



Número: 421/2010
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

CLEYTON DE CARVALHO CARNEIRO

Modelagem espacial de dados aerogeofísicos e interpretação de imagens SAR aplicados ao mapeamento geológico e metalogenético da região central do Domínio Bacajá, Estado do Pará.

Tese apresentada ao Instituto de Geociências como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta

Co-orientadores:

Profa. Dra. Adalene Moreira Silva

Prof. Dr. Carlos Eduardo de Mesquita Barros

CAMPINAS-SÃO PAULO

Agosto de 2010

© by Cleyton de Carvalho Carneiro, 2010

Catálogo na Publicação elaborada pela Biblioteca do Instituto de Geociências/UNICAMP

C215m Carneiro, Cleyton de Carvalho.
Modelagem espacial de dados aerogeofísicos e interpretação de
imagens SAR aplicados ao mapeamento geológico e metalogenético da
região central do Domínio Bacajá, Estado do Pará / Cleyton de Carvalho
Carneiro-- Campinas,SP.: [s.n.], 2010.

Orientadores: Alvaro Penteado Crósta, Adalene Moreira Silva, Carlos
Eduardo de Mesquita Barros.

Tese (doutorado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de
Geociências.

1. Sensoriamento remoto. 2. Geofísica – Processamento de dados.
3. Sistemas de informações geográficas. 4. Bacajá (PA), Rio. I. Crósta,
Alvaro Penteado. II. Silva, Adalene Moreira. III. Barros, Carlos
Eduardo de Mesquita. IV. Universidade Estadual de Campinas,
Instituto de Geociências. V. Título.

Título em inglês: Spatial modeling of aerogeophysical data and interpretation of SAR images
with application to geological and metallogenetic mapping of the central Bacajá Domain, State of
Pará, Brazil.

Keywords: - Remote Sensing;
- Geophysics – Data processing;
- Geographical information system;
- Bacajá (PA), Rio.

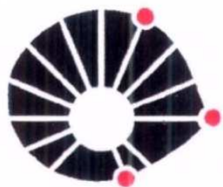
Área de concentração: Geologia e Recursos Naturais

Titulação: Doutor em Ciências.

Banca examinadora: - Alvaro Penteado Crósta;
- Henrique Llacer Roig;
- Jurandir Zullo Junior;
- Lena Virginia Soares Monteiro;
- Marcelo Lacerda Vasquez.

Data da defesa: 06/08/2010

Programa de Pós-graduação em Geociências.



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

AUTOR: CLEYTON DE CARVALHO CARNEIRO

**Modelagem espacial de dados aerogeofísicos e interpretação de imagens SAR
aplicados ao mapeamento geológico e metalogenético da região central do
Domínio Bacajá, Estado do Pará.**

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta

CO-ORIENTADORES:

Profa. Dra. Adalene Moreira Silva

Prof. Dr. Carlos Eduardo de Mesquita Barros

Aprovada em: 06/08/2010

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta

- Presidente

Profa. Dra. Lena Virginia Soares Monteiro

Prof. Dr. Jurandir Zullo Junior

Prof. Dr. Henrique Llacer Roig

Dr. Marcelo Lacerda Vasquez

Campinas, 06 de agosto de 2010.

DEDICATÓRIA

*Aos avós, Nápoles e Cármen (in memoriam),
pais, Raimundo (in memoriam) e Cleide,
à tia, Clélia
e ao companheiro Paulo
- com os meus mais sublimes sentimentos.*

Agradecimentos

Após estes anos de dedicação, é com muito boa vontade que registro aqui os meus sinceros agradecimentos aos que contribuíram para a conclusão desta etapa.

Agradeço a Deus, por me presentear com a vida, a natureza, com uma família e com amigos tão especiais.

Agradeço à Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), ao Instituto de Geociências e Departamento de Geologia e Recursos Naturais (IG/DGRN) pela estrutura física, filosófica e científica que pude desfrutar ao longo destes anos. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo 05/59368-0, que financiou a minha bolsa de estudos e, com isso, proporcionou o desenvolvimento desta pesquisa. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo 478792/2007-7, pelo custeio dos trabalhos de campo. Ao INCT Geociências da Amazônia (CNPq/MCT/FAPESPA), pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa. À ADIMB, em especial ao Sr. Onildo Marini, pela colaboração com o patrocínio nos cursos e eventos relacionados ao EXMIN e SIMEXMIN.

Muito obrigado ao orientador desta pesquisa, Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta, pelas discussões, correções, advertências e pelo exemplo de ética e dignidade que sempre tive como inspiração. Por ter acreditado no menino de 21 anos que o procurou em um congresso, e por tê-lo auxiliado a se desenvolver como pesquisador e crítico das ciências. Meus agradecimentos à Profa. Dra. Adalene Silva, co-orientadora e amiga, pelas críticas e sugestões, por saber “dar a bronca” na hora certa, mas sempre trazer um olhar de afago em seguida; por oferecer humanidade e leveza às discussões e ao desenvolvimento das atividades. Agradeço ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Barros (Cadu), parceiro e amigo, por me despertar para muitos raciocínios e indagações, por me tirar dos atoleiros (literalmente), e por aguentar, com tanta resignação, a teimosia deste taurino que aqui escreve.

Meu muito obrigado ao Mr. Stephen Fraser (CSIRO, Austrália), por ter me recebido como um filho em Brisbane, e por me mostrar um pouco do universo dos “self-organizing maps”. Obrigado à sua esposa, Helen Field, pelos auxílios com o inglês e por compartilhar comigo bons momentos entre os seus familiares. Existem gestos que não geram artigos em revistas indexadas, não produzem resumos expandidos internacionais, não pontuam no “currículo lattes”, nem geram prêmios de honra ao mérito, mas nós sabemos que, sem sombra de dúvidas, valem muito mais do que tudo isso. Thanks, Steve! Agradeço aos amigos do CSIRO, em especial, Jane, Simone, George, Gram, Ingrid e Cameron, pelo suporte, companhia e discussões.

Muito obrigado também aos professores que compuseram as bancas do exame de qualificação e da defesa, Prof. Dr. Waldir Renato Paradella, Prof. Dr. Emilson P. Leite, Profa. Dra. Lena Monteiro, Dr. Marcelo Vasquez, Prof. Dr. Jurandir Zullo e Prof. Dr. Henrique Roig. Agradeço por auxiliarem no desenvolvimento desta pesquisa, com críticas e sugestões, e por torná-la mais consistente. Meus agradecimentos ao examinador anônimo da FAPESP, dedicado e comprometido, que enviou pertinentes conselhos e sugestões, sempre bem acolhidos.

Ao Serviço Geológico do Brasil (SBG/CPRM), especialmente aos Sr. Luís F. Mourão e Sra. Maria Laura V. de Azevedo, pela concessão dos dados aerogeofísicos. Ao geólogo Dennis Miller (Petrobrás) por me ofertar amostras e explicações sobre a sua antiga área de trabalho. Aos professores e amigos geólogos Roberto Vizeu, Rosemery Nascimento, Vladimir Távora, Vânia Barriga, Roberto Dall’Agnol, Rômulo Angélica, Moacir Macambira, Jean-Michel Lafon, Lúcia Travassos, Marcondes Costa, Pedro Walfir, Augusto Pires, Rosely Teruiya, Caetano Juliani, Junny Oliveira, Fabrício Lima, Cristiane Sousa, Regina Célia, César Chaves, Marcelo Oliveira, Marcelly Neves, Alexandre Carnier, Luizemara Alves, Júlio Lyrio, João Boniatti, Gustavo Usero e Fernando Oliveira, pela amizade e pelo suporte sempre que necessário. Ao Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM) pela concessão das imagens SAR. Agradeço também ao Prof. José Cláudio Mura (INPE) pela colaboração com as imagens SAR, bem como aos colegas Arnaldo e Cleber. Agradeço ao colegas Enrico Pedroso e Carlos Beisl pelas ajudas com o USTC no Rio de Janeiro. Meus agradecimentos aos Colegas Filipa Gama da Gama e César Marinho Costa (FUGRO) pelos auxílios nas dúvidas relacionadas ao aerolevantamento Anapu-Tuerê.

Obrigado ao Sr. Afonso Quaresma (UFPA), por nos guiar pela aventureira Rodovia Transamazônica (e suas rodovias “vi sinais”), e por ter sido companheiro atuante nos atoleiros, gambiarras e truques de sobrevivência na selva.

Não posso deixar de agradecer aos amigos, colegas, professores e funcionários do IG/UNICAMP. Obrigado aos professores Jacinta, Alfonso, Lena, Elisabete, Emilson e Wanilson pelas contribuições e discussões. Aos amigos Lucíola (a querida Va, que me acompanha nas discussões, nos trabalhos e na vida), Pedro Prandi, Patrícia Piaia, Michelle Kuroda, Lobinho, Carolina Moretto, Maria Fernanda, Samuel, Mariana, Rodrigo Salles, Sebastião Milton, Danilo Barbuena, Paulo Locattelli, Juliana Bueno, Diego, Bienvenido, Ana Lúcia, Andréia Ruy, Tatiane, Eduardo e Andréa Vicente, Jean Fanton, Marquinhos, Juliano Senna, João Paulo, Rafael Reginato, Taco, Giuliana, Tatiana, Daniele Cardoso, Fabiane Hilário, Gustavo Nunes, Juliane Uchôa, Rafael Faria, Isabel, Rafael Assis, Joseane e Oderson pela convivência e pelas contribuições com discussões, pelos cafés e pela amizade. Agradeço ainda aos funcionários que tanto se esforçam para manter a estrutura funcional da academia, e assim, tornam possível a realização das nossas pesquisas: Valdirene, sem palavras... Você é uma “anja”! Muito obrigado Gorete, nunca vou esquecer daquele bombom! Obrigado Edinalva, Helena, Cristina, Neide, Aparecida, Lúcia, Jô e Marlene. Obrigado ao pessoal da informática: Ricardo, Paulo, Moacir e Maicon. Obrigado também aos funcionários Cristiano, Maurícia, Eduardo, Aníbal, Antônio Guerreiro, Leandro, Aline e Dilma.

Meus agradecimentos aos familiares: agradeço à minha amada mãe, Cleide, que sempre fez suas fervorosas orações que me transmitem todo o seu amor e carinho, que veio me visitar sempre que possível e me apoiou em todos os instantes. Aos irmãos Cyntia, Cícero, Celyce, Ray e Hugo, tia Clélia (Cecé), prima Marcele (a Chéle do coração), cunhada Fernanda, sobrinhos Caio, Juninho e Fernando, Vó Dina, “compadres” Alde e Ewaldo, juntamente com Anna e Pedrinho, cunhado Michell, cunhado Nivaldo, tios Darialva, Walmir, Concé, Dílson, Cláudia e Zé Maria, Avane e Zéca, primos Maria Haidée, Andréa, Andrei, Neto, Ciro, Érica, Claudinha, Vailze, Dilsinho, Diego, Diogo e Fabiane Carvalho que me enviaram sempre mensagens, pensamentos e votos de carinho à distância. Cyntia e Celyce, obrigado pelos telefonemas e por todo o carinho! Ao cunhado Mauro e suas irmãs Josy e Carla, e à D. Ana por toda atenção e pela acolhida. E às sobrinhas lindas, Mariana e Helena, por me presentear com sorrisos e carinhos. Até o S. Entojo ama muito vocês!

Ao amigo e companheiro Paulo Afonso Mei, por compartilhar esses anos de amizade e companheirismo, sempre presente, com muita paciência e carinho. Obrigado a toda família Mei, em especial, agradeço à D. Lúcia, S. Paulão, André e D. Alaíde, pelas conversas edificantes, sopas e cafés compartilhados.

Agradeço aos amigos e companheiros que sempre estão por perto, Patrícia Sampaio, Marcos Laércio, Luís Samuel, Veridiana, Thamy, Fernando Zeferino, Harue, Edsel, Arnaldo, Karina, Erickinha, Alberto 18, Dani Araújo, Dani Japipa, Mateus, Xúnior, Guilherme Avansi, Felipe Mercadante, Rodrigo Lima, Luciana Palharini, Robson, Eduardo Cano, João Carlos Pereira, Carlinhos, Chiquinho e Junot. Um obrigado especial à D. Dazinha, amiga que cuida do nosso lar com tanto esmero, por toda confiança e amizade que temos. À D. Vanilda, pelo zelo e pelos cuidados que tanto auxiliam na minha organização. Aos amigos do Centro Espírita Alan Kardec (CEAK - Núcleo Vila Nova), em especial Wagner, Maíra, Ruy, Leandro, Stela e Silvinha. Aos amigos Márcia Linhares, Luciene Lima, Alexandre (AMPAS), Janussa, Lúvia, Ludmila Veloso, Rafaella, Rogério Costa, Eduardo Careli, Alessandra Gomes, Mariana (covinha), Benigna, Cipriano, Telma Vitorina, Virgínia, Joelson, Duda Okamoto, Dani Sampaio, Melissa, Alice, Naiane, Clayton, Maurício, Márcio Costa, Magno, Lucas Melgaço, Levindo, Conrado Krainer, Márcio Guerra, Gislaine, Daniel Amaro, Caroline Cardoso, Vanessa Carvalho, Márcia Alves, Joana (o café em Altamira estava ótimo), D. Glória, Martinha, Tia Dora, Shirley, Hellen Pompeu, Washington, Eliane Figueiredo e Lena Garcia. Valeu pela força! Aos amigos de graduação em Geologia (UFPA), em especial às minhas queridas “meninas”: Carolina Miranda (de longas datas), Gisele dos Anjos, Elem Lopes e Poliana Gualberto. Muito bom saber que as nossas conversas e novidades são preservadas até hoje pelos e-mails. Obrigado aos amigos e companheiros de república em Brisbane: Juliana, Vytor, Guilherme (Piolho), Cláudia, Bruno, Daniele, Jéssica, Alessandra, Fernando, Lúvia, Santiago e Felipe (Baiano). Os almoços, caminhadas até *South Bank* e filosofias sobre fatias de pizza ficarão para sempre na lembrança.

Agradeço aos que já se foram, mas que me deixaram ensinamentos que serão guardados para sempre: obrigado ao meu pai, que me ensinou a ser gente, ter humanidade, e a olhar para as pessoas igualmente. Meus maiores sentimentos de amor e carinho. Agradeço aos avós, Cármen e Nápoles, exemplos de conduta e amor verdadeiro. Ao tio Marcelo, alegre e jovial, que guardo no coração. Obrigado a todos os queridos que tanto amo e sei que torcem por mim do lado de lá.

Enfim, muito obrigado àqueles que não foram citados nestas duas páginas, mas que estão presentes em pensamentos e emoções contidas do meu consciente e inconsciente, cuja minha estima nem por isso se torna menor.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	V
AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO.....	XIX
ABSTRACT	XXI
1. ASPECTOS INTRODUTÓRIOS	1
1.1. APRESENTAÇÃO.....	1
1.2. JUSTIFICATIVA.....	2
1.3. LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	4
1.4. HIPÓTESE	4
1.5. OBJETIVOS	5
1.5.1. <i>Objetivo Geral</i>	5
1.5.2. <i>Objetivos Específicos</i>	5
1.6. MÉTODOS GERAIS.....	6
2. ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS.....	9
2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO TECTÔNICA.....	9
2.1.1. <i>Plataforma Sul-Americana</i>	9
2.1.2. <i>Cráton Amazônico</i>	10
2.2. TECTÔNICA, GEOLOGIA E MODELOS GEODINÂMICOS PARA O DOMÍNIO BACAJÁ	13
2.2.1. <i>Contexto Tectônico do Domínio Bacajá</i>	13
2.2.2. <i>Geologia do Domínio Bacajá</i>	13
2.2.2.1. Complexos Metamórficos.....	15
2.2.2.2. Greenstone belts	17
2.2.2.3. Magmatismo Orogênico Pré-Colisional	19
2.2.2.4. Magmatismo Orogênico Sin a Tardi-Colisional	20
2.2.2.5. Magmatismo Orogênico Tardi a Pós-Colisional	21
2.2.2.6. Magmatismo Orogênico Pós-Colisional	22
2.2.2.7. Coberturas Fanerozóicas	22
2.2.3. <i>Evolução Geodinâmica do Domínio Bacajá</i>	26
2.2.4. <i>Relações com o Modelo Geodinâmico do Escudo das Guianas</i>	27
2.3. RECURSOS MINERAIS DO DOMÍNIO BACAJÁ	28
3. AEROGEOFÍSICA DO PROJETO ANAPU-TUERÊ.....	31

3.1. FUNDAMENTOS, AQUISIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS DADOS.....	32
3.1.1. Fundamentos e características dos dados gamaespectrométricos.....	32
3.1.2. Fundamentos e características dos dados magnetométricos.....	33
3.1.3. Distribuição dos radioelementos nas rochas e no solo.....	34
3.1.4. Aquisição e características dos dados do Projeto Aerogeofísico Anapu-Tuerê	37
3.2. PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS.....	38
3.2.1. Pré-processamento.....	38
3.2.2. Interpolação em células regulares.....	39
3.2.3. Produtos aerogeofísicos para interpretação	39
3.3. INTERPRETAÇÃO VISUAL DAS IMAGENS AEROGEOFÍSICAS	42
3.3.1. Lineamentos delineados a partir dos dados magnetométricos.....	42
3.3.2. Unidades litogeofísicas obtidas a partir dos dados gamaespectrométricos	43
3.3.3. Análises visuais e interpretações dos domínios litogeofísicos	47
3.3.3.1. Domínio 1	47
3.3.3.1. Domínio 2	47
3.3.3.3. Domínio 3	48
3.3.3.4. Domínio 4	48
3.3.3.5. Domínio 5	49
3.3.3.6. Domínio 6	50
3.3.3.7. Domínio 7	51
3.3.3.8. Domínio 8	52
3.3.3.9. Domínio 9	52
3.3.3.10. Domínio 10	53
3.3.3.11. Domínio 11	54
3.3.3.12. Domínio 12	54
3.3.3.13. Domínio 13	55
3.3.3.14. Domínio 14	55
3.3.3.15. Domínio 15	56
3.4. DISCUSSÃO E COMENTÁRIOS.....	56
4. ANÁLISE DE IMAGENS SAR E INTEGRAÇÃO COM DADOS AEROGEOFÍSICOS	59
4.1. INTRODUÇÃO.....	59
4.2. AQUISIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS DADOS SAR	60
4.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	61
4.3.1. Correção de efeitos do padrão de antena (APC).....	61
4.3.2. Registro das imagens.....	62
4.3.3. Atenuação do ruído speckle.....	62

4.3.4. Produtos gerados a partir dos dados R99-B/SAR	63
4.3.5. Fusões da imagem R99-B/SAR (banda L, pol. VV) com imagens aerogeofísicas gamaespectrométricas	65
4.4. ANÁLISE DOS PRODUTOS GERADOS A PARTIR DAS IMAGENS SAR E AEROGEOFÍSICAS	67
4.4.1. Análise textural a partir da fusão entre imagens SAR e canal gamaespectrométrico de contagem total.....	67
4.4.2. Análise dos lineamentos a partir da fusão entre imagens SAR e composição ternária gamaespectrométrica R(K)-G(eTh)-B(U).....	69
4.5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE INTEGRADA DE IMAGENS SAR E AEROGEOFÍSICA GAMAESPECTROMÉTRICA.....	71
5. CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL.....	73
5.1. LEVANTAMENTOS DE DADOS EM CAMPO	73
5.2. PETROGRAFIA DA REGIÃO CENTRO-LESTE DO DOMÍNIO BACAJÁ.....	75
5.2.1. Complexos Metamórficos	76
5.2.1.1. Metatonalito.....	76
5.2.2. Sequência de Rochas Meta-vulcanossedimentares.....	76
5.2.2.1. Anfibolitos	77
5.2.2.2. Quartzitos	79
5.2.2.3. Metagabros	79
5.2.3. Rochas Ácidas Sin- a Tardi-Colisionais.....	81
5.2.3.1. Tonalitos.....	81
5.2.3.2. Granodioritos.....	82
5.2.3.3. Monzogranitos.....	85
5.2.3.4. Sienogranitos	87
5.2.3.5. Sienitos	89
5.2.4. Coberturas Fanerozóicas	90
5.2.4.1. Diabásios	90
5.2.4.2. Lateritas	90
5.3. GEOQUÍMICA DA REGIÃO CENTRO-LESTE DO DOMÍNIO BACAJÁ	91
5.3.1. Comportamento das Rochas Félicas a partir dos Minerais Normativos	92
5.3.2. Comportamento das Rochas Máficas Plutônicas e Vulcânicas a partir dos Elementos Maiores.....	95
5.3.3. Ambiência Tectônica das Rochas Graníticas	96
6. MODELOS DE ANÁLISE ESPACIAL.....	99
6.1. MODELAGEM DIRIGIDA PELO CONHECIMENTO	100
6.1.1. Introdução e caracterização do problema.....	100
6.1.2. Técnica Fuzzy	103
6.1.3. Modelo de Favorabilidade para Ocorrência de Rochas Máficas e/ou Ultramáficas	104

6.1.4. Discussões sobre os resultados.....	108
6.2. MODELAGEM DIRIGIDA PELOS DADOS	110
6.2.1. Princípios e Fundamentações do método “Self-Organizing Maps”	110
6.2.2. Variáveis de entrada e parâmetros estatísticos	113
6.2.3. Análises em ambiente SOM.....	116
6.2.4. Resultados das Análises SOM.....	116
6.2.5. Validação do modelo baseado em Self-Organizing Maps com dados de campo	119
6.2.6. Discussão e considerações sobre o modelo baseado em SOM.....	121
6.3. COMPARAÇÕES ENTRE OS MODELOS.....	124
6.4. DISCUSSÕES SOBRE AS MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS	124
6.5. MAPA GEOLÓGICO GERADO A PARTIR DA INTEGRAÇÃO DOS DADOS MULTIFONTES	125
6.5.1. Unidade 1	125
6.5.2. Unidade 2	126
6.5.3. Unidade 3	126
6.5.4. Unidade 4	126
6.5.5. Unidade 5	127
6.5.6. Unidade 6	127
6.5.7. Unidade 7	127
7. CONCLUSÕES.....	129
7.1. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS.....	129
7.2. INTERPRETAÇÃO DAS IMAGENS SAR E FUSÃO COM IMAGENS AEROGEOFÍSICAS	130
7.3. MODELAGENS ESPACIAIS.....	131
7.4. EVOLUÇÃO GEODINÂMICA DA REGIÃO CENTRO-LESTE DO DOMÍNIO BACAJÁ	132
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Localização da região estudada, com destaque para: (A) polígono do aerolevantamento geofísico realizado pela CPRM; (B) área onde foram concentradas as campanhas de campo e mapeamento geológico em escala de 1:100.000.	7
Figura 2-1. Porção continental da placa Sul-Americana, o continente Sul-Americano, destacando a área estável fanerozóica, a Plataforma Sul-Americana e as áreas instáveis dos Andes e do bloco da Patagônia (Schobbenhaus e Brito Neves 2003 - modificado de Almeida <i>et al.</i> 1976).	10
Figura 2-2. Províncias tectônicas do norte do Brasil, modificadas das propostas de Almeida <i>et al.</i> (1976, 1981) e Santos (2003), evidenciando os diferentes segmentos do Cráton Amazônico (Vasquez <i>et al.</i> 2008b).	12
Figura 2-3. Geologia e recursos minerais da parte central do Domínio Bacajá com destaque para a região do aerolevantamento Anapu-Tuerê (polígono em vermelho) e para a área de estudo (polígono azul) (modificado de Vasquez <i>et al.</i> 2008c).	25
Figura 2-4. Modelo de evolução geodinâmica para o Terreno Paleoproterozóico da Guiana Francesa (Delor <i>et al.</i> 2003a).	29
Figura 3-1. Espectro gamaespectrométrico mostrando as posições das janelas de energia correspondente ao potássio (K), urânio (eU), tório (eTh) e contagem total (CT) (IAEA 2003).	33
Figura 3-2. Imagens aerogeofísicas produzidas a partir do processamento dos dados magnetométricos do Projeto Aerogeofísico Anapu-Tuerê.	40
Figura 3-3. Imagens aerogeofísicas produzidas a partir do processamento dos dados gamaespectrométricos do Projeto Aerogeofísico Anapu-Tuerê.	41
Figura 3-4. (A) Composição ternária R(Dz0,75)-G(Dz1,00)-B(Dz1,25) de magnetometria; (B) Lineamentos realçados a partir dos dados magnetométricos.	44
Figura 3-5. (A) Imagem ternária R(K)-G(eTh)-B(eU) de gamaespectrometria; (B) Unidades litogeofísicas interpretadas a partir dos dados gamaespectrométricos.	45
Figura 4-1. Imagens R99-B/SAR produzidas após o processamento dos dados originais, em diferentes polarizações: (A) HH; (B) VH; (C) VV; e (D) composição ternária R(HH)-G(VH)-B(VV).	63

Figura 4-2. Imagem R99-B/SAR em amplitude, referente à banda L com polarização VV, selecionada como a que apresentou o melhor realce dos atributos geológicos da área estudada. .64	64
Figura 4-3. Imagem R99-B/SAR em amplitude, referente à banda L com polarização VV, fundida com imagens aerogeofísicas: (A) canal de Contagem Total ($\mu\text{R/h}$); (B) diagrama ternário R(K)-G(eTh)-B(eU).....66	66
Figura 4-4. Zonas com texturas homólogas sobrepostas à imagem R99-B/SAR em amplitude, referente à banda L com polarização VV, fundida ao canal de Contagem Total ($\mu\text{R/h}$).68	68
Figura 4-5. Zonas com texturas homólogas sobrepostas à imagem R99-B/SAR em amplitude, referente à banda L com polarização VV, fundida ao canal de Contagem Total ($\mu\text{R/h}$).70	70
Figura 5-1. Mapa dos pontos visitados durante a pesquisa de campo.....74	74
Figura 5-2. Classificação petrográfica das estimativas mineralógicas, segundo diagrama Q-A-P de Streckeisen (1976), para as rochas graníticas da área estudada.75	75
Figura 5-3. (A) Metatonalito com fenocristais orientados de feldespato alcalino; (B) fotomicrografia evidenciando granulação grossa com textura porfírica dos metatonalitos.....76	76
Figura 5-4. Solo de coloração avermelhada comum no domínio das rochas meta-vulcanossedimentares.....77	77
Figura 5-5. (A) Anfíbolito foliado com vênulas de plagioclásio subparalelas a perpendiculares à foliação; (B) disposição interna dos minerais formando foliação milimétrica, com destaque para pequenos pontos de sulfetos; (C) fotomicrografia (luz natural) evidenciando textura nematoblástica.78	78
Figura 5-6. (A) Muscovita quartzito foliado com planos de foliação marcados pelas micas; (B) fotomicrografia (luz polarizada) evidenciando textura granolepidoblástica; (C) fotomicrografia (luz polarizada) mostrando a muscovita intersticial em volta dos cristais de quartzo.80	80
Figura 5-7. (A) Amostra de metagabro com cristais de plagioclásio levemente orientados; (B) fotomicrografia (luz polarizada) de metagabro com cristais de plagioclásio envolvidos por anfibólio.81	81

Figura 5-8. (A) Biotita tonalito com acamamento composicional magmático; (B) enclaves máficos envoltos pelo biotita tonalito; (C) fotomicrografia (luz polarizada) do biotita tonalito inequigranular.....	82
Figura 5-9. (A) Titanita-hornblenda-biotita granodiorito evidenciando foliação forte marcada pela orientação da biotita; (B) titanita-biotita granodiorito protomilonítico com veio quartzo-feldspático discordante à foliação; (C) fotomicrografia (luz polarizada) de biotita-hornblenda granodiorito protomilonítico, mostrando recristalização do quartzo.	84
Figura 5-10. <i>Tension gashes</i> em monzogranitos evidenciando movimentação de blocos em cinemática sinistral.	86
Figura 5-11. (A) Enclaves semicirculares de biotita-hornblenda monzogranitos hospedados em granodioritos; (B) detalhe evidenciando borda de plagioclásio nos enclaves; (C) fotomicrografia (luz polarizada) de biotita-hornblenda monzogranitos, onde cristais alongados de hornblenda e biotita estão envoltos por cristais de microclínio, oligoclásio e quartzo.....	88
Figura 5-12. Falha dextral com direção N-S 80°/E deslocando veio quartzo-feldspático disposto segundo 120 Az subvertical.	89
Figura 5-13. (A) Blocos de diabásios ; (B) fotomicrografia (luz polarizada) evidenciando textura sub-ofítica no diabásio.	90
Figura 5-14. (A) Afloramento de laterita com planos de foliação preservados; (B) fotomicrografia (luz polarizada) da laterita com óxidos ferro e manganês.....	91
Figura 5-15. Classificação das rochas graníticas de acordo com a composição de minerais normativos An-Ab-Or (Barker 1979).....	94
Figura 5-16. Amostras de rochas máficas plutônicas plotadas no diagrama TAS de classificação e nomenclatura para rochas plutônicas com base nos álcalis totais <i>versus</i> sílica (Cox et al. 1979, adaptado por Wilson 1989).	95
Figura 5-17. Amostras de rochas máficas vulcânicas plotadas no diagrama TAS de classificação e nomenclatura para rochas plutônicas com base nos álcalis totais <i>versus</i> sílica (Cox et al. 1979, adaptado por Wilson 1989).	96

Figura 5-18. Diagramas para discriminação de granitos (Pearce <i>et al.</i> 1984), mostrando campos de granito de arco vulcânico (VAG), granito sin-colisional (syn-COLG), granito intra-placa (WPG) e granitos de cadeia meso-oceânica, baseado nas relações: (A) Nb-Y; e (B) Rb-(Y + Nb).	97
Figura 6-1. Pertinência das variáveis <i>fuzzificadas</i> conforme as funções descritas na Tabela 6-3: (A) <i>small</i> K; (B) <i>small</i> eTh; (C) <i>small</i> eU; (D) <i>large</i> ASA; e (E) operador <i>gama</i>	106
Figura 6-2. Rochas máficas mapeadas em campo plotadas ao modelo de favorabilidade à rochas máficas e/ou ultramáficas.	109
Figura 6-3. Síntese das etapas de uma análise em ambiente de <i>Self-Organizing Maps</i>	114
Figura 6-4. Variáveis gamaespectrométricas e magnetométrica analisadas: (a) potássio; (b) tório; (c) urânio; (d) contagem total; e (e) amplitude do sinal analítico.	115
Figura 6-5. Mapa auto-organizado visto a partir dos formatos de visualização: (A-E) parcelas das componentes das variáveis, respectivamente, K(%), eTh (ppm), eU (ppm), CT (cps) e ASA (nT/m); e (F) Matriz-U. A maior contribuição das parcelas das componentes está destacada, bem como as maiores dissimilaridades da Matriz-U.	117
Figura 6-6. (A) Matriz-U, com os neurônios coloridos para representar a suas respectivas similaridades; (B) Classificação dos neurônios no mapa auto-organizado a partir da média-K, resultando em sete <i>clusters</i> ; (C) Modelo espacializado mostrando cada amostra codificada pela respectiva cor do <i>cluster</i> derivado das análises SOM.	118
Figura 6-7. Rochas com análises petrográficas plotadas ao modelo de favorabilidade à rochas máficas e/ou ultramáficas.	123

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1. Síntese dos dados geocronológicos do Domínio Bacajá (modificado de Vasquez <i>et al.</i> 2008c).....	23
Tabela 3-1. Minerais em que K é um componente essencial, juntamente com outros minerais portadores de K. (Mittlefehldt 1999, IAEA 2003).	35
Tabela 3-2. Minerais acessórios que contém Th, juntamente com outros minerais que têm Th como um dos principais constituintes (Mittlefehldt 1999, IAEA 2003).	36
Tabela 3-3. Minerais mais abundantes de U (IAEA 2003).	37
Tabela 3-4. Concentração dos radioelementos em diferentes tipos de rochas (Killen 1979, IAEA 2003).....	37
Tabela 3-5. Características do aerolevante geofísico Anapu-Tuerê.....	38
Tabela 3-6. Estimativa dos teores gamaespectrométricos para as classes discriminadas a partir da análise visual.	43
Tabela 4-1. Características da missão R99-B/SAR Anapu-Tuerê.	61
Tabela 5-1. Análises químicas por fluorescência de raios X das rochas da região centro-leste do Domínio Bacajá.....	93
Tabela 6-1. Concentração dos radioelementos em diferentes tipos de rocha (modificado de Killen 1979), com destaque para as principais classes de rochas básicas e ultrabásicas.	101
Tabela 6-2. Susceptibilidade magnética de minerais e rochas (modificado de Telford <i>et al.</i> 1990), com destaque para as propriedades magnéticas das rochas máficas e ultramáficas e para os minerais com maiores susceptibilidades.	102
Tabela 6-3. Variáveis e dados de entrada utilizados na classificação baseada em pertinência <i>fuzzy</i> para mapeamento das rochas com constituintes máficos e/ou ultramáficos.	105
Tabela 6-4. Rochas máficas e/ou ultramáficas aflorantes na região centro-leste do Domínio Bacajá e seus respectivos valores de pertinência <i>fuzzy</i> . Observa-se em cinza as amostras que tiveram valores de pertinência condizentes com as rochas máficas e/ou ultramáficas.	107
Tabela 6-5. Valores de referência para determinar a classificação das variáveis analisadas.....	115
Tabela 6-6. Influência das variáveis em cada cluster das análises SOM.	119



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

**Modelagem espacial de dados aerogeofísicos e interpretação de imagens SAR
aplicados ao mapeamento geológico e metalogenético da região central do
Domínio Bacajá, Estado do Pará.**

RESUMO

TESE DE DOUTORADO

Cleyton de Carvalho Carneiro

O Domínio Bacajá está localizado na parte leste do Cráton Amazônico, no âmbito da Província Maroni-Itacaúnas ou Transamazonas, de idade paleoproterozóica. A interpretação vigente dos limites entre as unidades litoestratigráficas que compõem o Domínio Bacajá foi baseada, sobretudo, em dados aerogeofísicos adquiridos na década de 1970. Entre 2004 e 2005 foram realizados aerolevantamentos de radar (SAR) pelo Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM) e geofísicos (magnetometria e gamaespectrometria) foram adquiridos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Os novos dados são de fundamental importância ao desenvolvimento de pesquisas visando o avanço do conhecimento geológico e do potencial mineral da região. Esses dados foram analisados e modelados espacialmente para geração de mapas geológicos e de informações sobre o potencial aurífero da região central do Domínio Bacajá. Os resultados obtidos sugerem que o limite entre o Domínio Bacajá e a Província Carajás estaria situado entre as unidades Ortognaisse Pacajá (Neoarqueano) e Granulito Novolândia (Riaciano). A modelagem a partir da técnica *fuzzy* indicou zonas favoráveis à ocorrência de rochas máficas e ultramáficas, que incluem anfibolitos, diabásios, gabros e metagabros. Com a modelagem a partir da técnica Self-organizing maps (SOM), foram definidas classes relacionadas às principais variedades litológicas que ocorrem nessa região do Domínio Bacajá. Ocorrências auríferas encontram-se associadas às zonas cujas assinaturas gamaespectrométricas indicam alto teor potássico, marcadas ainda por lineamentos de direção NW-SE. Tais características sugerem a presença de estruturas extensionais associadas às zonas de cisalhamento na região onde ocorrem as rochas máficas da Sequência Três Palmeiras. A partir desses resultados, é apresentada uma nova proposta de distribuição das principais unidades litoestratigráficas em escala de 1:100.000 para a região central do Domínio Bacajá.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

Spatial modelling of aerogeophysical data and interpretation of SAR images
with application to geological and metallogenetic mapping of the central
Bacajá Domain, State of Pará, Brazil.

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

Cleyton de Carvalho Carneiro

The Bacajá Domain is located in the eastern portion of the Amazonian Craton, within the Maroni-Itacaúnas Paleoproterozoic province or Transamazon. The current interpretation of the limits between different lithostratigraphic units was based mainly on airborne geophysical data acquired in the 1970s. Between 2004 and 2005 radar (SAR) data were acquired by the Amazon Protection System (SIPAM) and new geophysical data, comprising magnetic and gammaespectrometric data, were acquired by the Geological Survey of Brazil (CPRM). These new data are fundamentally important to advance the geological knowledge and to assess the mineral potential of this region. These data sets were analyzed and spatially modeled for generating geological maps and information on the gold potential of the central Bacajá Domain. The results suggest that the boundary between the Bacajá Domain and the Carajás Province is located between the Pacajá orthogneiss (Neoarchean) and Novolândia granulite (Riaciano). Using fuzzy logic modeling the more favorable areas to the occurrence of mafic and ultramafic rocks were defined, comprising amphibolite, diabase, gabbro and metagabbro. Using Self-organizing Maps (SOM), classes related to the main lithologies that occur in the central Bacajá Domain were defined. Gold occurrences are associated with areas whose gammaespectrometric signatures exhibit high potassium values, characterized also by NW-SE trending lineaments. These characteristics suggest the presence of extensional structures associated with shear zones in the areas of the mafic rocks belonging to the Três Palmeiras Sequence. Based on these results, new proposal is presented for the distribution of the main lithostratigraphic units of the central Bacajá Domain at the scale of 1:100,000.

Capítulo 1

1. Aspectos Introdutórios

A relevância do objeto de pesquisa é apresentada neste capítulo, de forma a justificar a realização dos estudos na região do Domínio Bacajá. A área de abrangência é localizada em seus domínios geográficos. Os objetivos principais e específicos são expostos, de forma a caracterizar os enfoques metodológicos que serão aplicados e discutidos ao longo dos capítulos seguintes.

1.1. APRESENTAÇÃO

A Amazônia Brasileira representa uma das grandes fronteiras exploratórias mundiais no âmbito dos recursos minerais, com várias de suas regiões situadas em terrenos cristalinos considerados como de elevado potencial mineral. Contudo, para que esse potencial possa ser analisado efetivamente, e para que sejam geradas as condições exploratórias mínimas para geração de jazidas minerais, faz-se necessário superar questões fundamentais, tais como: (1) o conhecimento geológico disponível atualmente, notadamente restrito; (2) a presença de cobertura vegetal densa e extensa, que dificulta o acesso a informações lito-estruturais; (3) ocorrência de espesso manto intempérico que recobre o substrato geológico e impede igualmente o acesso a essas informações; (4) a falta de acesso, além das dificuldades de ordem logística para realização de levantamentos geológicos e exploratórios convencionais. Por esses motivos, parte considerável da produção mineral da Amazônia decorre ainda de atividade garimpeira, feita quase sempre de forma inadequada, ilegal e predatória, tanto do ponto de vista do aproveitamento dos recursos, como também pela ótica ambiental e social.

Em estudos geológicos e exploratórios de regiões com tais características, torna-se fundamental a utilização de métodos indiretos de mapeamento, com o emprego de técnicas de sensoriamento remoto e aerogeofísicas ([Crósta et al. 1994](#); [Paradella et al. 1997](#)). Estes instrumentos, operando a bordo de aeronaves ou satélites, proporcionam informações na forma de imagens que podem ser utilizadas no reconhecimento e mapeamento de unidades litológicas e

estruturas geológicas. As imagens de sensoriamento remoto e aerogeofísicas fornecem, assim, os elementos fundamentais para a cartografia geológica, notadamente de regiões com baixa exposição do substrato geológico, otimizando e direcionando as fases posteriores das atividades de mapeamento geológico convencional e/ou exploratórias ([Henderson e Lewis 1998](#), [Rencz 1999](#), [Sabine 1999](#), [Drury 2001](#)). A utilização combinada destas duas ferramentas favorece a compreensão do arcabouço geológico e a definição de áreas favoráveis a investimentos por parte da indústria de mineração.

1.2. JUSTIFICATIVA

O Terreno Bacajá possui uma ampla variedade litoestratigráfica, cujo conhecimento geológico ainda é incipiente ([Faraco *et al.* 2005](#)). Na parte norte deste terreno, ocorrem zonas mineralizadas diversas, nas quais foram registrados ouro, cobre e platinóides, dentre outros. A origem e a ocorrência dessas zonas mineralizadas, bem como suas relações espaciais, ainda são pouco discutidas na literatura. Além disso, a delimitação regional de unidades litoestratigráficas nos mapas geológicos disponíveis para essa região foi baseada em dados de levantamentos aerogeofísicos realizados na década de 1970, como o Projeto Aereogeofísico Brasil-Canadá (PGBC 1020), com baixa densidade de amostragem e linhas de produção espaçadas em 2 km.

O tipo de sensor de maior utilização em aplicações geológicas desenvolvidas na Amazônia é, sem dúvida, o radar de abertura sintética, ou SAR ([Paradella *et al.* 1997](#), [Graham e Moretzohn 1997](#), [Santos *et al.* 1999](#), [Paradella *et al.* 2000a](#), [2000b](#)). Esta preferência se deve aos seguintes fatores: (i) possibilidade de imageamento em condições atmosféricas adversas (presença de nuvens e chuva, por exemplo); (ii) geometria entre o sensor e o terreno favorável ao realce da textura (morfologia) da superfície que, por sua vez, expressa as características litológicas e estruturais, mesmo em regiões com baixos gradientes topográficos; (iii) possibilidade de penetração da radiação, ainda que limitada e fortemente dependente dos comprimentos de onda utilizados pelo SAR, no dossel da vegetação, podendo alcançar a superfície do terreno.

Há três aspectos que podem ser explorados em relação à extração de informações estruturais das imagens SAR: (1) a possibilidade de análise estereoscópica ([Santos *et al.* 1999](#), [Paradella *et al.* 2000a](#) e [Paradella *et al.* 2000b](#)); (2) a possibilidade de utilizar diferentes

geometrias de aquisição, com órbitas descendente e ascendente do satélite, que implicam em distintas direções de visada; e (3) a possibilidade de utilizar diferentes ângulos de incidência local, procurando realçar variações no relevo, mesmo em terrenos menos acidentados. Com os sistemas SAR mais modernos, como é o caso dos dados utilizados neste projeto, acrescenta-se a possibilidade de análise multi-polarimétrica na extração de elementos texturais.

A disponibilidade de imagens SAR orbitais sobre a Amazônia era, até pouco tempo, restrita a alguns sensores, particularmente o JERS-1/SAR do Japão e Radarsat-1, do Canadá. Contudo, esses sensores oferecem imagens com resoluções espaciais e características de frequência e polarização limitadas quando comparados ao radar aerotransportado operado pelo SIPAM, cujos dados foram empregados neste estudo. O início das operações das três aeronaves de aquisição de dados de sensoriamento remoto do SIPAM possibilitou o acesso a imagens produzidas por um conjunto de sistemas sensores SAR de alta resolução espacial e múltiplas polarizações e frequências. Estes sistemas operam em duas frequências: banda L (1.28 GHz) e banda X (9.3 GHz). O subsistema da banda L tem a capacidade de transmitir e receber tanto na polarização vertical quanto na horizontal (HH e HV). O subsistema da banda X só transmite e recebe na polarização horizontal HH ([Andrade e Santarosa 2005](#)).

Quanto à disponibilidade de dados aerogeofísicos sobre a Amazônia, o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) iniciou entre 2004 e 2005 uma série de levantamentos em áreas de conhecimento geológico restrito e com elevado potencial mineral, situadas em várias regiões do país, com prioridade para a Amazônia. A aquisição desses dados, com alta densidade de amostragem, visa dar subsídios às atividades de mapeamento geológico e aos estudos metalogenéticos e exploratórios regionais.

Os dados do sensor R99-B/SAR (SIPAM) e aerogeofísicos (CPRM) representam hoje o estado-da-arte em termos tecnológicos dos respectivos métodos de levantamento empregados. A partir da disponibilidade desses dados, foram criadas condições para um salto qualitativo no uso de técnicas indiretas de mapeamento geológico e exploração mineral na Amazônia. Faz-se necessário, contudo, a aplicação e o desenvolvimento de técnicas e métodos de processamento e análise espacial desses dados, a fim de que se possa extrair o máximo benefício de todo o investimento feito nesses novos sistemas de aquisição de dados indiretos.

1.3. LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

Para o desenvolvimento desta pesquisa, optou-se por duas abordagens distintas: regional e local. As áreas selecionadas para isso ([Figura 1-1](#)) localizam-se na região centro-leste do Estado do Pará, a leste do Rio Xingu, próximo às cidades de Anapu e Pacajá. Têm como principais vias de acesso a Rodovia Transamazônica (BR-230) e suas diversas estradas vicinais.

A abordagem regional compreende a área limitada a partir do polígono do Projeto Aerogeofísico Anapu-Tuerê. Nessa área, os dados aerogeofísicos foram processados e interpretados em escala de 1:250.000.

Na abordagem local, foi selecionada uma área de menores dimensões, inserida nos domínios do polígono regional. Nesta abordagem, os dados foram processados e interpretados em escala de 1:100.000. Em seguida foram realizados levantamentos de campo com o objetivo de validar os resultados obtidos a partir das imagens e produzir modelos geológicos e metalogenéticos relacionados às mineralizações auríferas da área. Optou-se por esse recurso devido ao fato de que as ocorrências minerais registradas nos mapas geológicos regionais existentes correspondem, em sua quase totalidade, a ocorrências auríferas.

1.4. HIPÓTESE

O desenvolvimento do conhecimento geológico e metalogenético do Domínio Bacajá pode ser alcançado a partir de análises e interpretações de dados aerogeofísicos e imagens SAR. A modelagem espacial dessas informações, associada às investigações realizadas em campo, possibilitam a delimitação das unidades litológicas em escala de até 1:100.000. A delimitação dessas unidades de maneira mais precisa, bem como o entendimento de suas relações com áreas adjacentes, trará contribuições tanto para o avanço do conhecimento sobre as unidades litoestratigráficas, quanto para o entendimento das respectivas relações com ocorrências minerais.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. *Objetivo Geral*

O estudo aqui proposto tem como objetivo geral a modelagem espacial de dados produzidos a partir de imagens aerogeofísicas e SAR para geração de um mapa geológico com interpretações sobre as ocorrências auríferas da região central do Domínio Bacajá, Estado do Pará. O trabalho utiliza como base mapas geológicos regionais existentes (escala 1:1.000.000) ([Schobenhau et al. 2004](#); [Vasquez e Rosa-Costa 2008](#)), mapas gerados pelo processamento, análise e interpretação dos dados de radar R99-B/SAR (SIPAM) e dos dados aerogeofísicos magnetométricos e gamaespectrométricos do projeto Anapu-Tuerê (CPRM). A validação dos modelos foi feita a partir de trabalhos de campo e, posteriormente, análises laboratoriais envolvendo análises químicas e petrográficas.

1.5.2. *Objetivos Específicos*

Como objetivos específicos propõem-se:

- 1- Identificar e caracterizar assinaturas geofísicas magnetométricas e gamaespectrométricas relacionadas às unidades litológicas e estruturas geológicas, a partir de técnicas de processamento digital de imagens aerogeofísicas;
- 2- Identificar e caracterizar padrões texturais homólogos, com base em análises visuais de imagens SAR, e discutir suas relações com unidades litológicas, buscando o detalhamento litológico;
- 3- A partir da análise integrada das imagens SAR e dos dados aerogeofísicos, detalhar e caracterizar as unidades litológicas e as estruturas geológicas da região centro-leste do Domínio Bacajá, buscando avançar o atual estágio de conhecimento geológico das mesmas em escala de 1:100.000;
- 4- Caracterizar, quanto aos domínios litogeofísicos, os principais litotipos hospedeiros de mineralizações auríferas já conhecidas. Estudar esses litotipos a partir de análises petrográficas e químicas;

- 5- Produzir um mapa geológico da área estudada, em escala 1:100.000, a partir da integração das informações obtidas anteriormente e com o emprego de técnicas de análise e interpretação de imagens SAR e dados aerogeofísicos, e de técnicas baseadas na análise estatística com base em inferência espacial, integradas em ambiente de sistema de informações geo-referenciadas (SIG).

1.6. MÉTODOS GERAIS

Em termos gerais, os métodos utilizados foram desenvolvidos em duas fases, denominadas fase conceitual e fase operacional. Maiores detalhes sobre os materiais e métodos específicos utilizados nesta pesquisa serão abordados nos capítulos seguintes.

A fase conceitual compreendeu a formulação e elaboração do projeto contendo a definição do problema a ser investigado e os métodos a serem empregados. O estudo do contexto geológico regional (apresentado no Capítulo 2) foi desenvolvido nesta fase. No decorrer da pesquisa, foram feitas atualizações constantes quanto aos conceitos referentes a esse contexto geológico regional, na medida em que novos trabalhos foram publicados. A seleção da área central do Domínio Bacajá foi realizada pelo fato da região abordar diferentes unidades litoestratigráficas situadas em contextos tectônicos distintos, além de apresentar registros de ocorrências auríferas associados a um terreno com sequências *greenstone-belt*.

Em uma outra fase, denominada fase operacional, o processamento das imagens e dos dados aerogeofísicos foi realizado no Laboratório de Processamento de Informações Geo-referenciadas (LAPIG) – IG/UNICAMP. Os dados foram uniformizados para o *datum* WGS84, geocêntrico, por apresentar distorções mínimas em relação ao SIRGAS 2000, obedecendo a recomendação feita na 7ª Conferência Cartográfica Regional das Nações Unidas para as Américas.

As imagens produzidas (discutidas nos Capítulos 3, 4 e 5) foram analisadas no formato digital. Para isso, foram utilizados os arquivos *raster* resultantes da aplicação das técnicas de processamento e visualização que serão descritas nos próximos capítulos. Sobrepondo-se a estas, foram adicionadas camadas *vetoriais*, nas quais foram delineados elementos fotointerpretativos, com o uso de ferramentas gráficas de desenho em tela e anotação no formato digital.

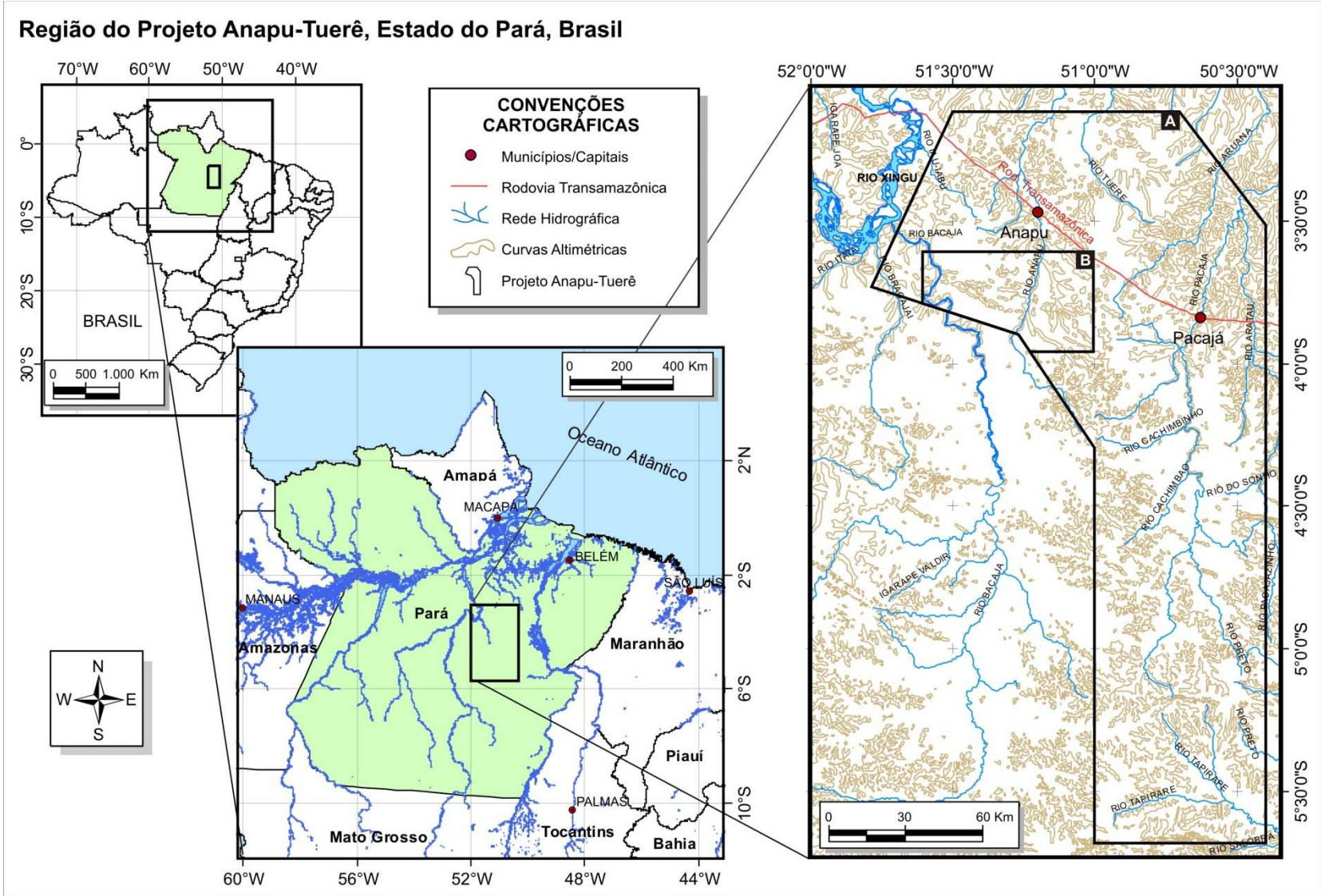


Figura 1-1. Localização da região estudada, com destaque para: (A) polígono do aerolevanteamento geofísico realizado pela CPRM; (B) área onde foram concentradas as campanhas de campo e mapeamento geológico em escala de 1:100.000.

Foram produzidos mapas interpretados em escala 1:100.000 que subsidiaram os trabalhos de verificação em campo (descritos no Capítulo 3). Estes mapas continham informações logísticas, litológicas e estruturais da área. Além disso, foram realizadas modelagens espaciais (discutidas no Capítulo 6), nas quais foram definidos padrões e classificações que serviram como guia nas coletas de dados e interpretações seguintes.

A coleta de dados em campo foi feita em dois levantamentos, que compreenderam em 25 dias de campo, nos quais foram identificadas e caracterizadas as principais unidades litoestratigráficas, bem como coletadas informações petrográficas e estruturais das rochas aflorantes na porção central do Domínio Bacajá. Os resultados referentes a estas campanhas são discutidos no Capítulo 5. Para representar os elementos planares, foi padronizada a notação: ângulo de mergulho / sentido de mergulho; para os elementos lineares: ângulo de caimento / sentido de caimento.

Uma base complementar de dados de campo, disponíveis nos mapas publicados anteriormente, foi acrescentada ao trabalho. Estes dados, somados àqueles coletados nos levantamentos de campo, subsidiaram as discussões interpretativas e a elaboração do modelo final.

De posse das informações interpretadas, tornou-se possível a confecção de um mapa geológico. Com base no mapeamento realizado e nos trabalhos desenvolvidos por outros autores na mesma região, foi elaborado um modelo de evolução tectônica para as rochas da área estudada.

Capítulo 2

2. Aspectos Geológicos Regionais

O Domínio Bacajá é apresentado neste capítulo, com enfoque em suas características geotectônicas e litoestratigráficas. O capítulo aborda a localização, conteúdo litológico, geocronologia, e recursos minerais desse domínio, além de discutir sua relação com outros domínios tectônicos da Plataforma Sul-Americana.

2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO TECTÔNICA

2.1.1. Plataforma Sul-Americana

A Plataforma Sul-Americana corresponde à fração continental da placa homônima que permaneceu estável e funcionou como antepaís durante a evolução das faixas móveis do Caribe, ao norte, e Andina, a oeste, ao mesmo tempo em que se processavam a abertura e o desenvolvimento do Atlântico Sul, no Meso-Cenozóico ([Schobbenhaus e Brito Neves 2003](#)).

O continente sul-americano ([Figura 2-1](#)) é composto por duas unidades geotectônicas, representadas pela Plataforma Sul-Americana e pela Cadeia Andina ([Almeida et al. 1981](#)). No território brasileiro, são reconhecidos três escudos predominantemente pré-cambrianos: (i) Brasil Central ou Guaporé; (ii) das Guianas; (iii) Atlântico. Além disso, o território apresenta extensas áreas de coberturas fanerozóicas acumuladas em bacias sedimentares, tais como as bacias do Amazonas e Solimões, do Paraná e do Parnaíba.

O Cráton Amazônico é constituído a norte pelo Escudo das Guianas, e a sul pelo Escudo Guaporé ou Brasil Central. Estes escudos são separados pela faixa de rochas sedimentares das bacias do Amazonas e Solimões.

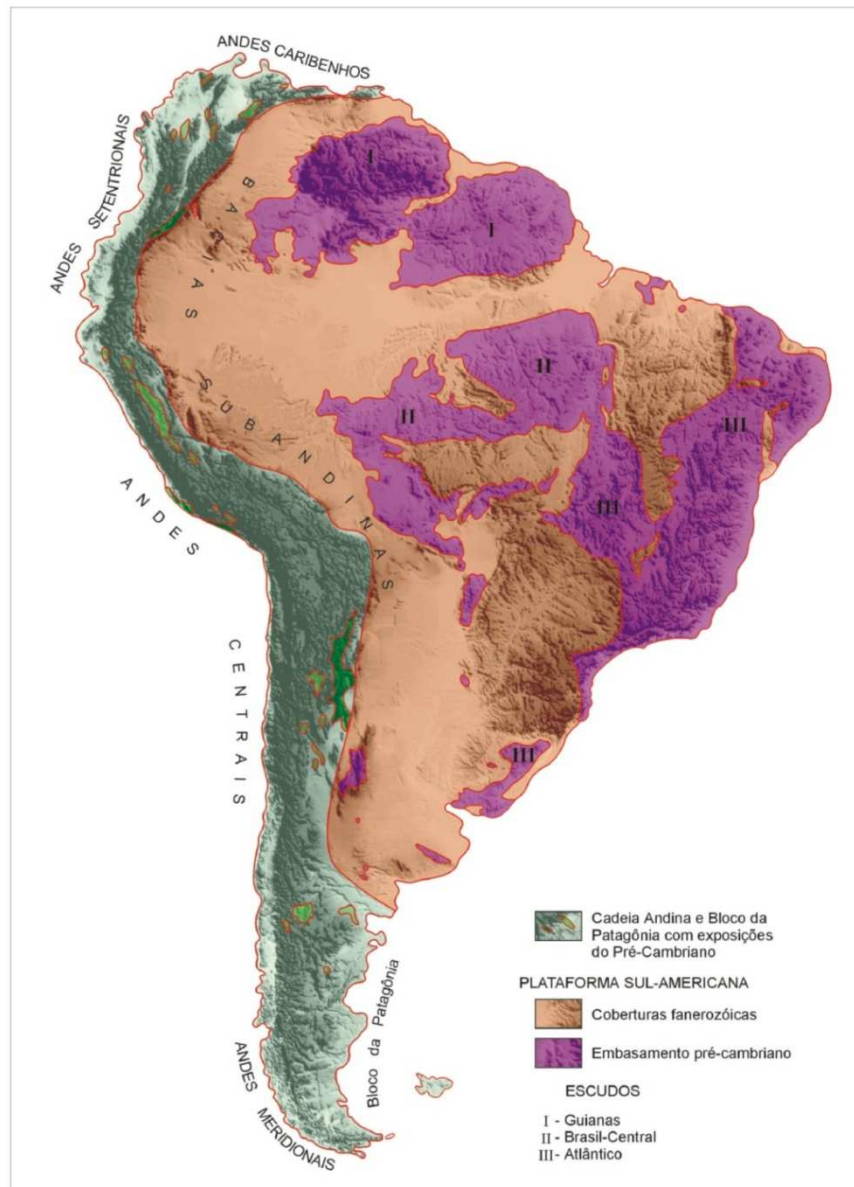


Figura 2-1. Porção continental da placa Sul-Americana, o continente Sul-Americano, destacando a área estável fanerozóica, a Plataforma Sul-Americana e as áreas instáveis dos Andes e do bloco da Patagônia ([Schobbenhaus e Brito Neves 2003](#) - modificado de [Almeida *et al.* 1976](#)).

2.1.2. Cráton Amazônico

A evolução geológica do Cráton Amazônico foi abordada por duas correntes científicas principais. Uma delas está baseada em informações fornecidas pela geologia estrutural e geofísica, para a qual o retrabalhamento crustal dos blocos continentais aglutinados no Arqueano

e Paleoproterozóico teria ocorrido a partir de orogenias predominantemente ensiálicas ([Hasui et al. 1984](#); [Costa e Hasui 1997](#)). A outra corrente está baseada em informações provenientes da geocronologia e geologia isotópica, e sugere a reciclagem de blocos crustais arqueanos em processos de acreção juvenil ([Cordani et al. 1979](#); [Teixeira et al. 1989](#); [Tassinari e Macambira 1999, 2004](#); [Santos et al. 2000](#); [Santos 2003](#)).

Dentre as propostas mais discutidas atualmente, destacam-se a de [Santos \(2003\)](#) e [Tassinari e Macambira \(2004\)](#). Estas propostas apresentam muitas similaridades entre si, mas discordam, sobretudo, com relação ao posicionamento dos limites das províncias tectônicas. [Vasquez et al. \(2008b\)](#) apresentam um mapa georreferenciado das províncias tectônicas do norte do Brasil, com base nos dados de [Almeida et al. \(1976\)](#), [\(1981\)](#) e [Santos \(2003\)](#) – [Figura 2-2](#).

Neste trabalho, foram adotados a proposta de [Santos \(2003\)](#) e o mapa de [Vasquez e Rosa-Costa \(2008\)](#). Segundo estes autores, o Cráton Amazônico seria dividido em sete províncias tectônicas ou geocronológica: (i) Carajás (3000-2500 Ma); (ii) Transamazonas (2260-1990 Ma); (iii) Tapajós – Parima (2030-1860 Ma); Amazônia Central (1900-1860 Ma); Rondônia – Juruena (1850 -1540 Ma); Rio Negro (1820 – 1520 Ma); e Sunsás (1450 – 1000 Ma).

A Província Transamazonas, correspondente à Província Maroni-Itacaiúnas de [Tassinari e Macambira \(2004\)](#), foi definida por [Santos \(2003\)](#) como um orógeno paleoproterozóico, cuja evolução esteve relacionada ao Ciclo Transamazônico (2,26 – 1,95 Ga). Este último autor relatou que a Província Transamazonas seria constituída, em território brasileiro, por três domínios distintos: Gurupi, Bacajá e Amapá.

O Domínio Bacajá ([Cordani et al. 1984](#), [Santos et al. 1988](#), [Macambira et al. 2001a, 2003](#), [Santos 2003](#), [Ricci et al. 2003b](#), [Faraco et al. 2005](#), [Vasquez 2006](#), [Barros et al. 2007](#), [Vasquez et al. 2008a, 2008b, 2008c](#)) é considerado como a zona de transição entre as províncias Transamazonas, a norte, e Carajás, a sul. O domínio consistiria em fragmentos de crosta arqueana e paleoproterozóica, imbricados tectonicamente segundo a direção WNW-ESE. [Faraco et al. \(2005\)](#) também relataram as incertezas quanto à definição dos limites entre o Domínio Bacajá e a Província Carajás. [Santos \(2003\)](#) sugeriu que o Domínio Bacajá dispõe de poucas informações, de forma que a caracterização do domínio ainda estaria baseada, principalmente, em relação às duas províncias.

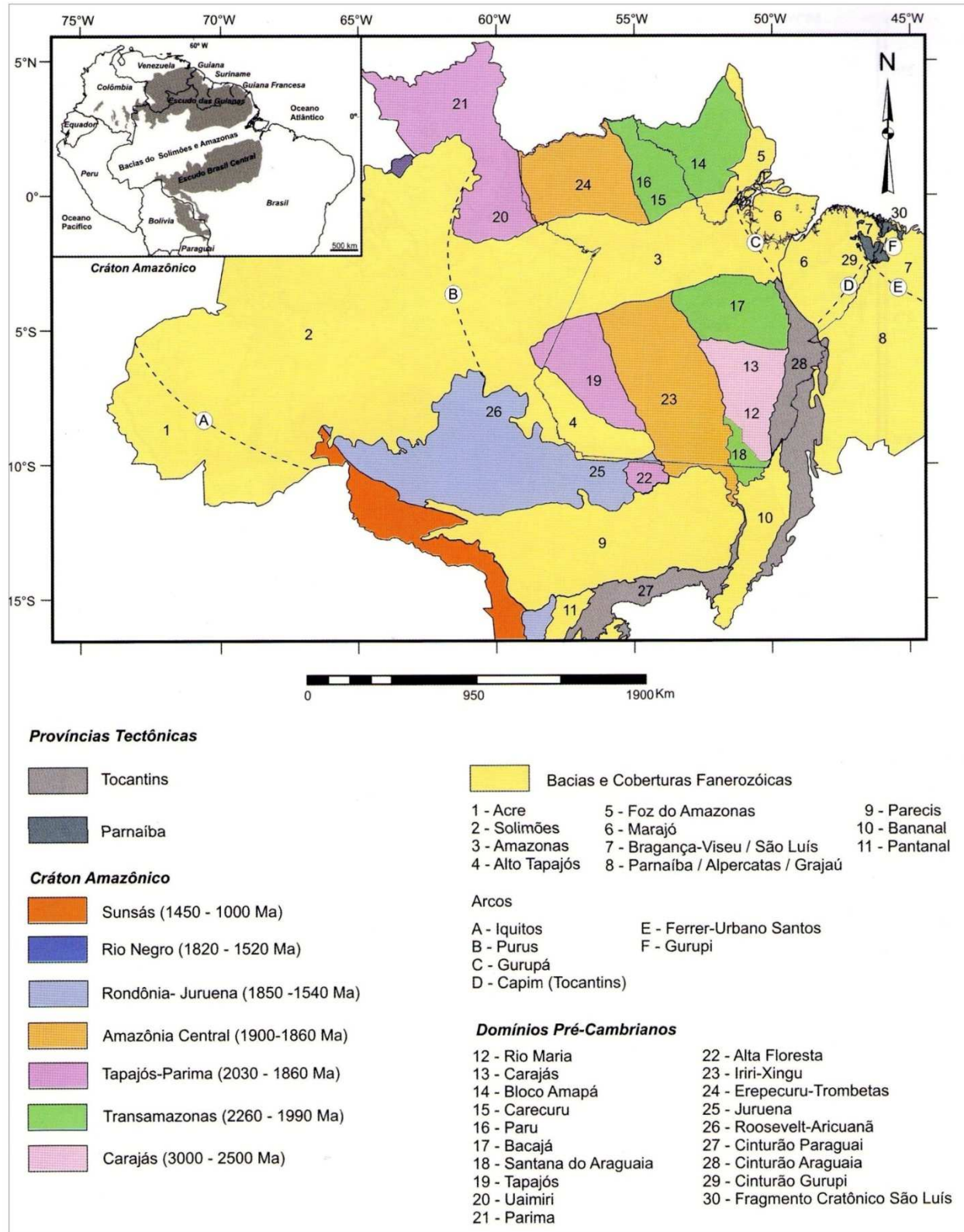


Figura 2-2. Províncias tectônicas do norte do Brasil, modificadas das propostas de Almeida *et al.* (1976, 1981) e Santos (2003), evidenciando os diferentes segmentos do Cráton Amazônico (Vasquez *et al.* 2008b).

2.2. TECTÔNICA, GEOLOGIA E MODELOS GEODINÂMICOS PARA O DOMÍNIO BACAJÁ

2.2.1. Contexto Tectônico do Domínio Bacajá

[Macambira et al. \(2003\)](#), com base em dados geocronológicos, definiram o Domínio Bacajá como um domínio tectônico à parte, que representaria um arco magmático soldado à crosta arqueana de Carajás. [Ricci et al. \(2003\)](#) caracterizaram o Domínio Bacajá como um segmento crustal paleoproterozóico, de orientação WNW e cerca de 150 km de largura, com uma ampla presença de associações de granulitos e anfibolitos. Tal segmento estaria localizado a sudoeste da Rodovia Transamazônica, tectonicamente justaposto ao Bloco Carajás, que se situa logo a sul. Nesse contexto, seria bordejado a sul pelo Sistema Transcorrente Cinzento, e a norte, na região do rio Anapu, por rochas paleoproterozóicas do Corredor de Cisalhamento Lombo Longo. [Vasquez et al. \(2008a\)](#) consideram o Domínio Bacajá como um orógeno colisional, representado por associações tectônicas que representam fragmentos arqueanos e siderianos retrabalhados no Ciclo Transamazônico.

2.2.2. Geologia do Domínio Bacajá

Diversos trabalhos de âmbito regional foram feitos com o intuito de reconhecer e ordenar as rochas do Domínio Bacajá segundo os principais eventos geológicos da região ([Jorge João et al. 1987, 2001](#), [Santos et al. 1988](#); [Faraco et al. 2005](#); [Vasquez 2006](#); [Barros et al. 2007](#); [Vasquez et al. 2008c](#); [Macambira et al. 2009](#)). Esses trabalhos apresentam muitas similaridades em termos dos eventos registrados, com pequenas divergências de conceitos e nomenclaturas e algumas adaptações e complementações quanto às descrições e definições das unidades litoestratigráficas.

[Jorge João et al. \(1987\)](#) individualizaram granulitos migmatíticos e diferentes granitóides na região de Altamira. Estas rochas eram reunidas anteriormente no Complexo Xingu, conforme descrito por [Issler et al. 1974](#)). Dessa maneira, os trabalhos de [Jorge João et al. \(1987\)](#) descreveram treze unidades litoestratigráficas presentes na região de Altamira, que foram agrupadas seguindo uma relação espaço temporal. Uma síntese das unidades aflorantes na área foi apresentada por esses autores: (i) rochas do embasamento arqueano, representadas pelo Granolito Bacajá; (ii) *greenstone belts* arqueano-paleoproterozóicos, denominadas de Suíte

Metamórfica Três Palmeiras, composta pelas unidades Anfibolito Itatá e Micaxisto Bacajá; (iii) Suíte Metamórfica Xingu, composta pelas unidades Granodiorito Anapu, Granodiorito Oca e Granito Jorge João; (iv) Rochas sedimentares da Bacia do Rio Amazonas, descritas pelas formações Alter-do-Chão, Irerê, Maecuru e Grupo Trombetas.

[Santos et al. \(1988\)](#) mapearam unidades de rochas de auto grau, granitóides e rochas supracrustais no interflúvio entre os rios Xingu e Iriri, região ocidental do Domínio Bacajá. Baseado em datações pelo método Rb-Sr, os autores mostraram que a região compreendia em rochas arqueanas retrabalhadas durante o Ciclo Transamazônico, além de rochas que foram formadas durante esse evento.

[Oliveira et al. \(1994\)](#) realizaram as primeiras individualizações de unidades do Complexo Xingu na região oriental do Domínio Bacajá, próximo à Serra Pelada. Estes autores mapearam corpos granulíticos, tais como as rochas do atual Complexo Cajazeiras e Ortogranulito Máfico Rio Preto, além de rochas supracrustais como a Formação Tapirapé e Serra Misteriosa.

Os trabalhos de [Faraco et al. \(2005\)](#) envolveram o mapeamento geológico das rochas localizadas a norte da Província Carajás, cujo conhecimento ainda era considerado incipiente. Os resultados foram baseados em dados de campo, interpretação de imagens aerogeofísicas e de sensoriamento remoto, análises petrográficas e isotópicas das rochas compreendidas entre as cidades de Belo Monte e Marabá. Conforme os autores, quatro novas unidades estratigráficas foram reconhecidas: Suíte Granulítica Direita, Kinzigito Ipiaçava, Complexo Jacaré e Complexo Valentim. As unidades Charnockito Bacajá e Monzogranito João Jorge foram reconceituadas. Além disso, a partir de análises isotópicas pelo método U-Pb SHRIMP em zircão, os autores comprovaram a presença de rochas siderianas, com idades de 2,3Ga na região.

[Barros et al. \(2007\)](#) mostraram resultados de estudos em rochas granitóides na região norte do Domínio Bacajá. Estes resultados relataram estruturas magmáticas e feições petrográficas que indicam a natureza sintectônica para estas rochas, as quais estariam em um contexto de arcos magmáticos em zonas de colagem de terrenos. A idade de 2076 ± 6 Ma obtida pelo método Pb-Pb em zircão ([Macambira et al. 2001, 2003](#); [Barros et al. 2007](#)), foi atribuída a um evento de deformação compressiva no final do Ciclo Transamazônico. Tendo as idades quanto o caráter sintectônico das estruturas reforçam a distinção do Domínio Bacajá em relação à Província Carajás.

[Vasquez et al. \(2008c\)](#) apresentaram uma síntese dos principais trabalhos regionais que envolveram estudos no Domínio Bacajá. Além da compilação, estes autores apresentaram novos dados geocronológicos e propuseram a definição de novas unidades litoestratigráficas ou mesmo a revisão da nomenclatura e constituição de unidades já conhecidas. Dessa maneira, os autores classificaram as rochas aflorantes na região do Domínio Bacajá em: complexos metamórficos, *greenstone belts*, rochas resultantes de magmatismo orogênicos colisionais, além das coberturas fanerozóicas. Para efeitos de reconhecimento regional, este trabalho utiliza a classificação de [Vasquez et al. \(2008c\)](#). A seguir, as principais unidades aflorantes no Domínio Bacajá serão descritas conforme a nomenclatura utilizada por [Vasquez et al. \(op. cit.\)](#). O respectivo mapa geológico destas unidades na região coberta pelo aerolevantamento do Projeto Aerogeofísico Anapu-Tuerê será apresentado na [Figura 2-3](#). As idades citadas neste capítulo estão apresentadas sinteticamente na [Tabela 2-1](#).

2.2.2.1. Complexos Metamórficos

As rochas descritas como pertencentes à unidade **Complexo Cajazeiras** ([Oliveira et al. 1994](#); [Faraco et al. 1996b](#), [2005](#); [Ricci 2006d](#)) afloram entre as bacias dos rios Bacajá e Tocantins. São compostas por granulitos re-hidratados, de composição tonalítica a granulítica, e por milonitos de alto grau. [Vasquez et al. \(2008c\)](#), a partir do método de evaporação de Pb em zircão, obtiveram uma idade mínima para a cristalização do protólito dessas rochas de 2942 ± 4 Ma ([Tabela 2-1](#)). [Macambira et al. \(2007\)](#), pelo método U-Pb SHRIMP em zircão, obtiveram idades de 3009 ± 27 Ma, atribuída ao Complexo Xingu, e de 2074 ± 8 Ma, nas bordas dos cristais de zircão analisados, atribuídas ao metamorfismo que levou à formação das rochas da unidade Complexo Cajazeiras.

O **Ortognaisse Pacajá** compreende corpos restritos de ortognaisse e migmatitos, afetados por metamorfismo em fácies anfibolito, dispostos segundo a direção WNW-ESE, justapostos por granulitos do embasamento ([Vasquez et al. 2008c](#)). Segundo esses autores, os migmatitos graníticos a tonalíticos apresentam assinatura gamaespectrométrica mais elevada no canal do eTh , enquanto que os ortognaisse predominantemente tonalíticos mostram assinatura gamaespectrométrica mais baixa neste mesmo canal. Idades obtidas pelo método Pb-Pb em zircão de 2671 ± 3 Ma ([Macambira et al. 2004](#), [2009](#)) representam a cristalização do protólito dessas

rochas. Estes mesmos autores, a partir de isótopos de Nd, apresentaram a idade modelo $T_{DM} 2,67$ Ga, com ϵNd de +2,7. [Vasquez et al. \(2008c\)](#) apresentam uma idade Pb-Pb em zircão de 2195 ± 3 Ma, obtida em um gnaiss tonalítico, interpretada como provável idade de metamorfismo desse embasamento.

Corpos máficos pertencentes ao **Ortogradulito Máfico Rio Preto** ([Vasquez et al. 2008c](#)) receberam o nome de Piracisito Rio Preto, unidade pertencente a então denominada Suíte Metamórfica Bacajaí ([Oliveira et al. 1994](#); [Faraco et al. 2005](#)). Esta unidade aflora na região sudeste do Domínio Bacajá, e é composta, segundo [Vasquez et al. \(2008c\)](#), por corpos alongados e estreitos, dispostos segundo WNW-ESE, marcados por anomalias magnetométricas nas rochas do Complexo Cajazeiras. As exposições podem ocorrer na forma de rochas hospedadas nos granulitos do Complexo Cajazeiras ou alojadas nos paragrulitos do Granulito Novolândia. Tais corpos apresentam paragênese e texturas compatíveis com fácies granulito, e são marcados por feições de migmatização com leucossomas enderbíticos ([Vasquez et al. 2008c](#)). Segundo os autores, esses granulitos máficos apresentaram idades Pb-Pb em zircão de 2628 ± 3 e 2072 ± 3 Ma que representariam, respectivamente, a idade mínima de cristalização do protólito ígneo, e o evento regional de granulitização.

O **Complexo Aruanã** ([Vasquez et al. 2008c](#)) compreende ortognaisses tonalíticos a graníticos fortemente re-hidratados que afloram em extensa e larga faixa WNW-ESE, na parte norte do Domínio Bacajá. [Ricci \(2006d\)](#) identificou vestígios de paragênese e microtexturas de metamorfismo de fácies granulito, apesar da intensa modificação causada pela migmatização úmida, de fácies anfibolito, deformação milonítica de alta temperatura e hidrotermalismo posteriores. Datações Pb-Pb em zircão, feitas por [Vasquez et al. \(2008c\)](#), em gnaisses granodioríticos ([Tabela 2-1](#)) indicaram a idade mínima de cristalização de 2606 ± 4 Ma para o protólito ígneo desse granulito intensamente retrometamorfizado e reequilibrado.

Dois conjuntos de paragrulitos ocorrem no Domínio Bacajá. O conjunto localizado na região central do domínio, é denominado **Paragnaisse Ipiçava**. Já o corpo localizado na região sudeste refere-se ao **Granulito Novolândia** ([Vasquez et al. 2008c](#)). Este segundo conjunto, segundo os autores, seria composto por kinzigitos, granulitos máficos, paragnaises potássicos arcoseanos com ortopiroxênio, granada, cordierita e biotita, além de paragnaises quartzozos, com cordierita, biotita e granada. O corpo referente ao Granulito Novolândia está disposto

segundo a direção E-W, eventualmente infletido para NW-SE, com feições características de movimentação destrál. Segmentos de ortogranulitos do Complexo Cajazeiras e do Ortogranulito Máfico Rio Preto são notáveis no interior desse corpo. Análises U-Pb SHRIMP em paragnaisses desta unidade forneceram idade de 2064 ± 4 Ma, que foram interpretadas como correspondente ao metamorfismo regional ([Macambira et al. 2007](#)). Além disso, [Vasquez \(2006\)](#) datou fontes detríticas arqueanas e siderianas (3,13-2,47Ga) e eventos granulíticos entre 2,11 e 2,07 Ga, o que sugere idades de fontes similares para o Granulito Novolândia.

O **Metatonalito Rio Bacajá** ([Vasquez et al. 2008c](#)), reúne granitóides bandados que ocorrem a sul da Sequência Três Palmeiras, segundo uma direção preferencial NW-SE ([Figura 2-3](#)). Compreende metatonalitos a metamonzogranitos com biotita e hornblenda, bandados e porfiroclásticos, de granulação média a grossa. Frequentemente hospedam lentes de rochas máficas microgranulares quartzo-dioríticas a tonalíticas, e xenólitos de rochas supracrustais migmatizadas. Análises U-Pb em zircão de um metatonalito porfiroclástico sugere a idade de 2338 ± 5 Ma ([Vasquez et al. 2008c](#)).

2.2.2.2. *Greenstone belts*

O **Grupo Vila União** ([Vasquez et al. 2008c](#)) reúne as rochas dos antigos grupos Buritirama ([Docegeo 1987](#)) e Tapirapé ([Oliveira et al. 1994](#)). A disposição espacial dessas rochas, segundo o mapa proposto por [Vasquez e Rosa-Costa \(2008\)](#), demonstra formato elíptico, moldado por tectônica transcorrente sinistral. A **Formação Tapirapé** consiste em uma faixa de rochas metamórficas de direção WNW-ESE, descrita por [Oliveira et al. \(1994\)](#) como metabasaltos foliados (ortoanfibolitos, plagioclásio-actinolita xistos e plagioclásio-clorita xistos) e talco-xistos, com metamorfismo de fácies xisto verde a anfibolito baixo. A **Formação Buritirama** é composta por sericita e muscovita-quartzitos, hematita-quartzitos, mica-xistos carbonatados intemperizados, quartzo-xistos, rochas carbonáticas, rochas cálcio-silicáticas e leitos de mármore ([Docegeo 1988](#)). Segundo [Jorge João et al. \(1987\)](#), [\(2001\)](#), o metamorfismo de fácies xisto-verde a anfibolito teria afetado as rochas da Formação Buritirama.

[Faraco et al. \(1996b\)](#) individualizaram, a partir de interpretação fotogeológica, corpos lenticulares e irregulares, denominados Sequências Metavulcano-Sedimentares do Tipo *Greenstone*. A partir da interpretação de produtos de sensores remotos e aerogeofísicos, [Vasquez](#)

[et al. \(2008c\)](#) utilizam o termo **Sequência Rochas Supracrustais 1** para designar corpos orientados segundo WNW-ESE, com assinatura gamaespectrométrica pouco variável em relação às demais rochas supracrustais, e gradiente magnético alto. Os corpos são compostos por quartzitos puros ou micáceos, de baixo grau metamórfico, com foliação sub-vertical. Exposições destes corpos foram descritas na Serra Misteriosa e Serra Lombo Longo, onde se localiza o garimpo aurífero Manelão. Em relação à geocronologia, a presença de pelo menos dois conjuntos de rochas com idades distintas, um arqueano e outro sideriano, além da possibilidade de haver rochas desta sequência com idades riacianas, confere à sequência uma ampla distribuição estratigráfica, que varia desde o Arqueano ao Paleoproterozóico ([Vasquez et al. 2008c](#)).

[Jorge João et al. \(1987\)](#) definiram a Suíte Metamórfica Três Palmeiras que inclui duas unidades de rochas metavulcanossedimentares. A primeira é o Anfibolito Itatá composto, predominantemente, por rochas metavulcânicas máficas, ao passo que a segunda é o Micaxisto Bacajá composto por metavulcanoclásticas, metavulcânicas félsicas a intermediárias, além de metassedimentares químicas e clásticas. [Vasquez et al. \(2008c\)](#) assinalaram que a nomenclatura “Suíte Metamórfica” não seria apropriada para rochas de baixo grau metamórfico, e denominaram a unidade de **Sequência Três Palmeiras**. O termo foi utilizado para designar o conjunto de rochas metavulcanossedimentares que compõem a Serra das Três Palmeiras, na parte centro-norte do Domínio Bacajá. A Sequência Três Palmeiras é, portanto, constituída principalmente por actinolita xistos, metandesitos, metabasaltos, metatufos andesíticos e basáltico, e anfibolitos. E subordinadamente, ocorrem metadacitos, metatufos dacíticos, quartzitos, mica xistos, formações ferríferas bandadas, filitos grafitosos e turmalinitos. Os metandesitos dessa unidade forneceram uma idade de cristalização de 2359 ± 3 Ma ([Macambira et al. 2004](#), [Tabela 2-1](#)), atribuída a cristalização destas rochas. [Vasquez \(2006\)](#), a partir de análises isotópicas de Nd ($\epsilon\text{Nd}_{2,36 \text{ Ga}}$ de +1,73 a 1,64 e T_{DM} de 2,47 a 2,49 Ga), interpretaram a origem das rochas vulcânicas como sendo relacionada à acreção juvenil ocorrida há cerca de 2,5 Ga. Esta unidade, bem como os corpos de granitóides reconhecidos como **Granodiorito Oca**, alojados em seu interior, hospedam mineralizações auríferas, associadas às zonas de cisalhamento que cortam essas unidades ([Klein e Carvalho 2008](#)).

2.2.2.3. Magmatismo Orogênico Pré-Colisional

[Vasquez et al. \(2008c\)](#) agruparam no **Tonalito Brasil Novo** os tonalitos e granodioritos ricos em biotita e hornblenda, além de monzo e sienogranitos subordinados. Estas rochas que apresentam deformação dúctil evidente eram anteriormente inseridas na unidade Granodiorito Anapu ([Jorge João 1987](#)). Idades Pb-Pb em zircão de 2191 ± 2 Ma ([Macambira et al. 2009](#)), 2209 ± 2 ([Vasquez et al. 2008a](#)) e 2215 ± 2 ([Vasquez et al. 2005](#)), além de idades U-Pb em zircão de 2182 ± 6 ([Santos 2003](#)), foram obtidas como idade de cristalização para rochas relacionadas a esta unidade.

O **Granodiorito Oca** ([Jorge João et al. 1987](#)) abrange dois plútons de granitóides intrusivos na Sequência Três Palmeiras, na região da Volta Grande do Rio Xingu. É composto por granodioritos, tonalitos porfiroclásticos inequigranulares, e quartzo monzodioritos inequigranulares. Teriam textura ígnea preservada, apesar de apresentarem faixas miloníticas nas bordas e atravessando o interior dos plútons ([Vasquez et al. 2008c](#)). A idade de 2160 ± 3 Ma, obtida pelo método U-Pb SHRIMP em zircão de um quartzo monzodiorito inequigranular ([Vasquez 2006](#)), foi atribuída à cristalização das rochas desta unidade. Além disso, o autor destacou que isótopos de Nd assinalaram uma fonte juvenil, com possível participação de crosta arqueana.

As rochas do **Granodiorito Belo Monte** ([Vasquez et al. 2008c](#)) afloram nas proximidades da localidade de Belo Monte, nas margens do Rio Xingu. Estas rochas seriam correlatas às do Granodiorito Anapu ([Jorge João et al. 1987](#)); no entanto, por não apresentar continuidade até a região de Anapu, foram designadas como uma unidade distinta. A unidade seria composta por granodioritos e monzogranitos com biotita, em geral inequigranulares leuco a mesocrático, geralmente foliados segundo a direção E-W e mergulho subvertical. [Macambira et al. \(2001\)](#) obtiveram idade Pb-Pb por evaporação em zircão de 2154 ± 3 Ma em um granodiorito desta unidade. A idade foi interpretada como relacionada à cristalização destas rochas.

O **Metatonalito Tapiranga** apresenta similaridades com o Granodiorito Anapu ([Jorge João et al. 1987](#)), mas por possuir algumas particularidades no corpo aflorante, foi designado como uma unidade à parte ([Vasquez et al. 2008c](#)). Essas rochas afloram nas proximidades do Rio Iriri, sob a forma de um batólito irregular, orientado segundo a direção NW-SE. Para [Vasquez et al. \(op. cit\)](#), a unidade é composta por metatonalitos e metagranodioritos, porfiroclásticos, de

granulação média a fina, contendo xenólitos centimétricos a métricos de rochas metavulcânicas máficas. São cortados por veios leucograníticos concordantes ou discordantes à foliação. [Vasquez \(2006\)](#) obteve uma idade U-Pb SHRIMP em zircão de 2133 ± 10 Ma interpretada como a provável cristalização destas rochas. Uma segunda população de zircões com idades de 2055 ± 5 Ma, representaria um possível evento de migmatização. Em relação ao ambiente tectônico, o referido autor encontrou a assinatura isotópica de Nd ($\epsilon\text{Nd}_{2,13 \text{ Ga}}$ de -0,71 e T_{DM} de 2,45 Ga), que sugeriria uma fonte juvenil com alguma contribuição crustal, possivelmente relacionada a ambiente de arco magmático.

2.2.2.4. Magmatismo Orogênico Sin a Tardi-Colisional

As rochas conhecidas atualmente por **Complexo Bacajaí** ([Vasquez et al. 2008c](#)) haviam sido previamente denominadas de Granolito Bacajaí ([Jorge João 1987](#)) e Complexo Charnockítico Bacajaí. [Ricci e Costa \(2004\)](#) definiram a unidade como composta por charnockitóides de origem ígnea. No conceito de [Vasquez et al. \(2008c\)](#), o Complexo Bacajaí engloba, predominantemente, enderbitos e charnoenderbitos, associados subordinariamente, a charnockitos, jotunitos e mangeritos. Estas rochas representam granitóides orogênicos, gnaissificados a isotrópicos, com textura ígnea preservada. Segundo [Vasquez et al. \(2008c\)](#) as rochas charnockíticas encontram-se reequilibradas ou descharnockitizadas. As idades U-Pb SHRIMP em zircão de $2113 +35/-33$ Ma ([Faraco et al. 2005](#)), e Pb-Pb em zircão de 2094 ± 4 e 2114 ± 3 Ma ([Monteiro 2006](#)) seriam correspondentes à cristalização do evento magmático que gerou as rochas desta unidade.

O **Granodiorito Babaquara** foi designado por [Vasquez et al. \(2008c\)](#) para fazer referência a um corpo granítico, localizado nos interflúvios dos rios Xingu e Bacajá. A unidade corresponde ao Granodiorito Anapu ([Jorge João et al. 1987](#)). O corpo rochoso estaria alongado na direção regional NW-SE, e seria claramente distinto das unidades encaixantes Metatonalito Tapiranga e Complexo Bacajaí. É constituído por granodioritos com biotita e hornblenda, inequigranulares e porfiroclásticos, de granulação média com leucogranitos equigranulares subordinados ([Vasquez et al. 2008c](#)). Estas rochas apresentam foliação milonítica de baixa temperatura sobreposta à trama original, com direção concordante àquela NW-SE. Os autores

relataram ainda feições rúpteis e alteração hidrotermal. A idade Pb-Pb em zircão de 2102 ± 3 Ma foi obtida para um granodiorito porfiroclástico da unidade em questão ([Vasquez et al. 2008c](#)).

2.2.2.5. Magmatismo Orogênico Tardi a Pós-Colisional

A unidade **Suíte Intrusiva Amapari** foi proposta por [Vasquez et al. \(2008c\)](#) para designar as rochas ígneas catazonais reconhecidas por [Ricci e Costa \(2004\)](#). No contexto da unidade proposta, foram descritos batólitos e *stocks* charnockitos a charno-enderbitos. Estas rochas, segundo [Ricci \(2006b\)](#), estariam em geral descharnokitizadas, com cristais reliquiais de orto e clinopiroxênio pseudomorfizados por clorita, talco, bastita e/ou actinolita, ou reequilibrados para anfibólitos cálcicos de diferentes gerações. Para o referido autor, a presença de xenólitos de granulitos máficos e outros ortognaisses de alto grau como encaixantes sustentariam a idéia de nível crustal profundo para o magmatismo que deu origem a estas rochas. Idades Pb-Pb em zircão de 2070 ± 3 ([Vasquez et al. 2008c](#)) e U-Pb SHRIMP em zircão de 2086 ± 5 ([Santos 2003](#)) corroboram a separação desta unidade em relação ao Complexo Bacajaí. [Vasquez \(2006\)](#) ressalta, a partir de análises em isótopos de Nd, a contribuição crustal no magmatismo que originou estas rochas.

[Jorge João et al. \(1987\)](#) descreveram corpos graníticos de granulação fina denominados de Granito João Jorge, unidade integrante da então Suíte Metamórfica Xingu. Posteriormente, [Faraco et al. \(2005\)](#) descreveram estas rochas como batólitos alongados, denominados de Monzogranito João Jorge. Esses batólitos seriam caracterizados por altos radiométricos, e valores elevados do gradiente magnético. [Vasquez et al. \(2008c\)](#) propuseram a nomenclatura **Suíte Intrusiva João Jorge** para denominar esses plútons graníticos, incluindo o **Granito Felício Turvo**, individualizado por [Souza \(1995\)](#). A suíte é composta por monzo e sienogranitos, poucos granodioritos, com granulação média a fina, inequi e equigranulares, leucocráticos, com porções mais ricas em biotita. Estas rochas possuem uma tênue foliação magmática ocasionalmente superposta por uma foliação milonítica supostamente relacionada a zonas de cisalhamento transcorrentes. Além disso, apresentam faixas de brechas cataclásticas, acompanhadas por alteração hidrotermal, que retratariam reativação rúptil de zonas de cisalhamento transcorrentes ([Vasquez et al. 2008c](#)). Idades Pb-Pb em zircão de 2077 ± 2 Ma ([Vasquez et al. 2005](#)) e 2076 ± 6 Ma ([Barros et al. 2007](#)) foram atribuídas à cristalização dos corpos graníticos desta unidade.

Além disso, a idade Pb-Pb em zircão de 2069 ± 6 Ma foi atribuída à cristalização do Granito Felício Turvo ([Souza et al. 2003](#)).

2.2.2.6. Magmatismo Orogênico Pós-Colisional

Um pluton de granitóide denominado de **Granodiorito Sant'Ana** ([Vasquez et al. 2008c](#)), ocorre intrudido às rochas do Ortognaisse Rio Preto e Paragnaisse Ipiacava. Nesse pluton foram registrados granodioritos e tonalitos, além de leucomonzogranitos, ocasionalmente. As rochas apresentam granulação média a fina, e uma foliação magmática incipiente. Na mesma unidade, também foram encontrados diques de composição diorítica, relacionadas a misturas de magmas. A idade Pb-Pb em zircão de 1986 ± 5 Ma ([Vasquez et al. 2005](#)) sugeriu que o Granodiorito Sant'Ana é o granitóide mais jovem do Domínio Bacajá.

2.2.2.7. Coberturas Fanerozóicas

Sobrepostas às rochas Pré-Cambrianas do Domínio Bacajá, se encontram as rochas fanerozóicas da Bacia do Amazonas. Na área central do Domínio Bacajá afloram, principalmente, rochas da **Formação Alter do Chão** ([Caputo et al. 1971](#), [Daemon 1975](#), [Rossetti e Neto 2006](#)). Soleiras, diques e *stocks* ocorrem intrudidos às rochas da Bacia do Amazonas, e são denominados de **Diabásio Penatecaua** ([Issler et al. 1974](#), [Vasquez et al. 2008c](#)). Esses corpos são constituídos por diabásios, que apresentam alta expressividade em dados magnetométricos, e encontram-se preferencialmente orientados segundo ENE-WSW a N-S.

Cascalhos e demais sedimentos aluvionares recobrem as principais drenagens e planícies de inundações na região.

Tabela 2-1. Síntese dos dados geocronológicos do Domínio Bacajá (modificado de [Vasquez et al. 2008c](#)).

Associação	Unidade Litoestratigráfica	Idade de Formação/ Fontes Detriticas (Ma)	Método	Idade de Metamorfismo (Ma)	Método	TDM (Ga)	ϵ Nd (t)
Magmatismo Pós-Orogênico (Ciclo Transamazônico)	Granodiorito Sant'Ana	1986 $\pm$ 5 ⁷	Pb-Pb zr			2,83 ⁵	-8,89 ⁵
Magmatismo Orogênico Tardi a Pós-Colisional (Ciclo Transamazônico)	Granito Felício Turvo	2069 $\pm$ 6 ¹¹	Pb-Pb zr				
	Suíte Intrusiva João Jorge	2075 $\pm$ 3 ⁹	Pb-Pb zr				
		2076 $\pm$ 6 ^{9 e 12}	Pb-Pb zr			2,57 e 2,33 ⁹	-4,12 e -0,60 ⁹
		2077 $\pm$ 2 ⁷	Pb-Pb zr			2,73 e 2,65 ⁵	-5,80 e -6,49 ⁵
		2085 $\pm$ 4 ¹³	Pb-Pb zr				
	Suíte Intrusiva Amapari	2070 $\pm$ 3 ⁴	Pb-Pb zr			2,47 e 2,46 ⁵	-3,12 e -2,40 ⁵
Magmatismo Orogênico Sin a Tardicolisional (Ciclo Transamazônico)		2086 $\pm$ 5 ⁶	U-Pb S zr				
	Granodiorito Babaquara	2102 $\pm$ 3 ⁴	Pb-Pb zr			2,59 ⁵	-3,45 ⁵
	Granito Canaã	2104 $\pm$ 5 ⁷	Pb-Pb zr			2,54 ⁵	-3,40 ⁵
	Complexo Bacajá	2094 $\pm$ 4 e 2114 $\pm$ 3 ¹⁰	Pb-Pb zr				
Magmatismo Orogênico Pré-Colisional (Ciclo Transamazônico)		2113 $\pm$ 35/-33 ⁸	U-Pb S zr				
	Metatonalito Tapiranga	2133 $\pm$ 10 ⁵	U-Pb S zr		U-Pb S zr	2,45 ⁵	-0,71 ⁵
	Monzogranito Piranhaquara	2147 $\pm$ 5 ⁴	U-Pb S zr			2,74 ⁵	-4,29 ⁵
	Granodiorito Belo Monte	2154 $\pm$ 4 ^{9 e 13}	Pb-Pb zr				
	Granodiorito Oca	2160 $\pm$ 3 ⁵	U-Pb S zr			2,52 ⁵	-1,59 ⁵
	Tonalito Brasil Novo	2182 $\pm$ 6 ⁶	U-Pb S zr				
		2191 $\pm$ 2 ¹³	Pb-Pb zr				
		2209 $\pm$ 2 ⁴	Pb-Pb zr			2,93 e 2,71 ⁵	-4,35 e -6,37 ⁵
		2215 $\pm$ 2 ⁷	Pb-Pb zr				
Greenstone Belts	Sequência Três Palmeiras	2359 $\pm$ 3 ³	Pb-Pb zr			2,49 e 2,47 ⁵	+1,64 e +173 ⁵

Associação	Unidade Litoestratigráfica	Idade de Formação/ Fontes Detriticas (Ma)	Método	Idade de Metamorfismo (Ma)	Método	TDM (Ga)	ϵ Nd (t)
Complexos Metamórficos	Metatonalito Rio Bacajá	2338 $\pm$ 5 ⁴	U-Pb S zr			3,10 ⁵	-10,84 ⁵
	(Complexo Jacaré*)	2313 $\pm$ 9 ⁸	U-Pb S zr				
	Granulito Novolândia			2064 $\pm$ 4 ²	U-Pb S mz		
	Paragnaisse Ipiacava			2109 $\pm$ 9 ⁵ ⁴	U-Pb S zr		
		3,14 - 2,56 ⁵	Pb-Pb zrd	2073 $\pm$ 2, 2071 $\pm$ 3 ⁵	U-Pb S mz		
		3,12 - 2,47 (*) ⁵	U-Pb S zrd	2074 $\pm$ 3 ⁵	Pb-Pb zr		
	Ortognaisse Uruará	2439 $\pm$ 4 ¹³	Pb-Pb zr				
		2440 $\pm$ 7 ⁷	Pb-Pb zr				
		2487 $\pm$ 13 ⁴	U-Pb S zr			2,98 e 2,64 ⁵	-4,68 e +0,46 ⁵
		2503 $\pm$ 10 ⁶	U-Pb S zr				
	Complexo Aruanã	2606 $\pm$ 4 ¹	Pb-Pb zr				
	Ortogranulito Máf. Rio Preto	2628 $\pm$ 3 ¹	Pb-Pb zr	2072 $\pm$ 3 ¹			
	Ortognaisse Pacajá	2671 $\pm$ 3 ^{3 e 13}	Pb-Pb zr	2195 $\pm$ 3 ¹		2,67 ³	+2,7 ³
	Complexo Cajazeiras	3009 $\pm$ 27 ²	U-Pb S zr	2074 $\pm$ 8 ²			
		2942 $\pm$ 4 ¹	Pb-Pb zr				

Abreviaturas: S. SHRIMP; mz. monazita; zr. zircão; zrd. zircão detrítico; ϵ Nd (t) calculado para idade de cristalização; (*) idades em Ga; * - denominação usada exclusivamente pelos autores.

Referências: 1- [Vasquez et al. \(2008c\)](#); 2- [Macambira et al. \(2007\)](#); 3- [Macambira et al. \(2004\)](#); 4- [Vasquez et al. \(2008a\)](#); 5- [Vasquez \(2006\)](#); 6- [Santos \(2003\)](#); 7- [Vasquez et al. \(2005\)](#); 8- [Faraco et al. \(2005\)](#); 9- [Macambira et al. \(2003\)](#); 10- [Monteiro \(2006\)](#); 11- [Souza et al. \(2003\)](#); 12- [Barros et al. \(2007\)](#); 13- [Macambira et al. \(2009\)](#).

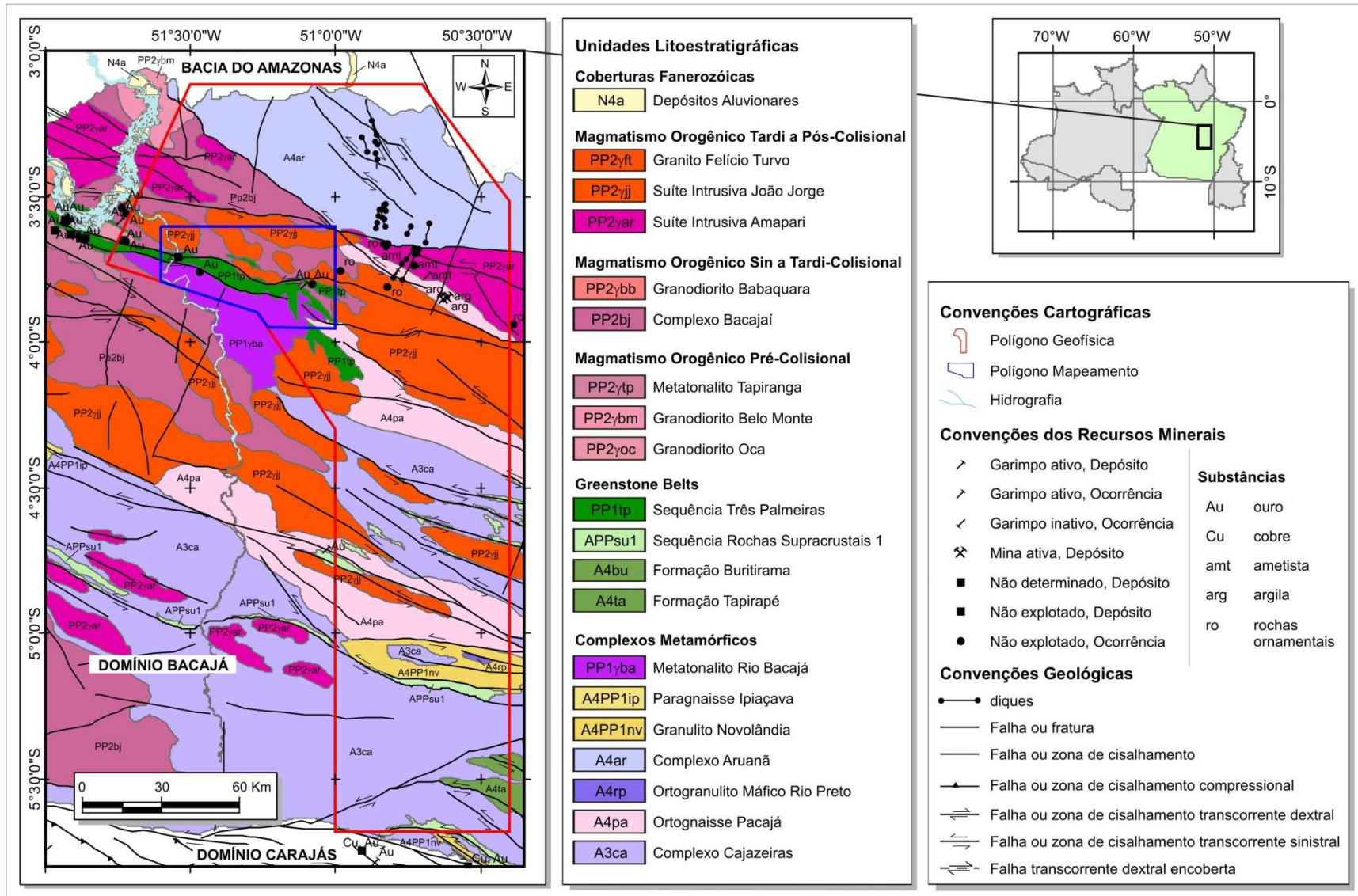


Figura 2-3. Geologia e recursos minerais da parte central do Domínio Bacajá com destaque para a região do aerolevante Anapu-Tuerê (polígono em vermelho) e para a área de estudo (polígono azul) (modificado de [Vasquez et al. 2008c](#)).

2.2.3. *Evolução Geodinâmica do Domínio Bacajá*

[Vasquez et al. \(2008c\)](#) agruparam as unidades litoestratigráficas do Domínio Bacajá em associações tectônicas de acordo com a época de formação, a filiação e os eventos térmicos e tectônicos a que as rochas foram submetidas. As seguintes associações de embasamento foram distinguidas: (i) Associação Granulítica Arqueana/Paleoproterozóica (3009-2597 Ma), composta por rochas metamórficas de auto grau, com protólitos ou fontes detríticas arqueanas a siderianas (3135-2475 Ma), submetidas a metamorfismo granulítico durante o Riaciano (2109-2064 Ma) e, frequentemente, apresentam rochas charnockíticas associadas. Esta associação compreende o Complexo Cajazeiras, o Ortogranulito Máfico Rio Preto, o Granulito Novolândia e o Paragnaisse Ipiacava; (ii) Greenstone Belts Arqueanos/Paleoproterozóicos composta por sequências metavulcano-sedimentares neoarqueanas a siderianas, a exemplo da Sequência Três Palmeiras (2359 Ma) e Rochas Supracrustais 1; (iii) Associação Granito-gnaiss-migmatítica Arqueana/Paleoproterozóica composta por metamorfitos de auto grau com protólitos arqueanos a siderianos (2671-2388 Ma) e leucossomas riacianos (2195 Ma), como os ortognaisses Pacajá e Uruará e Metatonalito Rio Bacajá.

Um outro conjunto de associações está relacionado a suíte de granitóides riacianos cuja a formação precedeu, culminou e seguiu a grande colisão continental durante o Ciclo Transamazônico, destacando as seguintes associações: (i) Suítes Plutônicas Pré-colisionais constituídas por granitóides de arcos de ilha de margem continental formados no Riaciano (2215-2133 Ma) colididos durante o Ciclo Transamazônico, que compreendem o Tonalito Brasil Novo, os granodioritos Oca e Belo Monte, o Monzogranito Piranhaquara e o Metatonalito Tapiranga; (ii) Suítes Plutônicas Sin a Tardicolisionais, compostas por granitóides e rochas charnockíticas riacianas (2114-2094 Ma) relacionados ao clímax da colisão continental (ca. 2,1 Ga); a esta associação foram relacionados o Complexo Bacajaí, o Granito Canaã e o Granodiorito Babaquara; (iii) Suítes Plutônicas Tardi a Pós-colisionais, formadas por granitóides e rochas charnockíticas riacianas (2086-2069 Ma) relacionados ao relaxamento crustal posterior à colisão transamazônica, que reúne as suítes intrusivas Amapari e João Jorge.

Por último, a Suíte Plutônica Pós-orogênica, caracterizada por granitóides orosirianos que podem ser relacionados a um pulso tardio do Ciclo Transamazônico. A esta suíte está relacionada ao Granodiorito Sant'Ana (1986 Ma).

Baseado em dados geocronológicos de Pb por evaporação e Sm-Nd em rocha total, [Macabira et al. \(2009\)](#) propuseram um modelo de evolução magmático-tectônica para a parte centro-leste do Domínio Bacajá. Segundo estes autores, o modelo seguiria um roteiro de desenvolvimento desde o Neoarqueano até o Riáciano. As rochas mais antigas seriam gnaisses com idades de 2,67 e 2,44 Ga, e representariam remanescentes de arcos de ilhas oceânicas e continentais. As rochas da Sequência Três Palmeiras, com idade compreendida entre 2,36 e 2,34 Ga, seriam os primeiros registros de rochas supracrustais Siderianas no Cráton Amazônico. Tais rochas foram relacionadas a um provável arco de ilha/assoalho oceânico acrescido à margem do cráton. Uma granitogênese riáciana registrada entre 2,22-2,08 Ga denotaria diferentes estágios do Ciclo Transamazônico. O primeiro estágio seria representado por granitóides de arco continental formados por magma da crosta arqueana entre 2,22-2,18 Ga. O segundo seria caracterizado pela produção de material juvenil entre 2,16 e 2,13 Ga. Por fim, o terceiro estágio, ocorrido em torno de 2,08 Ga, estaria representado por diversos granitóides também originados por material juvenil ou pela crosta retrabalhada durante eventos compressivos. Segundo os autores, os isótopos de Nd revelaram que as rochas juvenis predominariam na parte nordeste do domínio, enquanto que as formadas por retrabalhamento crustal dominariam a parte sul. A atual configuração do Domínio Bacajá resultaria, portanto, da colisão contra o Bloco Carajás (arqueano), no final do Ciclo Transamazônico.

2.2.4. Relações com o Modelo Geodinâmico do Escudo das Guianas

A partir da integração entre dados isotópicos e petroestruturais, [Delor et al. \(2003\)](#) propuseram uma revisão do modelo geodinâmico para o Escudo das Guianas, que seria o prolongamento da Província Transamazonas/Maroni-Itacaiúnas. Para esses autores o novo modelo geodinâmico, ilustrado na [Figura 2-4](#), abrangeria quatro estágios bem marcados.

O primeiro estágio denominado de “Eoriáciano: crosta oceânica juvenil (2,26-2,20 Ga)”, compreenderia na abertura de um oceano entre as rochas arqueanas do Escudo Oeste Africano e do Cráton Amazônico. Em seguida, um segundo estágio denominado “Mesoriáciano: convergência D1 versus multi-pulsos de acreção TTG (2,18-2,13 Ga)”. Neste estágio, dois processos foram relatados para representar os estágios iniciais do magmatismo paleoproterozóico relacionados ao grande volume de batólitos paleoproterozóicos TTG: um originado no manto

arcaico, provocando a fusão da crosta oceânica progressiva em sua base, e o seguinte, relacionado a processos de subducção modernos. Em ambas as interpretações, a produção de magmas TTG resultaria da fusão da crosta basáltica juvenil. O terceiro estágio foi denominado de “Neoriaciano: Transcorrência Sinistral D2a *versus* magmatismo granítico e abertura de bacias detriticas (2.11-2.08 Ga)”. Nesse estágio, domínios graníticos formariam um segundo tipo de litologia crustal paleoproterozóica. A acreção granítica sintectônica refletiria o bloqueio da convergência de placas (D1) e o desenvolvimento de transcorrência sinistral (D2a) entre os escudos Arqueanos sul-amazônico e norte-africano. O quarto e último estágio foi denominado “Neoriaciano: Corredores de cisalhamento D2b *versus* monzogranitos tardios e metamorfismos das bacias detriticas (2.07-2.05 Ga)”. Este estágio corresponderia ao contínuo tectonismo global D2, e à produção de monzogranitos metaluminosos metamorfizados em fácies granulito, dispostos ao longo dos corredores de cisalhamento dextrais WNW-ESE, no nordeste da Guiana Francesa.

2.3. RECURSOS MINERAIS DO DOMÍNIO BACAJÁ

O potencial metalogenético do Domínio Bacajá é considerado alto por similaridade e correlação com terrenos do Escudo das Guianas, representados pelo Grupo Paramaca e Supergrupo Barama-Mazaruni ([Delor et al. 2003](#)). Nas Guianas, estes terrenos são caracterizados por mineralizações auríferas do tipo ouro orogenético, com algumas minas de classe mundial. Ressalta-se ainda a presença de inúmeros garimpos de ouro na extensão brasileira desses terrenos, desde o norte do Amapá, parcialmente cobertos pela bacia Amazônica, estendendo-se até o norte do Núcleo arqueano de Carajás.

Os trabalhos de [Jorge João et al. \(1987\)](#) salientaram, além da presença de ouro, a presença de ferro e bens minerais como cobre, níquel e cromo, potencialmente associados com a sequência máfico-ultramáfica da Serra Três Palmeiras, atualmente reconhecida como Sequência Três Palmeiras. Os autores revelaram ainda a presença de scheelita nestas mesmas rochas.

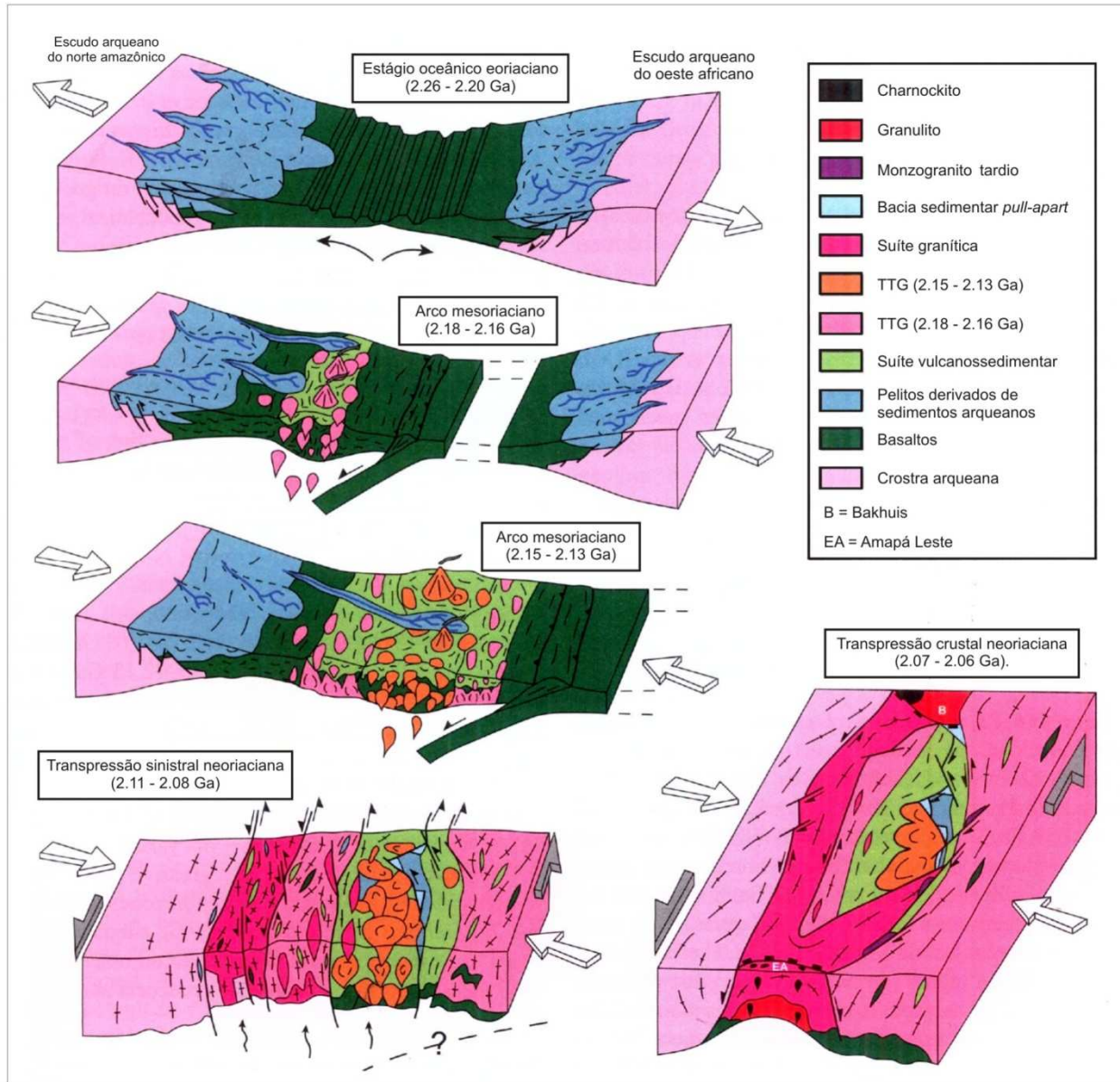


Figura 2-4. Modelo de evolução geodinâmica para o Terreno Paleoproterozóico da Guiana Francesa (Delor *et al.* 2003a).

Klein e Carvalho (2008) relataram a presença de depósitos auríferos filonianos associados às zonas de cisalhamento presentes nas rochas supracrustais e nos granitóides intrusivos. Estes depósitos, segundo os autores, seriam compostos por veios de quartzo com pirita, calcopirita, arsenopirita, ouro e possivelmente outros minerais de cobre e ferro, dispostos segundo a direção N60E ou WNW-ESE. A mineralização estaria associada às zonas de seritização, cloritização e

carbonatação, instaladas em metandesitos contendo antofilita, ou em plútons quartzo monzodioríticos a granodioríticos do Granodiorito Oca, intrudidos na sequência.

[Souza e Kotschoubey \(2005\)](#) relataram que no garimpo Manelão, o ouro é encontrado em veios de quartzo, no perfil de alteração laterítica e nas coberturas coluvial e aluvial. Tais características foram geologicamente associadas ou desenvolvidas sobre as rochas supracrustais (Sequência de Rochas Supracrustais 1). Segundo os autores, o ouro se encontra na forma livre, formando agregados milimétricos preenchendo fissuras ou dispersos na ganga quartzosa. Além disso, foi encontrado incluso em grãos de pirita de veios de quartzo ou nos anfibolitos e xistos alterados hidrotermalmente. Estes veios seriam hialinos, de granulação média a grossa, bastante fraturados, com textura localmente sacaroidal e atitudes N70W 80°/NE e N23E 80°/NW. Quanto à alteração hidrotermal, há zonas irregulares e descontínuas com geometria aproximada aos veios de quartzo. Estas zonas seriam originadas a partir de transformações mineralógicas decorrentes da interação entre os fluidos hidrotermais e as rochas encaixantes.

[Agnerian \(2005\)](#) descreve na região da Volta Grande do Rio Xingu a presença de dois tipos de mineralização: (i) ouro primário em rochas intrusivas; e (ii) ouro secundário em rochas saprolíticas. O ouro primário ocorre associado a zonas de alteração situadas em granodioritos. A assembléia de alteração compreende, principalmente, em carbonato, albita, pirita e, como secundários, quartzo e magnetita. A mineralização é controlada por zonas miloníticas formadas próximas ao contato intrusivo do granodiorito. Em relação ao ouro secundário, este ocorre em uma zona saprolítica sobrejacente à mineralização primária de Volta Grande.

Na tentativa de mapear zonas hospedeiras de mineralizações compatíveis com os estudos relatados neste tópico, serão discutidos no Capítulo 6, modelos baseados em integrações de dados aerogeofísicos e geológicos.

Capítulo 3

3. Aerogeofísica do Projeto Anapu-Tuerê

Neste capítulo será apresentado um mapa litogeofísico originado a partir da interpretação visual das imagens do Projeto aerogeofísico Anapu-Tuerê. Para tanto, será feita uma síntese sobre as formas de aquisição e sobre as características do aerolevanteamento que originou o projeto. Serão apresentadas ainda as fases de processamento, análise e interpretação que possibilitaram a confecção do mapa litogeofísico em escala de 1:250.000 na área correspondente à região do projeto.

Inúmeras pesquisas em geociências utilizam imagens aerogeofísicas como ferramenta auxiliar para o mapeamento geológico ([Pires 1990](#), [Pires 1995](#), [Silva 1999](#), [Cainzos et al. 2003](#), [Maas et al. 2003](#), [Ruy et al. 2006](#), [Magalhães et al. 2007](#), [Sousa 2008](#)). No mundo inteiro, dados aerogeofísicos são processados de forma a realçar unidades litoestratigráficas ou alvos prospectivos, seja no âmbito dos recursos minerais, energéticos, ambientais ou hídricos. Em pesquisas que envolvem o mapeamento geológico de regiões onde a cobertura vegetal é densa e o acesso ao substrato é dificultado, torna-se fundamental o uso de dados provenientes de métodos indiretos, tais como os adquiridos por aerolevanteamentos geofísicos. Entender a natureza desses dados e o que eles de fato representam é um desafio para o geólogo, uma vez que um acervo de modelos e interpretações será lançado a partir da análise desses dados.

Nesse sentido, os tópicos a seguir fazem uma síntese dos fundamentos primordiais para a compreensão das variáveis analisadas, o traçado das análises e as consequentes interpretações.

3.1. FUNDAMENTOS, AQUISIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS DADOS

3.1.1. Fundamentos e características dos dados gamaespectrométricos

Existem três principais tipos de radiação provinda do decaimento radioativo, que são as radiações alfa, beta e gama ([Minty 1997](#), [Grasty et al. 1985](#)). Segundo os autores, a emissão de uma partícula alfa ou beta deixa os novos núcleos em um estado excitado, e a energia excedente é irradiada na forma de raios gama. Estes raios podem penetrar aproximadamente 30 cm na crosta terrestre e se propagar por algumas centenas de metros na atmosfera, e representam fonte importante para o sensoriamento remoto da radioatividade terrestre. Desse modo, cada fóton de radiação gama tem uma energia discreta, e esta energia é característica da fonte isotópica. Em estudos geológicos, a energia de interesse varia entre 0,2 e 3 MeV, que corresponde a comprimentos de onda entre aproximadamente 3×10^{-12} e 3×10^{-19} Hz.

As séries de decaimento do potássio, tório e urânio apresentam espectros característicos ([IAEA 2003](#)). Estes espectros são abstrações teóricas que representam a distribuição de energia dos fótons emitidos pela respectiva fonte. Cada perfil espectral mostra a energia e a intensidade relativa de emissões de raios gama na série de decaimento. Os espectrômetros modernos geralmente operam com 256 ou 512 canais de informações nas taxas de energia compreendida entre 0-3,0 MeV. Cada canal registra os raios gama absorvidos pelo detector, que têm energia de aproximadamente 11,7 keV. A abordagem convencional para a aquisição e processamento de dados gamaespectrométricos monitora quatro janelas relativamente amplas do espectro ([Figura 3-1](#)). A janela de energia do potássio (K) monitora os raios gama emitidos pelo ^{40}K a 1,46 MeV. As janelas de energia do urânio (eU) e tório (eTh) monitoram as emissões de raios gama dos produtos de decaimento na série U e Th. Essas janelas são geralmente aceitas como as mais apropriadas para a medição de K, eU e eTh. A janela de contagem total (CT) dá uma medida da radioatividade total ([Grasty e Minty 1995](#), [IAEA 2003](#)).

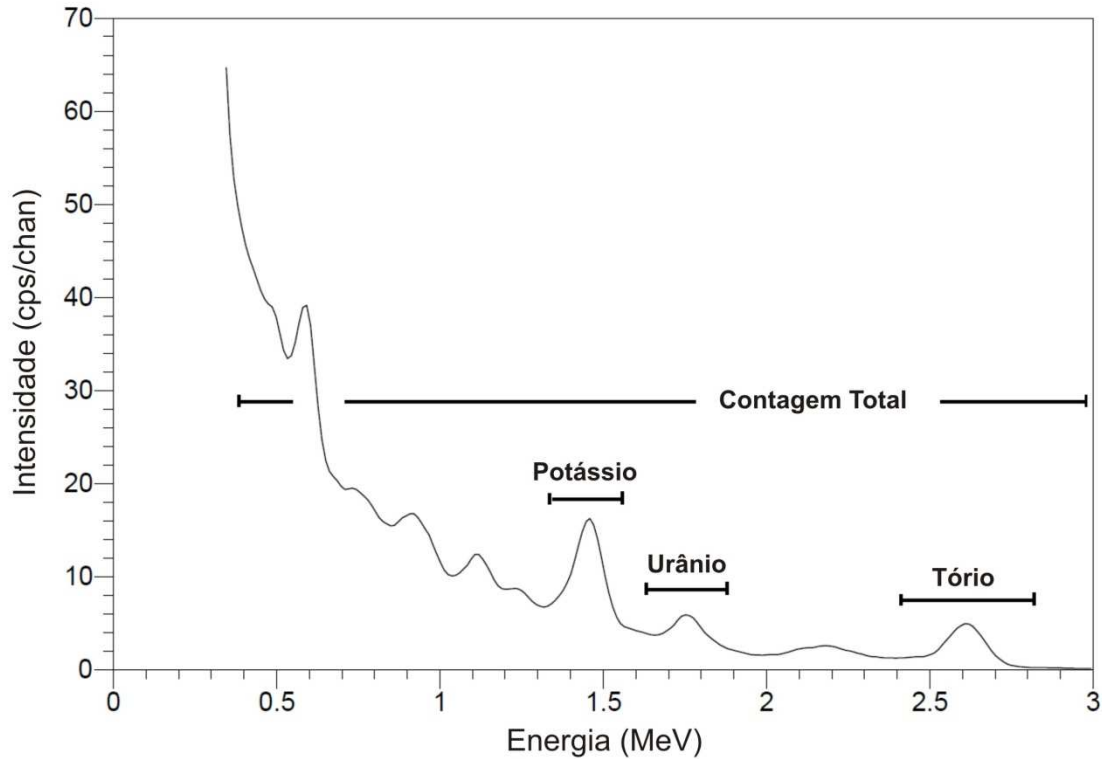


Figura 3-1. Espectro gamaespectrométrico mostrando as posições das janelas de energia correspondente ao potássio (K), urânio (eU), tório (eTh) e contagem total (CT) ([IAEA 2003](#)).

3.1.2. Fundamentos e características dos dados magnetométricos

Imagens aeromagnetométricas representam um método rápido e efetivo de mapear o campo magnético terrestre ([Horsfall 1997](#)). As anomalias no campo magnético terrestre são causadas pelos minerais magnéticos nas rochas. Desse modo, mapas e imagens dessas anomalias podem ser interpretados para fins geológicos. O magnetômetro mais comum atualmente é o magnetômetro de bombeamento ótico, baseado nos vapores de césio e hélio. Neste caso, o magnetômetro compreende uma minúscula unidade de absorção atômica, que gera um sinal proporcional à intensidade do campo magnético.

Diversas pesquisas descrevem a fundamentação teórica dos principais filtros e algoritmos utilizados no processamento dos dados aeromagnetométricos ([Nabighian 1972](#), [Blakely 1996](#), [Luyendyk 1997](#)). Uma síntese dos principais conceitos sobre os filtros e algoritmos utilizados neste trabalho será feita a seguir.

As derivadas horizontais realçam os **gradientes horizontais** (dx e dy) do campo magnético anômalo, representando possíveis fontes de anomalias ([Blakely 1996](#)). Essas derivadas funcionam como filtros “passa-altas”, que possibilitam a passagem de valores correspondentes às altas frequências. Na **derivada vertical** (dz), informações providas de comprimentos de ondas curtos são realçadas em relação aos longos, o que caracteriza, portanto, a semelhança com filtros “passa-altas”. As derivadas de 1ª ou 2ª ordem de diferenciação realçam gradientes de bordas de corpos magnéticos rasos. O **gradiente horizontal total**, em seu formato de amplitude (AGHT), auxilia na identificação de mudanças laterais abruptas das propriedades físicas no campo potencial, e tende a mostrar valores superiores aos limites de fontes causadoras de anomalias.

A **amplitude do sinal analítico** (ASA) representa uma função baseada nas derivadas horizontais e na derivada vertical do campo potencial ([Nabighian 1972](#), [1984](#), [Roest et al. 1992](#)). Esta função tem se demonstrado eficaz na determinação de parâmetros geométricos, sejam estes geológicos ou estruturais, e da profundidade de fontes magnéticas ([Gunn e Dentith 1997](#)). [Thurston e Smith \(1997\)](#) descrevem a **fase do sinal analítico (ISA)**, como a estimativa do mergulho da fonte geradora da anomalia, conseqüentemente, o contraste local de susceptibilidade, em uma extensão da teoria do sinal analítico complexo apresentada inicialmente por [Nabighian \(1972\)](#).

3.1.3. Distribuição dos radioelementos nas rochas e no solo

Os raios gama, apesar da possibilidade de detecção em centenas de metros de altura, são completamente atenuados em cerca de 50cm de rocha ou solo na superfície terrestre. Uma das implicações desta atenuação para o mapeamento das fontes naturais é que o método só é eficaz para o mapeamento de materiais superficiais. A maior parte dos raios gama emanando da superfície da terra se origina em até 30cm de profundidade. Isto significa que a interpretação desses dados requer uma compreensão de processos como o intemperismo, as relações entre os materiais superficiais e sua respectiva rocha fonte ([IAEA 2003](#)).

O potássio é relatado como um elemento muito móvel na superfície terrestre. A abundância deste elemento na crosta terrestre superior é de aproximadamente 2,33% K ([Mittlefehldt 1999](#)). Grande parte do K da crosta ocorre em alcali-feldspatos, micas e nas rochas félsicas, principalmente granitóides, que contêm cerca de 3,5% K. Rochas máficas e ultramáficas

contêm concentrações muito baixas, com teores de K variando entre 0,58-0,75%. A série dos minerais feldspáticos, os feldspatóides leucita e nefelina, e as micas biotita e muscovita, representariam em conjunto praticamente todo o potássio das rochas metamórficas e magmáticas. Alguns anfibólios podem conter até mais de 1% K. A [Tabela 3-1](#) lista os minerais mais comuns nos quais o potássio é um componente essencial e alguns outros minerais comuns em alterações potássicas.

Tabela 3-1. Minerais em que K é um componente essencial, juntamente com outros minerais portadores de K.

([Mittlefehldt 1999](#), [IAEA 2003](#)).

Minerais de potássio	Fórmula Química	%K
Minerais silicáticos formadores de rochas		
Feldspatos	$(K,Na)AlSi_3O_8;(Na_x,Ca_{1-x})Al_{2-x}Si_{2+x}O_8(x=0-1)$	
Feldspatos alcalinos	$(K,Na)AlSi_3O_8$	13
Microclina	$KAlSi_3O_8$	13
Ortoclásio	$KAlSi_3O_8$	13
Sanidina	$KAlSi_3O_8$	13
Leucita	$KAlSi_2O_6$	17
Nefelina	$(K,Na)AlSi_2O_4$	23
Biotita	$K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$	8
Muscovita	$KAl_2Si_3O_{10}(OH)_2$	8
Flogopita	$KMg_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$	8
Hornblenda	$(K,Na)_{0-1}(Na,Ca)_2(Fe,Mn,Mg,Ti,Al)_5(Si,Al)_8O_{22}(OH,F)_2$	1
Outros minerais potássicos		
Alunita	$KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$	
Glauconita	$(K,Ca,Na)_{<1}(Al,Fe^{3+},Fe^{2+},Mg)_2[(OH)_2/Al_{0,35}Si_{3,65}O_{10}]$	
Silvita	KCl	

Quanto ao elemento equivalente de tório (eTh), sua abundância na crosta terrestre seria relativamente baixa, com teores normalmente variando entre ppb e ppm com média de cerca de 12 ppm ([Dickson e Scott 1997](#)). O elemento Th é, para esses autores, constituinte de minerais acessórios como zircão, monazita, allanita, xenotima, apatita e titanita. Na [Tabela 3-2](#) estão listados os principais minerais cuja constituição contém o elemento Th. O Th é relatado como o pai de uma série de decaimento onde os raios gama mais energéticos (2,62 MeV) são emitidos pelo isótopo filho ^{208}Tl . Em geral, cerca de 60 anos seriam necessários para estabelecer o equilíbrio radioativo na série do Th. Isso faz da radiação gama uma técnica eficaz para medidas da concentração do elemento. [Krishnaswami \(1999\)](#) relata que o fracionamento químico entre os membros das séries do U e do Th ocorre durante processos magmáticos. Isso resultaria no desequilíbrio radioativo entre ^{238}U e ^{230}Th , ^{226}Ra e ^{230}Th , e na série de decaimento do ^{238}U em rochas vulcânicas.

Tabela 3-2. Minerais acessórios que contém Th, juntamente com outros minerais que têm Th como um dos principais constituintes ([Mittlefehldt 1999](#), [IAEA 2003](#)).

Minerais de tório	Fórmula Química	%ThO ₂
Minerais com Th como constituinte maior		
Huttonita	ThSiO ₄	80
Torita, Uranotorita	ThSiO ₄ , (Th,U)SiO ₄	50,<50
Cheralita	(Th,Ce,Ca)(SiO ₄ PO ₄)	30
Torianita, Uranotorianita	ThO ₂ ,(Th,U)O ₂	80, <80
Minerais acessórios comuns		
Monazita	(REE,Th)PO ₄	0,4-1
Xenotima	YPO ₄	0,01-1
Zircão	ZrSiO ₄	0,01-1
Allanita	(Ca,Al,Fe,Mg) silicato	0,1-1
Apatita	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,Cl,OH)	0,001-0,1
Titanita	CaTiSiO ₅	0,001-0,1
Epidoto	CaFe ³⁺ Al ₂ O.OH(Si ₂ O ₇)(Si ₂ O ₄)	0,005-0,05

[Bea \(1999\)](#) descreve o urânio como um metal reativo, cuja abundância média na crosta terrestre é de aproximadamente 3ppm. Segundo o autor, este elemento teria valência em rochas ígneas com propriedades cristaloquímicas próximas ao Th e aos Elementos Terras Raras (ETR), o que explicaria a geoquímica coerente entre U, Th e ETR em rochas ígneas. Essa coerência seria perdida em condições hidrotermais e ambientes supergênicos, onde o urânio é total ou parcialmente oxidado para U⁶⁺, que forma complexos solúveis com os ânions CO₃²⁻, SO₄²⁻ e PO₃ ([Langmuir e Hermans 1980](#)). Os minerais mais abundantes de urânio estão listados na [Tabela 3-3](#). A uraninita seria comum tanto em inclusões no interior dos minerais formadores de rochas graníticas, quanto na forma de grãos desenvolvidos em granitos e pegmatitos mineralizados. Pode ocorrer também em veios hidrotermais e rochas sedimentares. Os minerais acessórios zircão, monazita, apatita, alanita e titanita são comuns em rochas ígneas e metamórficas, sendo que o zircão e a monazita são os mais resistentes ao intemperismo. Devido ao U se tornar móvel em condições supergênicas, uma grande variedade de minerais de U⁶⁺ podem se formar. Isso explicaria a grande variedade de minerais encontrados em depósitos de urânio, incluindo os silicatos, fosfatos, carbonatos, sulfatos, vanadatos, molibdatos, niobatos, tantalatos e titanatos ([Bea 1999](#)).

Tabela 3-3. Minerais mais abundantes de U (IAEA 2003).

Minerais de urânio	Fórmula Química	%UO₂/ppmU
Minerais com U como constituinte maior		
Uraninita, (Pitchblenda)	UO ₂	
Betafita	(U,Ca)(Nb,Ta,Ti) ₃ O ₉ .nH ₂ O	
Huttonita	ThSiO ₄	100-20000 ppm
Uranosferita	(BiO)(UO ₂)(OH) ₃	
Torita, Uranotorita	ThSiO ₄ , (Th,U)SiO ₄	1-35%
Torianita, Uranotorianita	ThO ₂ ,(Th,U)O ₂	5%
Minerais acessórios comuns		
Zircão	ZrSiO ₄	5%
Xenotima	YPO ₄	5%
Monazita	(REE,Th)PO ₄	100-20000 ppm
Allanita	(Ca,Al,Fe,Mg) silicato	10-2000 ppm
Apatita	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,Cl,OH)	5-200 ppm
Titanita	CaTiSiO ₅	10-500 ppm

Tabela 3-4. Concentração dos radioelementos em diferentes tipos de rochas (Killen 1979, IAEA 2003).

Tipo de Rocha	Potássio (%)		Urânio (ppm)		Tório (ppm)	
	<i>Média</i>	<i>Variação</i>	<i>Média</i>	<i>Variação</i>	<i>Média</i>	<i>Variação</i>
Ácidas Extrusivas	3,1	1,0 - 6,2	4,1	0,8 - 16,4	11,9	1,1 - 41,0
Ácidas Intrusivas	3,4	0,1 - 7,6	4,5	0,1 - 30,0	25,7	0,1 - 253,1
Intermediárias Extrusivas	1,1	0,01 - 2,5	1,1	0,2 - 2,6	2,4	0,4 - 6,4
Intermediárias Intrusivas	2,1	0,1 - 6,2	3,2	0,1 - 23,4	12,2	0,4 - 106,0
Básicas Extrusivas	0,7	0,06 - 2,4	0,8	0,03 - 3,3	2,2	0,05 - 8,8
Básicas Intrusivas	0,8	0,01 - 2,6	0,8	0,01 - 5,7	2,3	0,03 - 15,0
Ultrabásicas	0,3	0 - 0,8	0,3	0 - 1,6	1,4	0 - 7,5
Alcali-feldspatoidal Intermediária	6,5	2,0 - 9,0	29,7	1,9 - 62,0	133,9	9,5 - 265,0
Extrusivas						
Alcali-feldspatoidal Intermediária	4,2	1,0 - 9,9	55,8	0,3 - 720,0	132,6	0,4 - 880,0
Intrusivas						
Alcali-feldspatoidal Básica	1,9	0,2 - 6,9	2,4	0,5 - 12,0	8,2	2,1 - 60,0
Extrusivas						
Alcali-feldspatoidal Básica	1,8	0,3 - 4,8	2,3	0,4 - 5,4	8,4	2,8 - 19,6
Intrusiva						
Rochas Sedimentares Químicas	0,6	0,02 - 8,4	3,6	0,03 - 26,7	14,9	0,03 - 132,0
Carbonatos	0,3	0,01 - 3,5	2,0	0,03 - 18,0	1,3	0,03 - 10,8
Rochas Sedimentares Detriticas	1,5	0,01 - 9,7	4,8	0,01 - 80,0	12,4	0,2 - 362,0
Rochas Ígneas Metamorfisadas	2,1	0,01 - 5,3	3,0	0,1 - 53,4	12,0	0,1 - 91,4
Rochas Sedimentares Metamorfisadas						

3.1.4. Aquisição e características dos dados do Projeto Aerogeofísico Anapu-Tuerê

O Projeto Aerogeofísico Anapu-Tuerê foi realizado a partir do “Programa Geologia do Brasil” (PGB), desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM. A aquisição dos dados foi feita entre 10/08 e 20/10/2004 pela empresa LASA Engenharia e Prospecções S/A. O levantamento abrangeu uma área de aproximadamente 24.735km², recoberta por 53.331 km de perfis aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos. Estes perfis foram dispostos em 310

linhas de produção, sobrevoadas na direção N-S, com espaçamento de 0,5 km, além de 30 linhas de controle, sobrevoadas na direção E-W, com espaçamento de 10 km entre as linhas.

Os parâmetros que nortearam a execução do levantamento são descritos, resumidamente, na [Tabela 3-5](#).

Tabela 3-5. Características do aerolevanteamento geofísico Anapu-Tuerê.

AEROLEVANTAMENTO GEOFÍSICO ANAPU-TUERÊ (CPRM-2004)	
Direção das linhas de produção	N-S
Espaçamento entre as linhas de produção	0,5 km
Direção das linhas de controle	E-W
Espaçamento entre as linhas de controle	10,0 km
Intervalo entre medições geofísicas consecutivas	0,1s (magnetômetro);
	1,0 s (espectrômetro)
Altura média de voo	100 m
Velocidade aproximada de voo	260 km/h

3.2. PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS

A base de dados utilizada gerada originalmente pela empresa LASA Engenharia e Prospecções, que executou o aerolevanteamento em 2004, foi cedida no formato XYZ. Em seguida, os dados foram convertidos para o formato do banco de dados Geosoft (*GDB), onde foram, subsequentemente, realizadas as fases de processamento descritas a seguir.

3.2.1. Pré-processamento

Os dados magnetométricos foram convertidos em dados do campo magnético anômalo, ou campo magnético total corrigido pela remoção da influência do “*International/Definitive Geomagnetic Reference Field*” (IGRF/DGRF). Em seguida, foram removidos os erros causados pelo nivelamento das malhas originais. Posteriormente, aplicou-se a técnica “diferença quarta” ([Naudy e Dreyer 1968](#)) para eliminar pseudo-anomalias nos dados magnetométricos na amostragem ao longo das linhas de voo.

Os dados gamaespectrométricos foram processados a partir de canais de energia dentro do espectro da energia total, ou contagem total (CT), expresso em mR/h. O canal de potássio (K) foi expresso em percentagem; já os canais de urânio (*e*U) e tório (*e*Th) foram expressos em partes

por milhão (ppm). A base de dados foi corrigida conforme [Minty \(1997\)](#), por “*dead-time*”; variações de energia ou estabilização espectral dos respectivos níveis de referência de radiação; variações de altitude relativas ao valor nominal para o projeto; e pelo espalhamento devido ao efeito Compton. As razões eU/eTh , eU/K e eTh/K foram calculadas após as correções.

3.2.2. Interpolação em células regulares

Os dados aerogeofísicos foram interpolados para gerar malhas regulares. O método da mínima curvatura ([Briggs 1974](#)) foi aplicado aos dados gamaespectrométricos, e o método “*bi-directional gridding*” utilizando “*Akima spline*” ([Akima 1978a](#), [1978b](#)) foi aplicado aos dados magnetométricos. Tanto os dados magnetométricos quanto os gamaespectrométricos foram interpolados em células com 125 metros de comprimento, o que corresponde a um quarto do espaçamento original entre as linhas de vôo.

3.2.3. Produtos aerogeofísicos para interpretação

A partir dos dados magnetométricos processados foram geradas as seguintes imagens, apresentadas de forma sintética na [Figura 3-2](#): (A) Campo Magnético Anômalo (CMA); Derivada Vertical (DV) do CMA em ordens de diferenciação (B) 0,75, (C) 1,00 e (D) 1,25; (4) Gradiente Horizontal nas direções (E) x e (F) y ; (G) Amplitude do Gradiente Horizontal Total (AGHT) do CMA; (H) Amplitude do Sinal Analítico (ASA) do CMA; (I) Inclinação do Sinal Analítico (ISA) do CMA; e (J) distribuição ternária das diferentes ordens de diferenciação das DV's R(0,75)-G(1,00)-B(1,25).

O processamento dos dados gamaespectrométricos, por sua vez, gerou os seguintes produtos destacados na [Figura 3-3](#): (A) taxa de exposição do canal de Contagem Total (CT) ($\mu R/h$); (B) concentração de Potássio (%); (C) concentração de Urânio (ppm); (D) concentração de Tório (ppm); (E) razão Urânio/Tório; (F) razão Urânio/Potássio; (G) razão Tório/Potássio; (H) composição ternária R(K)-G(eTh)-B(eU); e (I) composição ternária C(K)-M(eTh)-Y(eU).



Figura 3-2. Imagens aerogeofísicas produzidas a partir do processamento dos dados magnetométricos do Projeto Aerogeofísico Anapu-Tuerê.

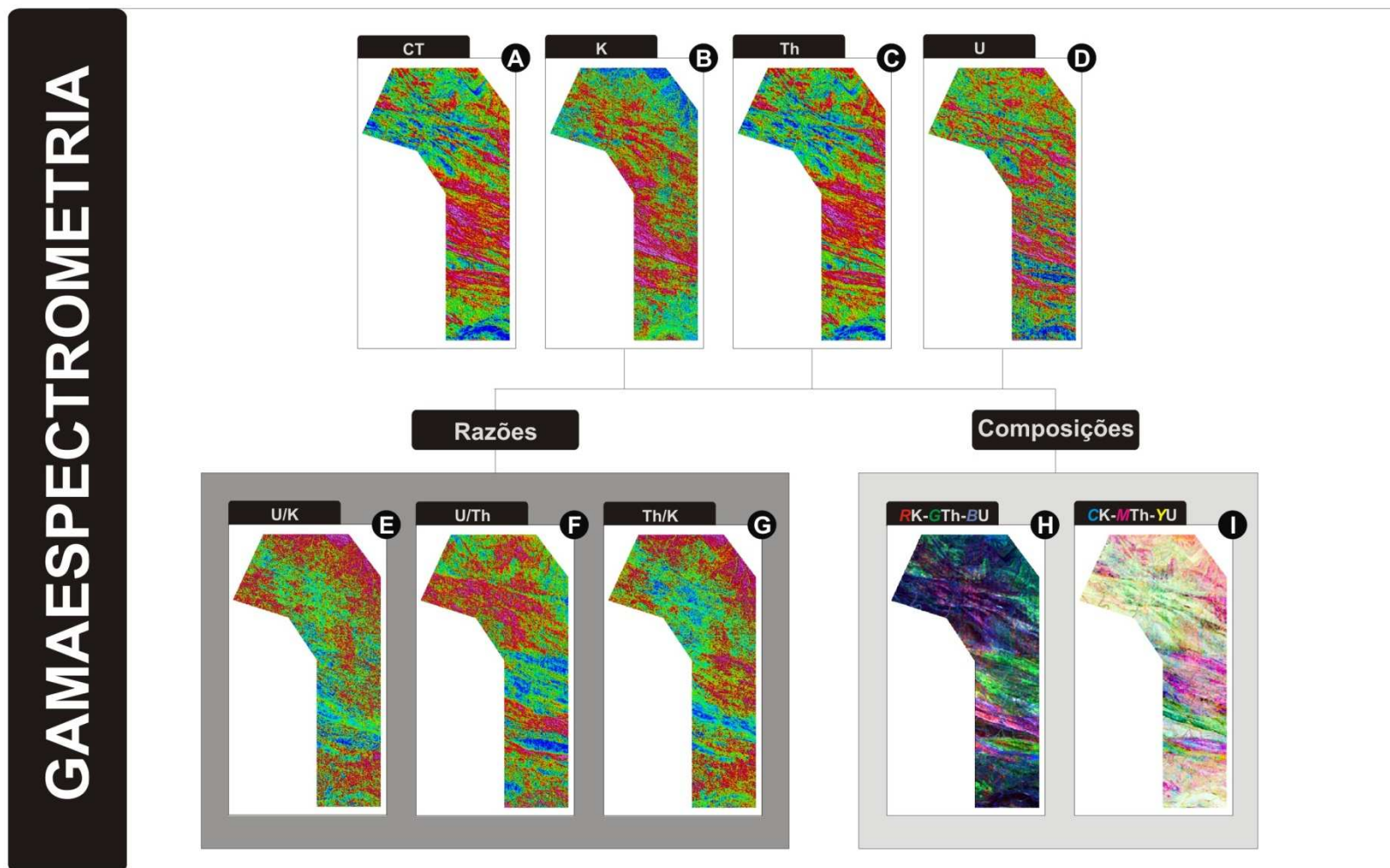


Figura 3-3. Imagens aerogeofísicas produzidas a partir do processamento dos dados gamaespectrométricos do Projeto Aerogeofísico Anapu-Tuerê.

3.3. INTERPRETAÇÃO VISUAL DAS IMAGENS AEROGEOFÍSICAS

Na fase de interpretação das imagens, utilizou-se o método lógico e sistemático de [Soares e Fiori \(1976\)](#), com as adaptações propostas por [Veneziani e Anjos \(1982\)](#). O método, originalmente, destinava-se à interpretação geológica de fotografias aéreas, tendo esta adaptação contemplado as características de imagens de sensoriamento remoto e aerogeofísica. O método abrange as etapas de fotoleitura, fotoanálise e fointerpretação. A *fotoleitura* consiste no reconhecimento e identificação dos elementos morfológicos e estruturais das imagens com as feições geológicas correspondentes, bem como sua classificação. Na *fotoanálise*, são realizadas as relações entre as imagens, bem como a associação e ordenação de elementos homólogos. A *fointerpretação* envolve a descoberta e avaliação, por métodos indutivos, dedutivos e comparativos, do significado, função e relação dos elementos extraídos das imagens.

A classificação visual envolve o agrupamento de características texturais e tonais de elementos interpretados pelo usuário nas imagens em regiões homólogas. Ela é utilizada como ferramenta de demarcação de zonas com isovalores ou características similares.

3.3.1. Lineamentos delineados a partir dos dados magnetométricos

A interpretação de feições estruturais a partir dos dados magnetométricos baseou-se nos lineamentos realçados pelo gradiente magnético. O traçado visual dos lineamentos foi feito a partir da distribuição ternária das diferentes ordens de diferenciação das DV's na composição ternária R0.75, G1.00, B1.25 ([Figura 3-4\(A\)](#)).

Esses lineamentos ([Figura 3-4\(B\)](#)) são relacionados a possíveis traços de fraturas e/ou falhas, situados em superfície ou sub-superfície, decorrentes de eventos de deformação progressiva e heterogênea. Considerando a natureza dessas feições, foram identificados dois grandes grupos de lineamentos:

- (1) Grupo de natureza dúctil a dúctil-rúptil, contínuo ou descontínuo, regular, espaçado e concentrado principalmente nas regiões sul e norte da área do aerolevante geofísico. Correspondem a traços de estruturas planares tectógenas ou secundárias, e não-tectógenas ou primárias. Na área, este grupo de lineamentos possui uma direção preferencial E-W, localmente com inflexão para WNW-ESE.

- (2) Grupo de natureza rúptil a rúptil-dúctil, descontínuo, irregular, disperso por toda a área do aerolevantamento geofísico. Correspondem a cristas e vales magnéticos, que podem estar relacionados a traços de falhas e/ou fraturas. Na área foram caracterizadas cinco direções preferenciais deste grupo de lineamentos (E-W; WNW-ESE; NNE-SSW; NW-SE e N-S).

3.3.2. Unidades litogeofísicas obtidas a partir dos dados gamaespectrométricos

A partir da composição ternária R(K)-G(eTh)-B(eU) ([Figura 3-5\(A\)](#)) tornou-se possível a discriminação de quinze domínios gamaespectrométricos, denominados “unidades litogeofísicas” ([Figura 3-5\(B\)](#)). As unidades apresentam diferentes combinações de teores dos elementos gamaespectrométricos, conforme apresentado na [Tabela 3-6](#). Vale ressaltar que esses domínios podem estar relacionados a unidades litológicas já descritas e cartografadas em cartas geológicas pré-existent, ou mesmo representar variações faciológicas e composicionais ainda não descritas dentro de uma mesma unidade.

Tabela 3-6. Estimativa dos teores gamaespectrométricos para as classes discriminadas a partir da análise visual.

Canais Gamaespectrométricos	Classes de Teores		
	(Baixo)	(Médio)	(Alto)
Potássio (K) - %	< 0,23	0,23 – 1,25	> 1,25
Tório (Th) – ppm	< 3,5	3,5 – 16	> 16
Urânio (U) – ppm	< 0,9	0,9 – 2,5	> 2,5

A [Figura 3-6\(A\)](#) apresenta, para efeito de comparação, uma imagem com a integração de dos dois produtos RGB ([Figuras 3-4\(A\)](#) e [3-5\(A\)](#)) em uma única imagem. Na [Figura 3-6\(B\)](#) são mostrados os resultados das [Figuras 3-4\(B\)](#) e [3-5\(B\)](#) integrados.

A partir da [Figura 3-6\(C\)](#), pode-se observar a comparação entre as unidades litogeofísicas geradas a partir dos dados gamaespectrométricos, adicionadas às estruturas adquiridas a partir dos dados magnetométricos e o mapa geológico da parte central do Domínio Bacajá ([Vasquez et al. 2008c](#)) destacando a região do aerolevantamento Anapu-Tuerê.

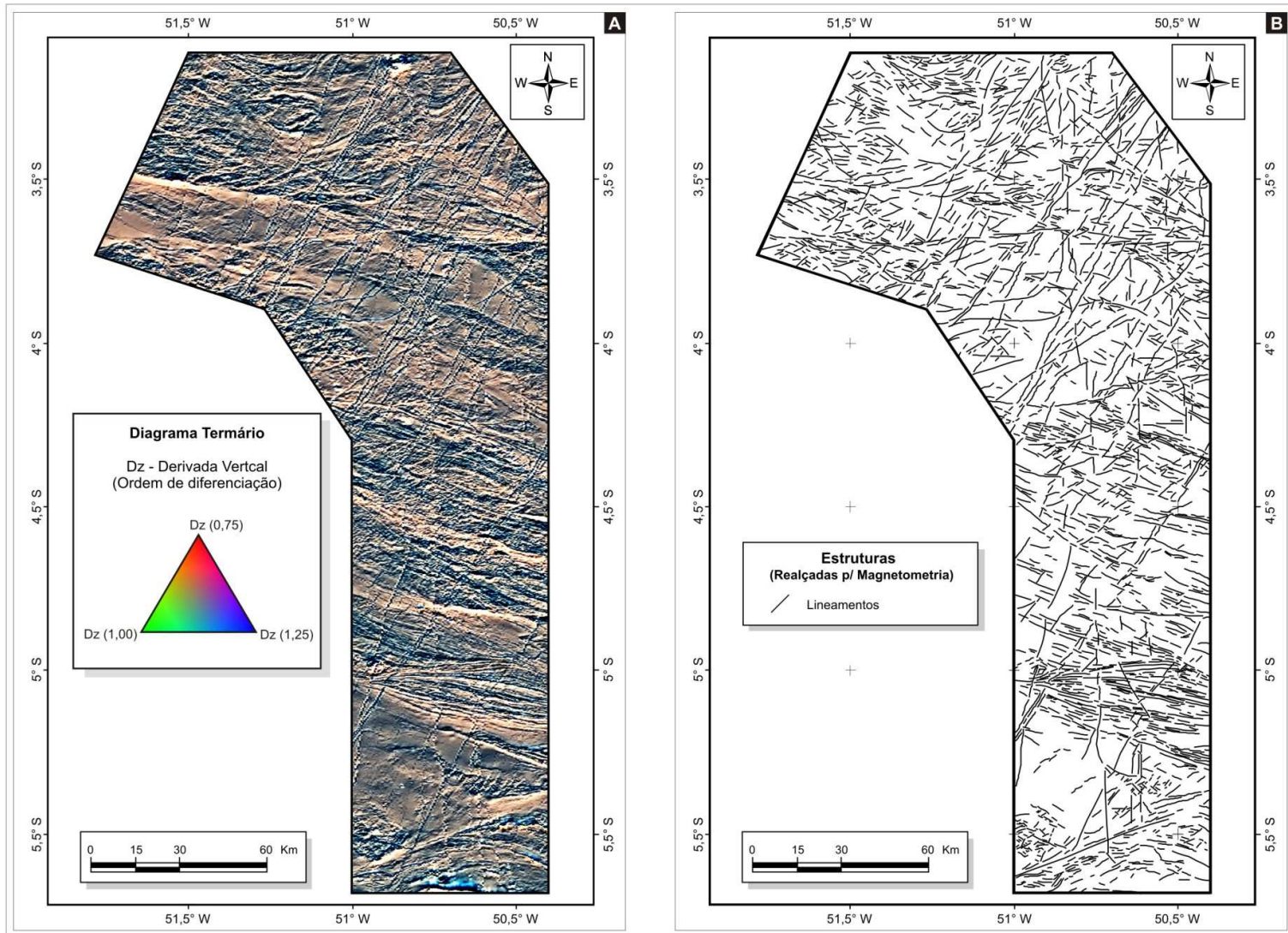


Figura 3-4. (A) Composição ternária R(Dz0,75)-G(Dz1,00)-B(Dz1,25) de magnetometria; (B) Lineamentos realçados a partir dos dados magnetométricos.

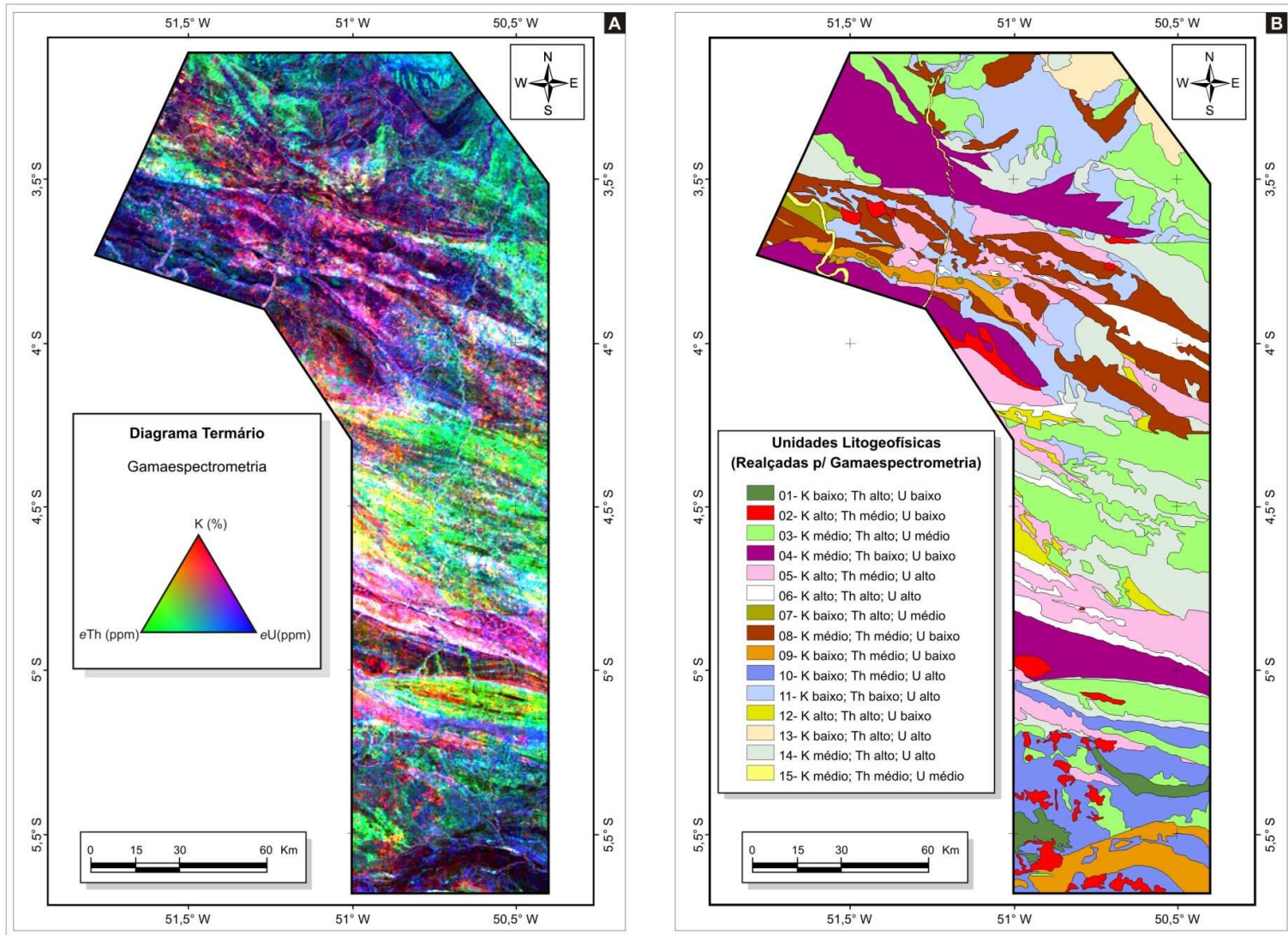


Figura 3-5. (A) Imagem ternária R(K)-G(eTh)-B(eU) de gamaespectrometria; (B) Unidades litogeofísicas interpretadas a partir dos dados gamaespectrométricos.

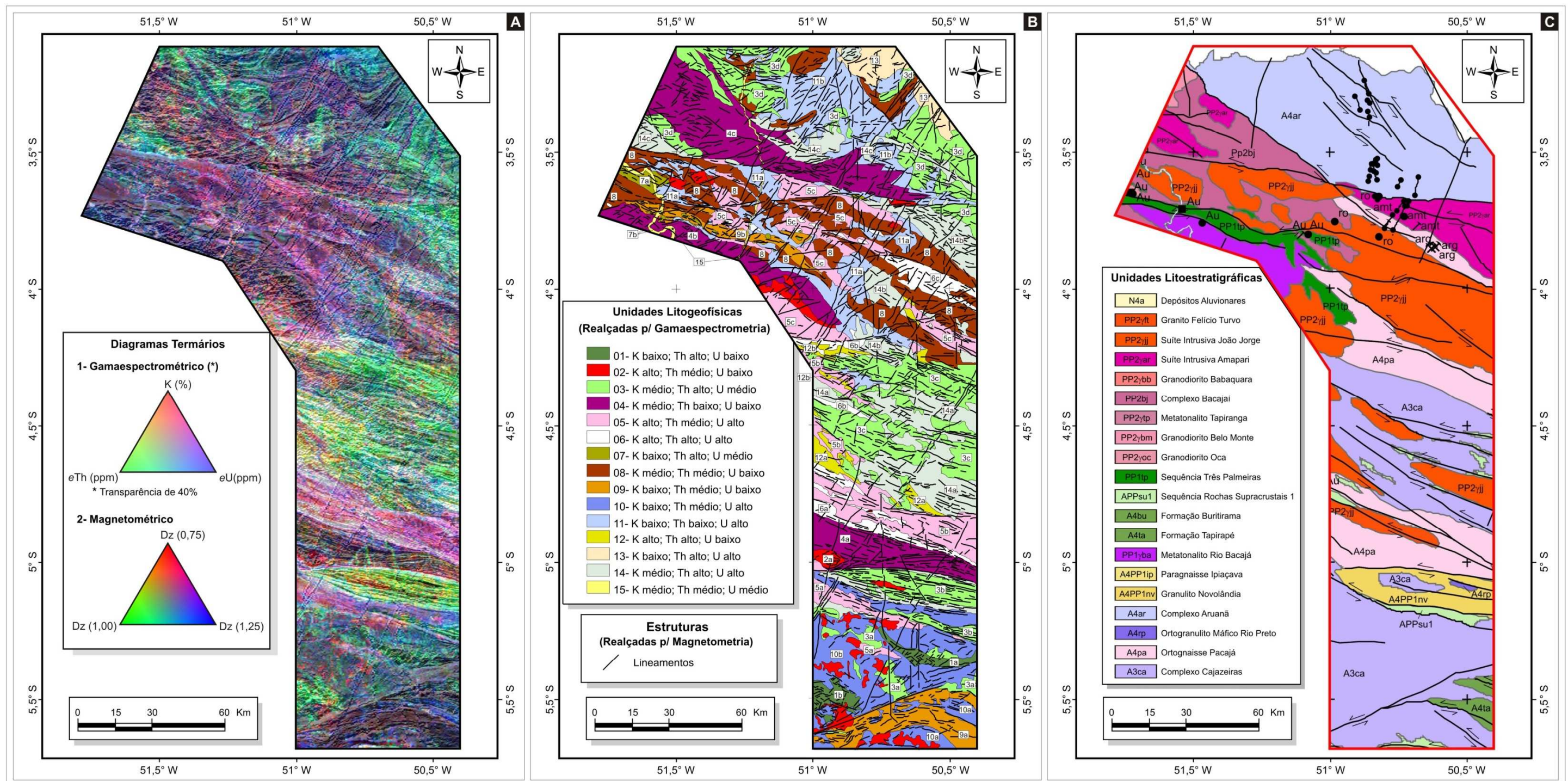


Figura 3-6. (A) Composição ternária R(K)-G(eTh)-B(eU) de gamaespectrometria, com transparência de 40%, sobreposta à composição ternária R(Dz0,75)-G(Dz1,00)-B(Dz1,25) de magnetometria; (B) Unidades litogeofísicas interpretadas a partir dos dados gamaespectrométricos, adicionadas às estruturas adquiridas a partir dos dados de magnetometria; (C) Mapa geológico da parte central do Domínio Bacajá com destaque para a região do aerolevante Anapu-Tuerê (Vasquez e Rosa-Costa 2008).

3.3.3. Análises visuais e interpretações dos domínios litogeofísicos

3.3.3.1. Domínio 1

Na região sul do polígono do levantamento aerogeofísico foi demarcado domínio caracterizado por altos teores de eTh que contrastam com os baixos teores de eU e K . Este domínio é composto por dois blocos (1a e 1b) com bordas irregulares, sem orientação preferencial. Ambos estão em contato como Domínio 11, de forma discordante. Quando observado em relação à magnetometria, esse domínio apresenta elevados gradientes na imagem da ASA. Em termos da cartografia geológica regional, ele estaria relacionado ao contexto espacial do Complexo Cajazeiras.

3.3.3.1. Domínio 2

Algumas feições com tendências arredondadas, localizadas de modo disperso principalmente na região sul da área, foram agrupadas no Domínio 2. Em relação às características gamaespectrométricas, ele é composto por altos teores de K , teores médios de eTh e baixos de eU . Quanto à magnetometria, o domínio apresenta uma variação entre médios e altos gradientes de ASA, dependendo da região onde está localizado.

Uma feição proeminente deste domínio (2a) está localizada na parte sudoeste da imagem, em contato direto e discordante com os domínios 4 e 3, na região limítrofe entre estes dois domínios. Essa feição apresenta características geométricas e cartográficas ainda não descritas nos mapas existentes. O aspecto anelar observado na composição colorida de derivadas verticais é sugestivo de rochas graníticas. No entanto, alto gradiente magnético alcançando picos de aproximadamente 15,69 nT/m não é comum em rochas graníticas. Pelo fato do corpo não estar inserido na região onde foi realizado o mapeamento de campo, convém aqui discutir a possível constituição para estas rochas. Uma possibilidade pertinente seria relacioná-las a corpos charnockíticos, o que seria compatível com as descrições relatadas por [Vasquez et al. \(2008c\)](#) no contexto geológico do Complexo Cajazeiras. A relação de discordância sugere que esta feição seja tardia em relação aos demais domínios. Uma tênue ou fraca orientação da disposição desses

corpos, observada na gamaespectrometria, permite sugerir que essas feições estejam associadas aos charnockitos sin ou tardi a pós-colisionais.

3.3.3.3. Domínio 3

No contexto do Domínio 3 aparecem feições em regiões distintas da área. Em relação à variação dos teores gamaespectrométricos, o domínio apresenta como característica comum médios teores de K, altos teores de eTh e médios teores de eU .

As feições localizadas mais a sul apresentam formas variadas (3a). Ainda na região sul, uma feição alongada com formato elíptico (3b) apresenta em seu interior lineamentos descontínuos, orientados segundo WNW-ESE, destacados pelo gradiente ASA. Essa feição está em contato direto com o Domínio 4 ao norte, e com o Domínio 14 ao sul. Em seu interior, há um fragmento alongado na mesma direção dos lineamentos, relacionado ao Domínio 2. Outras feições com as mesmas características gamaespectrométricas são observadas na região central da área do aerolevante (3c). Estas feições parecem estar dispostas como fragmentos cujas bordas se encaixam formando um segmento disposto em uma direção preferencial NW-SE. Mais ao norte da área, aparecem feições com características gamaespectrométricas similares, formando blocos disformes (3d), sem obedecer a uma orientação preferencial. Quando comparadas aos domínios cartografados, as feições 3a, 3c e 3d apresentam relações espaciais com os complexos metamórficos Cajazeiras e Aruanã. Já a feição 3b, fortemente orientada, possui relação evidente com o Granulito Novolândia.

3.3.3.4. Domínio 4

Três grandes blocos com similaridades gamaespectrométricas representada por médios teores de K e eTh contrastando com baixos teores de eU compõem a assinatura gamaespectrométrica do Domínio 4.

O primeiro destes blocos, localizado mais ao sul, está disposto segundo uma orientação WNW-ESSE (4a). Em sua borda sul apresenta forma côncava e está em contato direto com o Domínio 3, enquanto que em sua borda norte está em contato retilíneo e abrupto com o Domínio 6. Em relação à magnetometria, o bloco apresenta gradiente magnético ASA com médios valores.

Essas assinaturas são compatíveis com as descrições dos ortognaisses predominantemente tonalíticos que compõem o Ortognaisse Pacajá.

Um segundo bloco com assinaturas similares (4b), contendo baixos a médios teores gamaespectrométricos, está localizado ao sul da Serra das Três Palmeiras, na região noroeste do polígono correspondente ao aerolevante geofísico. Esse bloco apresenta forma irregular alongada, disposto igualmente segundo WNW-ESE, com bordas arredondadas e uma leve inflexão para NW-SE em sua terminação sudeste. Está em contato em sua borda sudeste com porções do Domínio 2 e, ao norte, com os domínios 9 e 11. Tal bloco é relacionado neste trabalho aos tonalitos metamorfisados que compõem o Metatonalito Rio Bacajá.

O terceiro e último bloco (4c) do Domínio 4 está localizado na região norte do área. Está orientado segundo a direção NW-SE em sua porção mais oeste, mostra uma disposição E-W na região central e converge para NE em sua porção leste. Apresenta contato descontínuo a sul com os domínios 3, 5 e 11 e a norte com os domínios 3, 11 e 14. Quanto às relações com as unidades litoestratigráficas, sugere-se que o bloco esteja relacionado às rochas charnockíticas e charnoenderbiticas do Complexo Bacajaí. Essa relação se dá principalmente pela correspondência espacial em mapa e pelos médios a altos teores de K associados a assinaturas altas do gradiente magnético mostrado a partir da ASA. Vale ressaltar que o contato sul deste bloco demonstra discordância abrupta de aproximadamente 150 km de extensão, cujo contraste entre as assinaturas gamaespectrométricas e magnetométricas é evidente. Essas informações sugerem que a(s) unidade(s) litoestratigráfica(s) situada(s) ao sul do bloco não demonstra(m) correspondência com as rochas deste bloco, devendo ser tratada(s) como unidade(s) à parte.

3.3.3.5. Domínio 5

Diversos blocos atribuídos a este domínio, com características gamaespectrométricas similares entre si, abrangem a área de forma dispersa e estão dispostos segundo WNW-ESE. A assinatura gamaespectrométrica destes domínios evidencia altos teores de K e eU , combinados com médios teores de eTh . A expressão magnetométrica se dá por baixo gradiente observado na imagem de ASA.

Os blocos mais ao sul (5a) estão em contato, sobretudo, com o Domínio 10 e com outros fragmentos dos domínios 2 e 14. Ainda na região sul da área, uma faixa maior (5b) com

espessura aproximada de 20 km se estende obedecendo a orientação preferencial do domínio. Esta faixa possui contato transicional a sul com o Domínio 6 e, ao norte, contato transicional com o Domínio 12 e abrupto com os domínios 3 e 14. A variação tonal interna no fragmento sugere alternância entre as abundâncias dos elementos gamaespectrométricos, ora mais abundantes em K, ora com altos teores de K e eU. Esta alternância é sugestiva de variações composicionais correlacionáveis a bandamento metamórfico. Outros fragmentos do Domínio 5 são observados na região centro-norte (5c). Esses fragmentos apresentam bordas predominantemente irregulares e estão dispostos segundo a direção principal do domínio ou na direção NW-SE, sendo esta última predominante na região centro-oeste da área.

A correlação mais evidente deste domínio na região centro-sul seria com os migmatitos e ortognaisses graníticos do Ortognaisse Pacajá. No entanto, na região central e centro-norte, esse domínio está associado a outra unidade litoestratigráfica, que é a Suíte Intrusiva João Jorge.

3.3.3.6. Domínio 6

As exposições deste domínio ocorrem principalmente nas regiões centro-sul e centro-norte da área. São representados por fragmentos com bordas irregulares dispostos segundo a orientação regional WNW-ESE. Esses fragmentos são constituídos por altos teores de K, eTh e eU. O fragmento mais a sul (6a) apresenta contato retilíneo abrupto com o Domínio 4 em sua borda sul. Já em sua borda norte, a transição com o Domínio 5 também é abrupta, porém, caracterizada por feições irregulares curvilíneas. Essa transição entre os domínios 5 e 6 tanto no fragmento maior quanto nos fragmentos menores localizados nas proximidades sugere um amoldamento entre os blocos destes domínios. Conforme as características gamaespectrométricas e comparações com as unidades já mapeadas e descritas, o fragmento ora relatado estaria relacionado à Suíte Intrusiva João Jorge, mais especificamente ao Granito Felício Turvo.

Dois blocos com assinaturas gamaespectrométricas do Domínio 6 (6b) estão localizados na região centro-oeste da área. O bloco mais ao sul está disposto segundo WNW-ESE, enquanto que o bloco mais a norte está orientado segundo a direção E-W. O primeiro deles, mais ao sul, está em contato transicional com os domínios 3 e 14, enquanto que o segundo, ao norte, está em contato transicional a sul com a unidade 12 e contato abrupto retilíneo ao norte com o Domínio 5. Este último contato está delimitado por lineamentos interpretados a partir dos dados de

magnetometria, com direção E-W que infletem a leste para NE. Em ambos os casos, a relação principal é com a Suíte Intrusiva João Jorge.

Outro bloco contido no Domínio 6 (6c) está localizado na região centro-leste da área. O bloco apresenta formato elíptico, com dimensões aproximadas de 40 x 15 Km, orientado segundo WNW-ESE. Os contatos a norte e a sul ocorrem com o Domínio 8 de forma abrupta. Ao norte, esse contato é retilíneo seguindo a orientação preferencial da unidade. Já ao sul o contato é sinuoso, com bordas irregulares. Um fragmento do Domínio 8 está situado no interior deste bloco. O fragmento apresenta contato abrupto, com direção também WNW-ESE. A extremidade NW do bloco pertencente ao Domínio 6 é transicional e parece ter continuidade por dezenas de quilômetros, formando pequenos fragmentos com transições graduais ao Domínio 5. As características espaciais e gamaespectrométricas deste bloco sugerem uma relação com a Suíte Intrusiva João Jorge, em suas regiões mais potássicas.

3.3.3.7. Domínio 7

Na região oeste da área são observados blocos com características similares em gamaespectrometria. A assinatura espectral desses blocos mostra teores baixos de K, altos de eTh e médio de eU .

O bloco mais a oeste (7a) apresenta formato semi-elíptico, com cerca de 20 km de extensão em seu eixo maior. O contato abrupto deste bloco é retilíneo em sua borda sul com o Domínio 8 e curvilíneo na borda norte com os domínios 8, 11 e 15. A disposição WNW-ESE do bloco demonstra uma concordância com a trama regional.

Outros blocos menores (7b) são observados na região centro-oeste, principalmente no interior do Domínio 9. Esses blocos apresentam formatos variáveis, ora discordantes com as unidades, ora arredondados seguindo a orientação do Domínio 9. Outro fragmento menor está localizado na região centro-norte, com orientação E-W em contato com os domínios 5 e 11.

O bloco 7a é descrito em mapas geológicos pretéritos como parte integrante da Suíte Granítica João Jorge. No entanto, os baixos teores de K deste domínio sugerem que estes blocos podem representar outras rochas de natureza diferente das graníticas. A sugestão mais provável é

de que os blocos do domínio representem concreções lateríticas. O formato dos corpos e a assinatura gamaespectrométrica do Domínio 7 corroboram essa sugestão.

3.3.3.8. Domínio 8

As exposições deste domínio estão localizadas em uma faixa extensa na região centro-norte da área. Esta faixa está orientada segundo a direção WNW-ESE e apresenta forma elíptica. Em seu interior, blocos com dimensões variadas compõem essa trama sob a forma de fragmentos elípticos cujas bordas parecem se encaixar. Em termos dos constituintes gamaespectrométricos, o Domínio 8 apresenta teores médios de K e eTh além de baixos teores de eU . Os contatos mais comuns do Domínio 8 são com os domínios 5, 6 e 11. Subordinariamente são observados também contatos com os domínios 3, 7, 8, 10 e 14. Este domínio se caracteriza também por mostrar poucos lineamentos nos dados magnetométricos.

A relação sugerida neste trabalho para o Domínio 8 é com rochas de composição granodioríticas e tonalíticas. Nas unidades descritas para as áreas deste domínio as rochas são atribuídas ao Complexo Bacajaí, unidade pertencente ao “Magmatismo Orogênico Sin a Tardi-Colisional”, composto essencialmente por charnockitóides. No Capítulo 5 serão discutidos aspectos geológicos embasados em trabalhos de campo para as rochas deste domínio. A presença de biotita-tonalitos neste domínio gera uma dúvida quanto ao enquadramento desses tonalitos, uma vez que estes não são descritos nas suítes sin a tardi-colisionais. A sugestão mais pertinente seria, portanto, relacionar o Domínio 8 às rochas pertencentes ao Complexo Aruanã, descrito na região leste da área, associado às rochas provindas do “Magmatismo Orogênico Pré-colisional”. Essa sugestão será abordada de forma mais detalhada nos capítulos 5 e 6.

3.3.3.9. Domínio 9

Dois subdomínios com características gamaespectrométricas similares são identificados na área, um deles localizado no extremo sul (9a) e outro na região centro-norte (9b). Essas características compreendem baixos teores de K e eU , associados a teores médios de eTh .

O subdomínio 9a apresenta espessura de aproximadamente 20 km. Está disposto segundo a direção preferencial NE-SW, com uma forte inflexão para NW-SE em sua parte leste. O contato

abrupto deste subdomínio é com os domínios 2, 3 e 10. Na parte norte esse contato é marcado por um forte lineamento magnetométrico.

O outro subdomínio, 9b, é composto por uma faixa principal de aproximadamente 90 x 10 km, orientada segundo WNW-ESE. Essa faixa é curvilínea, e faz contato com as unidades 4, 5, 7, 8, 11 e 15. Além dessa faixa, outros blocos com dimensões menores localizados nas proximidades da faixa apresentam as mesmas características.

A assinatura gamaespectrométrica do Domínio 9 é característica de rochas com conteúdo máfico e/ou ultramáfico, em função de seus baixos teores gamaespectrométricos. No subdomínio sul, inserido no contexto da Província Carajás, essa assinatura pode ser compatível com as rochas máficas correspondentes a um dos *greenstone belts* Neoarqueanos. Embora estas rochas sejam descritas por [Vasquez et al. \(2008c\)](#) como parte do Complexo Cajazeiras, as características gamaespectrométricas diferem em muito das assinaturas encontradas para as rochas desse complexo. Em relação ao subdomínio centro-norte, a assinatura descrita corresponde às rochas referentes ao *greenstone belt* da Sequência Três Palmeiras.

3.3.3.10. Domínio 10

As exposições deste domínio estão concentradas na região sul da área do projeto. Possuem assinatura gamaespectrométrica composta por baixos teores de K, médios teores de eTh e altos eU . No extremo sul, estas exposições são curvilíneas (10a) e apresentam contato abrupto para com o Domínio 9. Ainda na região sul, ocorre outra exposição desse mesmo domínio (10b), tangenciada por um extenso lineamento NE-SW em seu contato sul, que revela um contato abrupto retilíneo com o Domínio 9. Esta exposição envolve em seu interior fragmentos dos domínios 1, 2, 3, 5 e 14. Seu contato a norte é abrupto, levemente curvilíneo e orientado a WNW-ESSE para com as exposições do Domínio 14.

A correspondência evidente em relação ao mapa geológico é com o Complexo Cajazeiras. Esta unidade litoestratigráfica é composta por granulitos re-hidratados, tonalíticos a graníticos, e por milonitos de alto grau. No entanto, os baixos teores de K são compatíveis com os granulitos tonalíticos da unidade em questão.

3.3.3.11. Domínio 11

Em termos de localização, o Domínio 11 situa-se sobretudo na região centro-norte e norte da área. A assinatura gamaespectrométrica desse domínio compreende baixos valores de K e eTh que contrastam com altos valores de eU .

Na região centro-norte, o Domínio 11 é constituído por blocos disformes (11a), sem orientação preferencial, que parecem se amoldar aos demais domínios. Os contatos ora são abruptos com os domínios 2, 4, 8, 6 e 9, ora formam transições gradacionais principalmente com os domínios 5 e 14. Poucos lineamentos realçados por magnetometria ocorrem nessa região. Embora este domínio represente baixos teores de K, os dados da [Tabela 3-4](#) indicam uma possível associação com rochas ácidas, as quais se caracterizam por baixos teores desse elemento. Neste caso, a relação mais evidente deste domínio seria com as rochas graníticas menos alcalinas (monzogranitos ou granodioritos) da Suíte Intrusiva João Jorge.

Já na região norte, este domínio aparece na forma de blocos com dimensões batolíticas (11b), sem orientação preferencial, cujo interior exhibe uma trama de lineamentos realçados na [Figura 3-6 \(B\)](#) com direção preferencial NE-SW. As relações de contato nesta região são abruptas com os domínios 3, 8, 13 e 15 e transicionais com o Domínio 14. As relações espaciais deste domínio possibilitam correlacioná-lo aos ortognaisses do Complexo Aruanã.

3.3.3.12. Domínio 12

Nas regiões sul e centro-sul da área ocorrem blocos com altos teores de K e eTh que contrastam com baixos teores de eU . Os blocos mais a sul (12a) estão dispostos na direção NW-SE e mantêm contato gradacional com os domínios 6 e 14 e contato abrupto com os domínios 3 e 5. Já os blocos localizados na região centro-norte (12b) estão dispostos segundo a direção E-W, NW-SE ou então não exibem nenhuma orientação preferencial. Estes blocos fazem contato gradacional com os domínios 6, 8 e 14, e contato abrupto com os domínios 3, 5 e 11.

As características gamaespectrométricas e a disposição espacial do Domínio 12 possibilitam a sua relação para com as rochas da Suíte Intrusiva João Jorge.

3.3.3.13. Domínio 13

Baixos teores de K contrastantes com altos teores de eTh e eU caracterizam o Domínio 13, localizado na região nordeste da área. Dois blocos caracterizam esse domínio, ambos com formato subarredondado e sem orientação preferencial. Os contatos com os domínios 3, 8, 11 e 14 são abruptos. A principal relação encontrada desse domínio é com rochas fanerozóicas da Bacia do Amazonas.

3.3.3.14. Domínio 14

As exposições do Domínio 14 estão dispersas por toda a área, compreendendo blocos com formatos variados, porém com características gamaespectrométricas similares, envolvendo teores médios de K e altos de eTh e eU . Uma trama variando entre E-W a NW-SE é mostrada pelos lineamentos exibidos pela derivada vertical dos dados magnetométricos.

Na região centro-sul da área, um conjunto de blocos (14a) apresenta disposição preferencial NW-SE. Estes blocos fazem contato gradacional com o Domínio 3 e abrupto com os domínios 5, 6, 8, 11 e 12. Nesta região, a correspondência do domínio é com o Complexo Cajazeiras. Em particular, a assinatura composta por teores médios de K em conjunto com altos teores de eTh e eU apresenta uma boa correspondência para com ortogranulitos félsicos (graníticos).

Três blocos (14b) localizados na região centro-norte da área estão dispostos segundo a orientação NW-SE. O bloco mais a sul tem formato semi-elíptico com bordas arredondadas. Faz contato abrupto com os domínios 5, 8 e 11, e gradacional com o Domínio 12. A correspondência espacial deste bloco é com a Suíte Intrusiva João Jorge. Já os blocos situados a noroeste e centro-leste apresentam formato elíptico e fazem contato abrupto com os domínios 3, 5, 8 e 11. A relação evidente destes blocos é com as rochas da Suíte Intrusiva Amapari, composta por rochas ígneas catazonais charnockíticas a charno-enderbíticas descharnockitizadas.

Na região norte da área, outros três blocos (14c) com características similares apresentam formatos curvilíneos que por vezes sugerem dobramentos. Esses blocos fazem contato abrupto com os domínios 4, 8 e 11, e contato gradativo com o Domínio 3. Nas três situações a correlação espacial destes domínios é com as rochas do Complexo Aruanã.

3.3.3.15. Domínio 15

Este último domínio, localizado na região centro-norte da área, apresenta teores médios de K, eTh e eU . O contato com os demais domínios é abrupto e discordante. A correspondência espacial deste domínio é com os sedimentos aluvionares das planícies dos rios Bacajá e Anapu.

3.4. DISCUSSÃO E COMENTÁRIOS

As descrições que demonstram as características dos domínios gamaespectrométricos levam em conta apenas as análises das variáveis individualmente e em conjunto na composição RGB. No entanto, estes domínios refletem variações composicionais que nem sempre correspondem às transições e limites entre as unidades litoestratigráficas. Conforme demonstrado, uma mesma unidade litoestratigráfica pode conter diferentes domínios lito-gamaespectrométricos, que por sua vez podem representar variações petrográficas ou diferentes litotipos dentro da mesma unidade litológica.

[Vasquez \(2006\)](#) relata a ocorrência de uma componente crustal neoarqueana (T_{DM} de 2,73 e 2,65 Ga e $\epsilon Nd_{2,08Ga}$ de -6,49 e -5,80) para as rochas graníticas correspondentes a Suíte Intrusiva João Jorge da porção ocidental do Domínio Bacajá. Com isso, o autor sugeriu uma origem desses granitos a partir da fusão de rochas do embasamento neoarqueano com participação de componente paleoproterozóica. No Domínio 5, a assinatura gamaespectrométrica dos blocos sugere uma correspondência espectral entre a Suíte Intrusiva João Jorge e o Ortognaisse Pacajá. Desse modo, a similaridade e as correspondências isotópicas sugerem que estas rochas provêm de uma fonte de mesma natureza.

No bloco norte do Domínio 4, relacionado ao Complexo Bacajaí, uma discordância abrupta com aproximadamente 150 km de extensão em seu limite sul sugere a presença de falha de natureza transcorrente, com evidências de movimentação sinistral. Tanto as características gamaespectrométricas quanto magnetométricas indicam que o Complexo Bacajaí estaria restrito à região norte da área. [Vasquez et al. \(2008c\)](#) propõem que as rochas do Complexo Bacajaí são pretéritas a esta falha. No entanto, a descontinuidade do Domínio 4 para sul da falha sugere que as rochas do complexo estejam restritas à região norte.

O contato entre o Domínio Bacajá e a Província Carajás, que se encontra ao sul da área de estudo, ainda é pouco discutido em termos de sua localização ([Ricci *et al.* 2003](#), [Faraco *et al.* 2005](#), [Macambira *et al.* 2007](#)). Neste trabalho, os resultados da análise das imagens aerogeofísicas permite inferir que esse contato se situe entre os domínios 3 e 4, na região sul do mapa. Esta representaria a transição entre o Granulito Novolândia e o Ortognaisse Pacajá. As estruturas que contornam a concavidade do limite sul do Domínio 4, juntamente com a forma do plúton localizado no limite sudoeste entre estas unidades, sugere que esta colisão, além da componente compressiva, foi regida por um esforço sinistral. Essas componentes compressivas teriam proporcionado tanto o metamorfismo de contato nessas rochas, bem como a feições representativas de deformação interpretadas a partir dos lineamentos nas imagens aerogeofísicas.

Dadas as grandes dimensões de cobertura do projeto aerogeofísico, tornou-se inviável a validação neste estudo de todos os domínios em campo. No entanto, parte destes domínios pôde ser verificada e analisada com resultados de campanhas de campo. No Capítulo 5 será feita a abordagem desses aspectos geológicos observados em campo e baseados em análises petrográficas e geoquímicas, onde alguns desses domínios poderão ser discutidos com maior profundidade.

Capítulo 4

4. Análise de Imagens SAR e Integração com Dados Aerogeofísicos

Neste capítulo, a região centro-leste do Domínio Bacajá é analisada a partir das imagens de radar de abertura sintética (SAR) e das imagens resultantes da integração entre os dados SAR e aerogeofísicos. A análise visual enfocou principalmente os atributos texturais das imagens SAR, buscando analisar os aspectos morfológicos superficiais relacionados ao relevo, que são fundamentais para a percepção da geologia, principalmente em áreas da Amazônia. Os resultados desta análise foram utilizados na composição do mapa geológico que será apresentado nos capítulos 5 e 6.

4.1. INTRODUÇÃO

Imagens SAR (*synthetic aperture radar*) e dados aerogeofísicos são utilizados rotineiramente como ferramentas de mapeamento geológico, embora na maioria das vezes de forma não integrada ([Paradella et al 2000b](#), [Carneiro 2005](#), [Teruiya et al. 2008](#), [Carneiro et al. 2006](#)). Por outro lado, quando estes dados são utilizados de forma integrada, por meio de fusões de imagens utilizando técnicas de processamento digital ([Crósta 1992](#)), informações litológicas e estruturais, que muitas vezes são imperceptíveis nas imagens individuais, tornam-se mais evidentes à percepção humana.

A textura de uma imagem pode ser definida como a frequência da variação tonal de uma imagem, produzida pela agregação de feições unitárias que apresentam pouca representatividade para serem analisadas individualmente ([Simonett e Davis 1983](#), [Lillesand et al. 2008](#)).

[Dallemand et al. \(1993\)](#) subdividem a textura relacionada especificamente a imagens SAR em três tipos: (i) a **micro-textura**, ou ruído *speckle*, que ocorre na forma de feições de tamanho equivalente ou superior ao menor elemento com resolução espacial da imagem, e que é inerente aos radares imageadores; (ii) a **meso-textura**, que corresponde à variação natural da média da

energia que é retroespalhada pelo alvo em direção à antena SAR em uma mesma escala que o elemento com menor resolução espacial; e (iii) a **macro-textura**, caracterizada pela variação no brilho da imagens, propagada por muitos elementos com resolução espacial mínima.

O sensoriamento remoto com imagens SAR é capaz de revelar informações texturais das imagens relacionadas às características físicas do terreno, principalmente ao relevo superficial, e também às propriedades elétricas dos materiais presentes em superfície ([Elachi 1987](#)). Já as imagens aerogeofísicas, conforme visto no capítulo anterior, revelam as propriedades composicionais das rochas, sejam estas propriedades adquiridas a partir do espectro gamaespectrométrico, de natureza mais superficial, ou a partir do gradiente magnetométrico, de natureza mais sub-superficial. Imagens geradas por fusão de dados SAR e aerogeofísicos podem, desse modo, auxiliar sobremaneira o mapeamento geológico tradicional, dada a possibilidade de analisar propriedades texturais e composicionais das rochas em conjunto ([Henderson e Lewis 1998](#), [Rencz 1999](#), [Drury 2001](#)), bem como agregar informações de natureza superficial e sub-superficial.

A partir do processamento e interpretação das imagens SAR, seja de forma independente ou fundidas a imagens aerogeofísicas, analisaram-se as características geométricas e morfológicas da área estudada, com o objetivo de obter informações sobre sua geologia.

4.2. AQUISIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS DADOS SAR

Os dados utilizados foram adquiridos a partir da “Missão Terra do Meio”, realizada pelo Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM) no ano de 2005, que adquiriu imagens de radar na forma de faixas de imageamento aéreo. O aerolevantamento foi realizado no modo A4 Quad, banda L, com cenas dispostas em faixas com dimensões de aproximadamente 180 x 60 km, voadas na direção norte-sul com visada para oeste. As principais características do aerolevantamento estão listadas na [Tabela 4-1](#).

Tabela 4-1. Características da missão R99-B/SAR Anapu-Tuerê.

Modo	Reso- lução	Dist Min: início do imagea- mento (km)	Dist Max: início do imagea- mento (km)	Largura da Faixa Imageada (km / pixels)	Limite - Dist Max (km)	Process. em Tempo Real (pixels / modo)	Duração da DCRsi (min.)	Extensão do Segmento (km) - p/ encher a DCRsi	Ângulos de Incidência (near range – far range)
A.4 QuadL	18 m	14	65	60 km / 4000	74-125	4000 Single L	72	777,6	40,23° - 81,70°

4.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os dados R99-B/SAR passaram inicialmente por etapas que consistem na avaliação da qualidade das imagens para possível detecção de efeitos espúrios oriundos do aerolevantamento e/ou do processamento inicial. Em seguida, foram aplicadas as correções necessárias para remoção de ruídos e distorções comuns aos radares imageadores e, finalmente, foram aplicadas técnicas de processamento para realce textural das imagens. Essas etapas de processamento são descritas a seguir.

4.3.1. Correção de efeitos do padrão de antena (APC)

A perda de potência relacionada à geometria de visada lateral ocasiona variações de frequência no brilho das imagens na direção de “range” ([Ulaby et al. 1986a](#)). No caso das imagens SAR, a potência decresce em $1/R^3$, sendo que “R” representa a distância entre a antena e um dado ponto na imagem. Em imagens geradas por sensores aerotransportados, a razão entre R_{min} (início da faixa imageada) e R_{max} (fim da faixa) é bem menor em relação às imagens adquiridas por satélites, onde os valores de R_{min} e R_{max} são similares.

Na correção APC, dois métodos podem ser utilizados. O primeiro consiste em filtrar o padrão de antena através de um filtro de média, onde o número de pontos da média é definido pelo tamanho da janela da interface, ao passo que o segundo envolve o ajuste polinomial, onde o grau do polinômio é selecionado pelo usuário.

Após a filtragem do padrão, a imagem pode ser corrigida por métodos de adição e multiplicação. No método multiplicativo, o valor do pixel processado, $V(i,j)$, é multiplicado por

um fator originado da razão entre o valor médio do padrão (P) e o valor do padrão ajustado, ($P(j)$), ou seja:

$$V_c(i,j) = V(i,j) \cdot \frac{P}{P(j)} \quad (\text{Eq. 4-1})$$

onde j é o índice de coluna da imagem (direção de “range”).

As imagens R99-B/SAR foram corrigidas conforme o algoritmo descrito por [Pietsch \(1993\)](#). Com isso, as imagens mostraram-se homogêneas quanto à iluminação na direção *range*.

4.3.2. Registro das imagens

O registro espacial se faz necessário para utilização de imagens obtidas por diferentes sensores sobre uma mesma área ([Crósta 1992](#)). Esse registro pode ser realizado de modo manual, utilizando pontos de controle no terreno, ou automático, tendo como base a análise da similaridade e dissimilaridade entre duas imagens. [Schowengerdt \(1997\)](#) ressalta que a qualidade da correção aplicada dependerá, principalmente, da precisão com que estes pontos foram adquiridos, da respectiva distribuição sobre a imagem e da perfeita precisão dos mesmos.

Para o registro das imagens R99-B/SAR da região de estudo, foram utilizadas imagens LANDSAT-7/ETM+ orto-retificadas com resolução espacial de 15m na banda pancromática.

4.3.3. Atenuação do ruído *speckle*

O *speckle* é um ruído do tipo multiplicativo, característico do sistema imageador de radar, expresso por um padrão aleatório de pixels escuros e brilhantes ([Lillesand et al. 2008](#)). [Lee \(1986\)](#) descreve duas técnicas para redução do *speckle*: (i) processamento *multilook* ou multivisada; e (ii) aplicação de filtros.

Nas imagens R99-B/SAR, após o processamento *multilook*, constatou-se ainda a presença de ruídos de *speckle* remanescentes. Desse modo, as imagens foram submetidas ao filtro *Frost* com janelas de dimensão de 3x3 elementos.

4.3.4. Produtos gerados a partir dos dados R99-B/SAR

Após o processamento inicial dos dados, foram produzidas as imagens em amplitude das polarizações HH ([Figura 4-1\(A\)](#)), HV, VH ([Figura 4-1\(B\)](#)) e VV ([Figura 4-1\(C\)](#)) corrigidas do ruído speckle. Em seguida, a composição ternária R(HH)-G(VH)-B(VV) foi realizada para compor a base de dados complementar ([Figura 4-1\(D\)](#)). Em uma etapa seguinte foi realizada a seleção, dentre as imagens geradas, daquela que apresentaria o melhor realce dos atributos geológicos, ou seja, das feições relacionadas ao relevo e à topografia. A imagem referente à polarização VV ([Figura 4-2](#)) apresentou maior realce dos aspectos geológicos de interesse, haja visto que tanto nas polarizações HH, HV, VV quanto na composição ternária R(HH)-G(VH)-B(VV) foi observado maior realce das áreas de uso e ocupação do solo.

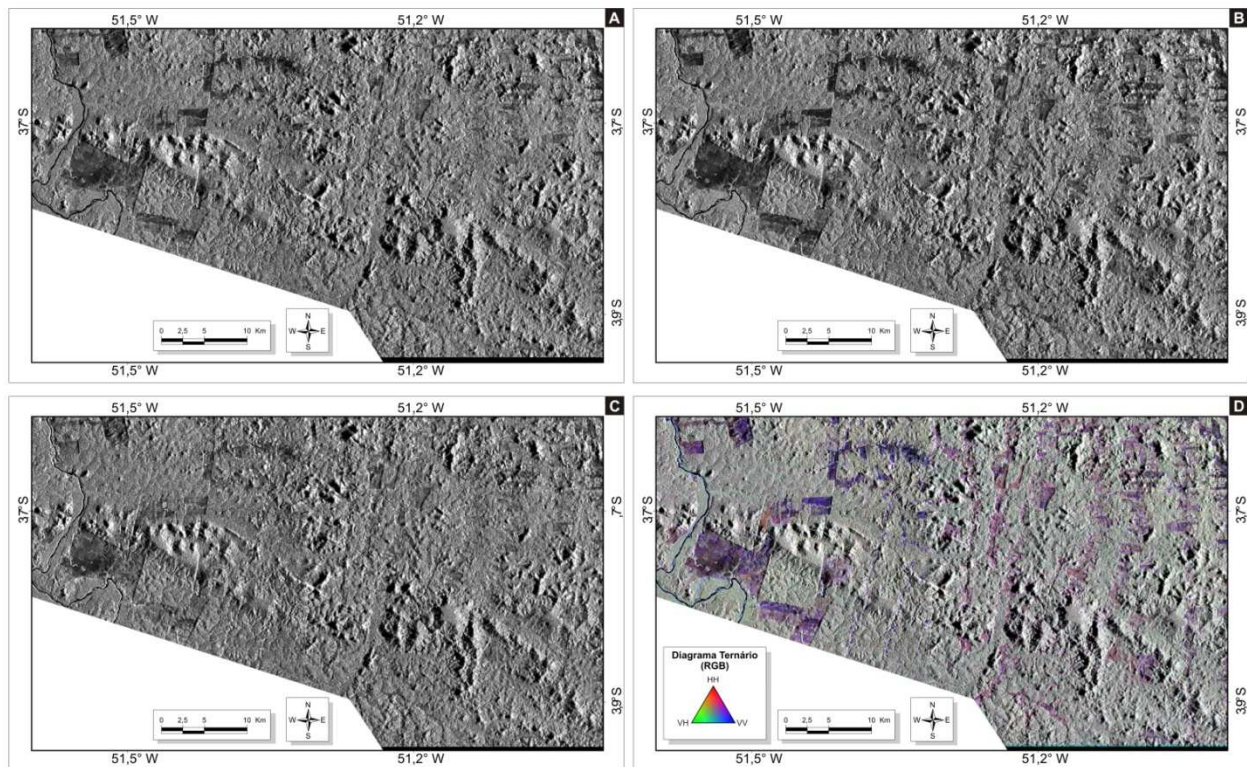


Figura 4-1. Imagens R99-B/SAR produzidas após o processamento dos dados originais, em diferentes polarizações: (A) HH; (B) VH; (C) VV; e (D) composição ternária R(HH)-G(VH)-B(VV).

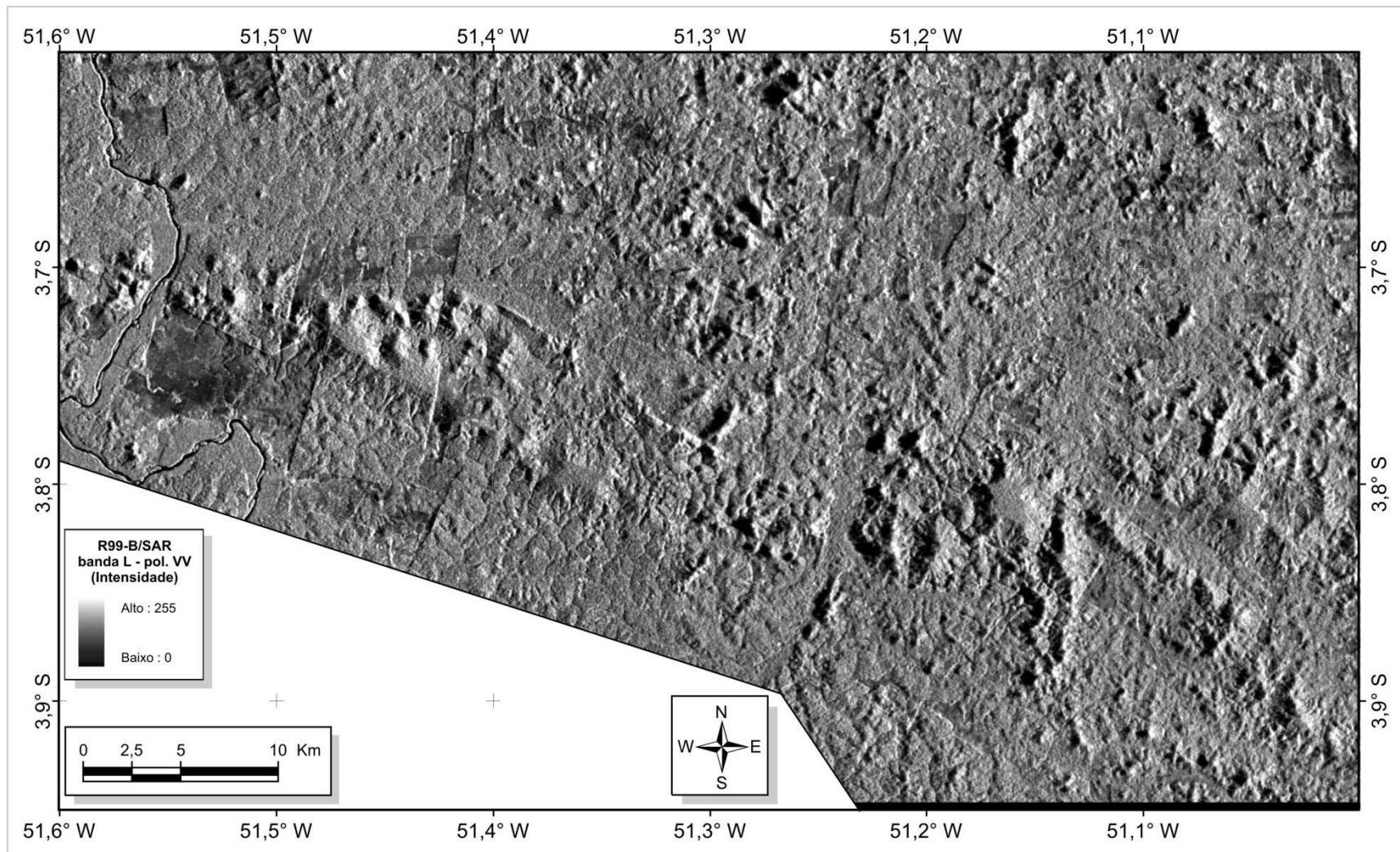


Figura 4-2. Imagem R99-B/SAR em amplitude, referente à banda L com polarização VV, selecionada como a que apresentou o melhor realce dos atributos geológicos da área estudada.

4.3.5. Fusões da imagem R99-B/SAR (banda L, pol. VV) com imagens aerogeofísicas gamaespectrométricas

A fusão de imagens permite a análise da variação espacial de dados de natureza distinta, adicionando às diferentes tonalidades de cor, elementos texturais relativos aos dados de maior resolução espacial ([Schowengerdt 1997](#)). Desse modo, foi realizada a transferência das informações de alta frequência contida nas imagens SAR para aquelas de menor resolução, referentes aos dados aerogeofísicos.

A imagem de amplitude R99-B/SAR, banda L, polarização VV foi adicionada como camada de intensidade aos dados aerogeofísicos por meio do algoritmo “RGB+I”, gerando assim dois produtos: (i) imagem R99-B/SAR L-VV + canal de contagem total dos dados gamaespectrométricos, ([Figura 4-3\(A\)](#)); (ii) imagem R99-B/SAR + composição ternária R(K)-G(eTh)-B(eU), ([Figura 4-3\(B\)](#)).

Uma questão importante a ressaltar é que as duas fontes de dados, SAR e gamaespectrometria, trazem respostas em superfície. Essas fusões, diferentemente daquelas realizadas com imagens magnetométricas (Capítulo 3), possibilitam a análise da textura referente ao relevo gerado pelas rochas, espectro de radiação gama, além dos lineamentos relacionados a estruturas geológicas em superfície.

A [Figura 4-3\(A\)](#) foi utilizada na análise dos principais domínios texturais, uma vez que esta representa o espectro total da janela gamaespectrométrica, relativa ao canal de contagem total (CT). Desse modo, a textura da imagem foi analisada visualmente levando em consideração os aspectos morfológicos e a radiação gamaespectrométrica total.

A análise dos lineamentos neste capítulo foi realizada tendo como base a [Figura 4-3\(B\)](#). A análise de lineamentos abordada no capítulo anterior foi feita com base nas estruturas extraídas a partir de dados magnetométricos, que representam estruturas geológicas presentes tanto em superfície quanto em subsuperfície. Já os lineamentos extraídos a partir de imagens produzidas pela fusão de dados SAR e gamaespectrometria, refletem apenas as estruturas em superfície, dada a limitação da penetração da radiação gamaespectrométrica até aproximadamente 30 cm de profundidade. Esses resultados, portanto, se aproximam mais às estruturas aflorantes e, consequentemente, são mais apropriados ao mapeamento geológico em superfície.

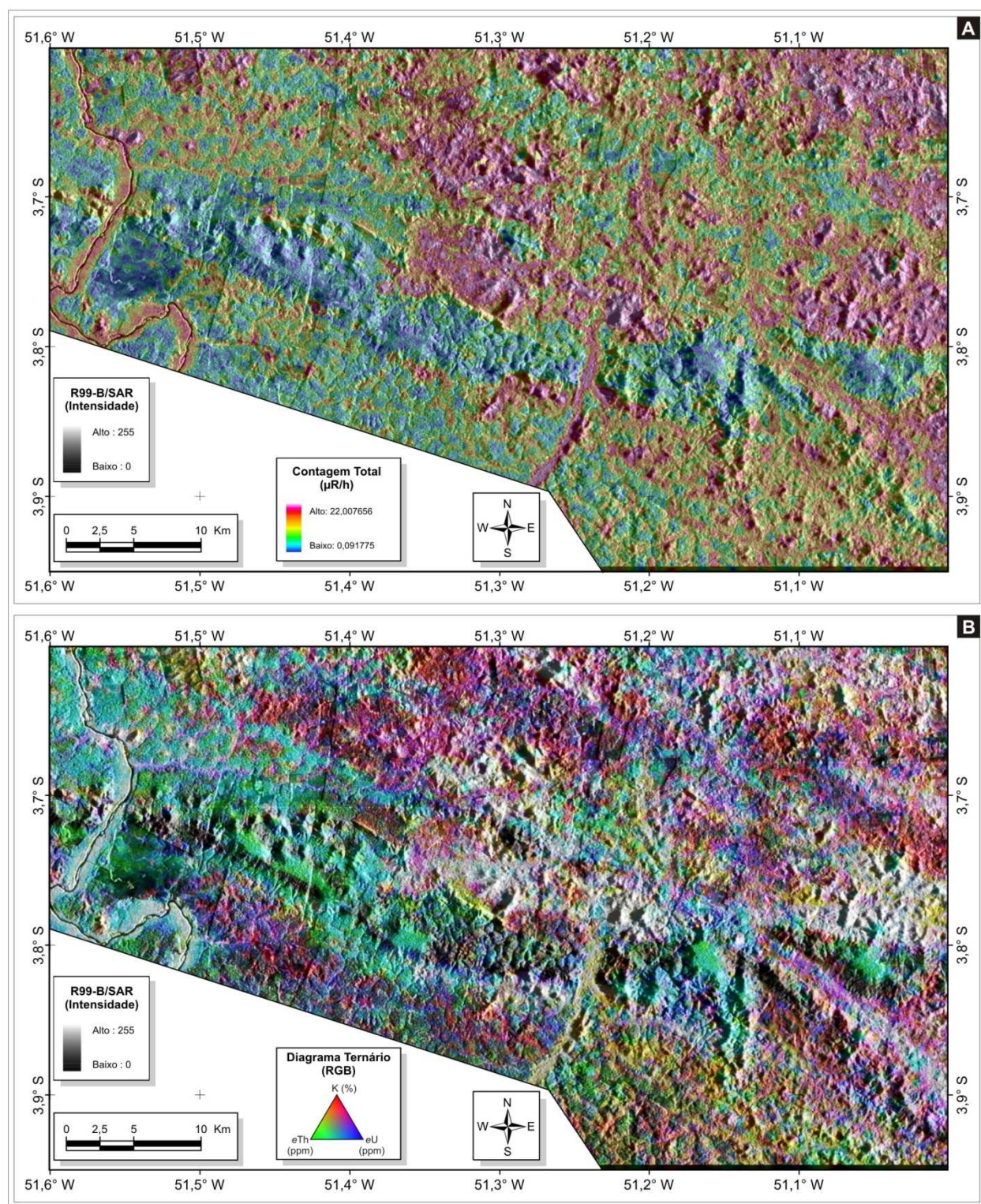


Figura 4-3. Imagem R99-B/SAR em amplitude, referente à banda L com polarização VV, fundida com imagens aerogeofísicas: (A) canal de Contagem Total ($\mu\text{R/h}$); (B) diagrama ternário R(K)-G(eTh)-B(eU).

4.4. ANÁLISE DOS PRODUTOS GERADOS A PARTIR DAS IMAGENS SAR E AEROGEOFÍSICAS

4.4.1. Análise textural a partir da fusão entre imagens SAR e canal gamaespectrométrico de contagem total

A análise mostrada na [Figura 4-4](#) evidencia a presença de seis zonas homólogas de textura. Essas zonas apresentam relações de similaridades e contrastes entre si, que serão discutidas a seguir.

A Zona T1, localizada predominantemente nas regiões sul e noroeste da área, apresenta textura muito fina, com relevo suavemente ondulado, marcada por padrões de drenagens dendríticas. A zona apresenta teores de contagem total médios a baixos. Localmente são observadas teores altos de contagem total associados a pequenas elevações de relevo suave ou às drenagens.

Localizada na região sul da área, em uma faixa disposta na direção E-W, os domínios da Zona T2 apresentam textura variando entre média e grossa. O relevo varia entre ondulado a acidentado com morros ora alinhados com topos em cristas retilíneas, ora formando platôs com rugosidade baixa. Padrões retilíneos de drenagens predominam principalmente nas zonas próximas às encostas. Localmente, são observados padrões dendríticos de drenagem desordenado. Baixos teores de contagem total estão associados a esta zona textural. No extremo oeste da área, teores de contagem total médios a altos estão associados a morrotes arredondados.

A Zona Textural T3 está disposta em domínios dispersos sobretudo nas regiões central e norte da área. A textura é média a fina, com relevo variando entre ondulado e suavemente ondulado. O padrão dominante de drenagem é o dendrítico desordenado. Predominam também nesta zona morros com topos alinhados, preferencialmente em direções próximas a N-S e NNE-SSW. Altos teores de contagem total recobrem a maior parte das áreas relacionadas a esta zona textural. Localmente, teores de contagem total médios e baixos são observados em regiões localizadas entre os morros.

Uma textura fina associada ao relevo plano a levemente ondulado marca os domínios da Zona T4, localizada nas regiões nordeste e sudeste da área. Os padrões de drenagens são pouco frequentes, porém predominam os direcionais.

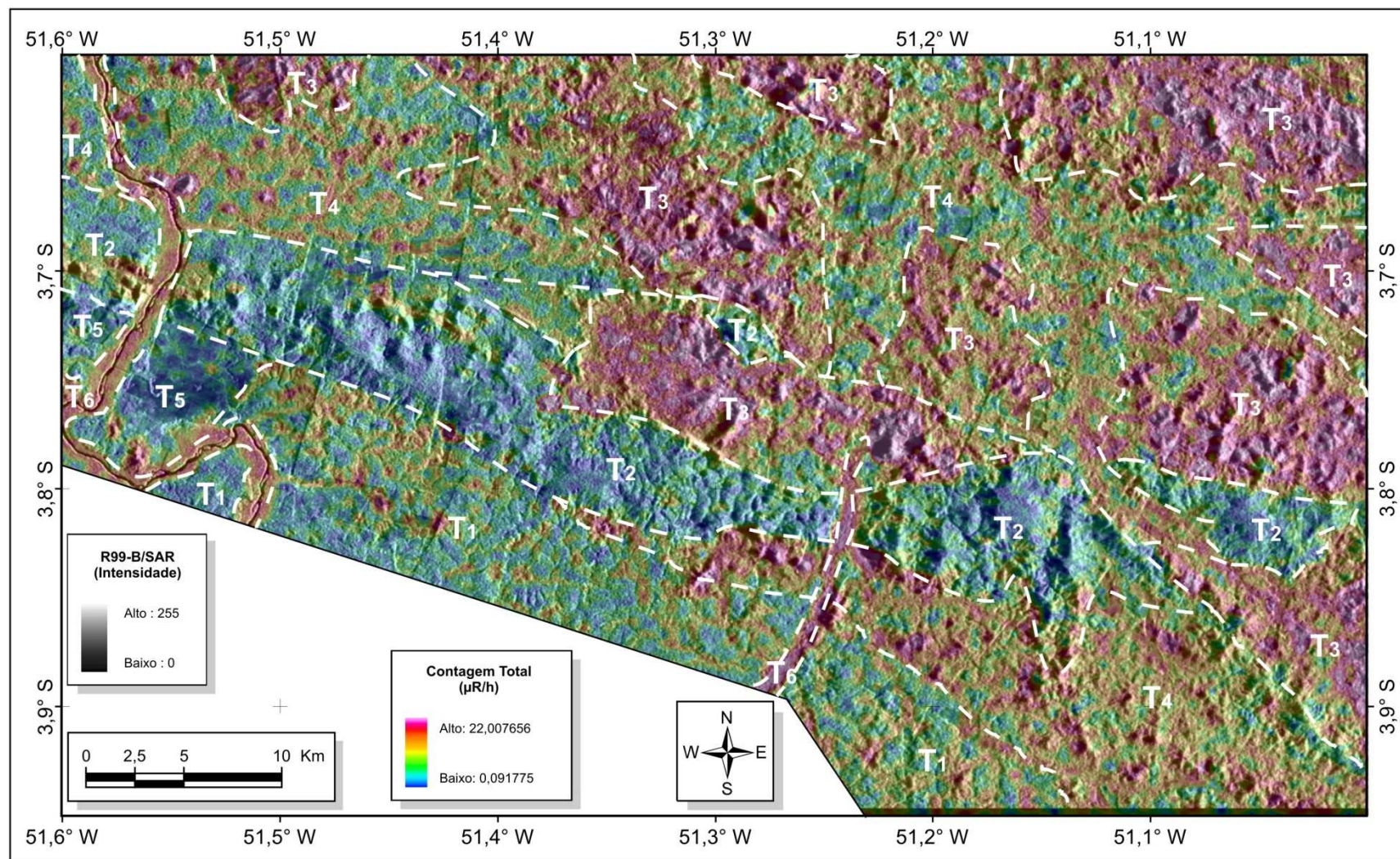


Figura 4-4. Zonas com texturas homólogas sobrepostas à imagem R99-B/SAR em amplitude, referente à banda L com polarizaçãoVV, fundida ao canal de Contagem Total ($\mu\text{R/h}$).

Ainda na Zona T4, teores de contagem total médios a altos estão associados, na região sudeste, a morrotes com topos arredondados alinhados segundo NW-SE.

Os domínios relacionados à Zona T5 estão localizados na região sudoeste da área, sendo caracterizados por textura lisa com relevo plano a levemente ondulado. Teores baixos de contagem total estão associados a esta zona.

Finalmente, a Zona T6 apresenta textura muito fina, com relevo plano, que contorna as superfícies especulares relacionadas às drenagens principais. Teores médios a altos de contagem total estão associados a esta zona.

4.4.2. Análise dos lineamentos a partir da fusão entre imagens SAR e composição ternária gamaespectrométrica R(K)-G(eTh)-B(U)

A [Figura 4-5](#) mostra os lineamentos interpretados a partir da fusão apresentada na [Figura 4-3\(B\)](#). Na análise desses lineamentos é possível identificar cinco direções predominantes, identificadas na [Figura 4-5](#) com cores distintas.

Lineamentos NW-SE, assinalados na cor marrom, apresentam geralmente pequenos a médios comprimentos, mostrando-se dispersos por toda a área estudada, com maior concentração na região sul. Na região central e centro-leste são observados lineamentos pouco frequentes, de direção E-W, assinalados em azul claro, que deslocam lineamentos NW-SE. Com evidência de sobreposição a estes últimos, aparecem lineamentos com direção NNW-SSE, assinalados em azul escuro. Estes lineamentos ocorrem na forma de feixes segmentados, espaçados em aproximadamente 7 km. A direção NE-SW é marcada por feixes segmentados de lineamentos assinalados na cor amarela. Estes feixes apresentam até 40 km de extensão e espaçamento de aproximadamente 5 km entre si, sendo mais frequentes nas regiões central e leste. Por fim, sobrepostos a todas as direções citadas, ocorrem lineamentos de direção aproximadamente N-S, ocasionalmente inflectindo para NNE-SSW, assinalados em vermelho, também dispostos em feixes subparalelos. Estes feixes cruzam a área estudada de norte a sul, apresentam frequência alta e são espaçados em cerca de 3 km.

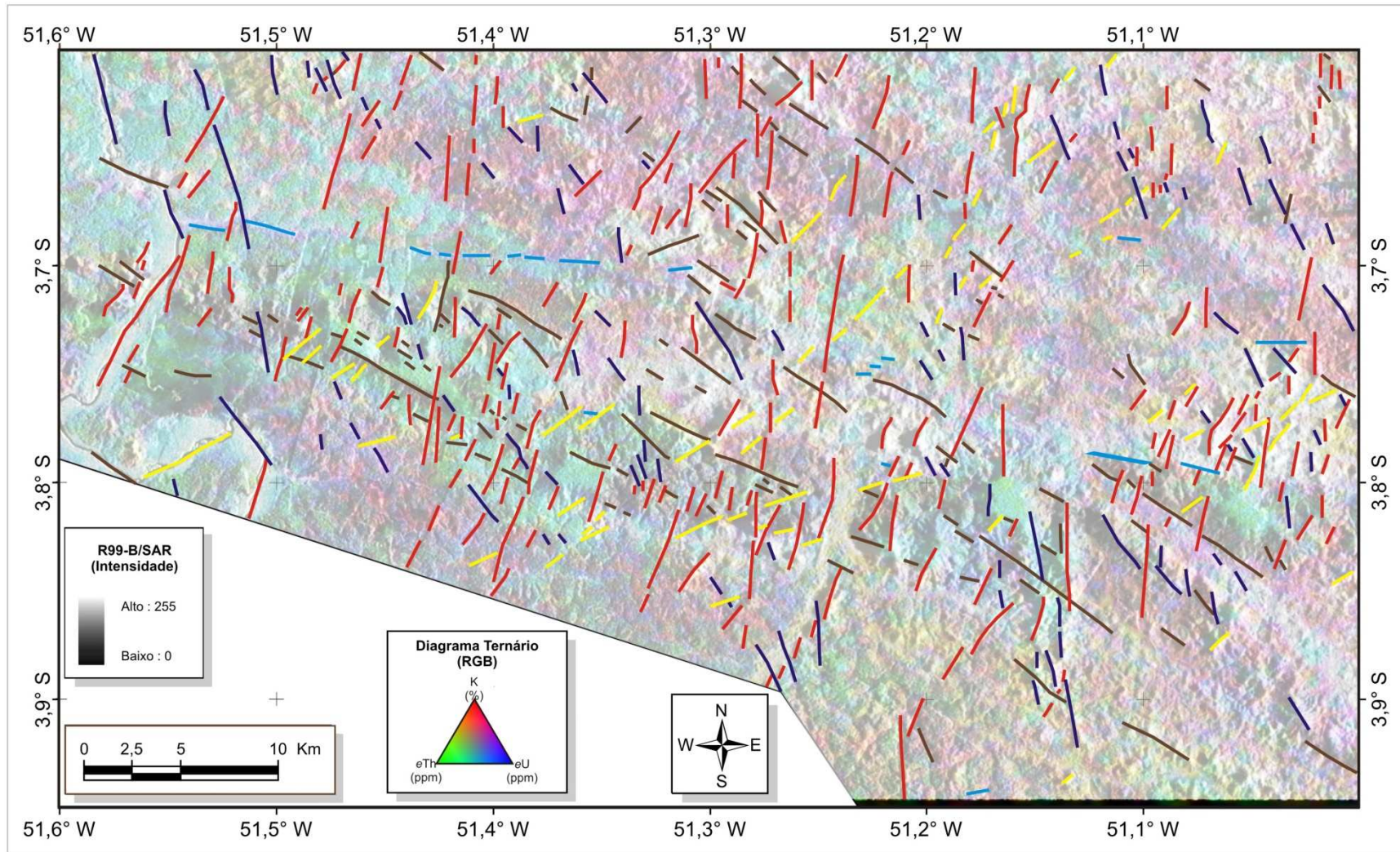


Figura 4-5. Zonas com texturas homólogas sobrepostas à imagem R99-B/SAR em amplitude, referente à banda L com polarizaçãoVV, fundida ao canal de Contagem Total ($\mu\text{R/h}$).

4.5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE INTEGRADA DE IMAGENS SAR E AEROGEOFÍSICA GAMAESPECTROMÉTRICA

Os produtos derivados da imagem SAR e da fusão destas com imagens gamaespectrométricas apresentam densidade de informação maior que aquelas geradas exclusivamente pelas imagens aerogeofísicas. O aumento da densidade de informação ocorre pela atribuição da maior resolução espacial das imagens SAR, com 15 m, às imagens aerogeofísicas, cuja resolução espacial é de 125 m na aresta dos *pixels*.

Em relação aos grandes domínios gerados pela análise textural, individualizados em zonas homólogas de textura, estes representam características de tipos litológicos similares, informação que é útil ao entendimento dos litotipos representados no mapa geológico da área estudada. As zonas texturais, no entanto, representam limites delineados em escala regional. Para a composição do mapa final, em escala de 1:100.000, o ajuste desses limites foi realizado de forma a adequá-los à escala.

Os lineamentos interpretados a partir da fusão SAR+gama representam estruturas que ocorrem em superfície. A utilização dessa imagem de fusão possibilitou o realce da geometria linear formada pela transição tonal gamaespectrométrica associada às texturas expressas na imagem SAR. A partir desses lineamentos, foram interpretadas falhas constatadas e inferidas, conforme apresentado no Capítulo 5.

Capítulo 5

5. Contexto Geológico Local

Este capítulo traz uma síntese dos dados coletados a partir de duas campanhas de campo, juntamente com seus respectivos resultados analíticos. Dessa forma, os dados coletados em campo serão discutidos segundo suas características petrográficas e geoquímicas.

5.1. LEVANTAMENTOS DE DADOS EM CAMPO

Durante a pesquisa, foram realizadas duas etapas de levantamentos de dados em campo, sendo que a primeira ocorreu entre julho e agosto/2008, e a segunda no mês de julho/2009. Durante as etapas, foram descritos oitenta e nove pontos de afloramento ([Figura 5-1](#)), nos quais foram coletadas amostras de rochas e feitas as devidas descrições dos aspectos mineralógicos, texturais e estruturais. Além disso, foram feitas fotografias dos afloramentos e coletadas amostras para análises petrográficas e geoquímicas.

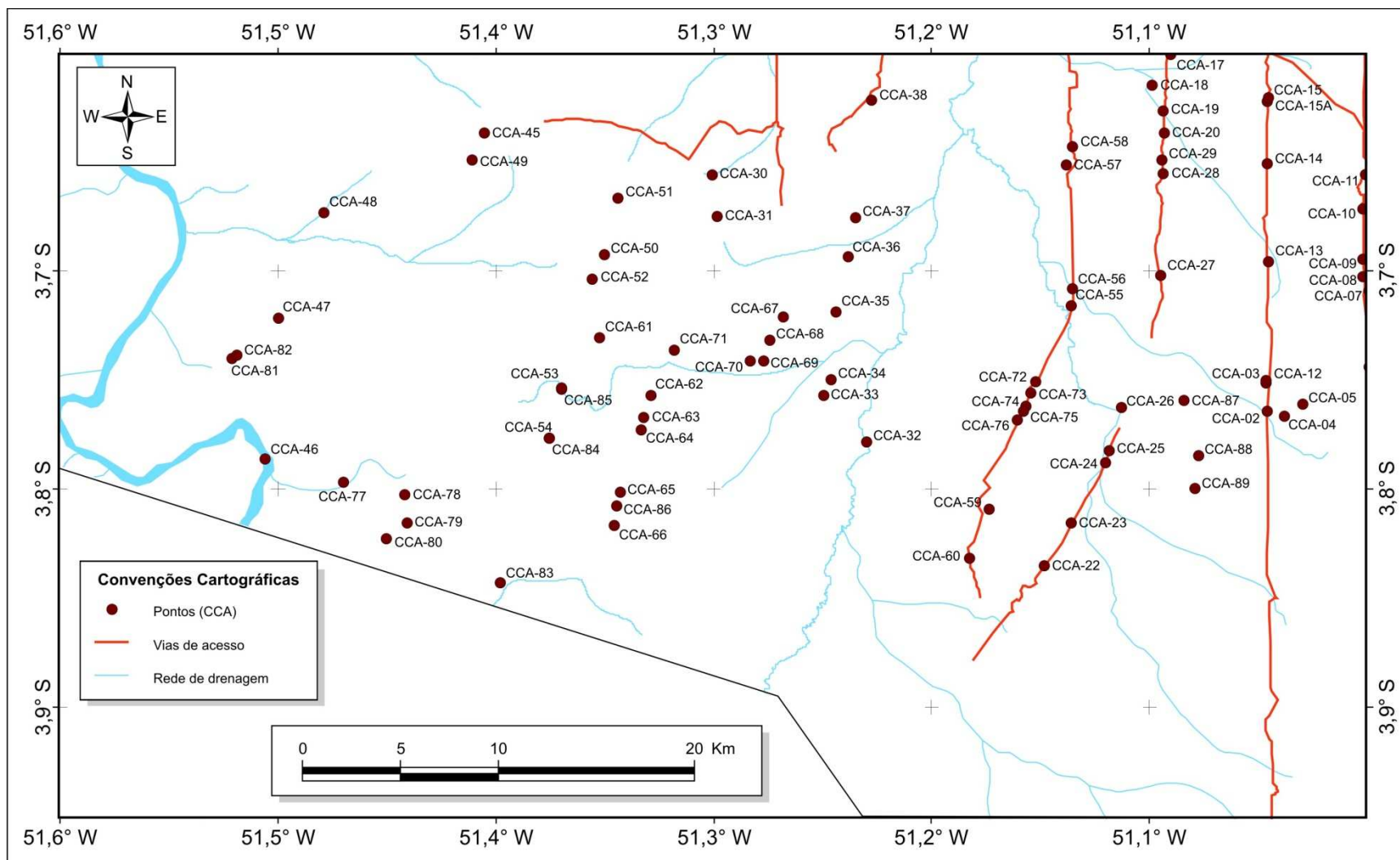


Figura 5-1. Mapa dos pontos visitados durante a pesquisa de campo.

5.2. PETROGRAFIA DA REGIÃO CENTRO-LESTE DO DOMÍNIO BACAJÁ

Os tipos litológicos foram descritos e analisados a partir das amostras coletadas em campo e das estimativas mineralógicas feitas a partir de lâminas delgadas das mesmas. As análises abordaram os aspectos texturais e mineralógicos das rochas. Os litotipos identificados foram classificados em quatro grandes grupos, conforme a proposta de unidades regionais de [Vasquez et al. \(2008c\)](#). Nesse sentido, os principais grupos de rochas são: (i) Complexos metamórficos; (ii) Sequência de rochas meta-vulcanossedimentares; e (iii) Rochas ácidas sin- a tardi-colisionais; e (iv) diques máficos tardi- a pós-colisionais. O diagrama Q-A-P mostrado na [Figura 5-2](#) refere-se a litotipos enquadrados nos grupos (i) e (iii).

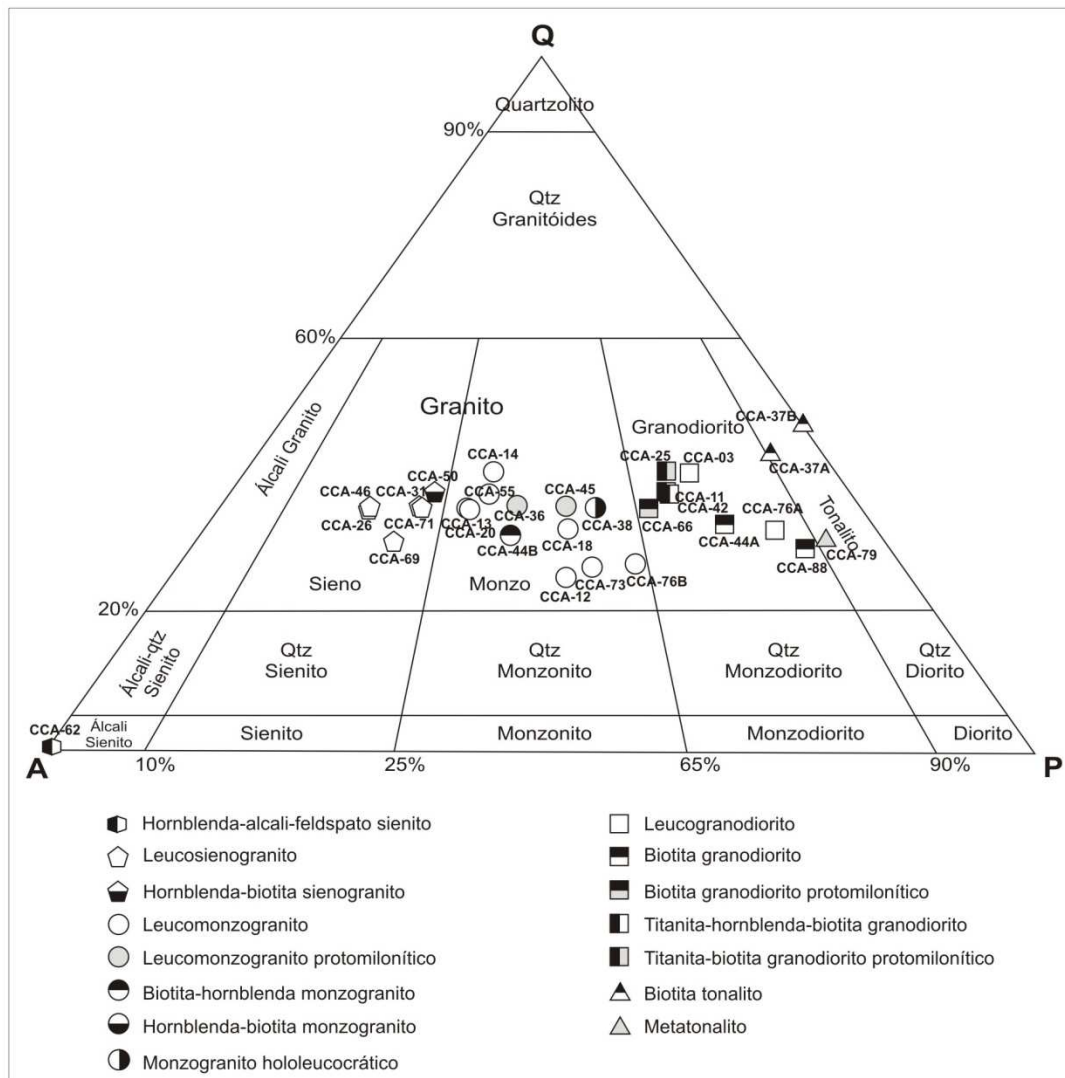


Figura 5-2. Classificação petrográfica das estimativas mineralógicas, segundo diagrama Q-A-P de [Streckeisen \(1976\)](#), para as rochas graníticas da área estudada.

5.2.1. Complexos Metamórficos

5.2.1.1. Metatonalito

A sul da Serra das Três Palmeiras ocorrem metatonalitos com granulação grossa e textura porfirítica ([Figura 5-3\(B\)](#)), nos quais os fenocristais de feldspato alcalino desenvolvem uma orientação preferencial ([Figura 5-3\(A\)](#)). A constituição mineralógica é representada por oligoclásio ($\pm 55\%$), quartzo ($\pm 27\%$), microclínio ($\pm 10\%$) e clinopiroxênio ($\pm 8\%$). São observados nestas rochas, enclaves máficos com aproximadamente 40 x 5 cm e com orientação subparalela à foliação.

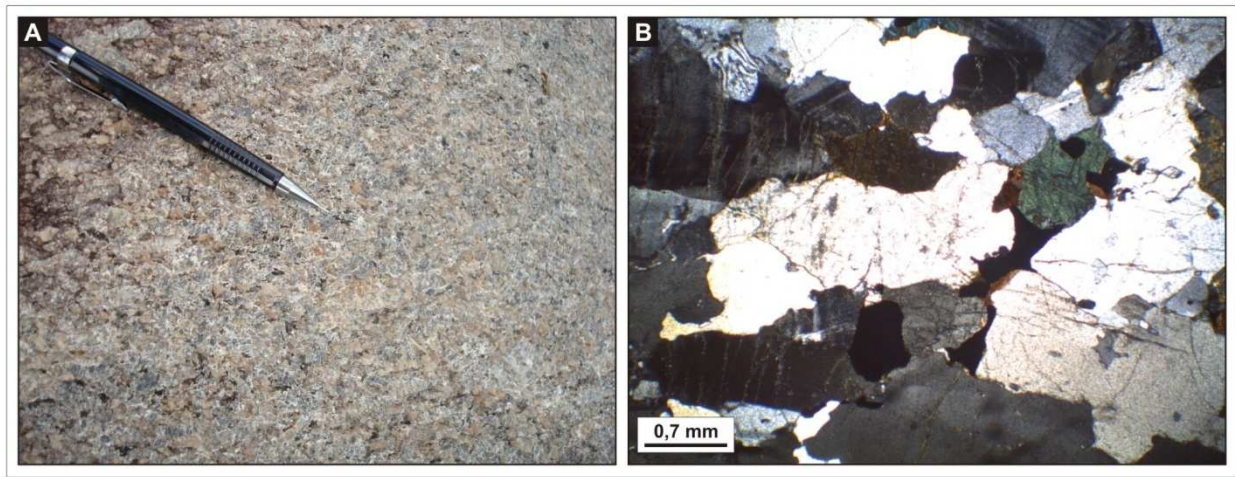


Figura 5-3. (A) Metatonalito com fenocristais orientados de feldspato alcalino; (B) fotomicrografia evidenciando granulação grossa com textura porfirítica dos metatonalitos.

5.2.2. Sequência de Rochas Meta-vulcanossedimentares

Dentre as rochas encontradas, estão as rochas metabásicas compreendidas no domínio do *greenstone belt* que compõe a Serra das Três Palmeiras. Essas rochas afloram em uma faixa com largura de aproximadamente 5 Km, cuja extensão cruza de oeste para leste a área de estudo. Essa faixa apresenta-se curvilínea, com lineamentos internos que sugerem zonas de cisalhamento. Em sua terminação leste, estas rochas infletem para sudeste. São observados ainda fragmentos angulosos em torno dessa faixa, que parecem encaixar-se perfeitamente junto às rochas da Serra das Três Palmeiras. As rochas consistem principalmente de metagabros e anfibolitos, além de metabasaltos e quartzitos subordinados, muitas vezes recobertos por formações lateríticas. O

domínio destas rochas é facilmente reconhecido em superfície pela coloração marrom-avermelhada do solo ([Figura 5-4](#)).



Figura 5-4. Solo de coloração avermelhada comum no domínio das rochas meta-vulcanossedimentares.

5.2.2.1. Anfibolitos

Os anfibolitos afloram principalmente na região sul da área. Ocorrem na forma de blocos subarredondados localizados próximos às estradas vicinais, em leitos de córregos ou ainda na forma de xenólitos em rochas graníticas. Apresentam coloração cinza com tonalidade média a escura. A textura granoblástica equigranular com granulação fina a média é predominante. A composição mineralógica dessas rochas apresenta como minerais principais hornblenda, plagioclásio (labradorita) e, subordinariamente, epidoto e quartzo. Os minerais desenvolvem uma foliação que varia entre fraca a forte e é marcada, geralmente, pela orientação do plagioclásio. A intensidade da foliação é mais forte nas zonas mais próximas ao lineamento central da Serra das

Três Palmeiras. Ocasionalmente são observadas vênulas milimétricas compostas por plagioclásio (Figura 5-5(A)), subparalelas ou perpendiculares à foliação. Localmente foram observados pequenos pontos de sulfetos (pirita) dispersos próximos as vênulas subparalelas à foliação (Figura 5-5(B)). Em lâmina, a textura granoblástica está marcada pela orientação tanto dos cristais de hornblenda quanto da labradorita (Figura 5-5(C)).



Figura 5-5. (A) Anfibolito foliado com vênulas de plagioclásio subparalelas a perpendiculares à foliação; (B) disposição interna dos minerais formando foliação milimétrica, com destaque para pequenos pontos de sulfetos; (C) fotomicrografia (luz natural) evidenciando textura nematoblástica.

5.2.2.2. Quartzitos

Em regiões próximas à base da Serra das Três Palmeiras foram encontradas encostas constituídas por muscovita quartzitos. Estas rochas, de coloração cinza esbranquiçada, apresentam quartzo e muscovita como minerais principais, além de sericita e magnetita como minerais traços.

Em escala mesoscópica, o quartzito apresenta foliação forte cujos planos são marcados tanto por muscovita quanto por pequenos cristais de magnetita ([Figura 5-6\(A\)](#)). Ao microscópio, os quartzitos apresentam textura granolepidoblástica, com cristais de quartzo orientados cujos contatos são retilíneos, suturados, formando ponto tríplice ([Figura 5-6\(B\)](#)). A muscovita ocorre nos interstícios do quartzo e está fortemente orientada, obedecendo a mesma direção de orientação do quartzo ([Figura 5-6\(C\)](#)). A sericita, tal como a muscovita, ocorre intersticialmente.

5.2.2.3. Metagabros

Ainda no contexto das rochas metavulcanossedimentares foram encontrados **metagabros** com coloração cinza escuro, granular, com granulação variando entre fina a média ([Figura 5-7\(A\)](#)). Essas rochas apresentam em lâmina textura subofítica, com cristais de plagioclásio levemente orientados. Foram identificados dois grupos destas rochas com composição mineralógica distinta. O primeiro deles é composto por labradorita ($\pm 50\%$) e actinolita ($\pm 50\%$) como minerais principais, além de hornblenda e opacos como traços. O plagioclásio (labradorita) apresenta bordas com cominuição e está envolvido pelo anfibólio (actinolita), conforme a [Figura 5-7\(B\)](#). O segundo grupo é composto por hornblenda ($\pm 55\%$), andesina ($\pm 30\%$) e quartzo ($\pm 15\%$), com cristais euédricos de hornblenda em contato suturado com cristais de plagioclásio (andesina).

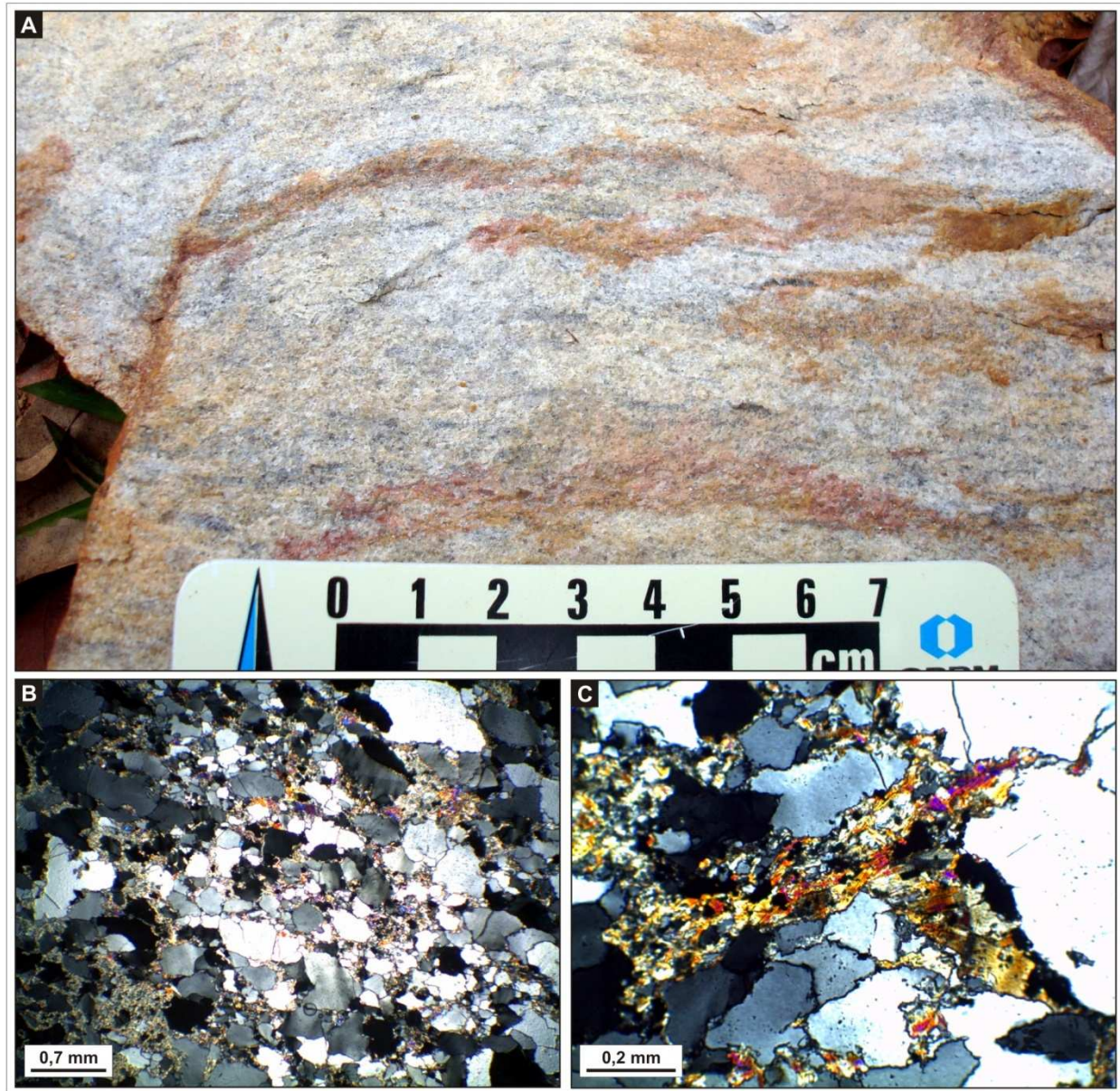


Figura 5-6. (A) Muscovita quartzito foliado com planos de foliação marcados pelas micas; (B) fotomicrografia (luz polarizada) evidenciando textura granolepidoblástica; (C) fotomicrografia (luz polarizada) mostrando a muscovita intersticial em volta dos cristais de quartzo.

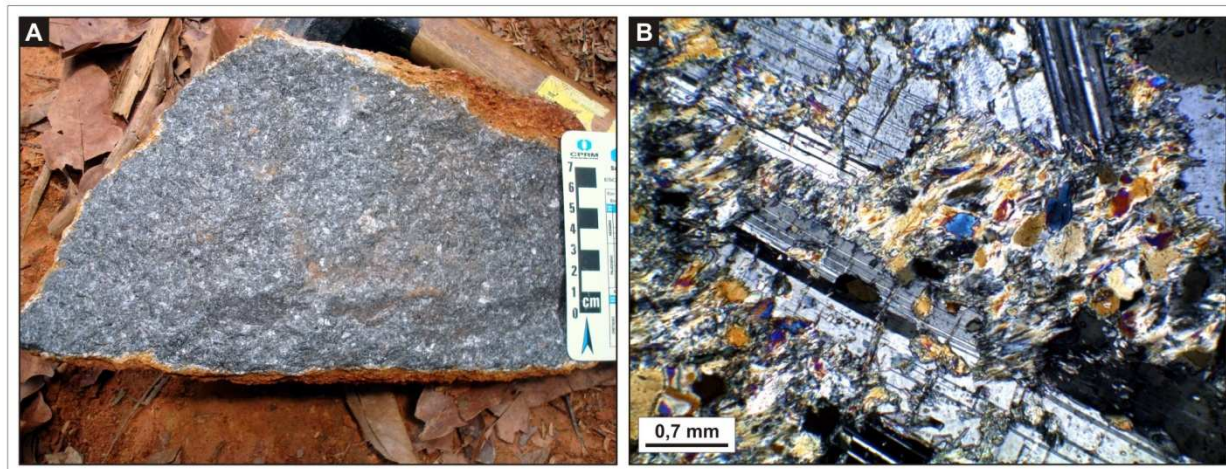


Figura 5-7. (A) Amostra de metagabro com cristais de plagioclásio levemente orientados; (B) fotomicrografia (luz polarizada) de metagabro com cristais de plagioclásio envolvidos por anfibólio.

5.2.3. Rochas Ácidas Sin- a Tardi-Colisionais

5.2.3.1. Tonalitos

Biotita tonalitos afloram na área sob a forma de grandes blocos com acamamento composicional (S_0) marcado pela presença de níveis félsicos alternados por níveis mais máficos ([Figura 5-8\(A\)](#)). Os cristais são inequigranulares com granulação variando entre fina a grossa ([Figura 5-8\(C\)](#)). A composição mineralógica destas rochas apresenta oligoclásio ($\pm 45-48\%$), quartzo ($\pm 40\%$), microclínio ($\pm 5\%$) e biotita ($\pm 5-13\%$), além de clorita, alanita, epidoto, titanita, muscovita, carbonato e opacos como traços. Esses níveis de alternância têm entre 0,5 a 3 cm de espessura. Enclaves máficos com eixos de aproximadamente 1 m ([Figura 5-8\(B\)](#)) ocorrem dispostos paralelamente ao acamamento composicional. Embora a rocha possa comumente ser confundida com gnaiss, dada a alternância dos níveis de acamamento composicional reproduzir o aspecto do bandamento metamórfico, há alguns aspectos diagnósticos que excluem essa possibilidade. A forma idiomórfica dos cristais, que não apresentam características de metamorfismo, bem como a alternância mineralógica entre as camadas, podem ser consideradas como diagnósticas para definir o padrão como acamamento composicional.

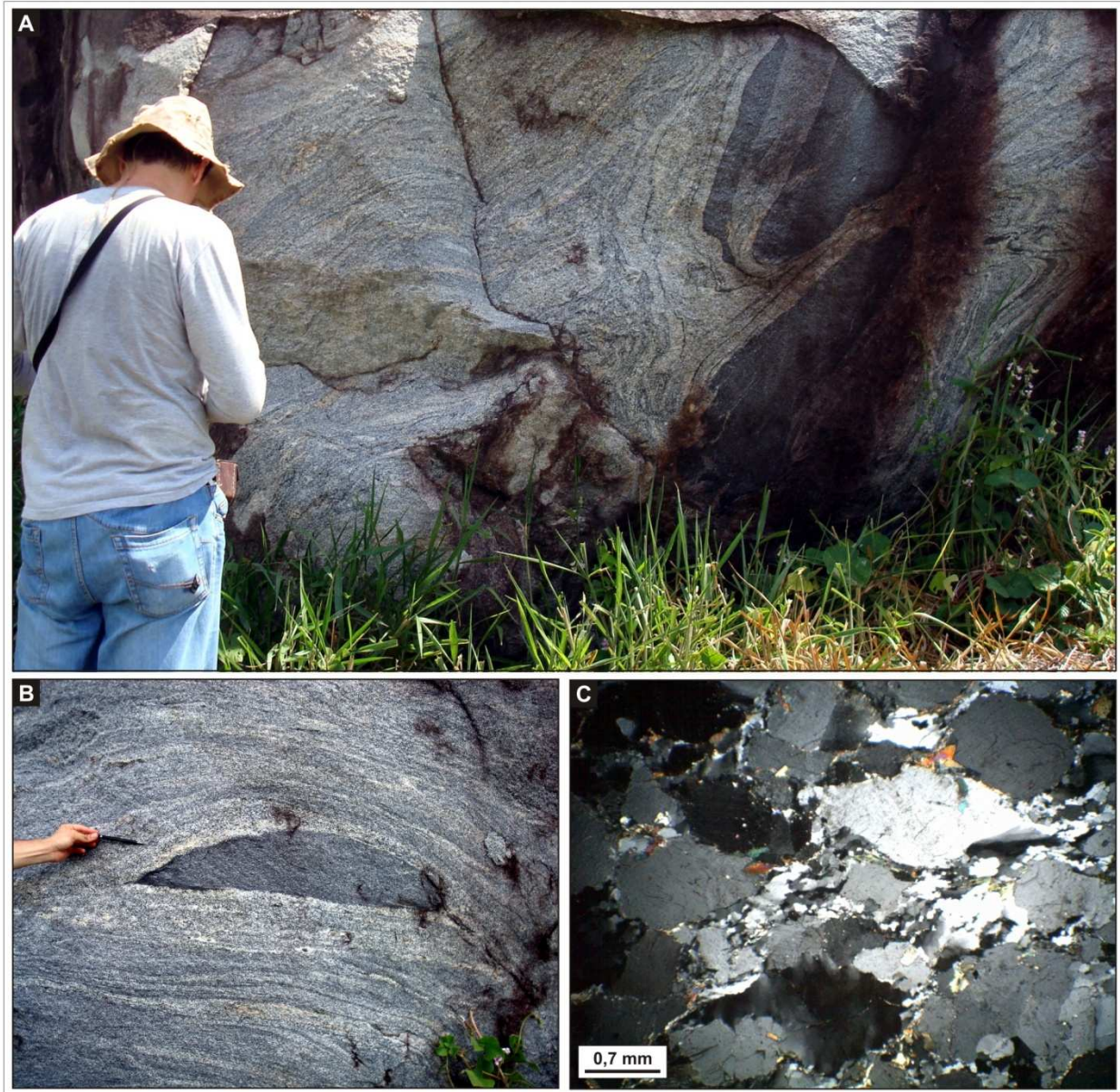


Figura 5-8. (A) Biotita tonalito com acamamento composicional magmático; (B) enclaves máficos envoltos pelo biotita tonalito; (C) fotomicrografia (luz polarizada) do biotita tonalito inequigranular.

5.2.3.2. Granodioritos

Os **leucogranodioritos** são encontrados em escala mesoscópica na forma de blocos rochosos com granulação fina a média, de coloração cinza esbranquiçado levemente rosada, e são pobres em máficos. Localmente, são observados planos de falha com estrias, além de veios pegmatóides com aproximadamente 10 cm de espessura. Em lâmina, apresentam textura granular

hipidiomórfica, e são compostos por oligoclásio ($\pm 45\%$), quartzo ($\pm 40\%$) e microclínio ($\pm 15\%$), além de biotita, clorita, apatita, opacos, zircão e titanita como elementos traços.

Titanita-hornblenda-biotita granodioritos, com granulação fina e cor cinza claro são observados na área estudada ([Figura 5-9\(A\)](#)). Em lâmina foram identificados minerais de oligoclásio ($\pm 35\%$), quartzo ($\pm 30\%$), microclínio ($\pm 15\%$), biotita ($\pm 10\%$), hornblenda ($\pm 5\%$) e titanita ($\pm 5\%$), além de opacos, alanita, zircão e apatita como minerais traços. A disposição dos cristais de biotita, juntamente com cristais de quartzo deformados, desenvolve uma foliação homogênea e retilínea moderada. Observam-se, ainda, veios preenchidos por quartzo e feldspato.

Outro litotipo identificado foi o **titanita-biotita granodiorito protomilonítico**, que aflora sob a forma de grandes blocos rochosos de coloração cinza claro, levemente rosado, com granulação média ([Figura 5-9\(B\)](#)). Estas rochas são compostas por oligoclásio ($\pm 37\%$), quartzo ($\pm 35\%$), microclínio ($\pm 15\%$), biotita ($\pm 11\%$) e titanita ($\pm 2\%$), além de apatita, zircão, epidoto, clorita e opacos como minerais traços. A orientação preferencial dos minerais máficos e o achatamento dos cristais de quartzo produzem uma foliação moderada. Foram observados ainda veios com espessura entre 0,5 e 2 cm de microgranito cinza rosado com foliação incipiente marcada pela fraca orientação preferencial de máficos. Além disso, foram identificados veios preenchidos por material pegmatóide composto por quartzo e feldspato, com foliação mais intensa e paralela à foliação do granodiorito hospedeiro. Eventualmente, foram encontrados diques pegmatíticos com aproximadamente 1 m de espessura, pobre em máficos, constituídos de quartzo e feldspato alcalino com textura gráfica bem desenvolvida.

Os **biotita-hornblenda granodioritos protomiloníticos** apresentam coloração cinza médio, e granulação média. Estas rochas são compostas por oligoclásio ($\pm 35\%$), quartzo ($\pm 30\%$), microclínio ($\pm 20\%$), hornblenda ($\pm 10\%$), biotita ($\pm 5\%$), além de alanita, epidoto, zircão, apatita e opacos como minerais traços. Uma leve orientação dos minerais máficos concomitantemente com a geometria dos cristais de quartzo resulta em uma foliação moderada ([Figura 5-9 \(C\)](#)).

Biotita-hornblenda granodioritos apresentam cor cinza médio e granulação média. São compostos por oligoclásio ($\pm 35\%$), quartzo ($\pm 30\%$), microclínio ($\pm 15\%$), hornblenda ($\pm 10\%$), biotita ($\pm 10\%$), além de titanita, epidoto, zircão, apatita e opacos como minerais traços. O arranjo dos minerais forma uma estrutura maciça na rocha.



Figura 5-9. (A) Titanita-hornblenda-biotita granodiorito evidenciando foliação forte marcada pela orientação da biotita; (B) titanita-biotita granodiorito protomilonítico com veio quartzo-feldspático discordante à foliação; (C) fotomicrografia (luz polarizada) de biotita-hornblenda granodiorito protomilonítico, mostrando recristalização do quartzo.

Outro litotipo observado é o **biotita granodiorito**, com cor cinza claro mostrando intercalações de mobilizados leucocráticos. Em lâmina, foram observados oligoclásio ($\pm 48\%$), quartzo ($\pm 30\%$), microclínio ($\pm 15\%$), biotita ($\pm 5\%$), além de clorita, alanita, epidoto, titanita, apatita e opacos como minerais traços. Foram observadas porções ricas em máficos com formas

elípticas ou semicirculares, além de enclaves monzodioríticos nestas rochas. A foliação é moderada, e definida pela alternância de níveis ricos em máficos e níveis quartzo feldspáticos.

Biotita granodioritos protomiloníticos foram encontrados na forma de grandes blocos com cor cinza claro e granulação variando entre média a grossa, o que caracteriza a textura heterogranular. Os cristais maiores são subédricos de plagioclásio e feldspato potássico. A rocha é composta por oligoclásio ($\pm 40\%$), quartzo ($\pm 32\%$), microclínio ($\pm 20\%$), biotita ($\pm 5\%$), além de alanita, apatita, zircão e epidoto como minerais traços. Foram observados, ainda, enclaves máficos com formato subcircular com 5 a 10 cm de comprimento, no interior deste granodiorito. Veios de quartzo-feldspato também se apresentam discordantes a estas rochas. Em alguns blocos o acamamento primário foi preservado, com camadas de aproximadamente 0,5 cm, marcadas pela intercalação entre de cristais com granulação grossa e cristais com granulação média, estes últimos contendo fenocristais de feldspato alcalino. O acamamento também é desenhado pela presença de níveis finos e descontínuos de biotita. Uma foliação ocorre paralelamente ao acamamento, marcada pela orientação preferencial de minerais máficos, dos cristais grossos e subédricos de feldspato alcalino e pela geometria do quartzo.

5.2.3.3. Monzogranitos

Dentre as rochas monzograníticas, foram identificados **leucomonzogranitos** que apresentam granulação variando entre fina a média e cor entre rosa e cinza claro. Os diversos afloramentos mapeados deste litotipo apresentam composições mineralógicas equivalentes, com alguma variação quanto à contribuição em percentagem de cada um desses minerais. Nesse sentido, foram observados como minerais principais oligoclásio ($\pm 15-40\%$), quartzo ($\pm 20-40\%$), microclínio ($\pm 30-50\%$) e biotita ($\pm 0-5\%$), além de diversos minerais traços, tais como: biotita, muscovita, clorita, alanita, epidoto, titanita, apatita, zircão e opacos. A orientação dos minerais máficos, juntamente com moderado achatamento do quartzo, produz uma foliação fraca a moderada. Localmente foram observadas porções pegmatóides compostas por quartzo e feldspatos centimétricos a decimétricos. Enclaves de cor cinza escuro, rico em biotita, com forma elíptica, foram observados dispostos paralelamente à foliação da rocha hospedeira. Estes enclaves também apresentam foliação paralela à rocha hospedeira. Há a concentração de cristais grossos de magnetita em porções quartzo feldspáticas. Ocasionalmente, foram observados veios de

quartzo discordantes à foliação, com aproximadamente 2 cm de espessura, além de cristais médios euédricos de magnetita. Outras feições encontradas foram *tension-gashes* ([Figura 5-10\(A\)](#)), chegando até aproximadamente 5 cm de espessura ([Figura 5-10\(B\)](#)), formada entre veios quartzo-feldspáticos com cerca de 4 cm de espessura, evidenciando cisalhamento sinistral.

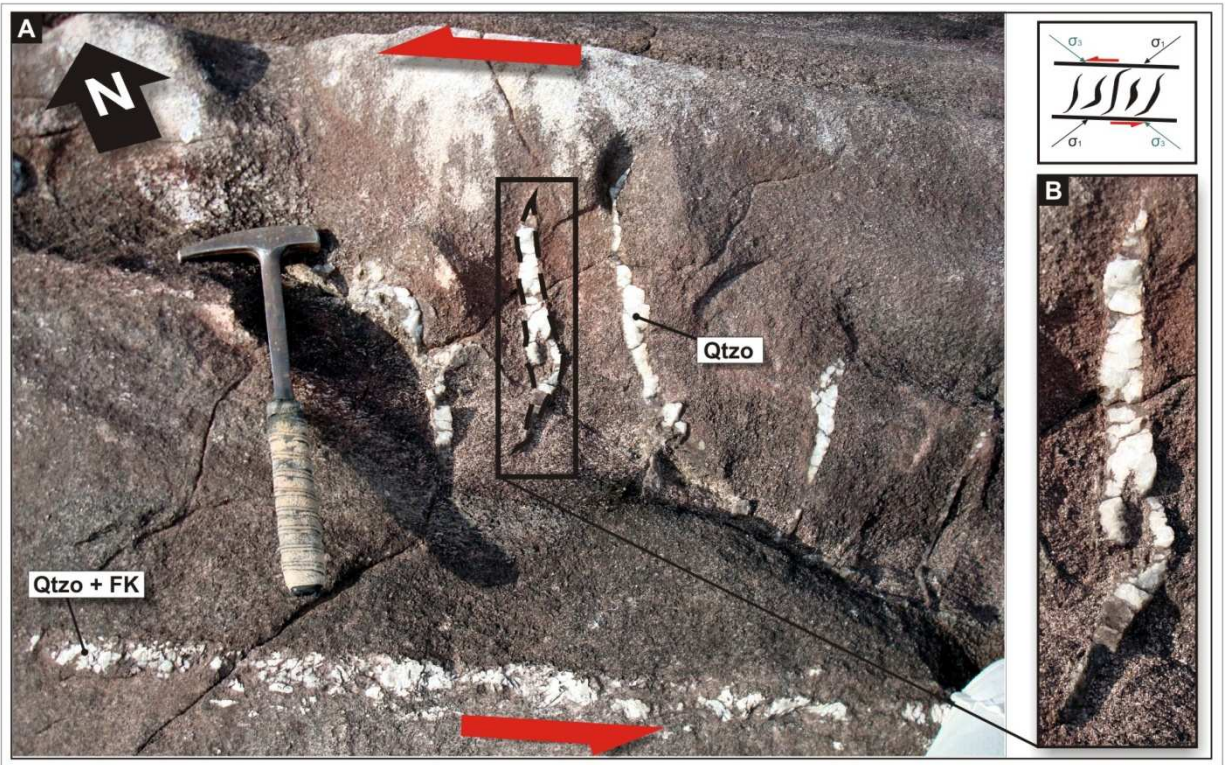


Figura 5-10. *Tension gashes* em monzogranitos evidenciando movimentação de blocos em cinemática sinistral.

Também foram identificados **leucomonzogranitos protomiloníticos**, de cor variando entre cinza e rosa, inequigranular, com granulação variando entre fina a média. São compostos por oligoclásio ($\pm 35\%$), quartzo ($\pm 35\%$) e microclínio ($\pm 30\%$), além de biotita, clorita, muscovita, carbonato, epidoto, titanita e opacos como minerais traços. O acamamento S_0 foi observado a partir da alternância de níveis com diferente porcentagem de minerais máficos. Além disso, foi observada foliação moderada S_1 , definida pela orientação de biotita e geometria do quartzo. Veios pegmatóides quartzo-feldspáticos encontram-se discordantes ao acamamento e à foliação.

Biotita-hornblenda monzogranitos afloram na forma de enclaves elípticos a semicirculares hospedados em biotita granodiorito ([Figura 5-11\(A\)](#)). Nas bordas, mostram o desenvolvimento de camadas com aproximadamente 1 cm de espessura, compostas por plagioclásio ([Figura 5-11\(B\)](#)). Esses monzogranitos apresentam granulação fina, cor rosa acinzentada e são compostos por microclínio ($\pm 30\%$), oligoclásio ($\pm 25\%$), quartzo ($\pm 25\%$), hornblenda ($\pm 12\%$) e biotita ($\pm 6\%$) como minerais principais ([Figura 5-11\(C\)](#)). Além disso, foram observados clorita, epidoto, zircão, apatita, titanita e opacos como minerais traços.

Outro litotipo aflorante é representado por **hornblenda-biotita monzogranitos**, que ocorrem na forma de blocos cor cinza claro, levemente rosado e granulação fina a média. São compostos por microclínio ($\pm 40\%$), quartzo ($\pm 35\%$), oligoclásio ($\pm 20\%$), e biotita ($\pm 5\%$), além de hornblenda, clorita, epidoto, zircão, apatita e opacos como traços. O acamamento composicional moderado a forte é definido pela alternância de níveis ricos em minerais máficos e níveis quartzo-feldspáticos. A foliação S_1 é paralela ao acamamento S_0 , e marcada pela orientação preferencial de minerais máficos e pela geometria dos cristais de quartzo.

5.2.3.4. Sienogranitos

Foram registrados na área de estudo **leucosienogranitos** inequigranulares com granulação fina a média. Essas rochas são compostas por microclínio ($\pm 50\%$), quartzo ($\pm 35\%$), oligoclásio ($\pm 15\%$), além de muscovita, epidoto, clorita e opacos como minerais traços. A foliação é penetrativa e apresenta atitude 120°Az subvertical. Veios quartzo-feldspáticos subparalelos à foliação foram observados com espessura de aproximadamente 5 cm. Uma falha com direção N-S 80°E está disposta discordante aos planos de foliação e desloca os veios quartzo-feldspáticos ([Figura 5-12](#)).

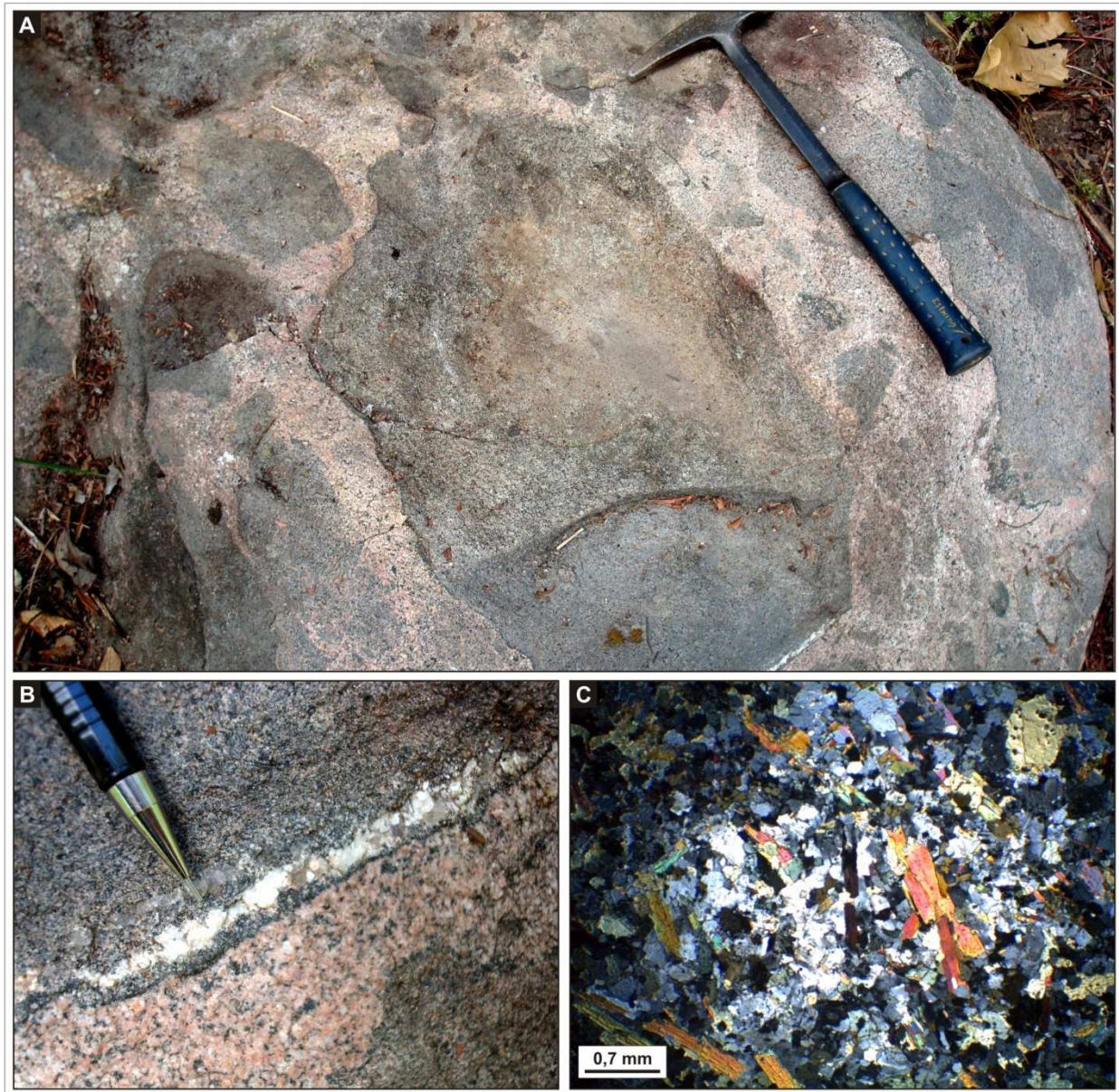


Figura 5-11. (A) Enclaves semicirculares de biotita-hornblenda monzogranitos hospedados em granodioritos; (B) detalhe evidenciando borda de plagioclásio nos enclaves; (C) fotomicrografia (luz polarizada) de biotita-hornblenda monzogranitos, onde cristais alongados de hornblenda e biotita estão envoltos por cristais de microclínio, oligoclásio e quartzo.

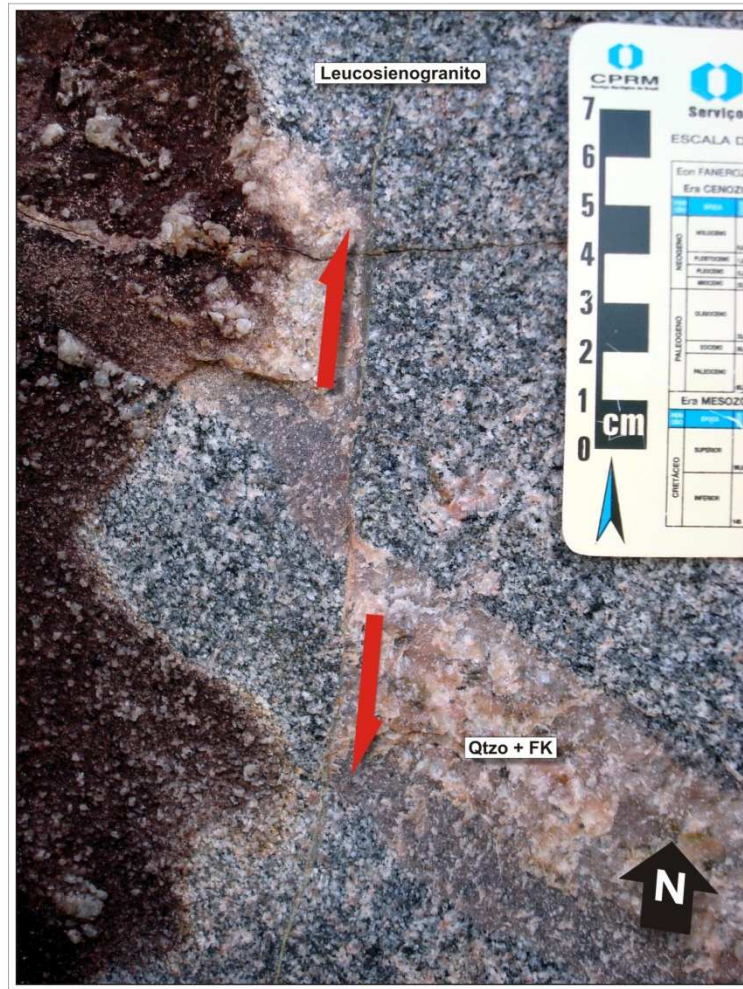


Figura 5-12. Falha destal com direção N-S 80°/E deslocando veio quartzo-feldspático disposto segundo 120 Az subvertical.

5.2.3.5. Sienitos

Hornblenda-álcali-feldspato sienitos apresentam coloração cinza rosado e granulação fina a média. Esta rocha possui como minerais principais microclínio ($\pm 90\%$) e hornblenda ($\pm 10\%$), além de apatita, epidoto e zircão como minerais traços. Uma foliação fraca a moderada é definida, principalmente, pela orientação dos minerais máficos. Observam-se, ainda, cloritização de minerais máficos e oxidação do feldspato alcalino próximo aos planos de falha.

5.2.4. Coberturas Fanerozóicas

5.2.4.1. Diabásios

Diques compostos por **diabásios** foram encontrados ao longo da área de estudo, na forma de blocos ([Figura 5-13\(A\)](#)). Essas rochas, de coloração cinza esverdeada, são compostas por labradorita ($\pm 60\%$), augita ($\pm 15\%$), opacos ($\pm 10\%$), diopsídio ($\pm 5\%$), biotita ($\pm 5\%$), actinolita ($\pm 5\%$) além apatita como mineral traço. Próximo às exposições destas rochas em campo, a coloração do solo é fortemente avermelhada. Em lâmina, os diabásios apresentam textura ofítica a sub-ofítica ([Figura 5-13\(B\)](#)).

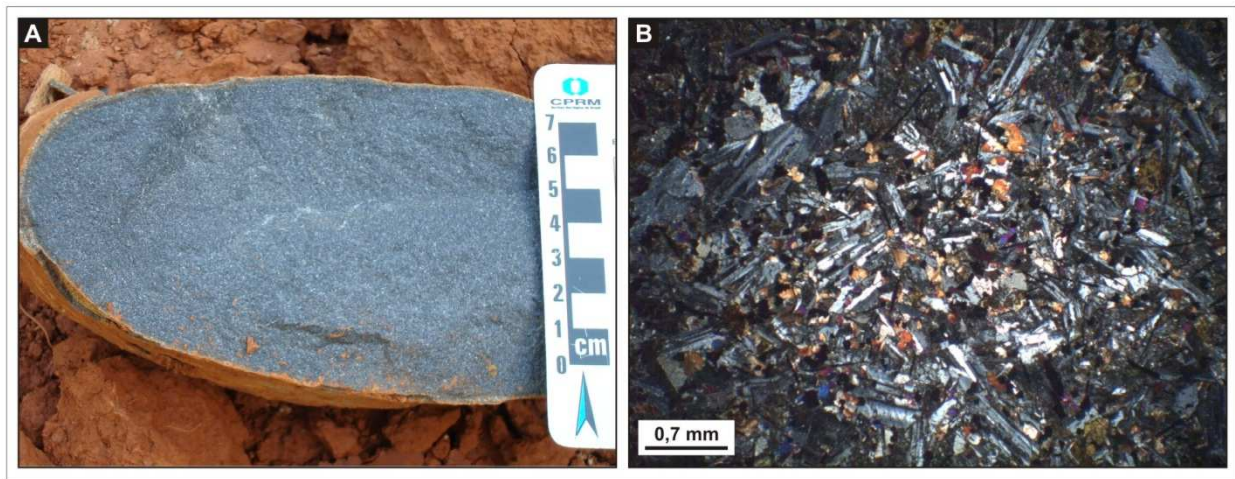


Figura 5-13. (A) Blocos de diabásios ; (B) fotomicrografia (luz polarizada) evidenciando textura sub-ofítica no diabásio.

5.2.4.2. Lateritas

Crostras lateríticas com estrutura de foliação protólita remanescentes foram encontradas, principalmente nas proximidades ou nos domínios da Serra das Três Palmeiras ([Figura 5-14\(A\)](#)). Em algumas situações, estas crostras aparecem próximas a blocos de anfibolitos. Em lâmina, estas rochas são compostas exclusivamente por óxidos ferro e manganês ([Figura 5-14\(B\)](#)).

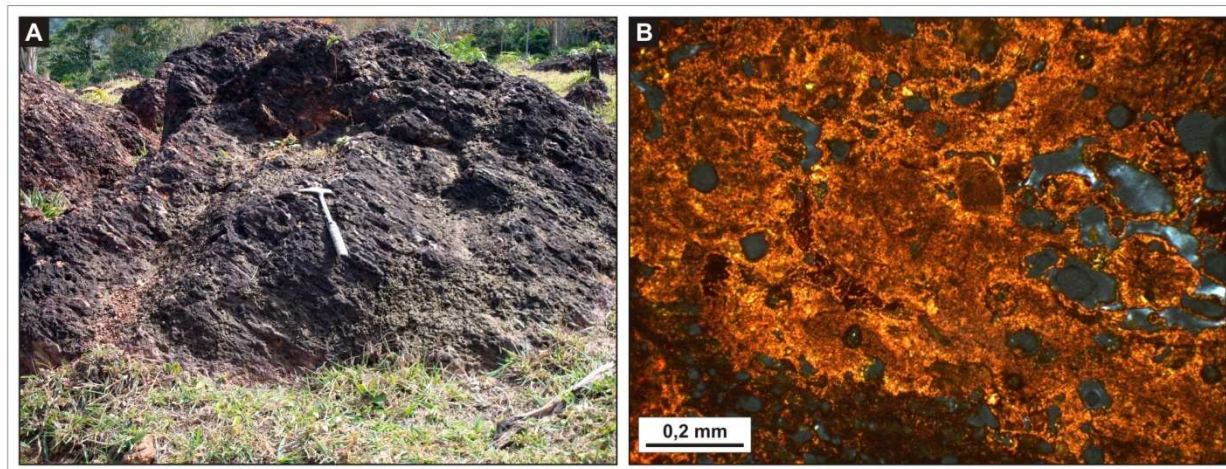


Figura 5-14. (A) Afloramento de laterita com planos de foliação preservados; (B) fotomicrografia (luz polarizada) da laterita com óxidos ferro e manganês.

5.3. GEOQUÍMICA DA REGIÃO CENTRO-LESTE DO DOMÍNIO BACAJÁ

Embora a proposta de modelagem desta pesquisa tenha utilizado dados aerogeofísicos e SAR, a caracterização quanto aos elementos constituintes das rochas presentes no Domínio Bacajá é fundamental para a validação da modelagem que será apresentada no Capítulo 6. Por isso, além das análises petrográficas para caracterização dos litotipos, será discutido neste tópico o comportamento de alguns destes litotipos a partir de análises químicas.

As análises de 30 amostras coletadas em campo foram realizadas no Laboratório de Geoquímica Analítica do Instituto de Geociências da UNICAMP. A preparação das amostras foi realizada a partir da trituração e moagem, determinação da perda ao fogo, preparação de discos de vidro e pastilhas prensadas e análise química por espectrometria de fluorescência de raios X (Philips, PW 2404, Holanda). Os elementos traços foram determinados em pastilhas prensadas e os elementos maiores e menores em discos de vidro. Para o controle de qualidade dos resultados, a amostra “CCA-08” foi duplicada na preparação durante a etapa de moagem; um disco de vidro de um material de referência interno (BRP-1) foi confeccionado e três amostras de materiais de referência internacionais (RGM-1, WSE e BE-N) foram analisadas em paralelo. Os valores obtidos e os recomendados são reportados na [Tabela 5-1](#). Para a amostra CCA-54, que tem uma composição bastante diferente das demais, foi necessária uma preparação do disco de vidro de forma diferenciada e análise no programa Uniquant para todos os elementos.

5.3.1. Comportamento das Rochas Félsicas a partir dos Minerais Normativos

A composição dos minerais normativos a partir do cálculo normativo foi lançado por [Cross et al. \(1902\)](#), como um método de classificação geoquímica de rochas ígneas, sendo chamado atualmente como a “Norma CIPW”.

Dada a identificação de diversos litotipos de rochas ácidas pelas análises petrográficas, a caracterização geoquímica pode auxiliar na compreensão das relações entre esses litotipos. A partir do cálculo dos minerais normativos em rochas ácidas, é possível observar grupamentos com características geoquímicas similares. Estes grupamentos representariam, então, domínios de rochas que são o objeto de estudo desta pesquisa.

Para o cálculo dos minerais normativos das rochas ígneas analisadas, utilizou-se o método proposto por [Johannsen \(1931\)](#), que consiste, sinteticamente, em quatro processos: (i) converter a composição química analisada em proporção molecular de óxidos; (ii) compor provisoriamente os minerais normativos; (iii) compensar a deficiência em sílica resultante do processo anterior por meio da decomposição dos certos minerais provisórios já calculados; e (iv) reconverter os minerais normativos calculados em proporção molecular para porcentagem de peso. As etapas citadas foram utilizadas a partir do algoritmo desenvolvido por Kurt Hollocher (Geology Department, Union College, Schenectady, NY, USA).

[Rollinson \(1993\)](#) afirma que a composição normativa em um diagrama An-Ab-Or fornece estimativas mais acuradas sobre a composição do feldspato que a classificação modal, pelo fato de evidenciar também soluções sólidas no feldspato. Dessa forma, o diagrama pode ser utilizado, com cautela, em rochas graníticas deformadas e metamorfisadas, possibilitando a estimativa dos tipos de magma originais. A classificação das rochas graníticas analisadas por petrografia foi realizada de acordo com os minerais normativos da composição An-Ab-Or ([Barker 1979](#)) .

Tabela 5-1. Análises químicas por fluorescência de raios X das rochas da região centro-leste do Domínio Bacajá.

Elementos	LAT	LONG	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	MnO	Ba	Cr	Cs	Ga	Nb	Rb	Sc	Sn	Sr	Th	U	V	Zr	Y	Cu	Pb	Zn	Ni
Amostras			%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
CCA-03	-3,75092	-51,04671	48,04	13,3	15,17	6,4	10,85	2,37	0,42	2,349	0,225	0,23	100	165	<7	21	8,8	14,9	47	<3	148	<2	<3	382	164	48	220	3,4	102	83
CCA-08A	-3,70181	-51,00260	50,07	12,75	15,93	5,34	9,37	2,37	0,82	2,276	0,237	0,232	229	52	<7	24	14,4	25	44	<3	178	3,8	<3	383	180	47	153	3,5	124	45
CCA-08B	-3,70181	-51,00260	49,75	12,64	15,98	5,34	9,38	2,35	0,79	2,321	0,24	0,234	226	48	<7	23,7	14,3	24,3	48	<3	178	5,8	<3	396	181	49	158	4,7	126	48
CCA-08	-3,70181	-51,00260	49,91	12,7	15,95	5,34	9,38	2,36	0,8	2,298	0,238	0,233	227	50	<7	23,9	14,4	24,7	46	<3	178	4,8	<3	389	181	48	156	4,1	125	47
CCA-12	-3,74990	-51,04685	73	13,53	2,02	0,32	1,09	3,09	5,73	0,258	0,054	0,029	1198	8,4	<7	16,4	11,1	255	<3	4	213	65	3	13,6	242	14,4	2,1	42	44	<1,5
CCA-13	-3,69504	-51,04565	73,97	13,66	1,32	0,21	1	3,16	5,54	0,104	0,032	0,018	1321	6,4	7	13,8	3,9	198	<3	3	304	40	8	16,1	131	9,4	<1,5	29,1	21,9	<1,5
CCA-18	-3,61443	-51,09874	72,11	13,75	2,41	0,43	1,08	3,08	5,58	0,347	0,093	0,043	1245	6,2	<7	14,9	11,3	207	<3	3	204	43	<3	18	303	17	2,5	28,7	55	2,2
CCA-22	-3,83476	-51,14867	49,01	14,5	12,42	8,32	12,05	1,66	0,3	0,779	0,03	0,166	51	303	<7	15,2	1,1	5,2	45	<3	93	<2	<3	267	24,9	15,7	50	2,2	58	174
CCA-23B	-3,81503	-51,13636	48,61	13,06	14,45	8,53	12,1	1,44	0,21	0,895	0,046	0,208	14,3	261	<7	17,8	1,7	11,3	53	<3	99	<2	<3	294	22,2	17,4	5,9	5,2	104	138
CCA-24	-3,78769	-51,12055	47,52	14,9	11,28	6,43	14,46	1,37	0,51	0,717	0,166	0,182	190	151	<7	28,6	3,7	15,4	28	3	668	4,7	<3	224	77	13,4	96	9,8	85	50
CCA-25	-3,78195	-51,11873	62,18	15,46	6,09	1,78	3,82	4,04	3,46	1,553	0,646	0,078	1413	30	<7	25,4	29,4	171	8	5	495	15,4	7	74	591	24,1	23,2	35	138	13,7
CCA-29	-3,64848	-51,09427	75,06	13,64	0,76	0,25	1,8	4,06	3,19	0,099	0,03	0,016	766	2,6	<7	14,1	4,2	149	<3	<3	322	22,2	<3	8,1	107	3	3,2	24,8	17,6	<1,5
CCA-36	-3,69311	-51,23862	74,54	13,17	1,25	0,12	0,78	3,33	5,19	0,129	0,024	0,03	504	4,6	9	17,8	16,6	339	<3	6	107	42	6	8,7	107	23,6	2	52	28,3	<1,5
CCA-37A	-3,67502	-51,23509	70,4	15,12	2,79	0,64	2,89	4,91	1,42	0,367	0,097	0,033	318	14	<7	18,6	9,4	84	5	<3	333	6,6	<3	22,2	185	6,1	3,8	9,6	60	1,8
CCA-37B	-3,67503	-51,23510	60,19	17,13	7,83	1,85	3,42	4,61	2,62	1,186	0,255	0,082	843	7,1	10	21,4	8,3	223	7	4	356	3,7	<3	96	138	11,9	24,2	11	162	6,9
CCA-38	-3,62114	-51,22769	72,36	14,49	1,99	0,4	2,13	3,87	3,7	0,226	0,058	0,023	1329	6	<7	17,8	6,4	109	3	3	209	10,1	<3	13,7	163	5,4	1,2	12,5	39	<1,5
CCA-44A	-3,59790	-51,40872	71,57	14,93	2,83	0,72	2,76	4,84	1,62	0,303	0,085	0,04	500	13,3	<7	19,3	8,1	107	5	<3	262	7,6	<3	22,5	133	8,3	2,6	18,6	52	5,9
CCA-44B	-3,59791	-51,40873	53,15	14,59	6,89	6,31	5,41	2,17	6,95	1,068	1,333	0,094	9461	116	<7	15,3	9,4	237	9	7	2536	10,9	4	88	386	18,2	9,3	24,3	118	32
CCA-45	-3,63606	-51,40536	69,65	14,74	2,71	1,07	2,73	4,47	2,43	0,29	0,11	0,048	614	23,4	<7	18,4	6,8	109	5	<3	475	12,6	3	39	108	18	8,9	14,9	50	10,6
CCA-46	-3,78585	-51,50611	78,04	11,89	0,7	0,09	0,51	2,54	5,59	0,098	0,011	0,008	139	3,9	<7	8,1	0,8	83	<3	<3	39	2	<3	6,1	48	4,9	4,3	17,2	14,7	<1,5
CCA-50	-3,69178	-51,35044	72,81	13,91	2,09	0,41	1,89	3,92	3,43	0,221	0,061	0,036	562	6	<7	15	10,4	145	4	<3	138	12,1	<3	16,8	146	13,5	1,6	15,9	46	<1,5
CCA-52	-3,70338	-51,35618	48,76	12,51	16,58	5,14	8,7	2,54	1,15	3,666	0,607	0,213	232	41	<7	24,5	22,9	26,2	33	<3	263	2,7	<3	425	288	50	326	3,8	127	58
CCA-53	-3,75354	-51,37014	48,17	16,22	14	8,82	10,21	1,37	0,13	0,968	0,073	0,206	32	330	<7	20	2,4	9,6	49	<3	95	<2	<3	305	38	19	118	7	98	150
CCA-54	-3,77615	-51,37558	1,82	3,05	81,01	nd	0,04	nd	0,02	0,098	1,52	0,037	nd	nd	nd	nd	nd	nd	13	nd	nd	nd	nd	nd	15	46	645	nd	227	313
CCA-57	-3,65068	-51,13851	54,15	14,55	11,55	5	7,76	2,76	1,34	1,22	0,105	0,147	457	172	<7	19,7	3,7	54	20	<3	297	<2	<3	169	83	19,1	63	5,5	124	111
CCA-58	-3,64269	-51,13548	51,1	13,78	15,45	4,32	8,02	2,77	1,58	2,326	0,397	0,192	398	76	<7	20,6	13,4	56	29	<3	169	5,8	<3	279	244	50	118	9,9	131	48
CCA-60	-3,83156	-51,18300	50,19	15,8	10,72	7,07	11,58	1,88	0,29	0,791	0,108	0,144	69	18,8	<7	21,3	2,1	8	42	<3	199	3,1	<3	280	48	10,3	163	3,5	66	72
CCA-63	-3,76676	-51,33258	87,18	6,07	2,73	0,11	0,02	0,13	1,68	0,389	0,028	0,008	494	53	<7	7,7	3,9	62	3	<3	32	19,8	3	50	343	15,7	1,9	10,7	31	9,9
CCA-65	-3,80128	-51,34330	49,59	15,08	10,86	8,64	12,55	1,52	0,1	0,701	0,058	0,174	<7	783	<7	11,5	2,1	3,8	42	<3	91	<2	<3	249	44	17,7	93	4,5	71	147
CCA-66	-3,81604	-51,34617	71,84	13,96	2,94	0,61	2,39	3,47	3,46	0,313	0,081	0,048	784	9,9	7	16,3	10,2	139	4	4	112	23,1	<3	25,1	200	25,8	4,7	19,1	49	1,9
CCA-70	-3,74092	-51,28351	50,73	14,59	9,02	9,42	13,21	1,3	0,23	0,492	0,029	0,169	76	243	<7	15,9	1,7	7,4	40	<3	79	2,7	<3	209	39	13,2	132	4,9	57	76
CCA-71	-3,73570	-51,31809	75,1	13,15	0,88	0,12	0,59	3,63	4,81	0,096	0,028	0,026	413	4,9	16	16,1	19,3	333	3	5	102	47	17	3,5	87	13,8	2	69	18	<1,5

A [Figura 5-15](#) mostra a presença de quatro grupos principais. O primeiro, composto por seis amostras, mostra granitos relacionados àqueles descritos como leucomonzogranitos nas análises petrográficas. Um segundo grupo, composto por quatro amostras, está localizado na zona de transição entre o campo dos granitos e o campo dos granodioritos. Este grupo corresponde a monzogranitos e granodioritos identificados por petrografia. O terceiro grupo, composto por quatro amostras, está compreendido na interface entre granodioritos, tonalitos e trondjemitos. As amostras que compõem esse grupo foram descritas petrograficamente como tonalitos, granodiorito e monzogranito. Por fim, uma única amostra está localizada no campo dos tonalitos. No entanto, em termos petrográficos, essa amostra foi analisada como leucogranodiorito.

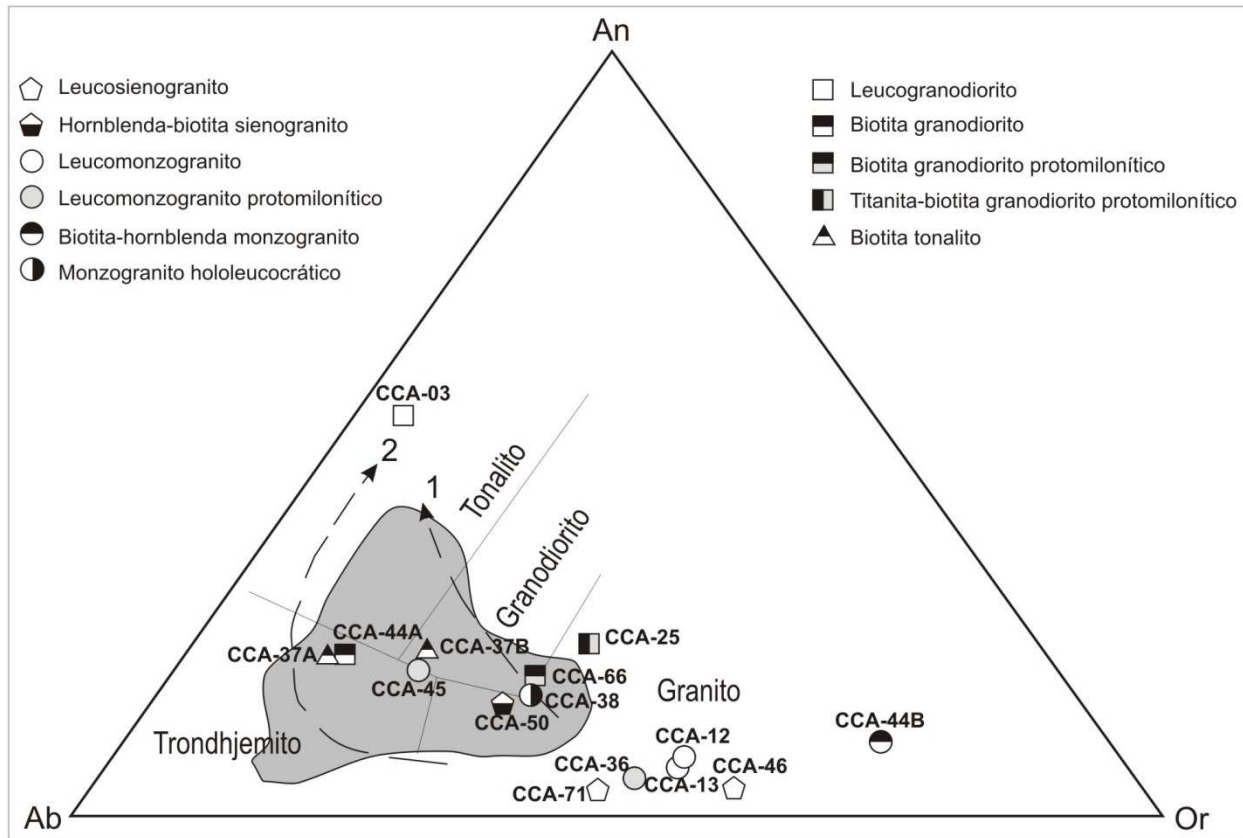


Figura 5-15. Classificação das rochas graníticas de acordo com a composição de minerais normativos An-Ab-Or ([Barker 1979](#)).

5.3.2. Comportamento das Rochas Máficas Plutônicas e Vulcânicas a partir dos Elementos Maiores

Para classificar as rochas máficas analisadas quanto às suas composições químicas utilizou-se o diagrama álcalis total *versus* sílica (TAS) (Cox *et al.* 1979, adaptado por Wilson 1989). A Figura 5-16 mostra que as cinco amostras de rochas máficas plutônicas analisadas apresentam composição gabróica. As amostras CCA-65 e CCA-70 correspondem aos metagabros e estariam enquadradas na série subalcalina ou tholeítica. Já as demais amostras, que estão próximas ao limite entre as séries subalcalina e alcalina, compreendem gabros sem evidências de metamorfismo.

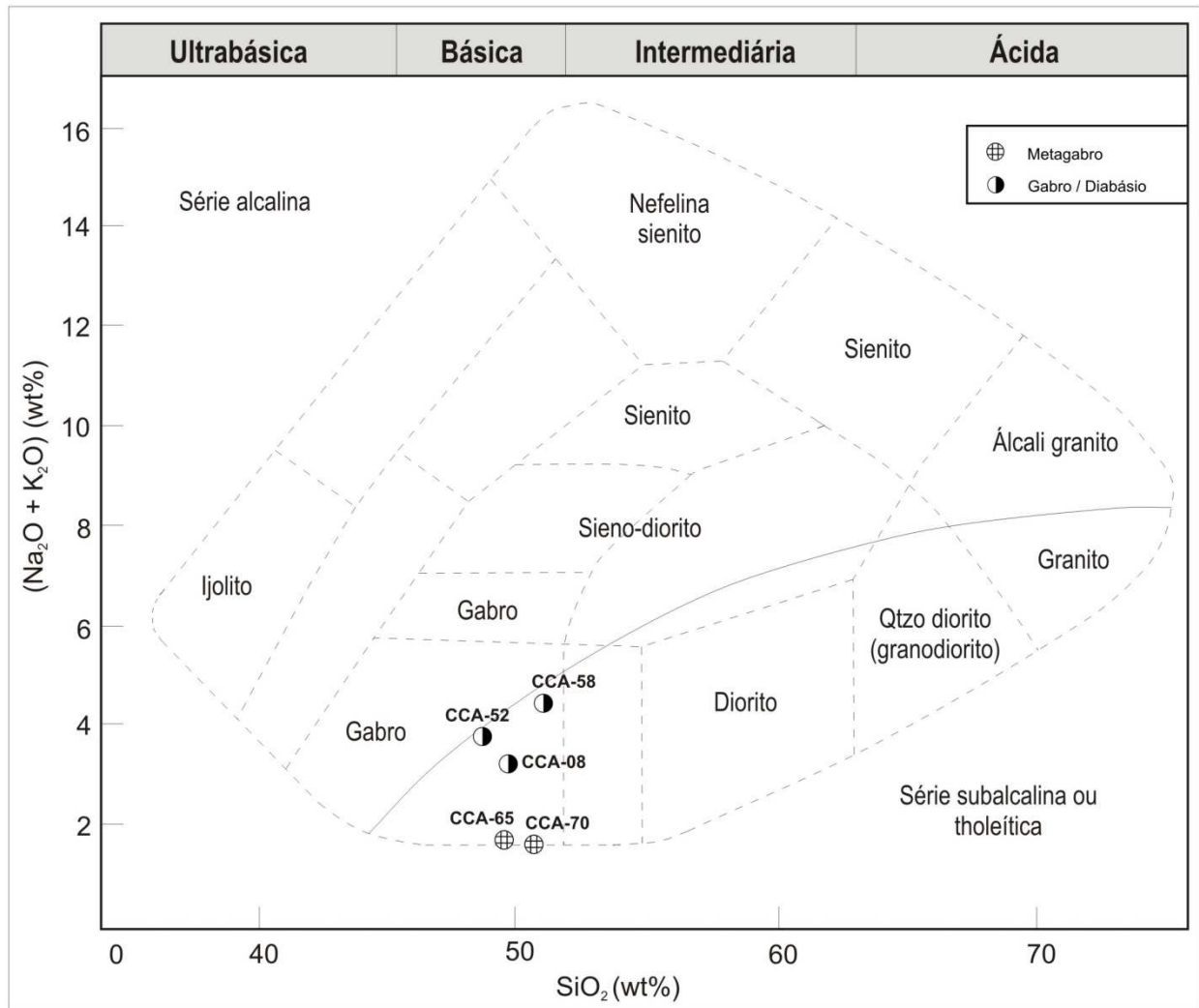


Figura 5-16. Amostras de rochas máficas plutônicas plotadas no diagrama TAS de classificação e nomeclatura para rochas plutônicas com base nos álcalis totais *versus* sílica (Cox *et al.* 1979, adaptado por Wilson 1989).

Em relação às rochas máficas vulcânicas observadas na [Figura 5-17](#), quatro amostras classificadas petrograficamente como anfibolitos, nas análises químicas apresentaram composição basáltica. Já a amostra CCA-57, também classificada petrograficamente como anfibolito a partir das análises químicas, apresenta composição equivalente a andesito basáltico.

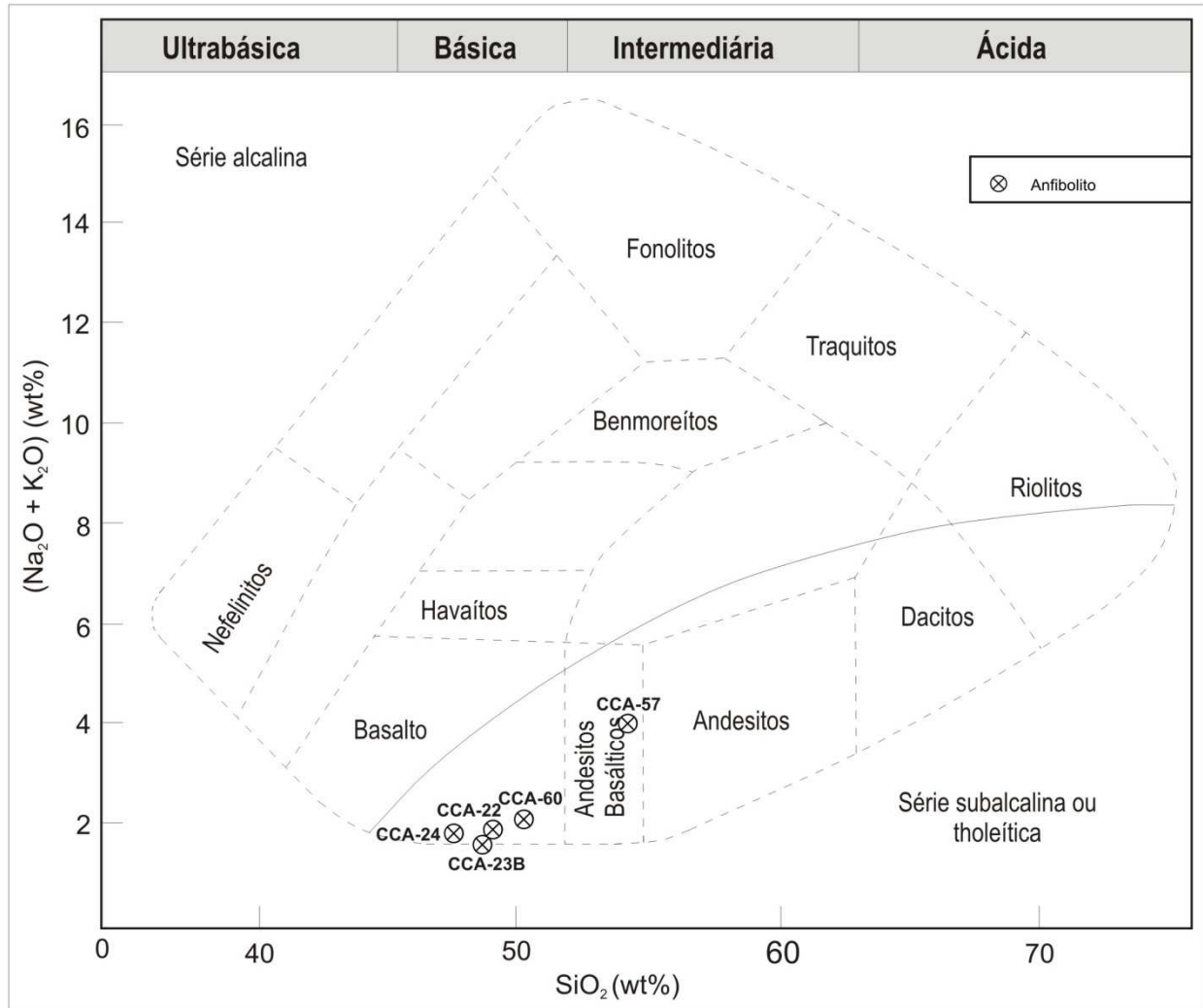


Figura 5-17. Amostras de rochas máficas vulcânicas plotadas no diagrama TAS de classificação e nomeclatura para rochas plutônicas com base nos álcalis totais *versus* sílica (Cox et al. 1979, adaptado por Wilson 1989).

5.3.3. *Ambiência Tectônica das Rochas Graníticas*

As rochas graníticas foram plotadas em diagramas (Pearce et al. 1984) para caracterização dos seus respectivos ambientes de formação ([Figura 5-18\(A\) e \(B\)](#)). Nesse sentido, as rochas

estão posicionadas em campos, preferencialmente, de granito de arco vulcânico (syn-COLG) e sin-colisional (VAG). Uma amostra de leucogranodiorito (CCA-03) está posicionada no campo de granito intra-placa.

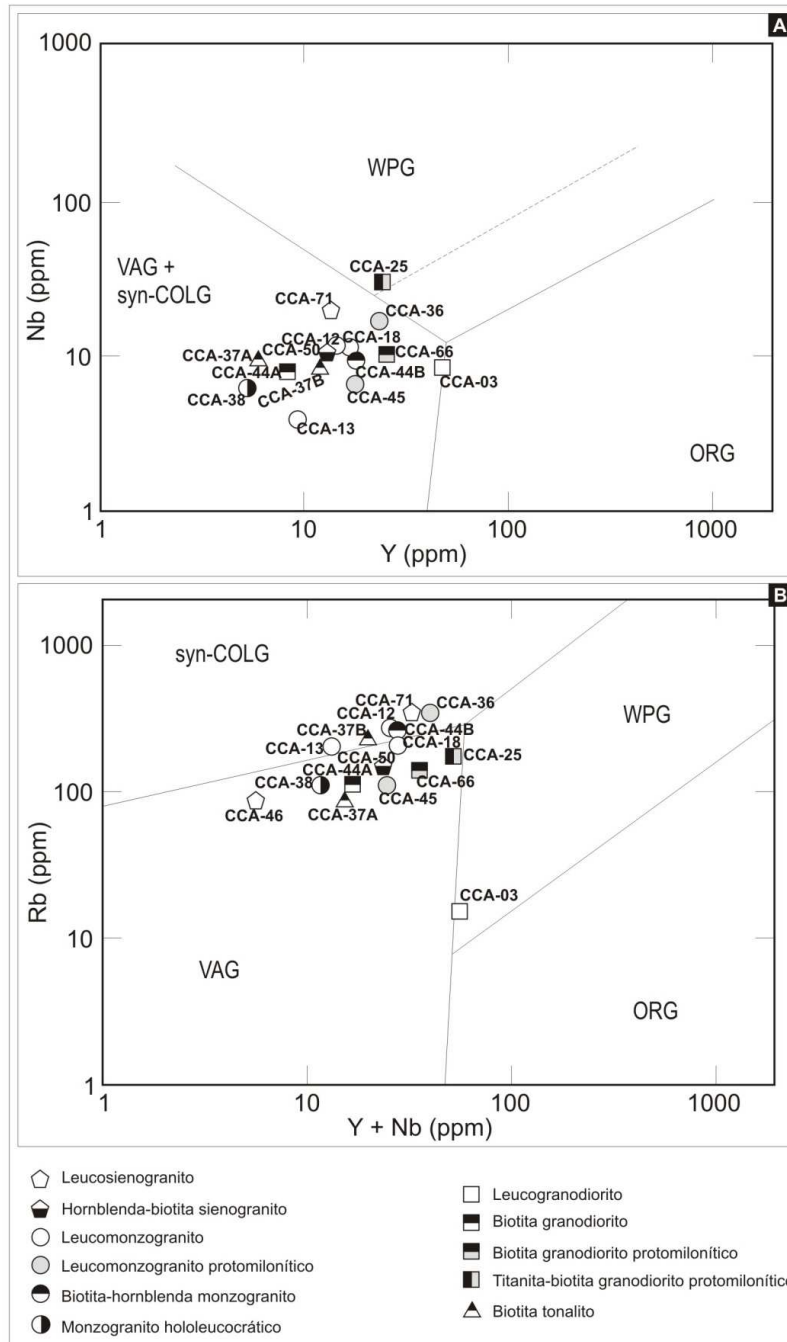


Figura 5-18. Diagramas para discriminação de granitos (Pearce *et al.* 1984), mostrando campos de granito de arco vulcânico (VAG), granito sin-colisional (syn-COLG), granito intra-placa (WPG) e granitos de cadeia meso-oceânica, baseado nas relações: (A) Nb-Y; e (B) Rb-(Y + Nb).

Capítulo 6

6. Modelos de Análise Espacial

Neste capítulo, serão discutidas duas modelagens espaciais de dados aerogeofísicos e suas aplicações ao mapeamento geológico, cada uma delas com objetivos distintos. A primeira modelagem, baseada em pertinência fuzzy, buscou selecionar áreas com maior potencial de ocorrência de rochas máficas e/ou ultramáficas, que representam a litologia hospedeira das mineralizações auríferas primárias na região de estudo. A segunda modelagem, baseada na técnica “Self-Organizing Maps” (SOM), teve seu enfoque no mapeamento das distintas unidades litológicas presentes. Os resultados obtidos mostram dois modelos que serão utilizados como suporte à discussão e interpretações apresentadas neste capítulo. Finalmente, é apresentado o mapa geológico da região centro-leste do Domínio Bacajá.

[Bonhan-Carter \(1994\)](#) define modelo como uma maneira simplificada de representar a realidade. Segundo esta definição, mapas geológicos, classificações, ou qualquer outra forma de mostrar parte da realidade a partir de símbolos, podem ser tratados como modelos. Modelagens realizadas em mapas disponíveis em ambiente SIG podem, portanto, ser classificadas em duas categorias principais: (i) guiado pelo conhecimento (*knowledge driven*); e (ii) guiado pelos dados (*data driven*).

Tendo em vista o mapeamento geológico das unidades aflorantes na região central do Domínio Bacajá em escala de 1:100.000, tornou-se necessária a utilização de ferramentas de modelagem espacial. Estas ferramentas geram representações capazes de adicionar informações quantitativas aos mapas gerados a partir da interpretação visual. A partir destas análises, torna-se possível a caracterização das unidades propostas com base nas suas características geofísicas, segundo os métodos magnetométrico e gamaespectrométrico. Esses resultados, quando analisados de forma integrada com os dados geológicos obtidos em campo fornecem os

elementos necessários à discussão de possíveis modelos de evolução geodinâmica para essa região, além de fornecer subsídios para a identificação de áreas potenciais à ocorrência de mineralizações auríferas.

Nos tópicos a seguir serão discutidos dois modelos de análise espacial de dados, que foram utilizados na compreensão do arcabouço geológico e do potencial aurífero da região estudada. O primeiro deles, guiado pelo conhecimento, foi empregado para delimitar a ocorrência de rochas máficas e ultramáficas, tidas como encaixantes das mineralizações auríferas (Essex S.A. 1998 citado em [Klein e Carvalho 2008](#)). No segundo modelo, guiado pelos dados, traz discussões quanto à constituição de classes com características similares que podem ser associadas a tipos litológicos semelhantes ou distintos. Neste segundo modelo, os possíveis ambientes potencialmente mineralizados também serão discutidos.

6.1. MODELAGEM DIRIGIDA PELO CONHECIMENTO

6.1.1. Introdução e caracterização do problema

Na área de estudo, são descritas rochas máficas e ultramáficas formando um conjunto litológico que hospeda a maioria das mineralizações auríferas conhecidas na região ([Jorge João *et al.* 1987](#), [Klein e Carvalho 2008](#), [Mineração Rio Jatobá 1986](#)). A disposição espacial desta unidade era discutida em função de levantamentos de campo, das quebras negativas de relevo obtidas a partir de dados de radar, além de imagens aerogeofísicas gamaespectrométricas adquiridas na década de 1970.

Os atributos gamaespectrométricos e magnetométricos das rochas máficas e ultramáficas são bem marcantes em imagens aerogeofísicas ([Tabelas 6-1 e 6-2](#), respectivamente). Conforme [Killen \(1979\)](#) e [Telford *et al.* \(1990\)](#), com exceção das rochas máficas álcali-feldspáticas, que apresentam teores mais elevados das medidas gamaespectrométricas, as demais rochas máficas e ultramáficas, intrusivas ou extrusivas, apresentam baixos valores gamaespectrométricas que contrastam com altas susceptibilidades magnéticas.

Tabela 6-1. Concentração dos radioelementos em diferentes tipos de rocha (modificado de [Killen 1979](#)), com destaque para as principais classes de rochas básicas e ultrabásicas.

Tipo de Rocha	Potássio (%)		Urânio (ppm)		Tório (ppm)	
	Média	Varição	Média	Varição	Média	Varição
Ácidas Extrusivas	3,1	1,0 - 6,2	4,1	0,8 - 16,4	11,9	1,1 - 41,0
Ácidas Intrusivas	3,4	0,1 - 7,6	4,5	0,1 - 30,0	25,7	0,1 - 253,1
Intermediárias Extrusivas	1,1	0,01 - 2,5	1,1	0,2 - 2,6	2,4	0,4 - 6,4
Intermediárias Intrusivas	2,1	0,1 - 6,2	3,2	0,1 - 23,4	12,2	0,4 - 106,0
Básicas Extrusivas	0,7	0,06 - 2,4	0,8	0,03 - 3,3	2,2	0,05 - 8,8
Básicas Intrusivas	0,8	0,01 - 2,6	0,8	0,01 - 5,7	2,3	0,03 - 15,0
Ultrabásicas	0,3	0 - 0,8	0,3	0 - 1,6	1,4	0 - 7,5
Alcali-feldspática Intermediária Extrusivas	6,5	2,0 - 9,0	29,7	1,9 - 62,0	133,9	9,5 - 265,0
Alcali-feldspática Intermediária Intrusivas	4,2	1,0 - 9,9	55,8	0,3 - 720,0	132,6	0,4 - 880,0
Alcali-feldspática Básica Extrusivas	1,9	0,2 - 6,9	2,4	0,5 - 12,0	8,2	2,1 - 60,0
Alcali-feldspática Básica Intrusiva	1,8	0,3 - 4,8	2,3	0,4 - 5,4	8,4	2,8 - 19,6
Rochas Sedimentares Químicas	0,6	0,02 - 8,4	3,6	0,03 - 26,7	14,9	0,03 - 132,0
Carbonatos	0,3	0,01 - 3,5	2,0	0,03 - 18,0	1,3	0,03 - 10,8
Rochas Sedimentares Detriticas	1,5	0,01 - 9,7	4,8	0,01 - 80,0	12,4	0,2 - 362,0
Rochas Ígneas Metamorfisadas	2,5	0,1 - 6,1	4,0	0,1 - 148,5	14,8	0,1 - 104,2
Rochas Sedimentares Metamorfisadas	2,1	0,01 - 5,3	3,0	0,1 - 53,4	12,0	0,1 - 91,4

O reconhecimento e delimitação espacial de unidades com constituintes máficos e/ou ultramáficos, dada a relevância metalogenética dessas unidades, auxiliariam nas interpretações seguintes em relação à gênese e evolução das unidades litoestratigráficas presentes na área estudada. O conhecimento prévio das propriedades geofísicas que caracterizam as rochas máficas e ultramáficas, aliado à disponibilidade dos dados aerogeofísicos para a área de estudo, tornou possível a realização de modelagem espacial para produzir uma proposta de representação da realidade, na forma de um mapa mostrando a distribuição espacial das áreas potencialmente relacionadas à ocorrências desses litotipos.

Tabela 6-2. Susceptibilidade magnética de minerais e rochas (modificado de [Telford et al. 1990](#)), com destaque para as propriedades magnéticas das rochas máficas e ultramáficas e para os minerais com maiores susceptibilidades.

Tipo de rocha	Susceptibilidade x 10 ³ (SI)	
	Faixa de variação	Média
Sedimentares		
Dolomito	0 - 0,9	0,1
Calcários	0 - 3	0,3
Arenitos	0 - 20	0,4
Folhelhos	0,01 - 15	0,6
Média de 48 exemplares	0 - 18	0,9
Metamórficas		
Anfibolito		0,7
Xisto	0,3 - 3	1,4
Filito		1,5
Gnaisse	0,1 - 25	
Quartzito		4
Serpentinito	3 - 17	
Ardósia	0 - 35	6
Média de 61 exemplares	0 - 70	4,2
Ígneas		
Granitos	0 - 50	2,5
Riolito	0,2 - 35	
Dolerito	1 - 35	17
Augita-sienito	30 - 40	
Olivina-diabásio		25
Diabásio	1 - 160	55
Pórfiros	0,3 - 200	60
Gabro	1 - 90	70
Basalto/Dolerito	0,2 - 175	70
Diorito	0,6 - 120	85
Piroxenito		125
Peridotito	90 - 120	150
Andesito		160
Média de ígneas ácidas	0 - 80	8
Média de ígneas básicas	0,5 - 97	25
Minerais		
Grafita		0,1
Quartzo		-0,01
Salgema		-0,01
Anidrita, gipsita		-0,01
Calcita	-0,001 - -0,01	
Carvão		0,02
Argilas		0,2
Calcopirita		0,4
Esfalerita		0,7
Cassiterita		0,9
Siderita	1 - 4	
Pirita	0,05 - 5	1,5
Limonita		2,5
Arsenopirita		3
Hematita	0,5 - 35	6,5
Cromita	3 - 110	7
Franklinite		430
Pirrotita	1 - 6000	1500
Ilmenita	300 - 3500	1800
Magnetita	1200 - 19200	6000

6.1.2. Técnica Fuzzy

Em uma análise *fuzzy*, o intervalo de dados originais é reescalado em uma escala de graduação contínua, por meio da atribuição de valores contínuos de pertinência ([Zadeh 1965](#), [Bonhan-Carter 1994](#), [Cheng e Agterberg 1999](#), [Meirelles et al. 2007a](#), [2007b](#)). Nesse sentido, a lógica *fuzzy* “A em X” pode ser expressa por um par ordenado, tal como:

$$f_A(x) = \begin{cases} \mu_A(x), & \text{para } x \in X \\ 0 & \text{para } x \notin X \end{cases} \quad (\text{Eq. 6-1})$$

onde $X = (x)$ representa o universo de atributos, e $\mu_A(x)$ o grau de pertinência de x em A . O valor $\mu_A(x)$ pertence ao intervalo $[0,1]$, onde 1 representa a pertinência total e 0 a não-pertinência.

Quanto ao grau de associação de x em A , estes valores mostram uma ordem que não tem como base a probabilidade, mas sim a possibilidade. Para chegar a estes valores, é utilizada a função de pertinência, a saber:

$$\mu_A(x): X \rightarrow A: [0,1] \quad (\text{Eq. 6-2})$$

Os conjuntos *fuzzy* seriam representados, quando A for contínuo, pela notação:

$$A = \int_x x \mu_A(x) / x \quad (\text{Eq. 6-3})$$

ou ainda, quando A representar um valor finito ou um conjunto contável de n elementos:

$$A = \sum_{j=1}^n \mu_{A_j}(x) / x_j \quad (\text{Eq. 6-4})$$

ou seja:

$$\frac{\mu_{A_1}(x)}{x_1} + \frac{\mu_{A_2}(x)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_{A_n}(x)}{x_n} \quad (\text{Eq. 6-5})$$

Embora os valores de pertinência *fuzzy* necessitem estar compreendidos entre o intervalo $[0,1]$, não há limitações para a escolha destes valores. Diversas funções podem ser utilizadas no

processo chamado de “fuzzificação”. No entanto, todas essas funções têm como objetivo transformar os dados de naturezas distintas para que estes possam ser utilizados e analisados de forma sinérgica.

Para a integração dos dados resultantes da *fuzzyficação*, estes dados podem ser combinados a partir dos operadores *fuzzy*. Os operadores mais frequentes são: “*Fuzzy-AND*”, “*Fuzzy-OR*”, “*Fuzzy-Soma*”, “*Fuzzy-Produto*” e “*Fuzzy-Gamma*” (Bonham-Carter 1994, Meirelles *et al.* 2007a). Neste trabalho, a integração dos dados foi realizada a partir do operador *Fuzzy-Gamma*. De acordo com Bonham-Carter (1994), o operador *Fuzzy-Gamma* é definido pelos operadores “*Fuzzy-Produto*” e “*Fuzzy-Soma*” de acordo com a equação:

$$\text{Fuzzy Gamma } (\gamma) = (\text{fuzzy sum})^\gamma \cdot (\text{fuzzy prod})^{1-\gamma} \quad (\text{Eq. 6-6})$$

no qual, γ corresponde ao parâmetro que varia entre 0 e 1. Quando o valor de *gamma* (γ) = 1, a combinação é igual à somatória *fuzzy* e, quando *gamma* = 0, a combinação é igual ao produto algébrico *fuzzy*. Assim, valores intermediários de γ definem a importância de cada operador no resultado final.

6.1.3. Modelo de Favorabilidade para Ocorrência de Rochas Máficas e/ou Ultramáficas

Com o intuito de normalizar as unidades das diferentes variáveis, foram utilizadas funções de pertinências *fuzzy*, que reamostram os valores originais no intervalo [0,1]. Para estas análises, foram utilizados atributos magnetométricos e gamaespectrométricos que melhor permitem cartografar as rochas com constituintes máficos e/ou ultramáficos. As variáveis utilizadas estão representadas na [Figura 6-1: \(A\)](#) abundância de potássio – K (%); [\(B\)](#) abundância de microequivalentes de tório - eTh (ppm); [\(C\)](#) abundância de microequivalentes de urânio (eU) (ppm); e [\(D\)](#) gradiente magnetométrico, realçado pela amplitude do sinal analítico (ASA) do campo magnético anômalo (nT/m). Para melhor ajuste quanto à aplicação das funções de pertinência *fuzzy*, alguns dados tiveram seus valores re-escalados a partir de multiplicações que, assim como as funções de pertinência e dados de entrada, estão apresentadas na [Tabela 6-3](#).

Os valores de pertinência foram processados de modo a destacar a importância relativa de cada variável ([Tabela 6-3](#)). Assim, receberam **maior pertinência**, os **baixos valores dos canais gamaespectrométricos (K, eTh, e eU)**, e os **altos valores do gradiente magnético (ASA)**.

Tabela 6-3. Variáveis e dados de entrada utilizados na classificação baseada em pertinência fuzzy para mapeamento das rochas com constituintes máficos e/ou ultramáficos.

Variável	transformação	função fuzzy	ponto-médio	Espalhamento
Potássio (%)	x 10	<i>small</i>	10 %	5
Tório (ppm)	-	<i>small</i>	23 ppm	5
Urânio (ppm)	x 10	<i>small</i>	62 ppm	5
Amplitude do Sinal Analítico (nT/m)	x 100	<i>large</i>	14 nT/m	5

Os dados gerados a partir das funções de pertinência foram integrados pelo operador *fuzzy gamma* ([Figura 6-1\(E\)](#)).

O resultado apresentado na [Figura 6-1\(E\)](#) mostra que os maiores valores de pertinência fuzzy estão associados a feições alongadas e fragmentadas, dispostas segundo WNW-ESE. Além dessas feições, altos valores de pertinência são observados na forma de lineamentos orientados segundo NE-SW, por vezes infletidos para a direção E-W. Esses lineamentos se estendem em até 50 km e apresentam largura aproximada de 0,5 km. Observa-se que a alta pertinência está localizada com maior frequência na região sul da área. Na região norte, são observados médios e baixos valores de pertinência em intercalações.

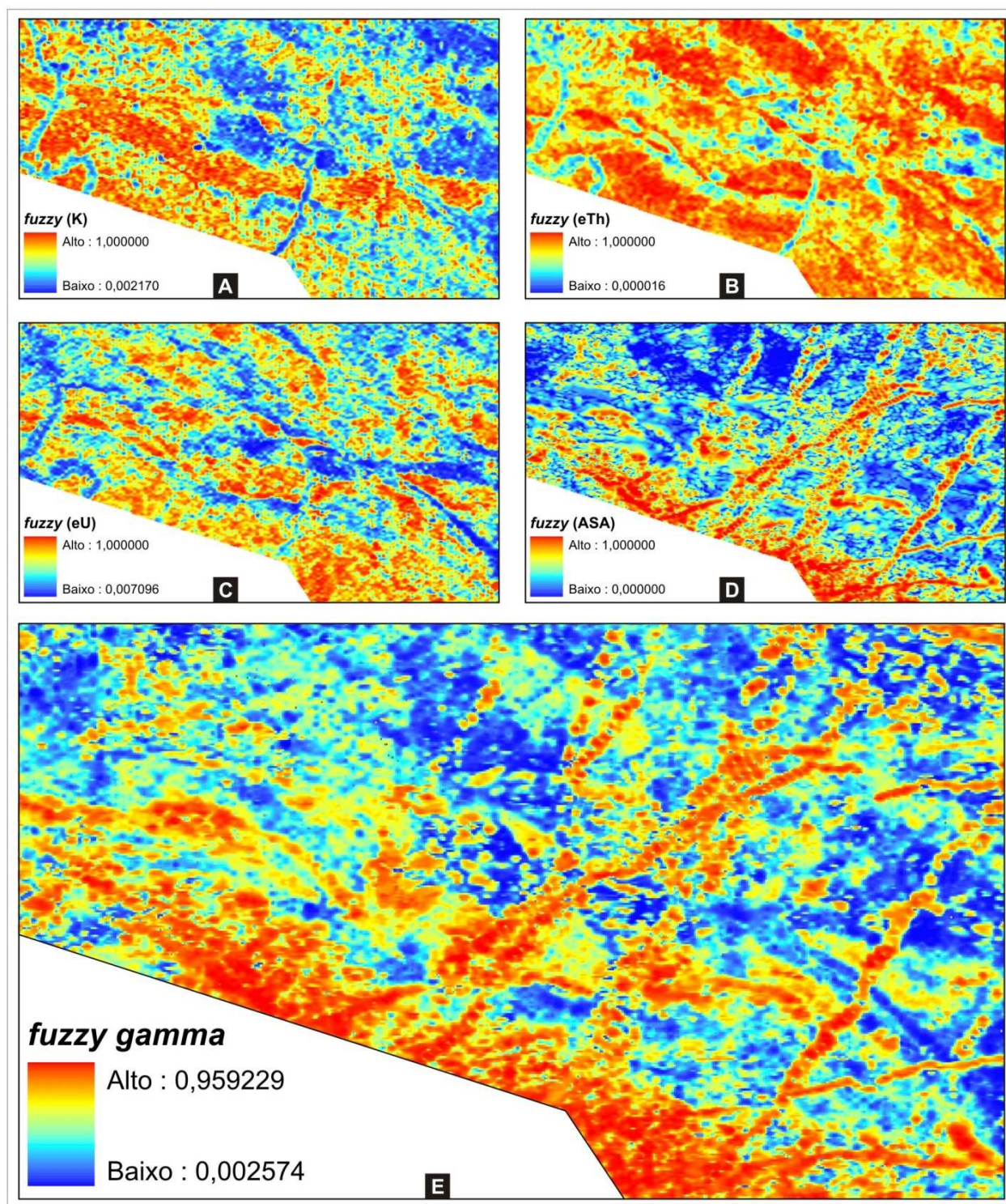


Figura 6-1. Pertinência das variáveis *fuzzificadas* conforme as funções descritas na [Tabela 6-3](#): (A) *small K*; (B) *small eTh*; (C) *small eU*; (D) *large ASA*; e (E) operador *gama*.

Tabela 6-4. Rochas máficas e/ou ultramáficas aflorantes na região centro-leste do Domínio Bacajá e seus respectivos valores de pertinência fuzzy. Observa-se em cinza as amostras que tiveram valores de pertinência condizentes com as rochas máficas e/ou ultramáficas.

Afloramento	ASA (nT/m)	CT	K (%)	Th (ppm)	U (ppm)	Pertinência Fuzzy	Rocha
CCA-08	0,202	4,433	1,171	7,315	1,486	0,632	Diabasio
CCA-22	0,115	4,659	0,008	11,875	1,826	0,488	Anfibolito
CCA-23	0,092	1,263	0,109	3,091	0,276	0,722	Anfibolito
CCA-24	0,163	4,088	0,443	7,170	1,249	0,703	Anfibolito
CCA-29	0,541	4,922	0,964	10,306	0,764	0,857	Diabasio
CCA-47	0,218	1,720	0,152	4,046	0,353	0,869	Laterita
CCA-52	0,096	3,003	0,100	5,531	1,734	0,455	Diabasio
CCA-54	0,109	3,205	0,197	8,388	0,886	0,632	Laterita
CCA-57	0,202	3,882	0,505	8,687	0,973	0,778	Anfibolito
CCA-58	0,368	5,615	0,592	11,063	2,589	0,820	Gabro
CCA-60	0,231	3,961	0,104	10,839	1,208	0,808	Anfibolito
CCA-65	0,116	1,413	0,016	3,434	0,516	0,711	Metagabro
CCA-68	0,111	2,257	0,067	2,501	1,174	0,585	Metagabro
CCA-70	0,129	2,245	0,253	5,681	0,044	0,754	Metagabro
CCA-74	0,069	5,158	0,740	11,439	1,459	0,387	Gabro
CCA-80	0,447	2,833	0,013	9,500	0,112	0,942	Laterita
CCA-82	0,116	2,177	0,026	5,101	1,243	0,587	Anfibolito
CCA-85	0,277	6,277	0,494	14,648	1,561	0,821	Metagabro
CCA-86	0,164	0,749	0,133	1,852	0,057	0,853	Anfibolito

A [Tabela 6-4](#) mostra que dos dezenove pontos descritos como rochas máficas e/ou ultramáficas, apenas três apresentaram valores de pertinência abaixo do mínimo estimado para ocorrência de rochas máficas e/ou ultramáficas. Estes três valores estão destacados em branco na referida tabela. Isso sugere que o método apresenta um índice de 84,21% de acerto. As três amostras de rochas máficas e/ou ultramáficas descritas a partir das análises petrográfica que não apresentaram compatibilidade com a alta pertinência *fuzzy* incluem uma amostra de anfibolito, uma de diabásio e uma amostra de gabro. Essas amostras, no entanto, quando observadas em mapa, localizam-se muito próximas às zonas que apresentam alta pertinência. As amostras de rochas máficas são encontradas em campo, em sua maior parte, na forma de blocos e matacões. Desse modo, as amostras de rochas máficas e/ou ultramáficas coletadas nem sempre representam suas respectivas fontes, embora estejam situadas próximas à estas. Como os afloramentos *in situ* de rochas máficas e ultramáficas são escassos, dado ao intenso intemperismo que atua nestas rochas na região amazônica, esses blocos não podem ser descartados das análises. No entanto, é necessário analisá-los sob a ótica de rochas transportadas de uma fonte proximal.

Um ponto crucial a ser discutido é que, embora as rochas máficas e ultramáficas tenham uma correspondência clara com o respectivo modelo de favorabilidade, a situação inversa nem

sempre é uma verdade absoluta. Existem muitas rochas que, apesar de não apresentarem natureza máfica ou ultramáfica, possuem assinatura gamaespectrométrica e magnetométrica similares a estas. O exemplo mais simples é das rochas ácidas que não apresentam altos teores de álcali-feldspatos como constituinte principal e possuem gradiente magnético da ASA médio a alto. Tonalitos podem ter características como estas e, por conseguinte, poderiam ser incluídos na categoria de alta favorabilidade à ocorrências de rochas máficas e/ou ultramáficas pela metodologia utilizada. No entanto, para trabalhos prospectivos com o objetivo de identificar áreas potenciais de ocorrência de rochas máficas e ultramáficas e para atividades de reconhecimento geológico regional, a técnica demonstra-se eficaz.

6.1.4. Discussões sobre os resultados

O modelo de favorabilidade à ocorrência de rochas máficas e/ou ultramáficas apresentado na [Figura 6-2](#) mostra variações entre alta e baixa pertinência. Estas pertinências apresentam relações importantes com os tipos litológicos da área de estudo, sendo que as altas pertinências tendem a apresentar relações estreitas com rochas máficas e/ou ultramáficas.

Vale ressaltar que existem rochas de naturezas distintas cujas características gamaespectrométricas e magnetométricas demonstram similaridades. Rochas ácidas com baixos teores de álcali-feldspato e alta susceptibilidade magnética, por exemplo, podem ter uma alta pertinência aos constituintes máficos. Por outro lado, rochas máficas e ultramáficas que foram metamorfasadas podem apresentar taxas mais elevadas de potássio, o que revelaria taxas médias de pertinência *fuzzy* aos constituintes máficos e/ou ultramáficos.

Embora os resultados apresentados tragam uma referência aos trabalhos exploratórios seguintes, é de fundamental relevância que sejam tomados como uma indicação, e não como uma verdade absoluta.

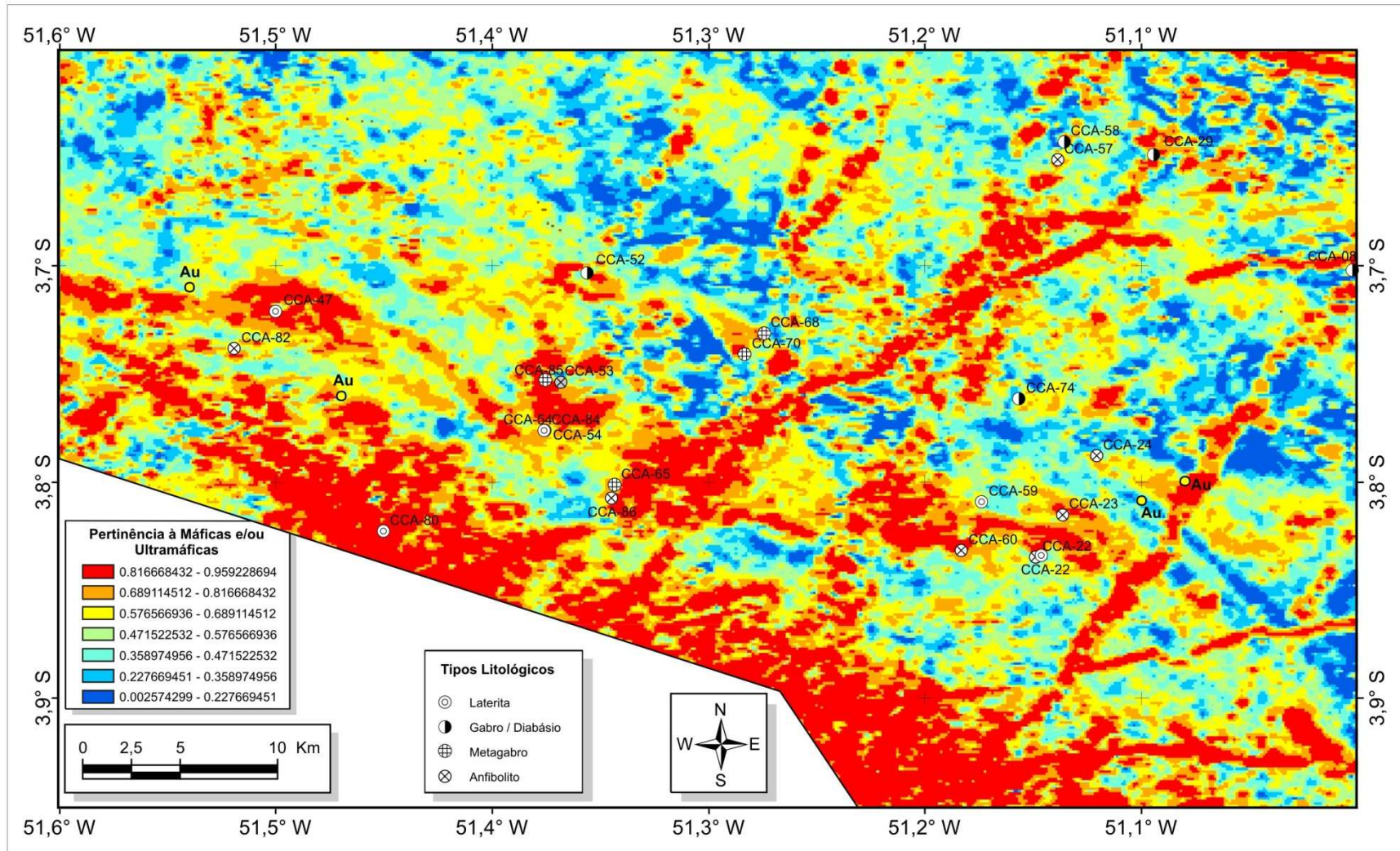


Figura 6-2. Rochas máficas mapeadas em campo plotadas ao modelo de favorabilidade à rochas máficas e/ou ultramáficas.

6.2. MODELAGEM DIRIGIDA PELOS DADOS

A produção de mapas geológicos a partir de dados de múltiplas naturezas, tais como os dados gamaespectrométricos e magnetométricos, requer mais do que habilidades indutivas e interpretativas a partir das análises visuais. Diversas técnicas de análise espacial de dados permitem a otimização dos dados para a geração de modelos que permitam a melhor representação do objeto de análise. Nas modelagens dirigidas pelos dados, características e feições sutis, que dificilmente seria percebidas em representações comuns desses dados, podem ser realçadas a partir da análise conjunta das variáveis que compõem a base de dados.

Partindo-se desses pressupostos, e com o objetivo de explorar feições sutis presentes na base de dados aerogeofísicos, optou-se pela abordagem a partir de modelagens dirigidas pelos dados. Tendo essa abordagem como fonte geradora de informações, tornou-se possível a discussão quanto às características quantitativas das variáveis analisadas para a composição das unidades litoestratigráficas. Além disso, buscou-se identificar algumas características comuns às ocorrências auríferas cartografadas.

6.2.1. Princípios e Fundamentações do método “Self-Organizing Maps”

Self-Organizing Maps (SOM), ou Mapas Auto-Organizáveis ([Kohonen 1982](#), [2001](#)), refere-se ao método capaz de analisar, visualizar e interpretar dados espaciais tendo como base os princípios de quantização vetorial e as medidas do vetor similaridade. No ambiente SOM, cada amostra é tratada como um vetor n -dimensional (nD) em um espaço amostral definido pelas variáveis desta amostra. No âmbito das imagens que foram utilizadas neste trabalho, amostras podem ser consideradas como *pixels*. Pelo fato da análise ser feita a partir da quantização vetorial, tanto variáveis contínuas quanto categóricas podem ser inseridas na análise, o que a torna ideal para dados geocientíficos distintos e complexos. Devido ao fato de tratar-se de uma análise não supervisionada, não é necessário o conhecimento prévio sobre os dados.

[Fraser e Dickson \(2007\)](#), com base nos trabalhos de [Kohonen \(1982\)](#), desenvolveram uma rotina com as principais etapas de uma análise SOM. Esta rotina foi implementado no programa SiroSOM[®], desenvolvido pela “*Australian Commonwealth Scientific and Research Organization*” (CSIRO). As definições a seguir são baseadas nesta rotina, e constituem os

fundamentos utilizados para as análises que serão demonstradas na sequência. Para [Fraser e Dickson \(2007\)](#), as principais definições e etapas que constituem uma análise em ambiente SOM são:

- Treinamento dos *node-vectors*

O espaço de dados n dimensional (nD) ([Figura 6-3\(A\)](#)), definido pelas amostras iniciais, é implantado aleatoriamente por um número definido de *seed-vectors* ([Figura 6-3\(B\)](#)). No formato iterativo, duas etapas de processamento são aplicadas diversas vezes para cada amostra inicial. Assim, os *seed-vectors* são subsequentemente treinados para representar a estrutura e os padrões das amostras iniciais. Em uma primeira etapa, denominada **etapa competitiva**, cada amostra original é comparada com os *seed-vectors* dentro de um raio particular ([Figura 6-3\(C\)](#)), até que um vetor representativo é determinado como mais similar ([Figura 6-3\(D\)](#)). Em seguida, em uma segunda etapa, denominada **etapa cooperativa**, os *seed-vectors* dentro de um dado raio do *seed-vector* “vencedor” são também modificados para que suas propriedades possam ser substituídas por um registro que mais se assemelhe àquele da amostra inicial em questão. Os vetores resultantes, treinados para representar a distribuição original das amostras envolvidas no processo, são denominados “vetores-neurônios” ou *node-vectors*, ou *Best Matching Units (BMU's)* - ([Figura 6-3\(E\)](#)).

- O Mapa Auto-organizável

Após a implantação dos *node-vectors*, todas as amostras próximas a estes são representadas em um mapa 2D. Uma regressão é usada para transformar a representação dos dados do espaço nD para o espaço 2D retilinear. Uma das características chave desta transformação é que as relações topológicas entre os *node-vectors* são preservadas. Ou seja, *node-vectors* que são próximos no espaço nD permanecem próximos no espaço 2D. As amostras originais são representadas nesta fase por neurônios particulares no mapa auto-organizável, e estes neurônios podem vir a formar *clusters* ou grupamentos. O mapa auto-organizável é, portanto, um produto ordenado, representação 2D de um conjunto de múltiplos parâmetros. Desse modo, é um produto ideal para visualização e interpretações posteriores. A “matriz da

distância unificada” também chamada de Matriz-U ou *U-Matrix* e as “parcelas componentes” ou *component plots* são dois exemplos dessas visualizações.

- Matriz da Distância Unificada (Matriz-U)

A representação do mapa auto-organizável na forma da Matriz-U evidencia as proximidades entre neurônios adjacentes neste mapa, em termos da distância euclidiana. Uma escala temperatura-cor é usada, sendo que cores frias (azuis) representam neurônios adjacentes com maior similaridade, enquanto as cores quentes (vermelhas) indicam maior distância ou separação euclidiana, ou ainda, neurônios com maior dissimilaridade. Para auxiliar a representação gráfica, neurônios simulados alternados são adicionados à Matriz-U, e estes são coloridos conforme a distância dos neurônios adjacentes. Desse modo, neurônios com maior similaridade (tons azuis) separados por neurônios mais dissimilares (tons vermelhos) representam amostras pertencentes a grupos diferentes.

- Erro de Quantização (QER)

Outro parâmetro registrado para cada amostra inicial é o “erro de quantização” (QER). Este representa a média da distância até o seu respectivo *node-vector*. Amostras com alto erro de quantização representam anomalias na base de dados. Elevados QER podem representar também bordas ou limites dentro de um conjunto de dados, que em geologia podem representar contatos litológicos, por exemplo.

- Parcelas Componentes

Outra maneira de visualizar os neurônios em um mapa auto-organizado é a partir das “parcelas componentes” ou *component plots*. Uma vez que cada neurônio representa um vetor no espaço amostral definido pelas variáveis iniciais, torna-se possível visualizar a contribuição de cada variável particular para a composição de cada neurônio. Desse modo, o resultado pode ser expresso novamente em uma escala temperatura-cor. Assim, baixos valores são mostrados em azul, enquanto que altos valores são representados em vermelho.

- Classificação dos “node-vectors”

O fatiamento em cores ou outras técnicas de classificação, como por exemplo, média-K, podem ser utilizadas para classificar grupos de neurônios. A utilização dessas técnicas, quando produz padrões coerentes, sugere que as análises produziram resultados significativos.

6.2.2. Variáveis de entrada e parâmetros estatísticos

Para as análises no ambiente SOM, foram selecionados cinco produtos aerogeofísicos cujas variáveis possuem significância geológica. As variáveis, respectivamente mostradas na [Figura 6-4](#) foram as seguintes: [\(A\)](#) abundância de potássio – K (%); [\(B\)](#) abundância de microequivalentes de tório (*eTh*) (ppm); [\(C\)](#) abundância de microequivalentes de urânio – *eU* (ppm); [\(D\)](#) canal de contagem total (cps); e [\(E\)](#) gradiente magnetométrico, realçado pela amplitude do sinal analítico (ASA) do campo magnético anômalo (nT/m).

As imagens foram transformadas do formato raster para o formato vetorial, onde os pixels foram substituídos por pontos. O valor de cada *pixel* da imagem original passou a contar como um atributo inerente ao respectivo ponto, juntamente com as coordenadas espaciais contidas no centro dos *pixels* originais. Desse modo, uma base de dados com 136.913 pontos foi criada contendo, além das coordenadas espaciais, todas as variáveis analisadas.

Os parâmetros estatísticos foram calculados a partir da base de pontos das variáveis originais para utilização posterior na comparação com os *clusters* resultantes das análises SOM. A classificação de cada variável foi realizada tendo como base os valores de mediana e, desse modo, foram gerados os valores de referência ([Tabela 6-5](#)). Os valores de referência das variáveis foram divididos em três classes: (i) altos valores; (ii) médios valores; e (iii) baixos valores.

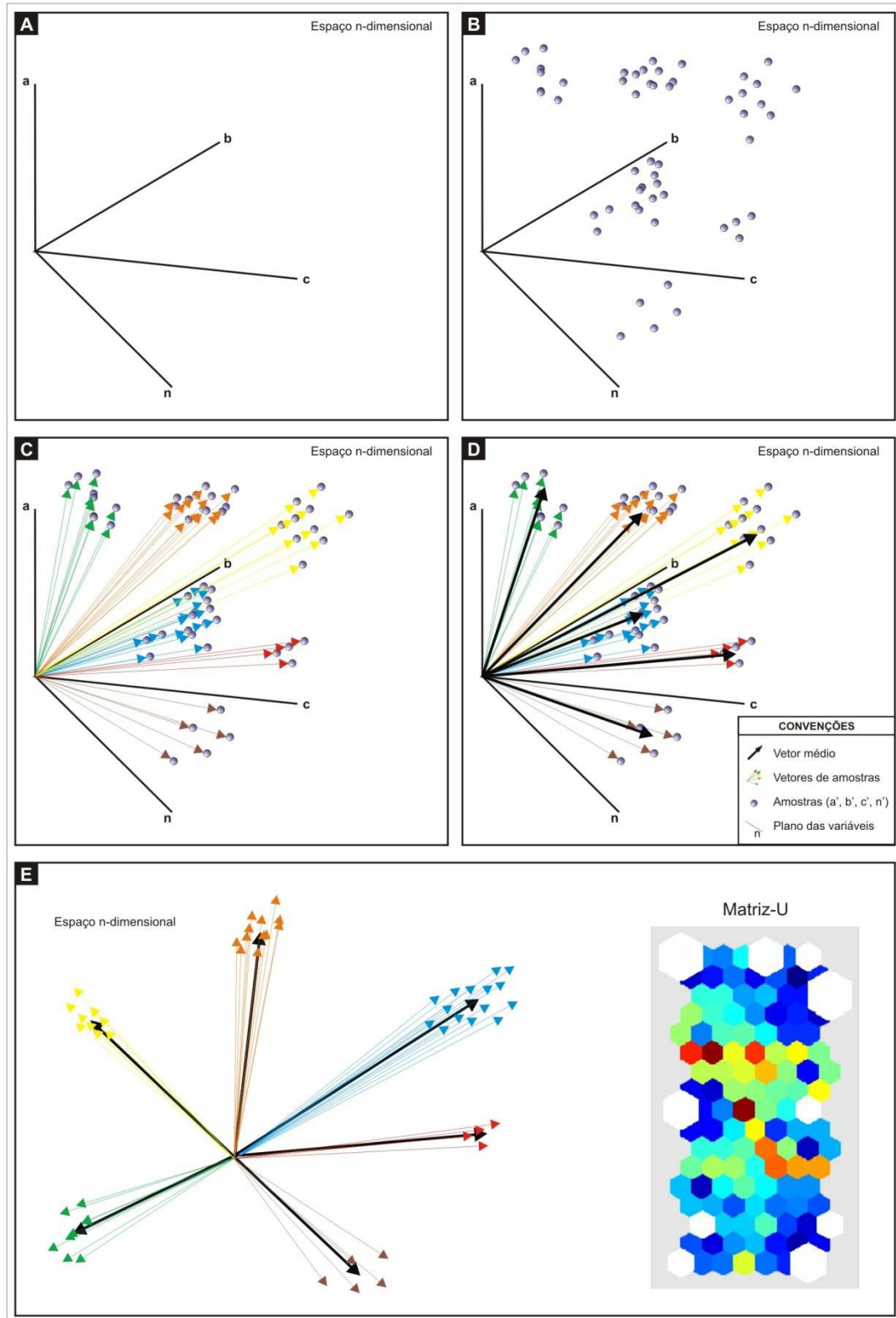


Figura 6-3. Síntese das etapas de uma análise em ambiente de *Self-Organizing Maps*.

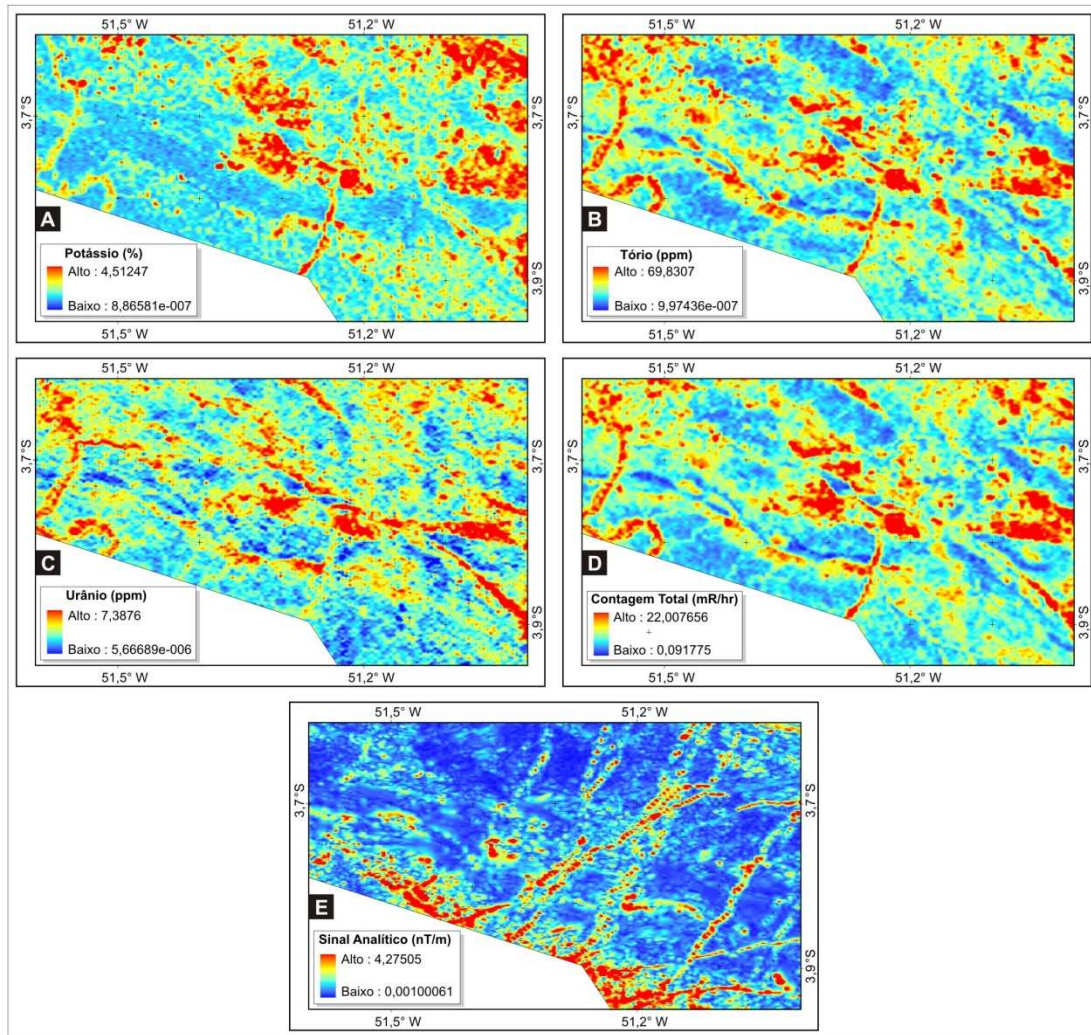


Figura 6-4. Variáveis gamaespectrométricas e magnetométrica analisadas: (a) potássio; (b) tório; (c) urânio; (d) contagem total; e (e) amplitude do sinal analítico.

Tabela 6-5. Valores de referência para determinar a classificação das variáveis analisadas.

REFERENCES VALUES (N° = 136913)					
	K (%)	eTh (ppm)	eU (ppm)	TC (cps)	AS (nT/m)
Mínimo	0,0000	0,0000	0,0000	0,0918	0,0010
Máximo	4,5125	69,8307	7,3876	22,0077	4,2751
Média	0,8934	10,2047	2,5398	4,3033	0,1662
Mediana	0,7781	9,2761	2,4468	3,8943	0,1102
Desvio Padrão	0,4253	5,0439	0,6747	2,1168	0,1798
CLASSIFICAÇÃO**					
Baixos Valores	< 0,6342	< 7,5091	< 2,2065	< 3,1453	< 0,0755
Médios Valores	0,6342 - 0,9714	7,5091 - 11,3882	2,2065 - 2,7243	3,1453 - 4,7970	0,0755 - 0,1617
Altos Valores	> 0,9714	> 11,3882	> 2,7243	> 4,7970	> 0,1617

*N = Número total de amostras em cada variável.

** Classificação = N/3: Baixos Valores (< N45638); Médios Valores (N45638-N91276); Altos Valores (N91276-N136913).

6.2.3. Análises em ambiente SOM

Os seguintes parâmetros de configuração do SOM foram escolhidos para este estudo: o espaço de dados foi iniciado de forma aleatória; uma grade hexagonal foi escolhida como formato de visualização; a superfície de um hipervolume toroidal foi utilizado para a projeção dos neurônios ou BMU's. Depois de algumas tentativas, um tamanho de mapa de 46 linhas x 40 colunas foi escolhido como adequado para este estudo exploratório. Após a geração do mapa-auto organizado, foram geradas as imagens da Matriz-U e parcelas componentes.

Cada neurônio ou BMU no mapa auto-organizado representa, de fato, um “mini-cluster” das variáveis de entrada. No entanto, para entender o comportamento destes neurônios em grupamentos maiores, é indicado a classificação do mapa-auto organizável. Neste trabalho, os neurônios resultantes foram classificados a partir da média-K, baseado no número de classes determinadas pelas análises de [Davies e Boldin \(1979\)](#).

Para visualizar a distribuição espacial dos resultados dessa classificação, os pontos resultantes foram interpolados a partir do método do vizinho mais próximo para dados discretos.

6.2.4. Resultados das Análises SOM

Os resultados das parcelas componentes SOM são mostrados na [Figura 6-5\(A-E\)](#) e a Matriz-U resultante desta análise é mostrada na [Figura 6-5\(F\)](#) e [Figura 6-6\(A\)](#). As parcelas componentes mostram a contribuição de cada variável em cada neurônio no mapa, sendo possível verificar as relações entre as respostas das várias componentes. Algumas destas relações podem ser descritas como: (i) o formato elíptico de altos valores de K, eTh e TC - elipses na [Figura 6-5 \(A\), \(B\) e \(D\)](#); (ii) altos valores de eU e a respectiva contribuição para a Matriz-U – [Figura 6-5\(C\) e \(F\)](#); (iii) valores altos coincidindo em outra área específica entre a ASA e a Matriz-U (círculo na [Figura 6-5\(E\) e \(F\)](#)). A Matriz-U mostra duas áreas com alta dissimilaridade, que sugerem contribuições elevadas de eU e ASA. Alta similaridade na Matriz-U está relacionada com médias contribuições de K, eTh , eU e CT, que contrastam com contribuições baixas de ASA.

Na etapa seguinte, a análise Davies-Bouldin ([Davies e Bouldin 1979](#)) foi executada para definir o número ideal de *clusters* para os neurônios provenientes das análises SOM. Assim, o

número 8 foi obtido como o ideal para representar os grupamentos de *node-vectors* em uma classificação baseada em médias-K ([Figura 6-6\(B\)](#)). A [Figura 6-6\(C\)](#) mostra a distribuição espacial das amostras de entrada, atribuídas a cada *cluster* SOM resultante.

Os valores de referência obtidos a partir do conjunto total de dados ([Tabela 6-5](#)) foram utilizados para classificar a contribuição de cada *cluster* SOM derivado do componente, como mostrado na [Tabela 6-6](#).

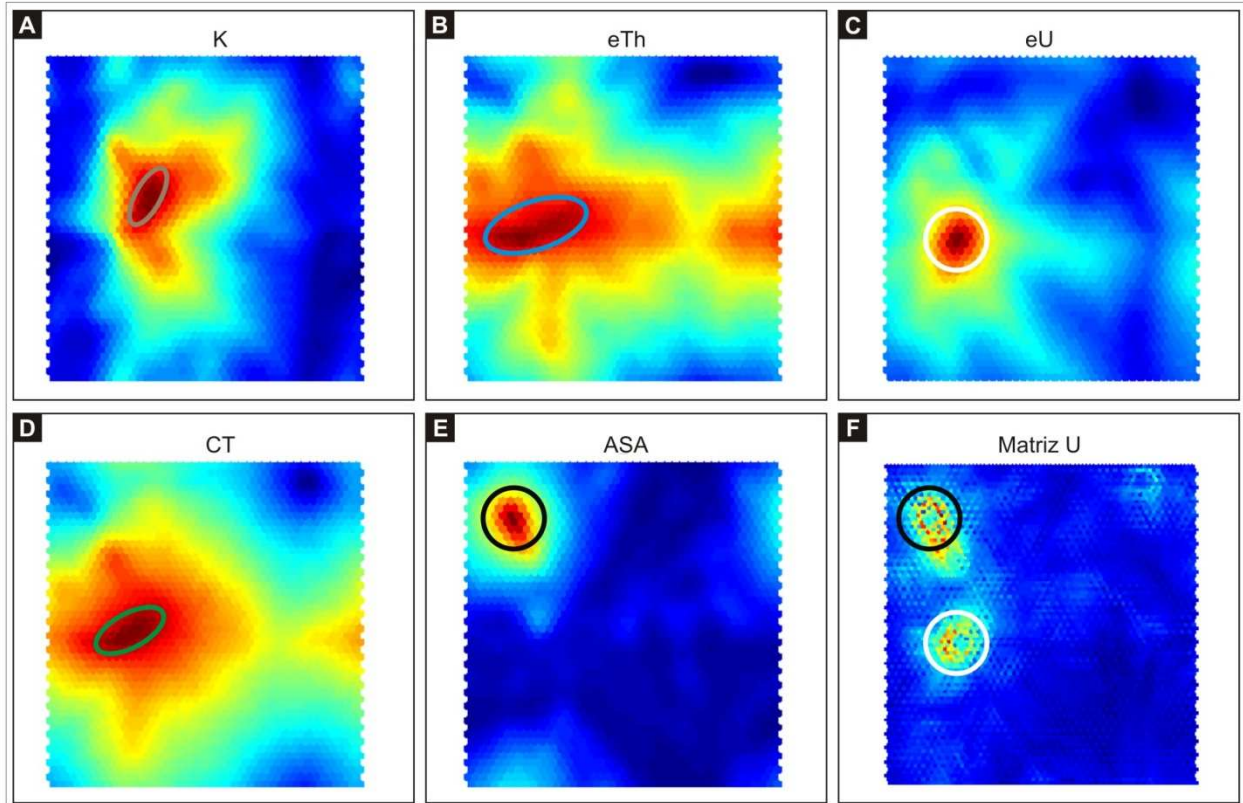


Figura 6-5. Mapa auto-organizado visto a partir dos formatos de visualização: (A-E) parcelas das componentes das variáveis, respectivamente, K(%), *eTh* (ppm), *eU* (ppm), CT (cps) e ASA (nT/m); e (F) Matriz-U. A maior contribuição das parcelas das componentes está destacada, bem como as maiores dissimilaridades da Matriz-U.

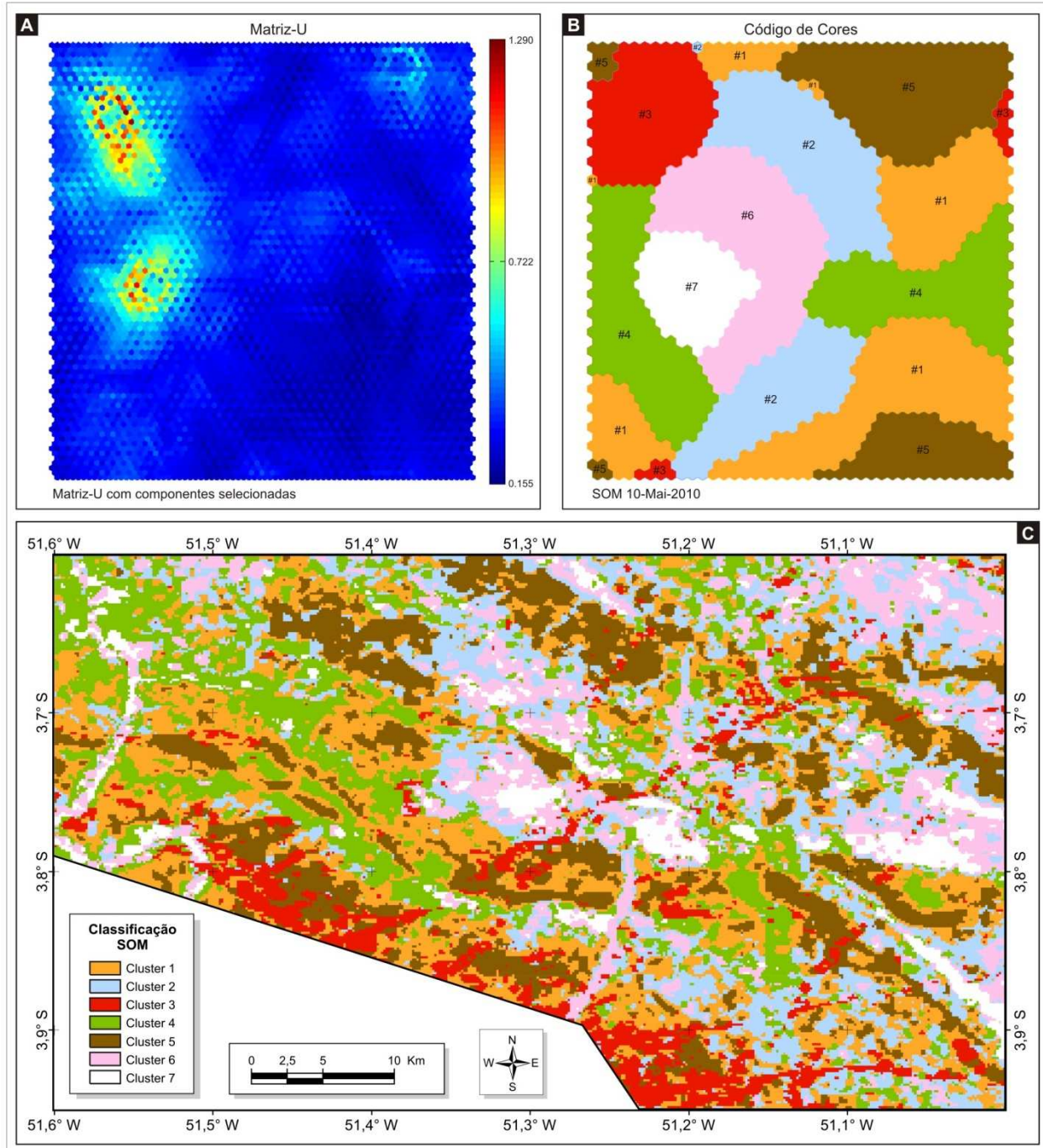


Figura 6-6. (A) Matriz-U, com os neurônios coloridos para representar a suas respectivas similaridades; (B) Classificação dos neurônios no mapa auto-organizado a partir da média-K, resultando em sete *clusters*; (C) Modelo espacializado mostrando cada amostra codificada pela respectiva cor do *cluster* derivado das análises SOM.

Tabela 6-6. Influência das variáveis em cada cluster das análises SOM.

		Erro Q	K	eTh	eU	TC	AS
Cluster 1	Média (Classificação)	0,3181	0,6329 (Baixo)	8,2648 (Médio)	2,2859 (Alto)	3,1916 (Médio)	0,1295 (Médio)
Cluster 2	Média (Classificação)	0,3663	1,1392 (Alto)	9,3817 (Médio)	2,4257 (Médio)	4,3580 (Médio)	0,1245 (Médio)
Cluster 3	Média (Classificação)	0,5664	0,7187 (Médio)	7,8796 (Médio)	2,1910 (Baixo)	3,1388 (Baixo)	0,6155 (Alto)
Cluster 4	Média (Classificação)	0,3700	0,6527 (Médio)	13,8198 (Alto)	2,9508 (Alto)	5,2532 (Alto)	0,1156 (Médio)
Cluster 5	Média (Classificação)	0,3765	0,6724 (Médio)	4,6254 (Baixo)	1,9241 (Baixo)	1,9672 (Baixo)	0,1185 (Médio)
Cluster 6	Média (Classificação)	0,4651	1,5882 (Alto)	15,0849 (Alto)	2,9918 (Alto)	7,0305 (Alto)	0,1587 (Médio)
Cluster 7	Média (Classificação)	0,6284	1,4281 (Alto)	20,5753 (Alto)	4,2583 (Alto)	9,2337 (Alto)	0,1317 (Médio)

6.2.5. Validação do modelo baseado em Self-Organizing Maps com dados de campo

Como resultado da modelagem a partir do cálculo do vetor similaridade em ambiente SOM, sete *clusters* representaram os grupamentos naturais das amostras de entrada. Esses *clusters*, no entanto, representam assinaturas aerogeofísicas próximas de rochas que nem sempre são similares. Por outro lado, seria de se esperar que rochas com composições parecidas estejam compreendidas dentro de um mesmo *cluster*.

Nesta etapa, os litotipos identificados em campo e petrograficamente foram plotados no modelo gerado em ambiente SOM ([Figura 6-7](#)). A partir desses resultados, as relações configuradas entre a modelagem SOM e os litotipos foram analisadas, de forma a gerar subsídio às discussões feitas a seguir.

O *Cluster 1* é predominantemente relacionado a anfíbolitos. No entanto, também foram incluídos nele laterita, diabásio, muscovita quartzito, leucosienogranito e hornblenda-biotita monzogranito. A ampla variedade de rochas encontradas pode ser justificada, principalmente, pelo fato destas rochas estarem compreendidas em zonas de transição entre *clusters* distintos. A amostra de anfíbolito com foliação incipiente CCA-57, localizado na parte norte da área, sugere que esta rocha, que ainda não havia sido descrita fora da área correspondente à Serra das Três Palmeiras, possa ocorrer também em subsuperfície.

Leucomonzogranito é o litotipo que predomina no *Cluster 2* que, por sua vez também apresentou amostras avulsas de titanita-hornblenda-biotita granodiorito, gabro e diabásio. No entanto, devido a estes três últimos litotipos citados representarem amostras únicas, a relação deste *cluster* será considerada como mais representativa para os monzogranitos. Outra característica importante deste *cluster* é a presença de corpos alongados com direção NE-SW, truncados por outros de direção NW-SE na região sudoeste da área. Além disso, uma espécie de “auréola” é observada na região que contorna a terminação leste da Serra das Três Palmeiras. Anfibolitos contendo sulfetos em vênulas de plagioclásio, além de biotita monzogranitos estão associados a essas feições, o que sugere a presença de zonas de alteração potássica. Registros de mina ativa e garimpos auríferos nos domínios dessas zonas de alteração sugerem a relação entre as mineralizações auríferas com as possíveis zonas de alteração. É importante observar que na região sudoeste da área, corpos representados pelo *Cluster 2* com direção NW-SE estão em contato direto com o *Cluster 1*, o que pode indicar que essas zonas de alteração estariam implantadas no contato com as rochas máficas da Sequência Três Palmeiras.

O *Cluster 3* é aquele que melhor representa os diabásios e gabros, que ocorrem na forma de diques. Vale ressaltar que nas análises feitas a partir do SOM, ao contrário da observação em dados exclusivamente magnetométricos, os diques se aproximam da disposição aflorante. Na região sul, observa-se a presença de áreas relativamente extensas relacionadas ao *Cluster 3*. Nessa região, de difícil acesso em campo, foram registrados afloramentos com laterita proveniente da alteração supergênica de rochas máficas. Essas regiões, pela continuidade das informações em mapa com os diques de direção NE, provavelmente são formadas por diabásios ou gabros.

O *Cluster 4* não apresentou uma representatividade consistente em relação às rochas mapeadas. No entanto, rochas com deformação milonítica foram descritas como pertencentes à este *cluster*. Biotita-diopsídio-quartzo-oligoclasio hornfels e biotita granodiorito protomiloníticos foram encontrados nesta unidade, o que a torna relacionável a zonas deformadas e regiões submetidas a metamorfismo de contato.

Três litotipos principais foram atribuídos ao *Cluster 5*: anfibolitos, metagabros e tonalitos. Além disso, uma amostra de monzogranito hololeucocrático também foi registrada nos domínios deste *cluster*. Na região norte da área, o afloramento CCA-37 mostrou a presença de biotita-

tonalitos. Esta rocha, que representa aquela com menor conteúdo de álcali-feldspatos dentre as rochas ácidas, pode apresentar assinaturas geofísicas próximas às dos anfibolitos. Na região sul, outra ocorrência de tonalito, desta vez metamorfisado (CCA-79), também corrobora esta interpretação. No interior da Serra das Três Palmeiras observa-se uma relação muito clara com lineamentos arqueados a levemente côncavos que indicam possíveis zonas de falhas de cisalhamento. Estas zonas coincidem com as ocorrências de anfibolitos com foliação forte.

Os *clusters* 6 e 7, apresentam assinaturas aerogeofísicas muito próximas entre si. No contexto do *Cluster* 6 foram registrados leucomonzogranitos, leucosienogranitos, além de hornblenda-álcali-feldspato sienitos. Já o *Cluster* 7 apresenta predominantemente leucomonzogranitos e granodioritos como rochas comuns. Ambos também apresentam relações evidentes com o *Cluster* 2, o que sugere que estes três *clusters*, principalmente a norte da Serra das Três Palmeiras, podem representar uma mesma unidade litoestratigráfica.

6.2.6. Discussão e considerações sobre o modelo baseado em SOM

Uma amostra de rocha, quando observada a partir de suas características litológicas, apresenta constituição mineralógica que pode ser expressa na forma de uma assinatura gamaespectrométrica e magnetométrica. Essa assinatura, no entanto, representa a contribuição de múltiplas variáveis que são expressas conjuntamente. Os resultados gerados a partir do modelo direcionado pelos dados baseado na técnica SOM produziu uma classificação que reflete as disposições naturais das variáveis em conjunto. Essas disposições, conforme apresentado na [Tabela 6-4](#), podem sugerir tipos de rochas distintas, ou mesmo zonas com características homólogas, tais como zonas de alteração potássica, zonas de cisalhamento ou regiões afetadas por transformações metamórficas.

Algumas considerações sobre o conteúdo litológico de determinados *clusters* podem ser feitas tendo como base as assinaturas das variáveis que compõem estes *clusters*:

O *Cluster* 1 apresenta baixo teor de K com médios teores de *eTh*, CT e ASA, além de altos teores de *eU*. Esta composição tanto é compatível com rochas máficas metamorfisadas quanto para com rochas graníticas cujo conteúdo de álcali-feldspato é considerado baixo, como tonalitos por exemplo.

No *Cluster 2*, altos teores de K contrastam com médios teores de todas as demais variáveis. A constituição gamaespectrométrica média a alta é característica das rochas graníticas ou rochas com micas com potássio em sua constituição química, como a biotita. Zonas de alteração potássica também podem ser realçadas em assinaturas como a do *Cluster 2*. Essas zonas, em geral compostas por minerais como bitotita ou sericita, revelam médios a altos teores gamaespectrométricos.

O *Cluster 3*, composto por médios teores de K e *eTh*, baixos teores de *eU* e CT e alto gradiente magnético em ASA, aparece em maior frequência na região sul da área e sob a forma lineamentos com direções que variam entre NE-SW a E-W. Com base na assinatura destes *clusters*, é possível relacioná-lo a rochas máficas cuja contribuição magnética é alta, ao passo que os constituintes gamaespectrométricos revelam médios a baixos teores de abundância relativa. Essa constituição é característica de diques de diabásio, por exemplo.

Em relação ao *Cluster 4*, a constituição de médio K e ASA em conjunto com altos teores de *eTh*, *eU* e CT, é correlacionável a diversas composições litológicas, o que sugere a possibilidade de uma ampla variedade de associações para esta unidade. A relação principal desta assinatura é com as rochas provenientes de alteração supergênica, tais como as lateritas. A correspondência ainda com rochas sub-vulcânicas pode ser também aventada a partir desta assinatura. Além disso, rochas sedimentares de protólitos diversos também podem apresentar constituição semelhante.

As características do *Cluster 5*, composto por médios valores de K e ASA e baixos teores de *eTh*, *eU* e CT, permitem relacioná-lo com rochas com pouco conteúdo álcali-feldspático e moderada susceptibilidade magnética. Nesse sentido, tonalitos e granodioritos podem ser associados a esta assinatura.

Quanto aos *clusters 6 e 7*, estes apresentam assinaturas muito próximas entre si. Em termos da classificação baseada na mediana dos dados, essa assinatura é idêntica, no entanto, a diferença entre esses valores é sutil e pode ser medida no ambiente SOM. A assinatura composta por altos teores gamaespectrométricos e médio gradiente magnético da ASA pode ser associado a rochas alcalinas, principalmente sienitos, sienos a monzogranitos, ou mesmo granodioritos.

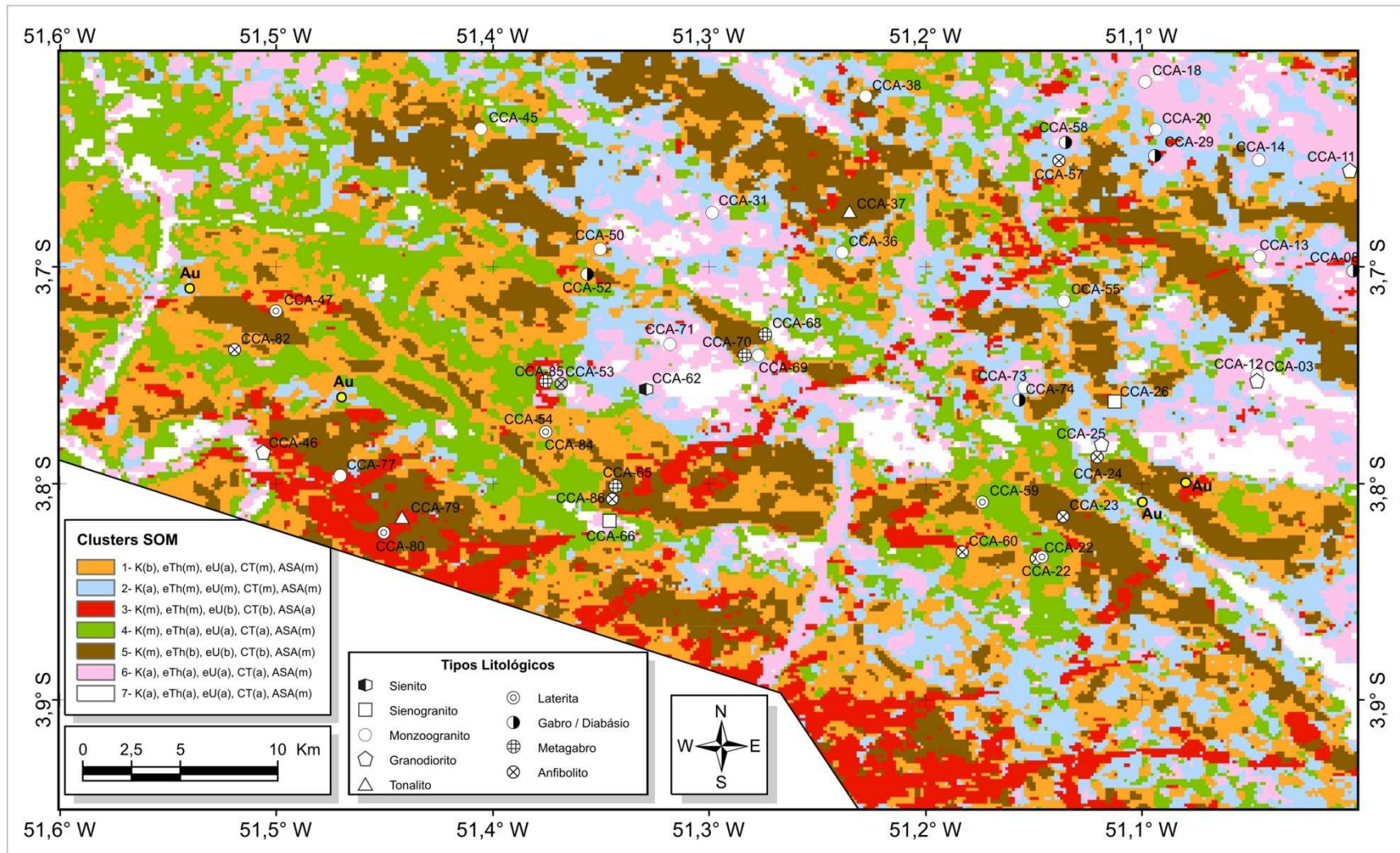


Figura 6-7. Rochas com análises petrográficas plotadas ao modelo de favorabilidade à rochas máficas e/ou ultramáficas.

6.3. COMPARAÇÕES ENTRE OS MODELOS

Algumas semelhanças entre os modelos puderam ser observadas a partir das comparações entre os resultados. No modelo utilizado para mapear constituintes máficos e/ou ultramáficos, a alta pertinência coincide com o *Cluster 3* do modelo gerado em ambiente SOM. Em contrapartida, as baixas pertinências aos constituintes máficos e/ultramáficos correspondem espacialmente às assinaturas dos *clusters* 2, 6 e 7 do modelo SOM, que sugerem rochas graníticas. Os médios valores *fuzzy* estariam relacionados aos *clusters* SOM 1, 4 e 5. Esta relação indicaria, principalmente rochas máficas metamorfasadas, ou rochas graníticas com pouco conteúdo álcali-feldspático.

A relação entre os modelos sugere correspondências importantes que irão auxiliar na caracterização das unidades litológicas presentes na área estudada. Os dados coletados durante os levantamentos de campo, no entanto, constituirão a fase final desta caracterização. No próximo capítulo, onde os principais litotipos aflorantes na área serão abordados, a validação destes modelos será discutida, tendo como base os litotipos descritos.

6.4. DISCUSSÕES SOBRE AS MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS

Uma característica observada nos resultados da modelagem espacial gerada a partir da lógica *fuzzy* é que as ocorrências de ouro da região de estudo não coincidiram com a alta favorabilidade às rochas máficas e/ou ultramáficas. Essa dissociação poderia ser explicada pelo fato de que tais ocorrências estariam associadas a zonas miloníticas em granodioritos ([Agnerian 2005](#), [Ruy 2009](#)) intrudidos na Sequência Três Palmeiras ou próximos a estas.

Uma associação entre o *Cluster 2* e os biotita monzogranitos e granodioritos (item 6.2.5) indicaria uma possível relação destas rochas para com ambiente, pelo qual teriam percolados os fluidos mineralizados.

[Biddle e Christie-Blick \(1985\)](#) descrevem que a geometria curva em planos de falhas transcorrentes pode induzir ao aparecimento de diversos padrões deformacionais, nos quais estariam compreendidos tensores compressivos ou extensionais. Mapeamentos regionais ([Jorge João 1987](#), [Vasquez et al. 2008c](#)) indicam que falhas transcorrentes sinistrais estariam relacionadas à Sequência Três Palmeiras. Neste trabalho, foi constatado que o arranjo dos

lineamentos sugere que estas falhas transcorrentes relacionadas à Sequência Três Palmeiras apresentam geometria curva. Corpos intrusivos relacionados ao *Cluster 2*, localizados na região sudoeste da área, encontram-se próximos às estruturas arqueadas que ocorrem ao longo da Sequência Três Palmeiras. Isso sugere que o alojamento destes corpos intrusivos seguiu a direção de estruturas extensionais, relacionadas a zona de cisalhamento instalada na Sequência Três Palmeiras. As assinaturas gamaespectrométrica e magnetométrica relacionadas ao *Cluster 2* são compatíveis tanto para com as intrusões granodioríticas e zonas de alteração quanto para com seus respectivos materiais saprolíticos, que foram as situações destacadas por [Agnerian \(2005\)](#), na região da Volta Grande, a oeste da área estudada.

6.5. MAPA GEOLÓGICO GERADO A PARTIR DA INTEGRAÇÃO DOS DADOS MULTIFONTES

Os resultados adquiridos a partir das interpretações de imagens aerogeofísicas, interpretações texturais de imagens SAR e fusões com aerogeofísica e pelas modelagens espaciais em conjunto com os dados de campo foram integrados em um mapa geológico em escala 1:100.000 (Anexo 1). Nas regiões onde não houve acesso a afloramentos, foram utilizadas informações no mapa geológico proposto por [Vasquez et al. \(2008c\)](#).

Foram individualizadas sete unidades com base na integração dos dados mencionados acima. Estas unidades serão descritas a seguir:

6.5.1. Unidade 1

Essas rochas são identificadas na forma de um bloco de dimensões batolíticas, disposto na direção NW-SE, bem representado pelo Domínio 4b das interpretações aerogeofísicas (Capítulo 3), pela Zona Textural T1 (Capítulo 4), bem como pelo *Cluster 5* das análises SOM em sua porção mais a sul. A unidade é constituída por metatonalitos com textura porfirítica que afloram na região sul da área e foi correlacionada ao Metatonalito Rio Bacajá ([Vasquez et al. 2008c](#)).

6.5.2. Unidade 2

Ainda na região sul da área, uma faixa de aproximadamente 90 x 7 km é bem marcada por médios a baixos teores gamaespectrométricos e médios a baixos gradientes magnéticos da ASA. Essa faixa pode ser claramente identificada pela Zona Textural T2 (Capítulo 4), ou pelos *clusters* 1 e 5 das análises SOM. Nessa região foram encontrados anfibolitos, quartzitos e metagabros, que foram relacionados às rochas metavulcanossedimentares da Sequência Três Palmeiras ([Jorge João 1987](#), [Vasquez et al. 2008c](#)).

6.5.3. Unidade 3

Na região centro-norte da área, blocos orientados preferencialmente a NW-SE, com baixos a médios teores gamaespectrométricos e médio gradiente magnético mostrado pela ASA coincidem com a Zona Textural T4 (Capítulo 4). Esses blocos também estão relacionados ao *Cluster* 5 das análises SOM. Foram registrados biotita tonalitos a estes blocos. No entanto, poucos afloramentos foram registrados nesses domínios para correlacioná-los precisamente a alguma unidade já conhecida em mapas geológicos pretéritos. A unidade foi demarcada por apresentar diferenças marcantes em relação à Suíte Intrusiva João Jorge. A correlação com o Complexo Aruanã poderia ser estabelecida, pela correspondência dos domínios litogeofísicos identificados no Capítulo 3, com os limites do Complexo Aruanã sugerido por [Vasquez et al. \(2008c\)](#). No entanto, os cristais idiomórficos de quartzo e plagioclásio não corresponderiam aos padrões mineralógicos comuns aos gnaisses, o que torna a correlação inapropriada.

6.5.4. Unidade 4

Regiões com altos teores gamaespectrométricos foram observadas a partir da composição ternária RGB (Capítulo 3), que coincidem com a Zona Textural T3 (Capítulo 4). Essas zonas apresentam poucos lineamentos em seus domínios. Está relacionada nas análises SOM com os *clusters* 6 e 7, e em campo correspondem a leucomonzogranitos, granodioritos, leucosienogranitos e sienitos. Esta unidade foi correlacionada à Suíte Intrusiva João Jorge ([Jorge João 1987](#), [Vasquez et al. 2008c](#)). Uma fácies com teores gamaespectrométricos mais elevados foi

detectada pelos blocos 6c (Capítulo 3) e a partir das análises SOM (*Cluster* 7, Capítulo 5). Essa variação está representada no mapa geológico por limites tracejados.

6.5.5. Unidade 5

Os domínios desta unidade não foram acessados a partir do mapeamento de campo. No entanto, a unidade é realçada pelo *Cluster* 2 das análises SOM. [Vasquez et al. \(2008c\)](#) registraram feições neste domínio vinculado ao Ortognaisse Pacajá. Neste trabalho, o limite dos ortognaisses para com os metatonalitos foi estendido mais para oeste, visando acompanhar as assinaturas geofísicas e os domínios do *Cluster* 2.

6.5.6. Unidade 6

A assinatura composta por altos teores gamaespectrométricos (Capítulo 3), associados à Zona Textural T6 originaram a demarcação desta unidade. As características apresentadas permitiram relacioná-la aos sedimentos das planícies aluvionares dos rios Bacajá e Anapu.

6.5.7. Unidade 7

Blocos semi-circulares a alongados com altos teores de eTh e baixos de K (Domínio 7, Capítulo 3) ocorrem principalmente no interior da Unidade 3. Esses blocos apresentam rugosidade baixa na Zona Textural T2 (Capítulo 4) e foram relacionados à lateritas originadas pela alteração supergênica dos anfibolitos.

Capítulo 7

7. Conclusões

Os estudos que envolveram a interpretação de imagens aerogeofísicas e SAR em conjunto com dados coletados em campo, possibilitaram discussões sobre as unidades litoestratigráficas e consequente elaboração de um mapa geológico. A composição das rochas mapeadas em relação às variáveis gamaespectrométricas e magnetométricas trouxeram subsídios e argumentos para interpretações sobre temporalidade dos eventos que marcaram as rochas da região central do Domínio Bacajá, que serão apresentados a seguir.

7.1. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS

Foram definidas, no Domínio Bacajá, unidades litogeofísicas com base nas respectivas assinaturas geofísicas, que por sua vez se relacionam com distintas propriedades mineralógicas das rochas.

Tendo como base a descrição dos domínios, algumas considerações podem ser feitas:

- (i) A zona de sutura entre o Domínio Bacajá e a Província Carajás, na região central do Domínio Bacajá, considerada indefinida por Faraco *et al.* (2005), pode ser inferida a partir dos dados aerogeofísicos, como o limite entre as unidades Ortognaisse Pacajá (neoarqueana) e Granulito Novolândia (riaciana);
- (ii) A assinatura gamaespectrométrica do Domínio 5 (Capítulo 3) sugere a correspondência espectral entre a Suíte Intrusiva João Jorge e o Ortognaisse Pacajá. Esta correspondência pode indicar uma relação entre as rochas da suíte intrusiva e a fusão do ortognaisse, o que estaria de acordo com a componente neoarqueana (T_{DM} de 2,73 e 2,65 Ga) apresentada por Vasquez (2006) para rochas graníticas da Suíte Intrusiva João Jorge, na porção ocidental do Domínio Bacajá. Maiores investigações isotópicas, no entanto, seriam necessárias para esta afirmação;

(iii) Uma discordância abrupta ocasionada por falha transcorrente sinistral demarca o limite entre as suítes plutônicas sin- a tardi-colisionais e a tardi- a pós-colisionais do Domínio Bacajá na região norte do aerolevante geofísico. As características gamaespectrométricas e magnetométricas indicam que o Complexo Bacajá estaria restrito apenas à região norte da falha.

7.2. INTERPRETAÇÃO DAS IMAGENS SAR E FUSÃO COM IMAGENS AEROGEOFÍSICAS

O conjunto de informações resultantes das interpretações de imagens SAR e respectivas fusões com dados gamaespectrométricos permitiram a abordagem sobre as características das estruturas em superfície. Essas características, diferentemente daquelas geradas pelos dados magnetométricos, que refletem fontes rasas e profundas, proporcionaram conclusões sobre o relevo, fundamentais na elaboração de mapas geológicos.

As interpretações dos lineamentos relacionados a essas imagens permitiram algumas considerações sobre a relação temporal dessas estruturas. O feixe de lineamentos NW-SE representa as estruturas mais antigas da área analisada. Essas estruturas foram geradas a partir de tensores compressivos e também são observadas, em escala mesoscópica, a partir de estruturas sin-magmáticas, as quais foram caracterizadas por [Barros *et al.* \(2007\)](#). Na região da Sequência Três Palmeiras, estruturas arqueadas NW-SE demonstraram correlação com regimes característicos de zonas de cisalhamento sinistral. Um segundo feixe de lineamentos, com direção E-W, marca um evento rúptil tardio em relação às estruturas NW-SE, que ocasionou falhas transcorrente destrais bem como o deslocamento de blocos de rochas, tais como ocorre na Suíte Granítica João Jorge. Falhas E-W em escala mesoscópica foram relacionadas a esse evento. Lineamentos NNE-SSW e NE-SW representam diques que se instalaram posteriormente às unidades riacianas. Esses diques podem estar relacionados aos enxames de diques paleoproterozóicos e neoproterozóicos relatados por [Delor *et al.* \(2003\)](#).

7.3. MODELAGENS ESPACIAIS

Rochas máficas e/ou ultramáficas, abrangendo anfibolitos, metagabros e gabros da Sequência Três Palmeiras, além de concreções lateríticas, foram mapeadas em função de seus valores altos de pertinência *fuzzy*, às rochas. A técnica aplicada envolve a intersecção de altos gradientes magnéticos com baixos teores gamaespectrométricos. Cerca de 84% das rochas máficas mapeadas coincidiram com a alta pertinência à rochas máficas e/ou ultramáficas, o que torna a técnica eficiente e viável para novas perspectivas a investigações de corpos máficos em outras regiões.

Algumas considerações sobre as rochas do Domínio Bacajá foram desencadeadas a partir das análises SOM. Anfibolitos apresentam assinatura composta por baixo teor de K, médios valores de eTh , CT e ASA, além de altos teores de eU . Essa assinatura poderá variar na presença de metamorfismo ou com a entrada de minerais característicos das zonas de alteração hidrotermal. Gabros e diabásios, observados em campo principalmente na forma de diques, apresentam altos teores de K além de médios valores associados às demais variáveis analisadas (eTh , eU , CT e ASA). Rochas máficas metamorfasadas (hornfels) e rochas miloníticas (biotita granodiorito protomiloníticos) mostraram assinatura aerogeofísica composta por médios teores de K e eTh , baixos teores de eU e CT e alto gradiente magnético em ASA. Tonalitos apresentaram médio K e ASA em conjunto com altos teores de eTh , eU e CT. Essa assinatura também foi relacionada a anfibolitos contendo clorita, biotita e muscovita. A formação desses minerais ocasiona a elevação dos teores gamaespectrométricos nesses anfibolitos. Rochas ácidas, tais como leucomonzogranitos, leucosienogranitos, sienitos e granodioritos apresentam assinatura composta por altos teores gamaespectrométrico e baixo gradiente magnetométrico.

Os resultados obtidos a partir das análises SOM no Domínio Bacajá foram considerados consistentes e satisfatórios, tanto para fins de mapeamento de unidades litoestratigráficas, quanto na identificação das principais zonas relacionadas às mineralizações auríferas. Neste último caso, há coincidência entre estruturas associadas a zonas de cisalhamento e zonas de alto potássio. Essas regiões apresentam registros de minas e garimpos auríferos, e sugere que a mineralização estaria associada à fluidos que geraram alteração potássica, que teria percolado estruturas extensionais próximas às zonas de cisalhamento.

7.4. EVOLUÇÃO GEODINÂMICA DA REGIÃO CENTRO-LESTE DO DOMÍNIO BACAJÁ

Um contexto geológico similar ao proposto por [Delor et al. \(2003\)](#) e que corrobora os modelos de [Vasquez et al. \(2008c\)](#) e [Macambira et al. \(2009\)](#), será apresentado a seguir. Informações complementares, baseadas no conjunto de dados aerogeofísicos, petrográficos, geoquímicos e nos modelos espaciais apresentados, serão discutidos aqui de forma a contribuir para o conhecimento geológico da área de estudo. Os processos descritos a seguir representam uma síntese da interpretação dos principais estágios que deram origem à atual configuração da região central do Domínio Bacajá.

Movimentação Distensiva e Constituição de Crosta Oceânica

A formação dos basaltos representando os protólitos das rochas que hoje formam a Sequência Três Palmeiras teve início a partir de uma movimentação extensional que originou a abertura de um oceano e, conseqüentemente, a extrusão de magma basáltico. Segundo [Delor et al. \(2003\)](#) essa abertura teria sido originada entre o escudo oeste africano e o Cráton Amazônico, durante o Eoriaciano (2.26-2.20 Ga).

Os resquícios da crosta oceânica antiga na região do Domínio Bacajá estão presentes tanto nos anfibolitos de composição basáltica da Sequência Três Palmeiras, quanto em resquícios de anfibolitos com composição de andesitos basálticos registrados na região norte da área. A fusão destas rochas teria também gerado os gabros (metagabros) intrudidos na sequência.

Compressão da Crosta Oceânica e Acresção Crustal com Pulsos Graníticos

Durante a fase de compressão da crosta oceânica, no Mesoriaciano, teriam ocorridos dois procesos relacionados ao magmatismo paleoproterozóico, que por sua vez teriam gerado batólitos com idades compreendidas entre 2.18-2.13 Ga ([Delor et al. 2003](#)). Esses batólitos, por serem sintectônicos, teriam desenvolvido uma forte foliação em ambiente dúctil a dúctil-rúptil.

Tonalitos e monzogranitos teriam sido gerados em uma associação de rochas representadas pelo *Cluster 5* obtido pela modelagem SOM. Nas imagens aerogeofísicas, estas rochas ocorrem na forma de feições lenticulares orientadas a WNW-ESE. Essas feições, com

médios a baixos valores gamaespectrométricos, podem estar relacionadas ao grupo de granitóides de 2,16 a 2,13 Ga, que foram relatados por [Vasquez \(2006\)](#) como granitóides cálcio-alcálicos de arcos magmáticos. Os metaquartzitos podem representar resquícios das bacias relacionadas ao arco riaciano.

Granodioritos, monzogranitos e sienitos contendo hornblenda, de composição metaluminosa, reconhecidos na área de estudo, não são comuns entre os granitóides colisionais ([Barbarin 1999](#), [Vasquez 2006](#)). Os granitóides citados, portanto, estariam relacionados a um segundo pulso de granitogênese sintectônica, tardi- a pós-colisional, de idade 2,10 Ga. Este pulso, por sua vez, teria se formado pela fusão dos granitóides com idade compreendida entre 2,16 e 2,13 Ga.

A ascensão granítica juntamente com os esforços gerados pela tectônica compressiva teria contribuído para o desenvolvimento de zonas de cisalhamento e arqueamento das estruturas que compõem a Sequência Três Palmeiras.

Evolução Crustal Pós-colisional

A região centro-leste do Domínio Bacajá, teria sido afetada por pulsos de magmatismo máfico representado na área de estudo por diques pertencentes ao Diabásio Penatecaua, com direção preferencial NNE-SSW. Esses diques podem ser relacionados àqueles descritos por [Delor et al. \(2003\)](#) no Escudo das Guianas.

Referências Bibliográficas

- Agnerian H. 2005. *Technical Report on the Volta Grande Gold Property, Brazil*. Prepared for Verena Mineral Corporations. 85p. [Web document]: Acessado em 05/08/2010. <http://www.verena.com/files/Volta/Technicalreport.pdf>
- Akima H. 1978a. A Method of Bivariate Interpolation and Smooth Surface Fitting for Irregularly Distributed Data Points. *ACM Trans. Math. Softw.* **4**(2):148-159. [Web document]: Acessado em 02/02/2009. <http://doi.acm.org/10.1145/355780.355786>
- Akima H. 1978b. Algorithm 526: Bivariate Interpolation and Smooth Surface Fitting for Irregularly Distributed Data Points [E1]. *ACM Trans. Math. Softw.* **4**(2):160-164. [Web document]: Acessado em 02/02/2009. <http://doi.acm.org/10.1145/355780.355787>
- Almeida F.F.M. de, Hasui Y., Neves B.B. de B., Fuck R.A. 1977. Províncias estruturais brasileiras. In: *VII Simpósio de Geologia do Nordeste - Actas*. Campina Grande, SBG-NE, **6**:363-391.
- Almeida F.F.M. de, Hasui Y., Neves B.B. de B., Fuck R.A. 1981. Brazilian Structural Provinces: an introduction. *Earth-Sciences Reviews*. **17**:1-29.
- Almieda F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B. 1976. The Upper Precambrian of South America. *Boletim Instituto de Geociências USP*, **7**:45-80.
- Andrade N. S. de O., Santarosa A. N. de C. 2005. O novo sistema SAR multipolarimétrico aerotransportado brasileiro. CCSIVAM / SIPAM / UNB, Brasília.
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origin and their geodynamic environment. *Lithos*, **46**:605-626.
- Barker F. 1979. Trondjemite: definition, environment and hypothesis of origin. In: F. Barker, Editor, Trondjemites, Dacites and Related Rocks. *Developments in Petrology*, United States Geological Survey, Denver, **6**:1-11.
- Barros C. E. de M., Macambira M. J. B., Santos M. C. da C., Silva D. C. C., Palmeira L. C. M., Souza M. M. 2007. Estruturas sinmagmáticas e idade de zircão de granitos (evaporação de

- Pb) paleoproterozóicos da parte leste do Domínio Bacajá, Província Maroni-Itacaiúnas. *Revista Brasileira de Geociências*, **37**(2):293-304.
- Bea F. 1999. Uranium. In: Marshall C.P., Fairbridge R.W. (eds). 1999. *Encyclopedia of Geochemistry*, Kluwer Academic Publishers, London, 712 p.
- Biddle K.T., Christie-Blick N. 1985. Glossary – Strike-slip deformation, Basin formation, and Sedimentation. In: Biddle K.T., Christie-Blick N. (eds.). 1985. *Strike-slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation*. SEPM – Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, **37**:375-386.
- Blakely R.J. 1996. *Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications*. Cambridge University Press, 441p.
- Bonham-Carter G.F. 1994. *Geographic information systems for geoscientists, modeling with GIS*. Ontario, Pergamon, 398p.
- Bonham-Carter G.F. 1997. *Geographic information systems for geoscientists, Computer methods in the geosciences*, Ottawa, Ontario, Canadá, 398p.
- Briggs I. C. 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, **39**:39-48.
- Cainzos R.P., Pascholati E.M., Souza Filho C.R. 2003. Utilização da classificação não-supervisionada de dados geofísicos em Cuba centro-oriental. *Revista Brasileira de Geofísica*, **20**(3):151-161.
- Caputo M.V., Rodrigues R., Vasconcelos D.N.N. 1971. *Litoestratigrafia da Bacia do Amazonas*. RENOR - Petrobras, 92 p.
- Carneiro C.C. 2005. Interpretação de dados de sensores remotos e aerogeofísicos como ferramenta na análise estrutural da área centro-oeste do sistema transcorrente Carajás (PA). Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 86p.
- Carneiro C. C., Crósta A. P., Silva A. M., Pinheiro R. V. L. 2006. Fusão de Imagens Altimétricas e Aeromagnetométricas como Ferramenta de Interpretação Geológica, Exemplo da Província Mineral de Carajás (PA). *Revista Brasileira de Geofísica*, **24**(2):261-271.
- Cheng Q., Agterberg F. P. 1999. Fuzzy Weights of Evidence Method and Its Application in Mineral Potential Mapping. *Natural Resources Research*, **8**(1):27-35.

- Cordani U. D., Tassinari C. C. G., Teixeira W., Basei M. A. S., Kawashita K. 1979. Evolução Tectônica da Amazônia com base nos dados geocronológicos. *II Congresso Geológico Chileno*, Actas... Arica, Chile, **4**: 137-48.
- Cordani, U.G., Tassinari, C.C.G., Kawashita, K. A. 1984. Serra dos Carajás como região limítrofe entre províncias tectônicas. *Ciências da Terra*, **9**:6-11.
- Costa J.B.S., Hasui Y. 1997. Evolução geológica da Amazônia. In: Rosa-Costa M.L. , Angélica R.S. (Coord.). *Contribuições a Geologia da Amazônia*. FINEP/SBG-Núcleo Norte, **5**:15-90.
- Cox K. G., Bell J. D. Pankhurst R. J. 1979. The Interpretation of Igneous Rocks. George Allen & Unwin.
- Cross W., Iddings J.P, Pirsson L.W., Washington H. S. 1902. A quantitative chemico- ineralogical classification and nomenclature of igneous rocks, *J. Geol.* **10**:555-690.
- Crósta A.P. 1992. *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. Instituto de Geociências, UNICAMP. Campinas, 164 p.
- Crósta A.P., Bicho C. P., Ferreira J.F.F. 1994. Image processing applied to aerogeophysics: an important tool for geological mapping and exploration in the Brazilian Amazon. In: *10th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing - Anais*, San Antonio, Texas, **2**:539-550.
- Daemon R.F. 1975. Contribuição à datação da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas. *Revista Brasileira de Geociências*, **5**(2):78-84.
- Dallemand J.F., Lichtenegger J., Raney R.K., Schumann R. 1993. *Radar imagery: theory and interpretation - Lecture Notes*. Rome, FAO/ESA, 1993. 103p. (RSC Series 67).
- Davies D.L., Bouldin D.W. 1979. A cluster separation measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **1**(2):224-227.
- Delor C., Lahondère D., Egal E., Lafon J.M., Cocherie A., Guerrot C., Rossi P., Truffert C., Théveniaut H., Phillips D., Avelar V.G. 2003. Transamazonian crustal growth and reworking as revealed by the 1:500,000-scale geological map of French Guiana (2nd edition). *Géologie de la France*, **2-3-4**:5-57.
- Dickson B.L., Scott K.M. 1997. Interpretation of aerial gamma ray surveys-adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2): 187-200.

- Docegeo. 1987. Lithostratigraphic review of the Carajás District and Southern Pará-Brazil. In: Final meeting of the working group, Carajás– PA. *Precambrian Evolution of the Amazon Region, Extended abstract...* Carajás-PA: IUGS-UNESCO, 32-39.
- Docegeo. 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: *Congresso Brasileiro de Geologia, 35., 1988, Belém. Anexo aos anais...* Belém: CVRD/SBG, 11-59.
- Drury S. A. 2001. *Image interpretation in geology*. Malden, MA. Blackwell Science. 3rd edition.
- Elachi C. 1987. *Spaceborne radar remote sensing: applications and techniques*. New York: IEEE Press, 255p.
- Faraco M.T.L., Carvalho J.M. de A., Klein E.L. 1996b. *Carta Metalogenética da Província de Carajás - SE do Pará. Folha Araguaia (SB.22). Nota Explicativa*. Escala 1: 1.000.000. Belém: CPRM, 28 p.
- Faraco M.T.L., Carvalho J.M.A., Klein E.L. 1996a. *Carta Metalogenética da Província Aurífera do Tapajós: escala 1:500.000. Nota explicativa*. Belem: CPRM, 13 p.
- Faraco M.T.L., Vale A.G., Santos J.O., Luzardo R., Ferreira A.L., Oliveira M., Marinho P.A.C. 2005. Levantamento geológico da região ao norte da província Carajás. In: *Contribuições à Geologia da Amazônia*, **4**:32-43.
- Fraser S.J., Dickson B.L. 2007. A New Method for Data Integration and Integrated Data Interpretation: Self-Organising Maps. In: *Milkereit B. (editor). 2007. Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, Proceedings*, 907-910.
- Graham D.F., Moretzohn J.S. 1997. Airbone radar data: utility for geological mapping in tropical environments, Serra Pelada, Pará, Brazil. *CIM Bulletin*, **90**:108-113.
- Grasty R.L., Minty B.R.S. 1995. *A guide to the technical specifications for airborne gamma-ray surveys*. Australian Geological Survey Organisation AGSO Record 1995/60.
- Grasty R.L., Glyn J.E., Grant J.A. 1985. The analysis of multichannel airborne gamma-ray spectra. *Geophysics*, **50**(12):2611-2620.
- Gunn P.J., Dentith M.C. 1997. Magnetic responses associated with mineral deposits. AGSO Journal **17**(2):145-158.

- Hasui Y., Haralyi N.L.E., Schobbenhaus C. 1984. Elementos geofísicos e geológicos da região amazônica: subsídios para o modelo geotectônico. *In: II Simposium Amazônico - Actas.* Manaus, SBG-NO, 129-145.
- Henderson F.M., Lewis A.J. 1998. Principles and applications of imaging radar. *In: Manual of Remote Sensing*, 3rd edition, John Wiley/American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 2, 866 p.
- Horsfall K.R. 1997. Airborne magnetic and gamma ray data acquisition. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2):159-174.
- International Atomic Energy Agency. 2003. *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data: Technical Report 1363*. IAEA, Viena, 173 p.
- Issler R.S., Andrade A.R.F., Montalvão R.M.G., Guimarães G., Silva G.G., Lima M.I.C. 1974. *Geologia. Folha SA.22 - Belém*. DNPM/Radam (Relatório técnico), **5**:1-71.
- Johannsen A. 1931. *A descriptive petrography of the igneous rocks*. Univ. Chicago Press, Introduction, textures, classifications and glossary, v. I, 319 p.
- Jorge João X.S., Vale A.G., Lobato T.A.M. 1987. Folha SA.22- Y-D, Altamira. Projeto especial mapas de recursos minerais de solos e de vegetação para a área do programam Grande Carajás. Subprojeto Recursos Minerais, Brasília, DNPM/CPRM, 31 p.
- Jorge João X.S., Vale A.G., Lobato T.A.M. 2001. Folha Altamira (PA) SA.22-Y-D. Escala 1:250.000. Geologia Regional. *In: Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil*. Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 03-27.
- Killeen P.G. 1979. Gamma ray spectrometric methods in uranium exploration – Application and interpretation. In *Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores*, edited by P.J. Hood, Geological Survey of Canada Economic Geology Report 31, 163-230.
- Klein E. L., Carvalho J.M.A. 2008. Recursos Minerais. *In: Vasquez M. L., Rosa-Costa L.T. da. 2008. Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará*. Escala 1:1.000.000. 328p + CD-ROM.

- Kohonen T. 1982. Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics*, 43:59-69.
- Kohonen T. 2001. *Self-Organizing Maps*. Third Extended Edition, Springer Series, Information Sciences, **30**, 501 p.
- Krishnaswami S., 1999. Thorium. In: *Marshall C.P., Fairbridge R.W. (editors). 1999. Encyclopedia of Geochemistry*. Kluwer Academic Publishers, London, 712 p.
- Langmuir D., Hermans J.S. 1980. The mobility of thorium in natural waters at low temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **44**:1753-1766.
- Lee J.S. 1986. Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images", *Optical Engineering*, **25**: 636-643.
- Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W. 2008. *Remote Sensing and Image Interpretation - Sixth Edition*. John Wiley and Sons, Inc. Hoboken, NJ, 756p.
- Luyendyk A.P.J. 1997. Processing of airborne magnetic data. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*. **17**:31-38.
- Maas M.V.R., Oliveira C. G., Pires A.C.B., Moraes R.A.V. 2003. Aplicação da geofísica aérea na exploração mineral e mapeamento geológico do setor sudoeste do cinturão cuprífero Orós-Jaguaribe. *Revista Brasileira de Geociências*, **33**(3):279-288.
- Macambira M.J.B., Silva D.C., Vasquez M.L., Barros C.E.M. 2004. Investigação do limite Arqueano-Paleoproterozóico ao norte da Província de Crajás, Amazônia Oriental. In: *XLIII Congresso Brasileiro de Geologia*, Araxá, CD-ROM.
- Macambira M.J.B., Pinheiro R.V.L., Armstrong R.A. 2007. A fronteira Arqueano-Paleoproterozóica no SE do Cráton Amazônico; abrupta no tempo, suave na tectônica. In: *Simpósio de Geologia da Amazônia, 10*. Porto Velho. Anais... SBG, p.105-108. CD-ROM.
- Macambira M.J.B., Barros C.E.M., Silva D.C.C., Santos M.C.C. 2001. Novos dados geocronológicos para a região ao norte da Província de Carajás: evidências para o estabelecimento do limite arqueano-paleoproterozóico no sudeste do Cráton Amazônico. In: *Simpósio de Geologia da Amazônia, 7*, Belém, CD-ROM.

- Macambira M.J.B., Silva, D.C.C., Scheller T., Barros C.E.M. 2003. New isotope evidences confirming the existence of a Paleoproterozoic terrain in the region at the north of the Carajas Mineral Province. *In: CBPM, Simpósio Sul-Americano de Geologia Isotópica*, 4, Salvador, 1:205-206.
- Macambira M.J.B., Vasquez M.L., Silva D.C.C., Galarza M.A., Barros C.E.M., Camelo J.F. 2009. Crustal growth of the central-eastern Paleoproterozoic domain, SW Amazonian craton: Juvenile accretion vs. reworking. *Journal of South American Earth Sciences*. **27**: 235-246.
- Magalhães L. A., Souza Filho C. R., Silva A. M. 2007. Caracterização geológica - geofísica da porção central do Amapá com base em processamento e interpretação de dados aerogerosfísicos. *Revista Brasileira de Geociências*, **37**(2):2-13.
- Matheron G. 1963. Principles of geostatistics. *Economic Geology*. **58**:1246-1266.
- Meirelles M. S. P., Moreira F. R., Camara G. 2007a. Técnicas de Inferência Espacial. *In: Meirelles, M. S. P.; Camara, G.; Almeida, C. M. 2007. Geomática: modelos e aplicações ambientais*, Brasília: EMBRAPA. p. 105-189.
- Meirelles M. S. P., Moreira F. R., Camara G., Coelho Netto A. L., Carneiro T. A. de À. 2007b. Métodos de inferência geográfica: aplicação no planejamento regional na avaliação ambiental e na pesquisa mineral. *In: Meirelles, M. S. P.; Camara, G.; Almeida, C. M. 2007. Geomática: modelos e aplicações ambientais*, Brasília: EMBRAPA. p. 283-357.
- Mineração Rio Jatobá Ltda. 1986. Processos: DNPM 851110-851112/82, 851182-851184/82 e 851186/82.
- Minty B.R.S. 1991. Simple micro-levelling for aeromagnetic data. *Exploration Geophysics*, **22**:591-592.
- Minty B.R.S. 1997. Fundamentals of airborne gamma ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, **17**(2):39-50.
- Mittlefehldt D.W. 1999. Potassium. *In: Marshall, C.P and Fairbridge, R.W. (eds). 1999. Encyclopedia of Geochemistry*. Kluwer Academic Publishers, London, 712 p.

- Monteiro P.C. 2006. Investigação do limite entre domínios geocronológicos da região do médio Rio Xingu, sudeste do Cráton Amazônico. *Dissertação de Mestrado*, Centro de Geociências - Universidade Federal do Pará, 104p.
- Morais M.C., Paradella W., Rennò C.D. 2002. Mapeamento de Lateritas Mineralizadas em Ferro do Depósito de N1 (Carajás-Pa) através de Classificação Textural de Imagens de Radar do Sarex'92. *Revista Brasileira de Geociências*, **32**(3):351-360.
- Nabighian M. N. 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations: *Geophysics*, **49**:780-786.
- Nabighian M.N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, **37**:507-517.
- Nabighian M.N. 1974. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, **39**:85-92.
- Naudy H., Dreyer H. 1968. Non-linear filtering applied to aeromagnetic profiles. *Geophysical Prospecting*, **16**(2):171-178.
- Oliveira J.R., Silva Neto C.S., Costa E.J.S. 1994. Folha Serra Pelada (PA) SB.22.X.C. Estado do Pará, escala 1:250.000. In: *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB)*. Brasília: CPRM, 220 p.
- Paradella W., Bignelli P.A., Veneziani P., Pietsch R.W., Toutin T. 1997. Airborne and spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) integration with Landsat TM and gamma ray spectrometry for geological mapping in a tropical rainforest environment, the Carajás Mineral Province, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, **18**:1483-1501.
- Paradella W., Santos A.R. dos., Veneziani P., Moraes M.C. de. 2000b. Synthetic aperture radar for geological applications in the tropics: experiences from the Brazilian Amazon region. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**:538-542.
- Paradella W., Santos A.R. dos., Veneziani P., Sant'Anna M.V., Moraes M.C. de. 2000a. Geological investigation using RADARSAT-1 images in the tropical rain forest environment of Brazil. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **26**:82-90.

- Pearce J. A., Harris N. W., Tindle A. G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, **25**:956-983.
- Pedroso E.C., Rivard B., Crósta A.P., Souza Filho C.R., Miranda F.P. 2001. Reconnaissance Geologic Mapping in the Tapajós Mineral Province, Brazilian Amazon, using Spaceborne SAR Imagery and Airborne Geophysics. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **27**(6): 669-678.
- Pietsch R.W. 1993. *TFI SAR processing procedure*. Ottawa: Dendron Resource Surveys, CCRS, 7p.
- Pires A.C.B. 1990. Statistical characterization of greenstone sequences using magnetic and gamma-ray spectrometric data, Guarinos-Pilar de Goiás area, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **20**(1-4):293-298.
- Pires A.C.B. 1995. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, **25**(1):61-68.
- Rencz A.N. 1999. Remote sensing for the earth sciences. *Manual of Remote Sensing*, 3rd edition, vol. 3. John Wiley/American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 707 p.
- Ricci P.S.F., Costa E.J.S., Faria C.A.S., Oliveira J.R. 2003. The reanalyzed Carajás Block is interposed between the Bacajá (The crustal reworking “lost link” now being predicted) and Rio Maria Archean Terranes – Guaporé Craton. In: *VIII Simpósio de Geologia da Amazônia*, Manaus, Amazonas.
- Ricci P.S.F. 2006b. Mineralogically bizarre charnockitoids of the Bacajá High-Grade Block (Pará): discharnockitized and reemplaced plutons mistakenly confused with granitoids crystallized at shallower crustal levels. In: *IX Simpósio de Geologia da Amazônia*, Sociedade Brasileira de Geologia, Belém, Brazil, Resumos Expandidos, CD-ROM.
- Ricci P.S. F. 2006d. Most of the “Xingu complex” previously mapped in the Bacajá high-grade block (Pará) comprises retrograded granulites as yet unsuspected from a petrological standpoint. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 43, Aracaju. Anais... Salvador: SBG. Núcleo Bahia-Sergipe, 381p.

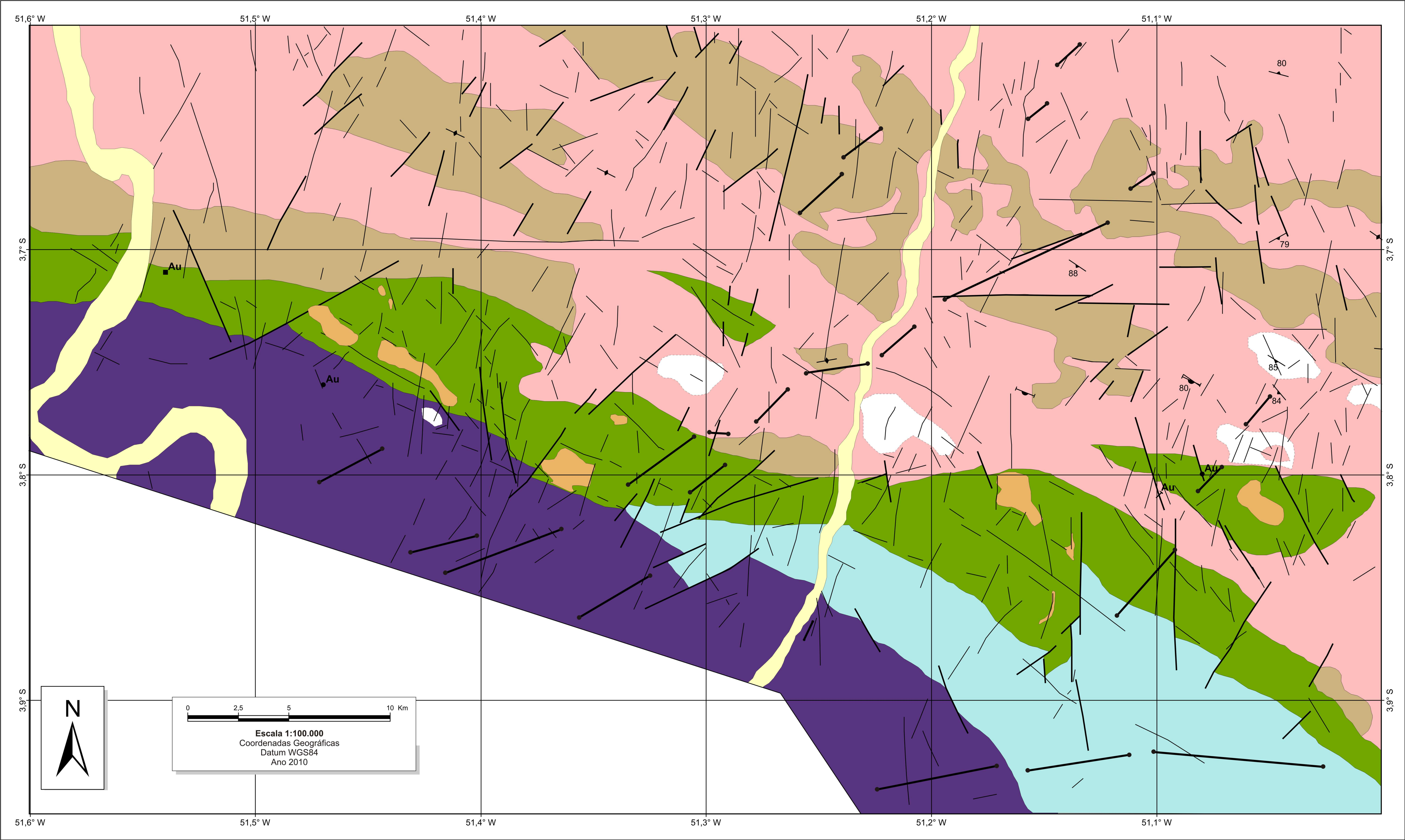
- Ricci P.S.F., Costa E.J.S. 2004. Orogenic charnockitoids previously mapped as granulitic basement of the Bacajá Terrane (Eastern-Central Pará). *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 42. Araxá. Resumos... SBG. CD-ROM.
- Roest W. R., Verhoef J., Pilkington M. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal: *Geophysics*, **57**:116-125.
- Rollinson H. 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. New York, Longman Scientific & Technical, John Wiley & Sons, 352 p.
- Rossetti D.F., Neto R.G. 2006. First evidence of marine influence in the Cretaceous of the Amazonas Basin, Brazil. *Cretaceous Research*, p. 1-16.
- Ruy A. C., Silva A.M., Toledo C.L.B., Souza Filho C.R. 2006. Uso de dados aerogeofísicos de alta densidade para mapeamento geológico em terrenos altamente intemperizados: o estudo de caso da região de Cláudio, porção sul do Cráton São Francisco. *Revista Brasileira de Geofísica*, **24**(4):535-546.
- Ruy A.C. 2009. Aplicação de dados magnéticos gradiométricos e gamaespectrométricos no Terreno Granito-Greenstone Belt Três Palmeiras, Volta Grande do Xingu, Pará: Implicações na caracterização geológico-geofísica e na seleção de alvos para exploração mineral. *Dissertação de Mestrado*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 83p.
- Sabine C. 1999. Strategies for Mineral Exploration. *In: Rencz A.N. (ed.). 1999. Remote Sensing for the Earth Sciences - Manual of Remote Sensing*, 3rd Edition, v. 3. John Wiley/American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Santos A.R., Paradella W., Veneziani P., Morais M.C. de. 1999. A estereoscopia com imagens RADARSAT-1: uma avaliação geológica na Província Mineral de Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, **29**:627-632.
- Santos J.O.S. 2003. Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central. *In: Bizzi L. A., Schobbenhaus C., Vidotti R. M., Gonçalves J. H. (eds.). 2003. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Brasília: CPRM-Serviço Geológico do Brasil, p. 169-226.
- Santos J.O.S. Hartmann L. A., Gaudette H.E., Groves D.I., Mcnaughton N.J., Fletcher I.R. 2000. A new understanding of the provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, **3**(4):453-488.

- Santos M.V., Tassinari C.C.G., Souza Filho E.E., Teixeira W., Ribeiro A.C.O., Payolla B., Vasconi A. 1988. Litoestratigrafia das rochas precambrianas na Bacia do Médio Rio Xingu, Altamira, Pará. In: *SBG, Congr. Lat. Amer. Geol.*, 7, Extended Abstracts, p.363-367.
- Schobbenhaus C., Brito Neves B.B. 2003. A Geologia do Brasil no Contexto da Plataforma Sul-Americana. In: *Bizzi L. A., Schobbenhaus C., Vidotti R. M., Gonçalves J. H. 2003. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. CPRM. Brasília, 5-54. Texto para o Mapa Geológico do Brasil (escala 1:2.500.000).
- Schobbenhaus C., Gonçalves J.H., Santos J.O.S., Abram M.B., Leão Neto R., Matos G.M.M., Vidotti R.M., Ramos M.A.B., Jesus J.D.A. de. 2004. *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas*. Programa Geologia do Brasil. CPRM, Brasília. CD-ROM.
- Schowengerdt R. A. 1997. Remote Sensing, Models and Methods for Image Processing. Second Edition. Academic Press.
- Silva A.M. 1999. Integração de dados geológicos e geofísicos utilizando-se uma nova técnica para seleção de alvos para exploração mineral, aplicada ao Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero. *Tese de Doutorado*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 195p.
- Simonett P.S., Davis R.E. 1983. Image analysis - active microwave. In: American Society of Photogrammetry (ASP). Manual of Remote Sensing: theory, instruments and techniques. Falls Church, 2:1125-1179.
- Soares P.C., Fiori A.P. 1976. Lógica e Sistemática na Análise e interpretação de Fotografias Aéreas. *Notícias Geomorfologicas*. **16**(32):71-104.
- Souza V.S. 1995. Geologia e mineralizações auríferas do Garimpo do Manelão, região do Bacajá - PA. *Dissertação de Mestrado*, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Souza V.S., Macambira M.J.B., Koutchoubey B. 2003. Idade de zircão do granito Felício Turvo, garimpo de ouro do Manelão, região do Bacajá (PA): implicações tectônicas. Simpósio de Geologia da Amazônia, vol. 8, SBG, Manaus, Resumos Expandidos, CD-ROM.

- Souza V.S., Kotschoubey B. 2005. Geologia e mineralizações auríferas do garimpo do Manelão, região do médio rio Bacajá (PA). In: Horbe A.M.C., Souza V.S. (Coord.). 2005. *Contribuições à Geologia da Amazônia*. Manaus, SBG, **4**:151-163.
- Souza C.S. 2008. Petrologia, geologia estrutural e aerogeofísica das rochas da porção leste do Domínio Bacajá, Província Maroni-Itacaiúnas. *Dissertação de Mestrado*, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 163p.
- Streckeisen A. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Reviews*, **12**:1-33.
- Tassinari C.C.G., Macambira M.J.B. 1999. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, **22**(3):174-182.
- Tassinari C.C.G., Macambira M.J.B. 2004. A Evolução Tectônica do Cráton Amazônico. In *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Editora Beca, p. 471-485.
- Teixeira W., Tassinari C.C.G., Cordani U.G., Kashawita K. 1989. A review of the geochronology of the Amazonian craton: tectonic implications. *Precambrian Research*, **42**:213-227.
- Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. 1990. *Applied Geophysics*, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 770 p.
- Teruiya R.K., Paradella W.R., Santos A.R., Dall'Agnol R., Veneziani P. 2008. Integrating airborne SAR, Landsat TM and airborne geophysics data for improving geological mapping in the Amazon Region: the Cigano Granite, Carajás Province, Brazil. *Intern. Jour. of Rem. Sens.*, **29**(13):3957-3974.
- Thurston J.B., Smith R.S. 1997. Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI(TM) method. *Geophysics* **62**(3):807-813.
- Ulaby F.T., Kouyate F., Brisco B., Williams T.H.L. 1986. Textural Information in SAR Images. In: *IEEE Transactions on geoscience and Remote Sensing*, **GE-24**(2):235-245.
- Vasquez M.L. 2006. Geocronologia em zircão, monazita e granada e isótopos de Nd das associações litológicas da porção oeste do domínio Bacajá: evolução crustal da porção meridional da Província Maroni-Itacaiúnas - Sudeste do Cráton Amazônico. *Tese de Doutorado*, Centro de Geociências - Universidade Federal do Pará, 212p.

- Vasquez M.L., Macambira M.J.B., Armstrong R. 2008a. Zircon geochronology of granitoids from the western Bacajá domain, southeastern Amazonian craton, Brazil: Neoproterozoic to Orosirian evolution. *Precambrian Research*, **161**:279-302.
- Vasquez M.L., Rosa-Costa L. T., Silva C.M.G., Klein E. L. 2008b. Compartimentação Tectônica. In: Vasquez M. L., Rosa-Costa L. T. da. 2008. *Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará*. Escala 1:1.000.000. 328p + CD-ROM.
- Vasquez M.L., Rosa-Costa L. T., Silva C.M.G., Ricci P. S. F., Barbosa J.P. de O., Klein E. L. Lopes E.C.S., Macambira E.M.B., Chaves C.L., Carvalho J.M.A., Oliveira J.G.F., Anjos G.C., Silva H.R. 2008c. Unidades Litoestratigráficas. In: Vasquez M. L., Rosa-Costa L. T. da. 2008. *Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará*. Escala 1:1.000.000. 328p + CD-ROM.
- Vasquez M. L., Rosa-Costa L. T. da. 2008. *Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará*. Escala 1:1.000.000. 328p + CD-ROM.
- Vasquez M.L., Macambira M.J.B., Galarza M.A. 2005. Granitóides transamazônicos da região Iriti-Xingu, Estado do Pará: novos dados geológicos e geocronológicos. in Horbe, A., Souza, W., eds., *Contribuições à Geologia da Amazônia*, **4**:16-31.
- Veneziani P., dos Anjos C.E. 1982. *Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia*. São José dos Campos: INPE, 61p.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*. London: Unwin Hyman.
- Zadeh L.A. 1965. Fuzzy sets. *Information and Control*, **8**(3):338-353.

ANEXO 01 - MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA CENTRAL DO DOMÍNIO BACAJÁ



LOCALIZAÇÃO SEGUNDO A ARTICULAÇÃO DAS FOLHAS 1:100.000

UNIDADES LITOLÓGICAS

- Unidade 1 - metatonalitos
- Unidade 2 - anfibolitos, quartzitos e metagabros
- Unidade 3 - biotita tonalitos
- Unidade 4 - leucomonzongranitos, granodioritos, leucosienogranitos e sienitos
- Unidade 5 - relacionada ao Ortognaisse Pacajá (Vasquez e Rosa-Costa 2008)
- Unidade 6 - sedimentos aluvionares
- Unidade 7 - lateritas

CONVENÇÕES ESTRUTURAIS

- acamamento magmático
- foliação com mergulho vertical
- foliação com mergulho indicado
- diques
- traços de falhas e/ou fraturas

RECURSOS MINERAIS

- Garimpo ativo, Ocorrência
- Não explotado, Depósito
- Não explotado, Ocorrência

FUSÃO R(K)-G(eTh)-B(eU) + R99B/SAR

IMAGEM do RADAR R99B/SAR (B. L, POL VV)

INSTITUIÇÃO:
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

UNIDADE:
INST. DE GEOCIÊNCIAS - DGRN

CURSO:
DOUTORADO EM GEOCIÊNCIAS

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
METALOGÊNESE

PROJETO:
MODELAGEM ESPACIAL DO DOMÍNIO BACAJÁ (PA)

AUTOR:
CLEYTON DE CARVALHO CARNEIRO

ORIENTADOR:
ALVARO CRÓSTA

CO-ORIENTADORES:
ADALENE SILVA E CARLOS EDUARDO BARROS