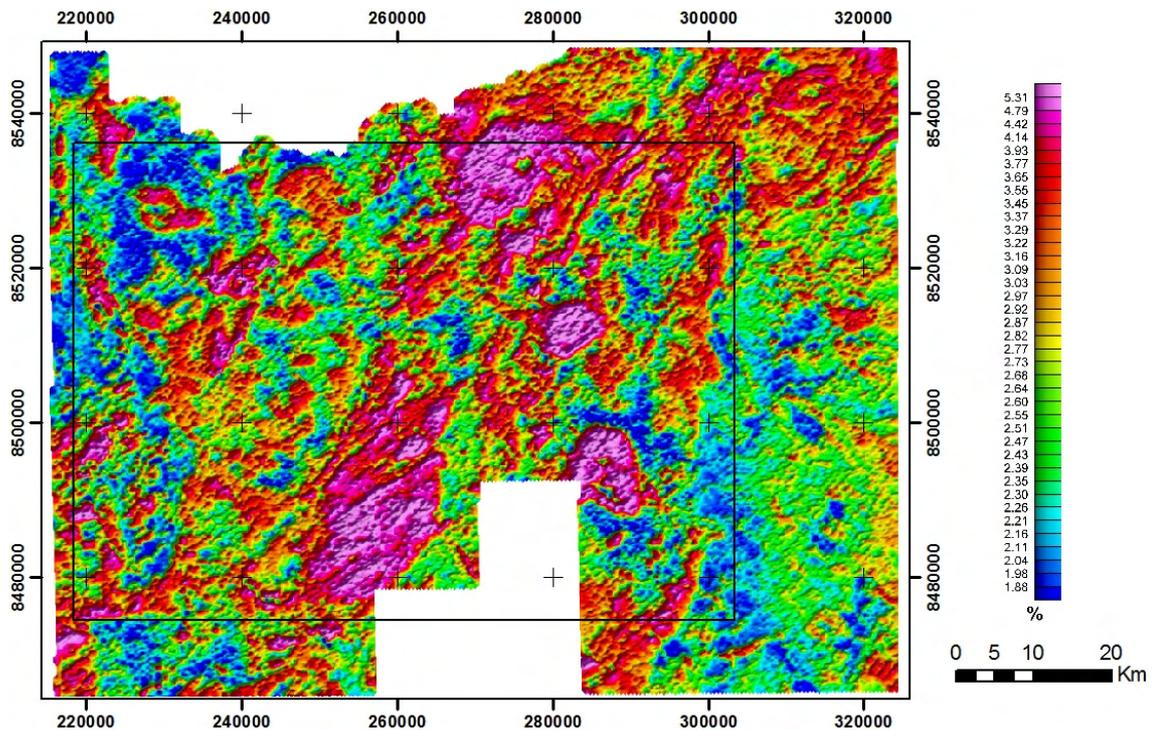


Figura 80: Imagem gamaespectrométrica do canal de potássio. O retângulo preto indica o posicionamento da área de estudo.

- (iii) Canal do Tório (Th, figura 81): o tório apresenta concentração média de 12ppm na crosta terrestre; é constituinte de minerais acessórios como zircão, monazita, alanita, xenotima, apatita e titanita. Esse elemento possui pequena mobilidade em relação ao intemperismo, sendo considerado o canal ideal para mapeamento litológico;

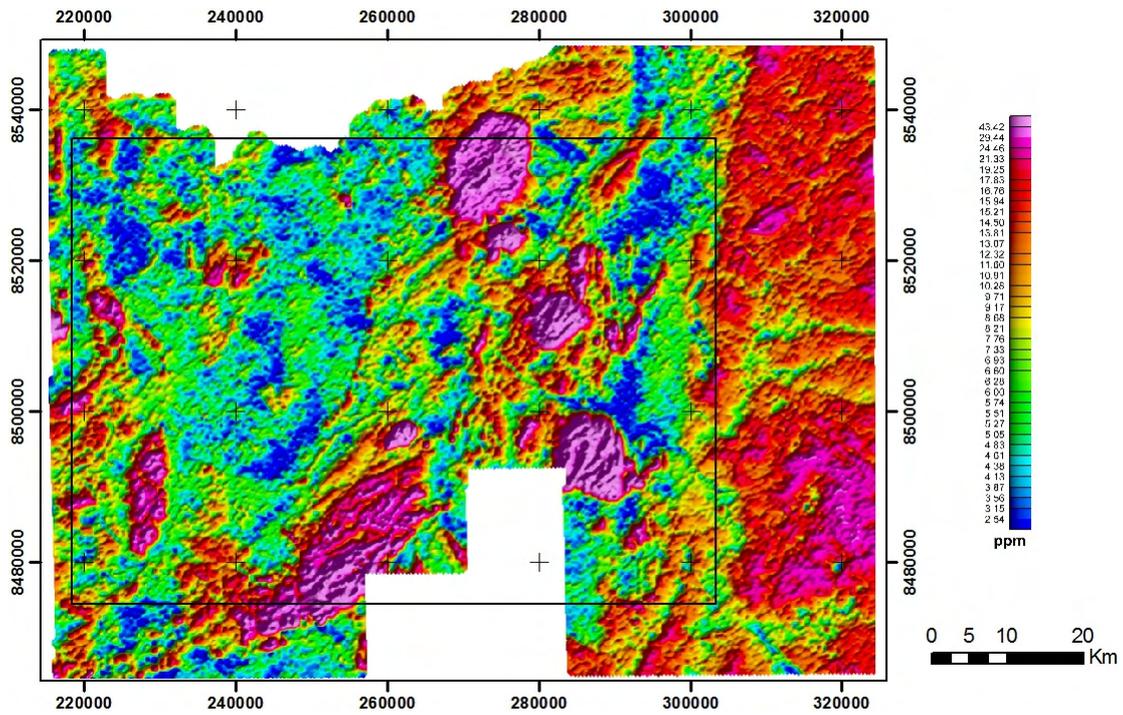


Figura 81: Imagem gamaespectrométrica do canal do tório. O retângulo preto indica o posicionamento da área de estudo.

- (iv) Canal do Urânio (U, figura 82): o urânio normalmente está associado a minerais acessórios como zircão, apatita, alanita, monazita e titanita, tendo concentração aproximada na crosta terrestre de 3ppm. É comum em pegmatitos, sienitos, carbonatitos, granitos e alguns folhelhos;

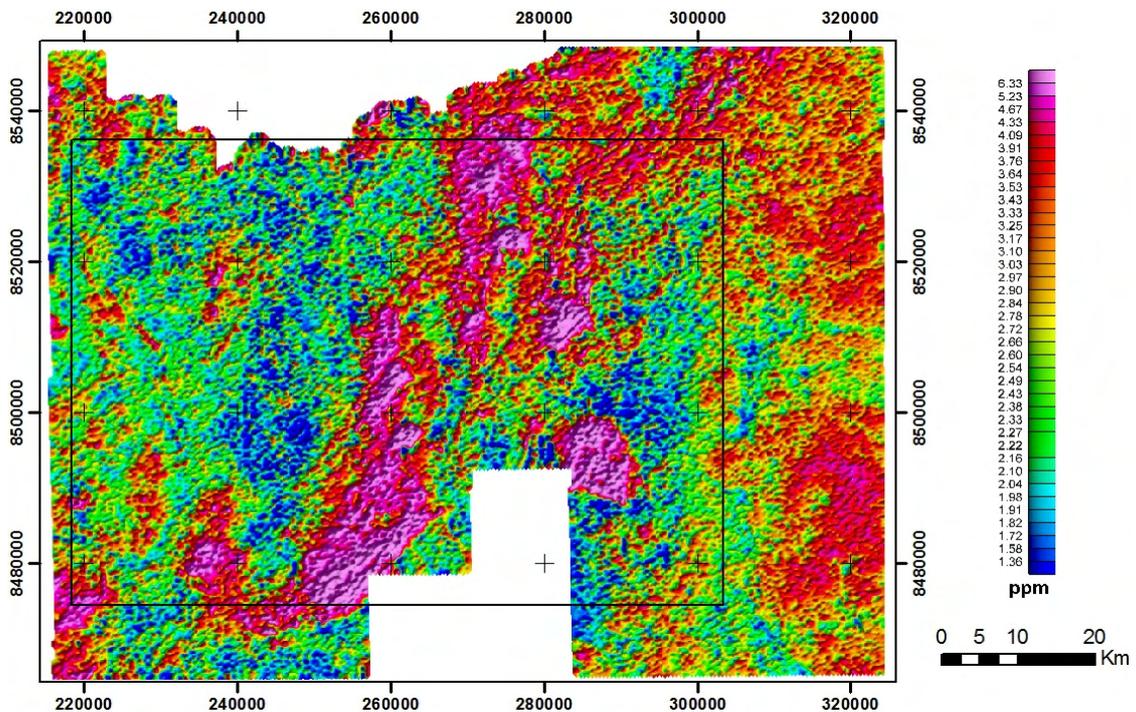


Figura 82: Imagem gamaespectrométrica do canal do urânio. O retângulo preto indica o posicionamento da área de estudo.

(v) Mapas de Razões (Th/K, U/Th e U/K, figura 83): as razões têm sido aplicadas para ressaltar estruturas com enriquecimento de um elemento em relação a outro e para realce de regiões onde atuaram processos de alteração hidrotermal secundariamente, pelo enriquecimento de potássio. Em particular, o mapa de razão Th/K serve como guia para separar zonas de alteração potássica de outras anomalias relacionadas a variações litológicas normais, em função do tório não acompanhar o enriquecimento de potássio durante os processos hidrotermais (Shives, 1997 *in* Moura, 2007). O enriquecimento do urânio em relação ao tório também aponta alvos exploratórios, sobretudo quando essas assinaturas são combinadas com outros dados geofísicos. Além desses fatos, esta operação anula erros ocasionados durante o processo de aquisição dos dados, tais como, efeito *Compton* e altura variável de vôo;

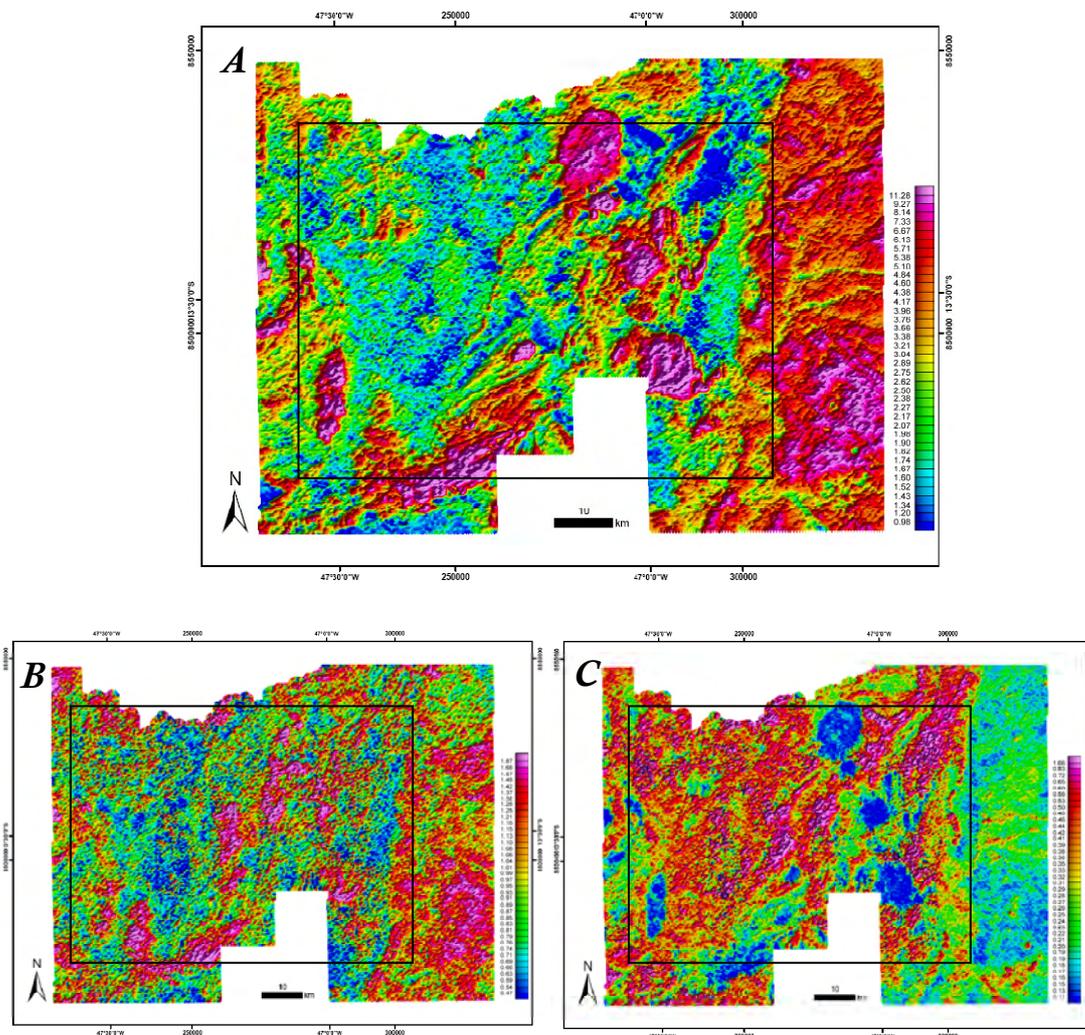


Figura 83: Imagens demonstrando as razões entre os dados de Th/K (A), U/Th (B) e U/K (C). O retângulo preto indica o posicionamento da área de estudo.

- (vi) Composições coloridas falsa-cor: processamento digital que integra através de espaços de cores RGB e/ou CMY, três dados de origens distintas. No caso de imagens gama, fazem-se imagens ternárias utilizando cores RGB e CMY para dados K, Th e U (figura 84).

5.3.1.3. *Discussão dos produtos gerados*

A análise dos dados magnetométricos distingue quatro domínios magnéticos subdivididos em relação à localização espacial e ao tipo de respostas obtido nos diversos produtos gerados (figura 85).

O domínio magnetométrico A apresenta um baixo magnetométrico associado a rochas da Suíte Aurumina que carecem de mapeamento e análise mineralógica.

A região definida pela letra B (figura 85) apresenta como característica marcante as altas respostas magnetométricas relacionadas a rochas metavulcânicas ácidas (PP4a α , Formação Arraias - Grupo Araí). Essas rochas afloram em pequenas extensões (>15m) e intercalada as unidade de quartzito feldspático (PP4aqf, Formação Arraias - Grupo Araí) que predominam nesta região. A presença de megadobras com eixos alinhados na direção NS a NNE é a característica mais marcante identificadas com facilidade na imagem da Amplitude do Gradiente Horizontal Total (figura 75). Lineamentos NNE paralelos aos eixos das megadobras são as estruturas mais comuns nesse produto.

Na análise do Campo Magnético Anômalo (CMA) é possível identificar, no centro leste da imagem (C, figura 85), uma anomalia de caráter regional bipolar invertida provavelmente profunda e relacionada provavelmente a um momento magnético (magnetismo remanescente?). A suspeita de remanescência deixa dúvidas na hora de traçar lineamentos em produtos filtrados do campo anômalo, pois todas as imagens produzidas apresentam interferência desta anomalia regional que provavelmente mascara as anomalias de alta frequência originadas por fontes mais rasas. No entanto, nota-se claramente altos magnetométrios associados aos granitos da Suíte Aurumina indicando a presença de minerais magnéticos nestas rochas.

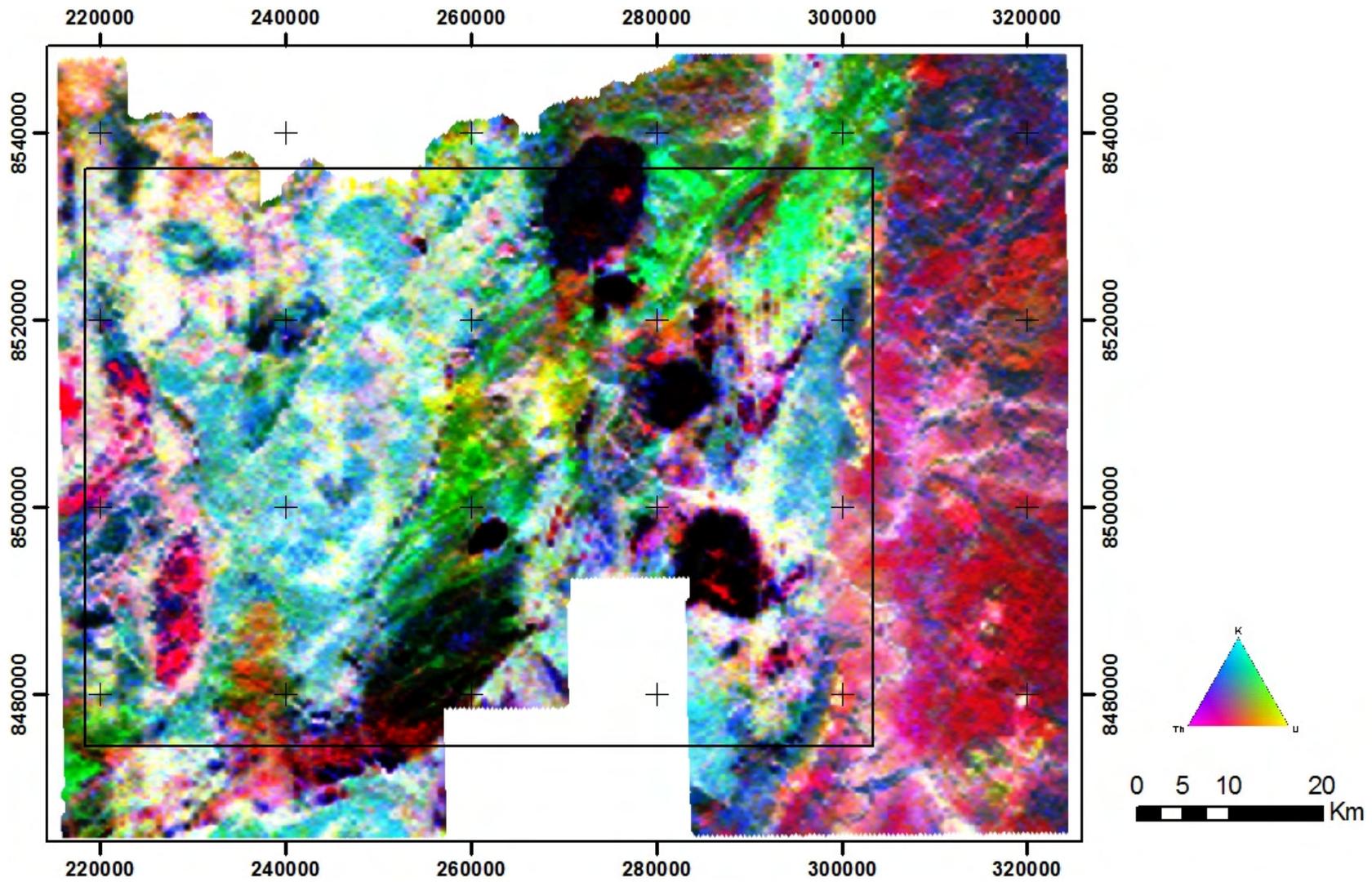


Figura 84: Imagem ternária CMY entre os canais de K,eTh e eU. O retângulo preto indica o posicionamento da área de estudo.

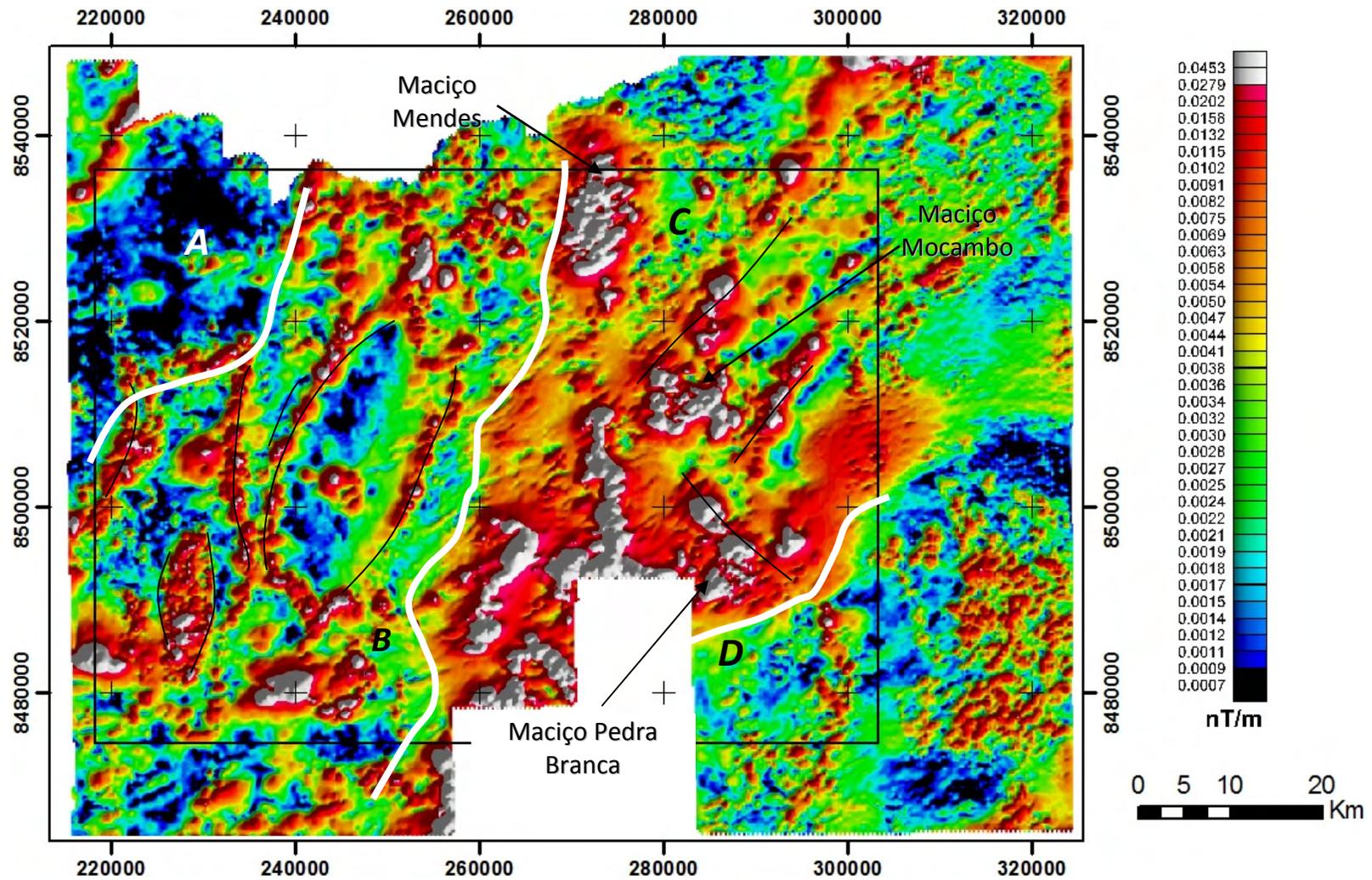


Figura 85: Amplitude do Sinal Analítico com as subdivisões dos grandes domínios magnéticos (A, B, C e D) e dos maciços graníticos da Suíte Pedra Branca. O retângulo preto indica o posicionamento da área de estudo.

O domínio leste da área, representado pela letra D, figura 85, apresenta as respostas médias e constantes da área de estudo. Os lineamentos presentes no mesmo são localizados e não apresentam um padrão único: ao norte o lineamento dos minerais magnéticos é nordeste, ao sul não é observada direção preferencial marcante e na região sudoeste novamente observa-se o lineamento NE.

Os produtos dos canais gamaespectrométricos de contagem total (figura 79) e do tório (figura 81) possibilitaram interpretações em termos estruturais e composicionais da região de baixo topográfico, interpretada como URG 19 nos dados do R99SAR (figura 57). Essa unidade representa uma área de praticamente 50% da área de estudo e possui pouca densidade de elementos de relevo e drenagem sendo o processamento dos dados gamaespectrométricos focado no realce dessa região.

Durante o processo foi observado que anomalias muito altas relacionavam-se aos corpos graníticos da Suíte Pedra Branca, Macicos Mocambo, Pedra Branca, Mendes, Soledade e Sucuri e que estes “mascaravam” possíveis feições de menor intensidade que ocorrem na Suíte Arumina. Nesse sentido, os dados de melhor caráter interpretativo (Th e CT) foram reprocessados na tentativa de melhorar essas informações.

No produto da contagem total foi aplicado o filtro de gradiente horizontal a fim de realçar as zonas de borda. Neste processo, as zonas de contato entre baixo e alto valor são realçadas, tal qual se observa na figura 86. Este processamento realçou os contatos dos corpos graníticos da Suíte Pedra Branca (Pedra Branca, Mocambo, Mendes e Sucuri) destacando-se do Granito Mendes, situado ao norte da área, com feições geofísicas sugestivas de variações faciológicas em concordância com IG/TF (2005) (figura 87).

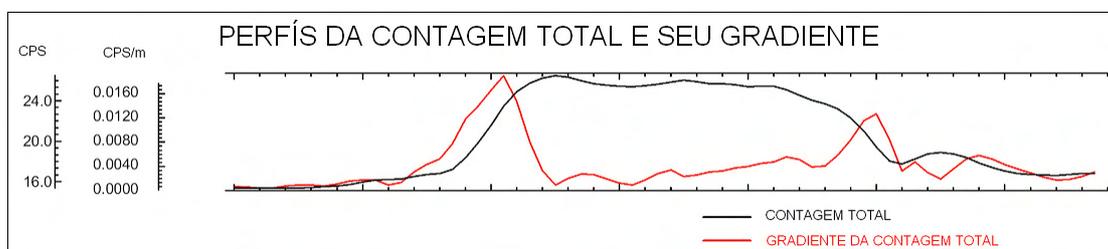


Figura 86: Perfis da contagem total e do seu gradiente (derivada). Mostra os limites do dado gama bem marcado como picos no perfil do gradiente.

Optou-se por reprocessar o canal de tório inicialmente suprimindo os altos valores e utilizando como fator de corte 12ppm. Após esse processo, elevou-se os resultados ao quadrado para expandir os valores e, assim, aumentar a amplitude e o contraste da imagem resultante (figura 88). Os valores superiores a 12 ppm foram encontrados nas áreas de afloramentos do Grupo Bambuí, da Suíte Pedra Branca e em áreas localizadas na Suíte Aurumina, principalmente nas rochas mapeadas como PP2γ2au2 (monzogranitos e biotita-muscovita granito) e a litologia PP4ts2 da Formação Traíras/ Grupo Araí.

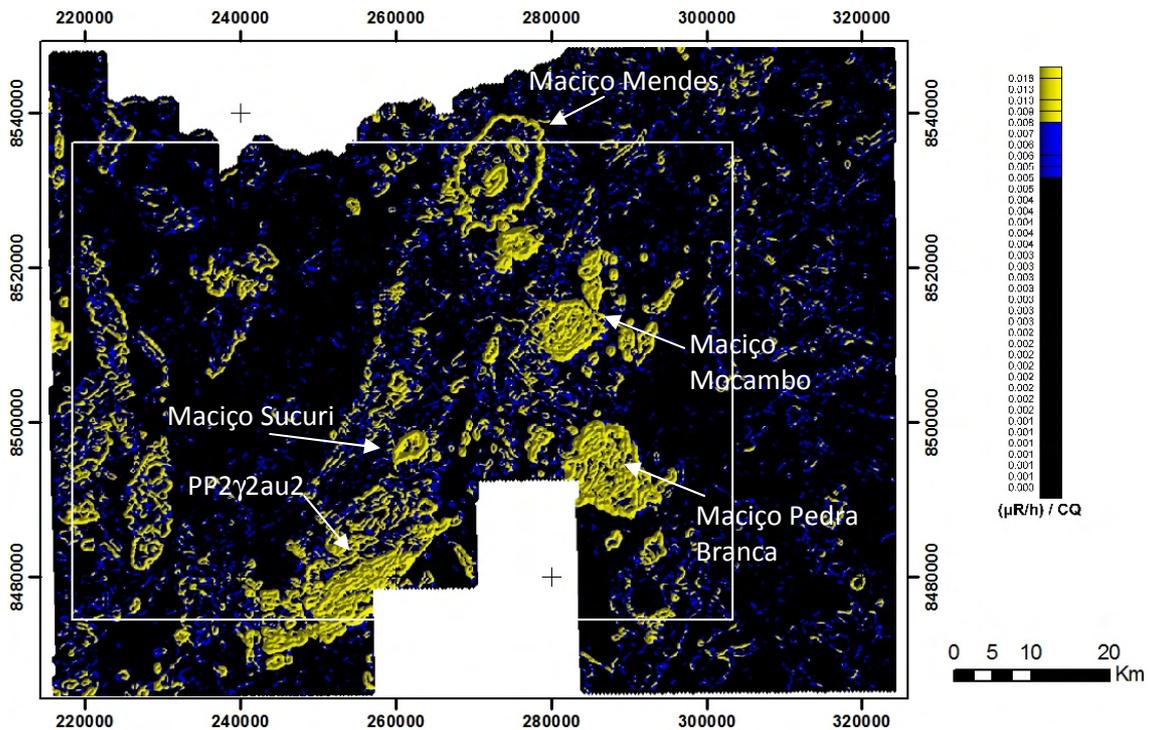


Figura 87: Imagem do gradiente do canal da contagem total. O retângulo em branco indica o posicionamento da área de estudo.

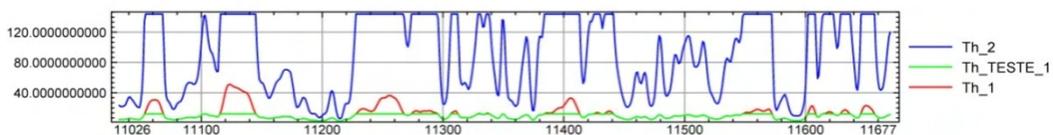


Figura 88: Perfil indicando as mudanças ocorridas na imagem processada para o canal do tório. A linha em vermelho (Th_1) apresenta os dados originais, a linha em verde os dados “recortados” para os valores superiores a 12ppm e a linha em azul os dados amplificados ao quadrado.

Nesse novo produto com os valores do canal do tório expandidos (figura 89) também foi aplicada a variação da técnica do gradiente horizontal total. O produto final desta sequência de processamento (figura 90) apresenta uma qualidade excelente

para interpretação do arcabouço das rochas da Suíte Aurumina, destacando-se um lineamento N60E muito penetrativo nesses terrenos arrasados, onde afloram as rochas da Suíte Aurumina, que não foram observados nos mapeamentos existentes.

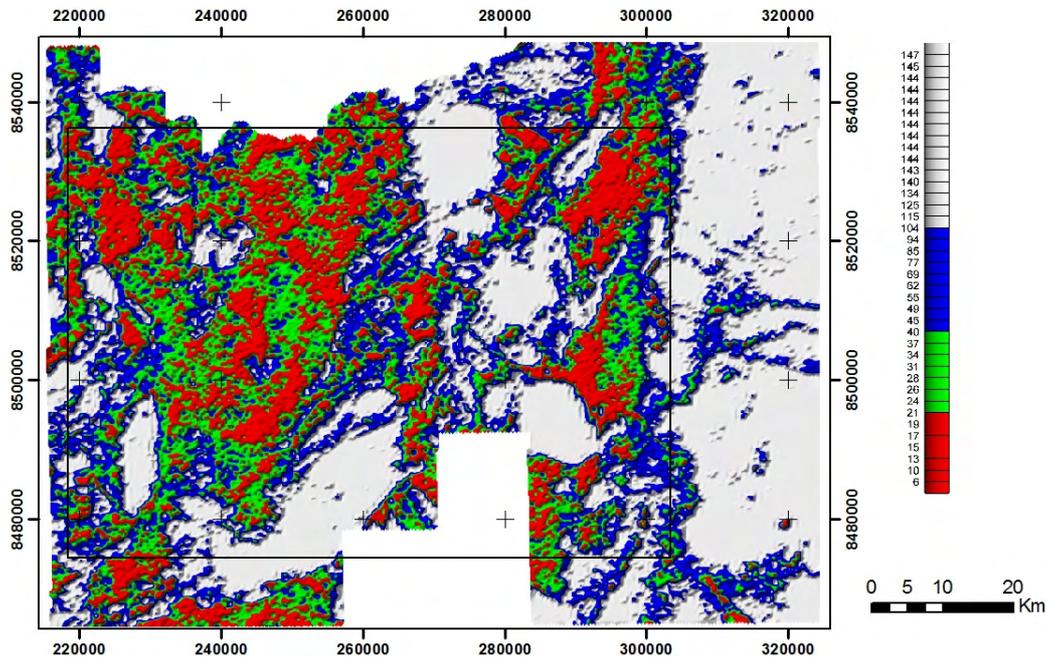


Figura 89: Imagem do canal do Tório filtrada para valores superiores a 12ppm. O retângulo preto indica o posicionamento da área de estudo.

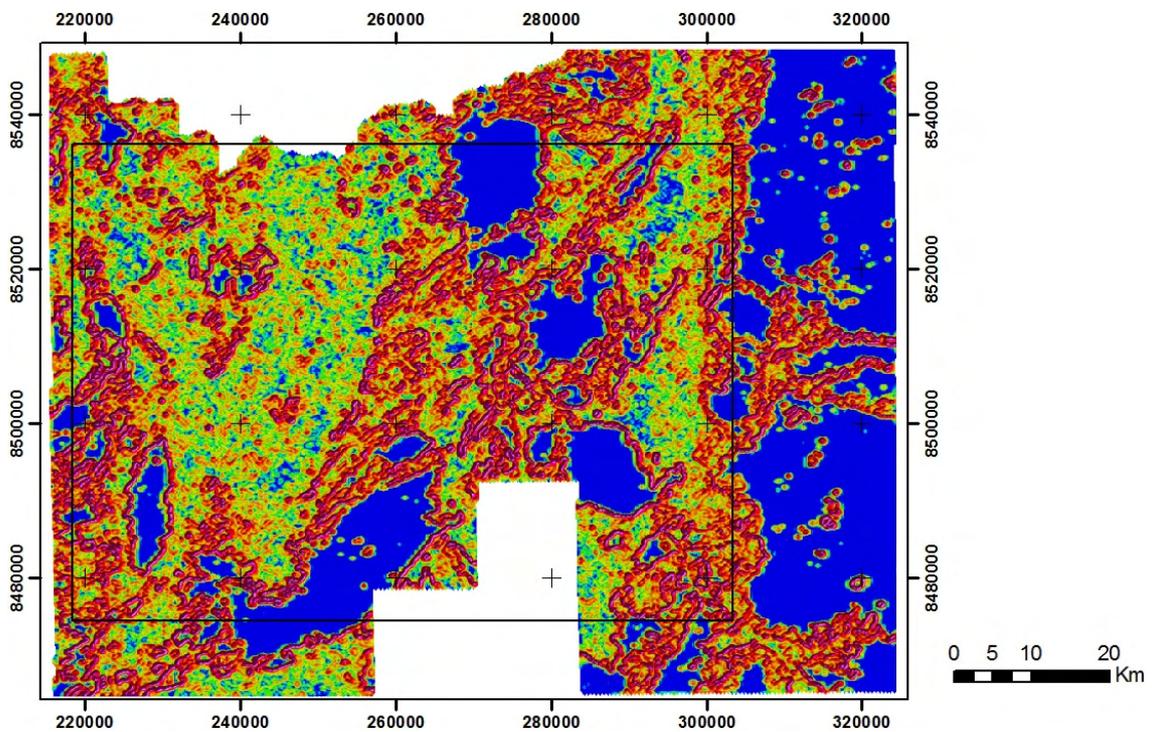


Figura 90: Imagem do gradiente horizontal do canal do Tório filtrada para valores superiores a 12ppm. O retângulo preto indica o posicionamento da área de estudo.

5.3.2. Dados Orbitais Landsat ETM+

As imagens Landsat ETM+ que recobrem a área de estudo, ao todo duas cenas (221/069 e 221/070, tabela 22), foram obtidas no site <http://glcfapp.umiacs.umd.edu/index.shtml>. Essas imagens estão ortorretificadas e possuem precisão cartográfica de aproximadamente 1,5pixel (50m) (http://glcf.umiacs.umd.edu/data/guide/technical/techguide_geocover.pdf).

Tabela 22: Especificações das imagens Landsat ETM+ utilizadas na área

Imagem	Bandas	Tamanho de pixel (m)	Sistema de Coordenada	Sun Azimuth (graus)	Sun Elevation (graus)
221_069	6 (VIS) + 1 (PAN)	28.5 14.5	UTM 23S WGS84	48.4396076	45.7197097
221_070	6 (VIS) + 1 (PAN)	28.5 14.5	UTM 23S WGS84	47.5585192	44.5921832

Esses dados possuem respostas relativas a interações entre a radiação eletromagnética e alvo distintas do aerolevante SAR e, portanto, podem trazer informações distintas desta área. As características de sombreamento da imagem R99SAR, por exemplo, dificultaram em alguns pontos a extração de drenagens e de quebras de relevo e a imagem ETM+ foi utilizada para auxiliar a extração conjunta dessas feições. A caracterização espectral de algumas litologias também serviu para o mapeamento litológico cartográfico das unidades aflorantes na região da carta de Porto Real (Almeida *et al.*, 2008a). Os processamentos realizados, tais como divisão de bandas, filtragem, principais componentes, fusão de imagens, entre outros, não serão descritos (para detalhamento consultar Lillesand & Kiefer, 1987; Novo, 2008; Crósta, 1993). As imagens resultantes estão demonstradas na figura 91 e foram incorporadas ao SIG apresentado no Anexo 2.

5.3.3. Dados SRTM

Os dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) são modelos digitais de elevação, com aproximadamente 90 metros de resolução espacial, obtidos a partir de interferometria de radar. Segundo as agências norte-americanas NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*), o cálculo da elevação da superfície possui precisão vertical de 16 metros (90% de confiança) (Santos *et al.*, 2005). Estes dados vêm sendo utilizados em diversas pesquisas geológicas como ferramenta na análise estrutural (Huandong *et al.*, 1993).

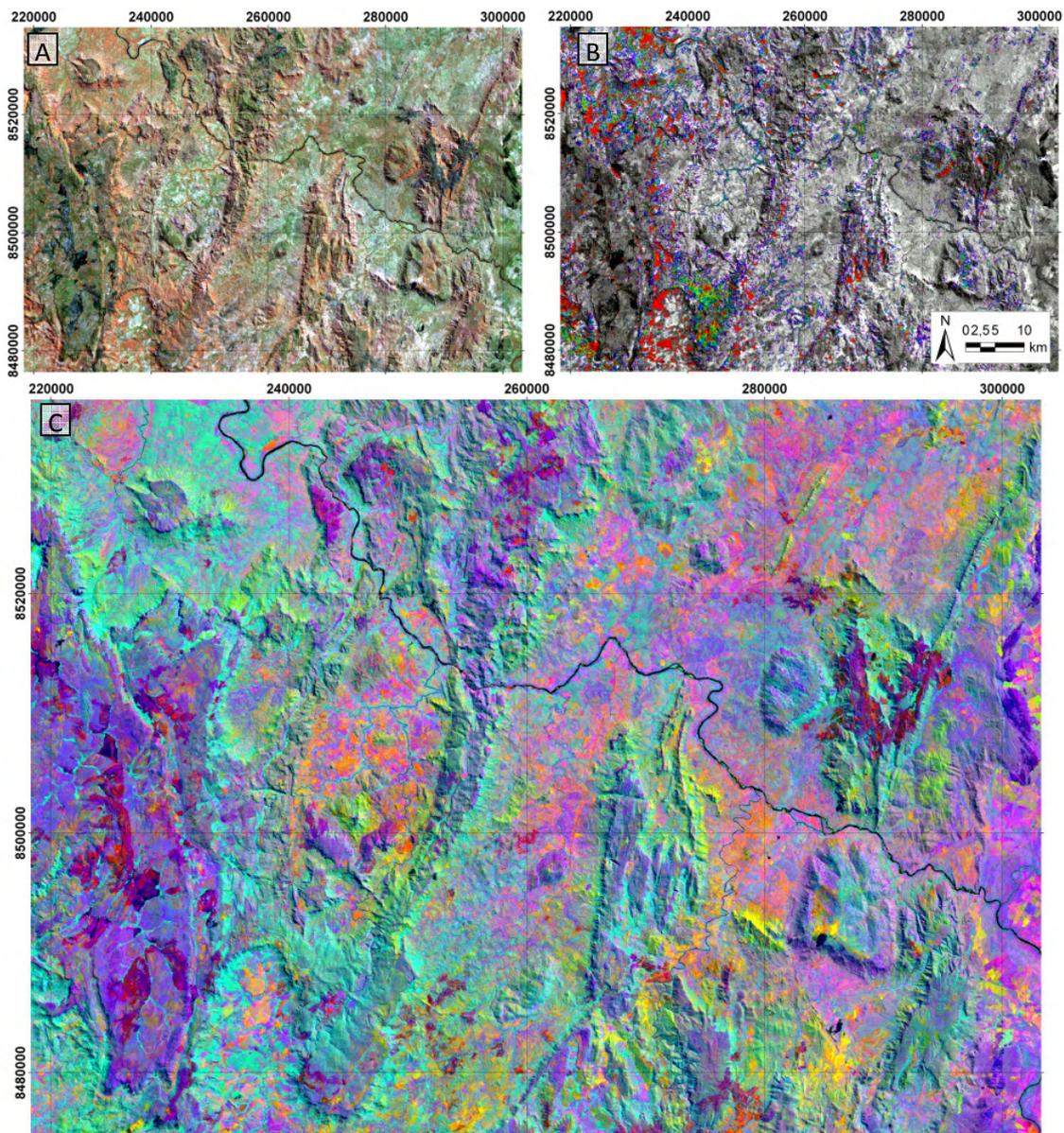


Figura 91: Imagens resultantes do processamento das imagens ETM+ do satélite Landsat. (A) Imagem falsa cor RGB entre as bandas 5/4/3; (B) Imagem NDVI sobreposta a banda 4; (C) Imagem falsa cor RGB entre as bandas obtidas pelo processamento por principal componente PC1/PC2/PC3.

Dados SRTM foram utilizados nesta tese como dados altimétricos para a correção geométrica dos dados R99SAR e ALOS/PALSAR e na geração de visualização 3D dos dados Landsat e radar de abertura sintética (figura 92).

5.4. Fusão de Dados

A fusão de imagens utilizando técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) objetiva a elaboração de produtos com maior quantidade de informação

possível, unindo em uma única imagem informações de naturezas distintas e, por vezes, complementares (Henderson & Lewis, 1998; Drury, 2001). A integração entre dados SAR e dados geofísicos proporciona fusões de informações topográficas e texturais (radar) com medidas de variações químicas da superfície (radiometria) e de diferentes domínios magnéticos associados à sub-superfície (Carrino *et al.*, 2008). Em relação à integração entre dados ópticos e SAR pretendeu-se enfatizar a informação espacial (texturas e estruturas) e espectral.

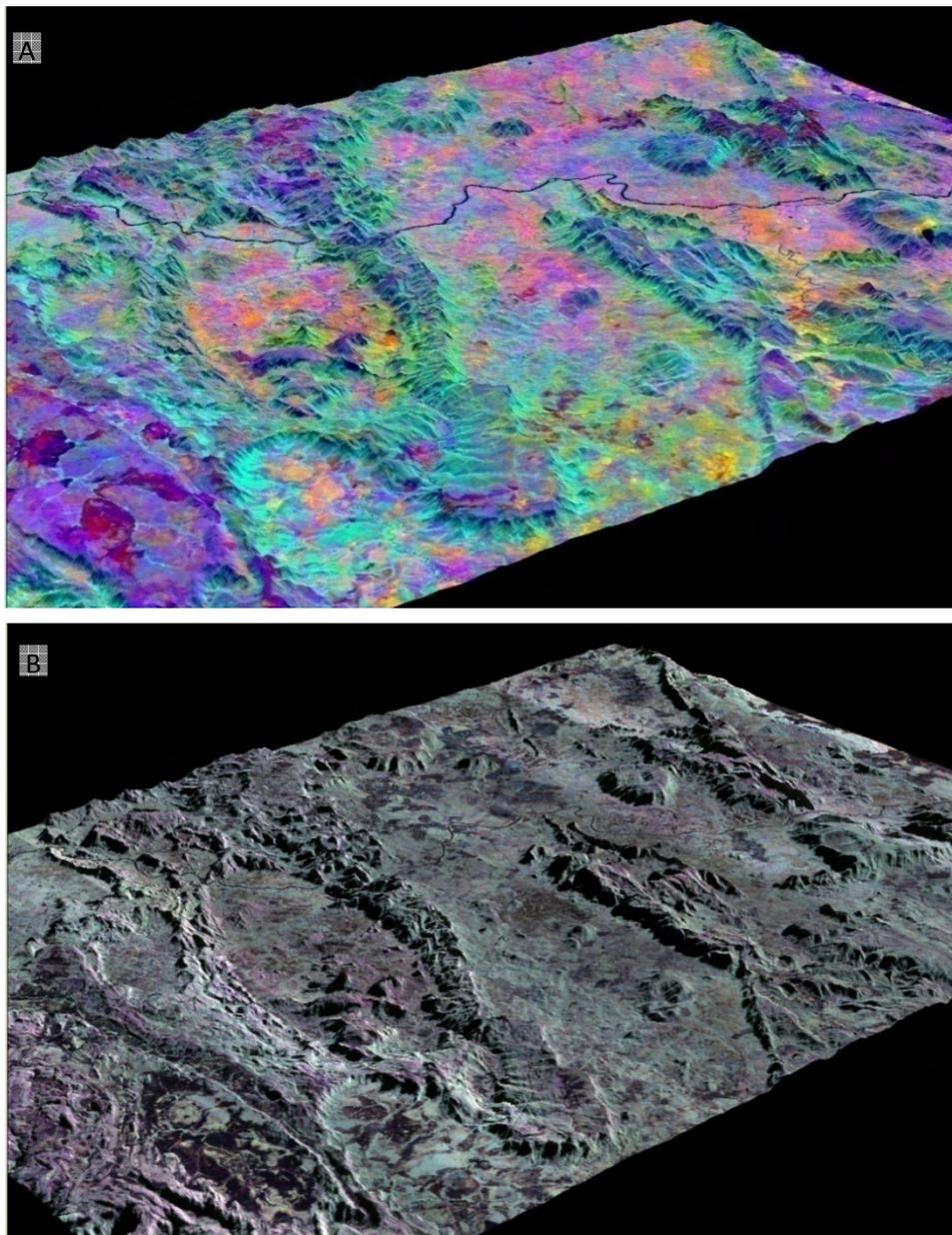


Figura 92: Visualização 3D falsa cor dos dados (A) Landsat PC1/PC2/PC3 e (B) R99 HH/HV/VV.

Na área de estudo foram priorizados os processos de fusão entre dados magnetométricos e gamaespectrométricos, pois como visto no item 5.3.1.3. (Discussão dos produtos gerados) as informações desses produtos são complementares aos dados R99SAR, principalmente quando observadas as áreas de relevo arrasado onde afloram as rochas da Suíte Aurumina.

Entre os métodos de fusão de dados multifonte, destaca-se o IHS, que consiste em uma técnica que explora o espaço de cores da intensidade (*Intensity*), matiz (*Hue*) e saturação (*Saturation*). Esse procedimento tem sido amplamente abordado nos trabalhos de mapeamento geológico, na fusão de dados radar com gama e mag (Harris *et al.*, 1994; Carrino *et al.*, 2008). O primeiro passo nessa técnica consiste na transformação do sistema de cores RGB para o IHS. Neste último, as cores são representadas através de três componentes: intensidade (Intensity - I), matiz (Hue – H) e saturação (Saturation –S). A componente intensidade (I) é a medida do brilho de uma determinada cor, a matiz é o comprimento de onda dominante da cor observada e a saturação é o grau de pureza da cor (Mather, 1991). Após a conversão de sistemas, a componente intensidade é substituída pela imagem radar e, em seguida, é realizada a transformação IHS-RGB.

Nesta tese, as imagens geofísicas “fusionadas” estavam em pseudocores, com exceção da imagem ternária RGB utilizada, que foi composta pelas informações dos canais de K, Th e U, respectivamente. As imagens resultantes deste processo estão apresentadas na figura 93 e encontram-se anexadas ao projeto do ARCREADER apresentado no DVD do anexo 2.

5.5. *Interpretação dos dados*

A interpretação preliminar dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos foi realizada pelo Geólogo Msc. Marcos F. N. Chiarini (CPRM- Goiânia, figura 94). Esta interpretação foi realizada sem conhecimento geológico prévio da área e, portanto, não apresenta tendências. As estruturas obtidas nessa etapa preliminar de interpretação demonstram o arranjo entre a estruturação NE e NW na área de estudo, tal qual observado para os dados R99SAR. As relações temporais entre essas estruturações não são muito bem definidas nessa análise.

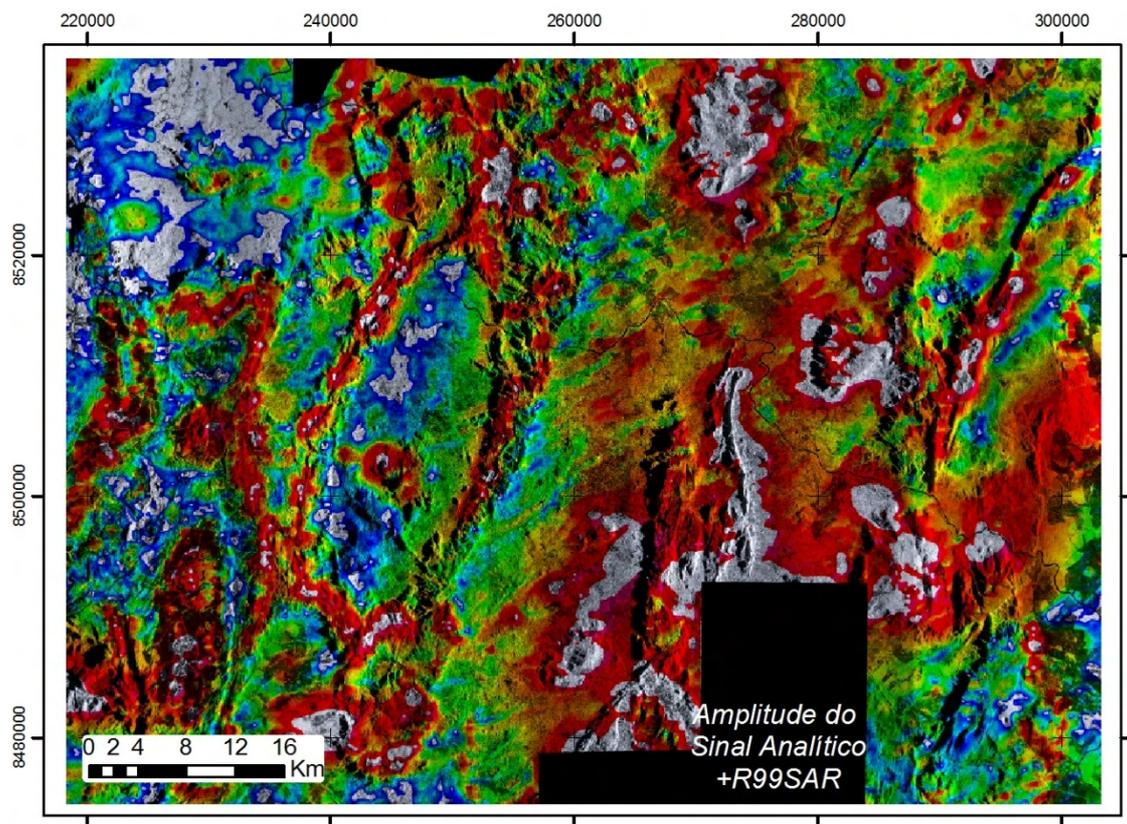
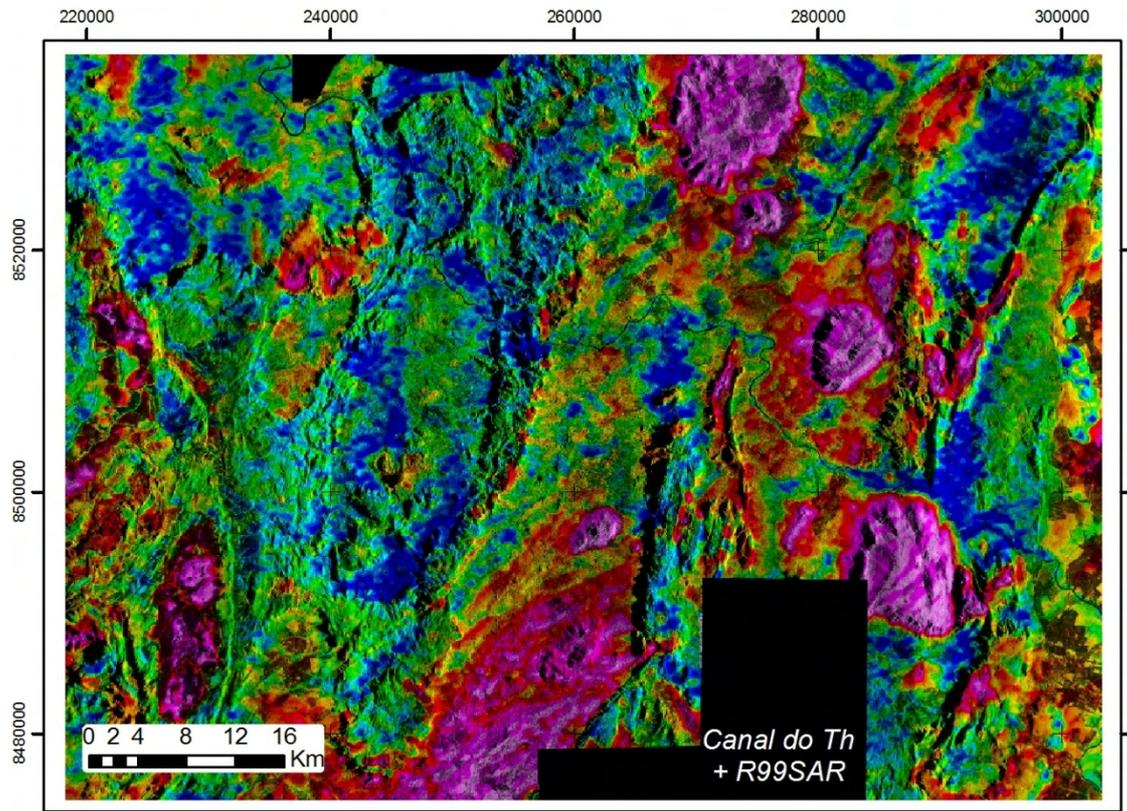


Figura 93: Imagens resultantes da fusão dos dados R99SAR e geofísica.

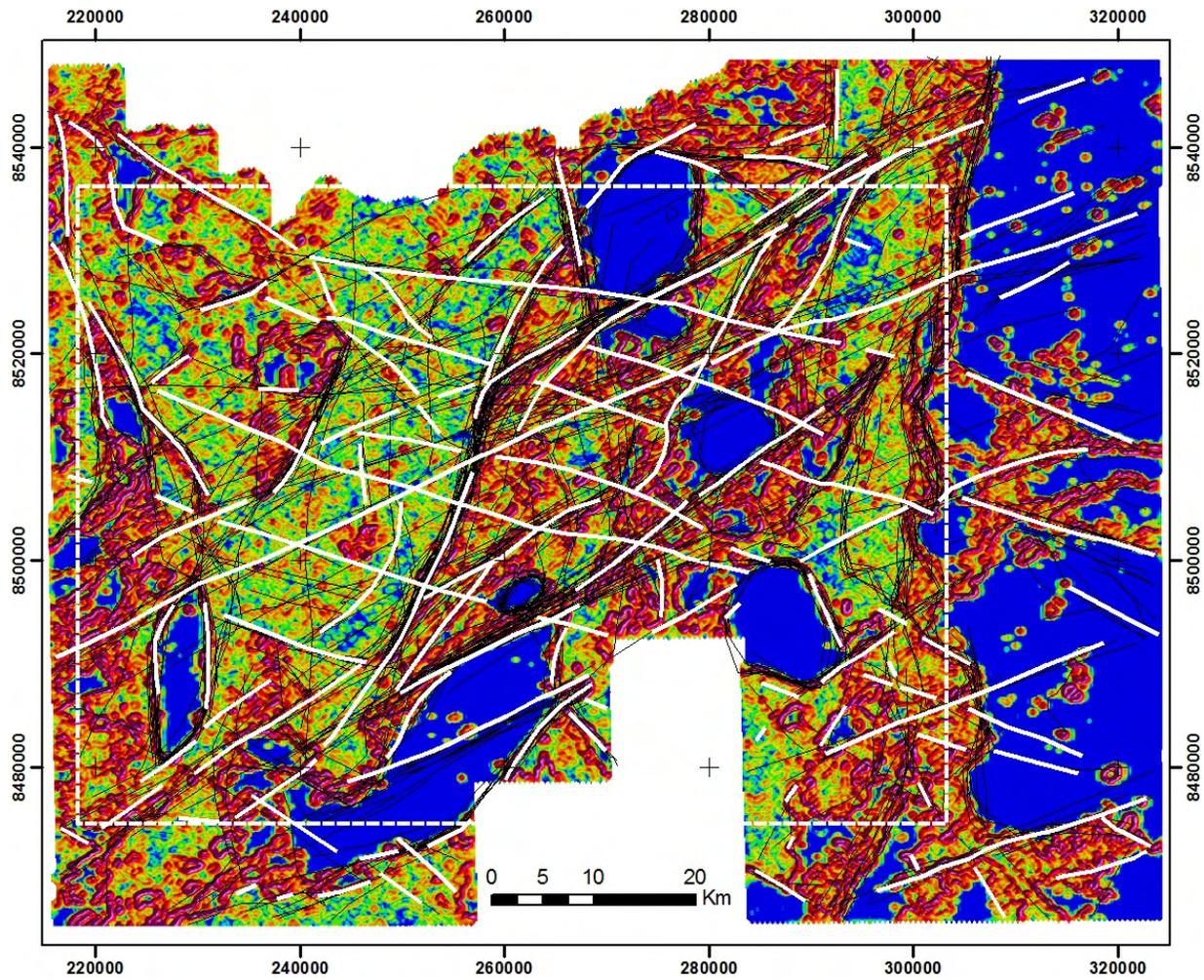


Figura 94: Interpretação dos dados mag e gama para a área de estudo sem o conhecimento prévio da mesma. O retângulo branco indica o posicionamento da área de estudo.

A análise integrada dos dados apresentados neste capítulo (magnetométricos, gamaespectrométricos, multiespectrais e de mapeamentos geológicos pretéritos) permite as seguintes observações para as unidades aflorantes na região de estudo:

- ✓ Formação Ticunzal (PP1tzx; PP1tzip): com pequenas ocorrências, aflora restritamente em janelas da unidade da Suíte Aurumina. Não tendo sido identificadas nos produtos magnetométricos, gamaespectrométricos e R99SAR.
- ✓ Suíte Aurumina (PP2γ3au1; PP2γ3au2; PP2γ3au3; PP2γ3au4): essa suíte, que compõe grande parte da área de estudo, apresenta composição granítica com variações locais entre termos tonalíticos, sieno à monzogranitos. Nas imagens SAR e ópticas, são identificadas como áreas de relevo arrasado com baixa densidade de feições lineares. Variações entre as fácies dessa suíte (PP2γ3au2 e PP2γ3au3) são muito bem demarcadas nos produtos gamaespectrométricos com a fácies PP2γ3au2 exibindo um alto retorno nos canais de contagem total, tório e urânio. Na porção centro-leste, o reprocessamento dos dados do tório e da contagem total realçou zonas de forte lineamentos N60E que podem variar localmente para NE, não observados nas imagens de sensoriamento remoto. Os dados magnetométricos também indicam um forte lineamento nesta unidade, no entanto concentrados em NNE (paralela à direção observada na unidade NP2qfm). No extremo noroeste da área, onde segundo o mapeamento de Araújo & Alves (1979) afloram rochas dessa suíte, que na época eram classificadas como Complexo Basal Gnáissico Migmatítico, os resultados da análise dos dados gamaespectrométricos são bastante distintos e coincidem com as ocorrências de rochas de composição mais tonalíticas (?). Nessa área noroeste, os lineamentos assumem direções NW destacados nas imagens de radar.
- ✓ Quartzo-diorito Nova Roma (PP2γ3nr): essa unidade ocorre restritamente próxima a cidade de Nova Roma. É delimitada por falha compressional a oeste, em contato direto com o quartzito arcoseano do Grupo Araí e, ao norte, com o corpo da Suíte Pedra Branca. Apresenta relevo arrasado com baixa concentração para os elementos potássio, tório e urânio. Os dados Landsat e R99SAR permitem a individualização deste corpo através do parâmetro de

densidade de drenagem e sua falta de estruturação; os dados R99SAR indicam a presença de áreas agricultadas nesta unidade.

- ✓ Suíte Pedra Branca (PP4γpb1; PP4γpb2): são maciços graníticos intrusivos que se destacam em todos os produtos gerados. Nas imagens SAR, a forma em cúpula de alto topográfico contrasta com as rochas da Suíte Aurumina, normalmente encaixantes e com contatos bem definidos. Lineamentos na direção NW no interior dos corpos Pedra Branca, Mocambo e Mendes (porção leste da área) são nitidamente observados nas imagens R99SAR e ópticas já tendo sido mapeados no trabalho final de graduação de 2005. Os corpos Soledade e o Sucuri (centro sul da área) apresentam lineamentos NE presentes em suas bordas e, internamente, orientações de foliação NNE a NS; sendo que o Maciço Sucuri pode ser interpretado como uma mega clasto rotacionado (figura 95). Nos dados gamaespectrométricos, o baixo contraste entre os corpos intrusivos da Suíte Pedra Branca com o embasamento granito-gnáissico da Suíte Aurumina não permitem definir com clareza os seus contatos, tal qual se observa nas imagens SAR. Como descrito anteriormente, o resultado do reprocessamento do canal da contagem total indica a existência de possíveis variações faciológicas no Granito Mendes, situado no extremo norte da área de estudo. Regionalmente, os lineamentos de direção NE destacam-se nas imagens gama e os de direção NS nos produtos de sensoriamento remoto radar e ópticos.
- ✓ Grupo Araí/ Formação Arraias (PP4aqa; PP4aqo; PP4aqf; PP4aqs; PP4aβ; PP4aα; PP4as; PP4acg): sendo um conjunto de rochas quartzíticas, metassiltitos e metavulcânicas de sistema tipo rifte, sua variedade composicional impossibilita a distinção de uma única assinatura gamaespectrométrica, radargramétrica, magnetométrica ou mesmo espectral. As variações topográficas desta unidade são da ordem de centenas de metros e as rochas apresentam-se fortemente alinhadas e com foliações de direção preferencial norte-sul. Essa formação é facilmente visualizada nas imagens R99SAR quando comparadas aos dados gama, magnetométricos e ópticos. Na porção leste da área, as serras que compostas por rochas da Formação Arraias são estreitas e com contatos abruptos mapeados como falhas ou zonas de cisalhamentos. Na porção oeste, as rochas estruturam-se em megadobras em anticlinais e sinclinais com eixos na direção NS a NNE. Ainda nesta região, as rochas metavulcânicas

ácidas (PP4aα) destacam-se das rochas quartzíticas feldspáticas (PP4aqf) pela suas formas de relevo e características espectrais, tal qual observado nas figuras 90 e 91, entre as três primeiras principais componentes das imagens ETM+, onde é observada uma coloração ciano para as rochas metavulcânicas. Os domínios quartzíticos apresentam nos dados gamaespectrométricos forte resposta para o canal do potássio, provavelmente devido à alta concentração de minerais micáceos como muscovitas principalmente nas fácies de composições arcoseanas. O relevo magnético dessa unidade está intimamente interligado aos valores altimétricos, demarcando muito bem as bordas dos anticlinais e sinclinais no domínio oeste e as falhas ou zonas de cisalhamentos compressoriais do domínio leste.

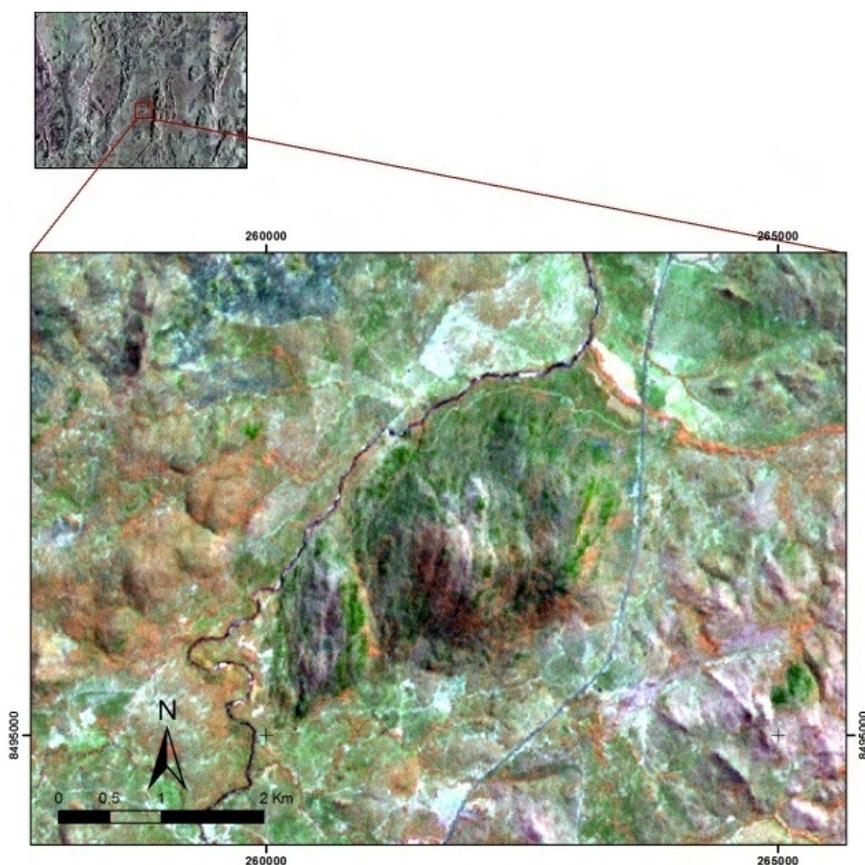


Figura 95: Detalhe do Granito Sucuri (PP4γPb1), na porção centro sul da imagem Landsat ETM+ 4/5/3 com fusão por Principal Componente da banda 8. Aparentemente um megaclasto rotacionado de orientação NE.

- ✓ Grupo Araí/ Formação Traíras (PP4ts2; PP4tq; PP4ts1): esta formação ocorre no extremo oeste da área mapeada onde há as maiores cotas topográficas. O contato desta unidade também é abrupto com direções variando entre NNE e

NNW. Nas imagens do R99SAR, apresentam retroespalhamento praticamente especular (tons de cinza escuros) para todas as polarizações, indicando a presença de topo plano com vegetação rala. Na porção sul, com o centro nas coordenadas 230.000E/8.490.000N, ocorre um mega anticlinal com eixo NS que é realçada em todos os produtos magnetométricos, gamaespectrométricos e radar. As dobras de menor amplitude e comprimento somente foram identificadas nas imagens SAR e nos dados ópticos devido à sua alta resolução espacial.

- ✓ Grupo Bambuí (NP2sh; NP2sld; NP2slc; NP2slm): este grupo apresenta o relevo topográfico mais baixo da área de estudo, ocorrendo restritamente na porção leste. O contato entre essa unidade e as demais é abrupto com direção NS a NNE, muito bem marcado nos produtos gamaespectrométricos fusionados com os dados R99SAR. Ao norte, observam-se discretos lineamentos NE com valores expressivos para os canais de potássio e tório e para os produtos derivados do campo magnético anômalo, em especial na amplitude do gradiente horizontal total. Restritivamente, nas porções onde afloram as fácies mais calcárias deste grupo (NP2slc), ocorrem concentrações anômalas para os dados de urânio. Na porção centro-sul, os lineamentos nos produtos magnetométricos são discretos de direção NE, não observado nos dados gamaespectrométrico.
- ✓ Fengita-quartzo-milonito (NP2qfm): sem informações relativas a variações gamaespectrométrica. Apresenta alinhamento topográfico que se expressa através dos elementos relevo e drenagens nas imagens radargramétricas e em um incipiente alinhamento magnetométrico observado na imagem da amplitude do sinal analítico;

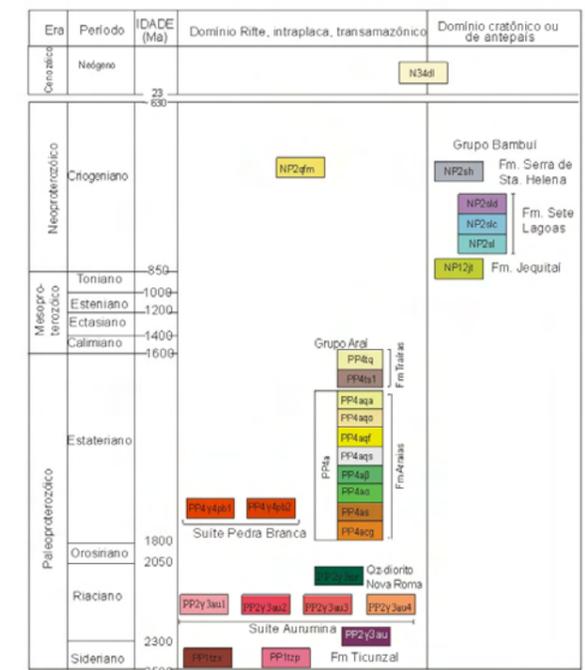
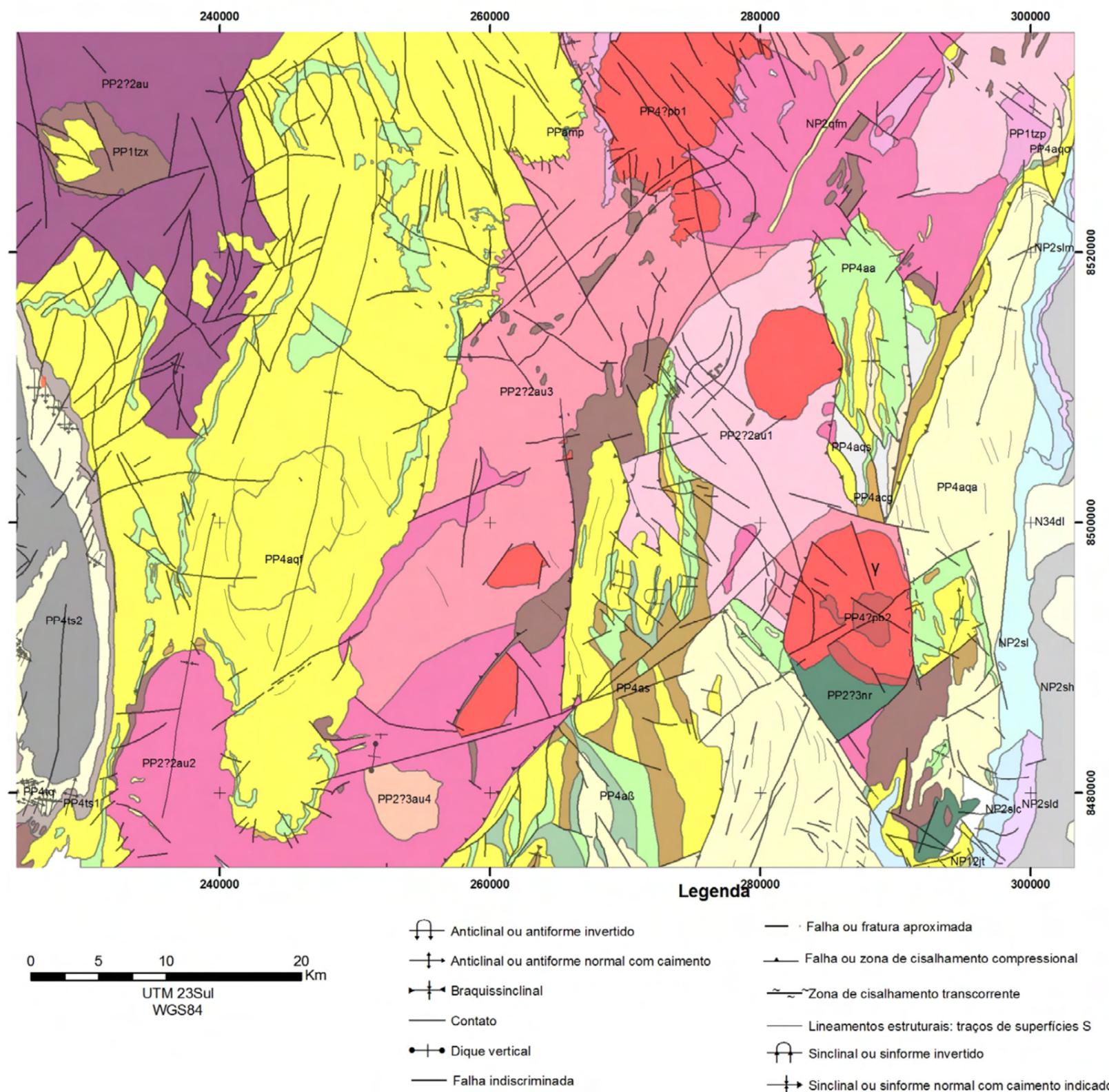
Na tentativa de estabelecer alguns mapas como produtos do Banco de dados geográfico de informações geológicas do Rifte Araí, foram gerados: mapa geológico em escala 1:100.000 (figura 96), mapa de lineamentos (figura 97) e mapa de foliações e lineações (figura 98).

O mapa geológico foi produzido pela integração entre os mapeamentos anteriores. Em síntese, as variações faciológicas da Suíte Aurumina não foram totalmente identificadas nos produtos de radar e gamaespectrométricos como se apresentam nos mapas geológicos de Botelho *et al.* (2007), Alvarenga *et al.* (2007b), Dardenne *et al.* (2007) e do trabalho final de graduação de 2005. Nas áreas de

mapeamento do Projeto de Cana Brava- Porto Real (Araújo & Alves, 1979) e do trabalho final de graduação do ano de 1998 falta o reconhecimento dessas fácies o que somados á falta de assinaturas distintas nos dados gamaespectrométricos e radar impossibilitou a diferenciação. No processo de integração optou-se pela generalização desta unidade, não subdividindo-a em fácies. No extremo oeste da área, onde aflora a Formação Traíras, as imagens geofísicas e de radar possibilitaram mapear as diferenciações de fácies desta unidade da maneira como foram identificados nos mapeamentos geológicos dos mapas do IG/TF (1998) e do Projeto Cana Brava- Porto Real, sendo os contatos entre essas fácies obtidos através da análise das imagens.

O mapa de lineamentos obtidos foi resultado da interpretação dos dados de sensoriamento remoto SAR e óptico, e dos dados aerogeofísicos (magnetométrico e gamaespectrometria). As análises e interpretações pertinentes a este mapa estão apresentadas no capítulo 6 desta tese, juntamente com a análise dos mapas de foliações e lineações.

No mapa de lineações e foliações, ocorre uma “descompensação” na área de trabalho. Na área mapeada pelo trabalho final de graduação do ano de 2005 foram aproveitadas todas as informações pertinentes a esse tema, fato este que não ocorreu para o IG/TF (1998) e para o projeto Cana Brava- Porto Real. Assim, a quantidade de dado “pontual” envolvida na análise da porção leste da área mapeada é desproporcional às demais áreas deste mapeamento.



CENOZÓICO
NEOGENO (NQ)

NEOPROTEROZÓICO (NP)

Grupo Bambuí
 NP2sh Formação Serra de Santa Helena: Siltito argiloso laminado cinza esverdeado quando fresco. Ritmos finos com intercalações de lâminas de siltito macio e arenito muito fino com mica branca detritica.
 NP2nd Formação Sete Lagoas: Dolomito: Dolomito laminado, dolarenito, brecha dolomítica e dolomito macio. Esta fácies está geralmente recristalizada e venulada, mascarando as estruturas primárias.
 NP2ml Calcário: Calcário e calcário argiloso cinza com intercalações subordinadas de margas.
 NP2jt Marga: Marga e siltito calcífero com calcário e calcário argiloso subordinado.
 NP2je Formação Jequitai: Diamictito com rara intercalação de pelito e arenito. Inclui fragmentos de quartzo, granito, quartzo-xisto, basalto etc., sustentados por matriz silteosa com grãos esparsos de quartzo, feldspato etc.

Grupo Araí
 Formação Traíras
 NP4ts Siltito doís: Siltito e metassiltito
 NP4aq Quartzo: Quartzo arcozeano laminado e em bancos com estratificações cruzadas.
 NP4as Siltito um: Siltito e metassiltito macio e laminado com marcas onduladas e laminações cruzadas.
 Formação Armaís
 NP4ar Quartzo arcozeano: Quartzo arcozeano em bancos internamente laminados com ocasionais marcas onduladas e estratificações cruzadas decimétricas a métricas.
 NP4aq Ortoquartzito: Ortoquartzito médio a grosso com grãos bem arredondados e estêreos com frequentes estratificações cruzadas superiores a um metro.
 NP4aq Quartzo feldspático: Quartzo médio a grosso feldspático. Ocasionalmente dominam ortoquartzitos na base da unidade.
 NP4aq Quartzo seixo: Quartzo feldspático muito grosso a grosso com seixos esparsos e lentes centimétricas de conglomerados.
 NP4as Metabasaltos: Metabasaltos com amígdalas ocasionais.
 NP4as Metavulcânicas ácidas: Metarolito rosa a esbranquiçado com feições de fluxo magmático, fenocristais de Kf e de quartzo idiomórfico. Metadiáclito cinza escuro com fenocristais de plagioclásio e raros quartzo. Metapiroclástica com predominância de metatufos, metaplilinito e metapiroclástica. São comuns intercalações de quartzitos.
 NP4as Siltito: Alternância de metassiltitos com quartzitos finos.
 NP4as Conglomerado: Metaconglomerado suportado por matriz ou clasto. Inclui seixo de granito, metavulcânica ácida, quartzo e quartzo. Camadas de quartzo ocorrem intercaladas.

Suíte Pedra Branca
 NP2sl Monzogranito: Biotita monzogranito, biotita sienogranito com fácies rapakivi e granofíricas.
 NP2sl Sienogranito: Biotita sienogranito, Li-siderofilita, zinwaldita-Li-albita-topázio granito portadores de zonas albitizadas e conglomeradas e depósitos de Sn, F e Ta.
 NP2sl Quartzo-diorito Nova Roma: Biotita-anfíbólio-quartzo diorito.

Suíte Aurumina
 NP2sl Biotita Sieno-granito
 NP2sl Tonalito: Leucotonalito, granada-biotita tonalito, muscovita-biotita tonalito com raro anfíbólio.
 NP2sl Monzogranito: Biotita-muscovita ou muscovita-biotita-sieno a monzogranito com monazita.
 NP2sl Sienogranito: Biotita-muscovita sienogranito com domínios mais jovens de turmalina-muscovita-albita granito, pegmatitos e albitos com Sn e Ta.

Formação Ticunzal
 NP2sl Xisto: Biotita-muscovita-quartzo xisto, muscovita-clorita-quartzo xisto, com grafita e granada.
 NP2sl Paragneisse: paragneisse com bandas claras ricas em quartzo e feldspato e as bandas máficas ricas em biotita, alterando para clorita e fengita, ilmenita passando para titanita e minerais opacos

Figura 96: Mapa geológico compilados dos projetos Cana Brava – Porto Real, Botelho *et al.* (2007), Alvarenga *et al.* (2007b), Dardenne *et al.* (2007), IG/TF (2005) e IG/TF (1998) utilizando informações das imagens R99SAR

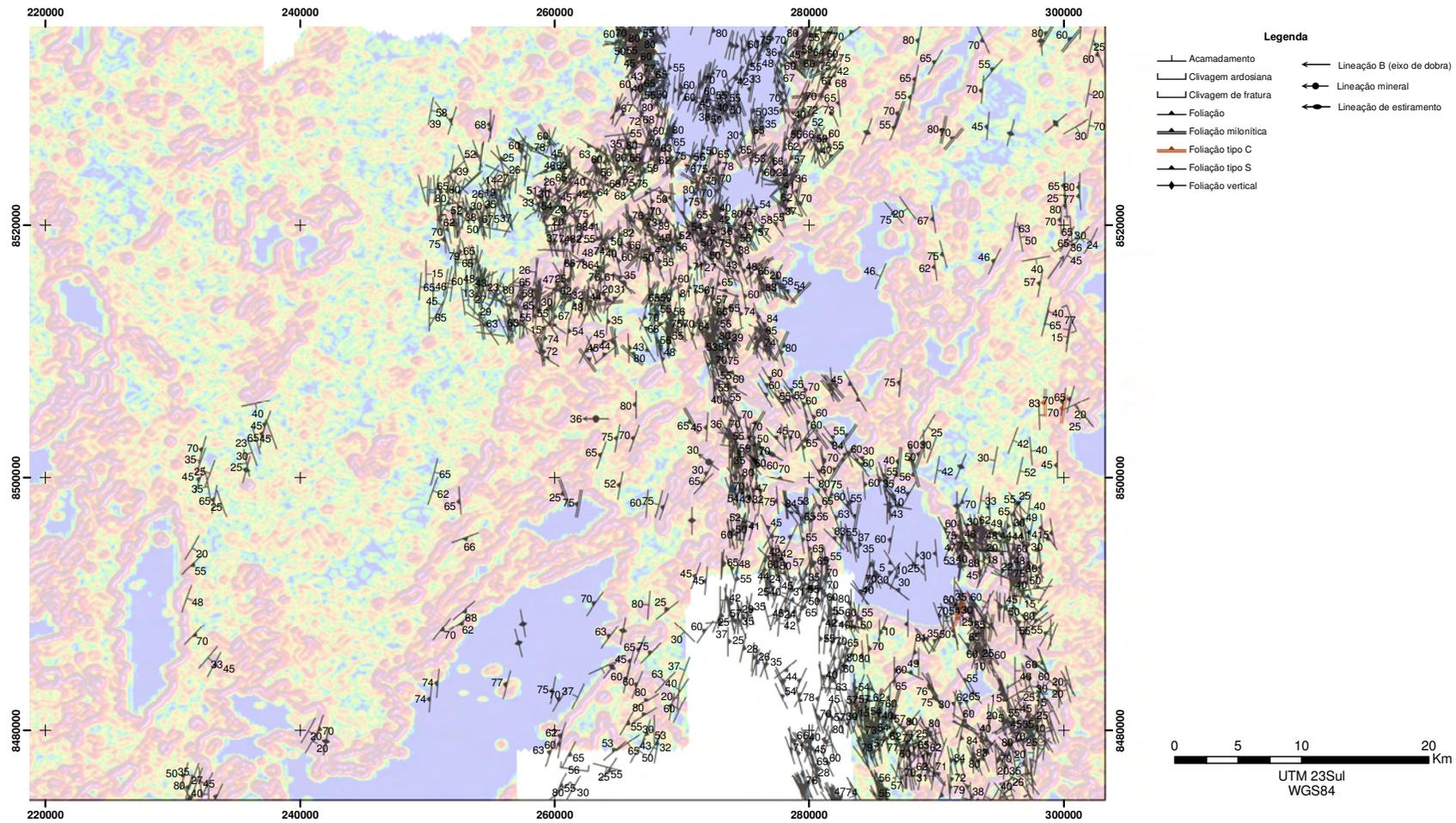


Figura 97: Foliações e lineações cadastradas no banco de dados geográficos com informações geológicas do Rife Araí.

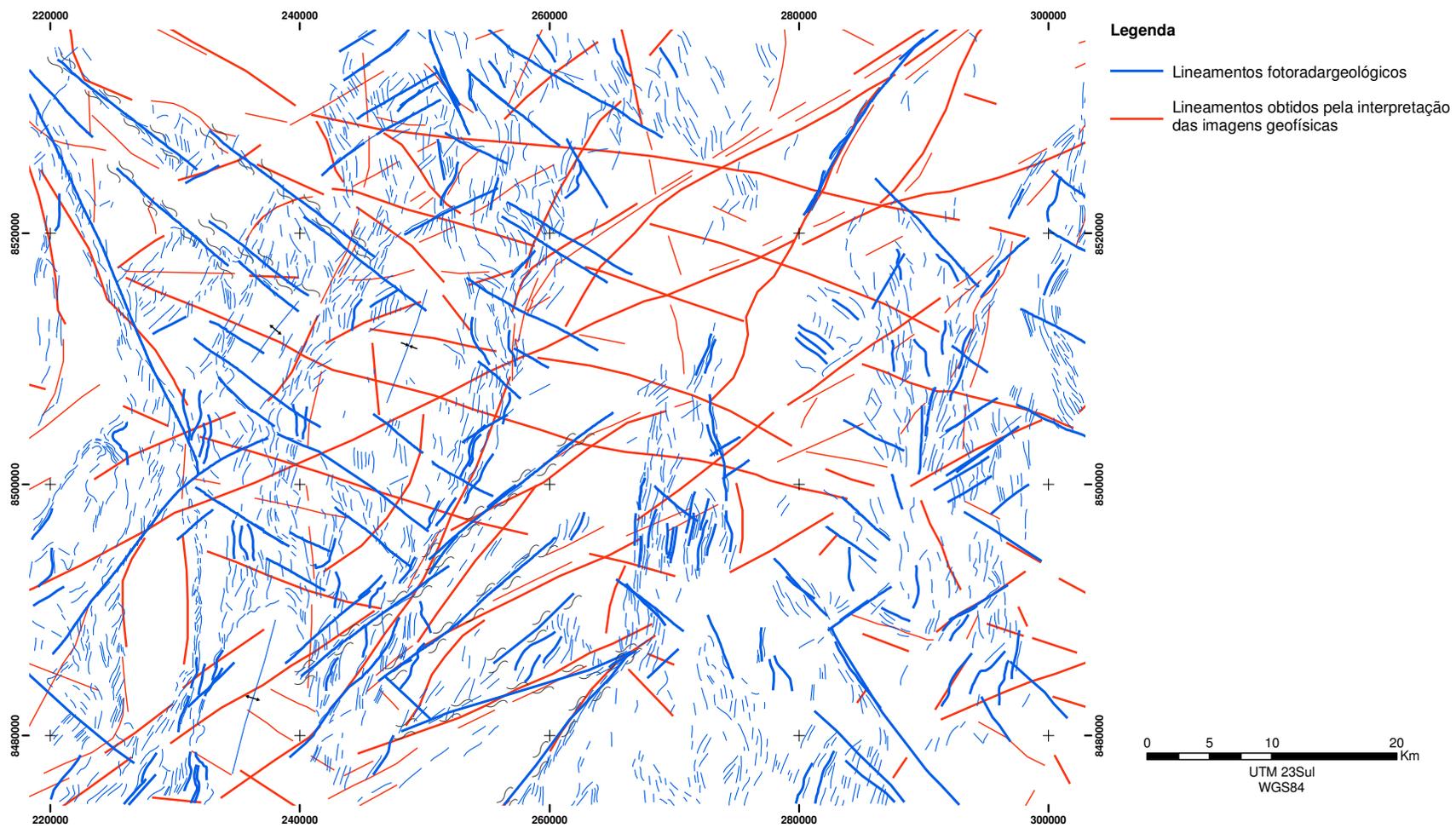


Figura 98: Lineamentos radargramétricos e interpretados pela gamaespectrometria cadastrados no banco de dados geográficos com informações geológicas do Rife Araí.my

Capítulo 6

Arcabouço estrutural do Rifte Araí com base nas informações do banco de dados

O arcabouço estrutural do Rifte Araí segundo interpretações de Fonseca (1996), Hippert & Massucato (1998), Massucato (2003) e Alvarenga *et al.* (2007a) ainda necessita de mais estudos e tomadas de dados mais detalhados para que se defina com maior certeza a evolução dos eventos deformacionais e suas superposições na região desta área de estudo.

Neste sentido, as interpretações das imagens de radar e geofísicas, ao evidenciarem a presença de fortes alinhamentos estruturais que se mostram condizentes com os dados de campo de mapeamentos anteriores contribuem, não só para reafirmar a utilidade das imagens SAR e geofísicas para o entendimento do arcabouço estrutural de grandes domínios, como também para o acréscimo de novas informações.

Os trabalhos estatísticos de confecção de diagramas de rosetas e de estereogramas para os dados do Rifte foram realizados utilizando o aplicativo *Rockworks* 14. Este aplicativo adequou-se às particularidades dos dados deste trabalho, possibilitando a análise individualizada dos vetores que compõem as polilinhas dentro do programa ArcGis.

6.1. Os Domínios Geotectônicos do Rifte

O entendimento dos eventos cinemáticos e deformacionais da área situada entre as cidades de Nova Roma, Cavalcante e Monte Alegre de Goiás baseia-se em quatro principais trabalhos: Alvarenga *et al.* (2007a), Massucato (2003), Fonseca (1996) e Araújo & Alves (1979).

Tomou-se como referência para a interpretação tectônica do rifte, o trabalho de Alvarenga *et al.* (2007a) que propõe uma subdivisão estrutural da área em domínios geotectônicos, suportado nas relações de idades das unidades que ocorrem nas folhas de Nova Roma, Cavalcante e Monte Alegre de Goiás e dos ciclos deformacionais Transamazônico (?) e Brasileiro.

Segundo esses autores, são três os estágios tectônicos principais que ocorreram na região, sendo: (i) estágio de sinéclise e antepaís, relacionado à abertura e fechamento da bacia de sedimentação do Grupo Bambuí, incluindo a Formação Jequitaí, classificado pelos autores supra-citados como Domínio I; (ii) Estágio de rifteamento Paleoproterozóico que afetou as rochas do embasamento envolvidas na Orogenia Transamazônica. Manifesta-se essencialmente pelo desenvolvimento de uma tectônica rúptil em escala continental e define os Domínios II e III, relacionados ao Grupo Araí e a Suíte Pedra Branca, respectivamente; (iii) Rochas da Formação Ticunzal e da Suíte Aurumina afetadas pelo Evento Transamazônico (entre Riáciano e o Orosiriano) que devido à intensidade do Evento Brasileiro coloca um grau de incerteza da orogenia Transamazônica e define o Domínio IV.

6.1.1. Domínio Geotectônico I

As rochas do Domínio I (Grupo Bambuí e Formação Jequitaí) restringem-se ao extremo leste da área estudada. As considerações dos trabalhos anteriores definem contatos estratigráficos normais ou por falha de direção NS/ NNE com os metassedimentos do Grupo Araí ou com a Suíte Pedra Branca. As rochas aflorantes apresentam uma maior intensidade das deformações próximas aos contatos e que, gradualmente, diminui a intensidade em direção às partes centrais e orientais das áreas equivalentes as cartas de Nova Roma e Monte Alegre.

Os depósitos pelito-carbonatados do Grupo Bambuí foram deformados com vergência para leste pela Orogenia Brasileira. Próximo ao contato com o Domínio Geotectônico II, ocorre, sobre rochas do Grupo Bambuí e da Formação Jequitaí, uma estreita faixa NS a N20E intensamente dobrada e falhada, cujas dobras apresentam nítida vergência para leste e clivagem de plano axial, mergulhando para NW.

6.1.2. Domínio Geotectônico II

O estabelecimento no Paleoproterozóico ($\approx 1800\text{Ma}$) de um ambiente de rifteamento (Marini & Botelho, 1986) pressupõe que os falhamentos regionais formados nesta fase foram bastante profundos atravessando a crosta continental e atingindo a zona superior do manto. Os trabalhos realizados por Marini & Botelho (1986), Pimentel *et al.* (1991) e Pimentel *et al.* (1999) indicam que localmente houve fusão parcial do manto e crosta dando início aos processos magmáticos que

conduziram à formação do vulcanismo bimodal registrado na base do Grupo Araí (Domínio II) e dos granitos da Suíte Pedra Branca (Domínio III).

No Domínio Geotectônico II ocorrem as rochas formadas durante as fases rifte (Estateriano) e pós-rifte que, provavelmente, se estenderam ao Mesoproterozóico. Segundo Alvarenga *et al.* (2007a), as antigas falhas extensionais relacionadas à fase rifte tiveram um importante papel no preenchimento da bacia de sedimentação e foram reativadas como falhas compressivas na Orogenia Brasileira. Além dessas falhas, as estruturas presentes na sequência metavulcanossedimentar do Grupo Araí manifestam-se principalmente por um intenso dobramento assimétrico orientado de NS a N20E, com planos axiais sub-verticais ora mergulhando para W ora NW, e eixos de dobras sub-horizontais mergulhando tanto para N como para S. Houve milonitização ao longo dos planos axiais e principalmente das falhas, afetando os quartzitos do Grupo Araí e se prolongando nas rochas do embasamento Paleoproterozóico. Essas observações permitiram concluir que falhas anteriores à Orogenia Brasileira canalizaram a deformação rúptil-dúctil, transformando-se em corredores de cisalhamentos gigantesco acompanhados por intensa milonitização e silicificação.

Essas falhas mostram movimentação transpressiva com lineação mineral tanto *down-dip* como direcional. Muitas dessas falhas devem ter sido originadas pelos processos de rifteamento Paleoproterozóico e foram reativadas pelo Evento Brasileiro no fim do Neoproterozóico. Importante falhamento inverso N40-45E pode ser observado cortando toda porção centro-leste da Folha Cavalcante, suspendendo o bloco norte em relação ao bloco sul. Esses elementos são confirmados pelo contato da Suíte Aurumina com os metassedimentos do Grupo Araí, reforçados pela diminuição dos afloramentos do Grupo Araí no bloco norte. Falhamentos orientados na direção N0-20E e N40W são também comuns em todo este domínio.

6.1.3. Domínio Geotectônico III

No Domínio III, a Orogenia Brasileira afetou essencialmente os maciços graníticos da Suíte Pedra Branca, onde se manifesta pela individualização de zonas de cisalhamento e extenso fraturamento dessas rochas. Uma feição proeminente neste domínio é o cisalhamento da borda leste do Maciço Mocambo (Folha Monte Alegre de Goiás), resultante do falhamento que colocou o maciço em contato com o Grupo Araí. Essa é provavelmente também uma feição da fase rifte reativada no Brasileiro. Zonas de cisalhamento como a representada pela Faixa Placha no Maciço Pedra Branca são provavelmente reflexos da deformação brasileira nos granitos intraplaca da fase rifte.

6.1.4. Domínio Geotectônico IV

Esse domínio é caracterizado pelas rochas da Formação Ticunzal e da Suíte Aurumina expostas, segundo Massucato (2003), a dois eventos deformacionais pré-brasileiros: um primeiro responsável por foliação EW e um segundo de orientação NS, que oblitera quase que completamente esta primeira foliação (Massucato 2003). Contudo, Alvarenga *et al.* (2007a) observaram a presença de foliação EW incipiente mas não da foliação NS.

O grau metamórfico superior e a composição química das grauvacas da Formação Ticunzal sugerem que estes litotipos foram depositados em condição geotectônica de margem ativa. Já os granitos atribuídos à Suíte Aurumina são do tipo S, originados por fusão de pilha sedimentar no fim da Orogenia Transamazônica, contrastando com as condições intraplaca dos granitos da Suíte Pedra Branca.

Esse domínio também sofreu os efeitos da Orogenia Brasileira, com desenvolvimento de foliação milonítica e zonas de cisalhamento regionais, provavelmente também canalizadas por estruturas pré-existentes.

6.2. Análise das informações do Banco de Dados Geológicos do Rifte Araí

Como mencionado anteriormente, a densidade dos dados amostrados em campo pelos mapeamentos anteriores orientou a subdivisão da área em dois blocos (figura 97).

A espacialização dos dados dos mapeamentos antigos orientou a subdivisão da área em duas grandes regiões que apresentam concentrações de informações diferentes (figura 99). A área leste apresenta uma grande quantidade de dados devido ao mapeamento 1:50.000 do trabalho final graduação de 2005, enquanto a área oeste apresenta pouquíssimos dados de medidas de foliações e lineações.

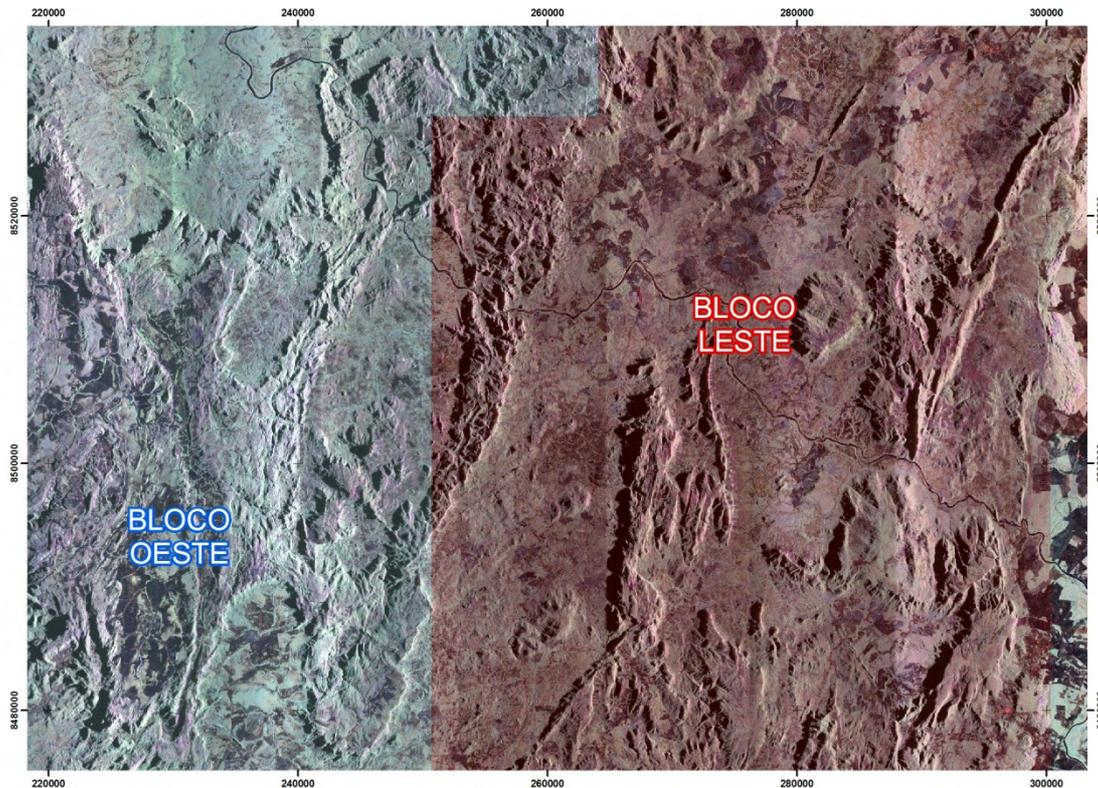


Figura 99: Imagem R99SAR sobreposta a subdivisão entre os blocos oeste e leste.

6.2.1. Bloco Oeste

Os dados de campo de medidas estruturais para essa área são limitados aos obtidos pelo Projeto Cana Brava – Porto Real, concluído em 1976 pela CPRM, na porção norte, e pelo mapeamento da Folha de Cavalcante ao sul (Botelho *et al.*, 2007). As dificuldades de acesso à área norte deste bloco, presentes até hoje, limitam a tomada de medidas estruturais e por isso o mapeamento dos contatos geológicos e das estruturas é predominantemente resultado das interpretações de imagens.

Nesse bloco aflora cerca de 70% de rochas das formações Arraias e Traíras do Grupo Araí que possuem como estruturas marcantes mega sinclinais e mega anticlinais com orientações entre N10E a N15E. Dobras em menor escala são observadas nos contatos dos metassedimentos da Formação Traíras com a Formação Arraias na porção oeste da área de estudo. Pequenas falhas normais e inversas de escala métrica são as estruturas mais freqüentes e que foram mapeadas por Araújo & Alves (1979) para esse bloco.

A análise das direções dos lineamentos por meio de diagramas de rosetas obtida no banco de dados geológicos subdividiu os lineamentos em relação ao tipo de

elementos de extração (rede de drenagens, relevo, gamaespectrometria e mapa geológico).

As rosetas referentes à análise dos alinhamentos da rede de drenagens indicam duas direções com frequência praticamente idênticas nas direções N50W e N45E, e que pouco variam em relação ao tamanho da feição (figura 100).

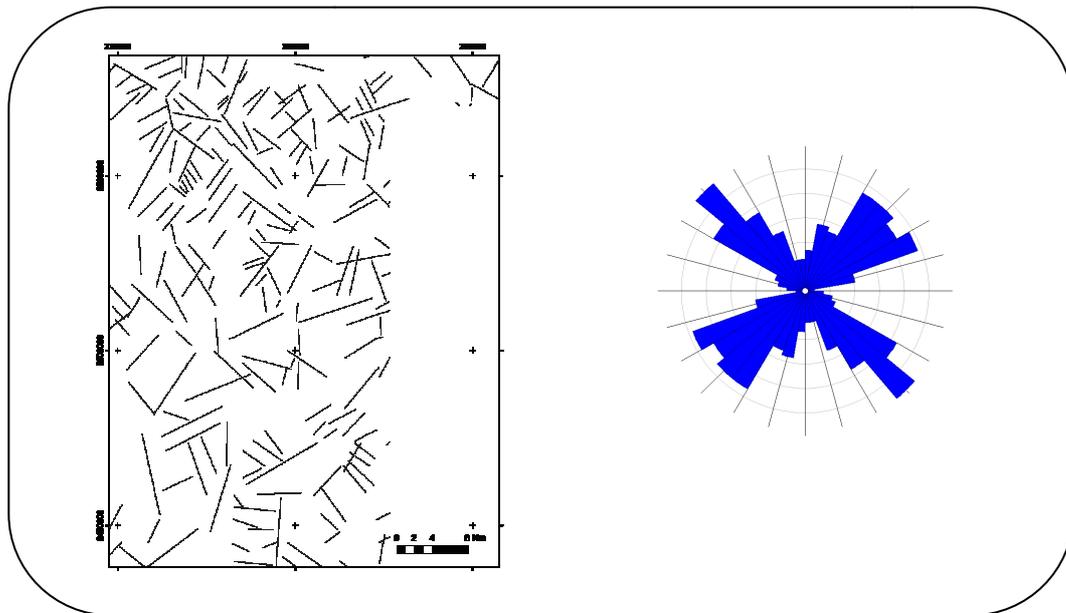


Figura 100: Alinhamentos de drenagem obtidos pela interpretação dos dados R99SAR no bloco oeste e diagrama de roseta.

As feições lineares e alinhamentos de relevo demonstram padrões de concentração em direções distintas. No caso das feições lineares há uma forte orientação entre N15W e N30E com maior concentração de ocorrências na direção em N10E. Os alinhamentos de relevo demonstram três famílias distintas de direções preferenciais: N10W; N50W e N40E (figura 101).

Os diagramas de rosetas gerados a partir dos alinhamentos dos dados geofísicos apresentam duas principais famílias, uma N60E e outra N65W, contrastantes com os dados obtidos até o momento (figura 102).

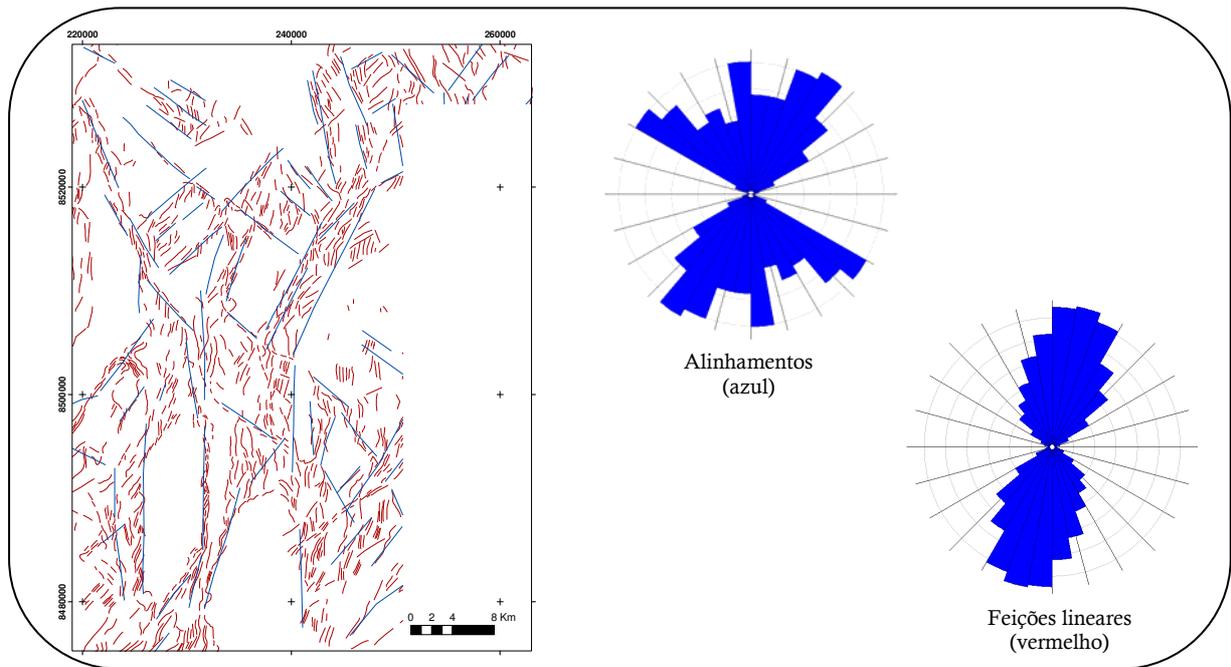


Figura 101: Alinhamentos (azul) e feições lineares (vermelho) de relevo obtidos pela interpretação dos dados R99SAR do bloco oeste e diagrama de roseta.

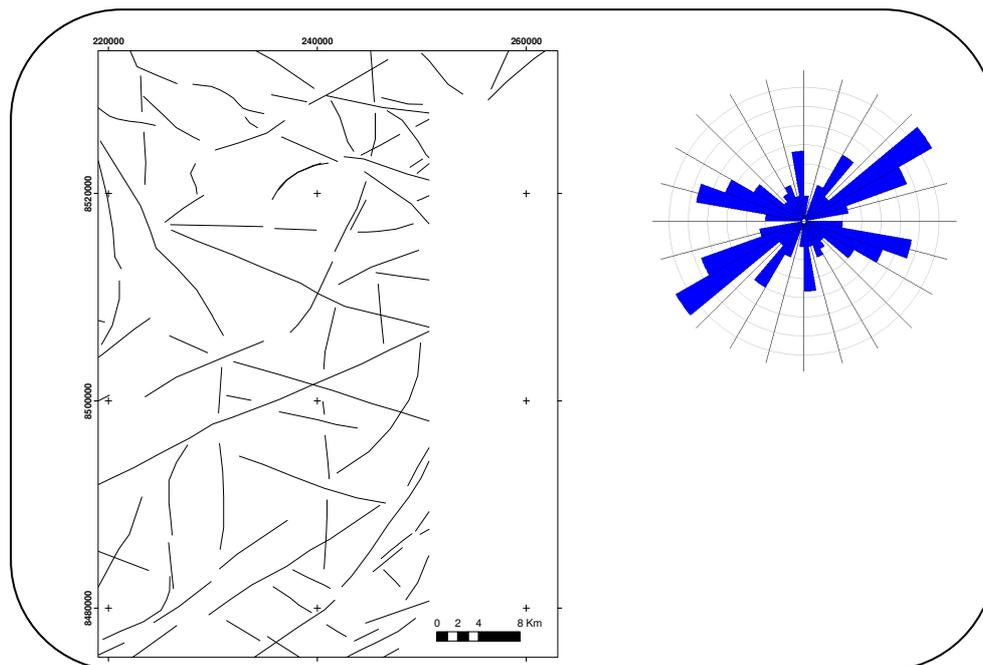


Figura 102: Alinhamentos gamaespectrométricos do bloco oeste e diagrama de roseta.

As direções dos contatos e estruturas extraídas do mapa geológico desse bloco mostram uma alta, e praticamente única, concentração na direção N10E (figura 103).

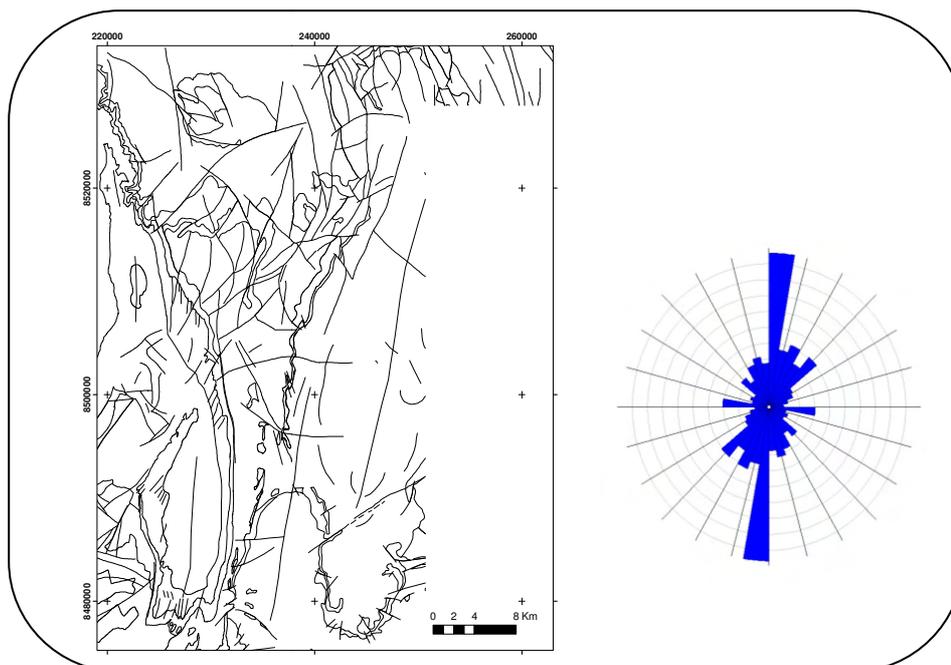


Figura 103: Contatos e estruturas extraídos do mapa geológico do bloco oeste e diagrama de roseta.

A análise conjunta de todos os dados indica uma orientação principal das rochas do bloco oeste na direção NNE (foliação) com descontinuidades mecânicas observadas em duas direções principais: N50W e N45E (com frequências praticamente idênticas). Os dados geofísicos gamaespectométricos, no entanto, apresentam direções de concentração de alinhamentos não observados nos outros produtos.

6.2.2. Bloco Leste

Nesse bloco, dado a alta densidade de dados de campo, foi possível fazer uma análise comparativa com os dados extraídos nas imagens SAR e geofísicas. Neste sentido, optou-se por criar um método que individualizasse as informações pertinentes às unidades pré-rifte e sin/pós-rifte e à procedência do tipo da informação (radar, geofísica, campo). Cerca de 70% das rochas deste bloco fazem parte da sequência pré-rifte: Formação Ticunzal e Suíte Arumina.

Seguindo o mesmo procedimento, foram criados diagramas de rosetas para os dados extraídos das imagens R99SAR, geofísica e para o mapa geológico. As análises desses diagramas demonstram novamente alinhamentos da rede de drenagem com direções NW e NE (figura 104).

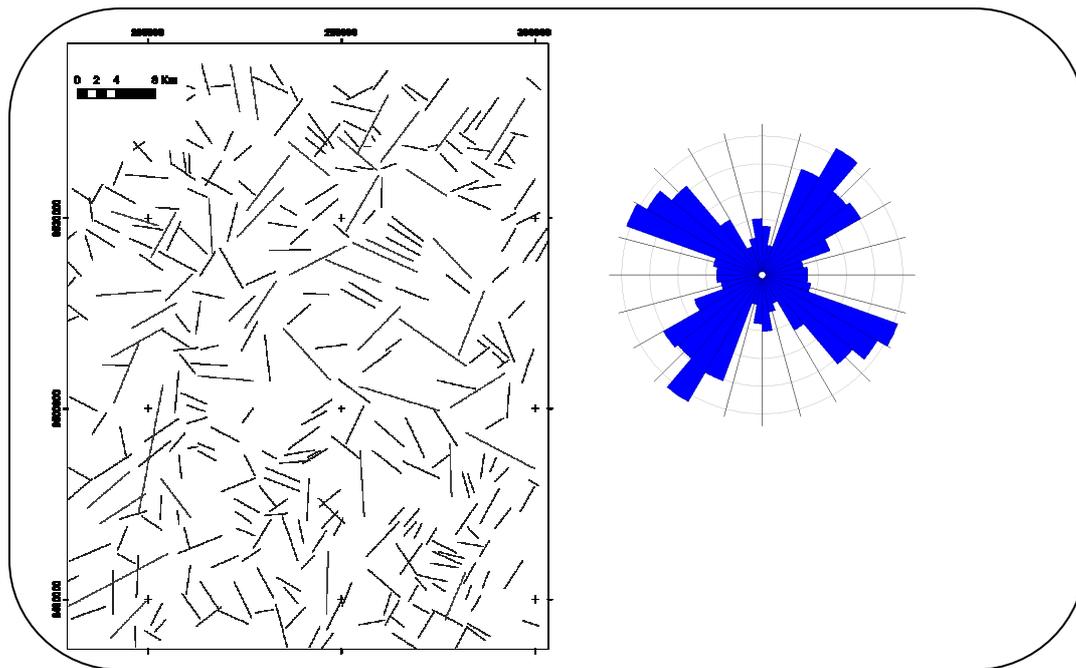


Figura 104: Traçados dos alinhamentos de drenagem obtidos pela interpretação dos dados R99SAR no bloco leste com diagrama de roseta.

O principal contraste entre os blocos oeste e leste ocorre nos alinhamentos de relevo, que prevalecem de direção NS nesse bloco sendo muito incipientes as direções NW e NE (figura 105). As feições lineares permanecem de direção NNE, similares ao observado no outro bloco.

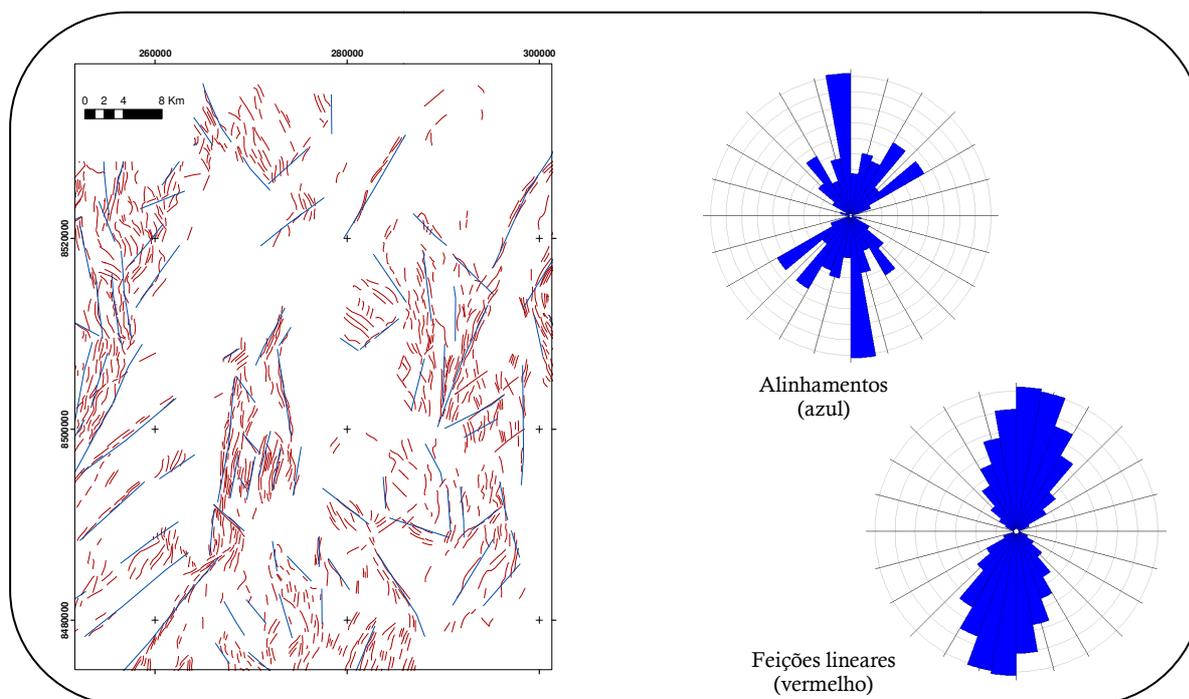


Figura 105: Traçados de feições lineares (vermelho) e de alinhamentos (azul) de relevo obtidos pela interpretação dos dados R99SAR no bloco leste da área de estudo com diagrama de roseta.

Os alinhamentos obtidos pela análise dos dados geofísicos do bloco leste mostram direções contrastantes com os demais produtos (figura 106). Tal qual observado para o bloco oeste, as direções N60E e N65W com uma maior frequência em relação ao bloco leste.

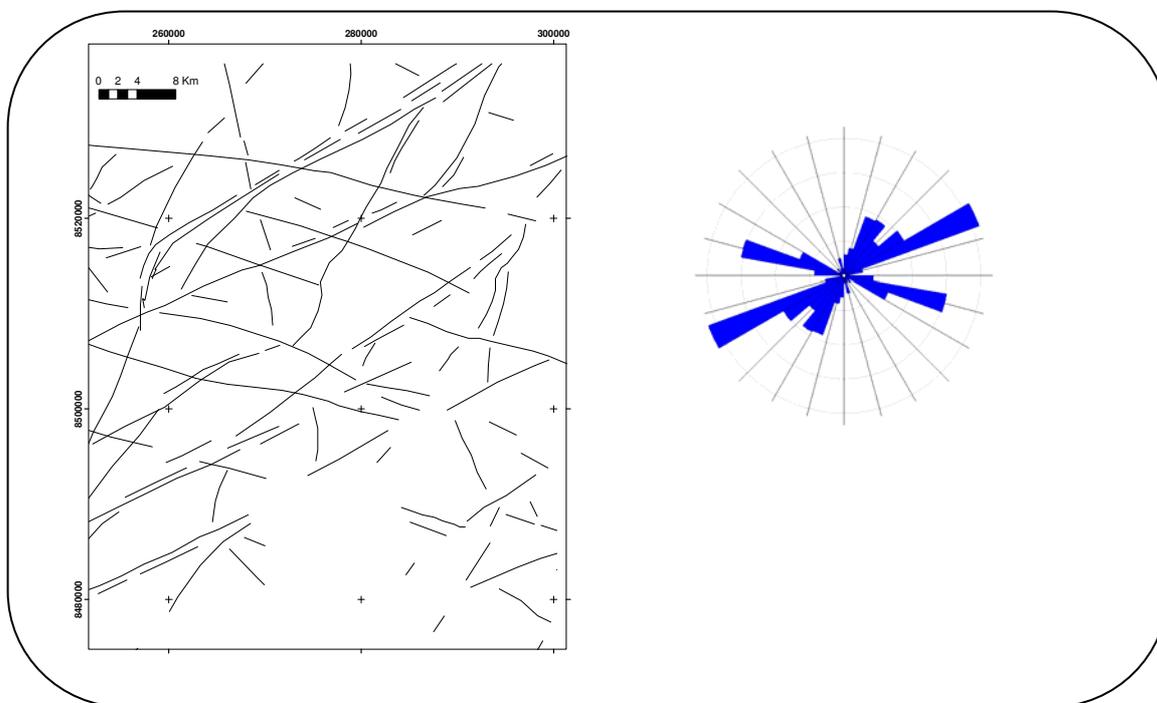


Figura 106: Traçados da interpretação dos dados gamaespectrométricos presentes no bloco leste da área de estudo com diagrama de roseta de frequência e direção dos alinhamentos.

No mapa geológico do bloco leste (figura 107), predominam direções de contatos e estruturas NS a N10E, condizentes com os dados obtidos pela análise das feições lineares de relevo.

Nesse sentido, os dados coletados remotamente nessa porção da área de estudo também demonstram um alinhamento principal das rochas para NNE, com alinhamentos NE e NW menos presentes quando comparados aos dados do bloco leste. O contraste entre os dados geofísicos e os demais dados novamente é claro.

Os dados coletados em campo para esse bloco oferecem uma perspectiva de entender a origem desses alinhamentos observados nos aerolevantamentos geofísicos e de radar. Os estereogramas para os dados de foliação Sn e foliação milonítica, cadastrados no banco de dados do Rife Araí, foram gerados utilizando o conceito das unidades pré-rifte (Fm. Ticunzal e Suíte Aurumina) e sin e pós-rifte (Suíte Pedra Branca e Gr. Araí). Devido à baixa concentração de informações do Gr. Bambuí optou-se por não gerar estereogramas dessas unidades.

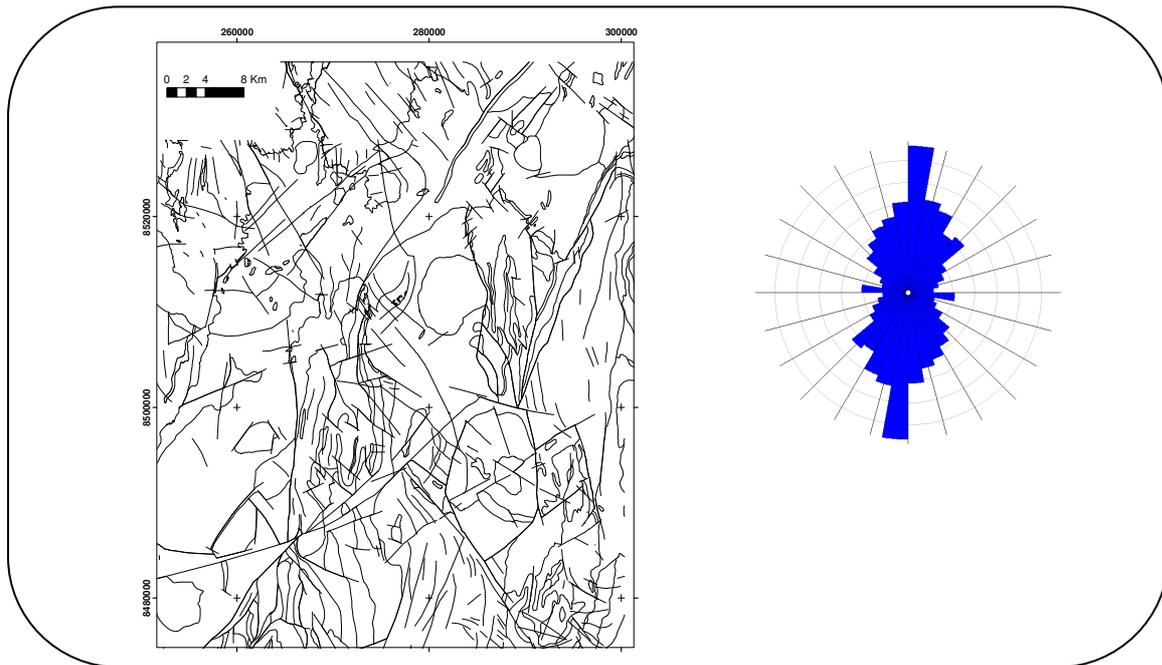


Figura 107: Contatos e estruturas extraídos do mapa geológico do bloco leste e diagrama de rosetas.

Os estereogramas formados pelos dados das foliações coletadas sobre as unidades sin- pós rifte demonstram a orientação preferencial da foliação principal da área (denominada S_n) em NS com variações entre NNW e NNE em 776 amostras coletadas. O mergulho das mesmas varia entre 25° a 85° para oeste, concentrando-se em 55 (figura 108a)°.

A foliação milonítica (figura 108b), observada para a Suíte Pedra Branca e o Grupo Araí, apresenta três pólos principais, listados a seguir em ordem decrescente de ocorrência: (i) N10W/50~55°W; (ii) N30E/60°W; e (iii) N20W subvertical. Foram analisadas, ao todo, 88 amostras deste tipo de foliação.

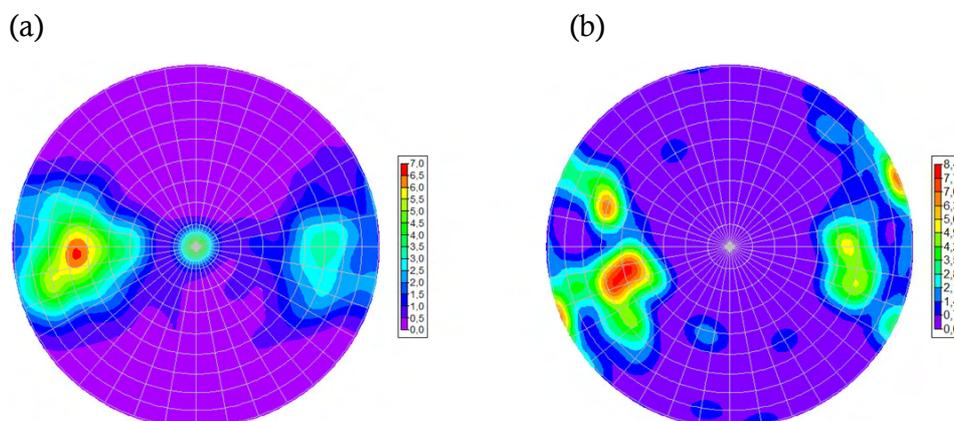


Figura 108: Estereogramas das foliações S_n (a) e Milonítica (b) das unidades sin e pós Rifte (Grupo Araí e Suíte Pedra Branca). Medições realizadas no trabalho final de graduação de 2005 e por Alvarenga *et al.* (2007a).

Dos dados de foliações do trabalho final de graduação 2005 e Alvarenga *et al.* (2007a) foram utilizadas para a Formação Ticunzal e a Suíte Aurumina: 755 amostras de foliação S_n e 126 amostras de foliações miloníticas. O estereograma gerado para as medidas S_n (figura 109a) apresenta um único pólo com média de N06W/60°W, concordante com o observado para as foliações das unidades sin-pós rifte.

Para as foliações miloníticas, o estereograma gerado apresenta a mais alta variação esférica em relação aos dados do trabalho final de graduação 2005 e Alvarenga *et al.*(2007a). A variação concentra-se no hemisfério NE com direções que variam desde NS até N70E; na direção N20~30E, ocorre um dos pólos deste hemisfério e os ângulos de mergulho são, na maioria, subverticais. Um pólo de direção N30W/subvertical também pode ser definido para este tipo de foliação.

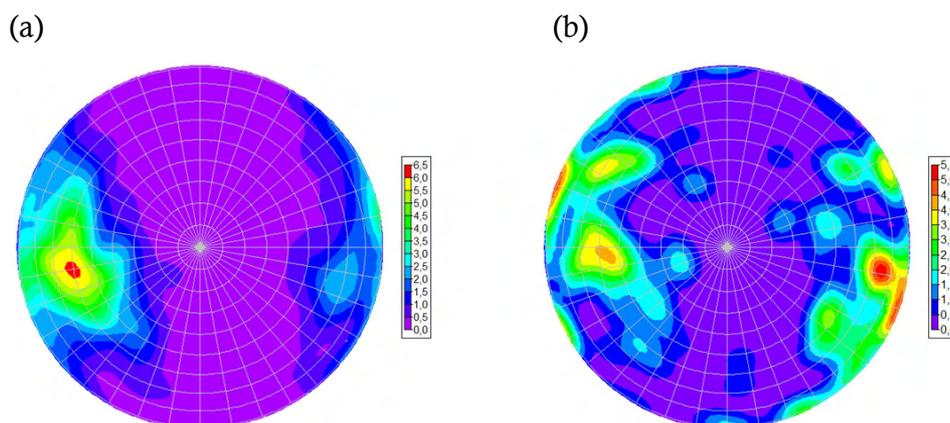


Figura 109: Estereogramas das foliações S_n (a) e Milonítica (b) das unidades pré Rifte (Suíte Aurumina e Formação Ticunzal). Medições realizadas pelos alunos de graduação do trabalho final de graduação 2005 e por Alvarenga *et al.* (2007a).

6.3. Discussão das informações estruturais obtidas para o Rifte Araí

A análise dos dados obtidos através de tratamentos de dados pré-existentes e de informações coletadas de forma remota indica um arcabouço bastante complexo para a área de estudo, tal qual constatado por autores anteriores.

A subdivisão em dois blocos para análise compartimentada das unidades foi útil somente para o acompanhamento e comparação do bloco leste com os dados obtidos em campo, pois quantitativamente os alinhamentos presentes na porção oeste são bastante similares ao observado para porção leste.

A estruturação da foliação regional em toda a área de estudo é NS a NNE, conforme as rosetas e estereogramas produzidos, que segundo Alvarenga *et al.* (2007a) possui idade Brasileira. A análise de todos os elementos observáveis nas imagens

indica que provavelmente houve a obliteração das estruturas geradas por eventos geotectônicos mais antigos (p.ex. Transamazônicos), tal qual afirma Alvarenga *et al.* (2007a).

Pelo fato da foliação ser uma característica física da rocha, as litologias mais resistentes à erosão, que na área são as serras quartzíticas do Grupo Araí, destacam a direção preferencial da foliação principal. A análise de forma e alinhamento do relevo para os sensores R99SAR e as rosetas geradas a partir desses dados demonstram direções que variam de N10W a N10E.

Os falhamentos mais expressivos observados para essa área concentram-se nas direções N30W e N20E, sendo considerados por Alvarenga *et al.* (2007a) como zonas de cisalhamento compressionais. São facilmente identificados nas imagens de sensoriamento remoto por colocarem lado a lado rochas cronologicamente diferentes e de comportamentos reológicos distintos. Como exemplo, podemos citar tanto a unidade PP4aqa (unidade de quartzito arcoseano do Grupo Araí) que a sudeste da área de trabalho faz contato com as rochas da Suíte Aurumina e Fm. Ticunzal por zona de cisalhamento transpressivo de orientação NNW; como o contato de direção NNE por vezes NS na área, onde rochas da unidade de quartzito feldspático (PP4aqf) fazem contato com rochas da Suíte Aurumina. Por esses dois alinhamentos envolverem contatos entre rochas quartzíticas do Grupo Araí e rochas de granito-gnáissica da Suíte Aurumina, os reflexos do relevo são facilmente identificados nas imagens R99SAR.

Os alinhamentos acima descritos corroboram as observações citadas por Alvarenga *et al.* (2007a) para o Domínio Geotectônico II, onde as deformações são de caráter dúctil-rúptil e provavelmente resultados de corredores de cisalhamento desenvolvidos sob descontinuidades mecânicas pretéritas.

As imagens gamaespectrométricas, principalmente a do canal do Tório e da Contagem Total, demonstram um arcabouço estrutural bastante distinto do observado na superfície morfológica da área para a região da Suíte Aurumina (região arrasada topograficamente no centro leste da área, figura 110

Os lineamentos delineados por esses canais indicam direções distintas em relação aos elementos de drenagem e relevo, com predominância da direção N60E e forma anastomosada. Nessas imagens observam-se rochas de alto tório em corredores estreitos que estão contidas dentro da Suíte Aurumina. Poucos são os reflexos destes alinhamentos no Grupo Araí e, quando ocorrem, apresentam deslocamentos da ordem de dezenas de metros (área ao norte da cidade de Teresina de Goiás) com sentido de movimento preferencial dextral. Somente neste caso, também são detectados nas

imagens de sensoriamento remoto devido a reflexos na estruturação dos elementos de relevo do Grupo Araí. No entanto, por estes lineamentos serem mais penetrativos nas rochas da Suíte Aurumina, que apresentam grau elevado de intemperização e pediplanação, os mesmos não se destacam nas imagens R99SAR.

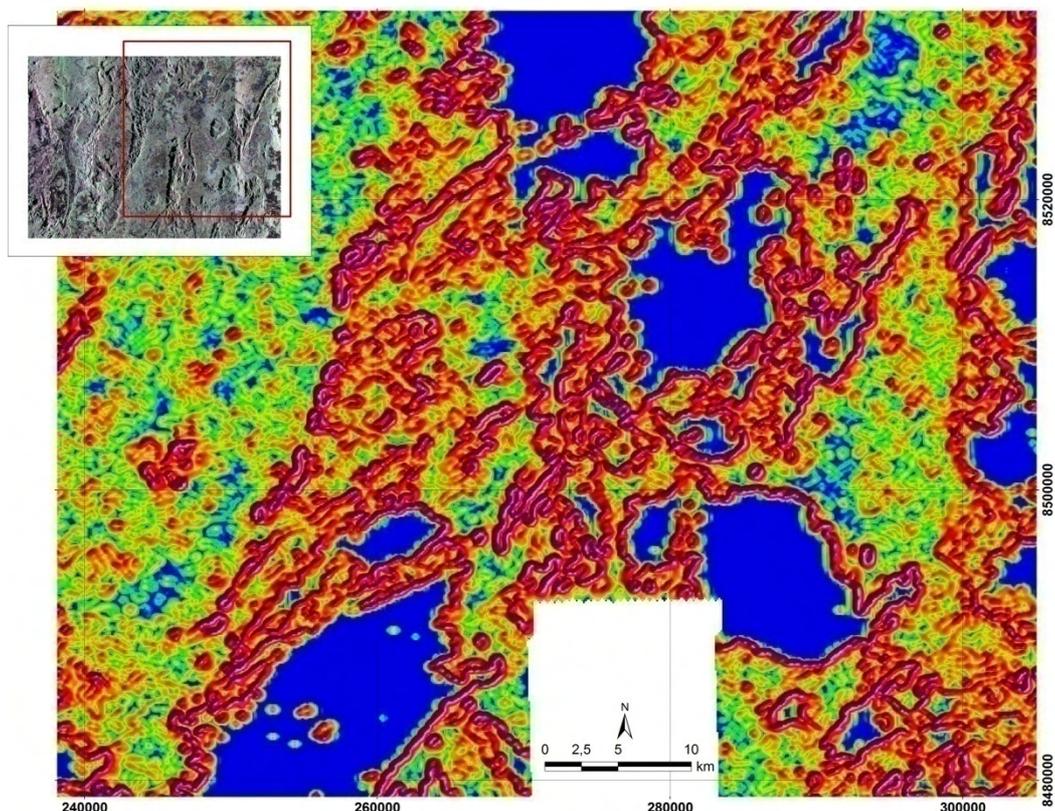


Figura 110: Imagem do gradiente horizontal do canal do tório do centro da área de estudo realçando a estruturação presente na área que aflora a Suíte Aurumina

A identificação deste lineamento também é observada nos produtos magnéticos, no entanto, com menor destaque devido aos baixos valores e baixo contraste da Suíte Aurumina neste tipo de imagem (figura 77, capítulo 5).

Os dados de foliação milonítica obtidos pelos alunos do trabalho final de graduação de 2005 (figura 108b- estereograma da foliação) demonstram que as rochas da Suíte Aurumina juntamente com as da Formação Ticunzal apresentam, em relação às foliações miloníticas do Grupo Araí e Suíte Pedra Branca, uma grande variação no hemisfério nordeste (NS~N70E/subvertical), que talvez possam caracterizar *in loco* a presença destes lineamentos observados nos dados geofísicos.

Comprovam essas observações, medições efetuadas em pontos situados entre as cidades de Teresina de Goiás, Ourominas e Nova Roma que apresentam rochas pertencentes à Suíte Aurumina e estruturação com foliações miloníticas tipo SC (figura 111).

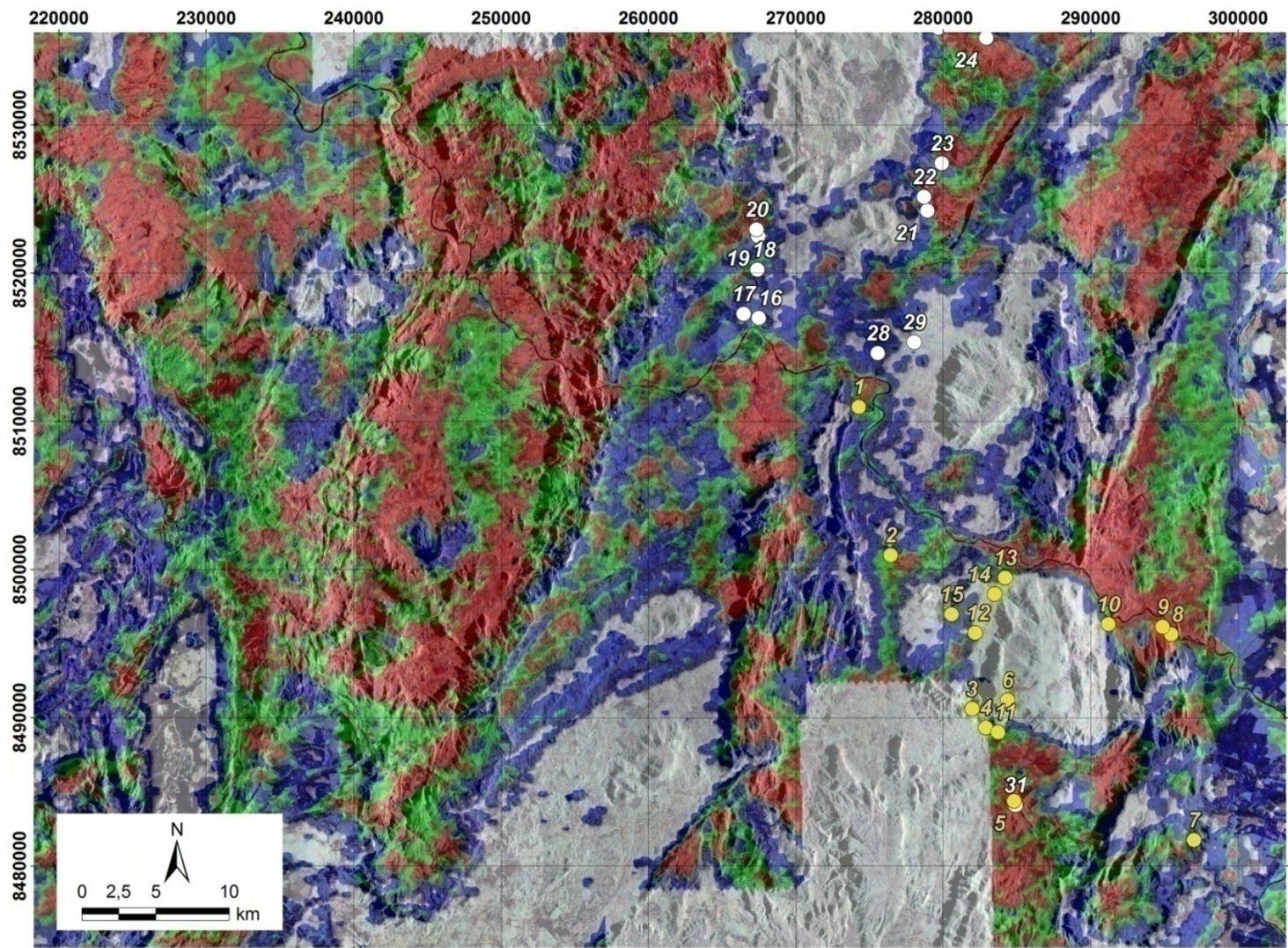


Figura 111: Imagem do espalhamento matemático para as baixas concentrações do canal do tório com localização dos pontos visitados em campo

As foliações identificadas como do tipo C possuem formas anastomosadas e são definidas por zonas de espessura sub-milimétricas de material ultrafino com variações de direção de mergulho (*dip direction*) entre 290~320/70 e caráter dextral. Os afloramentos visitados indicam que a foliação principal (S) pode ter dois padrões de comportamentos em relação à cisalhante (C): (i) deslocamento com variações submilimétricas ou (ii) foliação S não se amoldando a foliação C (figura 112).

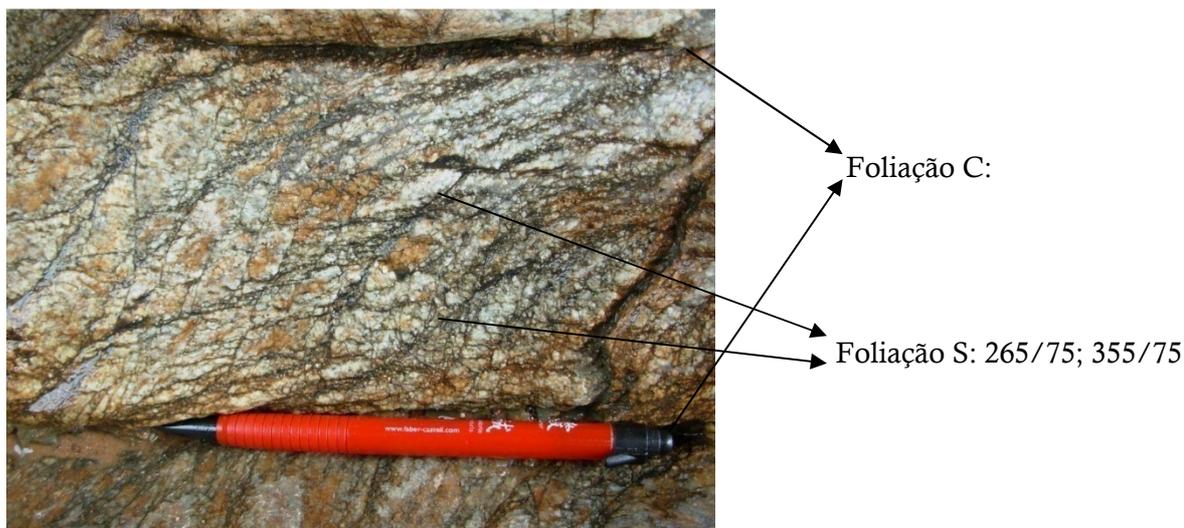


Figura 112: Foto de típica foliação SC em rocha da Suíte Aurumina (ponto 12). A foliação C caracteriza-se por zonas sub-milimétricas de material ultrafino que desloca (em milímetros) a foliação S.

Acompanhando a direção da foliação C, em cerca de 70% dos afloramentos visitados da Suíte Aurumina ocorrem enxames de diques decimétricos de material pegmatítico ou granitos grossos (figura 113), não deformados (tardi-deformacional), e que, por vezes, mostram características anastomosadas (ponto 19). Os indicadores cinemáticos observados possuem, predominantemente, caráter dextral.

As descrições dos afloramentos encaixam-se no contexto de estreitas zonas milonitizadas com estruturação em escala de afloramento entre direção N55E e N65E (figura 114) muito parecida com a observada nos dados geofísicos de tório.

Algumas evidências dessas orientações de direções N60E com movimento dextral foram propostas nos trabalhos de D'el-Rey & Senna Filho (1998) definido caráter tardi-brasiliano para tal. Não sendo o objetivo desta tese a caracterização mineralógica dos veios e aplitos e a cronologia deste alinhamento, esta pesquisa indica a necessidade de estudos mais detalhados para as questões relacionadas a estes alinhamentos.



Figura 113: Foto de injeção de granito pegmatítico tardi- deformacional da Suíte Aurumina com orientação NE (ponto 2). Indicadores cinemáticos neste ponto possuem caráter dextral.



Figura 114: Foto de injeção de granito pegmatítico tardi- deformacional em rocha da Suíte Aurumina com orientação NE (ponto 19). Indicadores cinemáticos neste ponto possuem caráter dextral.

Capítulo 7

Conclusões e Recomendações

De acordo com os objetivos propostos nesta tese de doutorado, as conclusões alcançadas podem ser consideradas segundo duas óticas: a primeira relacionada ao processo metodológico de avaliação e interpretação geológica de dados R99SAR e dos dados geofísico; a segunda relacionada às contribuições geológicas para a área do Rifte Araí.

7.1. Quanto às imagens R99SAR

A seleção da área teste, bem como o levantamento de suas características fisiográficas e geológicas, permitiram definir os parâmetros de imageamento com relação à direção de linha de voo, à direção de visada, ao tamanho de pixel, ângulo de incidência e sobreposição de faixas do aerolevante R99SAR Nova Roma. As vantagens do controle destes parâmetros, possíveis de ser pré-estabelecidos em sensores aerotransportados, e a participação nas etapas de planejamento e execução do aerolevante resultaram na obtenção de imagens de ótima qualidade sem problemas relacionados a arrasto, desfocagem, grandes distorções geométricas e perda de dados.

Os processadores PROSAR e GSP, responsáveis pelo processo de transformação dos dados em imagem de amplitude, apresentaram resultados visualmente semelhantes quando analisados com realce histográfico 2%. No entanto, os valores estatísticos de mínimo, máximo, média e desvio padrão demonstraram resultados diferentes. Os dados do GSP não utilizam o intervalo dinâmico de 16 bits de resolução radiométrica, mas apresentam relações entre as polarizações HH, HV e VV concordantes com as informações observadas nas referências bibliográficas. Os dados PROSAR são compatíveis a 16 bits, mas as relações estatísticas entre as polarizações não apresentam o padrão esperado e, por isso, foram analisadas somente as imagens geradas pelo software GSP.

A aplicação da correção do padrão de antena, devido à variação do ângulo de incidência do sensor no terreno, foi indispensável para a análise visual da imagem. Devido à variação do sinal dentro da faixa e à alta taxa de recobrimento entre

segmentos, optou-se pelo descarte de aproximadamente 30% do *near range* das mesmas para reduzir o efeito *strapping* (persiana), muito comum nos imageamentos de aerotransportados e prejudicial na confecção de mosaicos. A função de ajuste dos dados utilizou modelo multiplicativo e polinômios de quinto grau para a solução desses problemas. A tentativa de remoção do ruído termal com parâmetros de áreas com retorno nulo (sombra) não foi possível e a falta de triédros e diedros para efeitos de calibração do sensor impossibilitou a definição do parâmetro \mathcal{K} , e a transformação do retroespalhamento para sigma 0, o que limitou a análise da imagem somente em termos de multipolarização.

A utilização da *Função Racional* para a ortorretificação dos dados do R99SAR em conjunto com coleta de pontos em dados GEOCOVER e SRTM possibilitou o posicionamento correto da imagem expandindo-a na direção de visada. Os deslocamentos das coordenadas de pixel foram imperceptíveis na escala 1:100.000 e escalas maiores.

Uma das razões da alta taxa de correlação das polarizações HH, HV e VV do R99SAR para toda a cena, observada tanto visualmente como estatisticamente nas imagens, é o sombreamento muito intenso devido à configuração entre ângulo de incidência e variações topográficas da região imageada. A alta correlação influenciada somente pela incidência da onda em ângulos superiores a 50 graus não foi confirmada.

A maioria das técnicas de realce em imagens SAR sugeridas por pesquisadores foi testada nas imagens R99SAR. As transformações dos dados utilizando razões entre polarizações e as principais componentes não mostraram resultados satisfatórios e não acrescentaram informações adicionais aos dados. A técnica de segmentação de imagem de classificação voltada ao objeto resultou numa subdivisão de áreas não condizentes com a espacialização das unidades litológicas sendo abandonada antes mesmo do processo posterior de classificação.

Considerando a alta correlação entre as polarizações, a interpretação geológica das imagens R99SAR foi realizada com as polarizações integradas na forma de uma composição colorida RGB por entender que a alta correlação entre as polarizações iria gerar uma redundância de interpretação.

A integração dos elementos da fotoanálise da rede de drenagem e do relevo possibilitou a subdivisão de trinta e quatro zonas homólogas na região do Rife Araí e uma excelente precisão no mapeamento dos elementos estruturais expressos pelos

lineamentos. Os elementos texturais e estruturais de análise de relevo foram os que mais contribuíram para a subdivisão das zonas homólogas devido às variações topográficas, texturais e estruturais existentes nas litologias que afloram nesta região.

As imagens de radar do sensor PALSAR, satélite ALOS, adquiridas para fins de comparação com as imagens R99SAR na região norte da cidade de Cavalcante, com ângulo de incidência de aproximadamente 21°, apresentaram acentuada distorção de inversão de relevo e encurtamento de rampa comprometendo seriamente seu uso para a interpretação geológica para utilização de métodos de fotointerpretação. A utilização das efemérides do sistema PALSAR possibilitam a calibração das imagens para σ_0 , com escala em decibéis. Em áreas planas que não apresentam distorções de relevo, as imagens PALSAR foram superiores às imagens R99SAR na identificação das unidades radargeológicas em função das informações mais diferenciadas das polarizações. Entretanto, apesar dos dados R99SAR não possuírem calibração absoluta, as informações obtidas através da análise fotoradarinterpretativa das imagens na região do Rift Araí apresentaram resultados superiores aos obtidos quando comparados aos dados multipolarimétricos PALSAR.

7.2. Quanto às imagens geofísicas

A ausência nas imagens de radar de elementos texturais e estruturais de relevo nas áreas de ocorrência da Suíte Aurumina, foi fator decisivo para o uso dos dados geofísicos na área do rifte próximo às cidades de Nova Roma e Teresina de Goiás. O processamento dos dados gamaespectrométricos, voltado para o realce das informações destas áreas arrasadas, utilizando técnicas de supressão de altos valores e de gradiente horizontal total, obteve bons resultados na identificação de novas direções de lineamentos estruturais não observadas nas imagens de radar. A interpretação das imagens com gradiente horizontal do canal de contagem total possibilitou a diferenciação de fácies mapeadas como biotita sieno granito rosa localmente com leucogranitos equigranular à porfirítico (PP4γpb3) no Granito Mendes, da Suíte Pedra Branca, tal qual descrito pelo IG/TF 2005.

Os dados magnetométricos demonstram, provavelmente, presença de remanescência na porção central da área de estudo dificultando a obtenção de lineamentos magnéticos rasos. Os produtos gerados indicam a presença de minerais

magnéticos na Suíte Pedra Branca e nas rochas metavulcânicas ácidas do Grupo Araí, Formação Arraias (PP4a α).

7.3. Quanto à Geologia

A organização de um banco de dados geológicos da região representativa do Rifte Araí, a fim de compatibilizar as informações compiladas dos mapeamentos anteriores, realizadas em escalas diferentes das informações obtidas das interpretações das imagens SAR e dados geofísicos, possibilitou uma análise integrada de toda a base de dados para a reformulação do mapa geológico desta região. Foram totalizadas quarenta e seis unidades radargeológicas para esta área que apresentam correlações de mais de 70% com as mapeadas. Na porção sul da folha de Porto Real, recoberta na área de estudo desta tese, várias unidades individualizadas não estão cartografadas em mapeamentos geológicos anteriores, o que demonstra a necessidade de atualização desta carta. O mapeamento de duas diferentes unidades radargeológicas com características texturais e estruturais distintas e respostas gamaespectrométricas e magnéticas na porção central do megassinclinal ao norte de Cavalcante demonstram que a unidade cartografada por Botelho *et al.* (2007), como PP4aqf, não é composta unicamente por quartzitos feldspáticos, devendo haver rochas de diferentes naturezas aflorando no interior deste megassinclinal.

A análise das direções dos lineamentos obtidos dos dados radargramétricos R99SAR identificou a existência de três sistemas principais que se mostraram concordantes com os dados descritos até o momento, em relação à compressão EW brasileira. Os dados de lineações de relevo, impressos nos domínios quartzíticos do Grupo Araí, caracterizam a foliação principal da área na direção NS, com variação local para NNE e NNW, tal qual observado para os dados das foliações S_n dos trabalhos de mapeamentos do IG/TF (2005), Botelho *et al.* (2007), Dardenne *et al.* (2007) e Alvarenga *et al.* (2007b).

As direções de lineamentos NE e NW concordaram com os falhamentos e direções das foliações miloníticas que ocorrem na Suíte Aurumina e no Grupo Araí, com movimentação dextral e sinistral, respectivamente. A relação cronológica entre estes falhamentos, no entanto, não se apresenta clara, sendo observadas ora a direção NE cortando a NW e ora vice-versa, sugerindo constituírem pares conjugados,

corroborando com os dados apresentados por Massucato (2003) e D'el-Rey Silva & Senna Filho (1998).

Um novo sistema de lineamento destacado nos dados gamaespectrométricos de direção N60E foi observado na Suíte Aurumina, cortando praticamente toda a área oeste do rifte. Dados de campo visitados indicaram que estes lineamentos estão relacionados à colocação de aplitos graníticos grossos e/ou de corpos pegmatíticos, cronologicamente distintos. Mapeamentos anteriores discriminam a presença deste tipo litológico, em escala pontual ou de afloramento. Este lineamento pode prolongar a sua área de atuação e refletir-se no Grupo Araí de forma bastante localizada, deslocando com movimentação dextral tal unidade, mas sem ocorrência de preenchimento por rochas graníticas.

Em campo, nota-se que a colocação dos aplitos ou corpos pegmatíticos é paralela à foliação cisalhante normalmente de direção NE e que esta foliação pode apresentar forma anastomosada, tal qual é observado para as foliações miloníticas de alto ângulo de mergulho do trabalho final de graduação de 2005. O baixo grau de deformação e a falta de uma foliação nos aplitos graníticos grosseiros e/ou de corpos pegmatíticos ainda não permitem o entendimento destas litologias dentro do cenário tectono- estrutural da área.

Capítulo 8

Referências Bibliográficas

- Abdelsalam, M.G.; Stern, R.J. Mapping Precambrian structures in the Sahara Desert with SIR-C/X-SAR radar: The Neoproterozoic Keraf Suture, NE Sudan. *Journal of Geophysical Research*, v.101, n. E10, p. 23,063-23,076, 1996.
- Almeida, F.F.M. Origem e evolução da Plataforma Brasileira. DNPM, 36 p. (Boletim 24), 1967.
- Almeida, F.F.M. Evolução tectônica do Centro-Oeste brasileiro no Proterozóico Superior. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 40 (Suplemento): p. 285-295, 1968.
- Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B.B.; Fuck, R.A. Províncias estruturais Brasileiras. *In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste*, 8, Campina Grande, p. 363-391, 1977.
- Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B.B.; Fuck, R.A. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Science Review*, 17, p. 1-29, 1981.
- Almeida, L.; Resende, L.; Rodrigues, A. P.; Campos, J.E.G. Hidrogeologia do Estado de Goiás. 01. ed. Goiânia: Governo do Estado de Goiás, 2006. v. 1000, 232 p, 2006.
- Almeida, T.; Meneses, P.R.; Andrade, N.S.O.; Santa Rosa, A.N.C.; Araújo Filho, J. O. de. Processamento de imagens SAR multipolarimétrico do R99B (SIPAM) para a extração de lineamentos na região do Rifte Araí (Nova Roma GO). *In: XLIII Congresso Brasileiro de Geologia*, 2006, Aracaju. *Anais Congresso Brasileiro de Geologia*, p. 153, 2006.
- Almeida, T.; Meneses, P.R.; Araújo Filho, J.O. de. As imagens do SAR multipolarimétrico R99B – SIPAM na caracterização de fácies e estruturas da Suíte Pedra Branca (Maçãos Mocambo e Pedra Branca, Nova Roma-GO). *In: Congresso Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 2007. Florianópolis (SC), 2007.
- Almeida, T.; Meneses, P.R.; Dantas, E.L.; Silva, A.D.; Roig, H.L. Contribuição para o entendimento das relações deformacionais no Rifte Araí utilizando dados de sensoriamento remoto multifonte e geofísica. *In: 44º Congresso Brasileiro de Geologia*, 2008, Curitiba. *Anais 44º Congresso Brasileiro de Geologia. O planeta terra em nossas mãos*, v. 1, p. 637, 2008a.
- Almeida, T.; Meneses, P.R.; Silva, A.D.; Dantas, E.L.; Roig, H.L. Novas perspectivas para uso de dados radar r99 e aerogeofísica de alta densidade de amostragem no mapeamento geológico estrutural: porção sul da folha de Porto Real (GO). *In: 44º Congresso Brasileiro de Geologia*, 2008, Curitiba. *Anais 44º Congresso Brasileiro de Geologia. O planeta terra em nossas mãos*, v. 1. p. 620, 2008b.
- Almeida, T.; Roig, H.L.; Sano, E. E.; Meneses, P.R. Dados ALOS/PALSAR na geologia: radar orbital polarimétrico na banda L. *In: 44º Congresso Brasileiro de Geologia*, 2008, Curitiba. *Anais 44º Congresso Brasileiro de Geologia. O planeta em nossas mãos*, v. 1, p. 690, 2008c.
- Almeida, T.; Silva, E.D. da; Silva Júnior, J.P. da; Meneses, P.R. Confecção de Carta Especial Aeronáutica de Pilotagem utilizando dados de sensoriamento: estudo de caso Carta Vila Sumuru, NB-20-Z-D. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 1715-1722, 2009.
- Alvarenga, C.J.S.; Dardenne, M.A. Geologia dos grupos Bambuí e Paranoá na Serra de São Domingos. *30º Congresso Brasileiro de Geologia*, Recife, v.2, 546-556, 1978.
- Alvarenga, C.J.S.; Dardenne, M.A.; Botelho, N.F.; Machado, M.A.; Lima, O.N.B.; Almeida, T. Relatório Final das Folhas Monte Alegre, Cavalcante e Nova Roma. Programa Geologia do Brasil (PGB/LGB), Convênio UNB/FINATEC/CPRM. Brasília, 2007a.
- Alvarenga, C.J.S.; Botelho, N.F.; Dardenne, M.A.; Lima, O.T.B. de; Almeida, T.. Mapa Geológico da Folha SD.23-V-C-VI - Nova Roma. (Cartas, mapas ou similares/Mapa). 2007b.

- Andrade, N.S. de O.; Santa Rosa, A.N. de C. Características técnicas do sensor SAR multipolarimétrico aerotransportado Brasileiro. Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril de 2007, INPE, p. 7027-7034, 2007.
- Andrade, N.S. de O.; Santa Rosa, A.N. de C.; Faria, P.C. de C. As matrizes de covariância e de coerência na Polarimetria SAR. Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril de 2007, INPE, p. 4759-4766, 2007a.
- Andrade, N.S. de O.; Santa Rosa, A.N. de C. Produtos do sensor SAR multipolarimétrico aerotransportado Brasileiro. Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril de 2007, INPE, p. 7035-7042, 2007b.
- Araújo Filho, J.O. A sintaxe dos Pirineus: um exemplo de intersecção de dois cinturões Brasileiros no Centro-Oeste do Brasil. *In*: SBG, Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, 7, Brasília, Anais, p.79, 1999.
- Araújo, V.A.; Alves, A.C. Projeto Cana Brava-Porto Real. Relatório Final, Vol.1 e 2, Convênio DNPM/CPRM, 1979.
- Babinski, M.; Kaufman, A.J. First direct dating of a Neoproterozoic post-glacial cap carbonate. *In*: Proceedings of the IV South American Symposium on Isotope Geology. Short Paper, Salvador, Brazil, pp. 321-323, 2003.
- Barbosa, O.; Baptista, M.B.; Dyer, R.C.; Braun, O.P.G.; Cotta, J.C. Geologia e Inventário dos recursos minerais da região central do estado de Goiás – Projeto Brasília. Brasília, DNPM, Série Geologia 18, Seção Geologia Básica 13, 1969.
- Barros, R.S.; Cruz, C.B.M. Avaliação da altimetria do modelo digital de elevação do SRTM. Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril de 2007, INPE, p. 1243-1250, 2007.
- Becker, B. K.; Miranda, M. & Machado, L. O. **Fronteira amazônica; questões sobre a gestão do território.** Brasília: Ed. UnB; Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 1990.
- Bizzi L.A.; Schobbenhaus, C.; Vidotti R.M.; Gonçalves, J.H. (Editores). Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG. Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 692 p. + 1 DVD com texto e 4 mapas (ISBN 85-230- 0790-3), 2002.
- Blakely, R.J. 1996. Potencial theory in Gravity & Magnetic Applications. Cambridge University Press, Cambridge, 441pp.1996.
- Blum, M.L.B. 1999. Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil central e sua aplicação à geologia regional e prospecção mineral. 229p. Universidade de Brasília, Dissertação de Doutorado, Brasília, 1999.
- Botelho, N.F. Lês ensembles granitique subalcalins a peralumineux mineralisés em Sn et In de la Sous-province Paraná, État de Goiás, Brésil (paragenèses hydrothermales associées: micas lithinifères, hélvite, cassitérite, minéraux d'indium). Doctorate Thesis, Univ. Pierre et Marie Curie (Paris VI), 343 p. Unpublished, 1992.
- Botelho, N.F.; Moura, M.A. Granite-ore deposit relationships in Central Brazil. Journal of South American Earth Science, 11 (5): p. 427-438, 1998.
- Botelho, N.F.; Alvarenga, C.J.S.; Menezes, P.R.; D'el-Rey Silva, L.J.H. Suíte Aurumina: uma suíte de granitos Paleoproterozóicos, peraluminosos e sin-tectônicos na Faixa Brasília. *In*: SBG, Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, 7, Brasília, Anais, p.17, 1999.
- Botelho, N.F.; Portela, J.F. Caracterização petrográfica e geoquímica das rochas metassedimentares da Formação Ticunzal, no contexto da Suíte granítica Aurumina, Goiás. *In*: SBG, Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, 9, Anais, p. 36-38, 2005.
- Botelho, N.F.; Alvarenga, C.J.S.; Dardenne, M.A.; Almeida, T. Mapa Geológico da Folha SD.23-V-C-V - Cavalcante. (Cartas, mapas ou similares/Mapa). Brasília, 2007.
- Branco, J.J.R.; Costa, M.T. da. Roteiro da Excursão Belo Horizonte – Brasília. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 14, Belo Horizonte, Instituto de Pesquisa Radioativ, UFMG, 15: p. 9-25, 1961.

- Brito Neves, B.B.; Sá, J.M.; Nilson, A.N.; Botelho, N.F. A tafrogênese Estateriana nos blocos Paleoproterozóicos da América do Sul e processos subseqüentes. *Geonomos*, 3: p. 1-21, 1995.
- Burrough, P.A.; MdDonnel, R.A. *Principals of Geographical Information Systems*. Oxford, Oxforduniversity Press. 285p. 1998.
- Calil, P.M. Conhecimento atual dos solos do Estado de Goiás. 2003. Disponível em: http://www.sieg.go.gov.br/downloads/SolosGO_PCalil.pdf. Acesso em 28/03/2007.
- Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, M.A. *Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos. INPE. 154p, 2004.
- Canada Center for Remote Sensing (CCRS). Tutorial: Fundamentals of Remote Sensing. Natural Resources Canada, Earth Sciences Setor. Documento em http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/index_e.php. Acesso em 04/02/2007.
- Carneiro, C. de C.; Crósta, A.P.; Silva, A.M.; Pinheiro, R.V.L.; Lima, R.V. de. Fusão de imagens altimétricas e aeromagnetométricas como ferramenta de interpretação geológica: o exemplo da Província Mineral de Carajás (PA). *Revista Brasileira de Geofísica*, vol.24, n. 3, p. 261-271, São Paulo, 2006.
- Carrino, T.A.; Souza Filho, C.R.; Leite, E.P. Processamento e Integração de Imagens Multiespectrais, de Radar e Aerogeofísicas do Bloco Serra Leste (Carajás, PA) e Discussão do Potencial para Mineralizações de Ferro. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 26, p. 123-140, 2008.
- Carvalho, A.S.; Meneses, P.R.. Avaliação das imagens de radar (SAR) do satélites JERS-1 para aplicação em mapeamento geológico . *Revista da Escola de Minas de Ouro Preto, Ouro Preto*, v. 49, n. 1, p. 44-51, 1996.
- Carvalho, A.S. Integração de imagens de radar/JERS-1, TM/Landsat e geofísicas para o mapeamento geológico da porção nordeste de Roraima, Brasil. 250p. Dissertação de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, 1997.
- Chaves, J.M.; Sano, E.E.; Guimarães, E.M.; Silva, A.B.; Meneses, P.R. Sinergismo entre dados ópticos e de radar no estudo geológico da região de Bezerra-Cabeceiras, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 33(2-Suplemento), p137-146, 2003.
- Chaves, J.M.; Sano, E.E.; Meneses, P.R.; Silva, A.B.; Guimarães, E.M. Investigação geológica na região de Bezerra-Cabeceiras (GO) por meio de dados de radar de abertura sintética. *In: Chaves, J.M.; Rocha, W.J.S.F. (Org.). Geotecnologias : Trilhando Novos Caminhos nas Geociências*. 1 ed. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 1, p. 101-122, 2006.
- Chiarini, M.F.N. Contribuição da aerogeofísica na caracterização de suturas e de sistemas transcorrentes: o exemplo de Porangatu-GO. 109p. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. Brasília, 2007.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. *Geologia e recursos minerais do estado da Bahia: sistema de informações geográficas/SIG/GIS*. 1 CD-ROM, mapas. Rio de janeiro, 2003.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. *Instruções para montagem dos SIG's geológicos*. Série Manuais Técnicos da CPRM, 21p, Brasília, 2005.
- Crósta, A.P. *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*. Universidade Federal de Campinas, 170p, 1993.
- Crósta, A.P.; Pedroso, E.C.; Souza Filho, C.R. de . Comparative analysis of Radarsat and JERS-1/SAR data for geologic mapping and gold exploration in the Tapajós region, Brazilian Amazon. *In: Radarsat ADRO Final Symposium, 1998, Quebec. Proceedings, 1998*.
- Crósta, A.P.; Souza Filho, C.R. de. Rivard, B.; Pedroso, E.C.; Miranda, F.P.de. Reconnaissance geologic mapping in the Tapajós Mineral Province, Brazilian Amazon, using spaceborne SAR imagery and airborne geophysics. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 27, n. 6, p. 669-678 Canada, 2001.
- Crósta, A.P.; Carneiro, C. de C.; Paradella, W.R.; Santos, A.R. dos. MAPSAR Simulation Campaign: Evaluation of the SIVAM/SIPAM SAR System for Geologic Mapping in Carajás Mineral Province. *In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007*,

- Florianópolis. Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPE. v. 1. p. 4057-4064. São José dos Campos, 2007.
- Cukrov, N.; Alvarenga, C.J.S. de; Uhlein, A. Litofácies da glaciação neoproterozóica nas porções sul do Cráton do São Francisco: exemplos de Jequitaiá, MG e Cristalina, GO. *Revista Brasileira de Geociências*, 35: p. 69-76, 2005.
- Daily, M.; Elachi, C.; Farr, T.; Stroberg, W.; Williams, S.; Schaber, G. Application of multispectral radar and Landsat imagery to geologic mapping in Death Valley. Washington: NASA JPL, 47 p. 1978.
- Dallemand, J.F.; Lichtenegger, J.; Raney, R.K.; Schumann, R. Radar imagery: theory and interpretation: lecture notes. Rome: FAO/ESA, (RSC Series 67), 1993.
- Dambrós, L.A et.alii. Zoneamento ecológico-econômico da área do aglomerado urbano de Goiânia. SEPLAN/IBGE. Goiânia, 1994.
- Dardenne, M.A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia*, 30, Recife, Anais... 2: p. 597-610, 1978.
- Dardenne, M.A. Os grupos Paranoá e Bambuí na faixa dobrada Brasília. *In: SBG, Simpósio do Cráton São Francisco*, 1º, Anais..., p. 104-157, 1981.
- Dardenne, M.A.; Campos, J.E.G.; Martins, F.L.; Alvarenga, C.J. S. Geologia da região de Alto Paraíso de Goiás/ Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, GO. Relatório FAP-DF, Geologia do Distrito Federal e entorno próximo, p. 87-103 (relatório interno), 1997.
- Dardenne, M.A.; Alvarenga, C.J.S.; Martins, F.A.L.; Campos, J.E.G. Geologia do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, GO. Plano de Manejo do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros – PNCV. Convênio UnB-IBAMA., 38p, Brasília, 1998.
- Dardenne, M.A., Campos, J.E.G., Alvarenga, C.J.S., Martins, F.L., Botelho, N.F.. A seqüência sedimentar do Grupo Araí na região da Chapada dos Veadeiros, Goiás. *In: SBG, Simpósio de Geologia do Centro-Oeste*, 7, Brasília, *Anais*, p.100. 1999.
- Dardenne, M.A. The Brasília Fold Belt. *In: Cordani, U.G.; Milani, E.J.; Thomaz Filho, A.; Campos, D.A. (eds.). Tectonic Evolution of South America. (International Geological Congress,31)*. p. 231-264, Rio de Janeiro, 2000.
- Dardenne, M.A.; Alvarenga, C.J.S.; Botelho, N.F.; Lima, O.T.B. de; Almeida, T. Mapa Geológico da Folha SD.23-V-C-III - Monte Alegre de Goiás. (Cartas, mapas ou similares/Mapa). Brasília, 2007.
- Dardenne, M.A.; Schobbenhaus, C. Metalogênese do Brasil. Editora Universidade de Brasília, Brasília, 392p, 2001.
- Delgado, I.M.; Souza, J.D.; Silva, L.C.; Silveira Filho, N.C.; Santos, R.A.; Pedreira, A.J.; Guimarães, J.T.; Angelim, L.A.A.; Vasconcelos, A.M.; Gomes, I.P.; Lacerda Filho, J.V.; Valente, C.R.; Perrota, M.M.; Heineck, C.A. Escudo Atlântico, *In: Bizzi L.A., Schobbenhaus C., Vidotti M., Gonçalves J.H. (eds.) Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. 1 DVD, 2002.
- Del Rey Silva, L. J. H.; SENNA FILHO, V. . Ouro em sericita-quartzo hidrotermalitos controlados por cisalhamentos conjugados brasileiros, na região de Cavalcante (GO), Brasil Central. *Revista Brasileira de Geociências*, Brasília, V. 28, N. 3, P. 443-447, 1998.
- Dobson, M. C.; Ulaby, F. T.; Le Toan, T.; Beaudoin, A.; Kasischke, E.S.; Christensen, N. Dependence of Radar Backscatter on Coniferous Forest Biomass. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 30, n. 2, p. 412-415, 1992.
- Dobson, M. C.; Ulaby, F. T.; Pierce, L. E.; Sharik, T. L.; Bergen, K. M.; Kellndorfer, J.; Kendra, J. R.; Li, E.; Lin, Y. C.; Nashashibi, A.; Sarabandi, K.; Siqueira, P. Estimation of forest biophysical characteristics in northern Michigan with SIR-C/XSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, n.33, p.877-894, 1995.
- Drury, S. A. Image interpretation in geology. 3 ed., Inglaterra, Blackwell Science. 290 p, 2001.
- Duarte, C.R.D. Radioelementos naturais na área do Projeto Rio Preto (GO). Dissertação de Mestrado, UNESP, 112p, Rio Claro, 2002.

- Dyer, R.C. Grupo Arai: Um Grupo de metamorfitos do Centro-Leste de Goiás. Revista da Escola de Minas de Ouro Preto, v. 28, 1970.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 2006.
- Evans, D.L.; Farr, T.M.; Ford, J.P.; Thompson, T.W.; Werner, C.L. Multipolarization Radar Images for Geologic Mapping and vegetation Discrimination. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. v. GE-24, n. 2, p. 246-257.1986
- FAB – Força Aérea Brasileira. Disponível em:
<<http://freepages.military.rootsweb.ancestry.com/~otranto/fab/sivam.htm>>. Acesso em 23/12/2008.
- Fagundes, F.R.; Paula, M.N. Dados de radar multipolarimétrico do SIPAM/SAR para a discriminação de fitofisionomias do Parque Nacional de Brasília. Universidade de Brasília. Monografia de especialização, 25p, Brasília, 2006.
- Falconi, P. G. A Modernização da FAB pelo SIVAM. Textos & Debates, número 8, p. 43-59, Brasília, 2005.
- Fernandez, G.A.V. Taxa de correlação entre diferentes polarizações das bandas L e X de imagens SAR adquiridas pelo R99-B do SIPAM visando mapeamento de corte seletivo. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 7057-7062. 2007.
- Fonseca, M A. Estilos estruturais e arcabouço tectônico do segmento setentrional da Faixa Brasília. Dissertação de Doutorado. 196p, Universidade de Brasília, Brasília, 1996.
- Fonseca, M.A.; Dardenne, M.A. Tectônica transpressional no contexto do núcleo metamórfico externo da Faixa Brasília em seu segmento setentrional. *In: 5º Simpósio de Geologia do Centro-Oeste*. SBG, Núcleos Goiânia e Brasília. p. 84-86, 1995.
- Fonseca, M.A.; Dardenne, M.A.; Uhlein, A. Faixa Brasília setor setentrional: estilos estruturais e arcabouço tectônico. Revista Brasileira de Geociências, 25 (4): p. 267-278, 1995.
- Ford, J.P.; Blom, R.G.; Coleman, J.L.; Farr, T.G.; Plaut, J.J.; Pohn, H.A.; Sabins, F.F. Radar Geology. *In: Lewis, A.J.; Henderson, F.M. Manual of remote sensing: principles & applications of imaging radar*, 3 ed. v.2, p. 511-565, 1998.
- Freitas C.C.; Sant’anna, S.J.S.; Rennó, C.D.; Correia, A.H. Utilização de radar de abertura sintética na classificação de uso e ocupação do solo. Divisão de Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/ofigeo.PDF>. Acesso em 04/02/2007.
- Fuck, R.A. A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins. *In: SBG, Simpósio de Geologia do Centro-Oeste*, 4, Anais, p. 184-187. 1994b.
- Fuck, R.A.; Jardim de Sá, E.F.; Pimentel, M.M.; Dardenne, M.A.; Pedrosa-Soares, A.C. As faixas de dobramentos marginais do Cráton São Francisco: Síntese dos conhecimentos. *In: J.M.L. Domingues; Misi, A. (eds). O Cráton do São Francisco*, SBG/SGM/CNPq, p.161-185,1993.
- Fuck R.A.; Pimentel, M.M.; D’el Rey Silva, L.J.H. Compartimentação tectônica na porção oriental da Província Tocantins. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia*, 38, Anais, p. 215- 217. 1994a.
- Fuck, R.A.; Dantas, E.L.; Pimentel, M.M.; Botelho, N.F.; Hollanda, M.H.B.M.; Moraes, R.; Armstrong, R. Crosta continental Paleoproterozóica no embasamento da porção norte da Faixa Brasília: Novos dados Sm-Nd e U-Pb. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia*, 41, João Pessoa, Anais, p.308, 2002.
- Giustina, M.E.S.D.; Barbosa, M.F.N. 2005. Trabalho final de graduação, área VII, Projeto Nova Roma – Porto Real. Universidade de Brasília, 127p, Brasília, 2005.
- Gonçalves, L.; Fonseca, A.M.; Caetano, M. Exploração de imagens de alta resolução do satélite IKONOS. *In: VI Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica (ESIG 2001)*. Série Comunicação. Lisboa, 22 p.2001.

- Goodchild, M. Geographical information science. *International Journal of Geographical Information Science*, 6: p35-45. 1992.
- Gotzinger, J., Press, F., Siver, R. Jordan T. *Para Entender a Terra*. Editora Bookman. 2006,
- Gouvêa, J.R.F.; Valadares, G.S.; Oshiro, O.T.; Mangabeira, J.A.C. Comparação dos modelos digitais de elevação gerados com dados SRTM e cartas IBGE na escala 1:250.000 na região da bacia do Camanducaia no Estado de São Paulo. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 2191-2193, 2005.
- Guimarães, E. M. Estudos de proveniência e diagênese com ênfase na caracterização dos filossilicatos dos Grupos Paranoá e Bambuí na região de Bezerras-Cabeceiras, GO. Universidade de Brasília, Tese de doutorado, 269p, Brasília, 1997.
- Gunn, P.J. Interpretation of airborne magnetic and radiometric surveys. Course. AGSO. 150p. 1998.
- Gunn, P.J.; Minty, B.R.S; Milligan, P.R. The airborne gamma-ray spectrometric response over australian terranes. *In: Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration. Proceedings...*, edited by A.G. Gubins, p.733-740. 1997.
- Harris, J. R., Bowie, C. , Rencz, A. N., Graham, D. 1994. Computer-Enhancement Techniques for the Integration of Remotely Sensed, Geophysical, and Thematic Data for the Geosciences. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 20 (3) 210-221.
- Hermuche, P.M.; Ferreira, N.C.; Sano, E. E. Proposta metodológica para elaboração de mapa de tendência de uso da terra no Vão do Paranã, Goiás, baseada em condicionantes ambientais e sócio-econômicos. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 14, Natal, RN. *Anais...*, p. 5873-5880, 2009.
- Henderson, F.M.; Lewis, A.J. Radar. *In: Wiley, J.; Sons, K. Manual of remote sensing: principles and application of imaging radar*. v. 2, Cap. 1, p. 1-6., New York, 1998.
- Higa, L.T.; Paranhos Filho, A.C.; Torres, T.; Salles, A.T. Avaliação da precisão vertical do modelo SRTM para a bacia do rio Paraguai, no Estado de Mato Grosso do Sul. *Anais 1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal*, Campo Grande, Brasil, 11-15 novembro 2006, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p.834-840, 2006.
- Hippert, J.F.; Massucato, A.J. Phyllonitization and development of kilometer size extension gashes in a continental scale strike slip shear zone, north Goiás, central Brazil. *Journal of Structural Geology*, 20: p. 433-455, 1998.
- Hu, Y.; Tao V.; Croitoun, A. 2004. Understanding the rational function model: methods and applications. *In: Proc. of the XXth International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Congress, Istanbul. DVD. Disponível em: <<http://www.spatial.maine.edu/~croitoru/Publications/423.pdf>>. Acesso em 22/02/2007.*
- Huandong, G.; Yunhr, Z.; Yun, S.; Piliang, D.; Chao, W. Geological Analysis using shuttle imaging radar and airborne SAR in China. *Adv. Space. Res. Vol 13, n°11, p. 79-82, 1993.*
- IBGE. Manual técnico da vegetação Brasileira. 92 p. Série Manuais Técnicos de Geociências, número 1. Rio de Janeiro, 1992.
- IG/TF. Trabalho Final de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências. Projeto Paranã. Coordenador: Nilson Francisquinni Botelho. 1995.
- IG/TF. Trabalho Final de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências. Projeto Cavalcante- Teresina de Goiás. Coordenador: Nilson Francisquinni Botelho. 1998.
- IG/TF. Trabalho Final de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências. Projeto Monte Alegre de Goiás. Coordenador: Carlos José Souza Alvarenga. 1999.
- IG/TF. Trabalho Final de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências. Projeto Nova Roma- Porto Real. Coordenador: Nilson Francisquinni Botelho. 2005.
- Isotta, C.A.L.; Rocha-Campos, A.C.; Yoshida, R. Striated pavement of the Upper Precambrian glaciations in Brazil. *Nature*, 222: p. 467-468, 1969.
- Karfunkel, J.; Hoppe, A.; Noce, C.M. Serra da Água Fria e vizinhanças, MG – Vestígios da glaciação neoproterozóica. *In: Schobbenhaus, C.; Campos, D.A.; Queiroz, E.T.; Winge, M.;*

- Berbert-Born, M.L.C. (eds.) Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. MME-DNPM-CPRM-SIGEP, p. 165-174, Brasília, 2003.
- Keckler, D. Surfer for Windows. UserIs Guide. Golden Software. 1994
- Knust, S.S.A. Avaliação das imagens RADARSAT-1 sob diferentes geometrias de observação em aplicação geológica no Vale do Rio Curuçá (Bahia). Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. INPE. São José dos Campos. 124p. 2007.
- Lacerda Filho, J.V.; Rezende, A.; Silva, A da. Geologia e recursos minerais do Estado de Goiás e Distrito Federal. Texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do Estado de Goiás e Distrito Federal – Escala 1: 500.000. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). 176p, Goiânia, 1999.
- Lacerda Filho, J.V.; Rezende, A.; Silva, A da. Mapa Geológico e de Recursos Minerais 1:500.000 da CPRM/METAGO/UnB/SMET - 1999 - SIG-Goiás-Geologia - SGM/SIC, SIG-Goiás - Superintendência de Geologia e Mineração – SIC. Goiânia, 2002.
- LASA Engenharia e Prospecções S.A. "Projeto Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás – 3ª Etapa – Paleo-Neoproterozóico do Nordeste de Goiás - Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos", Convênio de Cooperação Técnica entre a SGM/MME/CPRM e SIC/SGM/FUNMINERAL/Estado de Goiás, Relatório Final, 22 vol., Texto e Anexos (mapas), Rio de Janeiro, 2006.
- Latrubesse, E.M.; Carcalho, T.M.; Stevaux, J.C. Mapa Geomorfológico do Estado de Goiás. Secretaria de Indústria e Comércio. Superintendência de Geologia e Mineração, Relatório Final. 85p, Goiânia, 2005.
- Li, F.K.; Bryan, M.L. Tradeoffs Among Several Synthetic Aperture Radar Image Quality Parameters: Results of a User Survey Study. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 49, n. 6, p. 791-803, 1983.
- Lillesand, T.M.; Kieffer, R.W.; Chipman, J.W. 1987. Microwave Sensing. *In*: Wiley, J.; Sons, K. Remote sensing and image interpretation. v. 2, Cap. 8, p. 472-527, New York, 1987.
- Lima, M.I.C. Introdução à interpretação radargeológica. Série Manuais Técnicos em Geociências, número 3. IBGE - Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 122p, 1995.
- Lima, M.I.C. Projeto RADAM: uma saga Amazônica. Editora PacaTatu. 93p, 2008.
- Lourenção, H.J. A Defesa Nacional e a Amazônia: O Sistema de Vigilância da Amazônia (SIVAM). 222p. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Campinas, 2003.
- Macfarlane, N.; Thomas, M.H.B. Speckle Reduction Algorithms and Their Application. *In*: Satellite Remote Sensing - Review & Preview Conference Reading. Proceedings. p. 391-398. University of Reading, England, 1984.
- Macleod, I.N.; Jones, K.; Dai, T.F. 3-D Analytic signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes, Exploration Geophysics, 24, 679-688. 1993.
- Macri Pellizzeri, T. M.; Dellapos, M.R.; Acqua, F.; Gamba, P.; Lombardo, P.; Mazzola, D. Multiband SAR classification using contextual analysis: annealing segmentation vs. a neural kernel-based approach. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS apos 02. IEEE International Volume 5, p. 2593 - 2595 vol.5, 2002.
- Marini, O.J.; Liberal, C.S.; Reis, L.T.; Trindade, C.A.H.; Souza, S.L. Nova Unidade litoestratigráfica do Pré-Cambriano do Estado de Goiás. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, Boletim Expandido Resumos, v. 1, p. 126-127, 1978.
- Marini, O.J.; Fuck, R.A.; Danni, J.C.M.; Dardenne, M.A. A evolução geotectônica da Faixa Brasília e do seu embasamento. Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas faixas marginais. Anais..., p.110-115, 1981.
- Marini, O.J.; Botelho, N.F. A província de granitos estaníferos de Goiás. Revista Brasileira de Geociências, 16 (1): p. 19-31, 1986.

- Martins, F.A.L. Análise faciológica e estratigráfica do Paleo-Mesoproterozóico: Sequência Araí no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 1999.
- Massucato, A.J. Caracterização estrutural do Embasamento do Grupo Araí na zona externa da Faixa Brasília (GO). Dissertação de Doutorado, UNESP, Rio Claro, 2003.
- Mather, P.M. Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. Chichester: John Wiley & Sons, 292 p. 1991.
- Mendonça, F.B. Identificação de feições de fábricas de cimento portland em imagens SAR com base na análise das polarizações da Banda L para a geração de informações de inteligência. Monografia de Especialização. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. 48p. Brasília, 2008.
- Meneses, P.R.; Carvalho, A.S. Preliminary evaluation of SAR/SERS-1 data for geological application in Roraima State, Brazil, in the Guyana shield. *In: Preliminary Evaluation of SAR/JERS Symposium, 1994, Toquio. v. 1, p. 429-443, Nasda, 1994.*
- Meneses, P.R.; Marques, L.S. Reavaliação geológica por meio de interpretação de imagens RADARSAT. *In: GlobSar 2 Final Symposium radarsat application in Latin America, 1999, Buenos Aires. v. 1. p. 172-177, Ottawa, 1999.*
- Meneses, P.R.; Sano, E.E.; Chaves, J.M. 2000. Uso de imagens de radar como ferramenta auxiliar na identificação de elementos geológicos na região do cerrado. *SITIENTIBUS, Feira de Santana, v. 22, p. 55-69, 2000.*
- Meneses, P.R.; Santa Rosa, A.N.C. 1999. Performance do filtro map gauss para reduzir ruído speckle em imagens de radar. *In: GlobSar 2 Final Symposium radarsat application in Latin America, 1999, Buenos Aires. v. 1, p. 66-70, Ottawa, 1999.*
- Miliareis, G.C.; Paraschou, C.V.E. Vertical accuracy of the SRTM DTED level 1 of Crete. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 7. p. 49-59, 2005.*
- Minty, B.R.S. Simple Microlevelling for aeromagnetic data. *Exploration Geophysics 22: 591-592p, 1991.*
- Moreira, M. A. Fundamento do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação. 1. ed. 251p. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2001.
- Moreira, M.L.O.; Costa, H.F. da; Silva, C.R.; Rodrigues, A.P.; Resende, L.; Almeida, L.; Sá, M.A.M. de; Medeiros, L.C.; Santos, W. R. 2007. SIG - Informações sobre recursos hídricos do Estado de Goiás. Disponível em: <http://www.sieg.go.gov.br/downloads/SICgeoinformacaoSRH2.pdf>. Acesso em 28/03/2007.
- Moura, C.O. Geologia do sudoeste do estado de Goiás: Integração de dados geológicos e aerogeofísicos de alta densidade. 135p. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- Moura, M.A.; Botelho, N.F. The topaz-albite granite and related rocks from the Sn-In mineralized zone of Mangabeira granitic Massif (GO, Brazil). *Revista Brasileira de Geociências, v. 30, n. 2, p. 270-273, Rio de Janeiro, 2000.*
- Mura, J.C.; Correia, A.H.; Honda, P. Calibração preliminar dos dados SAR polarimétricos em banda L do sensor R99B do CENSIPAM. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 4951-4958. 2007.*
- NASA. SAR Synthetic Aperture Radar: instrument panel report. Earth Observing System, v.2f. Washington, DC., 1996.
- Nepomuceno, A.M. Uso de rede neural artificial não supervisionada na classificação de dados de radar na banda-p para mapeamento de cobertura da terra em floresta tropical. Dissertação de Doutorado. 205p. Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2004.
- Novo, E.M.L.M. Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, v. 01. 363 p, 2008.

- Oliver, C.; Quegan, S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images. Artech house, Inc. 477p, British, 1997.
- Paradella, W.R.; Santos, A.R. dos; Venezianni, P.; Sant'anna, M.V.; Morais, M.C. Geological Investigation Using RADARSAT-1 Images in the Tropical Rain Forest environment of Brasil. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26:2, p. 82-89, 2000.
- Paradella, W.R.; Santos, A.R. dos; Venezianni P.; Cunha, E.S.P. Radars Imageadores nas Geociências: Status e Perspectivas. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)*, 12, 2005, Goiânia, Anais..., São José dos Campos: INPE. Artigos, p. 1847-1854, 2005.
- Paradella, W.R. Conceitos fundamentais do radar imageador: nível básico. Apostila oferecida ao curso Conceitos fundamentais do radar, segundo semestre de 2006, na Universidade de Campinas (UNICAMP), 91p, 2006.
- Peake, W.M.; Oliver, T.L. The response of terrestrial surfaces at microwave frequencies. (Technical Report). Columbus, Ohio: State University, p. 2440-2447, 1971.
- Pimentel, M.M.; Heaman, L.; Fuck, R.A.; Marini, O.J. U-Pb zircon geochronology of Precambrian tin-bearing continental-type acid magmatism in Central Brazil. *Precambrian Research*, 52: p. 321-335, 1991.
- Pimentel, M.M.; Fuck, R.A.; Botelho, N.F. Granites and the geodynamic history of the Neoproterozoic Brasília Belt, Central Brazil: a review. *Lithos*, 46: 463-483, 1999.
- Pimentel, M.M.; Fuck, R.A.; Jost, H.; Ferreira Filho, C.F.; Araújo, S.M. The basement of the Brasília Belt and the Goiás Magmatic Arc. *In: Cordani, U.G.; Milani, E.J.; Thomaz Filho, A.; Campos, D.A. (eds.). Tectonic Evolution of South America. 31st Int. Geological Congress*, p. 195-229, Rio de Janeiro, 2000.
- Pimentel, M.M.; Botelho, N.F. Sr and Nd isotopic characteristics of 1.77-1.58 Ga *ritf*-related granites and volcanics of the Goiás tin province, Central Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 73 (2): p. 263-276, 2001.
- Pimentel, M.M.; Alvarenga, C.J.S.; Armstrong, R. Proveniência da Formação Jequitaiá, Brasil central, com base em dados U-Pb SHRIMP em zircões detríticos. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia*, 41, João Pessoa, Anais, p.503, 2002.
- Pimentel, M.M.; Jost, H.; Fuck, R.A. O embasamento da Faixa Brasília e o Arco Magmático de Goiás. *In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Brito Neves, B.B. (eds.) Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, p. 355-368, 2004.
- Pinheiro, E. da S. Avaliação de Imagens Quickbird na análise geográfica de um setor da Mata Atlântica do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisa Tecnológica (INPE). p.46-52. São José dos Campos, 2003. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2003/08.05.10.17/doc/publicacao.pdf>. Acesso em 15/05/08.
- Pinheiro, E. da S. Comparação entre dados altimétricos SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION, Cartas Topográficas e GPS: numa área com relevo escarpado. *Revista Brasileira de Cartografia* n°58/01, 2006. ISSN1808-0936, p. 1-9, 2006.
- Pinto, M.B.P. Avaliação do modelo digital de elevação do SIPAM, gerado por interferometria SAR. Dissertação de Mestrado, 84p, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- Rabelo, T. N. Avaliação das imagens multipolarizadas de radar em banda L do sensor SAR-R99B (SIVAM-CENSIPAM) em aplicação geológica no Vale do Rio Curuçá, Bahia. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisa Tecnológica (INPE). 85p. São José dos Campos, 2007.
- Rabelo, T. N.; Knust, S.S.A.; Paradella, W.R.; Santos, A.R. Aplicação das Técnicas de Fotointerpretação nas Imagens de Simulação do MAPSAR. *In: XLIII Congresso Brasileiro de Geologia*, 2006, Aracaju. XLIII Congresso Brasileiro de Geologia, 2006.
- Rabelo, T. N.; Paradella, W.R.; Santos, A.R.; Rennó, C.D.; Galvão, L.S.; Mura, J.C.; Knust, S.S.A. Evaluating the discrimination of Cu-mineralised rock alteration products from simulated

- MAPSAR images in the Curaçá Valley, Brasil. *International Journal of Remote Sensing*, v. 01, p.1-15, 2007.
- Rabus, B.; Eineder, M.; Roth, A.; Bamler, R. The shuttle radar topography-a new class of digital elevation models acquired by space borne radar- ISPRS, *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 57, p. 241-262, 2003.
- Raney, R.K. Radar Fundamentals: Technical Perspective. 1998. *In: Wiley, J; Sons, K. Manual of Remote Sensing: Principles & Applications of Imaging Radar. v. 2, Cap. 2, p. 9-124, New York, 1998.*
- Rao, K.S. 2004. Validation of digital elevation model derived from Shuttle Radar Topography Mission using GPS field measurements. Disponível em: <www.gisdevelopment.net/technology/gps/ma03033abs.htm> Acesso em: 28/03/2005.
- Reis, E.; Bicho, C.P.; Melo, E. Exploração Mineral – Tendências Tecnológicas. 2007. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/tendencias/livro/>. Acessado em 30/08/08.
- Ribeiro, J.F.; Walter, B.M.T. 1998. Fitofisionomias do bioma cerrado. *In: S.M. Sano & S.P. Almeida (eds). Cerrado: ambiente e flora. EMBRAPA-CPAC, Planaltina, p.89-166, 1998.*
- Roig, H.L. Modelagem e integração de dados aplicados a análise dos processos erosivos e de transporte de sedimentos – o caso da bacia do rio Paraíba do Sul – SP. Dissertação de Doutorado. Universidade de Brasília. 223p. Brasília, 2005.
- Sabins, F.F. *Remote Sensing: principles and interpretation*. 5 ed. Freeman and Company. 426p, San Francisco, 1986.
- Sano, E. E.; Ferreira, L.G.; Huete, A.R. Synthetic Aperture Radar (L band) and Optical Vegetation Indices for Discriminating the Brazilian Savanna Physiognomies: A Comparative Analysis. *Earth Interactions*, v. 9, n. Paper no., p. 1, Estados Unidos, 2005.
- Sant'anna, S.J.S., Mascarenhas, N.D.A. Comparação do desempenho de filtros redutores de "speckle". *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 8, Salvador, Anais..., São José dos Campos: INPE. Artigos, p.871-877, 1996.*
- Santos, A.R.; Veneziani, P.; Paradella, W.R.; Morais, M.C. 2000. "Radar aplicado ao mapeamento geológico e prospecção mineral: Aplicações." Curso INPE-ADIMB, São José dos Campos, 21- 26 de Agosto de 2000. São José dos Campos, INPE, 103p (INPE-8117-PUD/45), 2001.
- Santos, P.R.A. dos; Gaboardi, C.; Oliveira, L.C. Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 4473-4480, 2005.*
- Santos, P.R.A. dos; Silva, J.E.B da. A utilização dos modelos SRTM na interpretação geomorfológica: técnicas e tecnologias aplicadas ao mapeamento geomorfológico do território brasileiro. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 4261-4266.2007*
- Santos, V.T.M. Aplicação de classificação digital de imagens orbitais no mapeamento de uso da terra. Dissertação de Mestrado. 100p. Universidade de Brasília. Brasília, 2006.
- Schobbenhaus, C.; Brito Neves, B. B. A Geologia do Brasil no contexto da Plataforma Sul-Americana. *In: Bizi, L. A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R. M., Gonçalves, J. H. (Org.). Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Serviço Geológico do Brasil-CPRM, v. 1, p. 5-54. Brasília, 2004.*
- CPRM/SIC-FUNMINERAL. Superintendência de Geologia e Mineração – SIC. GEOLOGIA do Estado de Goiás e Distrito Federal. Org. Maria Luiza Osório Moreira, Luiz Calos Moreton, Vantederlei Antônio de Araújo, Joffre Valmório de Lacerda Filho, Heitor Faria da Costa. Escala 1:500.000. Goiânia, 2008.
- Silva, S.C.; Santana, N.M.P. de; Pelegrini, J.C. Caracterização Climática do Estado de Goiás. Secretaria de Indústria e Comércio. Superintendência de Geologia e Mineração. Goiânia. 133 p. il. (Série Geologia e Mineração n. 3), 2006.
- Silva, A. B. *Sistemas de Informações Geo-referenciadas: Conceitos e Fundamentos*. 1. ed. Campinas: Unicamp, v. 1. 235 p. 1999.

- Silva, L.O.M.; Menezes, M.J.P. 2008. Projeto SIPAM como Sistema de Informação. Acesso em 02/03/2009. Disponível em: <http://www.sbu.unicamp.br/snbu2008/anais/site/pdfs/3528.pdf>
- Silva, W.D da; Formaggio, A. R.; Rudorff, B.F.T.; Mura, J.C.; Paradella, W.R. Uso de imagens do sistema SAR-R99B para distinguir culturas agrícolas. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 4983-4990, 2007.
- Silva, W.F. Imagens polarimétricas em banda L do SAR-R99B e do MAPSAR (simuladas) para distinguir culturas agrícolas. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. INPE. São José dos Campos. 102p. 2007
- SIPAM – Sistema de Proteção da Amazônia. 2008. Disponível em <<http://www.sipam.gov.br/content/view/40/53/>>. Acesso em 02/12/2008
- SIVAM – Sistema de Vigilância da Amazônia. 2008. Disponível em: <<http://www.sivam.gov.br/TECNO/subrec2.htm>>. Acesso em: 12/11/08.
- Soares, J.V. 2007. Fundamentos de Sensoriamento Remoto por Radar. Divisão de Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em: http://www.dsr.inpe.br/dsr/vianei/radar/DOCs_PDFs/SensRem_Radar.pdf. Acesso em: 04/02/2007.
- Soares, P.C.; Barcellos, P.E.; Csordas, S.M.; Mattos, J.T. de; Balieiro, M.G.; Meneses, P.R. Lineamentos em imagens de Landsat e Radar e suas implicações no conhecimento tectônico da Bacia do Paraná. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2 (SBSR). p. 143-156, 1982.
- Soares, P.C.; Fiori, A.P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Notícia Geomorfológica*, v. 16, n. 32, p. 71-104, Campinas, 1976.
- Soller, L.S. Detecção de manchas de óleo na superfície do mar por meio de técnicas de classificação textural de imagens de radar de abertura sintética (Radarsat-1). Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), 152p, São Jose dos Campos, 2000.
- Sordi, D.A. Aerogeofísica aplicada à compreensão do sistema de empurrões da Sequencia Santa Terezinha de Goiás, Brasil Central. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 123p. Brasília, 2007.
- Sparrenberger, I.; Tassinari, C.C.G. Idade da mineralização estanífera na Subprovíncia do Rio Paraná (GO) através de datações U-Pb em cassiterita. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia*, 40, Belo Horizonte, Anais, p.143, 1998.
- Sun, G.; Ranson, K.J.; Kharuk, V.I.; Kovacs, K. Validation of surface height from shuttle radartopography mission using shuttle laser altimeter. *Remote Sensing of Environment*. p. 401-411, 2003.
- Tassinari, C.C.G.; Siga Jr., O.; Teixeira, W. Panorama geocronológico do centro-oeste brasileiro: soluções, problemáticas e sugestões. *Atas 2º Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, Goiânia*, p. 93-116, 1981.
- Teixeira, L.M. Caracterização dos minerais portadores de terras raras em granitos da sub-província estanífera Paraná-Goiás. Dissertação de Mestrado, 97p, Universidade de Brasília, Brasília, 1998.
- Toutin, T.; Rivard, B. A new tool for depth perception of multi-source data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 61, No. 10, p. 1209-1211, 1995.
- UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais. Geologia do quadrilátero ferrífero: integração e correção cartográfica em SIG. UFMG/CODEMIG. 1 DVD. Minas Gerais, 2005.
- Ulaby, F.T.; Dobson, M.C. Handbook of radar scattering statistics for terrain. Artech House, 357 p, Boston, 1988.
- Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. Real-Aperture Side-Looking Airborne Radars. *In: Microwave Remote Sensing: Active and Passive*. Addison-Wesley, v. 2, Cap. 8, p. 562-628, Massachusetts, 1982.

- Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. Microwave remote sensing: active e passive: From theory to applications. 2 ed. v. 3. Artech House, 2162p, Massachusetts, 1986.
- Ulhein, A.; Alvarenga, C. J. S.; Trompete, R.; Dupont, H.S.J.B.; Egydio-Silva, M.; Cukrov, N.; Lima, O.N.B. Glaciação neoproterozóica sobre o Cráton do São Francisco e faixas dobradas adjacentes. *In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C. D.R., Brito-Neves, B. B. (eds.) Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.* Beca, São Paulo, p. 539-553, 2004.
- Valeriano, C.M.; Dardenne, M.A.; Fonseca, M.A.; Simões, L.S.A.; Seer, H.J. A evolução tectônica da Faixa Brasília. *In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Brito Neves, B.B. (eds.) Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.* São Paulo, Beca, p. 575-592, 2004.
- Vasconcellos, R.M.; Metelo, M.S.; Mota, A.C.; Gomes, R.D. Geofísica em levantamentos geológicos. DIGEOF-CPRM. Rio de Janeiro, 1990.
- Veiga, R.Q. Processador SAR com compensação de movimento para SAR-SIVAM. Dissertação de Mestrado. 90p. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Jose dos Campos, 2004.
- Veiga, R.Q.; Andrade, N.S.O. Imageamento por radar. Apostila oferecida ao curso de Imageamento por radar oferecido no primeiro semestre de 2005 na Universidade de Brasília. 89p. Brasília, 2005.
- Veiga, R.Q.; Monteiro, M.V.T. Ortoretificação de imagens SAR do R-99. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 1905-1912, 2009.
- Velandia, P.F.A. Falla “Algeciras” a partir de imagenes de radar. *In: Horizontes Naturales.* ISSN 0113-9139. Rev. n°4. Enero – Diciembre, 2001.
- Veneziani, P.; Santos, A. R.; Paradella, W. R. A evolução tectono-estratigráfica da Província Mineral de Carajás: um modelo com base em dados de sensores remotos orbitais (SAR-C RADARSAT-1, TM-Landsat-5), aerogeofísica e dados de campo. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 34, n. 1, p. 67-78, São Paulo, 2004.