

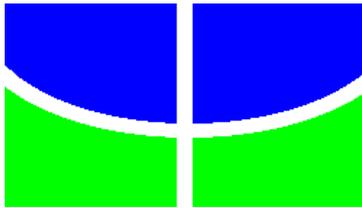
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO RECONHECIMENTO DE ÁREAS CHAVES
À EXPLORAÇÃO AURÍFERA NA PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS**

THAIS ANDRESSA CARRINO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOLOGIA N° 265

**Brasília-DF
Fevereiro, 2010**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO RECONHECIMENTO DE ÁREAS CHAVES
À EXPLORAÇÃO AURÍFERA NA PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS**

THAIS ANDRESSA CARRINO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOLOGIA N° 265

Orientadora: Profa. Dra. Adalene Moreira Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Nilson Francisquini Botelho

Banca examinadora: Profa. Dra. Catarina Labouré Benfica Toledo (IG-UnB)
Prof. Dr. Álvaro Penteadó Crósta (IG-UNICAMP)

**Brasília-DF
Fevereiro, 2010**



Imagem SAR-R99B (Lhh) do rio Tapajós, proximidade do prospecto homônimo

Ao doutor Sérgio Sacani Sancevero pela ajuda e opiniões a respeito de processamentos geoestatísticos e da APC, e pela paciência dos inúmeros emails.

Aos professores Nilson F. Botelho e Adalene M. Silva pela oportunidade de mestrado no IG-UnB.

À Mapex Mineração, Importação e Exportação Ltda., nas pessoas de Marcelo Pinto e Luiz Carlos Clerot, pela cessão de dados e oportunidade da realização do campo.

Ao Sr. Carlos Alberto Ribeiro de Freitas (SIPAM/CTO-Belém) pela cessão dos dados SAR-R99B.

À CAPES pela bolsa de pós-graduação.

À banca examinadora.

AGRADECIMENTOS	i
SUMÁRIO	ii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	ix

RESUMO	x
ABSTRACT	xi

CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO	1
1. APRESENTAÇÃO	1
1.1. Localização e aspectos fisiográficos da área de estudo	4
1.2. Objetivos gerais e específicos	4

CAPÍTULO II. CONTEXTO GEOLÓGICO DA PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS	6
2. ARCABOUÇO GEOLÓGICO REGIONAL: O CRATON AMAZONICO	6
2.1. Arcabouço geológico da Província Mineral do Tapajós	9
2.1.1. UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS DA PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS	12
2.1.1.1. Unidades litoestratigráficas paleoproterozóicas	12
2.1.1.2. Unidade litoestratigráfica mesoproterozóica	18
2.1.1.3. Unidades litoestratigráficas paleozóicas	18
2.1.1.4. Unidade litoestratigráfica mesozóica	19
2.1.1.5. Unidades litoestratigráficas cenozóicas	19
2.1.2. CONTEXTO ESTRUTURAL DA PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS	20
2.1.3. MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS	20
2.2. Prospectos 12 de Outubro, Maués, Rosa de Maio e Bandeirante	25
2.2.1. PROSPECTO 12 DE OUTUBRO	25
2.2.2. PROSPECTO MAUÉS	26
2.2.3. PROSPECTOS ROSA DE MAIO E BANDEIRANTE	27

CAPÍTULO III. MATERIAIS, AVALIAÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS MULTIFONTE	30
3. APRESENTAÇÃO	30
3.1. Dados cartográficos	30
3.2. Imagens SAR-R99B	30
3.2.1. AVALIAÇÃO VISUAL E PRÉ-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS SAR-R99B	31
3.3. Dados geofísicos	32
3.3.1. AEROLEVANTAMENTO BLOCO 1- PROVÍNCIA AURÍFERA DO TAPAJÓS	32
3.3.2. AEROLEVANTAMENTOS MAUÉS, ROSA DE MAIO, BANDEIRANTE E 12 DE OUTUBRO	32
3.3.3. DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS TERRESTRES	34
3.3.4. AVALIAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS AÉREOS	34
3.3.4.1. Gamaespectrometria	34
3.3.4.2. Magnetometria	37
3.3.5. MICRONIVELAMENTO DE DADOS GEOFÍSICOS AÉREOS E GERAÇÃO DOS GRIDS	39
3.4. Dados altimétricos	42
3.4.1. PRÉ-PROCESSAMENTO DE IMAGENS SRTM	43
3.5. Dados geoquímicos	43

CAPÍTULO IV. CARACTERIZAÇÃO DOS PROSPECTOS 12 DE OUTUBRO, ROSA DE MAIO, BANDEIRANTE E MAUÉS	45
--	----

4. APRESENTAÇÃO	45
4.1. Prospecto 12 de Outubro	45
4.1.1. <i>PROCESSAMENTOS E ANÁLISES DE DADOS MULTIFONTE</i>	45
4.1.2. <i>INTEGRAÇÃO DE DADOS</i>	62
4.1.3. <i>MODELAGEM DE DADOS ESPACIAIS</i>	66
4.2. Prospectos Rosa de Maio e Bandeirante	74
4.2.1. <i>PROCESSAMENTO, INTEGRAÇÃO E ANÁLISES DE DADOS MULTIFONTE</i>	74
4.2.2. <i>MODELAGEM DE DADOS ESPACIAIS</i>	97
4.3. Prospecto Maués	103
4.3.1. <i>INTERPRETAÇÕES E INTEGRAÇÃO DE DADOS</i>	103
4.3.2. <i>MODELAGEM DE DADOS ESPACIAIS</i>	113
4.4. Discussões	116
<i>CAPÍTULO V. OUTRAS ÁREAS CHAVES À EXPLORAÇÃO AURÍFERA NO TAPAJÓS</i>	127
5. APRESENTAÇÃO	127
5.1. Contexto geológico	127
5.1.1. <i>OURO ROXO-CANTAGALO</i>	127
5.1.2. <i>CHICO TORRES</i>	130
5.2. Materiais	131
5.3. Abordagem metodológica	131
5.3.1. <i>AValiação e interpretação de dados SAR</i>	131
5.3.2. <i>IMAGENS GEOFÍSICAS AÉREAS</i>	131
5.3.3. <i>MAPAS DE POTENCIAL AURÍFERO</i>	132
5.4. Resultados	132
5.4.1. <i>OURO ROXO-CANTAGALO</i>	132
5.4.2. <i>CHICO TORRES</i>	139
5.5. Discussões	145
<i>CAPÍTULO VI. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</i>	147
<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	156
<i>APÊNDICE I – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</i>	163

Figura 1.1. Localização da Província Mineral do Tapajós nos municípios dos estados do Amazonas e do Pará, incluindo principais vias de acesso, rede de drenagem e as áreas dos prospectos investigadas nesta dissertação (Modificado de Klein <i>et al.</i> 2001a, CPRM 2004).	2
Figura 2.1. Compartimentação do Cráton Amazônico de acordo com Costa & Hasui (1997). A Província Mineral do Tapajós mostra-se segmentada pelo cinturão de cisalhamento Médio Tapajós, de direção NW-SE.	7
Figura 2.2. Subdivisão do Cráton Amazônico: (a) em seis províncias geocronológicas da concepção de Tassinari (1996) e Tassinari & Macambira (1999, 2004) e, (b) em sete compartimentações geocronológicas, segundo Santos <i>et al.</i> (2000, 2006) (<i>AC</i> = Complexo Arequipa; <i>GC</i> = Complexo Garzón).	8
Figura 2.3. Imagem da amplitude do sinal analítico (ASA) e inclusão de dois lineamentos magnéticos interpretados por Silva (2003): a linha preta tracejada indica o possível limite, ainda não totalmente confirmado, que separa as províncias Amazônia Central e Tapajós-Parima; a linha branca tracejada compreende a interpretação do possível registro da subducção de crosta oceânica e formação do arco Cuiú-Cuiú.	11
Figura 2.4. Compartimentação tectônica da Província Mineral do Tapajós (Klein <i>et al.</i> 2001a). Em vermelho, as regiões dos prospectos abordados na dissertação.	13
Figura 2.5. Mapa geológico (a) e metalogenético (b) modificados de Klein <i>et al.</i> (2001), e indicação das regiões dos prospectos abordados nesta dissertação de mestrado.	15
Figura 2.6. Imagem ternária dos canais de K, eTh e eU em RGB, com indicação dos principais megalineamentos paleoproterozóicos da Província Mineral do Tapajós. Destaque aos três <i>trends</i> auríferos propostos por Coutinho (2008).	23
Figura 3.1. Exemplo de perda de resolução verificada em todos os segmentos cedidos pelo CENSIPAM em referência à Missão Terra do Meio Oeste abrangendo a região da Província Mineral do Tapajós.	31
Figura 3.2. Ilustração da disposição dos três sensores magnetométricos gradiométricos e da separação entre os mesmos (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2006a, b).	34
Figura 3.3. Mapas da disposição das linhas de vôo e de controle dos aerolevantamentos Maués, 12 de Outubro, Rosa de Maio e Bandeirante, e indicação das distâncias médias entre as mesmas. Para o levantamento 12 de Outubro, estão indicadas as áreas referentes aos três <i>grids</i> gerados devido à grande variação de espaçamento de linhas de vôo.	38
Figura 3.4. Exemplo da aplicação do parâmetro P e da diferença quarta, observando-se ausência de dados ruidosos (Linha de vôo L10130 do aerolevantamento Maués).	39
Figura 4.1. Localização da região do prospecto 12 de Outubro mostrada no retângulo preto. Observa-se o predomínio de drenagens com estruturação NE-SW (a) , bem como principais lineamentos sobrepostos ao modelo digital de terreno (SRTM) (b) . A partir da imagem ternária de Kn, eThn e eUn integrada com o SAR-R99B (Lhh), verifica-se a inserção da área em apreço no domínio do Grupo Iriri e Formação Bom Jardim (c) .	46
Figura 4.2. Localização do open pit <i>Main Breccia</i> na imagem ternária (RGB) de K, eTh e eU, e observação de riolitos brechados, marcados por intensa silicificação e pela presença de <i>stockworks</i> , conforme verificado em fotos (Ponto DO-MAG01).	47
Figura 4.3. Gráficos referentes a medidas gamaespectrométricas de materiais geológicos no prospecto 12 de Outubro. A descrição das amostras medidas é apresentada em quadro adjacente, assim como a localização das medidas efetuadas.	48
Figura 4.4. Dados geoquímicos de rochas mineralizadas do prospecto 12 de Outubro, e gráfico de K ₂ O por SiO ₂ reproduzido de Botelho <i>et al.</i> (2009) e Pinto <i>et al.</i> (2009). A medida que ocorre um aumento de sílica nas zonas mineralizadas, na maioria das vezes associado a expressivas anomalias auríferas, ocorre um decréscimo dos elementos K ₂ O, Th e U.	50
Figura 4.5. Aplicação da simulação indicatriz sequencial aos dados amostrados de ouro em solo e indicação dos principais parâmetros utilizados.	51
Figura 4.6. Perfis gamaespectrométricos em composição colorida RGB e indicação da principal área aurífera delimitada por retângulo preto. As linhas de vôo selecionadas para análise (L30102, L30106), juntamente com respectivas linhas de amostragem geoquímica para ouro em solo, estão apresentadas.	53
Figura 4.7. Dados gamaespectrométricos (K, eTh, eU) e de magnetometria gradiométrica (Gy)	54

relacionados à linha de vôo L30102, e respectiva malha geoquímica de ouro em solo integrados com a localização dos principais *pits* do prospecto 12 de Outubro em imagem ternária RGB de K, eTh e eU em 2,5D.

Figura 4.8. Dados gamaespectrométricos (K, eTh, eU) e de magnetometria gradiométrica (Gy) relacionados à linha de vôo L30106, e respectiva malha geoquímica de ouro em solo integrados com a localização dos principais *pits* do prospecto 12 de Outubro em imagem ternária RGB de K, eTh e eU em 2,5 D.

55

Figura 4.9. Recortes dos *grids* de eU, eTh, K e da razão K/eTh na principal região mineralizada no prospecto 12 de Outubro. Notar altas assinaturas de eTh relacionadas com a presença de solos, assim como baixos valores de K, eU e da razão K/eTh. A linha tracejada branca mostra o alinhamento ENE-WSW dos *pits*, demarcado por valores médios de eTh e médios a altos de K/eTh e K.

57

Figura 4.10. Imagens gamaespectrométricas em composição colorida RGB (K, eTh, eU) abrangendo o levantamento 12 de Outubro. Interpretações principais estão indicadas.

58

Figura 4.11. Comparação de imagens magnetométricas e interpretação de principais lineamentos. O retângulo preto indica a principal área mineralizada: **(a)** gradiente horizontal na direção x (Gx); **(b)** primeira derivada horizontal na direção x do campo magnético anômalo (Dx); **(c)** gradiente horizontal na direção y (Gy); **(d)** primeira derivada horizontal na direção y do campo magnético anômalo (Dy); **(e)** primeira derivada vertical do campo magnético anômalo (Dz); **(f)** amplitude do sinal analítico; **(g)** amplitude do gradiente horizontal total; **(h)** inclinação do sinal analítico.

59

Figura 4.12. Imagem SAR-R99B e interpretação de principais lineamentos.

63

Figura 4.13. Integração da imagem ternária RGB de K, eTh e eU com lineamentos interpretados na imagem SAR-R99B (Lhh) e dados de geoquímica de ouro em rocha. Observar que anomalias maiores que 1 ppm concentram-se na área indicada por retângulo vermelho.

64

Figura 4.14. Comparação das imagens geradas pela simulação indicatriz seqüencial: **(a)** média das 500 imagens simuladas, e os cortes gerados a partir desta imagem, considerando-se as probabilidades de ocorrência da variável indicatriz ouro em solo maiores que 10% **(b)**, 25 % **(c)**, e 50% **(d)**. A integração dos lineamentos magnéticos interpretados a partir da imagem do gradiente Gy permite observar que há uma relação de continuidade de anomalias de ouro em solo com lineamento de direção ENE-WSW que afeta a maioria dos *pits* do prospecto 12 de Outubro. Cruzes indicam os *pits* e ocorrências de ouro.

65

Figura 4.15. Comparação de produtos magnetométricos integrados com a imagem de probabilidade de ocorrência da variável indicatriz ouro em solo maior que 25%: **(a)** imagem do gradiente medido Gx; **(b)** imagem da primeira derivada horizontal em x do campo magnético anômalo; **(c)** imagem do gradiente medido Gy; **(d)** imagem da primeira derivada horizontal em y do campo magnético anômalo. Observar maior resolução das feições de baixo gradiente proporcionada pelas imagens de Gx e Gy em relação às imagens calculadas das respectivas derivadas. Cruzes indicam os *pits* e ocorrências de ouro.

66

Figura 4.16. Integração de dados da principal região mineralizada do prospecto 12 de Outubro: imagens da geoquímica de ouro em solo (média das 500 simulações) e a ternária RGB de K, eTh e eU integradas com o modelo digital de terreno e as imagens dos gradientes horizontais medidos nas direções x e y em 2.5D.

67

Figura 4.17. Síntese dos passos empregados para a aplicação da RBFLN, mostrando a configuração da base de dados e os parâmetros utilizados nas etapas de treinamento e classificação. EQT= erro quadrático total; EQM = erro quadrático médio.

71

Figura 4.18. Modelo de favorabilidade gerado a partir da aplicação da RBFLN nos dados associados à região do bloco principal, sobreposto à imagem do gradiente medido Gy. Gráfico de favorabilidade *versus* área classificada acumulada e detalhe das áreas classificadas estão apresentados. O modelo mapeia os alvos conhecidos, bem como mostra novos alvos potenciais.

72

Figura 4.19. Modelo de favorabilidade gerado a partir da aplicação da RBFLN nos dados associados à região do bloco central, sobreposto à imagem do gradiente medido Gy. Gráfico de favorabilidade *versus* área classificada acumulada e integração do resultado com dados de ouro em rocha > 1ppm estão apresentados. O modelo mapeia os alvos conhecidos, bem como mostra novos alvos potenciais.

73

Figura 4.20. Localização regional dos prospectos Rosa de Maio e Bandeirante na porção noroeste da PMT. É possível observar forte estruturação N-S e E-W nesta região por meio da análise de rede de drenagem **(a)** e de lineamentos predominantes **(b)**. Em **(c)**, as principais unidades litoestratigráficas (Klein *et al.* 2001a) estão sobrepostas na imagem normalizada de K, eTh e eU integrada com o SAR-R99B (Lhh).

75

Figura 4.21. Biotita monzogranito porfíritico, de granulação grossa, verificado no prospecto Rosa de Maio, e incluso na Suíte Intrusiva Parauari.

76

Figura 4.22. Gráficos referentes a medidas gamaespectrométricas de materiais geológicos no prospecto Rosa de Maio. A descrição das amostras medidas é apresentada em quadro adjacente, assim como a localização das medidas efetuadas.	77
Figura 4.23. Gráficos referentes a medidas gamaespectrométricas de materiais geológicos no prospecto Bandeirante. A descrição das amostras medidas é apresentada em quadro adjacente, assim como a localização das medidas efetuadas.	78
Figura 4.24. Composições coloridas ternárias RGB de K, eTh e eU para dados dos perfis gamaespectrométricos e das respectivas imagens geradas pelo interpolador curvatura mínima. Esta última foi integrada com a imagem SAR-R99B (Lhh) e o SRTM. Notar que grande parte da área do prospecto Rosa de Maio é caracterizada pelo predomínio de grandes aluviões e espessas coberturas de solos (altos valores de eTh).	81
Figura 4.25. Imagens do parâmetro F e da razão K/eTh, geradas na tentativa de realçar K anômalo que possa estar relacionado com hidrotermalismo. A drenagem mapeada pela empresa Mapex Mineração, Importação e Exportação Ltda. está representada pelas linhas pretas e os dados de geoquímica de ouro em rocha estão apresentados por círculo brancos. As zonas prospectivas denominadas Sela, Centro-norte e Buriti também estão indicadas.	82
Figura 4.26. Aplicação da simulação indicatriz sequencial aos dados amostrados de ouro em solo do prospecto Rosa de Maio e indicação dos principais parâmetros utilizados.	83
Figura 4.27. Aplicação da simulação indicatriz sequencial aos dados amostrados de ouro em solo na região do prospecto Buriti e indicação dos principais parâmetros utilizados.	84
Figura 4.28. Imagem da probabilidade de ocorrência da variável ouro em solo maior que 25%, integrada com a drenagem mapeada pela empresa Mapex Mineração, Importação e Exportação Ltda., e principais aluviões. Observar que as regiões mais anômalas para ouro em solo são designadas como zonas do prospecto Sela, Buriti e Centro-norte.	86
Figura 4.29. Comparação de imagens magnetométricas e interpretação de principais lineamentos. Os principais diques máficos estão representados por polígonos verdes: (a) gradiente horizontal na direção y (Gy); (b) gradiente horizontal na direção x (Gx); (c) primeira derivada horizontal na direção y do campo magnético anômalo (Dy); (d) primeira derivada horizontal na direção x do campo magnético anômalo (Dx).	87
Figura 4.30. Imagens da amplitude do gradiente horizontal total (calculada com uso dos gradientes medido Gx e Gy), e da amplitude do sinal analítico, integradas com anomalias de ouro em rocha.	91
Figura 4.31. Interpretação de principais estruturas a partir das imagens do modelo digital de terreno (derivada dos dados adquiridos no aerolevante geofísico) e da imagem SAR-R99B (Lhh).	92
Figura 4.32. Imagem do gradiente medido na direção y (Gy) integrada com o resultado de probabilidade de ocorrência da variável indicatriz ouro em solo maior que 25%. Estão indicadas as principais áreas prospectivas, o enxame de diques máficos, feições semi-circulares e baixos gradientes E-W, o qual está associado à atual disposição do Igarapé Anta.	94
Figura 4.33. Integração de principais estruturas interpretadas nas imagens magnetométricas e de sensoriamento remoto com a imagem de geoquímica de ouro em solo gerada pela simulação indicatriz sequencial e modelo digital de terreno.	95
Figura 4.34. Imagem SAR-R99B (Lhh) e interpretação de principais lineamentos. Dados de geoquímica de rocha estão integrados.	97
Figura 4.35. Imagens magnetométricas da região do prospecto Bandeirante, integradas com dados geoquímicos de ouro em rocha: (a) gradiente horizontal medido na direção y (Gy); (b) gradiente horizontal medido na direção x (Gx); (c) primeira derivada vertical do campo magnético anômalo (Dz); (d) amplitude do sinal analítico (ASA). A legenda dos dados geoquímicos equivale àquela mostrada na figura 4.36 .	98
Figura 4.36. Imagem ternária RGB de K, eTh e eU, integrada com SAR-R99B (Lhh) e pontos geoquímicos de ouro em rocha.	99
Figura 4.37. Síntese dos passos envolvidos para a aplicação da RBFLN, mostrando a configuração da base de dados e os parâmetros utilizados nas etapas de treinamento e classificação. EQT= erro quadrático total; EQM = erro quadrático médio.	101
Figura 4.38. Modelo de favorabilidade gerado a partir da aplicação da RBFLN nos dados multifonte associados ao prospecto Rosa de Maio. Gráfico de favorabilidade <i>versus</i> área classificada acumulada e integração dos resultados com dados de geoquímica de rocha >1ppm estão apresentados.	102
Figura 4.39. Localização do prospecto Maués, indicada pelo polígono preto. Observa-se o condicionamento de drenagem (a) e principais lineamentos (b) na direção predominante NW-SE, pertencente ao <i>trend</i> aurífero Patrocínio-Espírito Santo (Coutinho 2008). A partir da imagem ternária	104

de Kn, eTh e eUn, verifica-se a inserção da área em apreço no domínio do Grupo Jacareacanga, caracterizado por altos valores de K normalizado (c).

Figura 4.40. Localização e fotografias da amostra de veio sulfetado (MA-MAG07) e do típico afloramento de quartzo-muscovita xisto (MA-MAG01) pertencente ao Grupo Jacareacanga no prospecto Maués.	105
Figura 4.41. Gráficos referentes a medidas gamaespectrométricas de materiais geológicos no prospecto Maués. A descrição das amostras medidas é apresentada em quadro adjacente, assim como a localização das medidas realizadas.	106
Figura 4.42. Interpretação de lineamentos na região do prospecto Maués. Observar estruturas NE-SW transpostas por aquelas de direção NNW-SSE e sinistrais.	107
Figura 4.43. Integração de imagens gamaespectrométricas com dados de geoquímica: (a) imagem ternária RGB (K, eTh e eU) e pontos anômalos de ouro em rocha; (b) imagem do K normalizado (Kn) integrada com dados de geoquímica de ouro em solo. Observar as diferentes respostas gamaespectrométricas dos domínios das rochas supracrustais (Grupo Jacareacanga) e de granitos Parauari.	109
Figura 4.44. Integração de imagens gamaespectrométricas do parâmetro F e da razão K/eTh com os dados de geoquímica de ouro em solo. Observar que as ocorrências pontuais de ouro em solo >50 ppb estão associadas com médios e altos valores de parâmetro F e da razão K/eTh, e que caracterizam o domínio de rochas supracrustais do Grupo Jacareacanga.	110
Figura 4.45. Perfis gamaespectrométricos em composição colorida RGB e indicação das linhas de vôo selecionadas para análise.	111
Figura 4.46. Imagem regional da amplitude do sinal analítico e inserção do aerolevanteamento Maués. Notar que dique máfico de orientação aproximada N-S e atribuído ao enxame datado em ~510 Ma (Santos <i>et al.</i> 2002), está presente na região, conforme também verificado em campo (Ponto MA-MAG06).	112
Figura 4.47. Comparação de produtos magnetométricos integrados com dados de geoquímica de ouro em solo: (a) imagem do gradiente horizontal medido Gx; (b) imagem da primeira derivada horizontal em x do campo magnético anômalo; (c) imagem do gradiente horizontal medido Gy; (d) imagem da primeira derivada horizontal em y do campo magnético anômalo. Observar maior resolução das feições de baixo gradiente proporcionada pelas imagens de Gx e Gy em relação às imagens calculadas das respectivas derivadas. Os lineamentos magnéticos interpretados a cada imagem também se encontram integrados.	114
Figura 4.48. Imagem da primeira derivada vertical do campo magnético anômalo (Dz) integrada com dados geoquímicos e feições lineares interpretadas (a). Em (b), detalhe da imagem da amplitude do sinal analítico na área de maior favorabilidade aurífera do prospecto Maués, e integração de dados de geoquímica de ouro em solo.	115
Figura 4.49. Síntese dos passos envolvidos para a aplicação da RBFLN, considerando-se seis camadas evidenciais, além dos dados vetoriais do tipo depósito e não depósito. A configuração da base de dados e os parâmetros utilizados nas etapas de treinamento e classificação também estão apresentados. EQT= erro quadrático total; EQM = erro quadrático médio.	117
Figura 4.50. Síntese dos passos envolvidos para a aplicação da RBFLN, considerando-se sete camadas evidenciais, além dos dados vetoriais do tipo depósito e não depósito. A configuração da base de dados e os parâmetros utilizados nas etapas de treinamento e classificação também estão apresentados. EQT= erro quadrático total; EQM = erro quadrático médio.	118
Figura 4.51. Modelo de favorabilidade gerado a partir da aplicação da RBFLN nos dados associados à aerogeofísica da região do prospecto Maués. Gráfico de favorabilidade <i>versus</i> área classificada acumulada e integração dos resultados com dados de geoquímica de solo > 50 ppm estão apresentados. A figura 4.49 mostra a síntese da aplicação desta técnica.	119
Figura 4.52. Modelo de favorabilidade gerado a partir da aplicação da RBFLN nos dados associados à aerogeofísica e de lineamentos da região do prospecto Maués. Gráfico de favorabilidade <i>versus</i> área classificada acumulada e integração dos resultados com dados de geoquímica de solo > 50 ppm estão apresentados. A figura 4.50 mostra a síntese da aplicação desta técnica.	120
Figura 4.53. Gráfico da PCI e individualização de domínios geológico-gamaespectrométricos a partir de dados pontuais medidos pelo gamaespectrômetro portátil.	124
Figura 5.1. Mapa metalogenético da Província Mineral do Tapajós, indicando-se as duas áreas investigadas e caracterizadas por alto potencial aurífero (Modificado de Klein <i>et al.</i> 2001a).	128
Figura 5.2. Mapas geológicos das áreas em estudo: (a) região da zona de cisalhamento Ouro Roxo-Cantagalo (Klein <i>et al.</i> 2001a); (b) região Chico Torres (Klein <i>et al.</i> 2001a).	129
Figura 5.3. Resultados gerados para a área Ouro Roxo-Cantagalo: (a) imagem de K, eTh e eU	133

(RGB) com interpretação de unidades de médio a alto K; **(b)** interpretação integrada de dados gamaespectrométricos e do SAR-R99B para a principal área mineralizada; e **(c)** destaque da unidade geofísica de alto K normalizado e caracterizada por proeminente *trend* NNE-SSW, assim como pela zona de cisalhamento Ouro Roxo-Cantagalo, de direção aproximada N-S. As mineralizações estão indicadas pelos polígonos em amarelo.

Figura 5.4. Imagens magnetométricas da região Ouro Roxo-Cantagalo: **(a)** a ASA e a interpretação, em linha tracejada branca, de Silva (2003) equivalente ao possível registro da subducção de crosta oceânica e formação do arco Cuiú-Cuiú; **(b)** imagem da primeira derivada vertical do campo magnético anômalo e interpretação de feições lineares magnéticas. Seta azul indica a localização do prospecto Ouro Roxo por Klein *et al.* (2001a), enquanto a seta vermelha refere-se ao mesmo prospecto de acordo com Santos *et al.* (2001b). As características gamaespectrométricas e magnetométricas pontuais destas duas bases georreferenciadas do prospecto Ouro Roxo são mostradas em **(c)**, podendo-se verificar grandes diferenças, principalmente das medidas gamaespectrométricas que realçam o K. 135

Figura 5.5. Aplicação da lógica *fuzzy* na região Ouro Roxo-Cantagalo. Os mapas de favorabilidade aurífera foram produzidos pelos seguintes operadores *fuzzy*: **(a)** *fuzzy* gama (0,7); **(b)** *fuzzy* gama (0,9). Triângulos pretos compreendem as ocorrências de ouro identificadas em Santos *et al.* (2001b), e círculo pretos aquelas indicadas em Klein *et al.* (2001a). 137

Figura 5.6. Resultados referentes à região da zona de cisalhamento Chico Torres: **(a)** imagem ternária (RGB) de K, eTh e eU integrada com o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), e visualização de importante estrutura delgada e de médio a alto K orientada na direção NW-SE; **(b)** imagem do K anômalo, destacando-se o *trend* N40W; **(c)** perfis gamaespectrométricos, ressaltando anomalias potenciais associadas com a mineralização; **(d)** inserção da região do prospecto Chico Torres no *trend* aurífero São Jorge-Chico Torres. 140

Figura 5.7. Integração da imagem SAR-R99B (Lhh) com a da composição ternária RGB de Kn, eThn e eUn, incluindo os principais alinhamentos de drenagem **(a)**. Em **(b)**, gráfico tridimensional acerca das respostas típicas da ASA referentes aos principais prospectos da região, e extraídas de pixels da imagem correspondente. Notar que altas amplitudes do sinal analítico estão associadas a alguns prospectos, e devem-se às respostas de diques máficos, os quais ainda não estão claramente definidos quanto a uma possível relação com as mineralizações auríferas. 142

Figura 5.8. Aplicação da lógica *fuzzy* na região da zona de cisalhamento Chico Torres. Os mapas de favorabilidade aurífera foram produzidos pelos seguintes operadores *fuzzy*: **(a)** *E fuzzy*; **(b)** *fuzzy* gama (0,7). 143

Figura 6.1. Síntese das principais características geológico-geofísicas e feições estruturais dos prospectos abordados nesta dissertação de mestrado e inclusos na porção oeste da Província Mineral do Tapajós. 149

Figura 6.2. Resumo das principais assinaturas gamaespectrométricas decorrentes da ação conjunta de fatores topográficos, climáticos e de mobilidade de elementos químicos maiores. 151

Tabela 3.1. Estatística dos dados dos canais gamaespectrométricos do levantamento aéreo Bloco 1-Província Aurífera do Tapajós.	36
Tabela 3.2. Estatística dos dados dos canais gamaespectrométricos dos levantamentos aéreos Bandeirante, Rosa de Maio, Maués e 12 de Outubro.	36
Tabela 3.3. Parâmetros para interpolação e micronivelamento de dados magnetométricos gradiométricos e gamaespectrométricos.	41
Tabela 3.4. Estatística de dados geoquímicos disponíveis para as áreas dos prospectos Bandeirante, Rosa de Maio, 12 de Outubro e Maués.	44
Tabela 4.1. Quantificação de áreas classificadas por intervalos de favorabilidade (baixa, moderada e alta) em referência à aplicação da técnica RBFLN na região do prospecto 12 de Outubro.	74
Tabela 4.2. Quantificação de áreas classificadas por intervalos de favorabilidade (baixa, moderada, alta e muito alta) em referência à aplicação da técnica RBFLN na região do prospecto Rosa de Maio.	103
Tabela 4.3. Quantificação de áreas classificadas por intervalos de favorabilidade (baixa, moderada e alta) em referência à aplicação da técnica RBFLN na região do prospecto Maués.	121
Tabela 4.4. Autovetores e variância característicos da geração de quatro componentes principais.	125
Tabela 4.5. Scores das componentes principais e agrupamento de classes por meio do uso do classificador K-médias.	125
Tabela 5.1. Quantificação de áreas classificadas por intervalos de possibilidades <i>fuzzy</i> resultantes da aplicação de operadores <i>fuzzy</i> gama na região Ouro Roxo Cantagalo.	138
Tabela 5.2. Quantificação de áreas classificadas por intervalos de possibilidades <i>fuzzy</i> resultantes da aplicação da lógica <i>fuzzy</i> na região Chico Torres.	144

Esta dissertação de mestrado aborda um estudo de regiões prospectivas da porção oeste da Província Mineral do Tapajós (PMT), localizada nos estados do Amazonas e do Pará, a partir do processamento, interpretação, integração e análise espacial de dados aerogeofísicos regionais e de detalhe, de radar de abertura sintética (SAR-R99B), geoquímicos e geológicos. O principal objetivo compreende a avaliação de um acervo de dados na tentativa de identificar novas feições geofísicas e geológicas importantes para o contexto das mineralizações de ouro nesta vasta região ainda pouco conhecida.

A avaliação de dados aeromagnetométricos gradiométricos e geoquímicos disponíveis nos prospectos 12 de Outubro, Maués, Rosa de Maio e Bandeirante, permitiu a identificação de feições magnéticas e estruturas em imagens SAR-R99B interessantes sob o ponto de vista prospectivo. Da mesma forma, a análise de dados gamaespectrométricos terrestres permitiu individualizar assinaturas associadas com alteração hidrotermal potássica (K-feldspatização e sericitização, como observado nos prospectos Rosa de Maio e Bandeirante), e silicificação através do mapeamento de uma queda sutil de valores de K, eTh e eU (Prospecto 12 de Outubro). Esta relação de assinaturas gamaespectrométricas terrestres em função do tipo de alteração hidrotermal também foi balizada com dados de geoquímica de rochas (e.g., K₂O, Th, U, SiO₂, Au). Por outro lado, a análise de imagens aerogamaespectrométricas de maior detalhe revelou assinaturas muitas vezes obliteradas pelo intenso intemperismo químico.

Mapas da favorabilidade mineral para a seleção de áreas potenciais para ouro foram produzidos por meio da aplicação da rede neural artificial denominada *Radial Basis Functional Link Net*. Esta técnica requer tanto pontos de treinamento do tipo depósito (*pits* ou pontos geoquímicos anômalos) quanto pontos de treinamento do tipo não depósito onde, sabidamente, mineralizações de ouro não são conhecidas. As camadas evidenciais utilizadas equivalem a produtos derivados de dados aerogeofísicos e a estruturas interpretadas nas áreas de interesse.

Com o intuito de se contribuir com a seleção de outras áreas chaves na PMT, as regiões dos prospectos Chico Torres e Ouro Roxo, também inseridas na porção oeste da PMT, foram analisadas sob o enfoque regional, a partir de dados SAR-R99B e aerogeofísicos (Bloco 1 – Província Aurífera do Tapajós) e, posteriormente, modeladas utilizando como ferramenta a *lógica fuzzy*.

Os estudos de caso aqui abordados possibilitaram delinear as seguintes conclusões: (a) dados magnetométricos gradiométricos são vantajosos para determinação de feições geológicas em comparação com dados aerogeofísicos convencionais; (b) há uma forte obliteração de respostas aerogamaespectrométricas em função da espessa cobertura de solo (o que é compatível com a ausência de bons afloramentos em campo); (c) dados petrofísicos devem ser empregados na caracterização de áreas chaves e para a tomada de decisão de quais métodos de levantamentos geofísicos devam ser mais eficientes; (d) é pertinente analisar cada prospecto da PMT individualmente, pois modelos metalogenéticos já propostos variam dentro da província; (e) os mapas prospectivos gerados a partir de dados de baixa resolução são comuns em regiões do tipo *greenfield* e visam guiar a tomada de decisões em escala regional; já a geração de mapas a partir de dados disponíveis de maior resolução compreende uma tentativa de mostrar padrões que possam ser importantes à prospecção de ouro, a fim de auxiliar a tomada de decisões locais.

Geotechnologies applied to recognition of key areas to gold exploration in the Tapajós Mineral Province

This master dissertation comprises a study about the prospectable regions of the western portion of the Tapajós Mineral Province (TMP), located in the Pará and Amazonas states, based on the processing, interpretation and spatial analysis of regional and detail airborne geophysical data, SAR-R99B, geochemistry and geologic data. The aim of the master dissertation is to predict areas within the study region and to compare the different approaches used for modeling and the various applications of these methods.

The analysis of the airborne magnetic gradiometry and soil geochemistry data available in the regions of 12 de Outubro, Maués, Rosa de Maio and Bandeirante prospects allowed the identification of important structural features in the multi-source derivative products that have high priority for gold exploration. The pattern is variable and is different for each case study. The ground gamma-ray spectrometric data mapped signatures related to potassic hydrothermal alteration (Rosa de Maio and Bandeirante Prospects), and a subtle reduction of K, eTh and eU channels associated with silicification (12 de Outubro Prospect). These gamaspectrometric signatures related to hydrothermal alterations were also confirmed by the litho-geochemistry analysis (e.g., K₂O, Th, U, SiO₂, Au). However, the analysis of airborne gamma-ray spectrometric data reveals signatures obliterated by intense chemistry weathering.

Prospective maps were produced by the application of an artificial neural network (ANN) technique called Radial Basis Functional Link Net. This technique requiring both examples of known targets (pits or anomalous geochemistry points) as well as examples of locations where the desired targets are known not to occur. The evidential layers used comprises derivative products of airborne geophysical data and local structures for the several detail areas.

Fuzzy logic models were applied for Chico Torres and Ouro Roxo prospects, also located in the western portion of the TMP, using regional-scale geophysical data and SAR-R99B images for gold favorability analysis.

The general results of this master dissertation reveals that: (a) airborne magnetic gradiometry are advantageous for the determination of geophysical features when confronted with the traditional airborne geophysical data; (b) airborne gamma-ray suffer great attenuation due to intense soil coverage (what is compatible to the absence of good outcrops); (c) a petrophysic dataset must be acquired as first stage for characterization of deposits, to help with the next steps for follow up in TMP; (d) it is necessary to analyse each prospect of TMP individually, because the genetic models yet were not defined to each region; (e) the prospective maps produced based on the low resolution data are common in greenfield regions, and aid to select potential areas for follow up; (f) the interpretation of the high resolution airborne geophysical data comprises a tentative to show patterns that can be crucial to gold prospection in follow up studies.

1. APRESENTAÇÃO

A necessidade de geração e detalhamento de mapas geológicos, além do aprimoramento de pesquisas geocronológicas, geoquímicas entre outras, é crescente nas regiões do Amapá, Roraima, Amazonas e grande parte do Estado do Pará, a fim de proporcionar a seleção de alvos minerais potenciais. Estas regiões, inseridas no Cráton Amazônico, estão inclusas, majoritariamente, na categoria de áreas do tipo *greenfield*, onde o baixo conhecimento geológico atual contrapõe-se ao alto potencial mineral existente e associado com diferentes contextos tectônicos e estilos mineralizantes. Exceções compreendem áreas restritas deste cráton (*brownfields*), caracterizadas por estágios de reconhecimento geológico mais avançados, a exemplo da Província Mineral de Carajás (Pará), e que são assumidas como importantes fronteiras exploratórias geradoras de divisas.

No contexto de regiões potenciais do tipo *greenfield* enquadra-se a extensa Província Mineral do Tapajós (PMT), com cerca de 90.000 km² (**Figura 1.1**), cujo conhecimento geológico consiste, em geral, em cartas regionais em escalas 1:250.000 (Almeida *et al.* 2000, Bahia & Quadros 2000, Ferreira *et al.* 2000, Klein & Vasquez 2000, Vasquez & Klein 2000) e 1:500.000 (Klein *et al.* 2001a). A região é conhecida por diversificadas ocorrências minerais exploradas desde 1958. Entre estas ocorrências, destacam-se classes minerais como os não-metálicos (calcário, gipsita, sal-gema), os metálicos (ouro, prata, cobre, chumbo, wolfrânio, estanho), os industriais (areia, seixo, argila, granito, diabásio, água mineral), corretivos para solos e fertilizantes (calcário dolomítico, fosfato) e gemas (diamante, ametista, topázio, cristal de rocha, turmalina) (Amaral 1984, Faraco *et al.* 1997, Ferreira *et al.* 2000, Almeida *et al.* 2000, Santos *et al.* 2001b, Rodrigues *et al.* 2008).

A economia da província baseia-se, sobretudo, na exploração de ouro que, nos últimos cinquenta anos, foi extraído basicamente de aluviões, elúvios e colúvios predominantemente por meios rudimentares em garimpos (Peregovich *et al.* 2008). Mais recentemente, ocorrências primárias próximas às secundárias passaram a ser mapeadas utilizando-se dados indiretos e de mapeamento geológico. A mineralização aurífera do tipo primária, em função da atual exaustão dos *placers*, vem tornando-se a principal fonte de recursos da região (Peregovich *et al.* 2008). Dados anteriores à crise econômica que afetou o setor mineral brasileiro no final de

2008 indicavam que cerca de 40.000 garimpeiros exerciam a função (Rodrigues *et al.* 2008), e aproximadamente 12 companhias estavam ativas explorando a PMT (Peregovich *et al.* 2008).

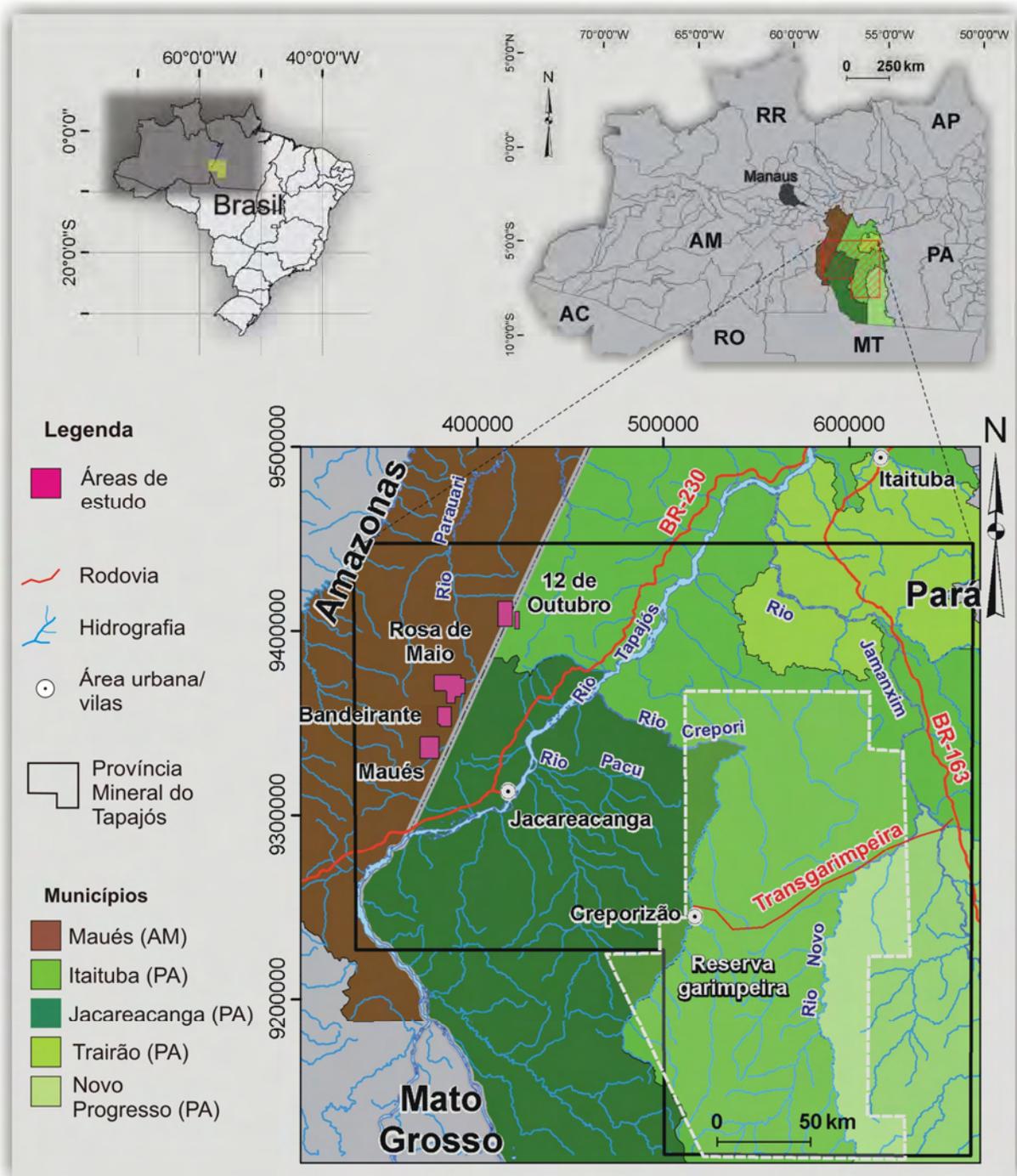


Figura 1.1. Localização da Província Mineral do Tapajós nos municípios dos estados do Amazonas e do Pará, incluindo principais vias de acesso, rede de drenagem e as áreas dos prospectos investigadas nesta dissertação (Modificado de Klein *et al.* 2001a, CPRM 2004).

Os trabalhos sistemáticos iniciais na PMT consistiram em mapeamento geológico e

levantamentos geoquímicos e geofísicos realizados nas décadas de 70 e 80 e que somente recentemente foram aprimorados e revistos por meio de estudos como o de Faraco *et al.* (1997), Klein *et al.* (2001a), Santos *et al.* (2000, 2001b, 2004), Lamarão *et al.* (2005), Coutinho (2008). A magnitude do potencial aurífero aí existente levou Dardenne & Schobbenhaus (2001b) a apontarem esta região como a maior província produtora de ouro do país. Estima-se uma produção total de 500 toneladas deste metal desde 1958 (Rodrigues *et al.* 2008). A origem destes depósitos está relacionada à *Época do Ouro* (entre 1,95 a 1,8 Ga) (Dardenne & Schobbenhaus 2001a), constatada nas Províncias Tapajós e Alta Floresta. As mineralizações auríferas estão associadas, principalmente, com zonas de cisalhamento e intrusões graníticas, havendo associações freqüentes com diques máficos e andesíticos, além de depósitos que já foram classificados como do tipo epitermal e supergênico (Faraco *et al.* 1997, Dreher *et al.* 1998, Almeida *et al.* 2001, Klein *et al.* 2001a, b, Martini 1998, Santos *et al.* 2001b, Klein *et al.* 2004, Juliani *et al.* 2002, 2005, 2008, Klein *et al.* 2008, Peregovich *et al.* 2008).

Alguns trabalhos utilizando dados de radar de abertura sintética e aerogeofísicos abrangendo o domínio da PMT demonstraram bons resultados na discriminação espacial de alvos geológicos com alta potencialidade para mineralizações auríferas, bem como possíveis assinaturas geofísicas associadas com alterações hidrotermais (e.g., Erazo 2001, Pedroso *et al.* 2001, Silva 2003, Silva *et al.* 2007). Entretanto, tais trabalhos não suprem toda a magnitude da província, fato que gera um grande desafio para a caracterização dos diferentes jazimentos encontrados nesta vasta região, uma vez que o nível de conhecimento de cada um destes é dependente do maior ou menor grau exploratório dos prospectos.

A meta principal desta dissertação de mestrado compreende a integração de dados geológicos, de radar de abertura sintética, geofísicos e geoquímicos como ferramentas para a caracterização de regiões auríferas inseridas na porção oeste da Província Mineral do Tapajós. Este trabalho de pesquisa faz parte do projeto temático denominado “Caracterização de Mineralizações Associadas a Granitos em Distritos Mineiros do Estado do Amazonas: Sn, Nb e Ta, no Alvo São Gabriel da Cachoeira, e Au nos Alvos Rosa de Maio e 12 de Outubro, Tapajós, Amazonas” (Processo n.º. 555063/2006-2 - CT-Mineral, CNPq), coordenado pelo Professor Dr. Nilson Francisquini Botelho (IG-UnB). O projeto agrega outras instituições como a CPRM (Serviço Geológico do Brasil), a UFAM (Universidade Federal do Amazonas) e a empresa Mapex Mineração, Importação e Exportação Ltda., que disponibilizou dados geofísicos aéreos, geoquímicos e auxiliou o trabalho de campo.

1.1. Localização e aspectos fisiográficos da área de estudo

A Província Mineral do Tapajós localiza-se na porção sudoeste do Estado do Pará e parte sudeste do Estado do Amazonas, abrangendo os municípios de Maués (AM), Trairão (PA), Jacareacanga (PA), Novo Progresso (PA) e Itaituba (PA) e as folhas topográficas em escala 1:250.000 denominadas Vila Mamãe Anã (SB.21-V-D), Jacareacanga (SB.21-Y-B), Caracol (SB.21-X-C), Vila Riozinho (SB.21-Z-A) e Rio Novo (SB.21-Z-C) (**Figura 1.1**). O acesso terrestre é realizado pelas rodovias Transamazônica (BR-230), Santarém-Cuiabá (BR-163) e a Transgarimpeira (Rodovia do Ouro). Por via fluvial destacam-se os rios Tapajós, Crepori, Jamanxim e Novo, além de rios e igarapés afluentes utilizados como meio de transporte (**Figura 1.1**). Pistas de pousos relacionadas com áreas garimpeiras também são meios de acesso amplamente utilizados nesta região por meio de aviões monomotores.

A província é caracterizada por clima quente e úmido, com duas estações definidas, uma chuvosa entre os meses de Dezembro e Maio, e outra seca, entre Junho e Novembro. Os índices pluviométricos médios anuais compreendem 2.500 mm, enquanto valores de temperatura possuem máxima de 38°C, mínima de 17,2°C e média de 25°C (Klein *et al.* 2001a). A vegetação é representada, predominantemente, pela floresta equatorial ombrófila densa, higrófila e latifoliada. Subordinadamente, há florestas abertas e cerrados locais em regiões mais aplainadas, em cristas quartzíticas e sedimentares ao sul da província (Ferreira *et al.* 2000, Almeida *et al.* 2000).

Geomorfologicamente, a região insere-se nas áreas do Planalto Residual do Tapajós, Serra do Cachimbo (porção sudoeste) e Planalto Residual da Amazônia. O relevo compreende três tipos principais: (a) as planícies fluviais ao longo dos rios; (b) colinas levemente onduladas, tabuleiros sedimentares, morrotes e serras alongadas com topos angulosos; (c) mesas sedimentares e morros tabulares com encosta escarpada, sustentados por rochas sedimentares da Bacia do Alto Tapajós e da Formação Buiucu (Ferreira *et al.* 2000, Almeida *et al.* 2000). Com relação às regiões abordadas nesta dissertação, a altitude máxima não ultrapassa 250 metros.

1.2. Objetivos gerais e específicos

O escopo desta dissertação de mestrado compreende a utilização de técnicas de processamento e integração de dados multifonte aplicados à caracterização de regiões auríferas da porção oeste da PMT. Ao final, pretende-se apontar novos alvos potenciais na região em apreço, por meio de análise visual e espacial.

Os objetivos específicos consistem em:

- cartografar estruturas regionais e locais com o intuito de definir zonas de influência metalogenética através da investigação qualitativa de dados aeromagnetométricos gradiométricos e de imagens do sensor SAR-R99B na região dos prospectos 12 de Outubro, Maués, Rosa de Maio e Bandeirante;
- integrar dados aerogeofísicos de alta resolução, além dos geoquímicos disponíveis aos prospectos 12 de Outubro, Maués, Rosa de Maio e Bandeirante, objetivando o realce de áreas potenciais para ouro; também se inclui a coleta e interpretação de dados gamaespectrométricos terrestres medidos em afloramentos;
- gerar mapas de favorabilidade mineral através da aplicação da rede neural artificial denominada *Radial Basis Functional Link Net* a partir do acervo de dados disponíveis aos prospectos 12 de Outubro, Rosa de Maio e Maués. Também se propõe a validação dos modelos obtidos por meio da integração de dados multifonte, objetivando uma melhor discriminação de alvos auríferos potenciais.
- identificar outras áreas potenciais da porção oeste da PMT, além daquelas analisadas nos dados de maior detalhe disponíveis aos prospectos 12 de Outubro, Maués, Rosa de Maio e Bandeirante, através de interpretação, integração e análises espaciais de dados regionais.

CAPÍTULO II. CONTEXTO GEOLÓGICO DA PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS

Imagem SAR-R99B (Lhh) da região do prospecto Rosa de Maio

2. ARCABOUÇO GEOLÓGICO REGIONAL: O CRÁTON AMAZÔNICO

A Província Mineral do Tapajós situa-se na porção centro-sul do Cráton Amazônico (Almeida *et al.* 1981), que abrange aproximadamente 4,3 milhões de km² de área (Hartmann & Delgado 2001). O Cráton Amazônico caracteriza-se por núcleos arqueanos e proterozóicos e é limitado pelas faixas móveis neoproterozóicas do Araguaia e Tucava (Bolívia) (Tassinari & Macambira 2004).

Hasui *et al.* (1984) e Costa & Hasui (1997) propuseram uma subdivisão do Cráton Amazônico a partir de um modelo baseado no retrabalhamento de crosta antiga e rejuvenescimento isotópico de grandes blocos crustais articulados (do Arqueano ou Paleoproterozóico) que formariam um mosaico com limites NE-SW e NW-SE (Cinturões transcorrentes ou de cavalgamento). Os blocos crustais compreenderiam os terrenos de médio a baixo grau (granito-*greenstone*) e de alto grau (cinturões granulíticos). A PMT, de acordo com esta concepção, está incluída em partes dos blocos Araguaia e Juruena que são limitados pelo Cinturão Médio Tapajós (**Figura 2.1**).

Propostas mais recentes para a segmentação desse cráton envolvem a diferenciação isotópica e geológica do mesmo, considerando-se a origem por meio de sucessivos eventos de acreção continental a um proto-craton arqueano a partir de episódios de subducção de crostas oceânicas entre ~1,95 e ~1,10 Ga. Províncias geocronológicas passaram a ser definidas como grandes zonas de áreas cratônicas em que há predomínio de padrões geocronológicos e similaridades de idades isotópicas (Tassinari & Macambira 2004). Neste contexto, duas propostas foram definidas, uma de Tassinari (1996) e outra de Santos *et al.* (2000), ambas posteriormente revistas.

A proposta de Tassinari (1996), revista por Tassinari & Macambira (1999, 2004), apresenta a subdivisão do cráton em seis províncias geocronológicas distintas: (a) Província Amazônia Central (> 2,5 Ga); (b) Província Maroni-Itacaiúnas (2,20 a 1,95 Ga); (c) Província Ventuari-Tapajós (1,95 a 1,80 Ga); (d) Província Rio Negro-Juruena (1,80 a 1,55 Ga); (e) Província Rondoniana-San Ignácio (1,55 a 1,30 Ga); (f) Província Sunsás (1,30 a 1,00 Ga) (**Figura 2.2 (a)**). Entretanto, o modelo de Tassinari (1996) foi baseado principalmente em dados de isótopos Rb-Sr, os quais apresentam algumas limitações quando utilizado em

terrenos deformados e metamorfisados.

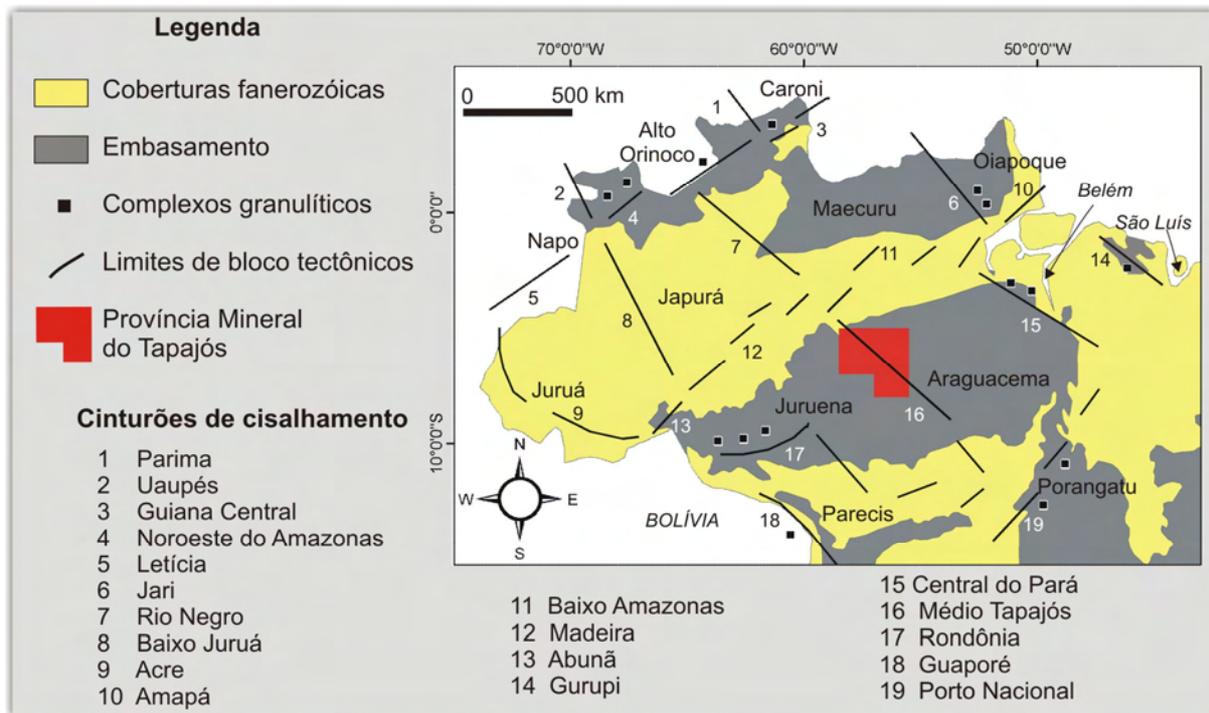


Figura 2.1. Compartimentação do Cráton Amazônico de acordo com Costa & Hasui (1997). A Província Mineral do Tapajós mostra-se segmentada pelo cinturão de cisalhamento Médio Tapajós, de direção NW-SE.

Santos *et al.* (2000) propuseram um modelo de subdivisão do Cráton Amazônico com base em datações pelos métodos Sm-Nd e U-Pb. Desta maneira, foi proposta a seguinte compartimentação de províncias (Santos *et al.* 2000, 2006): (a) Carajás (3,0-2,5 Ga); (b) Amazônia Central; (c) Transamazonas (2,26-2,01 Ga); (d) Tapajós-Parima (2,03-1,88 Ga); (e) Rio Negro (1,82-1,52 Ga); (f) Rondoniana-Juruena (1,82-1,54 Ga); (g) Sunsás e K'Mudku (1,45-1,10 Ga) (**Figura 2.2 (b)**). A exposição de crosta arqueana somente é verificada a leste (Carajás e sul do Amapá no Brasil) e norte (Imataca, na Venezuela) deste cráton. Nestas regiões de exposição e na província Transamazonas, há predominância de terrenos tipo *greenstone belts*. As províncias Tapajós-Parima e Rondoniana-Juruena representam cinturões orogênicos, enquanto as províncias Rio Negro e Sunsás foram originadas principalmente por meio de reciclagem tectono-magmática. O cinturão de cisalhamento K'Mudku consiste numa porção ainda pobremente conhecida, e é representado por uma zona de cisalhamento que deformou rochas de pelo menos três diferentes províncias (Rio Negro, Tapajós-Parima e Transamazonas) (Santos *et al.* 2000) (**Figura 2.2 (b)**).

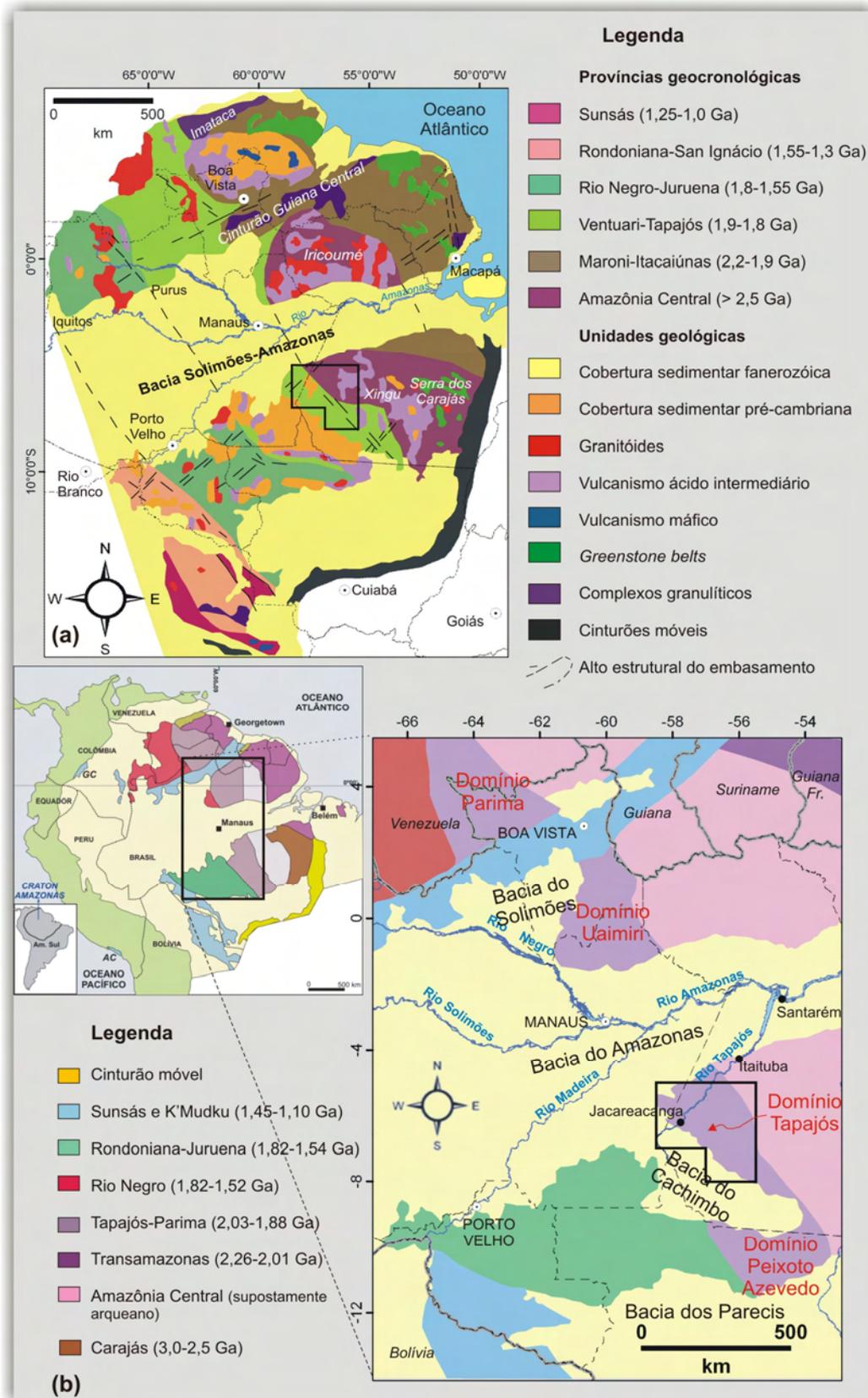


Figura 2.2. Subdivisão do Cráton Amazônico: **(a)** em seis províncias geocronológicas da concepção de Tassinari (1996) e Tassinari & Macambira (1999, 2004) e, **(b)** em sete compartimentações geocronológicas, segundo Santos *et al.* (2000, 2006) (AC = Complexo Arequipa; GC = Complexo Garzón).

As duas propostas de subdivisão do Cráton Amazônico por meio da metodologia isotópica, apesar de diferirem em alguns aspectos, evidenciam que a evolução crustal envolveu a adição de material juvenil no Arqueano e Proterozóico, com retrabalhamento da crosta continental mais antiga. Aproximadamente 30% da crosta total do cráton foi originada do manto no Arqueano e o restante, no Paleoproterozóico (Tassinari & Macambira 2004). As províncias paleo-mesoproterozóicas de Tassinari & Macambira (1999, 2004), ou as respectivas compartimentações de Santos *et al.* (2000, 2006), correspondem a arcos magmáticos acrescidos ao proto-cráton arqueano.

Nas condições de conhecimento atual, a PMT compreende um segmento da parte sul da Província Ventuari-Tapajós (Tassinari 1996, Tassinari & Macambira 1999, 2004), ou da porção sul da Província Tapajós-Parima (Santos *et al.* 2000, 2006) (*cf.*, **Figura 2.2**). A Província Tapajós-Parima é subdividida em quatro domínios geográficos: Matupá (ou Peixoto de Azevedo; norte do Mato Grosso), Tapajós (Pará e Amazonas), Uaimiri (Pará e Roraima) e Parima (Roraima e Venezuela) (**Figura 2.2 (b)**).

2.1. Arcabouço geológico da Província Mineral do Tapajós

O arcabouço geológico da Província Mineral do Tapajós é caracterizado por uma grande produção de crosta continental principalmente entre 2,00 Ga a 1,96 Ga (ambiente compressivo) e entre 1,90 a 1,87 Ga (ambiente distensivo), envolvendo eventos como acreção e encurtamento crustal relacionados à amalgamação de um arco magmático a um proto-cráton arqueano (Atual região de Carajás) (Klein *et al.* 2001a).

A confirmação de arcos magmáticos existentes no Tapajós ainda é motivo de discussão: Klein *et al.* (2001a) e Vasquez *et al.* (2002) atribuem a existência de um único arco (Cuiú-Cuiú), enquanto por exemplo Santos *et al.* (2001b) e Santos *et al.* (2004) defendem a ocorrência de outros arcos, como o Tropas, Creporizão, Parauari, Jamanxim, além do Cuiú-Cuiú.

A proposta de Santos *et al.* (2000), revista em Santos *et al.* (2004), apresenta a existência de cinco arcos magmáticos que estariam associados a dois eventos orogênicos. Na orogênese Munducus (2040-1957 Ma), o arco Cuiú-Cuiú (2,0 Ga) teria se formado em ambiente de arcos de ilha e a seqüência vulcanossedimentar representada pelo Grupo Jacareacanga estaria associada com o mesmo. Em seguida, os arcos Jamanxim (2,0-1,986 Ga) e Creporizão (1,98-1,957 Ga) teriam se formado em ambiente de arco continental do tipo andino. Após uma quiescência de aproximadamente 50 milhões de anos, ocorreria a

orogênese Tropas, marcada pela formação de arco homônimo (1906-1886 Ma) com gênese relacionada a arco de ilha com influência continental, seguido do arco Parauari (~1,88 Ga), caracterizado como arco continental.

A possível existência de todos os arcos propostos por Santos *et al.* (2000) foi questionada por Vasquez *et al.* (2002). Estes autores mostram uma incompatibilidade para a formação do arco Tropas em um período caracterizado pelo regime extensional em todo o Cráton Amazônico, ao invés de um regime compressional necessário para formação deste possível arco de ilha. Além disso, os autores citam a ausência de uma caracterização mais completa do mesmo e das bacias associadas. Adicionalmente, as considerações de Klein *et al.* (2001a) e Vasquez *et al.* (2002) apresentam-se mais compatíveis com as interpretações geológico-geofísicas realizadas por Silva (2003), que defende a existência de apenas um arco de ilha colidindo com uma área cratônica formando granitos colisionais do Complexo Cuiú-Cuiú, granitos sin a tardi-colisionais da Suíte Intrusiva Creporizão, granitos pós-colisionais da Suíte Intrusiva Parauari, e granitos pós-colisionais a anorogênicos da Suíte Intrusiva Maloquinha.

Silva (2003) e Silva *et al.* (2007), interpretando dados aeromagnetométricos observaram expressivo lineamento magnético orientado na direção N-S (com inflexão para NW-SE) cortando a porção ocidental da província, conforme apresentado na **figura 2.3** pela linha branca tracejada. Ao norte esta assinatura magnética está associada à Suíte Intrusiva Ingarana e para a direção sudeste, está relacionada com o contato entre as rochas metassedimentares do Grupo Jacareacanga e as rochas do arco Cuiú-Cuiú. Estes autores interpretaram tal estrutura como o possível registro do processo de subducção de crosta oceânica e formação do arco Cuiú-Cuiú, associado aos sedimentos do Grupo Jacareacanga.

Na porção nordeste da província, outro domínio magnético foi verificado por Silva (2003) e Silva *et al.* (2007), conforme mostrado na **figura 2.3** por meio de linha tracejada preta, e que é similar à interpretação mostrada por Santos *et al.* (2000) para a definição do limite entre as províncias Tapajós-Parima e Amazônia Central. O domínio magnético de médios a altos valores de amplitude do sinal analítico (**figura 2.3**) foi interpretado como resposta da fusão parcial de material crustal mais antigo que formou, durante o evento distensivo paleoproterozóico, as rochas que compõem o Supergrupo Uatumã. Esta interpretação aponta, de acordo com Silva (2003), para a existência de uma área cratônica a leste da Província Tapajós-Parima (ou Ventuari-Tapajós, de acordo com Tassinari & Macambira 1999, 2004).

Nesta dissertação de mestrado, o contexto litoestratigráfico e da compartimentação tectônica da província utilizado compreenderá aquele proposto por Klein *et al.* (2001a) e revisto em Vasquez *et al.* (2002) (**Figura 2.4**), adicionando-se dados importantes obtidos por outros autores.

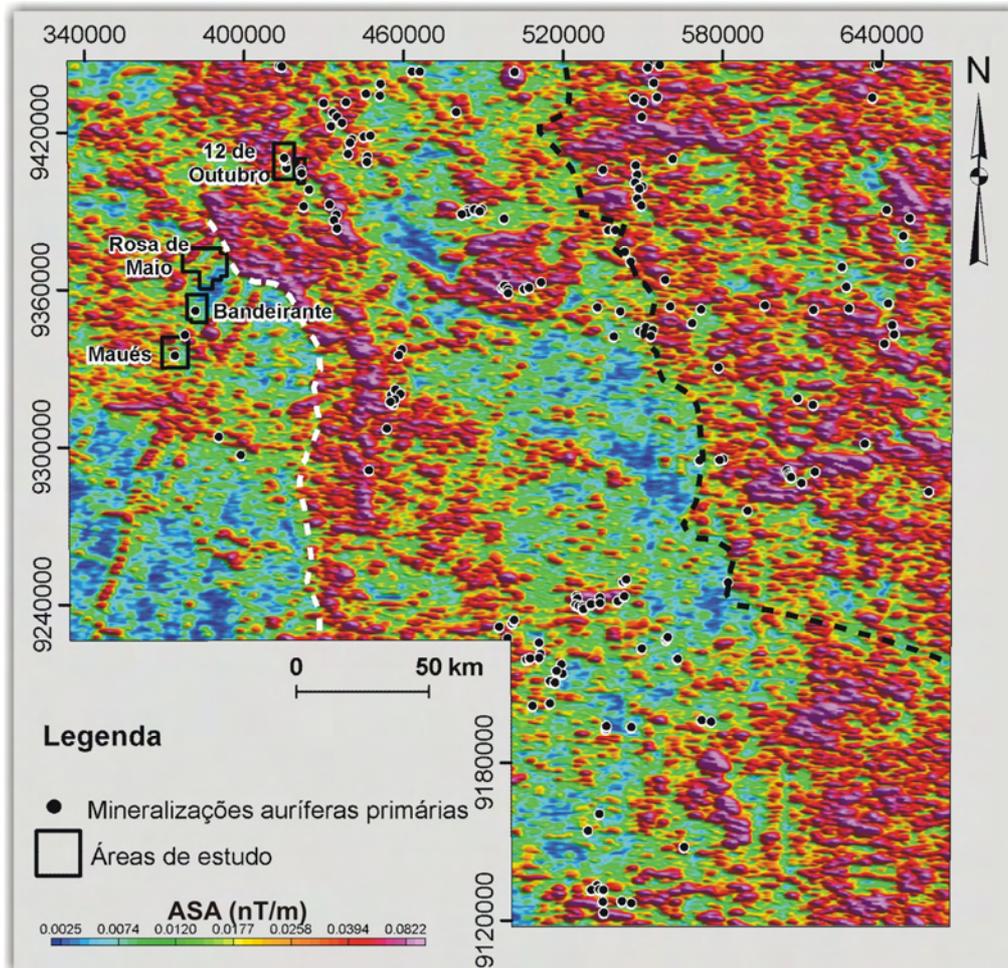


Figura 2.3. Imagem da amplitude do sinal analítico (ASA) e inclusão de dois lineamentos magnéticos interpretados por Silva (2003): a linha preta tracejada indica o possível limite, ainda não totalmente confirmado, que separa as províncias Amazônia Central e Tapajós-Parima; a linha branca tracejada compreende a interpretação do possível registro da subducção de crosta oceânica e formação do arco Cuiú-Cuiú.

Sob esse enfoque, as rochas mais antigas estão relacionadas ao domínio orogênico, sendo representadas pela seqüência vulcanossedimentar do Grupo Jacareacanga (~2,1 Ga), pelos ortognaisses, migmatitos e granitos pouco deformados do Complexo Cuiú-Cuiú (~2,0 Ga), e pelas intrusões sin a tardi-orogênicas da Suíte Intrusiva Creporizão (~1,97 Ga) (Klein *et al.* 2001a) (**Figura 2.4**). Este domínio compreende associações de rochas pré-colisionais, colisionais e pós-colisionais transcorrentes, sendo que o Complexo Cuiú-Cuiú e a Suíte Intrusiva Creporizão são caracterizados por metamorfismo e deformação dúctil, fato que

revela o caráter orogênico dos granitos de afinidade cálcio-alcálica (Vasquez *et al.* 2002).

O domínio pós-orogênico (**Figura 2.4**) é representado pelas intrusões graníticas da Suíte Intrusiva Parauari (~1,88 Ga), intrusões básicas a intermediárias da Suíte Intrusiva Ingarana (~1,88 Ga), pela Formação Bom Jardim (~1,88 Ga), além do vulcanismo ácido a intermediário (Grupo Iriri) associado ao plutonismo do Granito Pepita e da Suíte Intrusiva Maloquinha (granitos pós-orogênicos a anorogênicos) (~1,88 Ga). De acordo com Vasquez *et al.* (2002), o regime extensional teria favorecido processos de fusão mantélica e da crosta inferior por *underplating*, refletindo o processo de tafrogênese que afetou o Cráton Amazônico há aproximadamente 1,88 Ga.

A deposição de sedimentos paleoproterozóicos da Formação Buiçu representa a fase de estabilização na província, seguida de intenso magmatismo associado à intrusão de lamprófiros (Jamanxim), do granito Igarapé Escondido, e de rochas básicas (Suíte Intrusiva Cachoeira Seca) (Klein *et al.* 2001a).

Com o processo de sedimentação no Paleozóico, surgem as coberturas das bacias do Cachimbo e Amazônica, cortadas por diques de diabásio do Cambriano (Piranhas) e do Mesozóico (Periquito) e, posteriormente, as coberturas detrito lateríticas e aluviões do Cenozóico foram originadas (Klein *et al.* 2001a).

2.1.1. UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS DA PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS

As principais unidades litoestratigráficas da província presentes nas áreas de estudo estão descritas abaixo e mostradas no mapa geológico da **figura 2.5 (a)**.

2.1.1.1. Unidades litoestratigráficas paleoproterozóicas

O Grupo *Jacareacanga* compreende uma associação de rochas metassedimentares e metavulcânicas de baixo grau metamórfico, como mica xistos, mica-quartzo xistos, talco xistos, actinolita xistos, quartzitos, *metacherts*, metargilitos, metagrauvas e filitos (Ferreira *et al.* 2000, Santos *et al.* 2001b).

Rochas xistosas apresentam-se intercaladas por faixas estreitas de quartzito dispostos na direção NW-SE. Estas rochas caracterizam-se pela foliação NW-SE, além de zonas de cisalhamento sinistrais subparalelas, com orientação NNW-SSE (Almeida *et al.* 2001). Esta unidade é intrudida por granitos da Suíte Intrusiva Parauari, conforme indicado pela existência de metamorfismo de contato dado pela presença de *hornfels* de acordo com Klein *et al.* (2001a). O ambiente deposicional proposto consiste em região de plataforma

relacionada com rochas vulcânicas máficas (Ferreira *et al.* 2000, Klein *et al.* 2001a).

De acordo com Santos *et al.* (2004), o Grupo Jacareacanga é caracterizado por três associações principais de rochas: (a) basaltos oceânicos metamorfizados (actinolita e clorita xistos), e que são interpretados como a seqüência basal; (b) uma unidade de sedimentos químicos metamorfizados, intercalada com turbiditos e composta por *chert* e formações ferríferas bandadas; (c) uma seqüência turbidítica superior, metamorfizada em condições de fácies xisto verde (sericita xistos, sericita quartzito etc), e que compreende a unidade dominante.

A idade obtida pelo método U-Pb em zircões detríticos de metaturbiditos do Grupo Jacareacanga varia entre 2098 Ma a 2125 Ma (Santos *et al.* 2000).

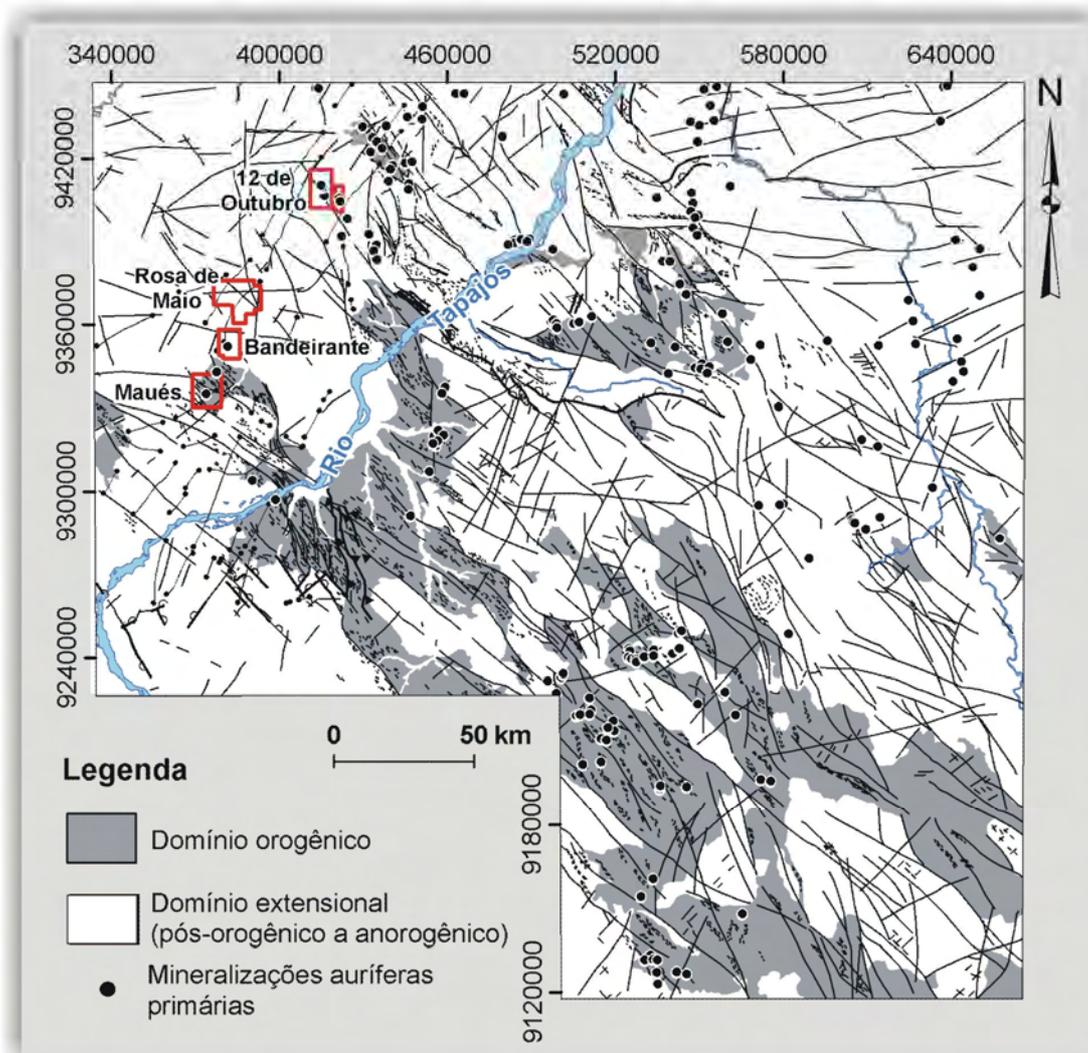


Figura 2.4. Compartimentação tectônica da Província Mineral do Tapajós (Klein *et al.* 2001a). Em vermelho, as regiões dos prospectos abordados na dissertação.

O *Complexo Cuiú-Cuiú* abrange rochas metamórficas de médio a alto grau (gnaisses

ortoderivados) e plutônicas associadas (granitos pouco deformados, leucogranitos e granitos alasquíticos). Outros litotipos mais raros compreendem migmatitos, dioritos, anfíbolitos, xenólitos de metapiroxenitos (Klein *et al.* 2001a). Metagranitóides apresentam estruturas de fluxo magmático preservadas, observado por alinhamento de minerais como plagioclásio, quartzo, biotita e hornblenda. Os gnaisses são mesocráticos, com foliação ou bandamento orientado na direção NW-SE (Ferreira *et al.* 2000). As rochas desta unidade são caracterizadas por deformação rúptil, caso de fraturamentos e falhas que deslocam a foliação. Contatos tectônicos são verificados com litotipos das suítes intrusivas Parauari e Maloquinha, e com derrames do Grupo Iriri.

Datação de zircão de um tonalito pelo método U-Pb resultou na idade de 2011 ± 23 Ma (Santos *et al.* 2000). Santos *et al.* (2001) listaram cinco idades adicionais pelo método U-Pb para o Complexo Cuiú-Cuiú, que equivalem a um intervalo de 2040 a 1998 Ma, considerando-se a incerteza de cada análise.

A *Suíte Intrusiva Parauari* compreende uma unidade granítica subdividida em três fácies: granodiorítica, granítica e granítica à titanita. Estas rochas pertencem à série cálcio-alcalina de médio a alto K, são metaluminosas, às vezes peraluminosas, e possuem características de arco vulcânico (Klein *et al.* 2001a). Duas fácies foram identificadas na área mostrada no mapa da **figura 2.5 (a)** (Klein *et al.* 2001a): (a) a fácies granodiorítica, que abrange rochas como (biotita) granodioritos, (clinopiroxênio)-biotita-hornblenda granodioritos, raramente ocorrendo tonalitos e biotita sienogranitos; (b) a fácies granítica, que inclui rochas como (biotita) monzogranitos, hornblenda-(biotita) monzogranitos, raramente verificando-se feldspato alcalino granitos, sienogranitos, tonalitos, microtonalitos e micromonzogranitos granofíricos.

A datação de zircões de monzogranito Parauari pelo método U-Pb gerou idade de 1879 ± 2 Ma (Santos *et al.* 2004).

A *Suíte Intrusiva Ingarana* abrange rochas máficas alongadas na direção NW-SE ou E-W (Almeida *et al.* 2000, Ferreira *et al.* 2000) (**Figura 2.5 (a)**). As rochas desta suíte caracterizam-se por contato falhado com outras unidades, e compreendem litotipos como diabásios e microgabros relacionados com gabro-noritos, dioritos, monzodioritos e granófiros. Os diabásios e microgabros são caracterizados por cor cinza escura a preta, e pelos minerais plagioclásio e piroxênio (augita).

Datação pelo método U-Pb em zircões e badeleíta de gabros produziu a idade de 1880 ± 2 Ma (Santos *et al.* 2004).

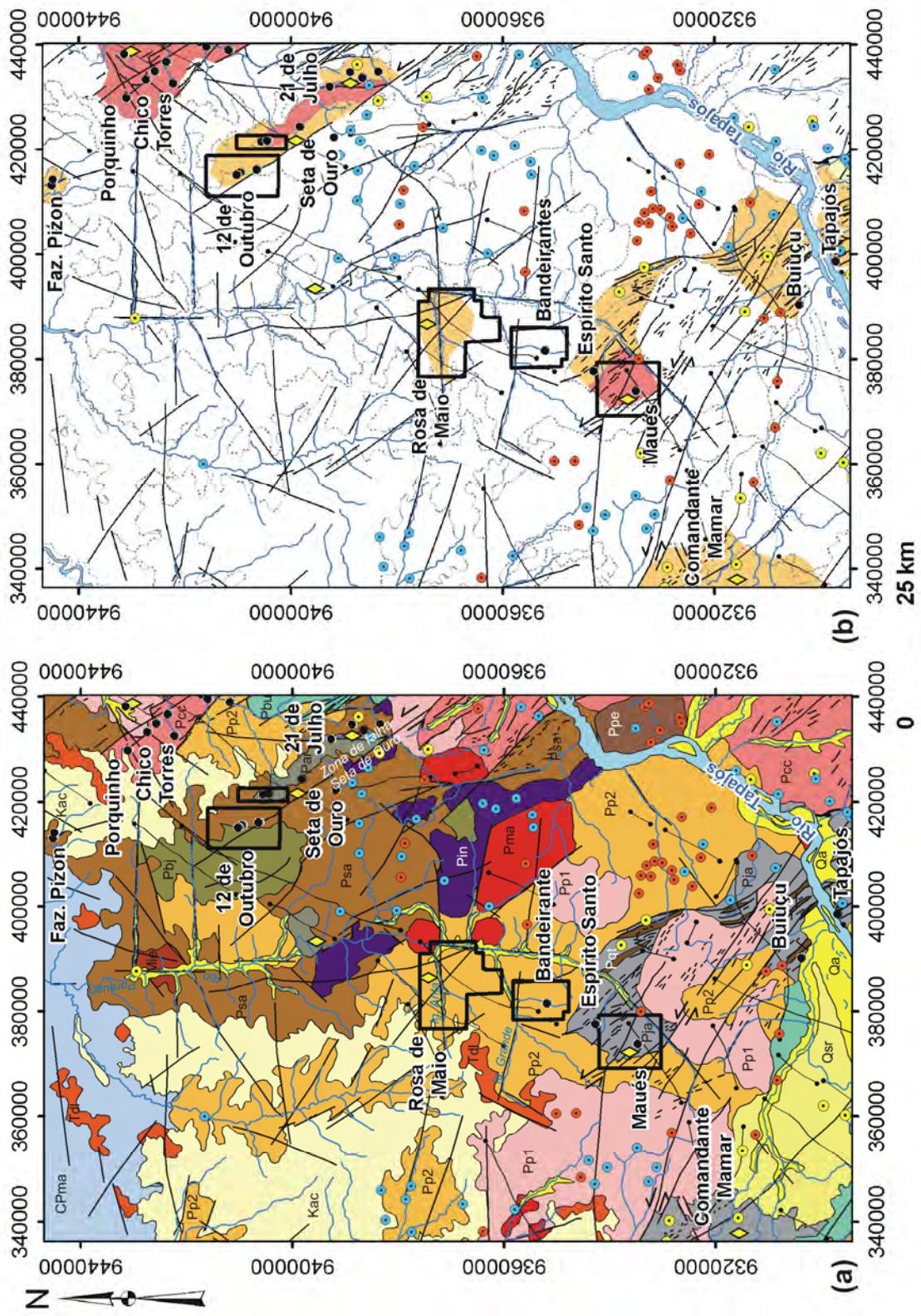


Figura 2.5. Mapas geológico (a) e metalogenético (b) modificados de Klein *et al.* (2001a), e indicação das regiões dos prospectos abordados em detalhe nesta dissertação de mestrado (Continua).

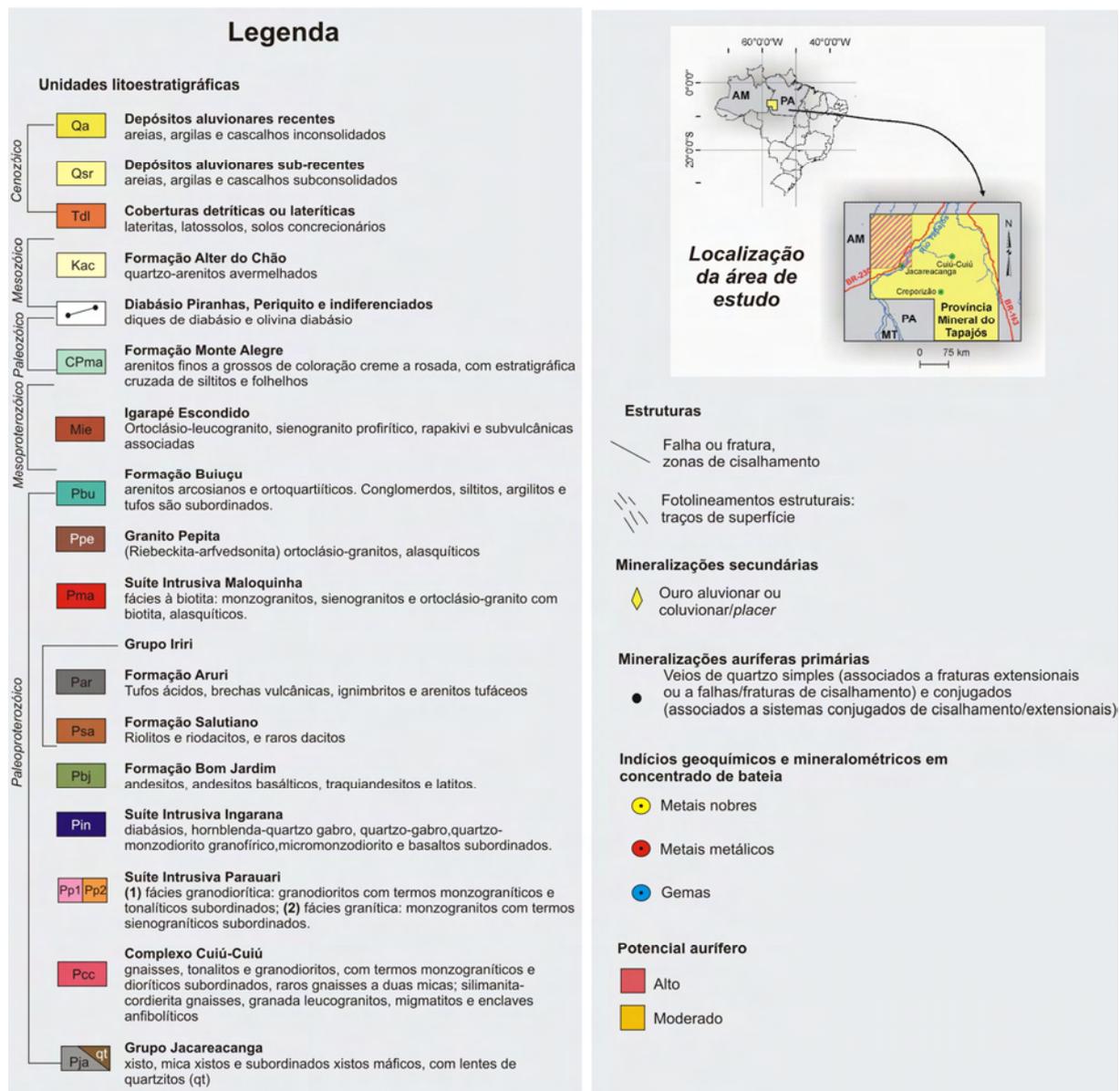


Figura 2.5. (Continuação).

A *Formação Bom Jardim* consiste em rochas vulcânicas de composição intermediária. As principais rochas equivalem a andesitos, andesitos basálticos, traquiandesitos e latitos, com coloração, em geral, cinza escura, granulação afanítica a fanerítica (Almeida *et al.* 2000). O posicionamento estratigráfico desta formação ainda é incerto, podendo estar relacionado à base do Supergrupo Uatumã, ou inserido na Suíte Intrusiva Ingarana (Klein *et al.* 2001a).

A falta de dados geocronológicos dificulta revelar com precisão a idade desta unidade.

O *Supergrupo Uatumã* abrange litotipos do Grupo Iriri e da Suíte Intrusiva Maloquinha, que consistem, respectivamente, em rochas vulcânicas e plutônicas anorogênicas (Almeida *et al.* 2000, Ferreira *et al.* 2000, Klein *et al.* 2001a).

O *Grupo Iriri* é subdividido em duas formações: a Salustiano, composta por rochas

vulcânicas ácidas, e a Aruri, caracterizada por rochas vulcanoclásticas. Estas rochas ocorrem, de maneira geral, como derrames, sendo que subordinadamente encontram-se depósitos piroclásticos e vulcanoclásticos sobrepostos a unidades como o Complexo Cuiú-Cuiú e às suítes intrusivas Maloquinha e Ingarana.

A Formação Salustiano compreende riolitos, riodacitos, dacitos, dos tipos maciços e porfiróides. Estas rochas podem apresentar-se fraturadas e com estruturas do tipo *stockwork*, além de ocorrer preenchimento de fraturamentos por veios de quartzo portadores de ouro e sulfetos. Da Formação Aruri destacam-se rochas como tufos, ignimbritos, brechas vulcânicas e conglomerados vulcânicos (Klein *et al.* 2001a). Esta formação apresenta estratificação plano-paralela, laminações convolutas, estratificações acanaladas e tabulares. O acamamento por vezes caracteriza-se como verticalizado, orientado para NE ou NW, e dobras, falhas e fraturas apresentam direções preferenciais de N40-80W e N65E.

Zircões de riodacito do Grupo Iriri foram datados por meio do método U-Pb (SHRIMP) e apresentam uma idade de 1870 ± 8 Ma (Santos *et al.* 2001b).

A *Suíte Intrusiva Maloquinha* abrange corpos plutônicos com formatos batolíticos que são controlados por falhamentos NNW-SSE. Nos trabalhos de Almeida *et al.* (2000) e Ferreira *et al.* (2000), são descritas duas fácies desta suíte, definidas a partir de estudos petrográficos e geoquímicos (fácies 1 – à biotita - e fácies 2 – a anfibólio). A única que ocorre nas áreas de estudo compreende a fácies a biotita (**Figura 2.5 (a)**), caracterizada por rochas de coloração róseo-avermelhada e abrangendo sienogranitos, monzogranitos e, mais raramente, os feldspatos alcalinos granitos com biotita (Klein *et al.* 2001a). Zircões de amostras desta suíte foram datados por Santos *et al.* (2001) pelo método U-Pb (SHRIMP), resultando nas seguintes idades: 1877 ± 12 Ma, 1874 ± 7 Ma, 1871 ± 8 Ma e 1864 ± 18 Ma.

O *Granito Pepita* compreende um granito disposto na direção NNW-SSE (**Figura 2.5 (a)**), e que foi datado pelo método U-Pb (SHRIMP) por Santos (1999), obtendo-se uma idade de 1.870 ± 4 Ma. Esta unidade abrange (riebeckita-arfvedsonita) ortoclásio granitos hololeucocráticos (alasquíticos), de cor creme acinzentada a róseo-avermelhada, de granulação média a raramente grossa. Comumente são observados ortoclásio pertítico, cristais de quartzo com borda corroída, cavidades miarolíticas, configurando um posicionamento em nível crustal raso.

A *Formação Buiuçu* consiste em um pacote de rochas sedimentares paleoproterozóicas, com predomínio de arenitos arcosianos, conglomerados, siltitos subordinados, tufos intercalados, e que, atualmente, estão distribuídos em cristas alongadas na

direção NW-SE (Almeida *et al.* 2000) (**Figura 2.5 (a)**). Postula-se um ambiente deposicional associado a rios entrelaçados (Klein *et al.* 2001a). A idade mínima desta unidade foi estimada pela datação da intrusão do diabásio Crepori a partir do método U-Pb em badeleíta, gerando-se a idade mínima de 1780 Ma (Santos 1999). Já a idade máxima foi estimada por datação U-Pb e Pb-Pb de zircões de rochas do Grupo Iriri, obtendo-se a idade em torno de 1,88 Ga (Klein *et al.* 2001a, Santos *et al.* 2001b).

2.1.1.2. Unidade litoestratigráfica mesoproterozóica

O *Granito Igarapé Escondido* compreende um granito mesoproterozóico localizado pontualmente na porção norte da Folha Vila Mamãe Anã (Almeida *et al.* 2000), no interflúvio do igarapé Escondido e do rio Parauari, consistindo em um plúton granítico do tipo rapakivi em formato de *stock*, que intrude a Formação Salustiano (Grupo Iriri) (**Figura 2.5 (a)**). A classificação apresentada em Almeida *et al.* (2000) denomina esta unidade como sienogranito porfirítico rapakivi e leuco feldspato alcalino granito (alaskito).

A análise litogeoquímica em elementos maiores, traços e elementos terras raras provenientes de amostras coletadas (Almeida *et al.* 2000), caracterizam um magmatismo com afinidade subalcalina e levemente peraluminoso. As características químicas são semelhantes com as de granitos tipo A e de granitos intraplaca.

Datações Rb-Sr em rocha total geraram idades entre 1,57 e 1,58 Ga (Silva *et al.* 1974).

2.1.1.3. Unidades litoestratigráficas paleozóicas

A *Formação Monte Alegre* compõe parte da Bacia do Amazonas, possuindo uma forma alongada orientada na direção E-W (**Figura 2.5 (a)**), e com idade carbonífera superior. Estima-se uma espessura dos sedimentos em torno de 35-40 m (Ferreira *et al.* 2000, Klein *et al.* 2001a). A unidade compreende, basicamente, arenitos e folhelhos cinza. Ocorrem estratificações cruzadas tabulares e acanaladas de médio porte, além de fraturas com atitudes N49W/84W e N01-05E/86NW (Ferreira *et al.* 2000, Klein *et al.* 2001a).

Os *diques máficos*, denominados de Diabásio Periquito (Klein *et al.* 2001a) cortam as unidades paleoproterozóicas e fanerozóicas da PMT. Nesta unidade também estão inclusos os diques indiferenciados (Klein *et al.* 2001a), sendo todo o conjunto caracterizado pela extensão quilométrica e orientação preferencial na direção NE-SW. As rochas compreendem diabásios e olivina diabásios com coloração cinza escura a preta.

A datação pelo método K-Ar de dique de diabásio resultou na idade de 179 ± 3 Ma

(e.g., Amaral 1974). Entretanto, Santos *et al.* (2002), datando dique similar (olivina gabro) pelo método U-Pb em badeleita, obteve idade de 507 ± 4 Ma. Ressalta-se que estes autores denominaram este enxame de dique de Diabásio Piranhas, pela proximidade da amostra coletada em relação à ilha homônima inserida no rio Tapajós. De acordo com Santos *et al.* (2002), os extensos diques do oeste da PMT não são mesozóicos e sim cambrianos e relacionados com o período de rifteamento que precedeu o início da sedimentação da Bacia Amazônica. Além disso, o sistema de rifteamento em 507 Ma pode ser contemporâneo com as atividades do final do Brasileiro ao longo das margens leste e sudeste do cráton.

2.1.1.4. Unidade litoestratigráfica mesozóica

A *Formação Alter do Chão* encontra-se disposta em um *trend* preferencial N-S e discordante aos granitos da Suíte Intrusiva Parauari e rochas vulcânicas do Grupo Iriri (**Figura 2.5 (a)**). Os principais litotipos correspondem a arenitos avermelhados silicificados e ferruginizados. Os grãos de quartzo são mal selecionados, ocorrendo também grãos caulinizados de rochas vulcânicas, fragmentos de *chert* e, mais raramente, bioturbações (Almeida *et al.* 2000, Klein *et al.* 2001a). A gênese proposta baseia-se em sedimentos depositados em ambiente continental associado com canais fluviais, visto pelo baixo grau de seleção e arredondamento de grãos de quartzo, entre outros fatores (Almeida *et al.* 2000). A datação por meio de estudo de palinórfos revelou uma idade associada ao Cretáceo Superior ou ao Terciário (Travassos & Barbosa Filho 1990).

2.1.1.5. Unidades litoestratigráficas cenozóicas

As *coberturas detrito-lateríticas* são comumente cartografadas por meio de imageamento remoto, pois se encontram associadas com platôs de pequenas dimensões e alongados em geral. Esta unidade encontra-se sobreposta aos litotipos das formações *Alter do Chão* e *Monte Alegre* (Almeida *et al.* 2000). Estas coberturas supergênicas são observadas também em garimpos na forma de crostas lateríticas de cor vermelho-escura e composição argilo-ferruginosa, sobrepostas ao Complexo Cuiú-Cuiú e à Suíte Intrusiva Parauari (Almeida *et al.* 2000).

Os *depósitos aluvionares sub-recentes* abrangem sedimentos inconsolidados e semiconsolidados arenosos e argilosos que, por vezes, interdigitam-se com sedimentos recentes nas proximidades do rio Tapajós. Estão associados com paleoterraços e paleocanais.

Os *depósitos aluvionares recentes* constituem os depósitos de areias inconsolidadas

localizados em trechos de rios atuais (**Figura 2.5 (a)**).

2.1.2. CONTEXTO ESTRUTURAL DA PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS

Seis fases tectono-evolutivas são propostas como geradoras da estruturação regional da Província Mineral do Tapajós (Ferreira *et al.* 2000, Almeida *et al.* 2000, Almeida *et al.* 2001, Klein *et al.* 2001a).

A fase inicial (2,60-2,20 Ga) é marcada pela produção de massas continentais em considerável intervalo de tempo. No Tapajós, este período consiste no estágio pré-colisional, sendo que apenas alguns indícios foram obtidos por meio da geocronologia. Granitos anorogênicos e pós-colisionais paleoproterozóicos caracterizam-se por idades modelos Sm-Nd de 2,4 Ga a 2,6 Ga (Sato & Tassinari 1997) e dados U-Pb (SHRIMP) demonstraram populações de zircões herdados com cerca de 2,6 Ga (Santos 1999).

A segunda fase (2,15-2,00 Ga) caracteriza-se por estruturação NE-SW a NNE-SSW de alto ângulo, representada por xistosidade e foliação penetrativa em rochas do Complexo Cuiú-Cuiú e supracrustais do Grupo Jacareacanga, em metamorfismo de fácies xisto verde a anfíbolito médio. Na terceira fase (1,99-1,96 Ga), a deformação progressiva alterou a direção do transporte tectônico para NW-SE, formando o sistema de megafalhas transcorrentes do Tapajós. A quarta fase (1,90-1,60 Ga) caracteriza-se por uma tectônica extensional, visto pela colocação de extensas intrusões de granitos pós-orogênicos da Suíte Intrusiva Parauari, e de rochas máficas da Suíte Intrusiva Ingarana. Temporalmente, ocorreram vulcanismos ácidos (Grupo Iriri) e intrusões graníticas pós-orogênicas a anorogênicas com afinidade alcalina (e.g., Suíte Intrusiva Maloquinha), em alinhamento preferencial NW-SE.

A quinta fase (1,2-1,0 Ga) está associada com a reativação de grandes estruturas paleoproterozóicas, e surgimento de zonas de cisalhamento rúpteis discretas. Na sexta fase, novas estruturas e antigas reativadas seccionam rochas paleozóicas, terciárias e cenozóicas, e favorecem a intrusão de diques máficos cambrianos (Diabásio Piranhas) e mesozóicos (Diabásio Periquito).

2.1.3. MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS

A formação da PMT como resultante de ambiente tectônico de margem continental ativa durante o Paleoproterozóico explica os principais modelos metalogenéticos das mineralizações auríferas atualmente propostos (e.g., Faraco *et al.* 1997, Dreher *et al.* 1998, Klein *et al.* 2001a, Santos *et al.* 2001b entre outros): (a) depósitos de ouro em veios de

quartzo associados com zonas de cisalhamento (tipo *lode*) (e.g., Klein *et al.* 2001b, 2004); (b) ouro disseminado (*stockwork*) do tipo pórfiro (Robert 1996, Coutinho *et al.* 1998); (c) ouro epitermal do sistema adularia-sericita (Dreher *et al.* 1998) e quartzo-alunita (Juliani *et al.* 2005, 2008).

Com base no tipo genético, morfologia, *status* e tamanho das ocorrências auríferas, Faraco *et al.* (1997) identificaram seis importantes associações das mineralizações relacionadas às seguintes unidades: (a) rochas de médio grau metamórfico (Complexo Cuiú-Cuiú); (b) rochas metassedimentares (Grupo Jacareacanga); (c) suítes básicas proterozóicas; (d) suítes vulcânicas proterozóicas (e.g., Grupo Iriri); (e) suítes intrusivas ácidas proterozóicas; (f) aluviões de idade cenozóica, onde, segundo Faraco *et al.* (1997), foram reconhecidas 360 ocorrências associadas às atividades garimpeiras na região. Há uma disposição preferencial de aluviões com relação às suítes intrusivas ácidas proterozóicas, rochas-fonte dos filões quartzo-auríferos os quais foram desagregados, transportados e sedimentados (Almeida *et al.* 2001). Na década de 90, um brusco decréscimo começou a refletir a exaustão das reservas dos depósitos secundários. Destaca-se que a baixa tecnologia ainda empregada possibilita, em geral, apenas a exploração de zonas supergênicas sob a rocha fresca (5 a 120 m em média de profundidade, segundo Santos *et al.* 2001b).

De acordo com Coutinho (2008), na PMT, as mineralizações auríferas estão hospedadas preferencialmente em rochas félsicas (predominantemente granitos, além de rochas vulcânicas), em rochas máficas (gabros) e, mais subordinadamente, em sedimentos antigos. Estas rochas hospedeiras foram submetidas a processos deformacionais em fácies xisto verde e, mais raramente, anfíbolito. Há um domínio de sistemas de veios de quartzo com <5% de sulfetos e raro carbonato, sendo o teor de cobre baixo e o de ouro entre 30 g/t e 2-6 g/t (Coutinho 2008). Nas áreas garimpeiras focadas em Coutinho (2008), independentemente da rocha hospedeira, foi observado um enriquecimento em minerais ricos em K (sericita e/ou K-feldspato) e, em menor frequência, em carbonato, muscovita e biotita.

Os depósitos auríferos relacionados com zonas de transcorrência exibem intensas zonas de alteração (carbonatação, sericitização e silicificação - e.g., garimpos Ouro Roxo, São José, Chico Torres, Abacaxis), enquanto que nas áreas mineralizadas originadas sob condição rúptil, o contato entre os veios de quartzo mineralizados e rocha encaixante é caracterizado por zonas de alteração menos expressivas (Coutinho 2008).

Coutinho (2008) também designou três principais *trends* auríferos, denominando-os de São Jorge-Chico Torres, Santa Isabel-Ouro Roxo e Patrocínio-Espírito Santo, todos

associados com megalineamentos paleoproterozóicos de direção NW-SE (**Figura 2.6**).

Coutinho *et al.* (2000), analisando os depósitos auríferos da PMT, propuseram uma classificação dos mesmos em mesozonais (tipo orogênico) e epizonais (correspondente ao tipo *intrusion related*), além de determinar duas épocas de mineralização (em 1,96 Ga e 1,88 Ga) a partir de idades-modelo em sulfetos. Esta classificação foi reafirmada em Coutinho (2008), sendo que a primeira fase metalogenética é caracterizada por processos hidrotermais em condições de temperatura e pressão de cerca de 500°C e 2,6 kb para enriquecimento potássico, e de aproximadamente 290°C e 1,2 kb para processos de sericitização. O alojamento de veios de quartzo ocorreu sob condições rúpteis-dúcteis e, a partir da pressão mínima de trapeamento das inclusões fluidas, inferiu-se uma profundidade de 4 a 7 km. Veios de quartzo mineralizados possuem origem de fluido do tipo CO₂, caracterizado por densidade entre 0,7 a 0,85 g/cm³, salinidade entre 2,7 a 5,5 mol% NaCl, *fO₂* entre cerca de -35 a -55, e pH próximo do neutro a levemente alcalino. A segunda fase metalogenética é marcada por veios de quartzo que tiveram origem a partir de fluido depletado em CO₂, com componente aquosa expressiva, *fO₂* entre cerca de -29 a -34,5, e pH neutro a levemente alcalino. A análise da pressão mínima de trapeamento das inclusões fluidas de 1,2 a < 1,4 kb, fornece informação de condições rúpteis de desenvolvimento de veios de quartzo mineralizados. Sob o ponto de vista regional, Coutinho (2008) afirma que os depósitos mais superficiais (epizonais) ocorrem predominantemente no lado leste da província, onde o sistema vulcano-plutônico encontra-se melhor preservado. Os depósitos com feições transicionais para profundos são dominantes na porção central, onde o nível de erosão tem uma forte influência na preservação.

A classificação dos depósitos auríferos realizada por Santos *et al.* (2001b) subdivide os tipos em quatro categorias de depósitos primários com base em observações mesoscópicas dos corpos mineralizados, dados isotópicos e de microtermometria: (a) tipo orogênico hospedado em metaturbiditos; (b) tipo orogênico hospedado em rochas de arco magmático; (c) associado a intrusões (*intrusion related*), sendo depósitos caracterizados por sistemas de veios de quartzo epizonais; (d) associado a intrusões (*intrusion related*) do tipo *stockwork* epizonal. A análise de isótopos de Pb em feldspatos potássicos, combinada com dados de sulfetos (Pb-Pb), indicam que a fonte dos fluidos hidrotermais está mais próxima da proveniência de rochas pertencentes ao Complexo Cuiú-Cuiú, suítes Tropas e Parauari do que das suítes intrusivas Creporizão e Maloquinha. Entretanto o magmatismo Maloquinha/Iriri pode ter fornecido o calor necessário à circulação de fluidos hidrotermais (Santos *et al.* 2001b).

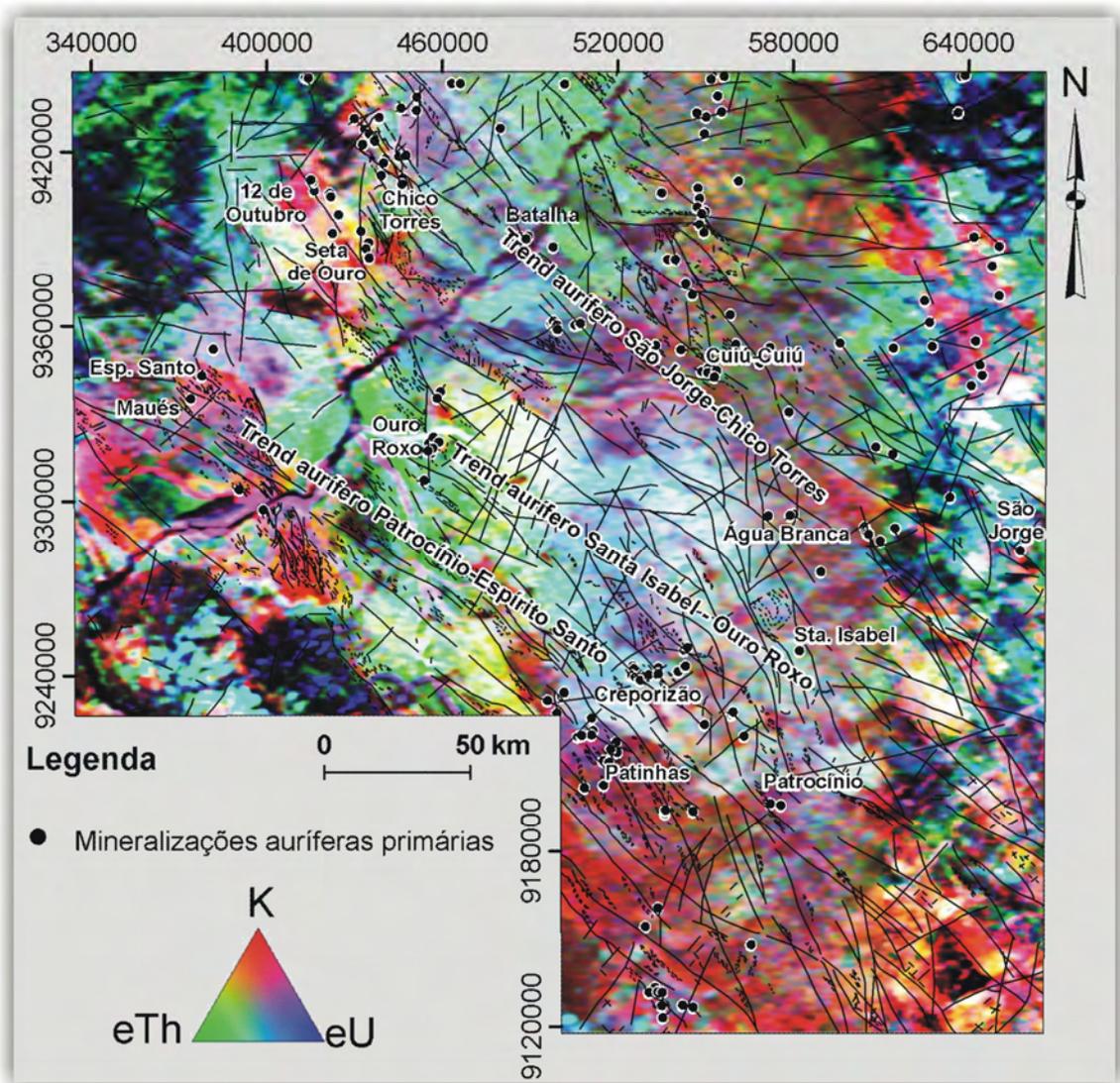


Figura 2.6. Imagem ternária dos canais de K, eTh e eU em RGB, com indicação dos principais megatendimentos paleoproterozóicos da Província Mineral do Tapajós. Destaque aos três *trends* auríferos propostos por Coutinho (2008).

Os depósitos orogênicos estão associados com rochas hospedeiras do Complexo Cuiú-Cuiú e da Suíte Intrusiva Tropas e, em menor grau, com os metassedimentos do Grupo Jacareacanga. Já os depósitos tipo *intrusion related* estão hospedados principalmente nas suítes intrusivas Parauari e Maloquinha, seguidos das rochas vulcânicas do Grupo Iri e em granitos da Suíte Intrusiva Creporizão, sendo as principais alterações hidrotermais a sericitização e feldspatização e, por vezes, epidotização e carbonatação. Adicionalmente, de acordo com Santos *et al.* (2001b), nenhuma mineralização de ouro foi verificada em unidades mais jovens que a Suíte Intrusiva Maloquinha. A partir da datação desta unidade, os autores obtiveram a idade máxima para os depósitos do tipo *intrusion related* em 1,862 Ga. Questionamentos acerca de mineralizações do tipo epitermal (adulária-sericita) abrangem

ocorrências localizadas na porção noroeste da PMT, como os garimpos Pizon, 12 de Outubro, Seta de Ouro, São Félix entre outros. Porém, além da hospedeira vulcânica ácida, Santos *et al.* (2001b) afirmam que há ausência de outras características típicas para se classificar tais ocorrências como mineralizações epitermais.

Outra classificação metalogenética compreende a do PROMIN-Tapajós (Klein *et al.* 2001a), que caracteriza as principais regiões auríferas de acordo com a potencialidade mineral (alta, moderada e baixa) e classifica as ocorrências e depósitos primários de acordo com os seguintes critérios: presença comprovada, inferida, indicada de um metalotecto; forma (tipologia) e frequência com que ocorrem as mineralizações primárias; intensidade e frequência dos jazimentos secundários; presença de indícios indiretos (alterações hidrotermais, ouro em concentrado de batéia, anomalias geofísicas). As regiões com maior densidade de mineralizações primárias consistem naquelas em que ocorre maior concentração das mineralizações secundárias (Klein *et al.* 2001a) (**Figura 2.5 (b)**).

Nessa abordagem, os depósitos primários estão relacionados com halos de alteração hidrotermal e são controlados por zonas de cisalhamento, principalmente àquelas alinhadas segundo o *trend* regional NW-SE, e que serviram como condutos dos fluidos mineralizantes, além de produzirem o controle da geometria e disposição dos granitos encaixantes (Martini 1998, Vasquez & Klein 2000).

Com relação à porção sudeste da PMT, Klein *et al.* (2002) defendem que um evento mineralizador, concomitante à deformação transcorrente e à colocação dos granitos da Suíte Intrusiva Creporizão, ocorreu entre aproximadamente 1,97 e 1,95 Ga. Nestas condições enquadra-se o prospecto Patinhas, estudado por Klein *et al.* (2004) com base em petrografia e dados de inclusões fluidas, e que foi caracterizado como depósito aurífero mesotermal/mesozonal estruturalmente controlado.

O sistema epitermal do tipo adularia-sericita foi identificado por Dreher *et al.* (1998) na região dos prospectos Joel e Davi. Nestas áreas, o mineral adularia foi reconhecido, aparecendo em cavidades fraturadas de rochas máficas hidrotermalmente afetadas, e associado com veios de quartzo mineralizados. A alteração hidrotermal, classificada como de natureza propilítica, caracteriza-se por minerais como clorita, calcita, sericita e epidoto.

Juliani *et al.* (2005, 2008) verificaram mineralizações epitermais de alta sulfetação na região do rio Jamaxim, com alunita magmático-hidrotermal associada com brechas hidrotermais hospedadas em complexos vulcânicos riolíticos que, por sua vez, encontram-se relacionados com rochas graníticas com idade variando de 1,89 a 1,87 Ga. A alunita

apresenta-se disseminada em halos de alteração argílica avançada que envelopam sílica *vuggy*. Amostras de alunita datadas pelo método Ar-Ar produziram idades de 1,869 a 1,846 Ga para a mineralização de ouro.

2.2. Prospectos 12 de Outubro, Maués, Rosa de Maio e Bandeirante

As regiões auríferas da PMT selecionadas para o estudo de detalhe compreendem prospectos requeridos pela empresa Mapex Mineração, Importação e Exportação Ltda. As áreas dos prospectos 12 de Outubro, Maués, Rosa de Maio e Bandeirante são descritas a seguir.

2.2.1. PROSPECTO 12 DE OUTUBRO

Esta área consiste numa porção noroeste da província Tapajós, inclusa no *trend* aurífero São Jorge-Chico Torres, de acordo com Coutinho (2008) (**Figura 2.6**).

As rochas mais antigas desta região compreendem monzogabros da Suíte Intrusiva Ingarana, rochas vulcânicas intermediárias (Formação Bom Jardim) e ácidas (Formações Salustiano e Aruri do Grupo Iriri). Sedimentação mais recente representada pela Formação Alter do Chão, também está presente (**Figura 2.5**).

A área da zona de falha Seta de Ouro (**Figura 2.5**) abrange prospectos como 12 de Outubro, São Félix, Coatá, Modelo, Abacate, 21 de Julho. Estes prospectos caracterizam-se por mineralizações em tufos, ignimbritos, brechas hidrotermais, riolitos, dacitos muito hidrotermalizados, e pela presença de veios de quartzo do tipo *stockwork* com estruturas NNE-SSW, NW-SE e E-W associadas. Os principais tipos de alteração hidrotermal compreendem a silicificação e a sulfetação. Ocasionalmente, ocorrem andesitos da Formação Bom Jardim mineralizados e portadores de estruturas tipo *stockwork*, caracterizados por epidotização, cloritização, silicificação, sulfetação e raramente carbonatação (Klein *et al.* 2001a). O ouro também é explotado no perfil laterítico, como nos andesitos basálticos amigdaloidais presentes no prospecto 12 de Outubro, além de haver ocorrências auríferas em brechas hidrotermais em pontos isolados, como visto nos prospectos Seta de Ouro, 12 de Outubro, Abacate, São Félix e Maranhense (Klein *et al.* 2001a).

No prospecto 12 de Outubro foram verificados veios de quartzo hospedados em brechas vulcânicas do Grupo Iriri. Estas rochas hospedeiras apresentam-se muito silicificadas, com clorita e sericita subordinados, além de pirita, calcopirita e covelita (Pereira *et al.* 2008). Botelho *et al.* (2009) afirmam que a tipologia das alterações hidrotermais, as paragêneses

encontradas nos minerais de minério e de ganga e os dados de microtermometria e espectroscopia Raman são semelhantes àsquelas encontradas nos depósitos de ouro do tipo *intrusion related*. Fluidos aquosos quentes (280° a 400 °C), com salinidades moderadas (8,6 a 16,4% em peso de NaCl eq.), ricos em vapor, além de inclusões aquocarbônicas ausentes, podem indicar que o depósito se formou em condições rasas na crosta, com a deposição de ouro a partir de fluidos de temperaturas relativamente baixas e de possível fonte meteórica, aquecidos pelo magmatismo presente na área (Botelho *et al.* 2009). Neste prospecto e no Rosa de Maio, o ouro ocorre como finas inclusões globulares em pirita, e como grãos irregulares de até 1 mm concentrados em zonas de oxidação da pirita. A concentração de prata no ouro situa-se entre 15 e 25% (peso), enquanto que as concentrações de ouro na rocha são acompanhadas de enriquecimento em Pb e Bi, havendo presença de galena como finas inclusões na pirita (Botelho *et al.* 2009).

Nas áreas mineralizadas, o tipo de alteração hidrotermal predominante é a silicificação, que gera uma diminuição da concentração de potássio nas rochas mineralizadas, conforme mostrado em gráfico da razão de K_2O/SiO_2 , produzido com base em dados obtidos por geoquímica de rocha (Pinto *et al.* 2009). Adicionalmente, estes autores mostram que as concentrações de ouro nas amostras analisadas possuem relação direta com aumento de SiO_2 e diminuição de K_2O .

2.2.2. PROSPECTO MAUÉS

A área do prospecto Maués (**Figura 2.5**) abrange mineralizações auríferas hospedadas em metaturbiditos do Grupo Jacareacanga (Santos *et al.* 2001b) ou, de acordo com a classificação proposta por Klein *et al.* (2001a), associadas com estruturas rúpteis-dúcteis e dúcteis. Coutinho (2008) inclui esta região como pertencente ao *trend* aurífero Patrocínio-Espírito Santo, caracterizada por transcorrência sinistral de direção NW-SE (**Figura 2.6**).

Em geral, segundo Santos *et al.* (2001b), estes depósitos orogênicos hospedados em metaturbiditos em fácies xisto-verde, são caracterizados por veios de quartzo ricos em pirita e associados com sericita e clorita em zonas de cisalhamento dúcteis. Estas ocorrências são interpretadas como depósitos de ouro mesozonal, formados nas maiores profundidades crustais em relação às demais ocorrências auríferas da PMT.

A região dos prospectos Espírito Santo e Maués abrange o maior potencial para ouro na região de contato dos xistos do Grupo Jacareacanga com os granitos Parauari (**Figura 2.5 (b)**). No prospecto Maués foi verificada uma pureza do ouro de até 94%. A extração do

minério, apresentada por Ferreira *et al.* (2000), compreende o nível de cascalho (quartzo leitoso) com até 2 cm de espessura, que situa-se acima de xisto alterado. Este xisto é caracterizado por lentes de quartzo sacaroidal friáveis e concordantes com a xistosidade regional (N11-20W/90-85SW), além de veios de quartzo com até 3 cm de espessura, discordantes. Santos *et al.* (2001b) constataram, na área do prospecto Maués, veios de quartzo portadores de ouro disseminado, originados durante o período de transpressão marcado por transporte tectônico NW (N20W). Os corpos mineralizados apresentam-se retrabalhados em evento posterior de deformação dúctil de movimentação sinistral (N-S). Já Coutinho (2008) questiona se realmente os veios de quartzo são portadores de ouro ou se o regolito é alóctone. Veios de quartzo auríferos encaixados em xistos do Grupo Jacareacanga foram encontrados na região do prospecto Teodorico, na porção noroeste da província. Em analogia a esta observação e considerando-se os dados de isótopos estáveis (oxigênio e hidrogênio) de veios de quartzo da área do prospecto Espírito Santo, que apresentaram valores similares aos obtidos para outros veios auríferos da PMT, Coutinho (2008) conclui a possibilidade de que tais veios sejam portadores da mineralização.

Para Pinto *et al.* (2009), as mineralizações auríferas da região do prospecto Maués estão condicionadas a veios de quartzo, e estruturadas segundo o *trend* NNW-SSE. Considerações preliminares dadas por Pinto *et al.* (2009) evidenciam forte tendência para ouro do tipo orogênico. Entretanto, uma associação local, no prospecto Maués, com rochas vulcânicas ou subvulcânicas, sem a mesma estruturação das ocorrências hospedadas nos mica xistos, é indicadora de mineralizações relacionadas com o magmatismo ácido a intermediário.

2.2.3. PROSPECTOS ROSA DE MAIO E BANDEIRANTE

O prospecto Rosa de Maio caracteriza-se por ocorrências de ouro secundário e primário associadas com aluviões em disposição preferencial E-W (**Figura 2.5**), em torno de granitos das suítes intrusivas Parauari e Maloquinha que, por sua vez, constituem um forte indício para a fonte primária do ouro (Klein *et al.* 2001a). O mapa metalogenético proposto pela CPRM (Klein *et al.* 2001a; *cf.*, **Figura 2.5 (b)**), indica um potencial prospectivo moderado para ouro nesta região. Na bacia do Igarapé Anta (**Figura 2.5**), estima-se uma produção de cerca de 20 toneladas de ouro aluvionar (Pinto *et al.* 2009).

Santos *et al.* (2000) classificaram o granito da região do Rosa de Maio como do tipo tardio da Suíte Intrusiva Parauari, e obtiveram uma idade, por meio da datação de zircão pelo método U-Pb, de 1879 ± 11 Ma. Esta mesma idade é muito similar àquela obtida pelo método

Pb-Pb em zircões do monzogranito Matupá, na Província de Alta Floresta (1870±12 Ma), além das semelhanças geoquímicas e tectônicas (Moura *et al.* 1997).

Juliani *et al.* (2002) fazem analogia da gênese do granito Batalha (~1,88 Ga), até então associado ao magmatismo Maloquinha, com o granito Rosa de Maio, visto as similaridades em termos de mineralogia, química e ambiente tectônico e, desta forma, incluindo-o como parte da granitogênese Parauari. Segundo estes autores e Juliani *et al.* (2005), os granitos denominados de Batalha e Rosa de Maio compreendem biotita granitos e biotita/hornblenda granitos calci-alcalinios, associados com metalogenia de ouro e cobre.

Pereira *et al.* (2008) realizaram estudos petrográficos em amostras do granito Parauari mineralizado proveniente da região do prospecto Rosa de Maio, constatando ouro em meio a quartzo e pirita limonitizados. Estes mesmos autores, a partir de estudos de inclusões fluidas, concluíram, preliminarmente, um tipo de depósito magmático-hidrotermal.

De acordo com Pinto *et al.* (2009), os granitos da região do prospecto Rosa de Maio caracterizam-se por assinatura geoquímica de granitos pós-colisionais. No setor central deste prospecto, as rochas dominantes caracterizam-se por composição monzogranítica (biotita monzogranito porfirítico, de cor cinza a rósea e granulação grossa a muito grossa) e, localmente, há afloramentos de quartzo diorito. As mineralizações auríferas estão hospedadas em veios de quartzo de alto teor (108 g/t Au) e em granitos Parauari hidrotermalizados (6 g/t Au). A alteração hidrotermal predominante compreende a sericitização, seguida da silicificação, conforme evidenciado pelas maiores razões de K₂O/SiO₂ obtidas por geoquímica de rocha (Botelho *et al.* 2009, Pinto *et al.* 2009). Considerações preliminares de Pinto *et al.* (2009), a partir da verificação de alteração hidrotermal, dos dados de levantamentos geofísicos e geoquímicos de rocha e solos e pela natureza das rochas graníticas encaixantes no prospecto Rosa de Maio, convergem para a sugestão de depósitos auríferos associados com cúpulas graníticas, do tipo pórfiro ou *intrusion related*.

Segundo Klein *et al.* (2001a), o prospecto Bandeirante caracteriza-se pela ocorrência de mineralizações auríferas associadas com brechas vulcânicas hidrotermais portadoras de adularia e intensa venulação (sílica amorfa, calcedônia e quartzo) que corta monzogranitos da Suíte Intrusiva Parauari (**Figura 2.5**). Estas são caracterizadas por espessura aproximada de 1 metro e orientação N20E/90 (Klein *et al.* 2001a), sendo que a direção N20E é a mesma do controle estrutural gerado por falha. Destaca-se que, com relação à fácies granítica da Suíte Parauari nas regiões dos prospectos Rosa de Maio e Bandeirante, é observada uma orientação preferencial de biotita e fenocristais euédricos de feldspato alcalino que representam uma

ocorrência de deformação heterogênea e/ou fluxo magmático (Ferreira *et al.* 2000).

De acordo com Pinto *et al.* (2009), biotita granito porfirítico, muito grosso e semelhante ao granito do prospecto Rosa de Maio, compreende a rocha dominante do prospecto Bandeirante. Intenso intemperismo ocorre na região, com presença de espessos perfis de solo em garimpos abandonados, fortalecendo a questão de enriquecimento supergênico (e.g., Almeida *et al.* 2000).

CAPÍTULO III. MATERIAIS, AVALIAÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS MULTIFONTE

Imagem SAR-R99B (Lhh) da região dos prospectos Espírito Santo e Maués

3. APRESENTAÇÃO

Os materiais utilizados nesta dissertação de mestrado compreendem dados cartográficos, radar de abertura sintética, um acervo de dados geofísicos terrestres coletados em campanha de campo e aéreos, modelo digital de elevação e dados geoquímicos.

O *Apêndice 1* apresenta detalhadamente a fundamentação teórica de dados SAR e aerogeofísicos aqui utilizados.

3.1. Dados cartográficos

A base cartográfica consiste em duas folhas topográficas em escala 1:250.000 denominadas Vila Mamãe Anã (SB.21-V-D) e Jacareacanga (SB.21-Y-B), além de mapas geológico (1:250.000) e metalogenético (1:500.000), ambos provenientes do PROMIN-Tapajós (Almeida *et al.* 2000, Ferreira *et al.* 2000, Klein *et al.* 2001a). Estas cartas, em formato analógico, foram rasterizadas e georreferenciadas com o emprego da projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 21 sul, e datum horizontal SAD-69.

3.2. Imagens SAR-R99B

Os dados de radar de abertura sintética do sensor SAR da plataforma R99B, referentes à Missão Terra do Meio Oeste, foram obtidos em Abril de 2006, recobrando parte dos estados do Amazonas e Pará. Compreendem segmentos imageados em banda L (nas polarizações Lhh, Lhv, Lvh, Lvv) e X (na polarização Xhh), com resolução espacial em alcance e azimute de 18 m e tamanho de pixel de 15 m. A altura de aquisição equivale a 35.000 pés, e foram empregados 8 *looks* e ângulo de incidência (*near ao far range*) variando de 45° a 81,10° (com visada para oeste). Estes dados foram cedidos pelo Centro Técnico Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM) de Belém em formato 8 bits.

O sensor SAR-R99B encontra-se instalado em três aeronaves Embraer ERJ-145 (R99B) da Força Aérea Brasileira que são operadas pelo 2° Esquadrão do 6° Grupo de Aviação. As aeronaves R99B também são equipadas com os sensores de Varredura Multiespectral (MSS-*Multispectral Scanner*) e Óptico e Infravermelho (OIS – *Optical and Infrared Sensor*) (Costa *et al.* 2007).

3.2.1. AVALIAÇÃO VISUAL E PRÉ-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS SAR-R99B

A partir da análise visual das bandas L (Lhh, Lhv, Lvh, Lvv) e X (Xhh) do sensor SAR-R99B, verificou-se perda de resolução (desfocagem) em algumas porções dos segmentos imageados, o que dificultou a identificação de feições morfológicas em geral. Este problema está associado possivelmente a efeitos de movimento da plataforma, que são mais frequentes em dados aerotransportados que orbitais, a exemplo de: variação de velocidade, desvio lateral ou vertical, entre outros fatores. A **figura 3.1** ilustra um exemplo deste problema.

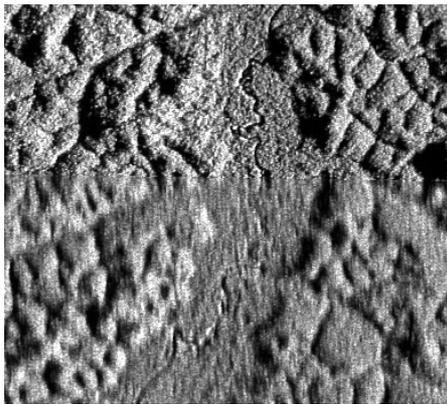


Figura 3.1. Exemplo de perda de resolução verificada em todos os segmentos cedidos pelo CENSIPAM em referência à Missão Terra do Meio Oeste abrangendo a região da Província Mineral do Tapajós.

As imagens em banda X do SAR-R99B foram descartadas na etapa de integração de dados, já que nuvens foram passíveis de observação, pois tal comprimento de onda empregado é mais susceptível ao bloqueio por meio de condições atmosféricas adversas.

A radiometria das imagens SAR-R99B foi homogeneizada por meio da correção do padrão de antena, que significa a aplicação de uma função matemática para equalização radiométrica, e que foi realizada a cada segmento imageado. Em todos os casos, uma função de ordem 5 foi selecionada.

Devido ao imageamento *multilook* (8 looks), uma menor resolução espacial (no caso, de 18 x 18 m em alcance e azimute) foi determinada para a Missão Terra do Meio Oeste. Em contrapartida, esta degradação da resolução espacial por meio das múltiplas visadas reduz os ruídos inerentes às imagens de SAR, o *speckle*. Com a análise visual dos segmentos, não se verificou o ruído e, portanto, não foi necessária a aplicação de filtros adaptativos para a suavização ou eliminação dos mesmos.

O passo final compreendeu a correção geométrica. Em função da ausência de dados sobre efemérides do SAR-R99B cedido, procedeu-se com a determinação de 82 pontos de controle utilizando-se cartas topográficas em escala 1:250.000. O erro quadrático médio resultante foi de 17,58 m.

3.3. Dados geofísicos

Para a elaboração desta dissertação de mestrado, dois conjuntos de dados aerogeofísicos foram utilizados: o primeiro, de caráter regional, compreende àquele proveniente do Serviço Geológico do Brasil (CPRM); o segundo conjunto de dados foi cedido pela empresa Mapex Mineração, Importação e Exportação Ltda., e abrange quatro áreas de detalhe referentes aos prospectos Maués, Rosa de Maio, Bandeirante e 12 de Outubro.

3.3.1. AEROLEVANTAMENTO BLOCO 1- PROVÍNCIA AURÍFERA DO TAPAJÓS

Os dados regionais do aerolevante Bloco 1- Província Aurífera do Tapajós foram obtidos pela empresa Lasa Engenharia e Prospecção S.A., contratante da CPRM, entre os meses de Junho e Novembro de 1997. Consistem em dados magnetométricos e gamaespectrométricos com espaçamento das linhas de vôo (N-S) e de controle (E-W) de 1 e 13 km, respectivamente, e coletados em altura de vôo de 100 metros. As leituras do aeromagnetômetro foram realizadas a cada 5,5 m e do aerogamaespectrômetro a cada 55 m. Os dados foram registrados a bordo da aeronave Britten-Norman, modelo BN-2A-*Islander*, prefixo PT-KNE, de forma digital e analógica (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 1998).

O sistema aeromagnético Picodas PDAS 1000 (aquisição e compensação) foi acoplado a um sensor de vapor de césio modelo CS-12 da SCINTREX, com resolução de 0,001 nT, e montado na cauda da aeronave (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 1998).

Foi empregado o sistema Picodas, modelo PGAM, de 256 canais espectrais, para registro da radiação gama referente aos canais de K, eU, eTh e da contagem total. O volume total de cristais de iodeto de sódio (NaI) ativado a tálio empregado consistiu em 2048 polegadas cúbicas para dois conjuntos de cristais voltados para baixo (*downward looking crystals*) e 512 polegadas cúbicas para dois conjuntos de cristais voltados para cima (*upward looking crystals*). Em síntese, o espectro de cada cristal detector é analisado individualmente para a determinação dos fotopicos de K, eU e eTh. As radiações gama detectadas são somadas e as leituras reduzidas a uma única saída de 256 canais espectrais (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 1998).

3.3.2. AEROLEVANTAMENTOS MAUÉS, ROSA DE MAIO, BANDEIRANTE E 12 DE OUTUBRO

Os dados geofísicos de maior detalhe são referentes aos aerolevantes efetuados nos prospectos 12 de Outubro, Maués e Bandeirante, adquiridos entre 17 e 30 de Janeiro de

2006. O quarto levantamento foi efetuado na região do prospecto Rosa de Maio, entre 7 e 15 de Janeiro de 2006. Os dados coletados compreenderam o tipo aeromagnetométrico gradiométrico e o aerogamaespectrométrico, e foram adquiridos pela empresa Lasa Engenharia e Prospecções S.A. A altura de vôo foi mantida constante em 100 m, e as linhas de vôo (N-S) e de controle (E-W) variaram, respectivamente, da seguinte maneira: para o bloco 12 de Outubro consistiram em 400 m e 4000 m; para o bloco Maués compreenderam 400 m e 3500 m; para o bloco Bandeirante equivaleram a 400 m e 3000 m; para o bloco Rosa de Maio consistiram em 75 m e 750 m (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2006a, b).

A aeronave utilizada foi uma Cessna, modelo 208- Grand Caravan, com o prefixo PT-MEP. Corresponde a um modelo turbo-hélice monomotor, com velocidade média de 255 km/h. O sistema de navegação correspondeu ao GPS Novatel OEM2 (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2006a, b).

O gamaespectrômetro empregado consistiu no *EXPLORANIUM*, modelo GR-820, composto por 256 canais espectrais. Dois conjuntos de cristais voltados para baixo de NaI de 1024 polegadas cúbicas para cada um foram selecionados, além de dois cristais voltados para cima de 256 polegadas cúbicas cada um. Uma leitura foi realizada a cada segundo (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2006a, b).

O aeromagnetômetro é formado por três sensores de vapor de césio SCINTREX, modelo CS-3, com resolução de 0,001 nT, para registro de dados do campo magnético total e dos gradientes horizontais lateral (Gx) e longitudinal (Gy). A taxa de amostragem equivaleu a 20 Hz. Os sensores foram colocados nas pontas das duas asas e na cauda da aeronave (**Figura 3.2**). O sinal do sensor é recebido por pré-amplificadores inseridos na base do cone da cauda e enviado ao sistema de aquisição aeromagnética FASDAS. Vinte leituras de dados do magnetômetro foram realizadas a cada segundo (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2006a, b).

O cálculo dos gradientes medidos, Gx e Gy, foi efetuado pela Lasa Engenharia e Prospecções S.A. (2006a, b). O gradiente lateral (Gx) representa a diferença dos valores medidos nos dois sensores presentes nas asas da aeronave, sendo este valor dividido pela respectiva distância entre os mesmos (15,70 m) (**Figura 3.2**). Já o gradiente longitudinal (Gy) equivale à média dos valores registrados pelos sensores localizados na asa da aeronave, posteriormente subtraída do valor adquirido pelo sensor da fuselagem. Este resultado foi dividido pela distância entre a localização dos sensores da asa e o da fuselagem (12,70 m) (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2006a, b) (**Figura 3.2**).

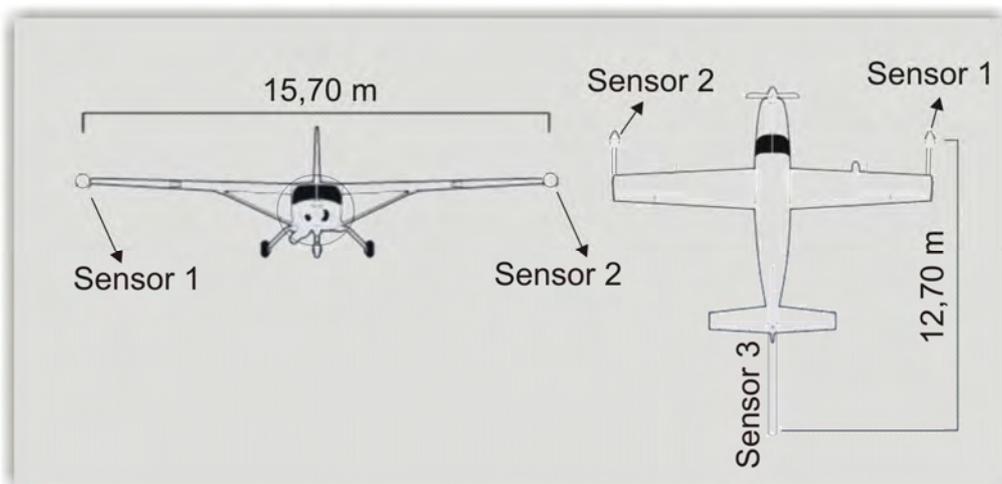


Figura 3.2. Ilustração da disposição dos três sensores magnetométricos gradiométricos e da separação entre os mesmos (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2006a, b).

3.3.3. DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS TERRESTRES

Dados gamaespectrométricos terrestres foram coletados por meio do gamaespectrômetro portátil GRS-500 da SCINTREX LIMITED (Canadá), durante a etapa de campo, que foi realizada entre 5 e 14 de Setembro de 2008.

Este aparelho é formado por um módulo com as medidas de 23,5 x 11,5 x 6,4 cm e peso de cerca de 2,5 kg. O detector é constituído por um cristal de iodeto de sódio ativado à tálio com volume de 124 cm³. As janelas de energia compreendem a TC1 (contagem total acima de 0,08 MeV), TC2 (contagem total acima de 0,40 MeV), K (entre 1,35 e 1,59 MeV), eU (entre 1,65 e 1,87 MeV), eTh (entre 2,45 e 2,79 MeV). As leituras da radiação gama são fornecidas em contagens por segundo (cps).

A coleta de dados de K, eU, eTh e contagem total (TC2) foram realizadas nos afloramentos de rochas quando encontrados, solos e saprolitos, em distribuição aleatória, considerando-se um tempo em torno de 2 minutos para assegurar boa estatística dos dados amostrados.

Optou-se pela manutenção das leituras medidas em cps para análise qualitativa das assinaturas gamaespectrométricas de materiais geológicos.

3.3.4. AVALIAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS AÉREOS

3.3.4.1. Gamaespectrometria

Silva (2003) trabalhou com os dados regionais do levantamento aéreo Bloco 1 – Província Aurífera do Tapajós. Na análise estatística dos dados gamaespectrométricos, Silva

(2003) optou pelo uso dos dados em unidades de contagem por segundo (cps) e realizou a normalização dos canais radiométricos por meio do acréscimo do valor de um desvio padrão.

No presente estudo, além da utilização dos produtos gamaespectrométricos regionais gerados por Silva (2003) em cps, também optou-se pela análise estatística dos valores dos canais de K, eTh, eU e contagem total em concentração de radioelementos, conforme apresentada na **tabela 3.1**.

Nota-se na **tabela 3.1** que a média para o canal de K (0,02%) está abaixo do esperado, visto que a média crustal varia de 2,2 a 2,35%, e que nas condições da PMT, que caracteriza-se por granitos, aluviões, rochas vulcânicas ácidas com grande distribuição em área (além de rochas máficas e intermediárias), seria esperado obter, no mínimo, tal média.

Este fato pode estar associado às condições da pista de calibração dinâmica, pois como reportado no relatório da Lasa Engenharia e Prospecções S.A. (1998), houve a recomendação de melhora imediata da pista a fim de torná-la mais homogênea para a obtenção de condições ideais de calibração. Este procedimento adotando a pista de Maricá (RJ) não foi aprovado pelo Dr. John Carson (Serviço Geológico do Canadá) e Dr. Bart St. John-Smith. A partir desta calibração é que se realizou a conversão das contagens obtidas a bordo (dados em cps) para concentrações de potássio, urânio, tório e contagem total no solo. Em função da conversão dos dados de K em cps para K em percentagem, onde foram apontados problemas operacionais, optou-se pelo uso dos dados dos quatro canais radiométricos medidos em cps, para produção de mapas e análise de perfis. Para o caso dos dados convertidos para concentração de radioelementos, a somatória de uma constante (em torno de 1,7-2 %) para obter uma média similar à crustal (~2%) não foi satisfatória, pois regiões caracterizadas por rochas máficas (e.g., Suíte Intrusiva Ingarana) passaram a ser caracterizadas por uma concentração de K em torno de 1,7%, o que não é condizente com uma medida mais próxima do real.

É interessante observar que os dados de eU e eTh além de não possuírem valores negativos, são caracterizados por médias respectivas de 2,581 ppm e 12,315 ppm (**Tabela 3.1**), coerentes com a média crustal para estes radioelementos.

A avaliação estatística dos dados gamaespectrométricos também foi realizada para os levantamentos aéreos Bandeirante, Rosa de Maio, Maués e 12 de Outubro, conforme mostrado na **tabela 3.2**. Com base nesta tabela, é possível constatar que principalmente os dados de K (%) e eU (ppm) compreendem aqueles que fogem dos parâmetros da média crustal do planeta (Respectivamente, 2-2,35% e 2,7-3 ppm), sobretudo considerando-se que as

áreas investigadas são compostas majoritariamente por granitos e rochas vulcânicas ácidas. Também se observam valores negativos nos canais de K, eU e eTh.

Tabela 3.1. Estatística dos dados dos canais gamaespectrométricos do levantamento aéreo Bloco 1- Província Aurífera do Tapajós.

Dados de radioelementos em cps				
Estatística	Canal do K	Canal do eU	Canal do eTh	Canal da contagem total
<i>Média</i>	14,989 cps	12,877 cps	45,441 cps	479,463 cps
<i>Desvio padrão</i>	14,656 cps	11,710 cps	28,015 cps	257,121 cps
<i>Máximo</i>	213,260 cps	293,140 cps	322,42 cps	4003,810 cps
<i>Mínimo</i>	0 cps	0 cps	0 cps	0 cps
Dados em concentração de radioelementos (Resultantes da transformação dos dados originais em cps)				
Estatística	Canal do K	Canal do eU	Canal do eTh	Canal da contagem total
<i>Média</i>	0,259 %	2,581 ppm	12,315 ppm	3,010 µR/h
<i>Desvio padrão</i>	0,254 %	2,347 ppm	7,592 ppm	1,614 µR/h
<i>Máximo</i>	3,690 %	58,750 ppm	87,38 ppm	25,130 µR/h
<i>Mínimo</i>	0 %	0 ppm	0 ppm	0 µR/h

Tabela 3.2. Estatística dos dados dos canais gamaespectrométricos dos levantamentos aéreos Bandeirante, Rosa de Maio, Maués e 12 de Outubro.

Aerolevantamento Bandeirante				
Estatística	Canal do K	Canal do eU	Canal do eTh	Canal da contagem total
<i>Média</i>	0.38 %	1.17 ppm	12.06 ppm	4.80 µR/h
<i>Desvio padrão</i>	0.20 %	0.46 ppm	2.03 ppm	0.72 µR/h
<i>Máximo</i>	1.91 %	3.13 ppm	18.83 ppm	7.12 µR/h
<i>Mínimo</i>	-0.19 %	-0.68 ppm	5.38 ppm	2.31 µR/h
Aerolevantamento Rosa de Maio				
Estatística	Canal do K	Canal do eU	Canal do eTh	Canal da contagem total
<i>Média</i>	0.32 %	1.09 ppm	13.19 ppm	4.98 µR/h
<i>Desvio padrão</i>	0.30 %	0.68 ppm	3.51 ppm	0.96 µR/h
<i>Máximo</i>	2.19 %	5.17 ppm	32.21 ppm	10.57 µR/h
<i>Mínimo</i>	-0.78 %	-1.24 ppm	0.39 ppm	0.58 µR/h
Aerolevantamento Maués				
Estatística	Canal do K	Canal do eU	Canal do eTh	Canal da contagem total
<i>Média</i>	0.71%	0.61 ppm	9.63 ppm	4.23 µR/h
<i>Desvio padrão</i>	0.36 %	0.41 ppm	1.89 ppm	0.60 µR/h
<i>Máximo</i>	1.70 %	2.89 ppm	17.57 ppm	7.01 µR/h
<i>Mínimo</i>	-0.23 %	-0.51 ppm	3.05 ppm	2.42 µR/h
Aerolevantamento 12 de Outubro				
Estatística	Canal do K	Canal do eU	Canal do eTh	Canal da contagem total
<i>Média</i>	0.65%	0.64 ppm	10.05 ppm	4.28 µR/h
<i>Desvio padrão</i>	0.39%	0.62 ppm	5.61 ppm	1.86µR/h
<i>Máximo</i>	2.68 %	4.10 ppm	40.11 ppm	13.34 µR/h
<i>Mínimo</i>	-0.45%	-1.55 ppm	-0.70 ppm	0.69 µR/h

A solução encontrada para a correção dos dados gamaespectrométricos compreendeu a somatória de constantes aos canais afetados, assegurando valores de medidas positivas e inclusas nos padrões crustais típicos. Desta forma, procedeu-se da seguinte maneira:

- *aerolevanteamento Bandeirante*: somatória das constantes 2,0%, e 1,5 ppm para os canais de K e eU. Os respectivos valores médios passaram para 2,38% e 2,67 ppm;
- *aerolevanteamento Rosa de Maio*: somatória das constantes 1,9%, e 1,6 ppm para os canais de K e eU. Os respectivos valores médios passaram para 2,22% e 2,69 ppm;
- *aerolevanteamento Maués*: somatória das constantes 1,5% e 1,9 ppm para os canais de K e eU. Os respectivos valores médios passaram para 2,21% e 2,51 ppm;
- *aerolevanteamento 12 de Outubro*: somatória das constantes 1,8%, 2,2 ppm e 0,8 ppm para os canais de K, eU e eTh. Os respectivos valores médios passaram para 2,45%, 2,84 ppm e 10,85 ppm.

Outra correção muito importante realizada compreendeu a averiguação dos espaçamentos de linhas de vôo e controle dos quatro aerolevanteamentos de detalhe, a fim de comparar com a descrição proveniente do relatório da Lasa Engenharia e Prospecções (2006a, b). Observou-se que, com exceção do aerolevanteamento Rosa de Maio, os demais são caracterizados por valores médios de espaçamentos distintos daqueles descritos nos relatórios acima citados, a saber (**Figura 3.3**):

- *aerolevanteamento Bandeirante*: espaçamento das linhas de vôo de 400 m, e de 200 m na porção central; espaçamento das linhas de controle de cerca de 4000 m;
- *aerolevanteamento Maués*: espaçamento das linhas de vôo de 400 m; espaçamento das linhas de controle de cerca de 4500 m;
- *aerolevanteamento 12 de Outubro*: o espaçamento das linhas de vôo é muito variável, indo de 400 m, 200 m e em torno de 100 m (porção central); espaçamento das linhas de controle de cerca de 2300 m.

Os novos valores obtidos acerca dos espaçamentos das linhas de produção e de controle foram utilizados para a etapa de micronivelamento dos dados gamaespectrométricos e magnetométricos.

3.3.4.2. Magnetometria

Da mesma forma que realizado aos dados aerogamaespectrométricos, Silva (2003) fez a avaliação dos dados magnetométricos do Bloco 1 – Província Aurífera do Tapajós. Foram realizados testes de consistência dos dados, seguindo-se da metodologia utilizada por Blum

(1999), como análise das linhas de vôo, cálculo do parâmetro P e da diferença quarta, removendo-se dados espúrios. A fim de otimizar o tempo, o banco de dados magnetométricos regionais de Silva (2003) foi aqui utilizado.

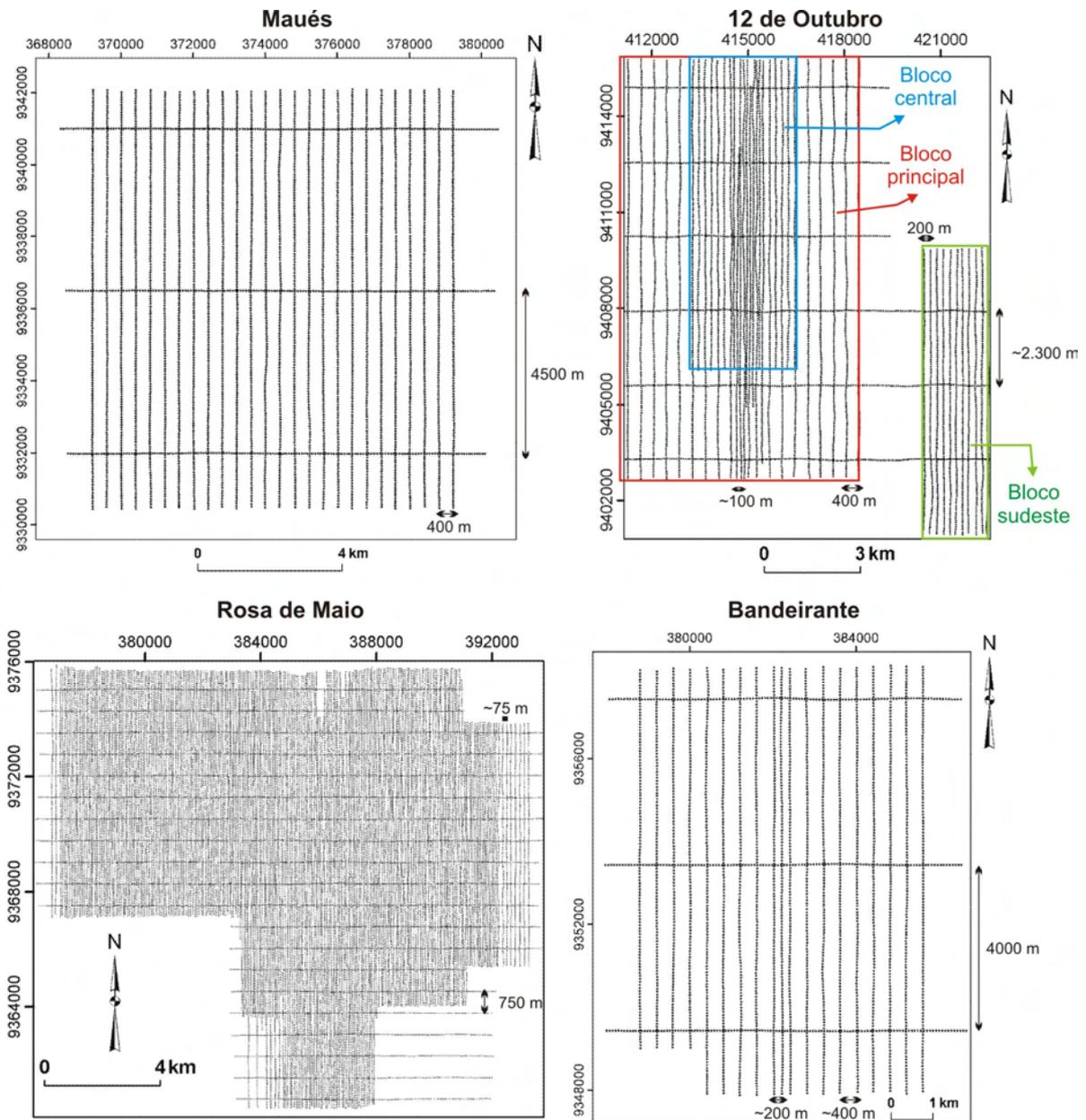


Figura 3.3. Mapas da disposição das linhas de vôo e de controle dos aerolevantamentos Maués, 12 de Outubro, Rosa de Maio e Bandeirante, e indicação das distâncias médias entre as mesmas. Para o levantamento 12 de Outubro, estão indicadas as áreas referentes aos três *grids* gerados devido à grande variação de espaçamento de linhas de vôo.

Os dados magnetométricos gradiométricos dos levantamentos Bandeirante, Rosa de Maio, Maués e 12 de Outubro foram analisados similarmente aos dados regionais da CPRM processados por Silva (2003).

O primeiro passo do tratamento de dados magnetométricos gradiométricos

compreendeu a averiguação do padrão das linhas de vôo, que não apresentou problemas de sobreposição.

Os valores do IGRF (calculados a cada aerolevanteamento magnetométrico gradiométrico) foram subtraídos dos dados de campo magnético total adquiridos, resultando no campo magnético anômalo. Em seguida, procedeu-se à averiguação de perfis rebatidos do campo magnético anômalo e à análise de possíveis inconsistências, como valores altamente anômalos, por meio do cálculo da diferença quarta e parâmetro P. Neste sentido, nenhuma inconsistência não justificável foi observada (**Figura 3.4**).

A diferença quarta compreende um método que substitui o valor do campo magnético anômalo de um ponto de uma linha de vôo pela diferença entre o segundo ponto anterior e o segundo ponto posterior ao ponto mencionado. Este procedimento é adotado de forma a revelar se um pico anômalo possui um correspondente que o justifique nas vizinhanças (Blum 1999).

O parâmetro P corresponde a uma técnica que permite restringir anomalias de forma a realçar apenas os picos. Estes picos estão fora do intervalo de ± 3 vezes o desvio padrão. Sabendo-se que o logaritmo de um número negativo não é real, a equação do parâmetro P foi designada da seguinte maneira (Blum 1999) (**Eq. 3.1**):

$$P = \log (| x - x_m | - | 3 * \sigma |), \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde P é o pico anômalo, x é o dado pontual do campo magnético anômalo medido, x_m é a média, σ é o desvio padrão.

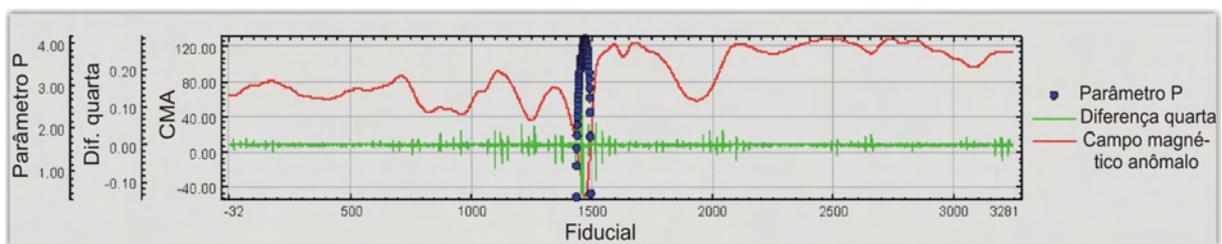


Figura 3.4. Exemplo da aplicação do parâmetro P e da diferença quarta, observando-se ausência de dados ruidosos (Linha de vôo L10130 do aerolevanteamento Maués).

3.3.5. MICRONIVELAMENTO DE DADOS GEOFÍSICOS AÉREOS E GERAÇÃO DOS GRIDS

Apesar das linhas de controle servirem ao nivelamento dos dados aerogeofísicos, torna-se importante o micronivelamento. O termo micronivelamento refere-se à remoção de qualquer erro residual aparente em dados aerogeofísicos depois do processo de padronização e da aplicação de técnicas de nivelamento mais rigorosas. Estes ajustes do micronivelamento

são necessários para a remoção de erros que se tornam muito visíveis em *grids*, principalmente com a aplicação de técnicas de realce (Luyendyk 1997), destacando-se tendências, na maioria das vezes, associadas à direção das linhas de vôo.

Para dados do Bloco 1 – Província Aurífera do Tapajós, Silva (2003) empregou o micronivelamento de Minty (1991) (descrito abaixo) a partir do algoritmo criado por Blum (1999), e aplicando-se o interpolador curvatura mínima para geração das imagens dos canais de K, eTh, eU, contagem total, e do campo magnético anômalo. Estas imagens são caracterizadas por tamanho de célula de 250 m.

Para dados dos levantamentos Bandeirante, Rosa de Maio, Maués e 12 de Outubro, inicialmente testes de interpolação foram realizados a partir da curvatura mínima e do método bi-direcional, de forma a criar uma malha regular para dados dos canais radiométricos, do campo magnético anômalo, e dos gradientes horizontais medidos Gx e Gy. Qualitativamente, observou-se que, para dados magnetométricos gradiométricos, o método bi-direcional (*spline* Akima) aparentou melhores resultados, pois ruídos na direção das linhas de vôo foram mais atenuados em relação ao resultado produzido pelo método curvatura mínima. Já para os dados gamaespectrométricos, a curvatura mínima foi selecionada.

Esses dois métodos interpoladores são caracterizados da seguinte maneira:

- a curvatura mínima produz uma superfície similar a uma placa fina e linearmente elástica a fim de passar pelos pontos de valores amostrados, utilizando-se a menor flexão possível (Briggs 1974). O resultado é gerado de maneira rápida e é caracterizado por suavização;
- o interpolador bi-direcional, ou de *splines* bi-cúbicos, permite o realce de tendências perpendiculares à orientação das linhas do aerolevante. Inicialmente, cada linha é interpolada ao longo da linha original do levantamento, seguindo-se da interpolação perpendicular. Os *splines* mais utilizados consistem no *spline* cúbico e de Akima.

Juntamente com a aplicação do interpolador, é necessária a escolha do tamanho da célula do *grid*. Vasconcellos *et al.* (1994) recomendam o uso de tamanhos de células entre 1/4 e 1/8 do espaçamento das linhas de vôo, para a manutenção da integridade dos dados originais, evitando-se *aliasing*. Foram empregados tamanhos de células de 1/4 e 1/5 do valor médio do espaçamento de linhas de vôo (*cf.*, **Tabela 3.3**).

O passo seguinte correspondeu à efetivação do micronivelamento dos dados, seguindo-se a metodologia proposta por Minty (1991):

(a) interpolação dos dados (do campo magnético anômalo, ou Gx, ou Gy, ou canais radiométricos), produzindo-se a malha A;

(b) uso de filtro passa-alta na malha A, na direção perpendicular à linha de vôo, resultando na malha B (comprimento de onda de corte de pelo menos duas vezes o valor do espaçamento das linhas de vôo);

(c) uso de filtro passa-baixa na malha B, aplicado na direção paralela às linhas de vôo, resultando na malha C (comprimento de onda de corte com no mínimo o valor do espaçamento das linhas de controle);

(d) malha C é subtraída da malha A, gerando-se a malha final micronivelada.

Ressalta-se que testes empíricos referentes à determinação de valores de comprimento de onda de corte foram realizados para a obtenção dos melhores resultados micronivelados. Quando necessário, filtro de convolução (*hanning*) com janela 3x3 foi utilizado nos *grids* gerados.

A **tabela 3.3** sintetiza a escolha do interpolador, tamanho de célula, e comprimentos de onda de corte referentes à aplicação dos filtros passa-alta e passa-baixa de acordo com a metodologia de Minty (1991) para dados dos levantamentos magnetométricos gradiométricos e gamaespectrométricos Bandeirante, Rosa de Maio, Maués e 12 de Outubro.

Tabela 3.3. Parâmetros para interpolação e micronivelamento de dados magnetométricos gradiométricos e gamaespectrométricos.

Aerolevantamento Bandeirante				
Dado	Interpolador	Tamanho da célula	Compr. onda (filtro passa-alta)	Compr. onda (filtro passa-baixa)
<i>Magnetometria gradiométrica</i>	Bi-direcional	80 m	10 m	50 m
<i>Gamaespectrometria</i>	Curvatura mínima (5000 iterações)	80 m	10 m	50 m
Aerolevantamento Rosa de Maio				
Dado	Interpolador	Tamanho da célula	Compr. onda (filtro passa-alta)	Compr. onda (filtro passa-baixa)
<i>Magnetometria gradiométrica</i>	Bi-direcional	15 m	10 m	50 m
<i>Gamaespectrometria</i>	Curvatura mínima (5000 iterações)	15 m	10 m	50 m
Aerolevantamento Maués				
Dado	Interpolador	Tamanho da célula	Compr. onda (filtro passa-alta)	Compr. onda (filtro passa-baixa)
<i>Magnetometria Gradiométrica</i>	Bi-direcional	100 m	8 m	45 m
<i>Gamaespectrometria</i>	Curvatura mínima (5000 iterações)	100 m	8 m	45 m

Aerolevantamento 12 de Outubro				
Dado	Interpolador	Tamanho da célula	Compr. onda (filtro passa-alta)	Compr. onda (filtro passa-baixa)
<i>Magnetometria gradiométrica</i>	Bi-direcional (Bloco central)	25 m	16 m	92 m
	Bi-direcional (Bloco principal)	100 m	8 m	23 m
	Bi-direcional (Bloco sudeste)	50 m	8 m	46 m
<i>Gamaespectrometria</i>	Curvatura mínima (5000 iterações) (Bloco central)	25 m	16 m	92 m
	Curvatura mínima (5000 iterações) (Bloco principal)	100 m	8 m	23 m
	Curvatura mínima (5000 iterações) (Bloco sudeste)	50 m	8 m	46 m

No caso do aerolevantamento 12 de Outubro, por ter distintos espaçamentos de linhas de vôo (**Figura 3.3**), optou-se por criar três *grids*, a partir do tratamento do bloco sudeste (espaçamento de linhas de vôo de 200 m), do bloco central (marcado por linhas de vôo espaçadas em cerca de 100 m) e o bloco principal, considerando-se somente linhas de vôo espaçadas em 400 m (**Figura 3.3**).

3.4. Dados altimétricos

Imagens altimétricas adquiridas no ano 2000, por meio do ônibus espacial *Endeavour*, foram selecionadas. Consistem nos dados do modelo digital de terreno do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), derivados da técnica de interferometria de radar e caracterizados por resolução espacial aproximada de 90 metros (Rabus *et al.* 2003). Utilizando a interferometria, duas imagens de radar foram adquiridas ao mesmo tempo: uma pela antena instalada no compartimento de carga do ônibus espacial e outra pela antena suspensa, por meio de um mastro a uma distância de 60 metros da espaçonave. As imagens coletadas são caracterizadas pelo formato de números complexos a fim de extrair informações da fase. A diferença de fase entre as imagens é empregada para o cálculo da diferença da distância de um mesmo pixel entre as imagens, que, por sua vez, é a base para a obtenção da altura do pixel.

Essa missão topográfica por radar interferométrico adquiriu dados topográficos de

80% das terras emersas do planeta em 11 dias de operação, e foi patrocinada pela NASA, USGS, Departamento de Defesa dos Estados Unidos, e pelas Agências Espaciais da Alemanha e da Itália (Rabus *et al.* 2003).

3.4.1. PRÉ-PROCESSAMENTO DE IMAGENS SRTM

As imagens SRTM selecionadas na região da PMT foram corrigidas por meio da utilização de carta topográfica (1:250.000), de forma a diminuir o erro causado por deslocamento da plataforma orbital, e assegurar maior precisão na integração destes dados com outros selecionados na dissertação. Realizou-se a correção geométrica, resultando em 89 pontos de controle e um erro quadrático médio de 4,17 m.

3.5. Dados geoquímicos

Dados geoquímicos disponíveis e referentes à concentração de ouro compreendem aqueles cedidos pela empresa Mapex Mineração, Importação e Exportação Ltda. para as áreas dos prospectos Maués (594 e 11 amostragens para ouro em solo e rocha, respectivamente), Rosa de Maio (560 e 7323 amostragens, respectivamente, para ouro em rocha e solo), 12 de Outubro (274 e 739 amostragens para ouro em rocha e solo, respectivamente), e Bandeirante (40 amostragens para ouro em rocha).

Análises para ouro em solo foram realizadas pelo método *Fire Assay* (fusão e copelação), sendo que 34 amostras da principal zona anômala da região do prospecto Rosa de Maio foram analisadas por ICP-MS para 34 elementos. Estas análises foram realizadas, respectivamente, pela Lakefield Geosol e ALS Chemex.

Dados geoquímicos de rocha foram obtidos a partir de análises no Laboratório ACME – Analítica Laboratórios Ltda., Canadá. As análises foram realizadas segundo as rotinas 4a e 4b. Nestas rotinas, os elementos maiores são analisados por ICP-AES, S e C em forno Leco, e os elementos terras raras, refratários, metais preciosos e metais base no ICP-MS. Os elementos maiores, terras raras e refratários são anteriormente fundidos por metaborato e tetraborato de Li e digeridos em ácido nítrico. Os metais preciosos e metais base são digeridos com água régia.

A estatística dos dados geoquímicos de ouro para cada prospecto pode ser observada na **tabela 3.4**.

Tabela 3.4. Estatística de dados geoquímicos disponíveis para as áreas dos prospectos Bandeirante, Rosa de Maio, 12 de Outubro e Maués.

Dados geoquímicos	Máximo	Mínimo	Média	Desvio padrão
<i>Ouro em rocha (Bandeirante)</i>	130,45 ppm	0 ppm	10,50 ppm	28,16 ppm
<i>Ouro em solo (Rosa de Maio)</i>	680 ppb	2,5 ppb	18,72 ppb	32,76 ppb
<i>Ouro em rocha (Rosa de Maio)</i>	92,95 ppm	0 ppm	2,28 ppm	9,25 ppm
<i>Ouro em rocha (12 de Outubro)</i>	168,54 ppm	0 ppm	2,90 ppm	15,49 ppm
<i>Ouro em solo (12 de Outubro)</i>	270 ppb	2,5 ppb	8,20 ppb	22,79 ppb
<i>Ouro em solo (Maués)</i>	342 ppb	2,5 ppb	15,27 ppb	27,69 ppb
<i>Ouro em rocha (Maués)</i>	133,38 ppm	0,43 ppm	13,40 ppm	39,80 ppm

CAPÍTULO IV. CARACTERIZAÇÃO DOS PROSPECTOS 12 DE OUTUBRO, ROSA DE MAIO, BANDEIRANTE E MAUÉS

Imagem SAR-R99B (Lhh) da região dos prospectos 12 de Outubro e São Félix

4. APRESENTAÇÃO

Este capítulo apresenta os principais resultados e discussões acerca do processamento, interpretação, integração e análises espaciais dos dados referentes aos prospectos 12 de Outubro, Rosa de Maio, Bandeirante e Maués.

O *Apêndice 1* apresenta a fundamentação teórica dos métodos de processamento adotados em cada estudo de caso.

4.1. Prospecto 12 de Outubro

4.1.1. PROCESSAMENTOS E ANÁLISES DOS DADOS MULTIFONTE

A região do prospecto 12 de Outubro está inserida na porção noroeste da PMT e, regionalmente, é afetada por estruturas de direção NE-SW (**Figura 4.1 (a, b)**), além de estar inclusa no domínio de rochas vulcânicas ácidas paleoproterozóicas do Grupo Iriri e de vulcânicas intermediárias da Formação Bom Jardim (Klein *et al.* 2001a) (**Figura 4.1 (c)**).

As áreas mineralizadas da região do prospecto 12 de Outubro são caracterizadas por intensa silicificação das rochas vulcânicas ácidas, como riolitos e riodacitos, assumidos como pertencentes ao Grupo Iriri. Neste contexto, foram identificadas brechas hidrotermais e zonas de *stockworks*, marcadas por vênulas de quartzo centimétricas, nas quais é possível observar a sulfetação com predomínio de pirita, estas com tamanho em torno de 1 a 2 mm (**Figura 4.2**).

A cava principal é denominada de *Main Breccia Pit* (e.g., **Figura 4.2**) e explorada pela empresa Mapex Mineração, Importação e Exportação Ltda., possuindo direção NE-SW, a mesma direção preferencial dos *stockworks*, em torno de N66E.

Na região do *Sulphide Pit*, há ocorrências de riolitos brechados intensamente silicificados e marcados por presença de piritas cúbicas centimétricas. Neste local, foram registrados altos teores de ouro obtidos por garimpeiros a partir do desmonte de rochas.

Medidas gamaespectrométricas obtidas por meio do gamaespectrômetro portátil da SCINTREX permitiram comparar as respostas radiométricas de rochas mineralizadas, não mineralizadas, além de produtos intempéricos que são os predominantes nesta região da Amazônia. A **figura 4.3** apresenta um gráfico da relação das medidas pontuais de K, eTh e eU, e outro que compara, a cada material geológico medido, os valores da contagem total, K,

eTh e eU.

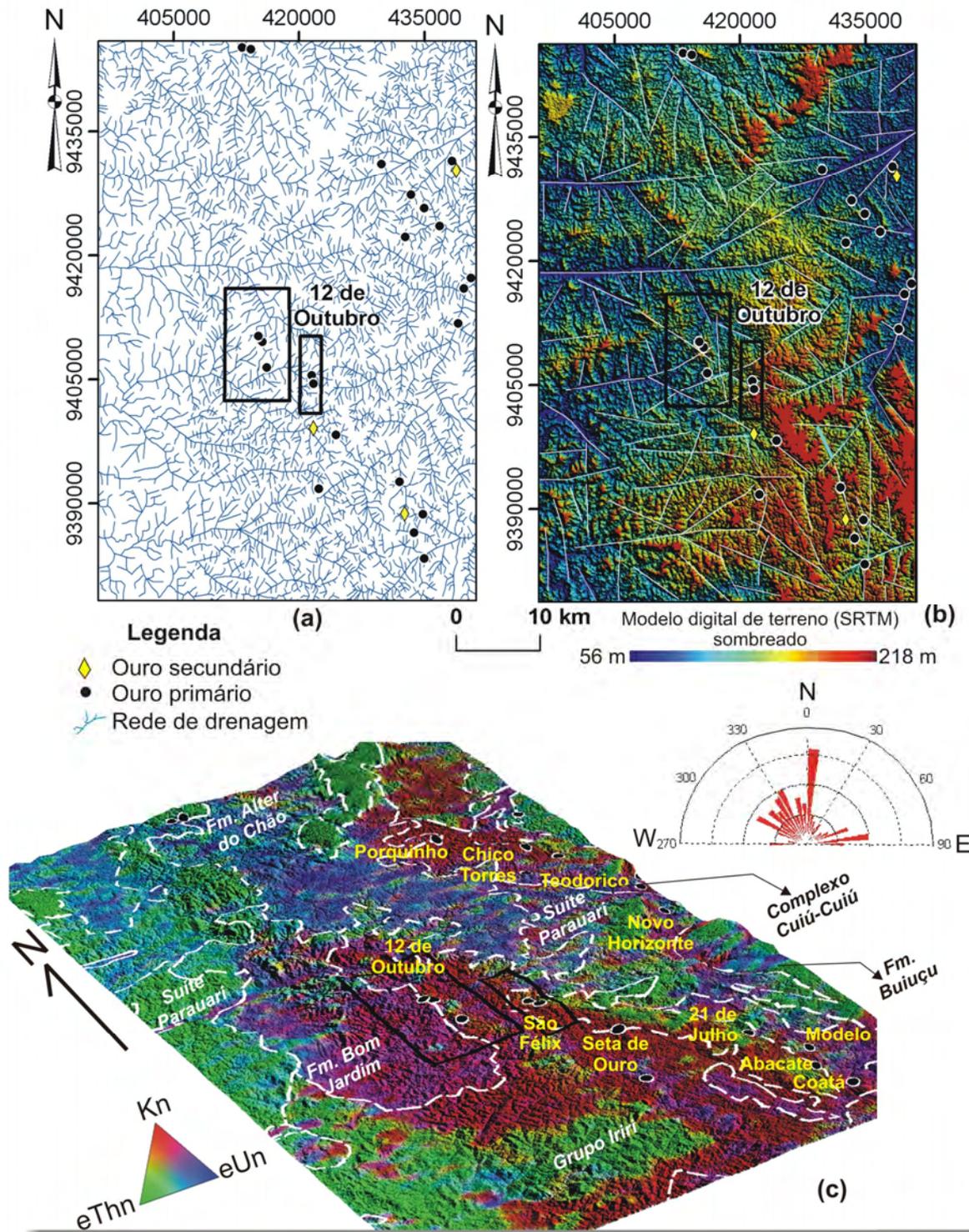


Figura 4.1. Localização da região do prospecto 12 de Outubro mostrada no retângulo preto. Observa-se o predomínio de drenagens com estruturação NE-SW (a), bem como principais lineamentos sobrepostos ao modelo digital de terreno (SRTM) (b). A partir da imagem ternária de Kn, eThn e eUn integrada com o SAR-R99B (Lhh), verifica-se a inserção da área em apreço no domínio do Grupo Iriri e Formação Bom Jardim (c).

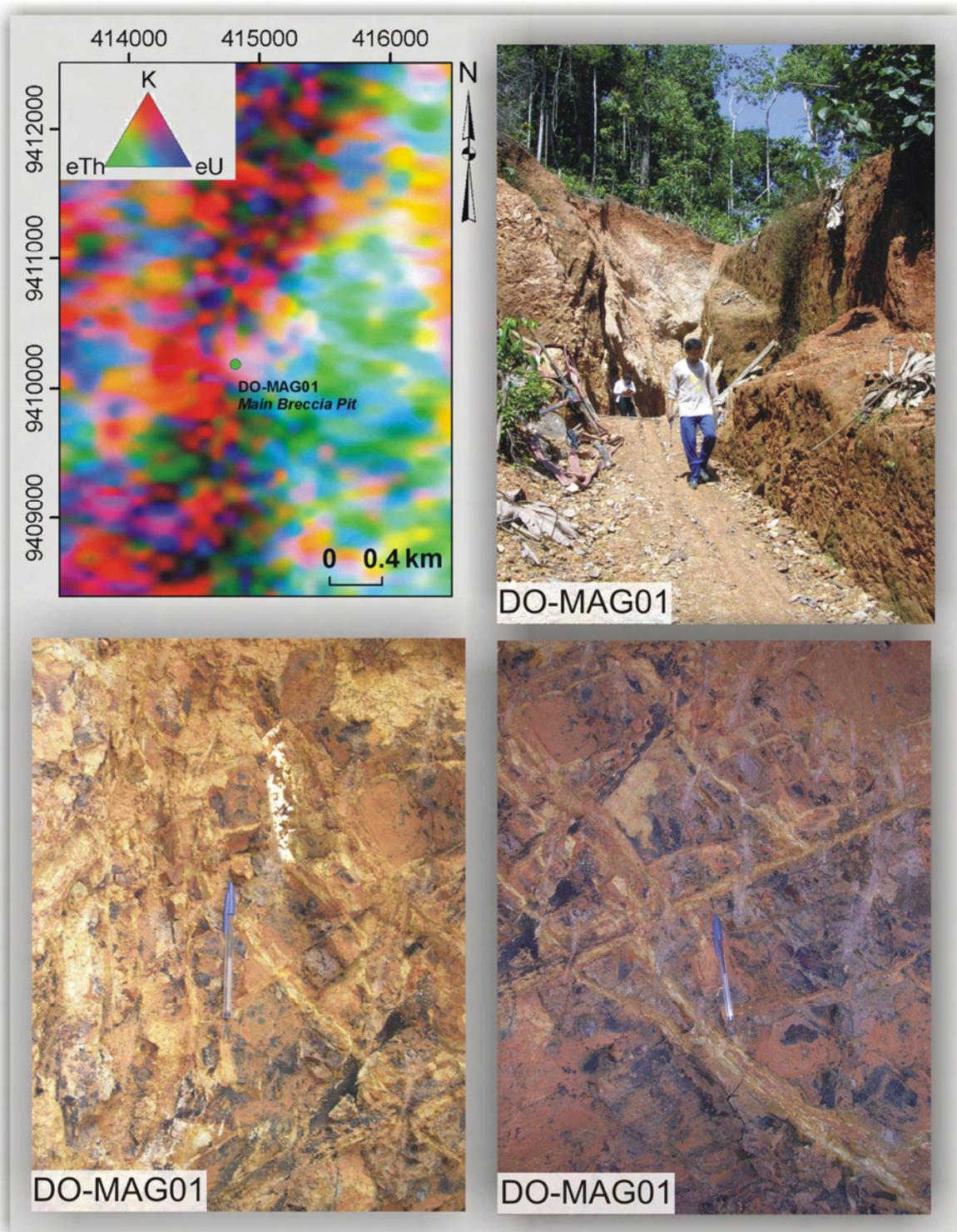


Figura 4.2. Localização do open pit *Main Breccia* na imagem ternária (RGB) de K, eTh e eU, e observação de riolitos brechados, marcados por intensa silicificação e pela presença de *stockworks*, conforme verificado em fotos (Ponto DO-MAG01).

A partir desses gráficos é possível verificar que o intemperismo químico, que propicia a formação de espessas coberturas de solos, atua de forma a atenuar as medidas dos radioelementos, sobretudo de K e U que possuem maior mobilidade frente a estas condições

ambientais (cf., Dickon & Scott 1997). A queda dos radioelementos é muito pronunciada, mas não compreende as menores medidas obtidas, como verificado com blocos de gabro (Ponto DO-MAG11) (Figura 4.3). Para fins comparativos, medidas de solos como o do ponto DO-MAG16 caracterizam-se por contagens de 5 cps no canal do K, 4 cps no canal do eU, 12 cps no canal do eTh e 90 cps no canal da contagem total, enquanto as medidas da radiação gama provenientes do gabro (DO-MAG11) compreendem 4 cps no canal do K, 3 cps no canal do eU, 1.5 cps no canal do eTh e 45 cps no canal da contagem total.

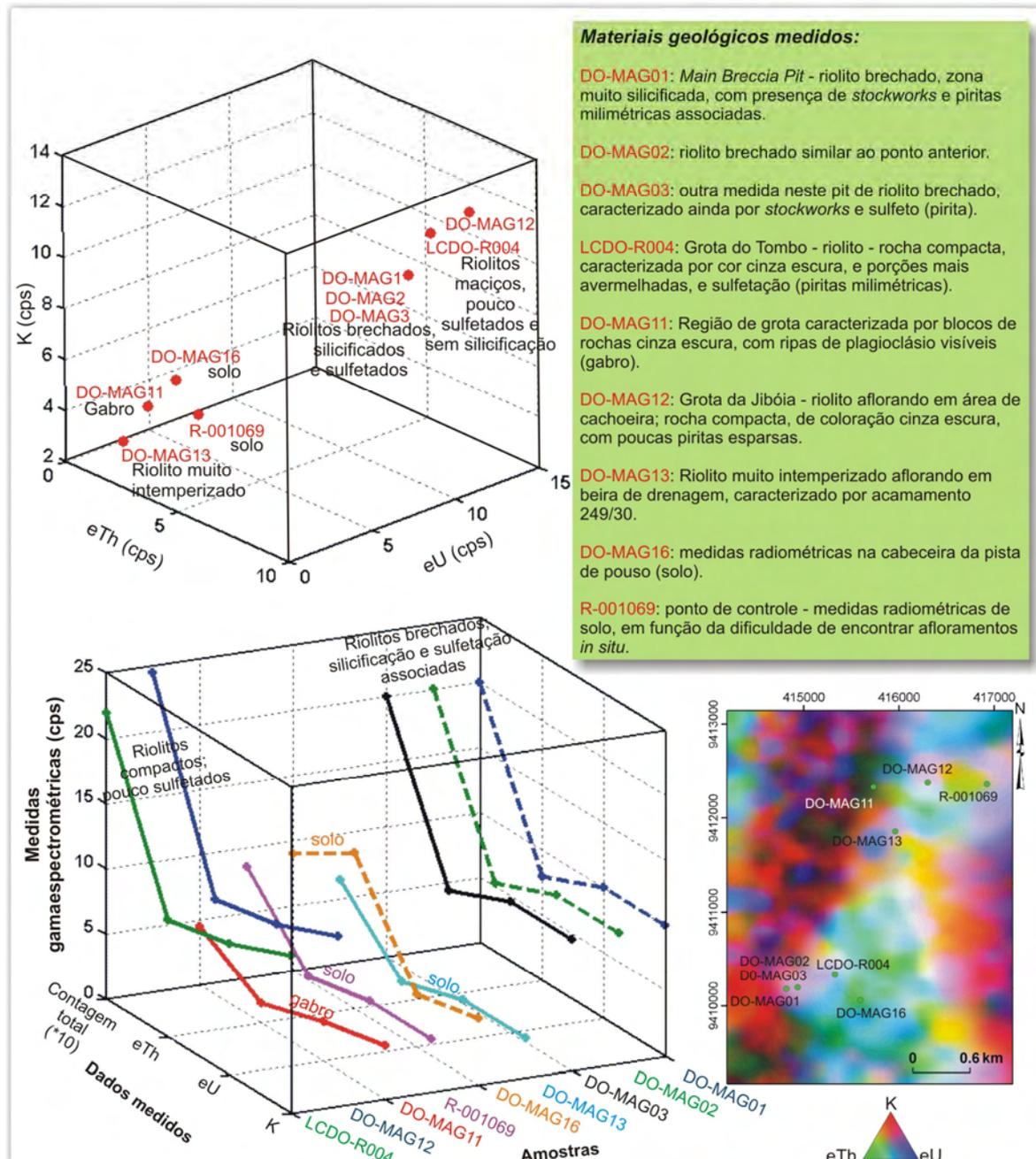


Figura 4.3. Gráficos referentes a medidas gamaespectrométricas de materiais geológicos no prospecto 12 de Outubro. A descrição das amostras medidas é apresentada em quadro adjacente, assim como a localização das medidas efetuadas.

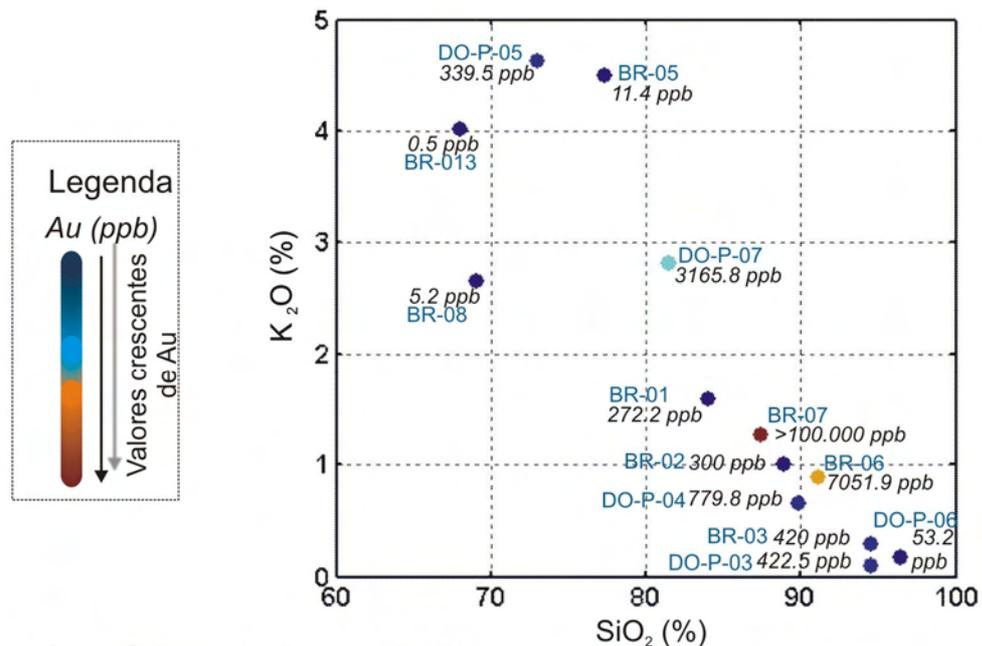
A silicificação compreende o principal tipo de alteração hidrotermal, conforme observado na principal área mineralizada denominada de *Main Breccia Pit* (cf., **Figura 4.2**). As medidas radiométricas, obtidas com o gamaespectrômetro portátil em afloramentos dominados por tal alteração hidrotermal, e designadas pelas siglas DO-MAG01, DO-MAG02 e DO-MAG03, são marcadas por uma queda sutil nos canais de K, eTh, eU e da contagem total, se comparadas às medidas pontuais de riolitos pouco sulfetados e sem silicificação (LCDO-R004 e DO-MAG12) (**Figura 4.3**). Esta queda pequena das medidas é condizente com observações de Dickson & Scott (1997) para quando há o domínio da silicificação e ausência de alteração potássica. Quantitativamente, os valores de medidas gamaespectrométrica da região silicificada (*Main Breccia Pit*) compreendem as seguintes: 10 cps no canal do K, 10 cps no canal do eU, 8 cps no canal do eTh e 200 cps no canal da contagem total. Já os riolitos sem esta alteração hidrotermal são caracterizados, quantitativamente, por 13 cps no canal do K, 11 cps no canal do eU, 10 cps no canal do eTh e 245 cps no canal da contagem total (e.g., ponto DO-MAG12) (**Figura 4.3**).

Os dados geoquímicos de rochas mineralizadas no prospecto 12 de Outubro também mostram uma queda de K, Th e U, quando há aumento da concentração de SiO₂ que, por sua vez, também está relacionada com maiores valores de ouro (**Figura 4.4**). Esta assertiva pode ser observada no gráfico da **figura 4.4** onde o teor de ouro aumenta quando em zonas de intensa silicificação, concomitante com uma queda na concentração de K₂O (Botelho *et al.* 2009, Pinto *et al.* 2009).

Em função da disponibilidade de dados de geoquímica de solo na principal região mineralizada do prospecto 12 de Outubro (*Main Breccia Pit*, *Sulphide Pit*, *New Breccia Pit*, Grotta do Tombo, Grotta do Limão e *Shaft Pit*), tais dados foram processados por meio da simulação indicatriz seqüencial (SIS). As vantagens da aplicação da SIS frente a métodos como as krigagens, por exemplo, abrangem o fato de estas últimas gerarem estimativas pontuais, ou seja, independentemente das estimativas vizinhas, compreendendo a melhor estimativa local associada a um variância de erro mínima possível (Goovaerts 1997). Por outro lado, as simulações estocásticas representam técnicas mais eficientes, pois se valem da geração de L realizações $z^{(l)}(\mathbf{u})$, $l=1, \dots, L$ para células \mathbf{u} (Goovaerts 1997).

As simulações estocásticas foram idealizadas para a reprodução da variabilidade da variável regionalizada em estudo de maneira probabilística. A medida da incerteza espacial dos valores amostrados é feita de forma conjunta e não individual como na krigagem (Goovaerts 1997). O objetivo da aplicação destas simulações compreende a reprodução da

textura geológica (características globais) a partir da produção de modelos ilimitados (L realizações), onde cada um é uma representação da realidade, fato que permite obter a incerteza de forma mais realística acerca das heterogeneidades da variável. Desta maneira, não se produz o cenário mais provável dos valores de uma variável regionalizada, mas sim imagens equiprováveis com mesma média, histograma e variabilidade espacial dos valores experimentais (Goovaerts 1997).



Geoquímica de rocha: relação do conteúdo de K₂O, Th, U, SiO₂ e Au

Amostra	Garimpo	SiO ₂ (%)	K ₂ O (%)	Th (ppm)	U (ppm)	Au (ppb)
DO-P-06	Grota do limão	96.45	0.17	0.9	0.1	53.2
DO-P-03	Grota do limão	94.56	0.1	0.7	0.2	422.5
BR-03	Main breccia pit	94.53	0.28	1.2	0.2	420
BR-06	Main breccia pit	91.17	0.89	3.5	0.6	7051.9
DO-P-04	Grota do limão	89.85	0.65	3.9	0.7	779.8
BR-02	Main breccia pit	88.9	1	5	0.9	300
BR-07	Main breccia pit	87.48	1.26	6	1.1	>100000.0
BR-01	Main breccia pit	84	1.59	7.7	1.6	272.2
DO-P-07	Grota do limão	81.51	2.81	13.5	2.7	3165.8
BR-05	Sulfide pit	77.3	4.49	14.2	3	11.4
DO-P-05	Grota do limão	72.98	4.63	17.4	2.7	339.5
BR-08	Main breccia pit	69.07	2.65	21.3	4.7	5.2
BR-013	Grota do tombo	68.02	4.02	11.5	4.5	<0.5

Figura 4.4. Dados geoquímicos de rochas mineralizadas do prospecto 12 de Outubro, e gráfico de K₂O por SiO₂ reproduzido de Botelho *et al.* (2009) e Pinto *et al.* (2009). À medida que ocorre um aumento de sílica nas zonas mineralizadas, ocorre um decréscimo dos elementos K₂O, Th e U.

Dentre os grupos de simulações destacam-se as sequenciais que, em suma, baseiam-se na extensão do condicionamento a toda a informação existente na vizinhança do ponto a simular e que é fornecida tanto pelos valores amostrados da variável quanto pelos valores simulados anteriormente. O princípio sequencial é utilizado para simular variáveis categóricas

(simulação indicatriz sequencial) ou contínuas (simulação gaussiana sequencial) (Goovaerts 1997).

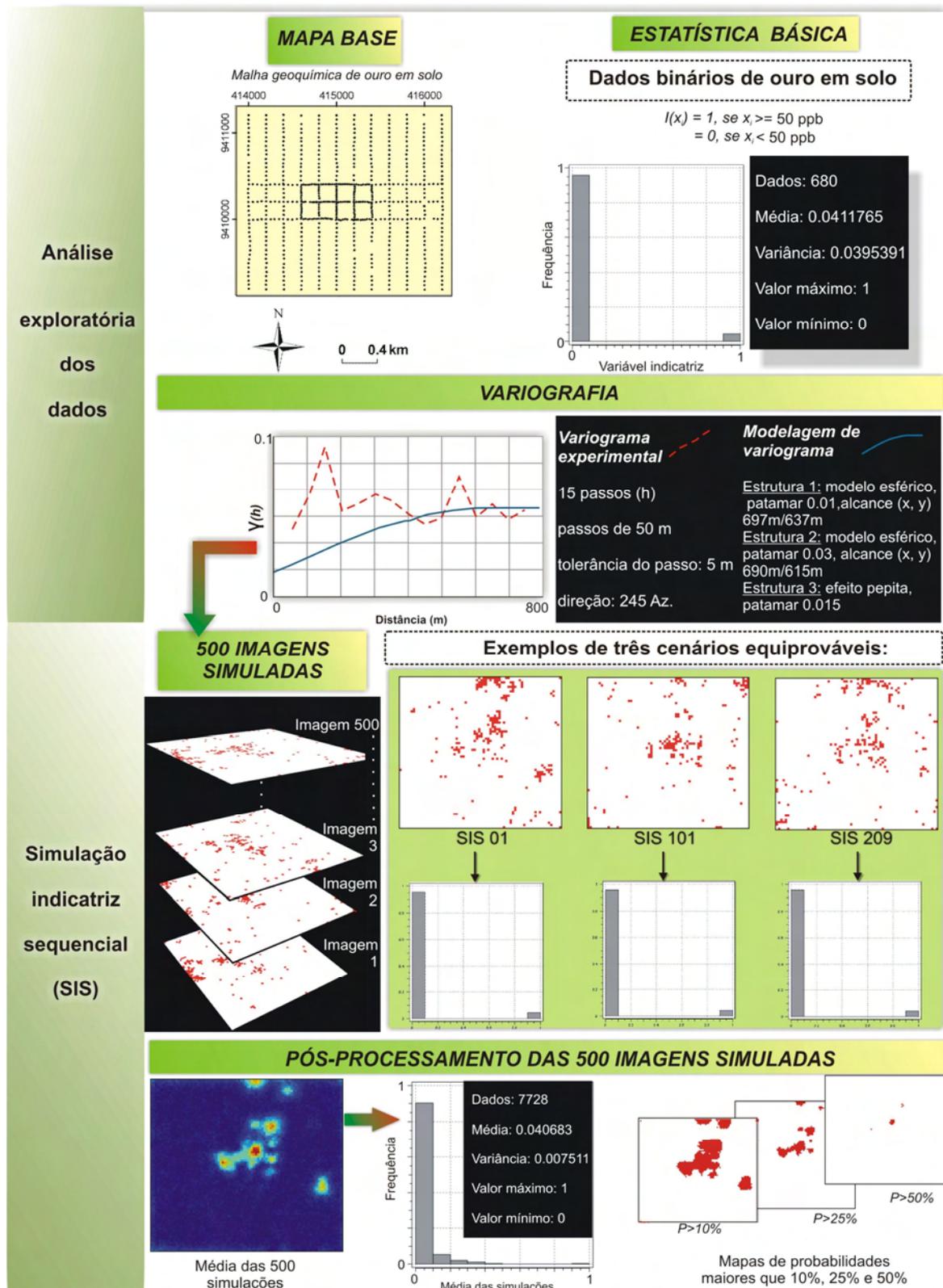


Figura 4.5. Aplicação da simulação indicatriz sequencial aos dados amostrados de ouro em solo e indicação dos principais parâmetros utilizados.

A malha geoquímica do prospecto 12 de Outubro é caracterizada por uma amostragem N-S aproximadamente a cada 50 m, sendo na parte central reduzida a cerca de 25 m. A amostragem E-W foi realizada a cada 200 m em geral, e na porção central, variável entre 50 m e 25 m. Para a geração dos *grids*, optou-se, portanto, pelo emprego de células de 25 m.

A SIS foi aplicada aos 680 pontos amostrados que foram anteriormente transformados em variáveis binárias do tipo 0 e 1 a partir da determinação do corte de 50 ppb. Desta forma, valores iguais ou acima de 50 ppb foram transformados em 1 e àqueles abaixo deste corte foi atribuído o valor 0 (**Figura 4.5**). Com este novo conjunto de dados, verificou-se a estatística básica, como a média (0,041) e a variância (0,0395). O variograma experimental foi produzido com base na direção de maior variabilidade (245 Az.). A modelagem do variograma experimental envolveu a seleção de duas estruturas baseadas no modelo esférico, além do emprego do efeito pepita. Os detalhes dos parâmetros utilizados estão apresentados na **figura 4.5**.

No presente estudo, 500 imagens foram geradas, todas caracterizadas por estatística básica a mais próxima possível dos dados amostrais sendo, porém, visualmente diferenciadas. Exemplos podem ser vistos na **figura 4.5** a partir de três cenários equiprováveis designados como SIS01, SIS101 e SIS209. O resultado que deve ser interpretado por meio do emprego da simulação indicatriz seqüencial compreende aquele derivado de um pós-processamento, como a média das n imagens simuladas geradas e cortes de probabilidades. Estes dois tipos de resultados foram produzidos, conforme mostrado na **figura 4.5**.

Analisando a imagem da média das 500 imagens simuladas, nota-se que esta se caracteriza por manter as heterogeneidades dos dados amostrais, ao invés das grandes regiões anômalas de ouro com o formato semi-circular típico que as krigagens geram. A análise estatística da imagem da média das 500 simulações evidencia uma diminuição da variância (0,0075) e a manutenção do valor mais anômalo como sendo 1, honrando os dados amostrais. Desta forma, a imagem da média das simulações indica a variação entre 0% e 100% da probabilidade de ocorrência de anomalias de ouro maiores que 50 ppb.

Cortes de probabilidades maiores que 10%, 25% e 50% também foram realizados a partir da imagem da média das 500 simulações, objetivando a averiguação de áreas mais anômalas (**Figura 4.5**).

Com relação aos dados gamaespectrométricos e magnetométricos, estes foram inicialmente analisados nos perfis de linhas de vôo, especificadamente, as linhas L30102 e L30106, pois estas são compatíveis com as amostragens N-S da geoquímica de ouro em solo

(Figura 4.6). As amostragens da geoquímica foram realizadas entre 50 e 25 m, enquanto as amostragens de dados magnetométricos e gamaespectrométricos equivaleram, respectivamente, a aproximadamente 4 m e 55 m.

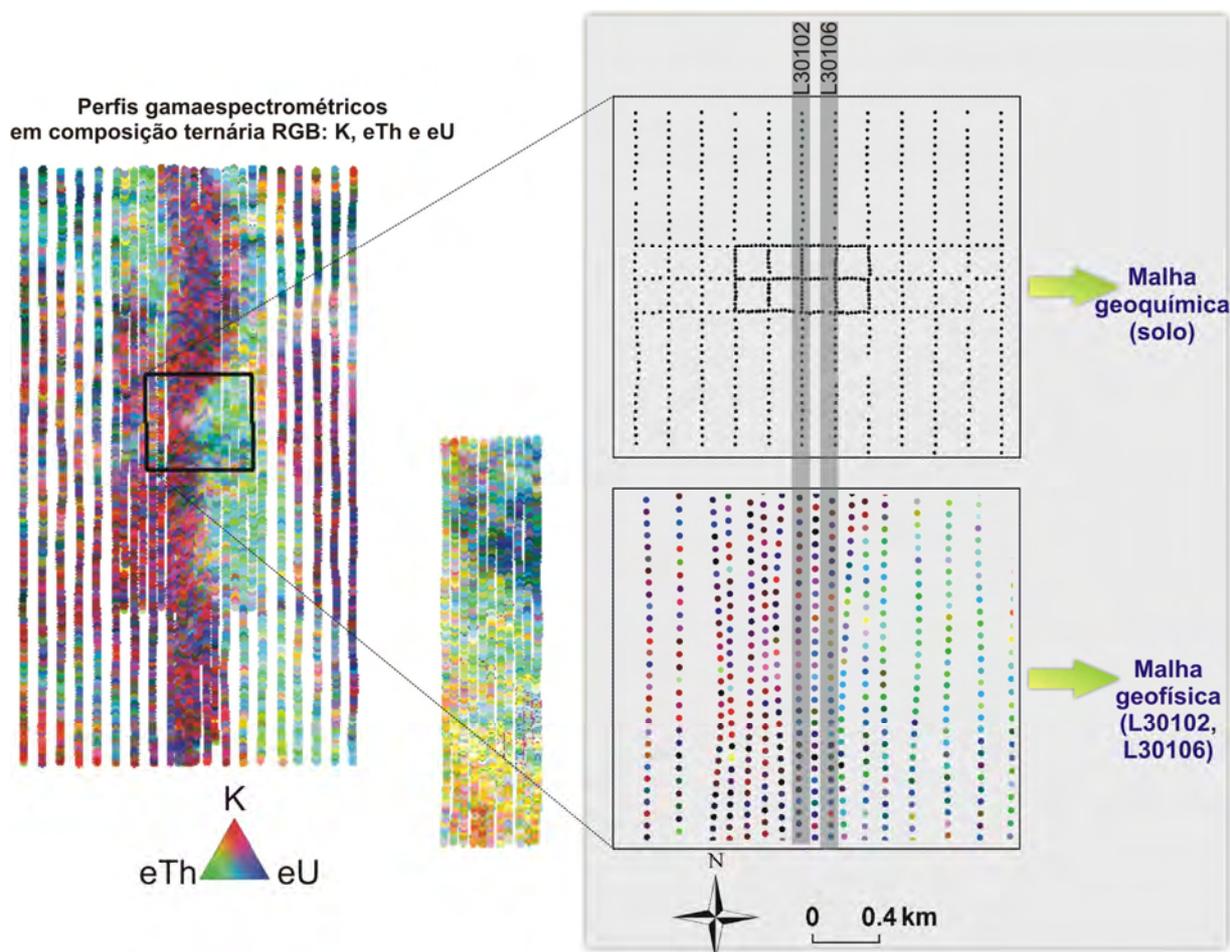


Figura 4.6. Perfis gamaespectrométricos em composição colorida RGB e indicação da principal área aurífera delimitada por retângulo preto. As linhas de vôo selecionadas para análise (L30102, L30106), juntamente com respectivas linhas de amostragem geoquímica para ouro em solo, estão apresentadas.

As **figuras 4.7 e 4.8** mostram os perfis geoquímicos da amostragem de ouro em solo, de K, eTh, eU e do gradiente medido Gy, indicando-se também os principais *pits* do prospecto 12 de Outubro. É possível verificar de forma clara que as principais anomalias de ouro estão associadas com baixos gradientes de direção ENE-WSW, equivalente à região de ocorrência do *Main Breccia Pit* e do *Sulphide Pit*.

Os dados de K, eTh e eU apresentam-se atenuados quando associados a porções mais elevadas e planas, onde solos se desenvolvem, caracterizando-se por tonalidades esverdeadas, conforme pode ser visualizado nas **figuras 4.7 e 4.8**. Nas regiões onde se inserem as grandes anomalias de ouro em solo, analisando-se os perfis das linhas de vôo, nota-se que há uma

alternância de altos valores radiométricos (típicos de rochas vulcânicas ácidas como os riolitos), e porções em que há uma queda das medidas gamaespectrométricas. Aparentemente, não parecem estar relacionadas com produto derivado de intenso intemperismo químico.

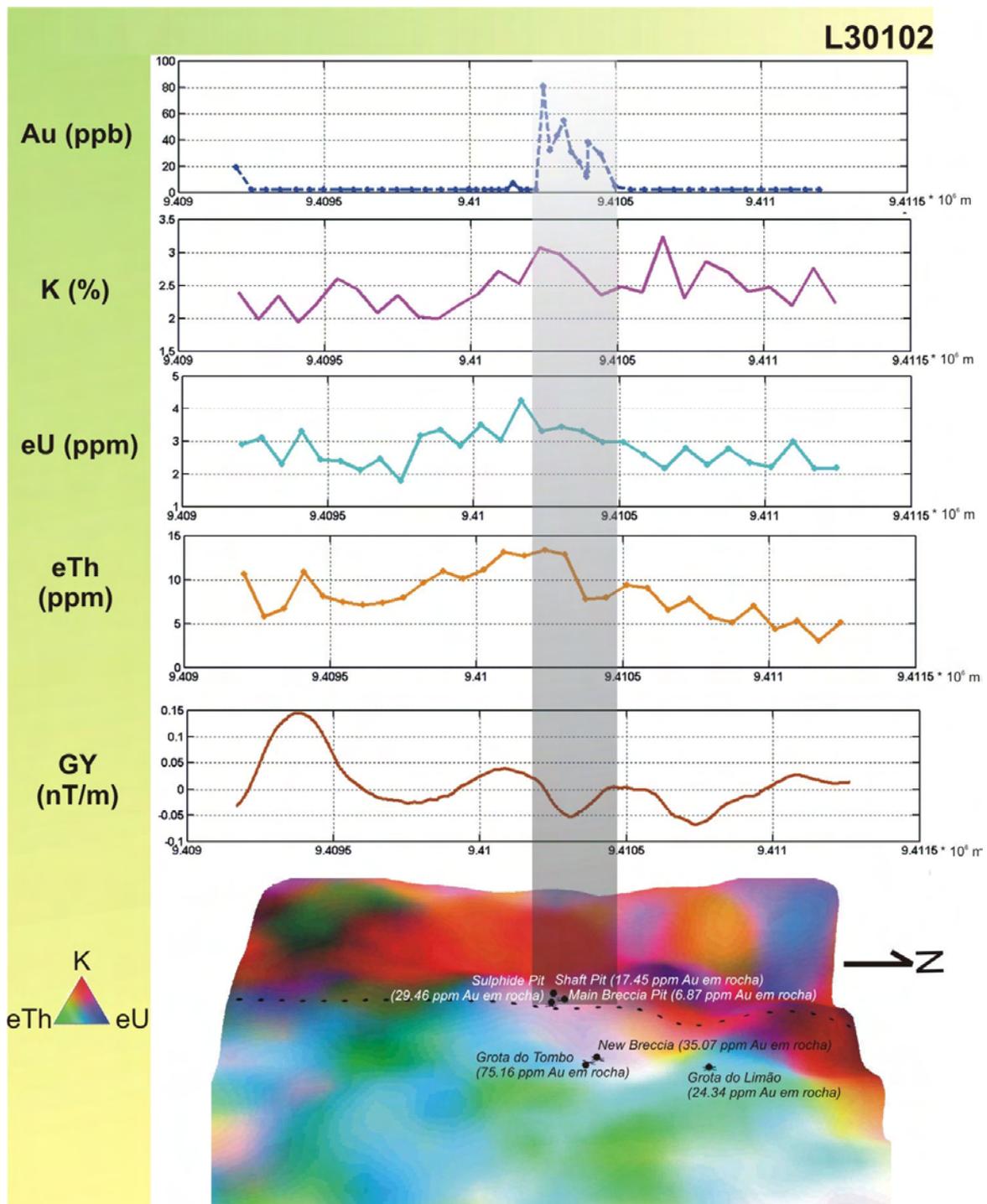


Figura 4.7. Dados gamaespectrométricos (K, eTh, eU) e de magnetometria gradiométrica (Gy) relacionados à linha de vôo L30102, e respectiva malha geoquímica de ouro em solo integrados com a localização dos principais *pits* do prospecto 12 de Outubro em imagem ternária RGB de K, eTh e eU em 2,5D.

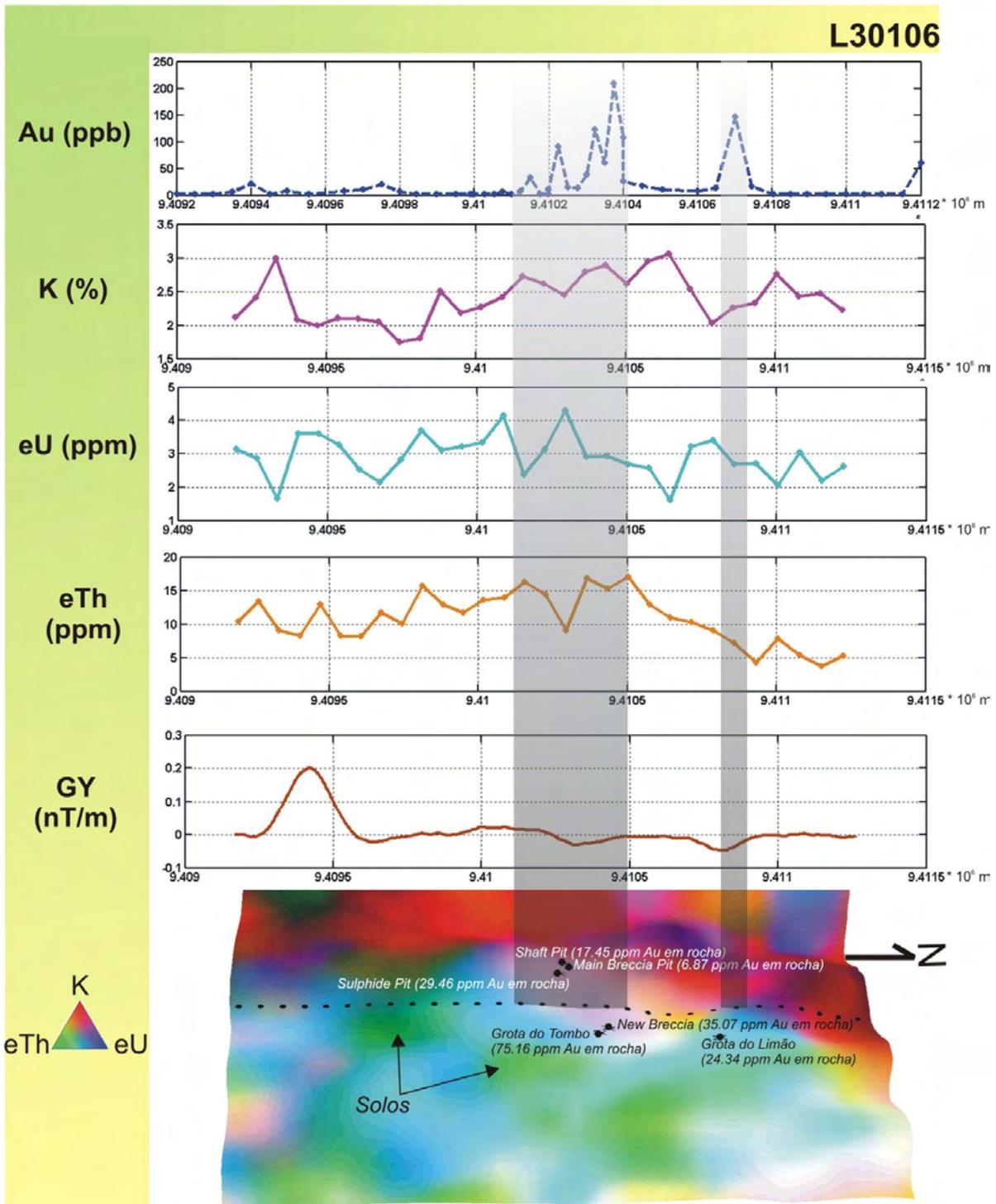


Figura 4.8. Dados gamaespectrométricos (K, eTh, eU) e de magnetometria gradiométrica (Gy) relacionados à linha de voo L30106, e respectiva malha geoquímica de ouro em solo integrados com a localização dos principais *pits* do prospecto 12 de Outubro em imagem ternária RGB de K, eTh e eU em 2,5 D.

Nenhuma linha de voo possui uma correspondência exata com os principais *pits* do prospecto 12 de Outubro, a fim de tornar mais adequada a avaliação dos dados gamaespectrométricos frente à questão dos efeitos da silicificação nestas respostas.

Dessa forma, as imagens geradas pelo uso do interpolador curvatura mínima foram analisadas. Primeiramente, um recorte da região dos principais *pits* foi feito a partir dos *grids* de K, eTh, eU e da razão K/eTh, caracterizados por tamanho de célula de 25 m (*grid* denominado de bloco central, conforme apresentado no Capítulo III). Com base na **figura 4.9**, verifica-se que a região dos *pits* é caracterizada por valores médios de eTh (sendo os maiores valores deste radioelemento associados com partes mais elevadas do terreno, e equivalendo à intensa cobertura de solos), médios a altos valores de K (mas não compreendem os pontos mais anômalos), médios a altos valores da razão K/eTh, e um padrão alto de eU. Por ser um corte mais detalhado, é possível verificar uma continuidade de baixos a médios valores de K, eTh e da razão K/eTh na direção ENE-WSW que, aparentemente, relaciona-se com os cinco *pits* mostrados na **figura 4.9**.

Analisando as imagens gamaespectrométricas dos *grids* do bloco sudeste (células de 50 m), bloco central (células de 25 m), e bloco principal (células de 100 m), as principais características averiguadas compreendem (**Figura 4.10**):

- (a) assinaturas típicas de alto K, baixos eTh e eU das rochas vulcânicas intermediárias pertencentes à Formação Bom Jardim, em cujo domínio também estão relacionadas rochas máficas, como constatado com a ocorrência de gabro do ponto DO-MAG11 (*cf.*, **figura 4.3**).
- (b) a quebra de relevo entre as rochas do Grupo Iriri e da Formação Bom Jardim aparentemente está associada com o contato entre tais unidades;
- (c) obliteração das assinaturas de alto K, eTh e eU de riolitos e outras rochas vulcânicas ácidas do Grupo Iriri, decorrente da ação intempérica. Neste sentido, altos valores de eTh passam a ser observados, em contrapartida a menores valores de K e U, estes mais facilmente lixiviados (Dickson & Scott 1997).

Com relação às imagens magnetométricas, a comparação de produtos como a geração de imagens pelo interpolador bi-direcional dos gradientes horizontais medidos Gx e Gy, das primeiras derivadas horizontais do campo magnético anômalo (Dx e Dy), da primeira derivada vertical do campo magnético anômalo (Dz), da amplitude do sinal analítico (ASA) (Nabighian 1972, Nabighian 1974, Roest *et al.* 1992), da amplitude do gradiente horizontal total (AGHT), e da inclinação do sinal analítico (ISA) (Graunch & Cordell 1987) (**Figura 4.11**), mostra as seguintes observações:

- (a) as imagens de gradientes medidos apresentam melhor definição das feições de baixos gradientes em relação às respectivas imagens calculadas a partir das derivadas horizontais de primeira ordem do campo magnético anômalo, fazendo-se jus às considerações apresentadas

em McMullean & MacLellan (1997) e Schmidt & Clark (2006). Entre tais melhorias de realce incluem-se aparentes feições sigmoidais dextrais observadas na imagem Gx (**Figura 4.11 (a)**); (b) predomínio de feições orientadas na direção ENE-WSW nas imagens magnetométricas gradiométricas. Em menor frequência, aparecem feições de direção NW-SE. Já nas imagens de radar, a estruturação principal da região mineralizada compreende a de direção NE-SW (**Figura 4.12**).

(c) as ocorrências auríferas do prospecto 12 de Outubro estão relacionadas com valores médios da ASA (**Figura 4.11 (f)**).

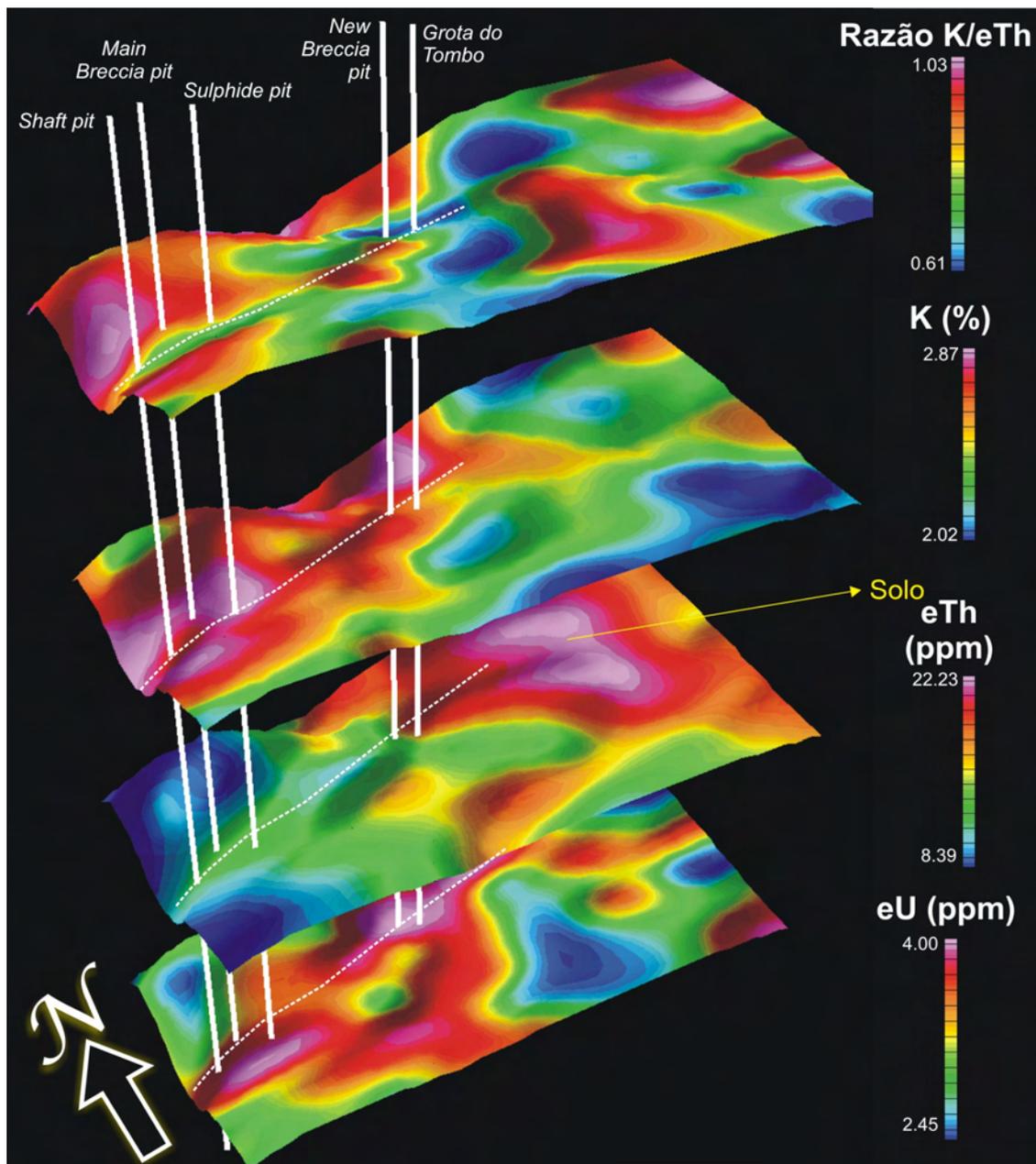


Figura 4.9. Recortes dos *grids* de eU, eTh, K e da razão K/eTh na principal região mineralizada no prospecto 12 de Outubro. Notar altas assinaturas de eTh relacionadas com a presença de solos, assim como baixos valores de K, eU e da razão K/eTh. A linha tracejada

branca mostra o alinhamento ENE-WSW dos *pits*, demarcado por valores médios de eTh e médios a altos de K/eTh e K .

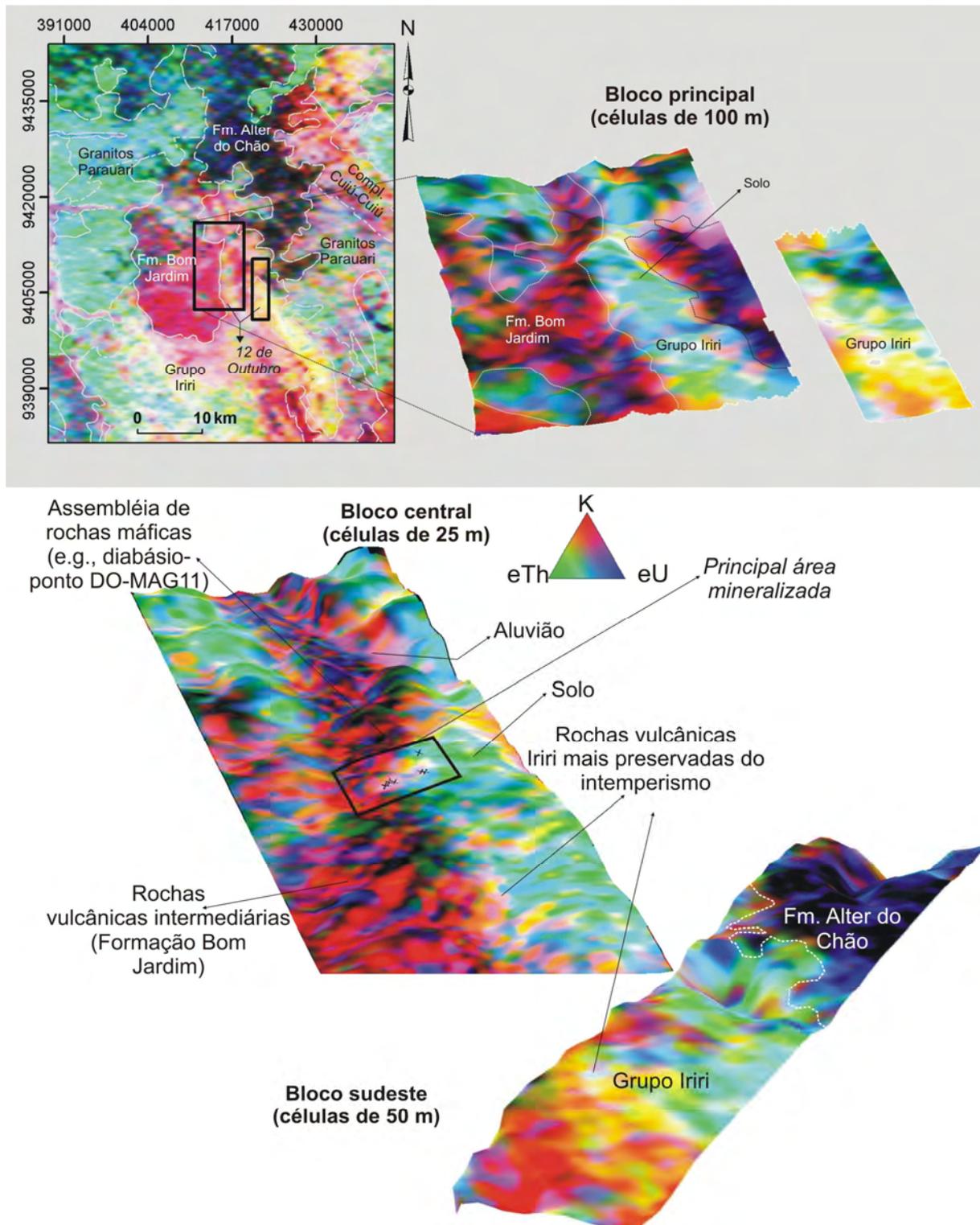


Figura 4.10. Imagens gamaespectrométricas em composição colorida RGB (K , eTh , eU) abrangendo o levantamento 12 de Outubro. Interpretações principais estão indicadas.

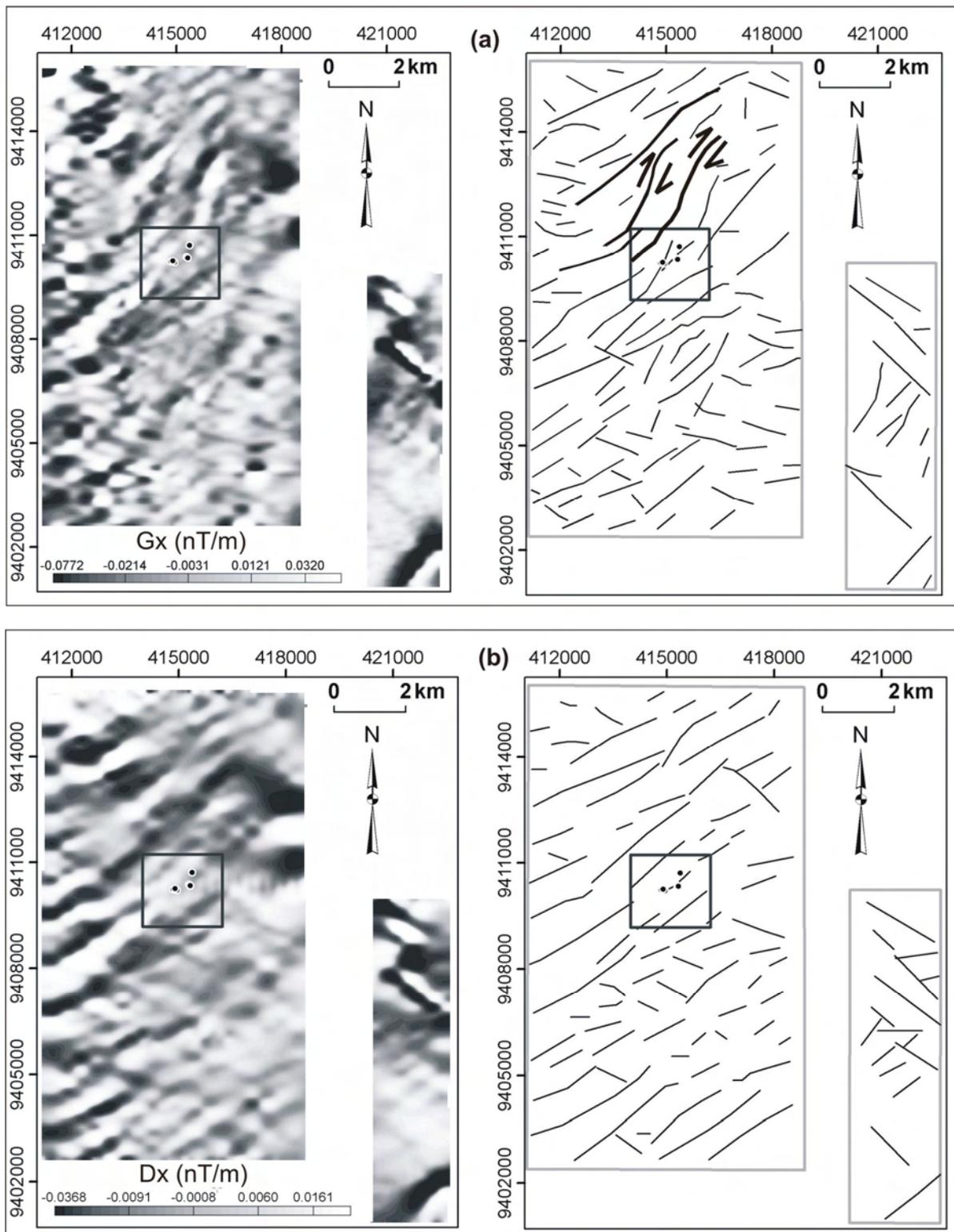


Figura 4.11. Comparação de imagens magnetométricas e interpretação de principais lineamentos. O retângulo preto indica a principal área mineralizada: **(a)** gradiente horizontal medido na direção x (G_x); **(b)** primeira derivada horizontal na direção x do campo magnético anômalo (D_x) (Continua).

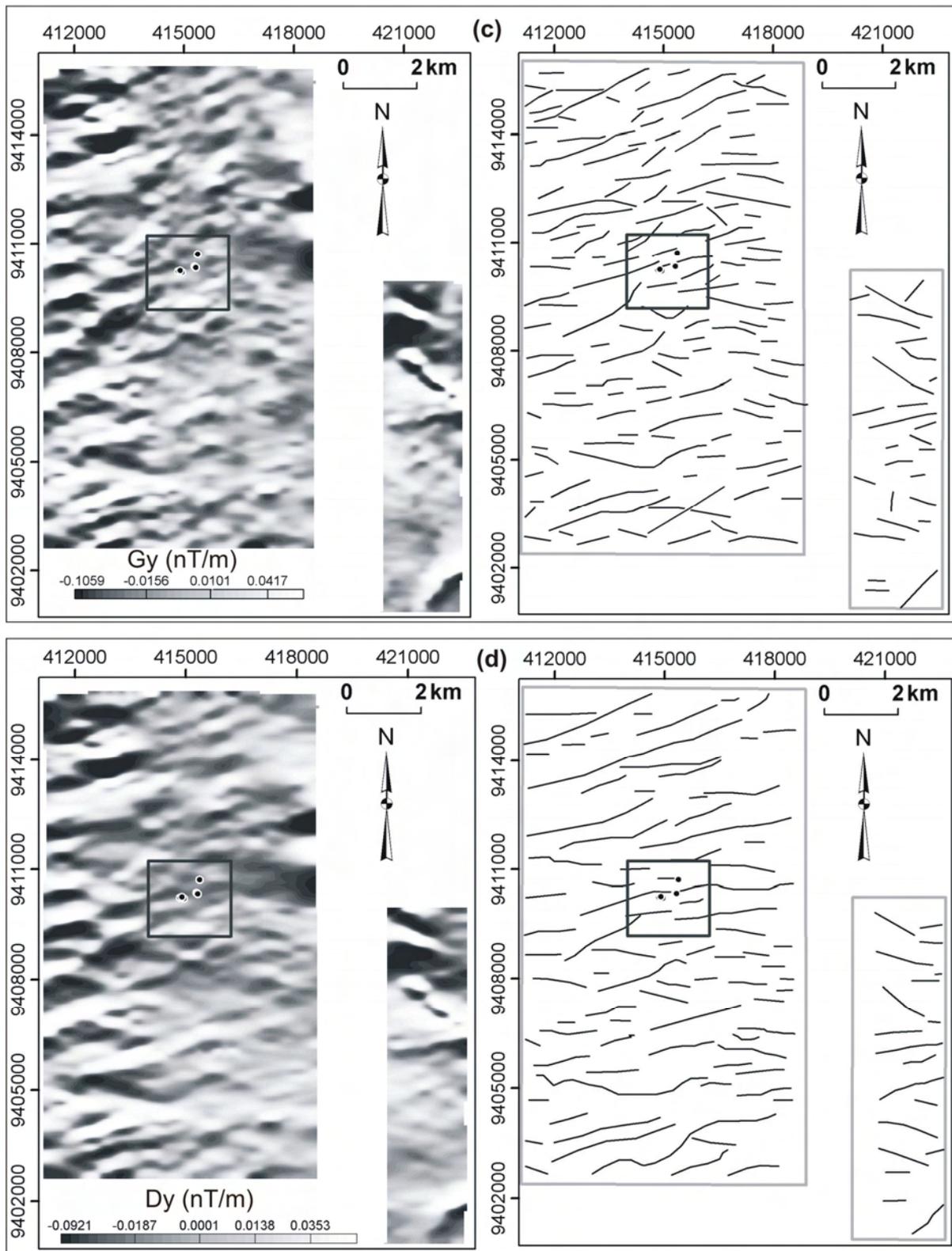


Figura 4.11. (Continuação) (c) gradiente horizontal medido na direção y (G_y); (d) primeira derivada horizontal na direção y do campo magnético anômalo (D_y) (Continua).

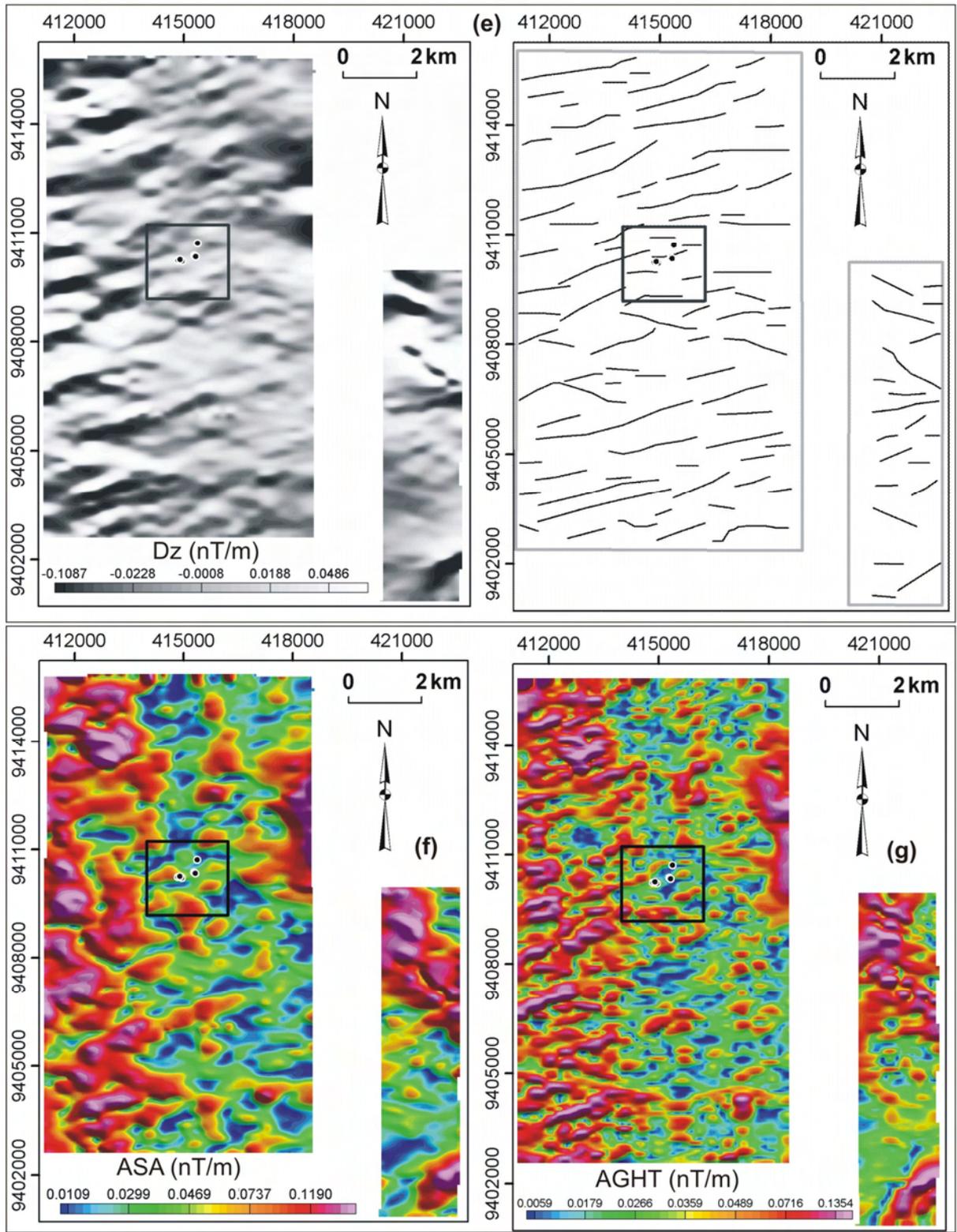


Figura 4.11. (Continuação) **(e)** primeira derivada vertical do campo magnético anômalo (D_z); **(f)** amplitude do sinal analítico; **(g)** amplitude do gradiente horizontal total (Continua).

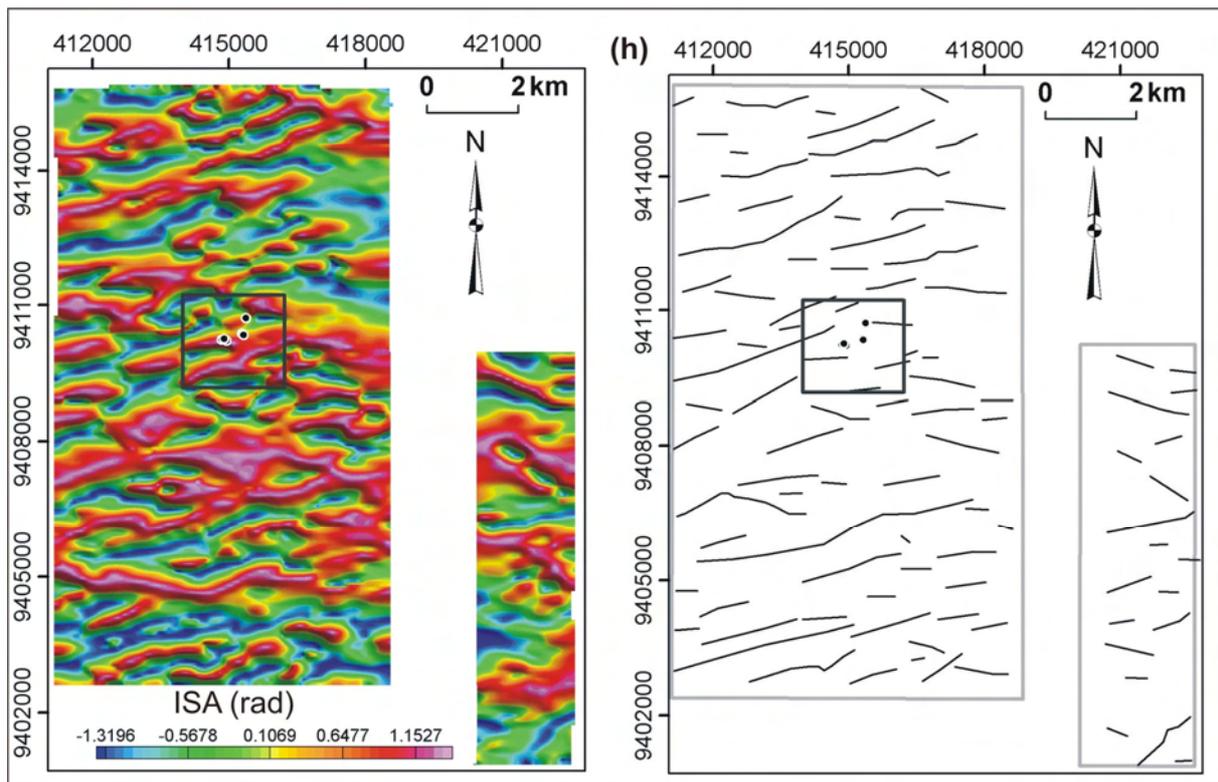


Figura 4.11. (Continuação) (h) inclinação do sinal analítico.

4.1.2. INTEGRAÇÃO DE DADOS

Dados de geoquímica de ouro em rocha foram integrados com a imagem ternária de K, eTh e eU em RGB, e com lineamentos interpretados com base na imagem SAR-R99B (Lhh), como mostrado na **figura 4.13**. O padrão principal observado compreende anomalias expressivas de ouro em rocha (>1 ppm) compatíveis com a região de *pits* como o *Main Breccia*, *Sulphide*, *New Breccia* e *Shaft*.

Desta maneira, para esta principal área mineralizada do prospecto 12 de Outubro, integrações das imagens referentes à geoquímica de ouro em solo e as magnetométricas foram estabelecidas de forma a proporcionar a observação de padrões e feições associáveis com as anomalias auríferas.

Tal padrão é claramente verificado por meio da integração das principais feições interpretadas na imagem do gradiente horizontal medido na direção y (Gy) (que ressalta as estruturas mais próximas da orientação E-W e que são muito importantes no contexto deste prospecto) com imagens das anomalias de ouro (**Figura 4.14**). Nota-se que para as imagens de corte de probabilidade de ocorrência da variável indicatriz ouro em solo maior que 10%, 25% e 50%, as seis ocorrências auríferas do prospecto 12 de Outubro estão relacionados a anomalias auríferas com continuidade ENE-WSW, compatível com o lineamento interpretado

com base na imagem do gradiente medido Gy. Estas feições ENE-WSW devem representar um sistema de fraturas ou falhas rúpteis associado com o contexto das mineralizações de ouro. Por tal, constituem uma importante zona de influência metalogénica para a prospecção aurífera nesta região (Klein *et al.* 2001a).

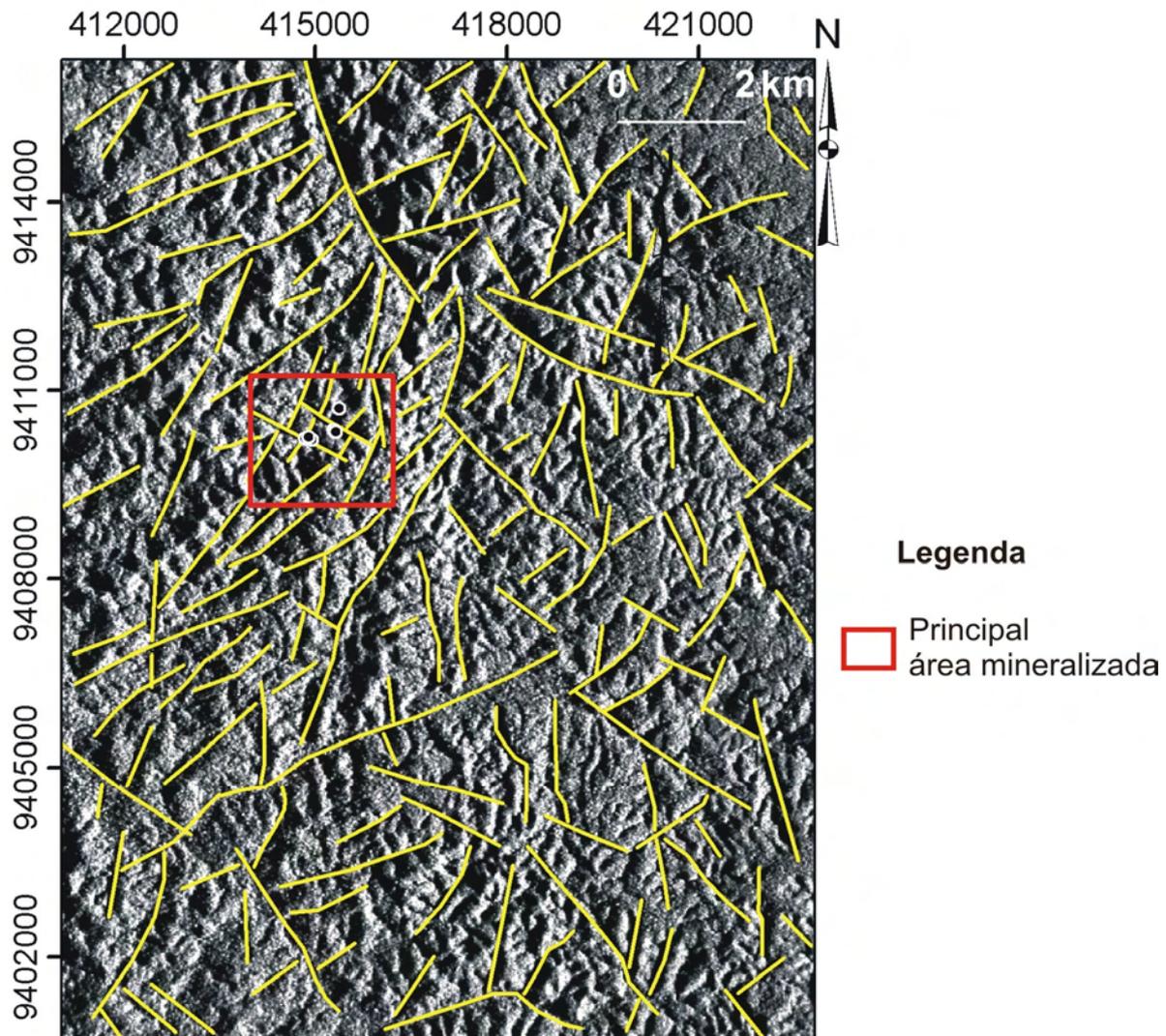


Figura 4.12. Imagem SAR-R99B e interpretação de principais lineamentos.

Esta relação é melhor visualizada na **figura 4.15**, que compara as imagens dos gradientes medidos Gx e Gy com as respectivas derivadas horizontais de primeira ordem do campo magnético anômalo (Dx e Dy), integradas com as anomalias auríferas de ouro em solo cuja probabilidade de ocorrência da variável indicatriz seja maior que 25%. Primeiramente é notável a maior resolução dos dados gradiométricos frente aos dados calculados das derivadas horizontais nas direções x e y. Em segundo, verifica-se o padrão de continuidade das anomalias de ouro com os baixos gradientes, principalmente os de direção ENE-WSW

observados na imagem Gy. Na imagem do gradiente Gx, é possível observar também correlações das anomalias auríferas com baixos gradientes que indicam a variação lateral de tais feições.

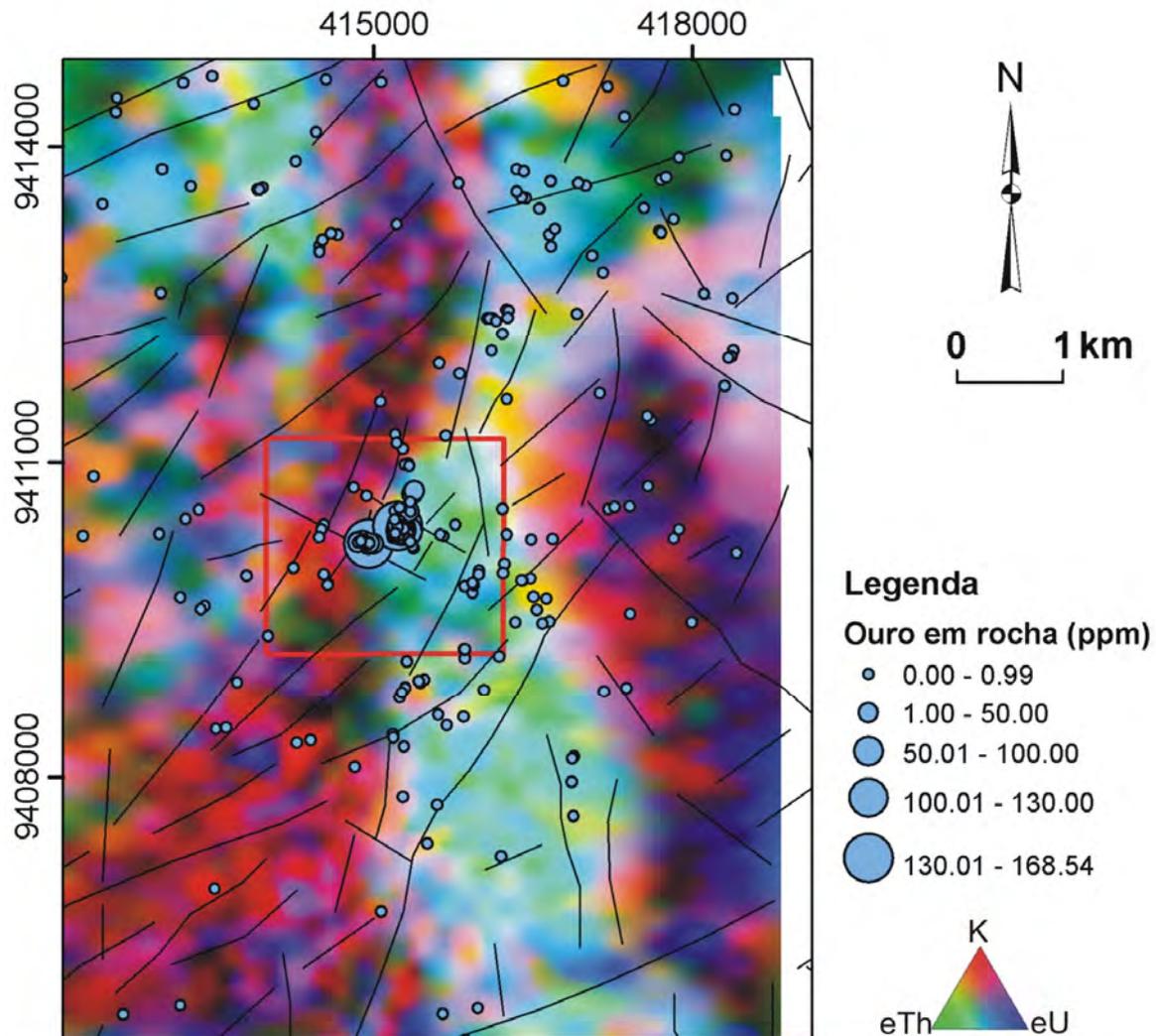


Figura 4.13. Integração da imagem ternária RGB de K, eTh e eU com lineamentos interpretados na imagem SAR-R99B (Lhh) e dados de geoquímica de ouro em rocha. Observar que anomalias maiores que 1 ppm concentram-se na área indicada por retângulo vermelho.

Como um produto que permita resumir essas observações acima, a **figura 4.16** mostra a integração das imagens da média das 500 simulações geradas para anomalias auríferas em solo maiores que 50 ppb, dos gradientes medidos Gx e Gy e da composição ternária RGB de K, eTh e eU, juntamente com a inserção dos *pits* do prospecto 12 de Outubro. Esta figura sintetiza a relação da importância dos baixos gradientes de direção ENE-WSW e NE-SW nos quais os *pits* se localizam, com a ocorrência de anomalias de ouro em solo, além de mostrar que esta região mais anômala é caracterizada por uma menor ação intempérica, pois altos

valores dos radioelementos K, eTh e eU ainda são observados. Diferentemente, a porção mais elevada e não associada à quebra de relevo que separa o Grupo Iriri da Formação Bom Jardim, caracteriza-se por respostas gamaespectrométricas das rochas obliteradas pela formação de espessos perfis de solos (Figura 4.16).

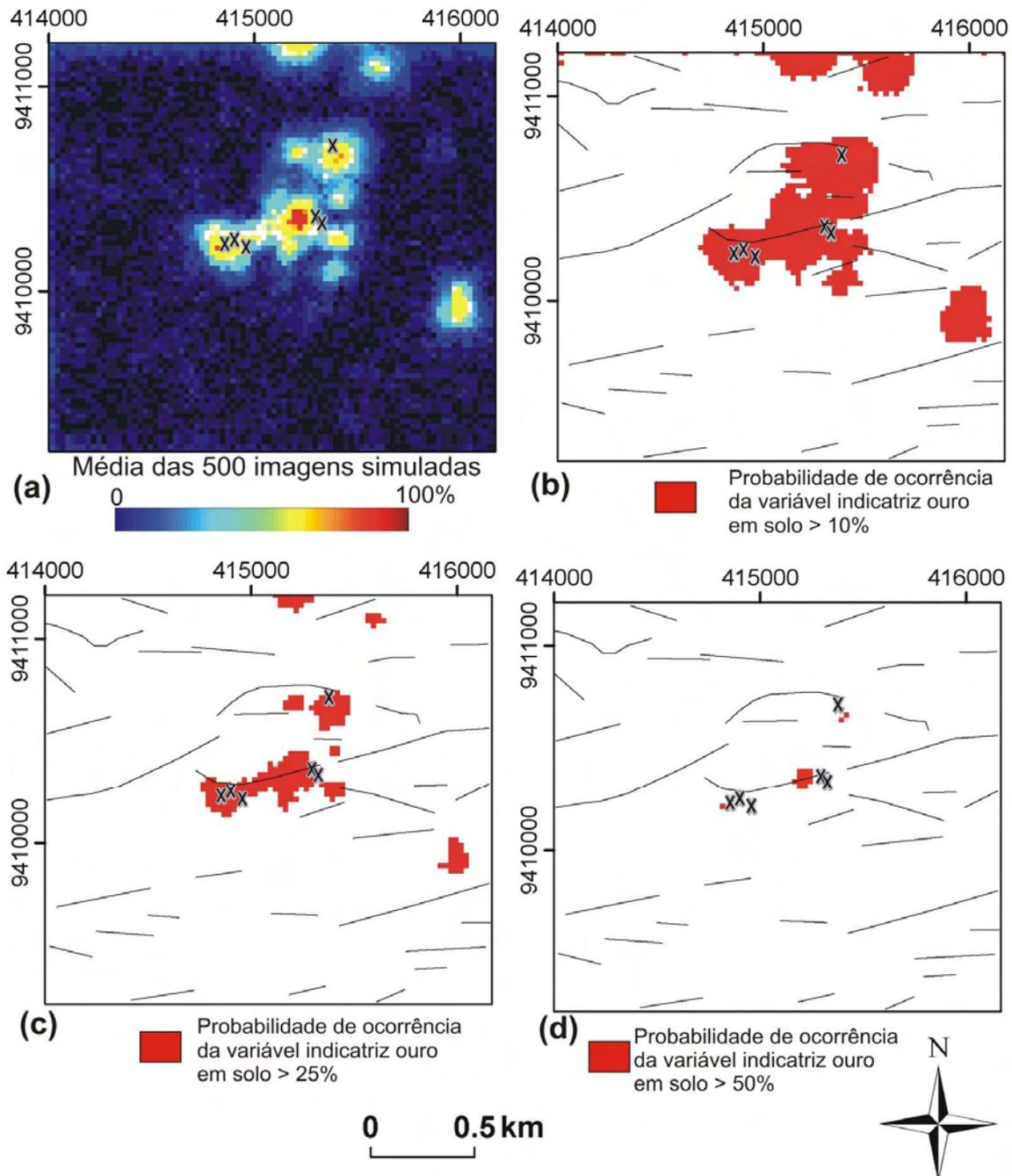


Figura 4.14. Comparação das imagens geradas pela simulação indicatriz seqüencial: (a) média das 500 imagens simuladas, e os cortes gerados a partir desta imagem, considerando-se as probabilidades de ocorrência da variável indicatriz ouro em solo maiores que 10% (b), 25 % (c), e 50% (d). A integração dos lineamentos magnéticos interpretados a partir da imagem do gradiente Gy permite observar que há uma relação de continuidade de anomalias de ouro em solo com lineamento de direção ENE-WSW que afeta a maioria dos *pits* do prospecto 12 de Outubro. Cruzes indicam os *pits* e ocorrências de ouro.

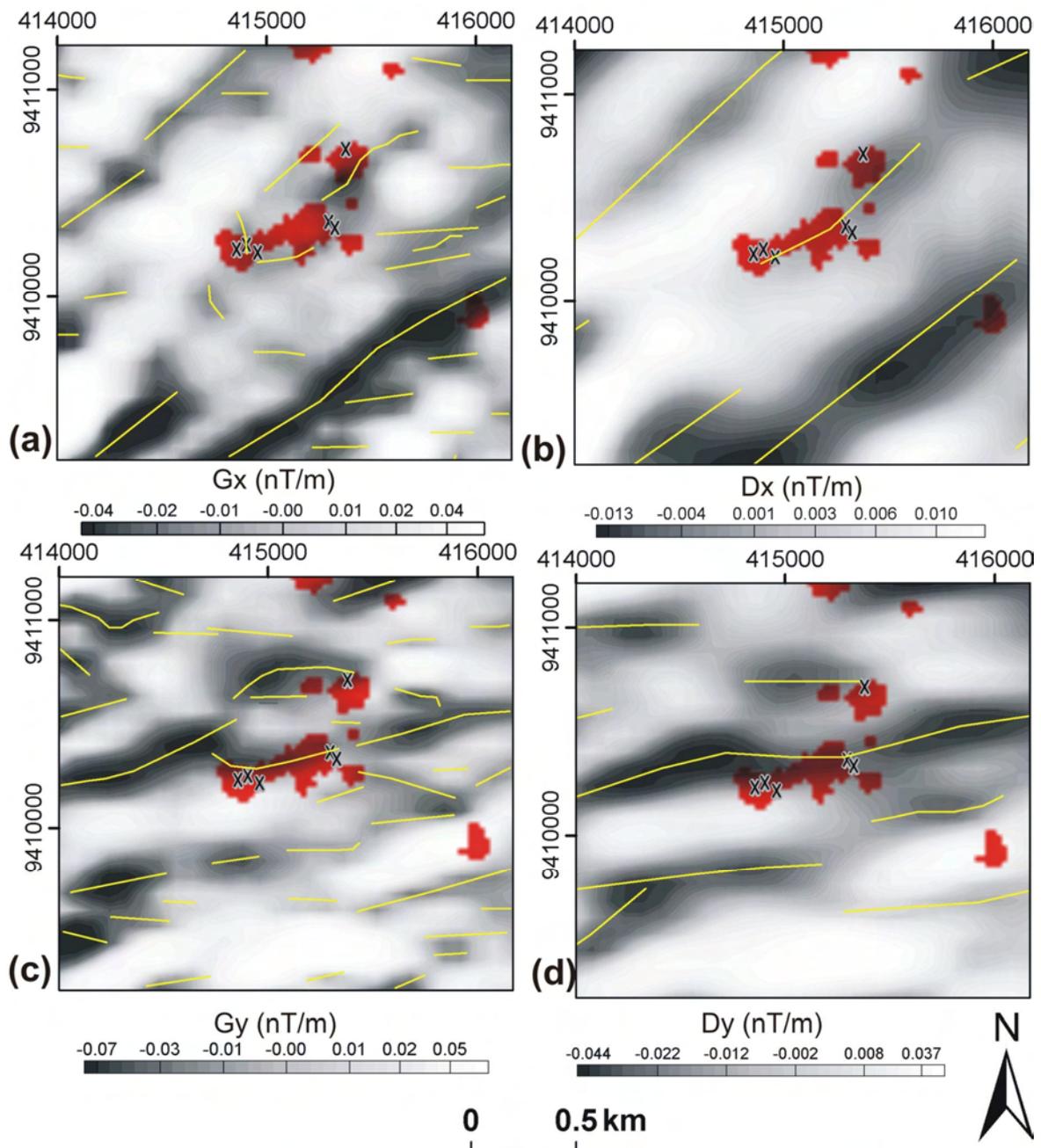


Figura 4.15. Comparação de produtos magnetométricos integrados com a imagem de probabilidade de ocorrência da variável indicatriz ouro em solo maior que 25%: **(a)** imagem do gradiente medido G_x ; **(b)** imagem da primeira derivada horizontal em x do campo magnético anômalo; **(c)** imagem do gradiente medido G_y ; **(d)** imagem da primeira derivada horizontal em y do campo magnético anômalo. Observar maior resolução das feições de baixo gradiente proporcionada pelas imagens de G_x e G_y em relação às imagens calculadas das respectivas derivadas. Cruzes indicam os pits e ocorrências de ouro.

4.1.3. MODELAGEM DE DADOS ESPACIAIS

Modelagens de dados espaciais foram testadas na região do prospecto 12 de Outubro como uma tentativa de realçar classes ou padrões de feições geológicas que indiquem os principais vetores de exploração aurífera na área do prospecto.

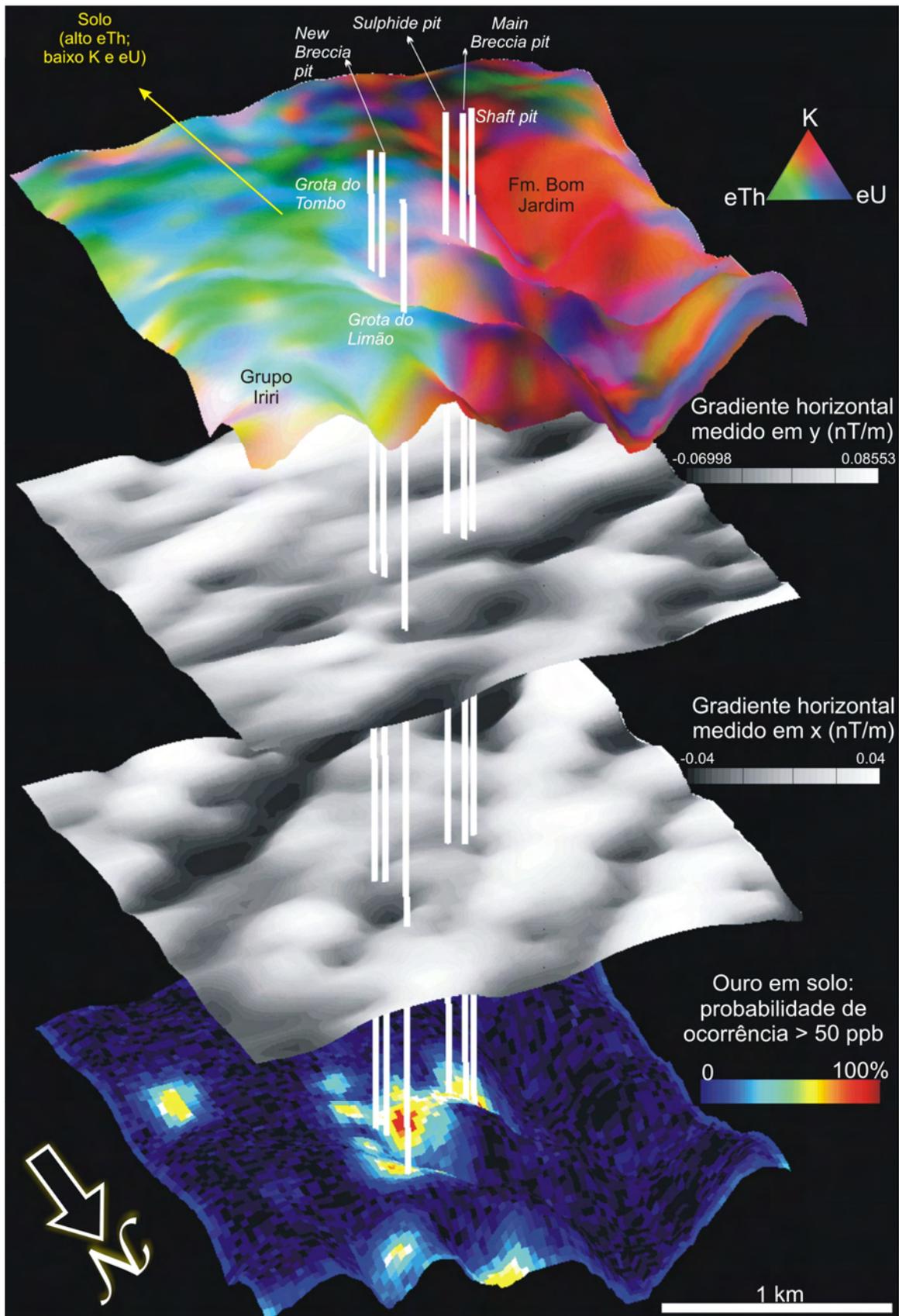


Figura 4.16. Integração de dados da principal região mineralizada do prospecto 12 de Outubro: imagem da geoquímica de ouro em solo (média das 500 simulações) e a ternária RGB de K, eTh e eU integradas com o modelo digital de terreno e as imagens dos gradientes horizontais medidos nas direções x e y em 2.5D.

As redes neurais artificiais (RNAs) foram empregadas para esta região (assim como para os prospectos Rosa de Maio e Maués – estes apresentados nos itens subseqüentes deste Capítulo IV), pois não necessitam de um conhecimento *a priori* do modelo metalogénico dos depósitos (visto que tal preceito ainda é questionável nesta área), além de possibilitarem a extração de padrões ocultos de dados que podem ser imperceptíveis aos seres humanos e aos métodos estatísticos convencionais (Brown *et al.* 2000), e não serem tão dependentes de um grande número de pontos de treinamentos (ocorrências minerais conhecidas).

Métodos probabilísticos bayesianos (*e.g.*, pesos de evidências) não são técnicas condizentes para modelagem nestes estudos de caso, em função da existência de poucos pontos de treinamento (ocorrências de ouro), que são importantes para a etapa de seleção dos dados de entrada para o processamento. Métodos dirigidos pelo conhecimento (*e.g.*, lógicas booleana e *fuzzy*) poderiam ser testados a partir da determinação de um ou mais modelos metalogénicos específicos. Entretanto, optou-se apenas pelas RNAs a fim de obter os primeiros subsídios previsionais que dependam apenas dos pontos de treinamento, visto que a base de dados cedida pela empresa Mapex Mineração, Importação e Exportação Ltda. é consistente. À medida em que mais dados fiquem disponíveis ao prospecto 12 de Outubro, modelagens dirigidas pelo conhecimento poderão ser feitas de modo mais coerente.

As RNAs compreendem técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado no raciocínio humano, e são formadas por elementos de processamento denominados *neurônios*, que compreendem funções matemáticas que se apresentam interconectadas por meio de ligações relacionadas a coeficientes numéricos (pesos sinápticos). Estes pesos mostram a intensidade de cada conexão e tendem a ser alterados a fim de adaptar, da melhor forma possível, os modelos à realidade existente (Porwal *et al.* 2003).

De maneira geral, as camadas relacionadas às RNAs são classificadas em três grupos: (a) a *camada de entrada*, compreendendo os vetores de entrada (planos de informação); (b) a(s) *camada(s) oculta(s)*, na(s) qual(is) uma determinada função irá estabelecer uma conexão ponderada entre os neurônios da camada de entrada e de saída; e (c) a *camada de saída*, consistindo no resultado final (Brown *et al.* 2000). Neste sentido, a rede neural denominada *Radial Basis Functional Link Net* (RBFLN) (Looney & Yu 2000) foi selecionada para uma tentativa de revelar padrões de dados mutifonte que possam ser interessantes sob a óptica da prospecção de ouro na região do prospecto 12 de Outubro.

As imagens selecionadas para o processamento equivalem as de K, eTh, eU (visando a caracterização das rochas hospedeiras das mineralizações), as imagens dos gradiente medidos

Gy e Gx (pois as ocorrências de ouro conhecidas estão associadas com baixos gradientes), e a imagem de *buffers* de lineamentos ENE-WSW, que foram interpretados e caracterizados por duas classes de distâncias: entre 0-100 m e outra entre 100-200 m.. Os dados de entrada foram reclassificados em 256 classes, e posteriormente combinados de forma a gerar uma matriz de n linhas por m colunas. Os m dados equivalem às variáveis K, eTh, eU, Gy, Gx, *buffers*, enquanto os n dados estão associados com os pixels que definem os vetores de entrada a serem processados. Dados vetoriais relacionados com ocorrências de ouro (pontos de treinamento) e pontos do tipo não depósito (selecionados em locais onde sabidamente não há ocorrências de ouro) também são necessários à aplicação da técnica RBFLN. Toda esta configuração da base de dados está ilustrada, esquematicamente, na **figura 4.17**.

Destaca-se que duas análises, utilizando a mesma estrutura de dados, foram realizadas: uma relacionada ao *grid* denominado ‘bloco central’ (*vide* Capítulo III) caracterizado por maior resolução, e outra associada ao *grid* ‘bloco principal’, de menor resolução. Respectivamente, a configuração dos vetores de entrada compreenderam matrizes do tipo 17420 x 6 e 38798 x 6 para estas duas abordagens (**Figura 4.17**).

Como afirmado acima, a arquitetura de uma RBFLN é formada por três camadas: a camada de entrada (composta por N neurônios que estão associados com os vetores de treinamento), a camada oculta (formada por M neurônios, estes representados pelas funções de base radial), e a camada de saída (formada por J neurônios) (Looney & Yu 2000).

Cada vetor x presente na camada de entrada ativa as funções de base radial na camada oculta. Cada um dos M neurônios da camada oculta retorna um valor y para os N neurônios da camada de entrada, sendo que os valores de y são multiplicados pelos pesos sinápticos u_{mj} nas conexões entre os neurônios da camada oculta e aqueles da camada de saída. Os vetores da camada de entrada são então conectados diretamente aos vetores da camada de saída de forma ponderada pelos pesos sinápticos w_{nj} . Desta maneira, cada um dos J neurônios da camada de saída é calculado por meio do somatório dos valores de y multiplicados pelos pesos sinápticos u_{mj} e dos valores de x multiplicados pelos pesos sinápticos w_{nj} .

A fase de treinamento é realizada com uma amostra de q vetores de entrada (vetores de treinamento), com um conjunto de q vetores de saída conhecidos associados. Estes q vetores estão associados aos pixels correspondentes aos pontos de treinamento e aos pontos do tipo não depósito. Esta etapa caracteriza-se por armazenamento dos parâmetros ajustados da rede neural que são ‘aprendidos’ durante o treinamento, a saber: (a) os valores dos centros dos vetores e dos espalhamentos (σ) das funções de base radial; (b) ajuste dos pesos

sinápticos u_{mj} da conexão entre os nós da camada oculta com os nós da camada de saída; e (c) ajuste dos pesos sinápticos w_{nj} da conexão entre os vetores da camada de entrada com os nós da camada de saída (Looney & Yu 2000). Destaca-se que os ajustes dos parâmetros das funções de base radial e dos pesos sinápticos são realizados de forma a minimizar, a cada iteração, o erro quadrático total (EQT) e o erro quadrático médio (EQM).

Após o treinamento dos q vetores, os parâmetros estimados na etapa de aprendizado com a definição da arquitetura da rede são aplicados a todos os vetores de entrada do banco de dados, resultando em vetores alvos, ou resultado final equivalente, a cada pixel, a um valor previsionial entre 0 e 1, indicando a favorabilidade do bem prospectado (Porwal *et al.* 2003). A **Figura 4.17** mostra os erros associados e relativos aos dois processamentos realizados, além do número de nós (funções gaussianas) na camada oculta e número de vetores de treinamento. Nota-se que, na fase de classificação, os erros associados são maiores em função de existir maior número de vetores de entrada ao processamento se comparado com os vetores usados na etapa de treinamento.

Os resultados gerados estão apresentados nas **figuras 4.18 e 4.19**. As áreas classificadas foram priorizadas a partir da definição de classes de alta, moderada e baixa favorabilidade para mineralizações de ouro. A quantificação das áreas classificadas está apresentada na **tabela 4.1**, e nos gráficos do tipo favorabilidade *versus* área classificada acumulada, mostrados nas **figuras 4.18 e 4.19**.

Os resultados obtidos (**Figuras 4.18 e 4.19**) mostram que os principais alvos mapeados pela empresa Mapex (pontos de treinamento das redes) e os alvos identificados pela CPRM (Klein *et al.* 2001a) foram classificados por prioridade prospectiva moderada a alta, além de outras regiões as quais ainda não possuem grande conhecimento geológico em boa escala para a prospecção.

Apesar de configurar uma tentativa de observar padrões mais favoráveis a ouro a partir dos dois mapas produzidos pela técnica RBFLN (**Figuras 4.18 e 4.19**), a existência de espessa cobertura de solo, observada em imagens gamaespectrométricas, agiu de forma a gerar uma menor prioridade prospectiva, basicamente associada à classe moderada.

A modelagem resultante da **figura 4.18** caracteriza-se pela validação das ocorrências de ouro reconhecidas pela CPRM (Klein *et al.* 2001a), considerando-se uma área total de 11,362 km² (favorabilidades alta e moderada) (**Tabela 4.1**). Esta quantificação equivale a aproximadamente 33% da área total classificada (**Figura 4.18**). Destacam-se os resultados da modelagem da porção sudeste, a qual ainda não foi investigada pela empresa Mapex, mas que

foi condizente com a existência de duas ocorrências de ouro mapeadas no PROMIN-Tapajós (Klein *et al.* 2001a).

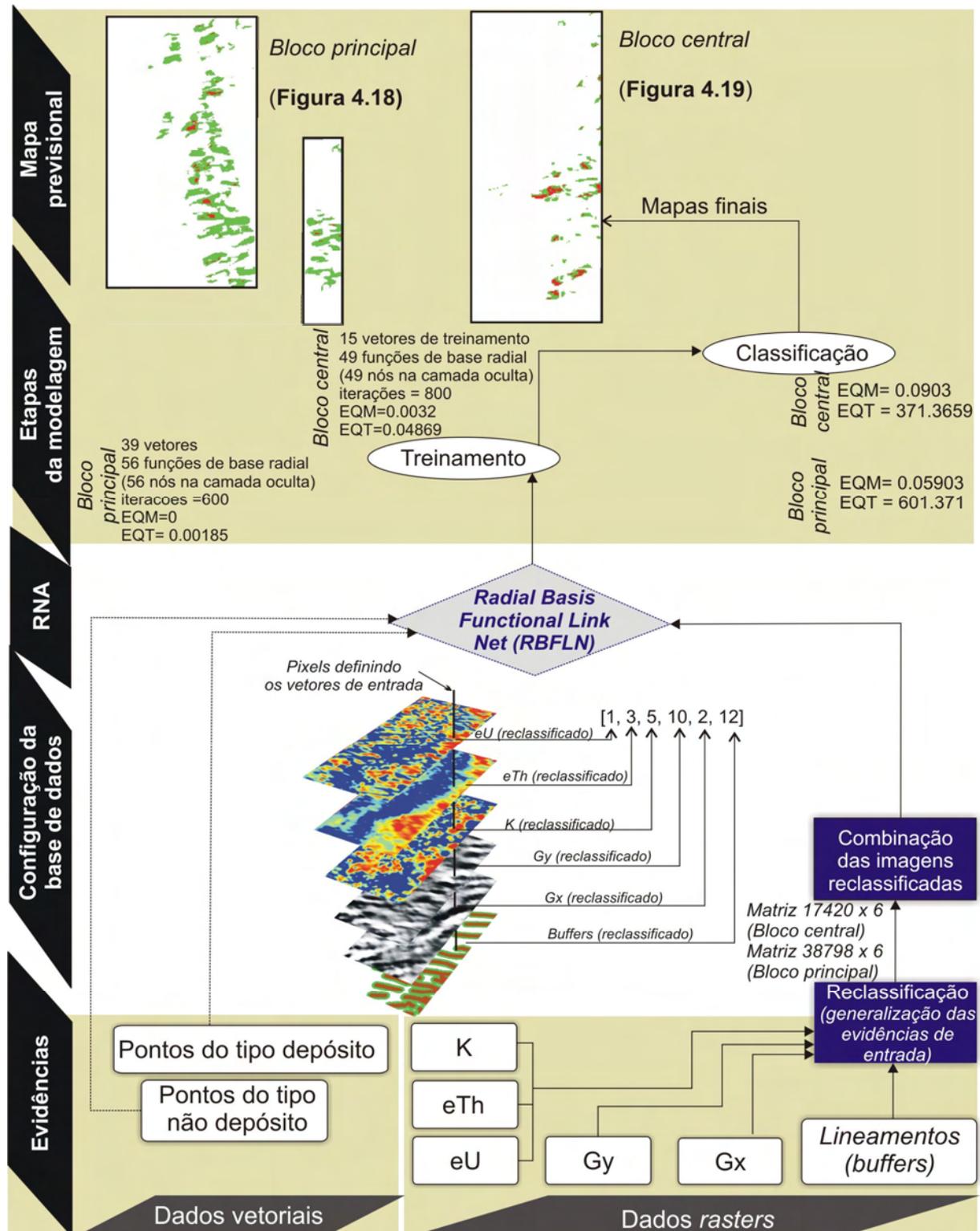


Figura 4.17. Síntese dos passos empregados para a aplicação da RBFLN, mostrando a configuração da base de dados e os parâmetros utilizados nas etapas de treinamento e classificação. EQT= erro quadrático total; EQM = erro quadrático médio.

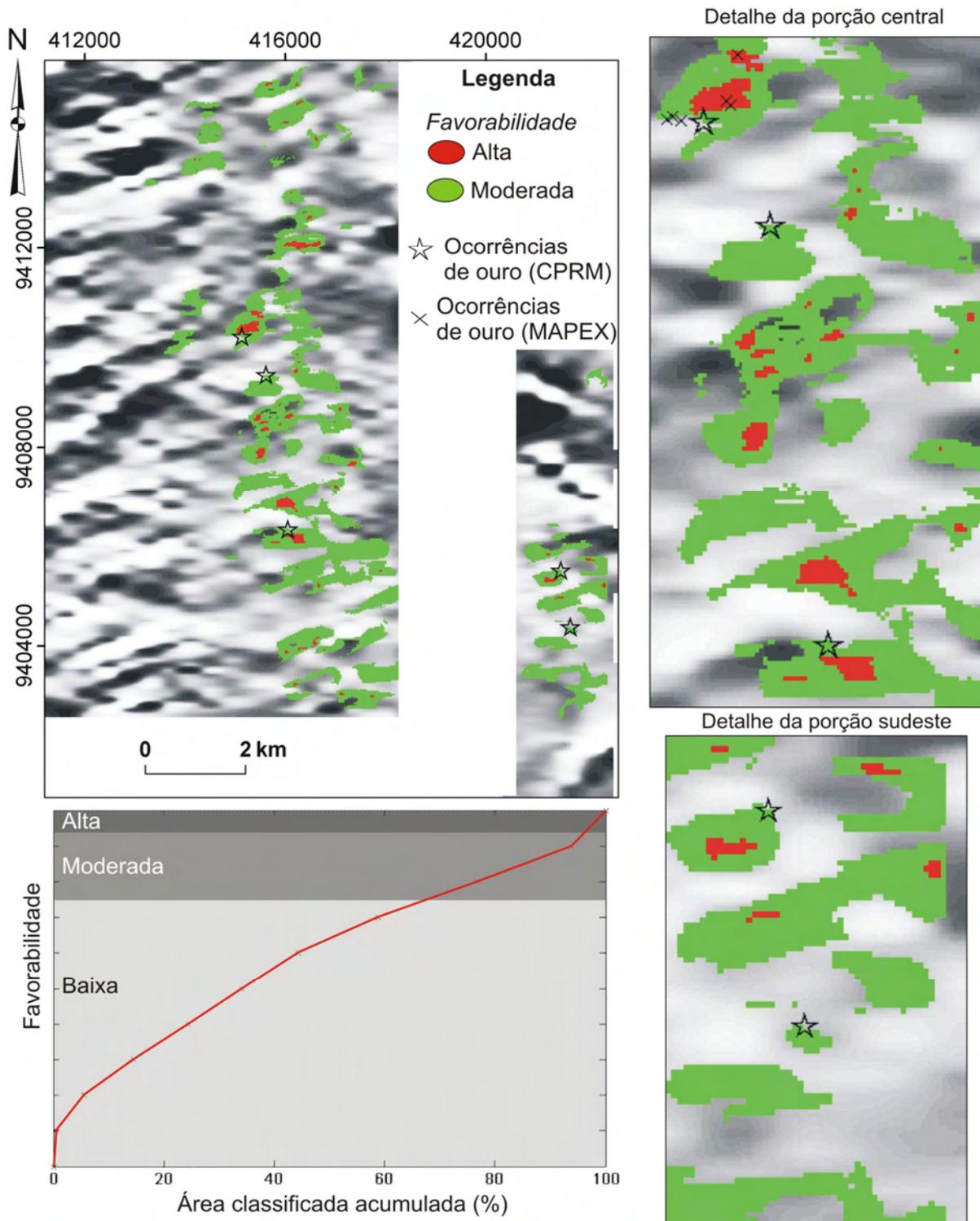


Figura 4.18. Modelo de favorabilidade gerado a partir da aplicação da RBFLN nos dados associados à região do bloco principal, sobreposto à imagem do gradiente medido Gy. Gráfico de favorabilidade *versus* área classificada acumulada e detalhe das áreas classificadas estão apresentados. O modelo mapeia os alvos conhecidos, bem como mostra novos alvos potenciais.

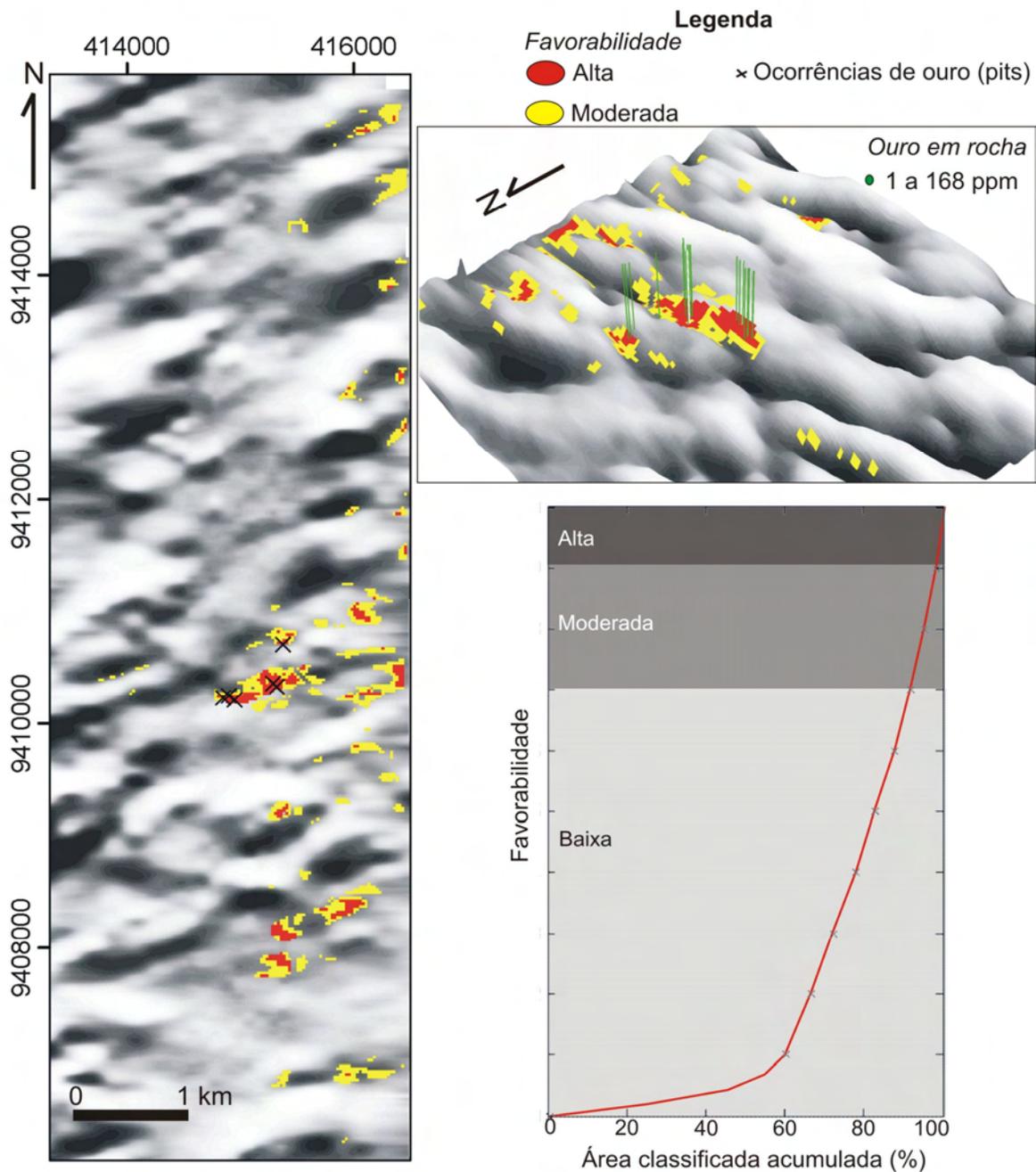


Figura 4.19. Modelo de favorabilidade gerado a partir da aplicação da RBFLN nos dados associados à região do bloco central, sobreposto à imagem do gradiente medido Gy. Gráfico de favorabilidade *versus* área classificada acumulada e integração do resultado com dados de ouro em rocha > 1ppm estão apresentados. O modelo mapeia os alvos conhecidos, bem como mostra novos alvos potenciais.

O resultado gerado para a área do bloco central (**Figura 4.19**), foi validado por meio de dados de ouro em rocha > 1 ppm. Vinte e sete ocorrências pontuais (90%) estão associadas à abrangência classificada por alta ou moderada favorabilidade para mineralizações auríferas, totalizando uma área de 0,505 km² (**Tabela 4.1**).

Tabela 4.1. Quantificação de áreas classificadas por intervalos de favorabilidade (baixa, moderada e alta) em referência à aplicação da técnica RBFLN na região do prospecto 12 de Outubro.

Mapa de favorabilidade gerado pela técnica RBFLN (Figura 4.18)		
Favorabilidade	Área classificada (km²)	Área classificada acumulada (km²)
<i>Alta</i>	0,473	0,473
<i>Moderada</i>	10,888	11,362
<i>Baixa</i>	23,554	(<i>área total classificada</i>) 34,916

Mapa de favorabilidade gerado pela técnica RBFLN (Figura 4.19)		
Favorabilidade	Área classificada (km²)	Área classificada acumulada (km²)
<i>Alta</i>	0,190	0,190
<i>Moderada</i>	0,315	0,505
<i>Baixa</i>	10,454	(<i>área total classificada</i>) 10,959

4.2. Prospectos Rosa de Maio e Bandeirante

4.2.1. PROCESSAMENTO, INTEGRAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS MULTIFONTE

Os prospectos Rosa de Maio e Bandeirante estão situados na porção noroeste da PMT, em uma região caracterizada por *trends* estruturais de direção E-W e N-S muito bem pronunciados, conforme ilustrado na **figura 4.20 (a, b)**. Nesta figura, é possível verificar o forte condicionamento das drenagens e a disposição de aluviões na direção N-S, associados com o rio Parauari, e na direção aproximada E-W, como o Igarapé Anta na área do prospecto Rosa de Maio (**Figura 4.20 (a)**). Estes *trends* principais também são observados na imagem do modelo digital de terreno (SRTM) sombreado (**Figura 4.20 (b)**), podendo-se notar inclusive que a estruturação NW-SE denominada *trend* aurífero Patrocínio-Espírito Santo (Coutinho 2008) é dominante na região dos prospectos Maués e Espírito Santo, passando a ser menos visível na região do prospecto Bandeirante (**Figura 4.20**). A integração da imagem ternária RGB dos radioelementos normalizados (Kn, eThn e eUn) com a imagem SAR-R99B (Lhh) (**Figura 4.20 (c)**) permite analisar, regionalmente, que os prospectos Rosa de Maio e Bandeirante estão inseridos nos domínios de granitos da Suíte Intrusiva Parauari.

De acordo com a empresa Mapex Mineração, Importação e Exportação Ltda., estima-se que somente no prospecto Rosa de Maio tenha havido uma produção de ouro aluvionar de cerca de 20 t, considerando-se a bacia do Igarapé Anta. As mineralizações primárias de ouro neste prospecto estão associadas com veios de quartzo auríferos de alto teor (108 g/ton de Au), granitos cisalhados e alterados hidrotermalmente (6 g/t de Au) e rochas vulcânicas (2 g/t de Au). As zonas de alteração hidrotermal estão orientadas, preferencialmente, nas direções NE-SW, E-W e NNE-SSW, e a principal alteração hidrotermal compreende a sericitização, também havendo metassomatismo potássico e, menos abundantemente, a silicificação.

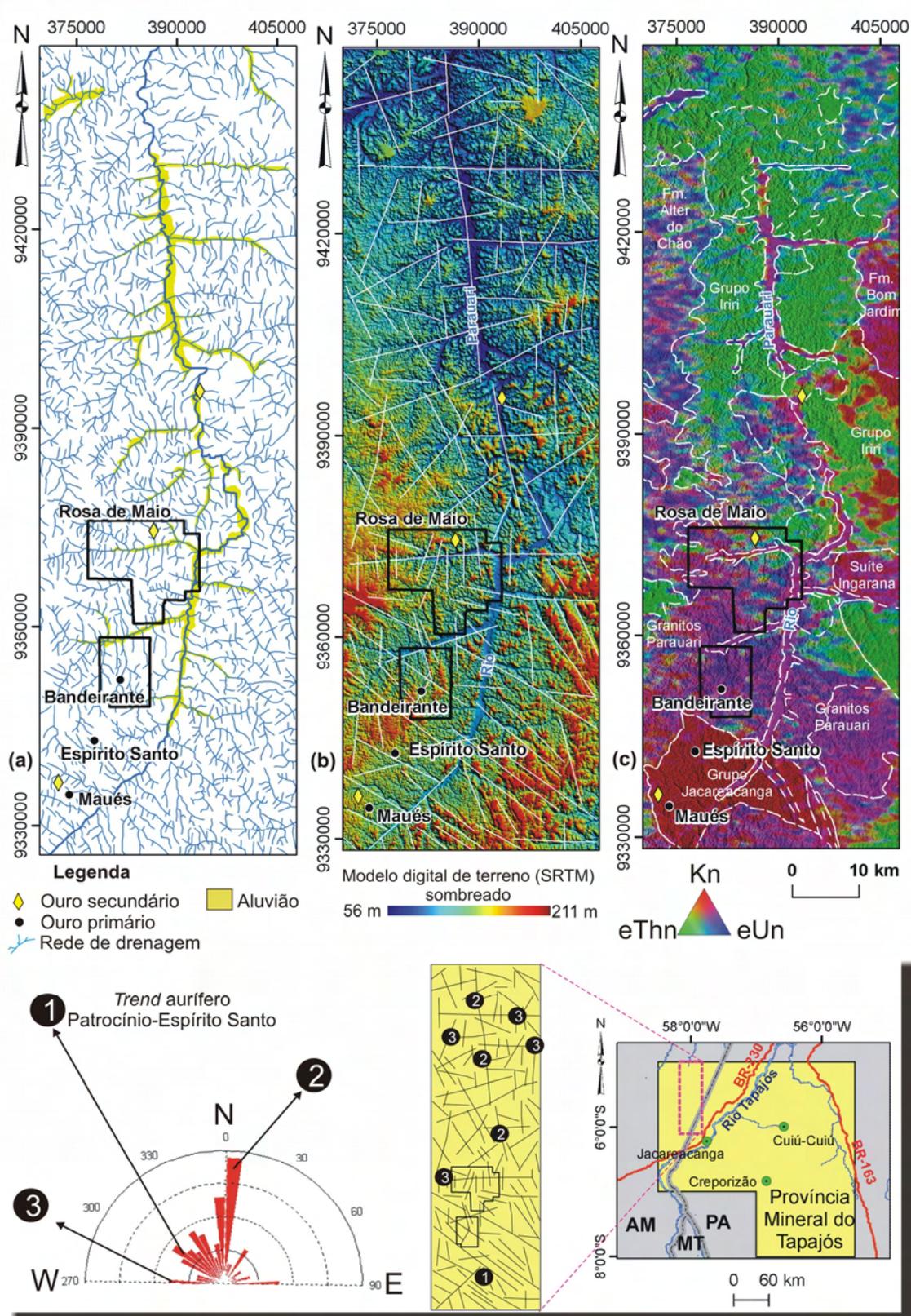


Figura 4.20. Localização regional dos prospectos Rosa de Maio e Bandeirante na porção noroeste da PMT. É possível observar forte estruturação N-S e E-W nesta região por meio da análise de rede de drenagem (a) e de lineamentos predominantes (b). Em (c), as principais unidades litoestratigráficas (Klein *et al.* 2001a) estão sobrepostas à imagem normalizada de K, eTh e eU integrada com o SAR-R99B (Lhh).

Com relação ao prospecto Rosa de Maio, foi verificado em campo que a rocha comumente encontrada nesta localidade consiste em granitos da Suíte Intrusiva Parauari, principalmente os biotita monzogranitos porfiríticos, de granulação muito grossa (**Figura 4.21**).

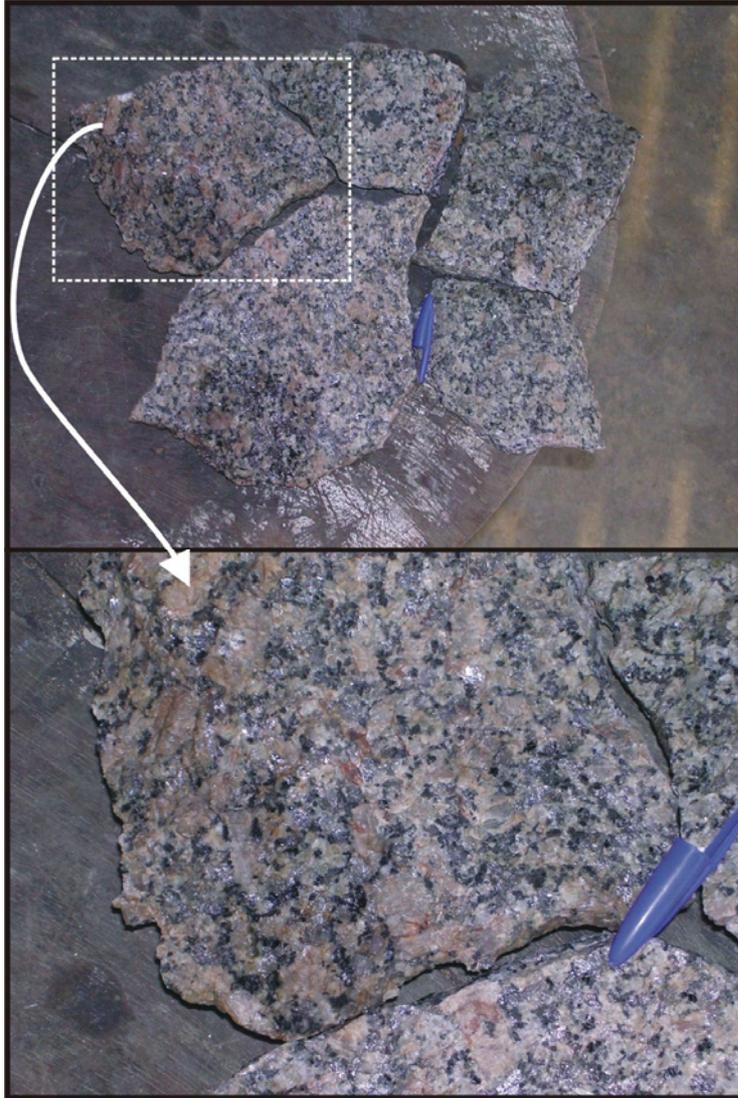


Figura 4.21. Biotita monzogranito porfirítico, de granulação grossa, verificado no prospecto Rosa de Maio, e incluso na Suíte Intrusiva Parauari.

Os biotita monzogranitos foram medidos por meio do gamaespectrômetro portátil, sendo caracterizados por contagens da radiação gama da ordem de 8 cps no canal do K, 6 cps no canal do eU, 5 cps no canal do eTh e 140 cps no canal da contagem total (Ponto RM-MAG02). Já blocos de biotita granitos referentes ao ponto RM-MAG13, caracterizam-se por maiores valores gamaespectrométricos, a saber: 11 cps no canal do K, 8 cps nos canais do eU e do eTh, e 170 cps no canal da contagem total - e estão associados a uma das áreas mineralizada (**Figura 4.22**).

Assim como verificado no prospecto 12 de Outubro, medidas de solos resultaram em um decréscimo acentuado do registro da radiação gama, a exemplo das assinaturas

gamaespectrométricas obtidas no ponto RM-MAG21 (K=4 cps, eU=2.7 cps, eTh=2.2 cps, contagem total=78 cps) (**Figura 4.22**).

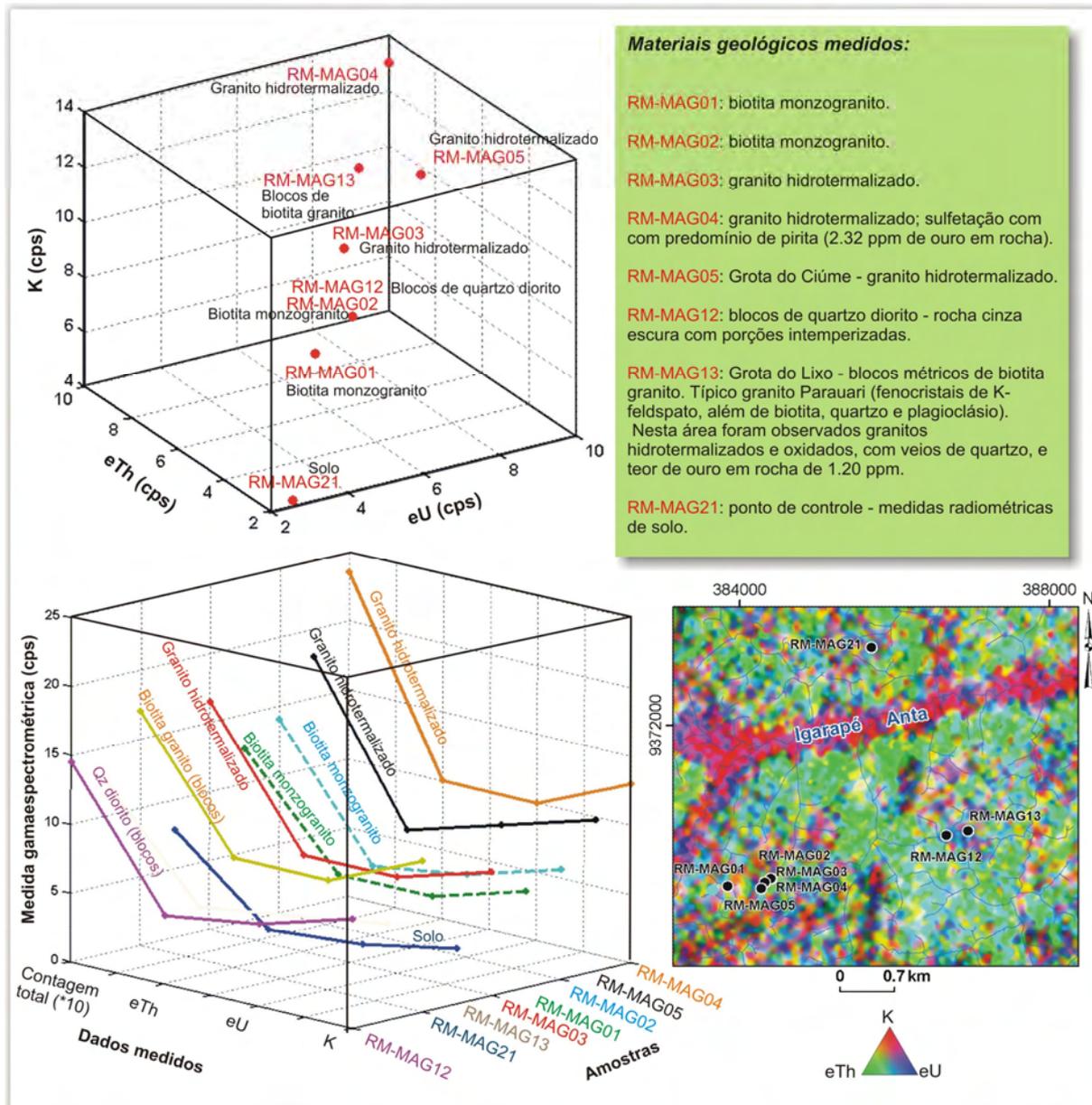


Figura 4.22. Gráficos referentes a medidas gamaespectrométricas de materiais geológicos no prospecto Rosa de Maio. A descrição das amostras medidas é apresentada em quadro adjacente, assim como a localização das medidas efetuadas.

Com relação aos granitos hidrotermalizados, as principais medidas realizadas consistiram em contagens entre 9 e 13 cps no canal do K, 7 a 10 cps no canal do eU, 7 a 10 cps no canal do eTh e entre 165 e 235 cps no canal da contagem total, em referência aos pontos RM-MAG03, RM-MAG04, RM-MAG05, caracterizados por predomínio de sulfetação (pirita) e presença de sericita (**Figura 4.22**).

No prospecto Bandeirante, observam-se saprólitos de granito Parauari compostos por

grãos de quartzo milimétricos, K-feldspato, e caracterizados por coloração rósea. Blocos de granitos com típicos fenocristais de K-feldspatos, biotita e quartzo leitoso são comuns em áreas de drenagem. Devido aos poucos afloramentos *in situ* na área visitada, somente blocos de granitos feldspatizados foram encontrados, e caracterizados pelas maiores contagens de radiação gama em relação ao *background* geológico da região (**Figura 4.23**).

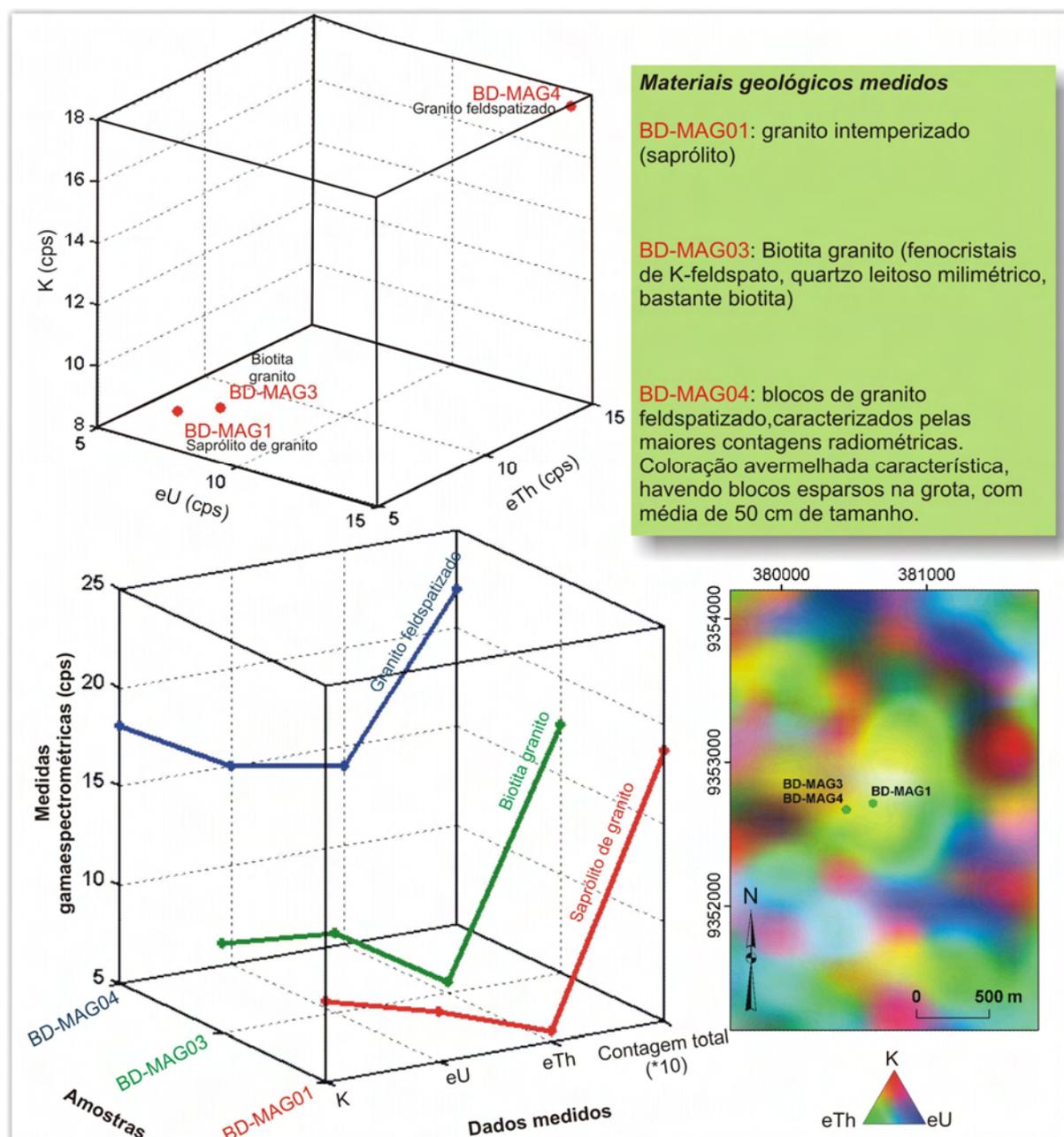


Figura 4.23. Gráficos referentes a medidas gamaespectrométricas de materiais geológicos no prospecto Bandeirante. A descrição das amostras medidas é apresentada em quadro adjacente, assim como a localização das medidas efetuadas.

Esse *background* mencionado está relacionado com as medidas provenientes de biotita granitos, como aquelas obtidas no ponto BD-MAG03 (K=9.5 cps, eU = 9 cps, eTh = 5.5 cps,

contagem total = 175 cps), cujos valores da radiação gama estão abaixo daqueles provenientes de bloco de granito feldspatizado (BD-MAG04 - K=18 cps, eU = 15 cps, eTh = 14 cps, contagem total = 220 cps) (**Figura 4.23**), com destaque ao acréscimo no canal do K.

Analisando-se os dados aerogamaespectrométricos de alta resolução referente ao prospecto Rosa de Maio, observa-se que a maior parte do levantamento possui as assinaturas de rochas atenuadas principalmente pelo desenvolvimento de espessa cobertura de solos, além do fato de existirem grandes aluviões, com destaque ao Igarapé Anta, com aproximadamente 15 km de extensão E-W, onde foram extraídas grandes quantidades de ouro aluvionar nas últimas décadas. A **figura 4.24** ilustra esta situação por meio da observação de composições coloridas ternárias RGB de K, eTh e eU dos dados dos perfis gamaespectrométricos e das respectivas imagens geradas pelo interpolador curvatura mínima, estas integradas com as imagens SAR-R99B (Lhh) e SRTM. Também nesta **figura 4.24**, dois pontos analisados por geoquímica de rocha foram integrados aos dados gamaespectrométricos.

As assinaturas gamaespectrométricas originais das rochas foram obliteradas pelo intemperismo, o que se reflete a partir da cobertura de solos, gerando-se uma dificuldade de se avaliar respostas que possam estar relacionadas com as alterações hidrotermais. Sugere-se que respostas associadas, *a priori*, com alto K (ou com variáveis como o parâmetro F e a razão K/eTh) devem ser prioritárias à prospecção de ouro neste prospecto em função da existência de metassomatismo potássico e sericitização, refletida na tendência verificada nos dois exemplos de dados geoquímicos (*vide* tabela na **figura 4.24**), os quais são caracterizados por valores de K acima da média crustal (amostras LCRM-R-113 e ELRM-R-188 marcadas, respectivamente, por 7.42% e 6.21% de K).

Devido à alta resolução dos dados aerogamaespectrométricos, foi possível observar assinaturas de parte do enxame de diques máficos que intrudiu a região há aproximadamente 510 Ma (*cf.*, Santos *et al.* 2002) (**Figura 4.24**). No entanto, pelas condições ambientais predominantes, aluviões de pequeno porte e regolitos também foram destacados. Isso desfavorece a tentativa inicial de análise de K hidrotermal, ou secundário, uma vez que as assinaturas são ambíguas às das aluviões desta região. Dentro deste contexto, as imagens do parâmetro F e da razão K/eTh (**Figura 4.25**) são caracterizadas por altos valores relacionados com aluviões de grande e de pequeno porte, sendo que muitas das anomalias de ouro em rocha estão especialmente associadas com estas ocorrências. Sabidamente, tais assinaturas gamaespectrométricas não estão relacionadas com hidrotermalismo. Por outro lado, os espessos perfis de solo são caracterizados por baixos valores de parâmetro F e da razão K/eTh

(**Figura 4.25**), havendo, inclusive, ocorrências de anomalias de ouro em rocha relacionadas com estas regiões. Isto demonstra que o enriquecimento potássico hidrotermal pode ter suas respostas obliteradas pelas severas condições ambientais da região amazônica, e que são de difícil percepção mesmo ao se usar dados aerogeofísicos de alta densidade de amostragem.

Todas essas considerações acima são visualizadas nas três zonas mais prospectivas, denominadas pela empresa Mapex, Mineração, Importação e Exportação Ltda. de Sela, Centro-norte e Buriti (*vide* indicações na **Figura 4.25**).

Os 7323 dados de geoquímica de ouro de solo disponíveis no prospecto Rosa de Maio foram tratados por meio da aplicação da simulação indicatriz seqüencial (SIS), analogamente ao realizado com o mesmo tipo dado disponível ao prospecto 12 de Outubro.

Os dados de ouro em solo do prospecto Rosa de Maio foram coletados considerando-se uma malha E-W espaçada em torno de 400 m, e outra malha N-S, espaçada a cada 50 m, aproximadamente (**Figura 4.26**). Na zona do prospecto Buriti, a amostragem foi mais detalhada, com espaçamentos da ordem de 25 m (N-S) e entre 200 m e 100 m (E-W) (**Figura 4.27**).

Esses dados geoquímicos foram reclassificados a partir da criação da variável indicatriz ouro em solo, ou seja, variável binária cujo valor 0 está relacionado com anomalias de ouro menores que 50 ppb, enquanto que o valor 1 associa-se com anomalias de ouro maiores ou iguais a 50 ppb (**Figura 4.26**).

Posteriormente, essa variável indicatriz foi processada por meio do uso da SIS, considerando-se células do tamanho de 50 m. O estudo variográfico foi realizado através da determinação do variograma experimental orientado na direção do azimute 320, considerando-se 30 passos de 250 metros, enquanto que a modelagem deste variograma experimental caracterizou-se pela estipulação de duas estruturas de modelo esférico, além do efeito pepita. Maiores informações sobre os parâmetros utilizados encontram-se na **figura 4.26**.

Assim como no prospecto 12 de Outubro, optou-se pela simulação de 500 imagens. Três exemplos podem ser vistos na **figura 4.26**, estando designados como SIS122, SIS177 e SIS400. A média das 500 imagens simuladas foi posteriormente calculada e, a partir desta, um corte de probabilidade de ocorrência da variável indicatriz ouro em solo maior que 25% foi realizado (**Figura 4.26**).

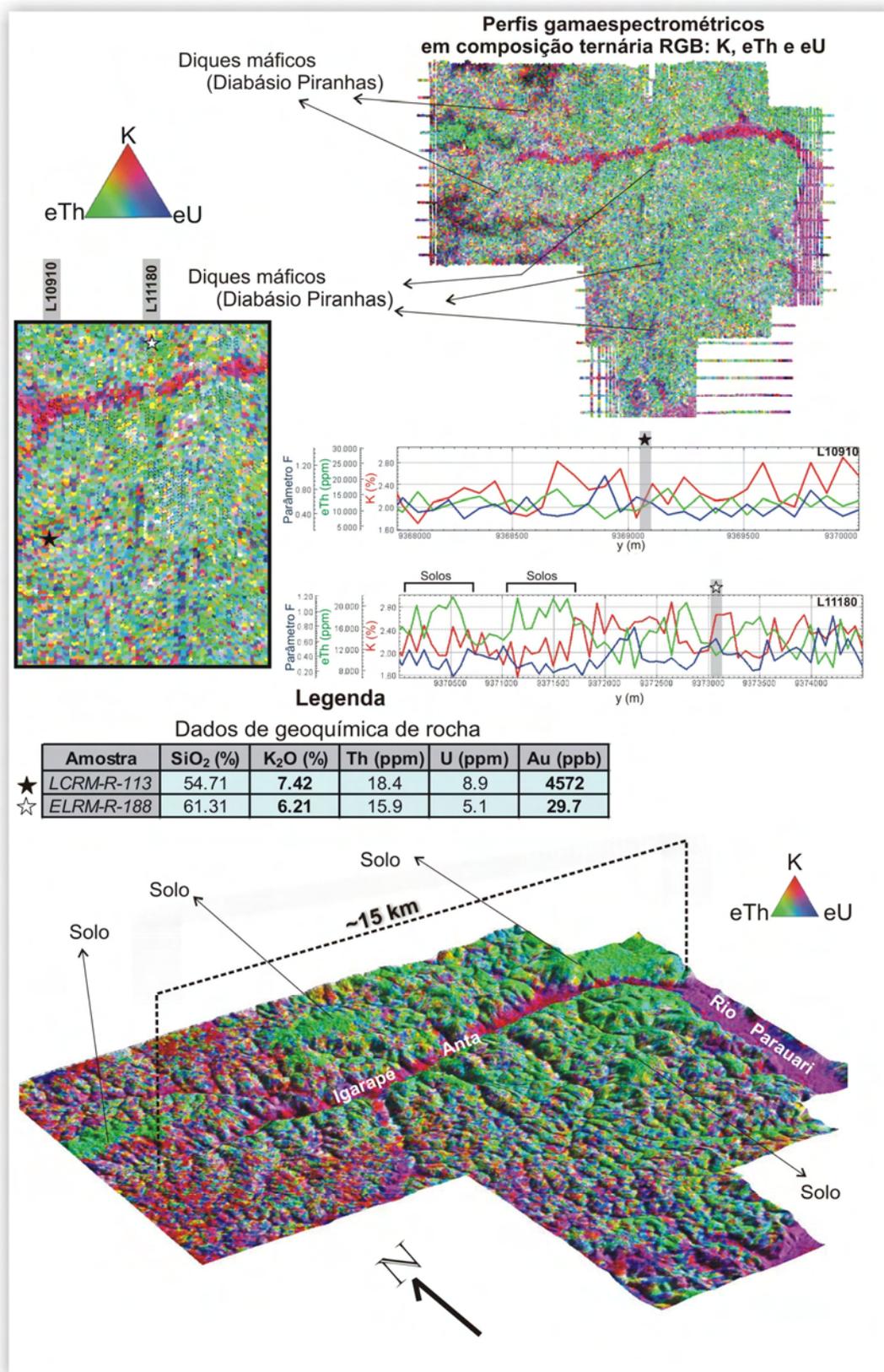


Figura 4.24. Composições coloridas ternárias RGB de K, eTh e eU para dados dos perfis gamaespectrométricos e das respectivas imagens geradas pelo interpolador curvatura mínima. Esta última foi integrada com a imagem SAR-R99B (Lhh) e o SRTM. Notar que grande parte da área do prospecto Rosa de Maio é caracterizada pelo predomínio de grandes aluviões e espessas coberturas de solos (altos valores de eTh).

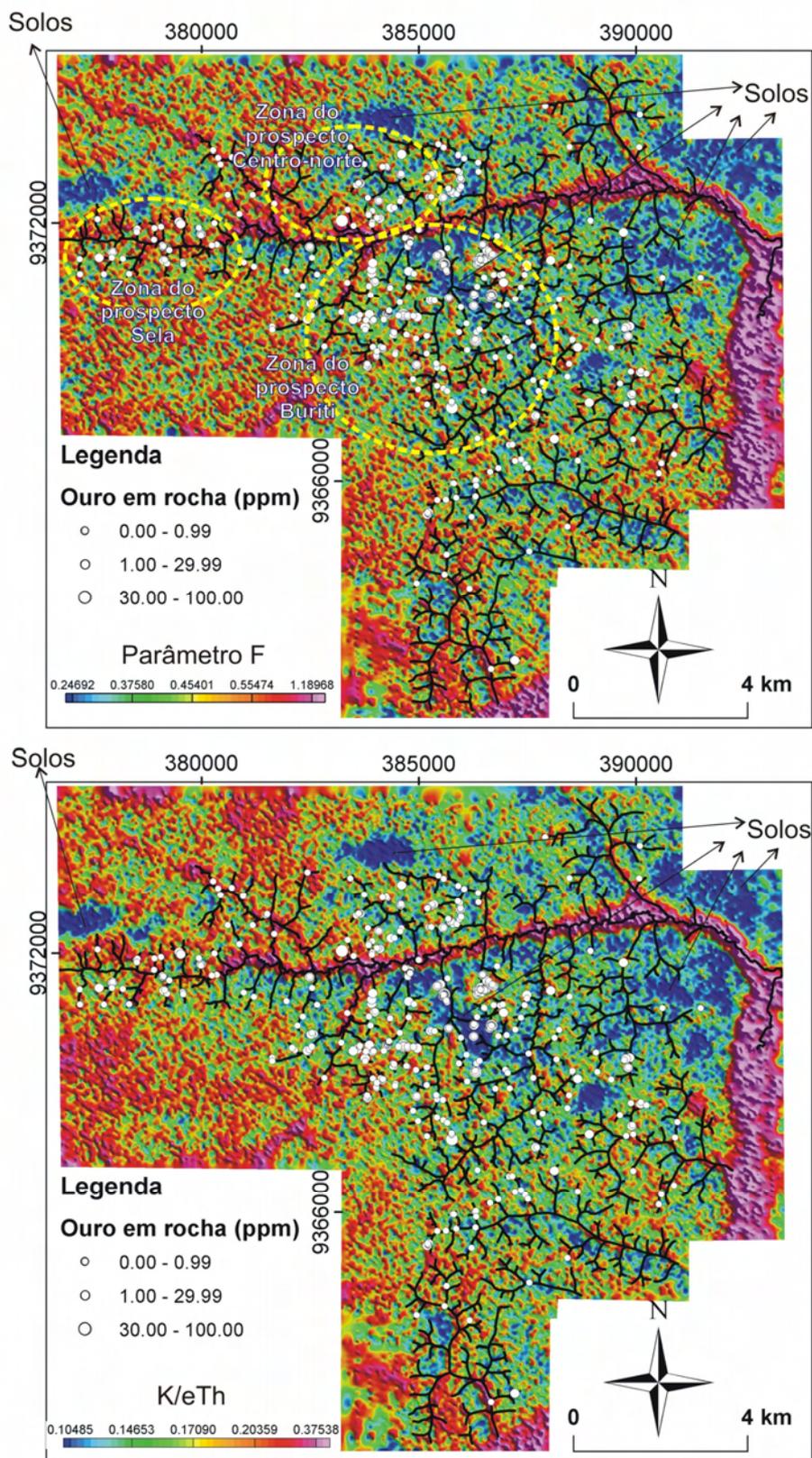


Figura 4.25. Imagens do parâmetro F e da razão K/eTh, geradas na tentativa de realçar K anômalo que possa estar relacionado com hidrotermalismo. A drenagem mapeada pela empresa Mapex Mineração, Importação e Exportação Ltda. está representada pelas linhas pretas e os dados de geoquímica de ouro em rocha estão apresentados por círculo branco. As zonas prospectivas denominadas Sela, Centro-norte e Buriti também estão indicadas.

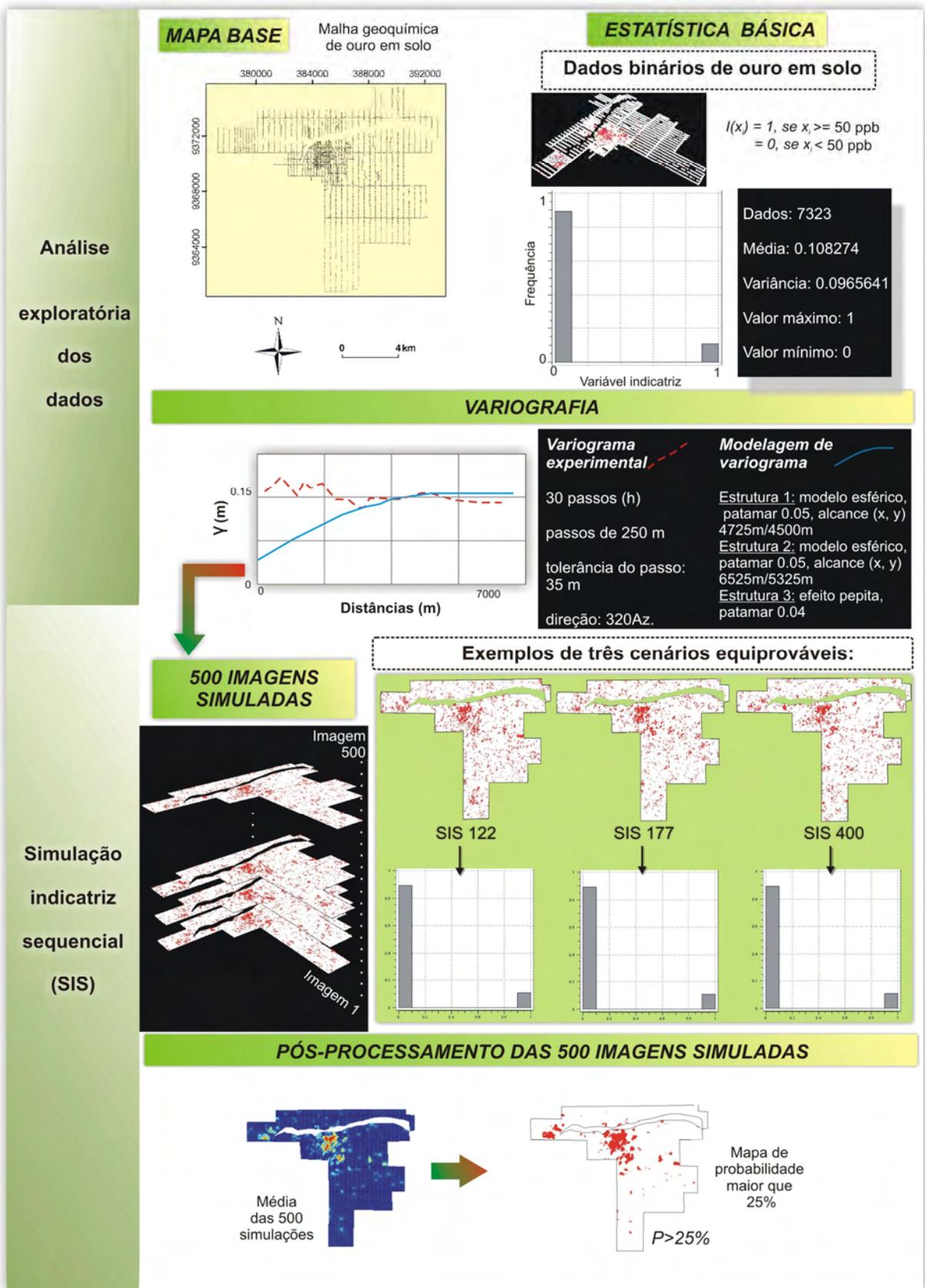


Figura 4.26. Aplicação da simulação indicatriz sequencial aos dados amostrados de ouro em solo do prospecto Rosa de Maio e indicação dos principais parâmetros utilizados.

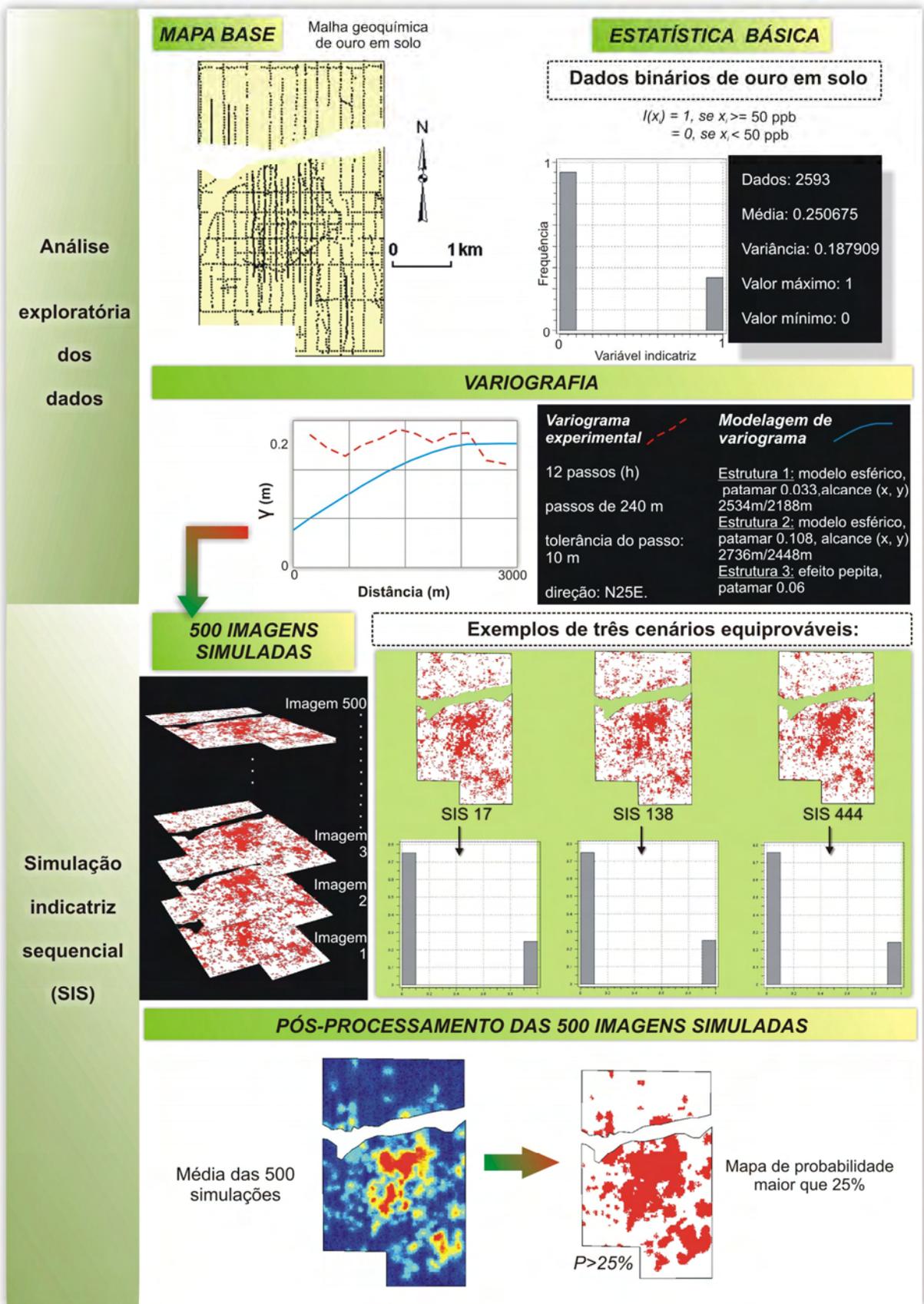


Figura 4.27. Aplicação da simulação indicatriz sequencial aos dados amostrados de ouro em solo na região do prospecto Buriti e indicação dos principais parâmetros utilizados.

Similarmente, os dados de ouro em solo em malha mais densa presentes na região do prospecto Buriti também foram processados por meio da simulação indicatriz sequencial, conforme esquematizado na **figura 4.27**, considerando-se células de 25 m, e obtendo-se os mesmos produtos anteriormente citados (mapa de probabilidade de ocorrência da variável indicatriz ouro em solo e o mapa de corte de probabilidade maior que 25%). Maiores informações dos parâmetros utilizados estão mostradas na **figura 4.27**.

A análise do mapa de probabilidade de ocorrência da variável indicatriz solo maior que 25%, conforme mostrado na **figura 4.28**, revela a disposição espacial das três principais áreas anômalas denominadas de zonas dos prospectos Sela, Centro-norte e Buriti. Com base na **figura 4.28**, é possível observar que as anomalias auríferas da região do prospecto Sela parecem estar segmentadas pela instalação ou reativação de estruturas E-W, aparentemente de movimentação dextral. Esta estruturação E-W, além de ser um dos *trends* preferenciais da ocorrência de zonas de alteração hidrotermal no Rosa de Maio, neste caso, está associada à atual disposição do Igarapé Anta.

A zona do prospecto Centro-norte é caracterizada por ocorrências pontuais anômalas, diferentemente de sua contraparte ao sul, denominada de prospecto Buriti, a qual se caracteriza por uma grande anomalia com tendência circular, e com eixos, aproximados, de 3 km (N-S) e 2,6 km (E-W). Esta porção do prospecto Rosa de Maio, marcada pela maior prioridade prospectiva, ainda é caracterizada por predomínio de alinhamentos de drenagem próximo a E-W (*cf.*, **Figura 4.28**).

Com o intuito de observar feições importantes que possam estar relacionadas com anomalias de ouro na região do prospecto Rosa de Maio, optou-se pela comparação de imagens magnetométricas e as respectivas interpretações, conforme apresentado nas **figuras 4.29 e 4.30**. Nestas figuras, estão mostradas as imagens dos gradientes medidos G_y e G_x , das derivadas horizontais de primeira ordem do campo magnético anômalo (D_y , D_x), da amplitude do gradiente horizontal total (calculada por meio do uso das imagens dos gradientes medidos G_y e G_x), e da amplitude do sinal analítico. Também efetuou-se uma interpretação das principais estruturas nas imagens do modelo digital de terreno e do SAR-R99B (Lhh), conforme apresentado na **figura 4.31**.

A partir das **figuras 4.29, 4.30 e 4.31**, é possível efetuar as seguintes observações:

(a) as imagens dos gradientes horizontais medidos (G_y e G_x) são capazes de revelar feições magnéticas de maneira superior às suas imagens equivalentes calculadas por meio das derivadas de primeira ordem do campo magnético anômalo (D_y e D_x);

- (b) em todas as imagens magnetométricas, fica claro que os maiores valores de ouro em rocha estão correlacionados com a proximidade espacial da região do enxame de diques máficos, além das estruturas E-W e NE-SW, predominantemente;
- (c) na imagem do gradiente medido Gy, especificadamente nos domínios da zona do prospecto Buriti, é possível observar feições semi-circulares, ou concêntricas, com maior eixo em torno de 700 m de extensão (vide **Figura 4.29 (a)**); na imagem da derivada horizontal na direção y, é possível notar, em partes, este padrão, mas sem a resolução apresentada na imagem Gy. Padrão radial de drenagem também foi passível de observação em imagens SAR e do modelo digital de terreno;
- (d) os maiores valores de ouro em rocha associam-se com amplitudes do sinal analítico muito altas em função da existência dos diques máficos; subordinadamente, valores médios a altos de ouro encontram-se relacionados com média amplitude do sinal analítico.
- (e) os diques máficos aparentam estar deformados e segmentados;
- (f) as imagens do modelo digital de terreno e do SAR-R99B (Lhh) revelam predomínio de estruturas E-W, NE-SW, N-S, NW-SE e NNE-SSW na região dos prospectos Sela, Buriti e Centro-norte.

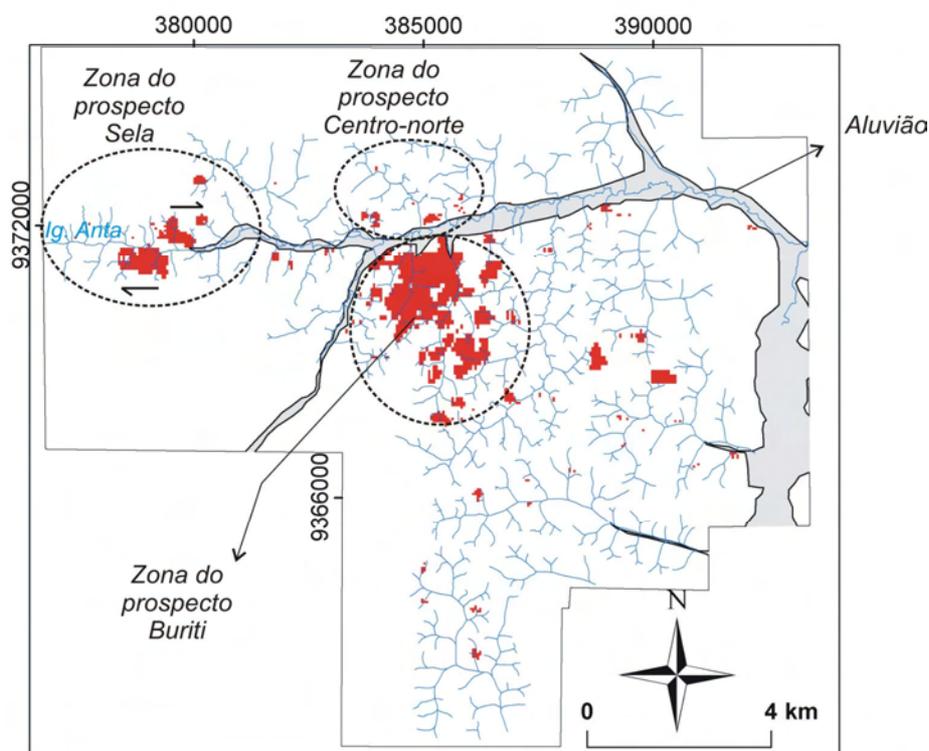


Figura 4.28. Imagem da probabilidade de ocorrência da variável ouro em solo maior que 25%, integrada com a drenagem mapeada pela empresa Mapex Mineração, Importação e Exportação Ltda., e principais aluviões. Observar que as regiões mais anômalas para ouro em solo são designadas como zonas do prospecto Sela, Buriti e Centro-norte.

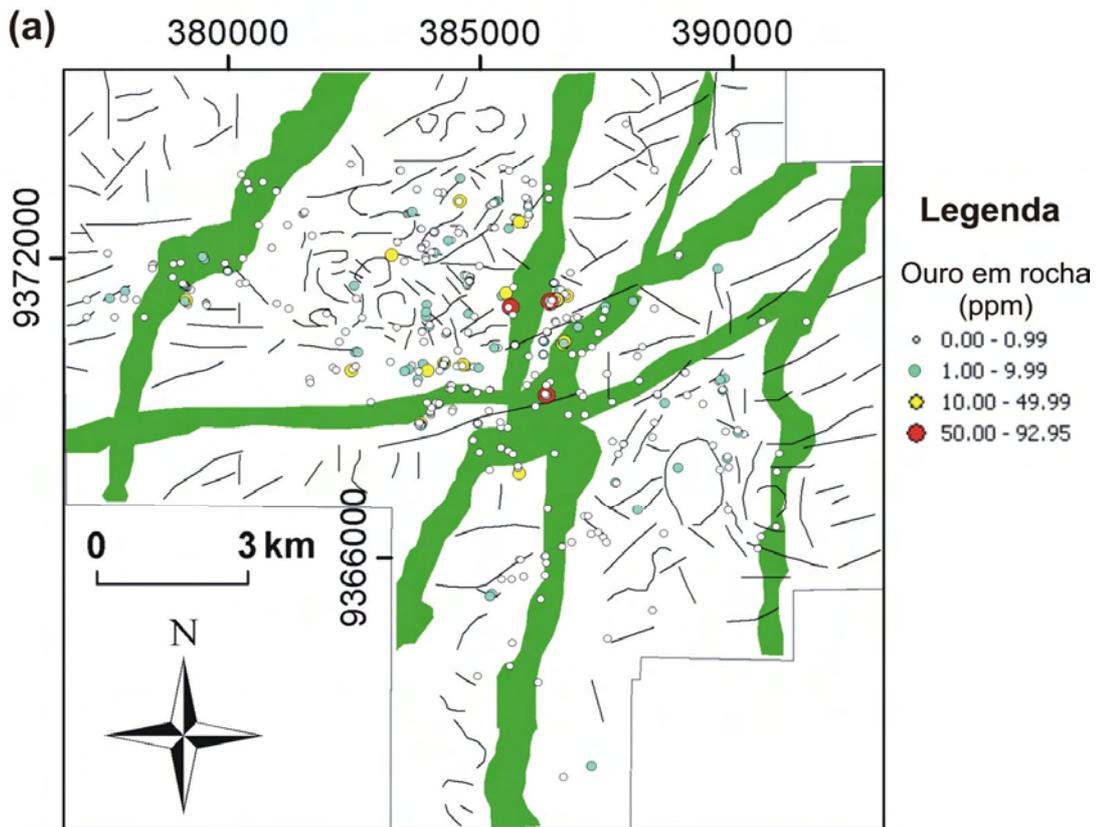
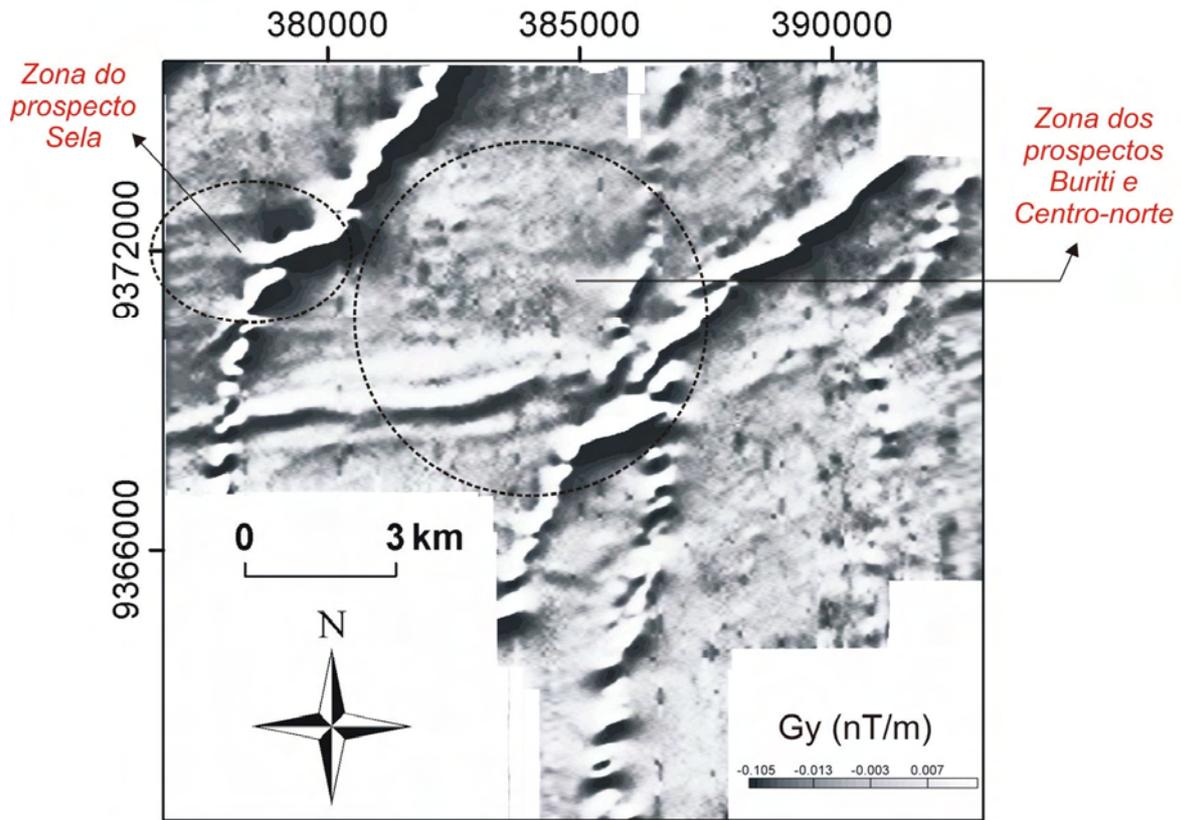


Figura 4.29. Comparação de imagens magnetométricas e interpretação de principais lineamentos. Os principais diques máficos estão representados por polígonos verdes: (a) gradiente horizontal na direção y (Gy) (Continua).

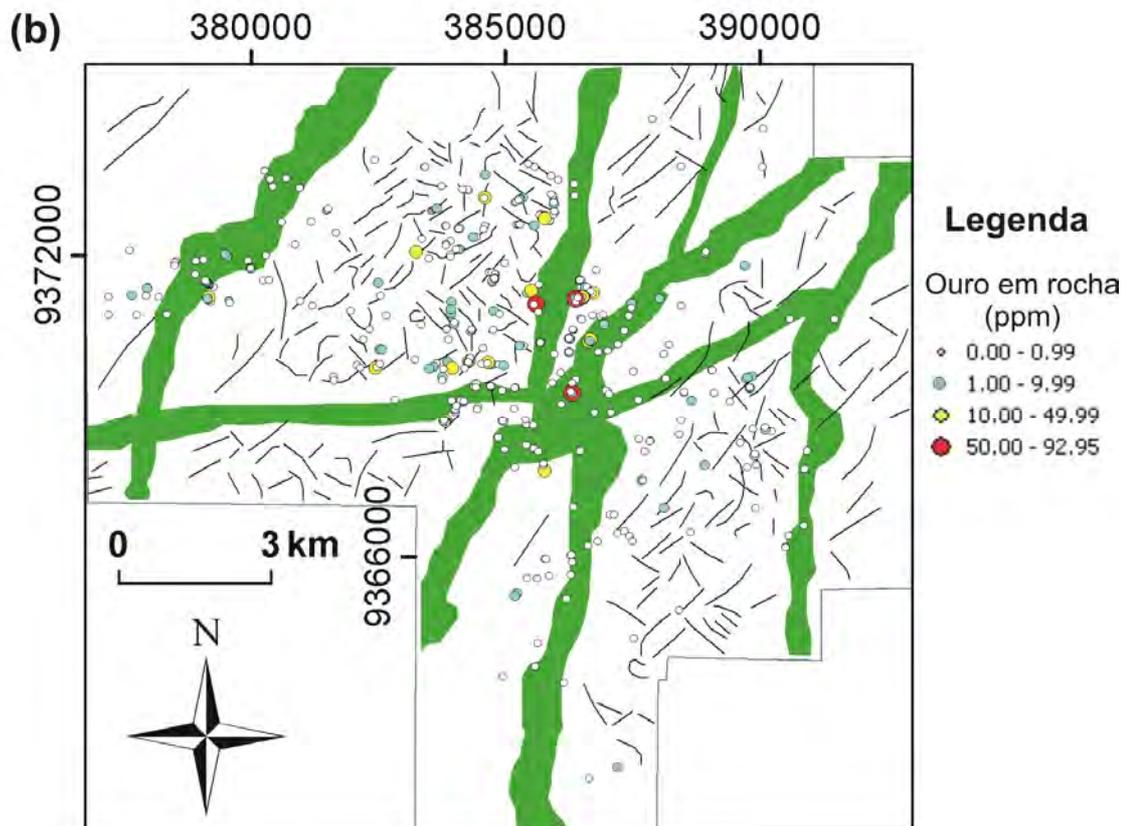
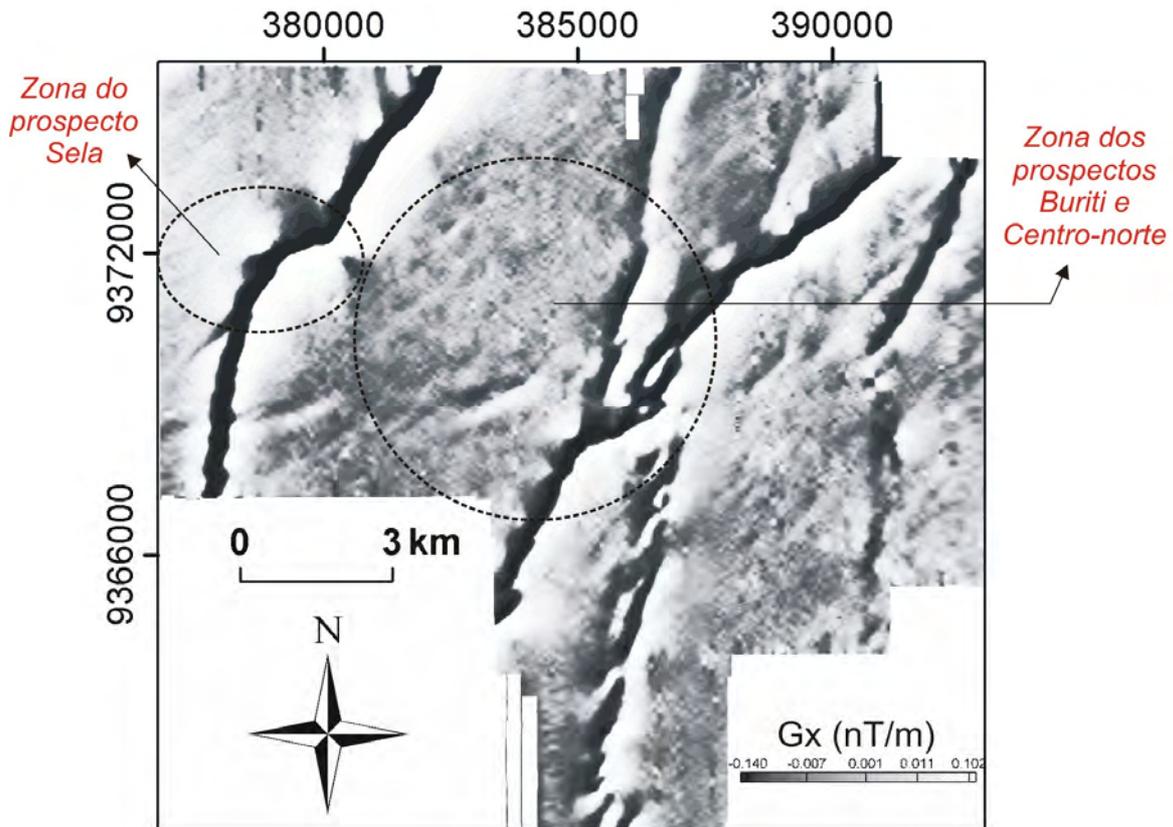


Figura 4.29. (Continuação) (b) gradiente horizontal na direção x (G_x) (Continua).

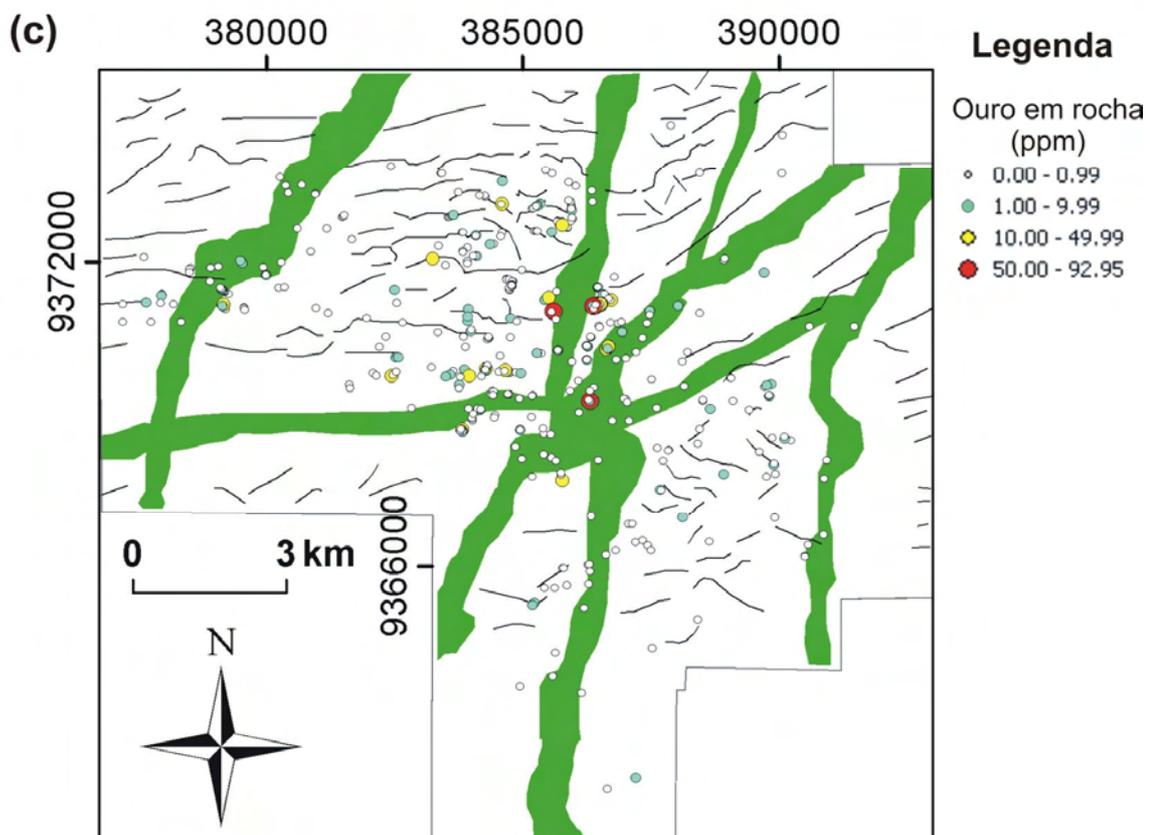
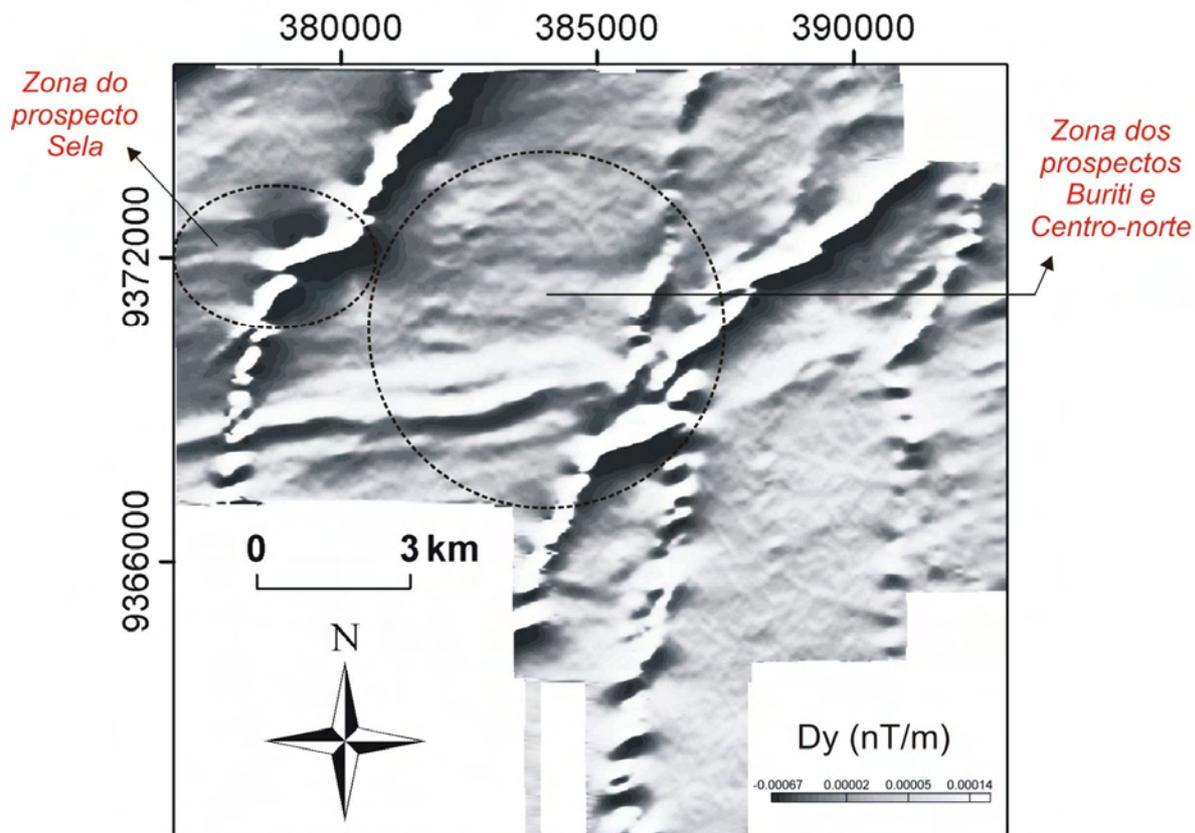


Figura 4.29. (Continuação) (c) primeira derivada horizontal na direção y do campo magnético anômalo (Dy) (Continua).

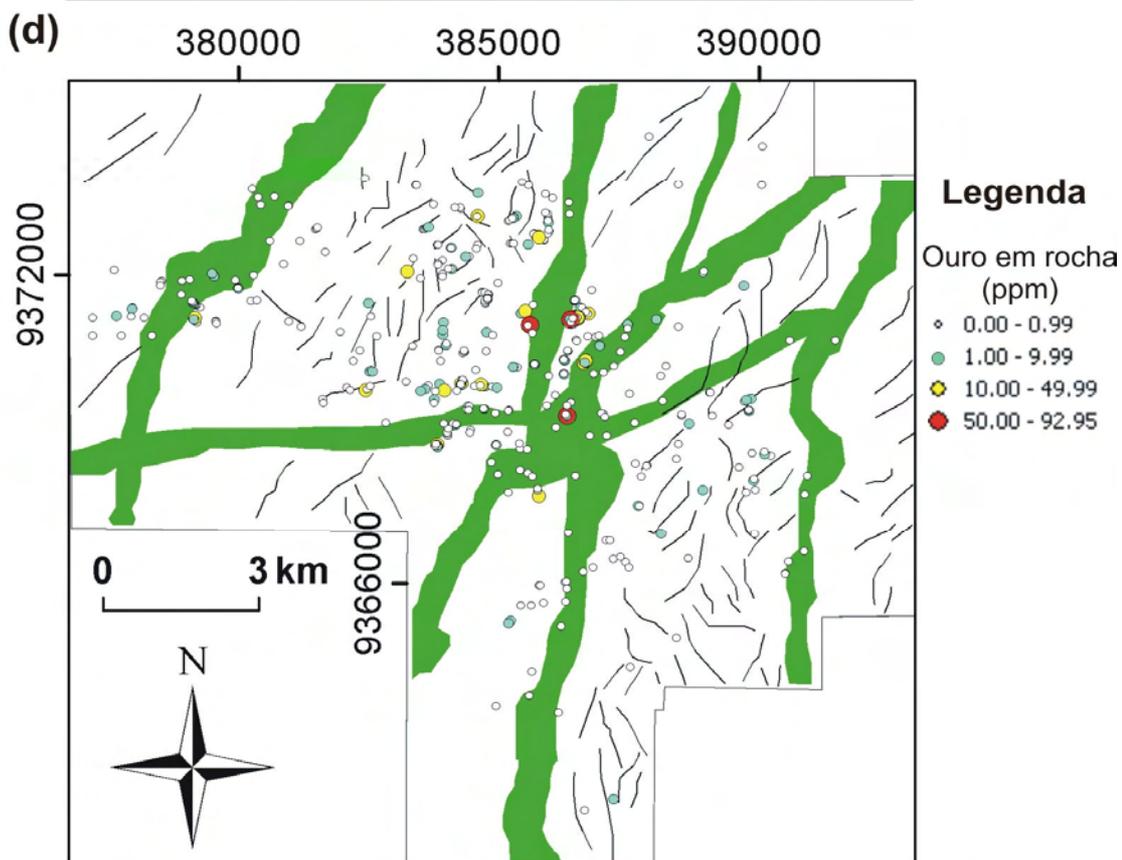
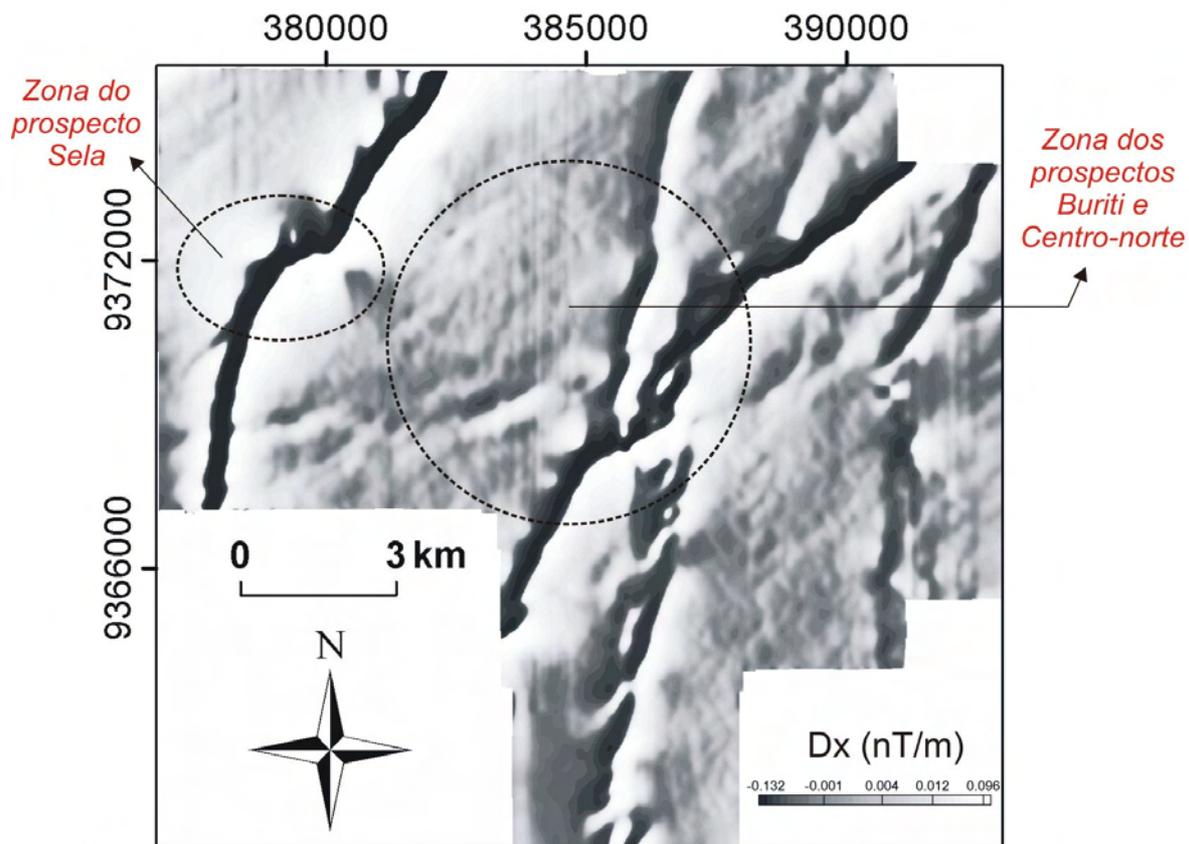


Figura 4.29. (Continuação) (d) primeira derivada horizontal na direção x do campo magnético anômalo (Dx).

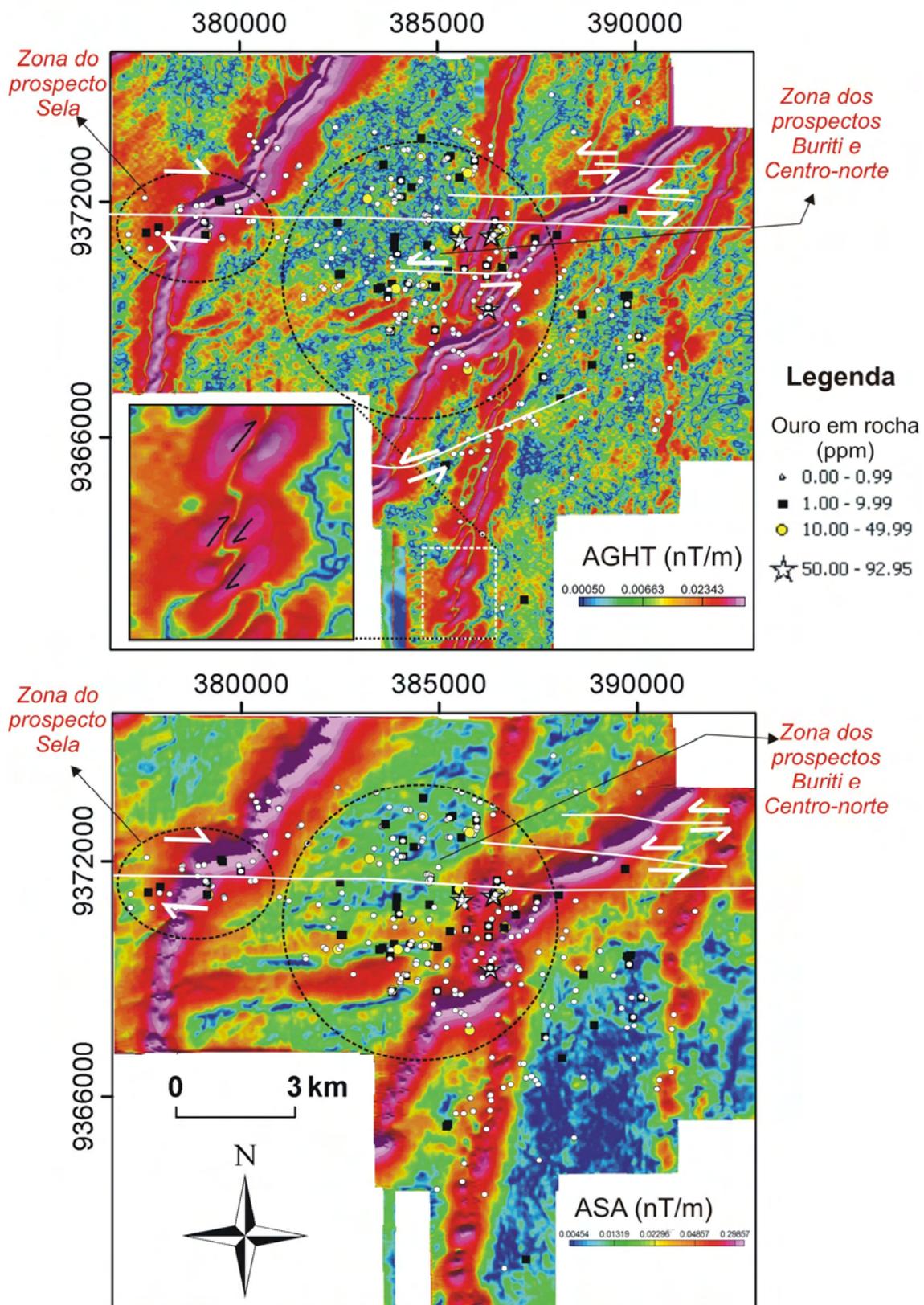


Figura 4.30. Imagens da amplitude do gradiente horizontal total (calculada com uso dos gradientes medido G_x e G_y), e da amplitude do sinal analítico, integradas com anomalias de ouro em rocha.

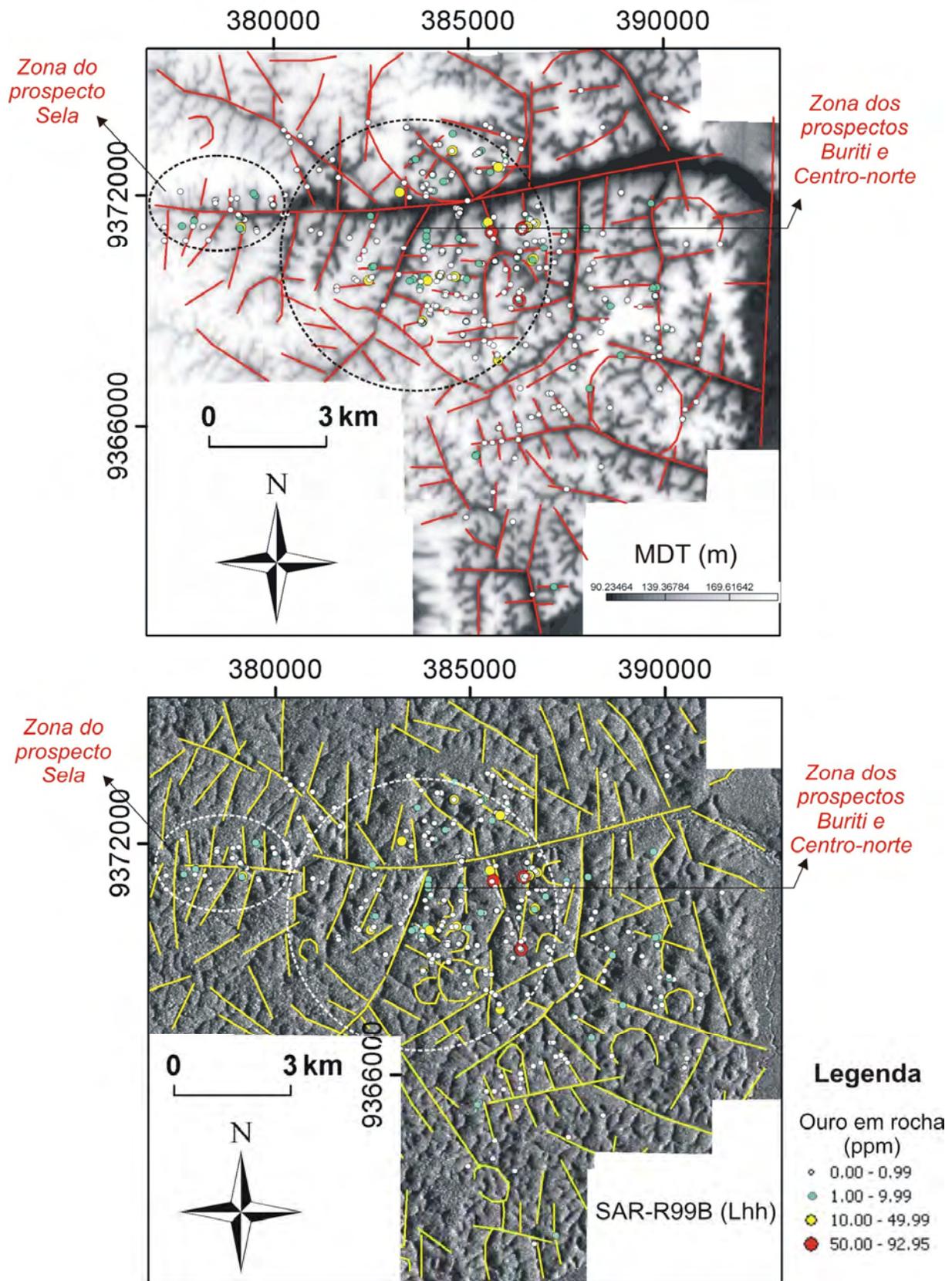


Figura 4.31. Interpretação de principais estruturas a partir das imagens do modelo digital de terreno (derivado dos dados adquiridos no aerolevantamento geofísico) e da imagem SAR-R99B (Lhh).

A integração da imagem da probabilidade de ocorrência da variável indicatriz ouro em solo maior que 25% com a imagem do gradiente medido Gy, mostrada na **figura 4.32**, reforça ainda mais a questão de que as anomalias de ouro estão concentradas nas proximidades dos diques máficos.

Esses diques, denominados Diabásio Piranhas (*cf.*, Santos *et al.* 2002), fazem parte de um extenso enxame que foi datado por Santos *et al.* (2002) pelo método U-Pb em badeleíta, derivando a idade de cerca de 510 Ma. Desta maneira, subentende-se que estas intrusões máficas são de uma época pós-mineralização paleoproterozóica e, desta forma, não possuem uma contemporaneidade para terem atuado como barreira geoquímica à precipitação do ouro. As intrusões, inclusive, devem ter sido favorecidas pelas estruturas pré-existentes, como as de direção E-W, NE-SW e NNE-SSW (algumas das quais podem ter tido um papel importante à percolação de fluidos hidrotermais para a origem das mineralizações). Um papel que pode estar associado aos diques consiste em uma possível remobilização do ouro paleoproterozóico (*cf.*, Juliani 2007, inédito), o que poderia explicar a tão evidente associação das anomalias auríferas em solo e em rocha com esta unidade máfica (*cf.*, **Figura 4.32**). Adicionalmente, de acordo com Santos *et al.* (2002), os diques máficos que hospedam mineralizações de ouro na PMT possuem uma idade estimada em cerca de 1,89 Ga. Entretanto, mais trabalho é necessário para determinar se todos ou a maioria dos diques deste enxame possuem a mesma idade obtida por Santos *et al.* (2002). O magmatismo cambriano Piranhas pode ser relacionado com um estágio de rifteamento intraplaca anterior à sedimentação paleozóica da Bacia Amazônica quando falhas permitiram a ascensão de magma toleítico (Santos *et al.* 2002). A idade de 510 Ma é a máxima estimada para a base do Paleozóico na Bacia Amazônica (Santos *et al.* 2002).

Outras feições importantes verificadas na **figura 4.32**, assim como nas imagens magnetométricas das **figuras 4.29** e **4.30**, compreendem a deformação do enxame de diques, aparentemente em mais de um evento que, desta maneira, estariam associados a períodos pós-intrusão máfica (<510 Ma). Na região do prospecto Sela, a deformação do dique, aliada à aparente secção das anomalias de ouro (*cf.*, **figuras 4.28** e **4.32**) parecem estar relacionadas com uma reativação da estrutura E-W, marcada por baixo gradiente magnético e análoga ao local de instalação do Igarapé Anta. Pelo menos duas reativações, uma de movimentação dextral e outra sinistral, parecem ter ocorrido na região após a intrusão máfica (*cf.*, **Figura 4.30**).

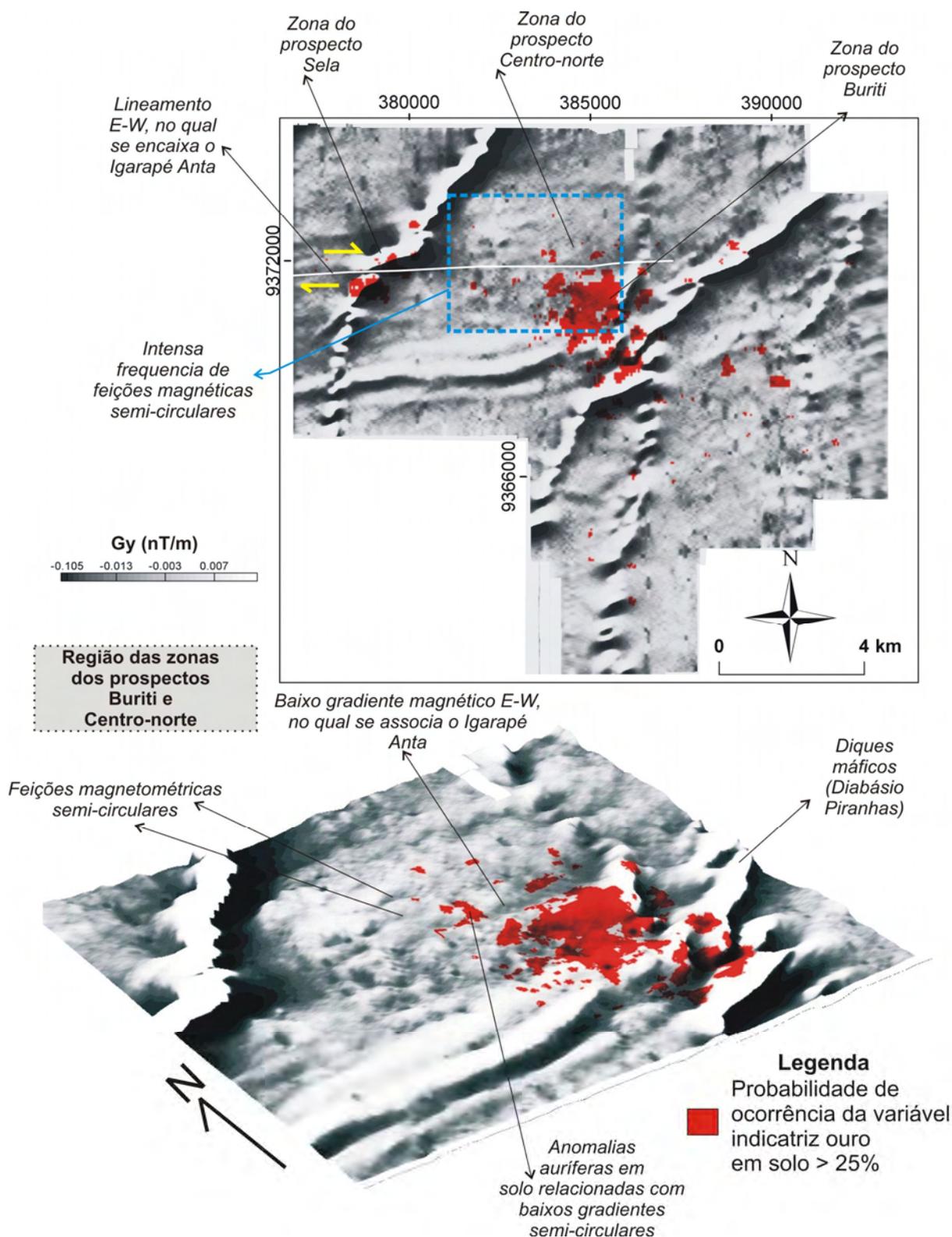


Figura 4.32. Imagem do gradiente medido na direção y (Gy) integrada com o resultado de probabilidade de ocorrência da variável indicatriz ouro em solo maior que 25%. Estão indicadas as principais áreas prospectivas, o enxame de diques máficos, feições semi-circulares e baixos gradientes E-W, o qual está associado à atual disposição do Igarapé Anta.

Ainda de acordo com a **figura 4.32**, é possível observar que anomalias auríferas na

região da zona do prospecto Centro-norte estão associadas com estruturas semi-circulares, enquanto que a feição de baixos gradientes associadas à atual disposição do Igarapé Anta, torna esta região interessante do ponto de vista prospectivo, a fim de averiguar o substrato subjacente. Com respeito às feições semi-circulares, estas são interessantes do ponto de vista prospectivo pois podem ter alguma relação com padrão concêntrico de cúpulas de granitos, os quais, seguindo-se de modelo metalogenético, podem estar associadas com mineralizações, como as do tipo *intrusion related* (cf., Pinto *et al.* 2009).

Convergingo para uma síntese a respeito das principais estruturas que configuram as mais importantes zonas de influência metalogenética no prospecto Rosa de Maio, as principais tendências estão indicadas na **figura 4.33**, e integradas com as principais anomalias de ouro em solo e imagem do modelo digital de terreno.

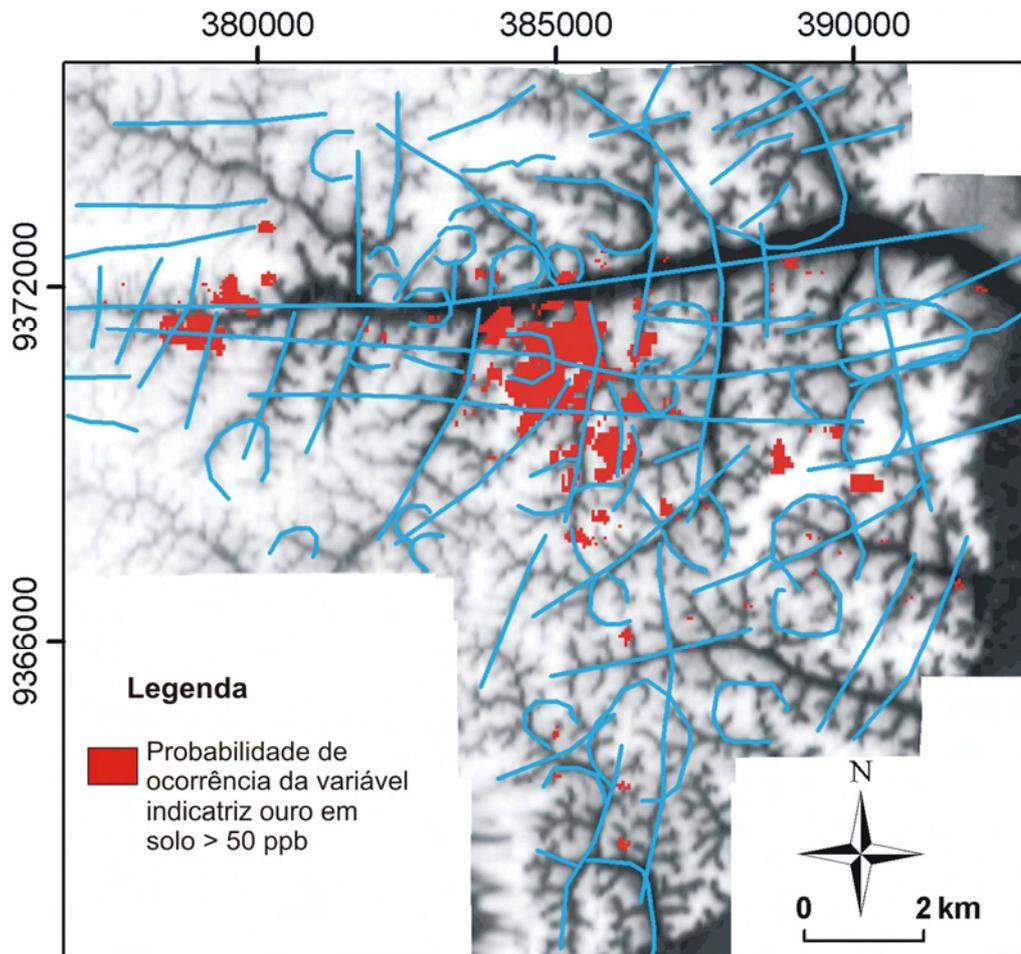


Figura 4.33. Integração de principais estruturas interpretadas nas imagens magnetométricas e de sensoriamento remoto com a imagem de geoquímica de ouro em solo gerada pela simulação indicatriz seqüencial e modelo digital de terreno.

Com relação à região do prospecto Bandeirante, esta é caracterizada a sul por uma estruturação NW-SE associada com o *trend* aurífero Patrocínio-Espírito Santo e, na porção

centro-norte, por uma estruturação similar àquela observada no prospecto Rosa de Maio: lineamentos E-W (*e.g.*, onde o Igarapé Grande se encaixa), NE-SW e NNE-SSW muito visíveis na imagem SAR-R99B (Lhh) (**Figura 4.34**). Especificadamente, os valores de ouro em rocha mais anômalos (>10 ppm) estão inseridos em região fortemente estruturada nas direções NE-SW e NW-SE (**Figura 4.34**).

Dados de ouro em rocha integrados com imagens magnetométricas (**Figura 3.35**) revelam que as maiores anomalias estão associadas à proximidade de diques máficos (Diabásio Piranhas), em um domínio marcado por valores médios a altos da amplitude do sinal analítico (**Figura 3.35 (d)**). Estes diques, regionalmente, pertencem ao mesmo enxame quilométrico que afeta o prospecto Rosa de Maio. A observação das imagens dos gradientes medidos Gy e Gx, da primeira derivada vertical (Dz) e da ASA mostra feições lineares rasas caracterizadas por uma orientação preferencial E-W, além dos próprios diques máficos, marcados por orientação NE-SW (**Figura 3.35**).

Todas as características geofísicas e estruturais mencionadas acima, além do ambiente associado com granitos pós-colisionais Parauari, são similares àqueles encontrados no prospecto Rosa de Maio e, em virtude da proximidade destes dois prospectos, um mesmo sistema metalogenético pode ser esperado.

Além da presença de grandes aluviões, marcadas por altos valores de K e médios de eU, e relacionadas ainda com uma superfície mais lisa na imagem de radar, esta região é caracterizada principalmente pelos granitos da Suíte Intrusiva Parauari, havendo uma resposta gamaespectrométrica associada, em geral, com valores médios de K e eTh e mais baixos de eU, sendo que nestas circunstâncias estão presentes as anomalias auríferas atualmente constatadas pela empresa Mapex Mineração, Importação e Exportação Ltda. (**Figura 4.36**). Destaca-se que os valores mais anômalos de ouro em rocha (>10 ppm) estão associados espacialmente com a ocorrência de blocos de granitos feldspatizados verificada em campo, os quais consistem naqueles que propocionaram o maior registro de radiação gama por meio do uso do gamaespectrômetro portátil, sobretudo no canal do K (*cf.*, medida pontual BD-MAG04 da **Figura 4.23**).

Diferentemente dos outros prospectos abordados nesta dissertação de mestrado, o prospecto Bandeirante ainda se encontra em fase inicial de trabalho e investigação e não possui densidade de dados. Desta forma, e em virtude de pouco tempo disponível em campo, somente a aquisição de dados de maior resolução e melhoramento da malha geoquímica (rocha e solo) poderá incrementar o estudo do mesmo.

4.2.2. MODELAGEM DE DADOS ESPACIAIS

A técnica *Radial Basis Functional Link Net* (RBFLN) (Looney & Yu 2000) foi aplicada aos dados disponíveis ao prospecto Rosa de Maio. Para esta tentativa de priorizar regiões favoráveis a ouro neste prospecto, foram selecionadas as imagens dos gradientes medidos Gx e Gy, da ASA, as estruturas mostradas no mapa da **figura 4.33** (entendidas como prioritárias para a prospecção aurífera), além da imagem de ouro em solo gerada pela simulação indicatriz sequencial (**Figura 4.28**). No caso das estruturas, *buffers* foram criados com as seguintes distâncias: 0-100 m, 100-200 m e 200-300 m.

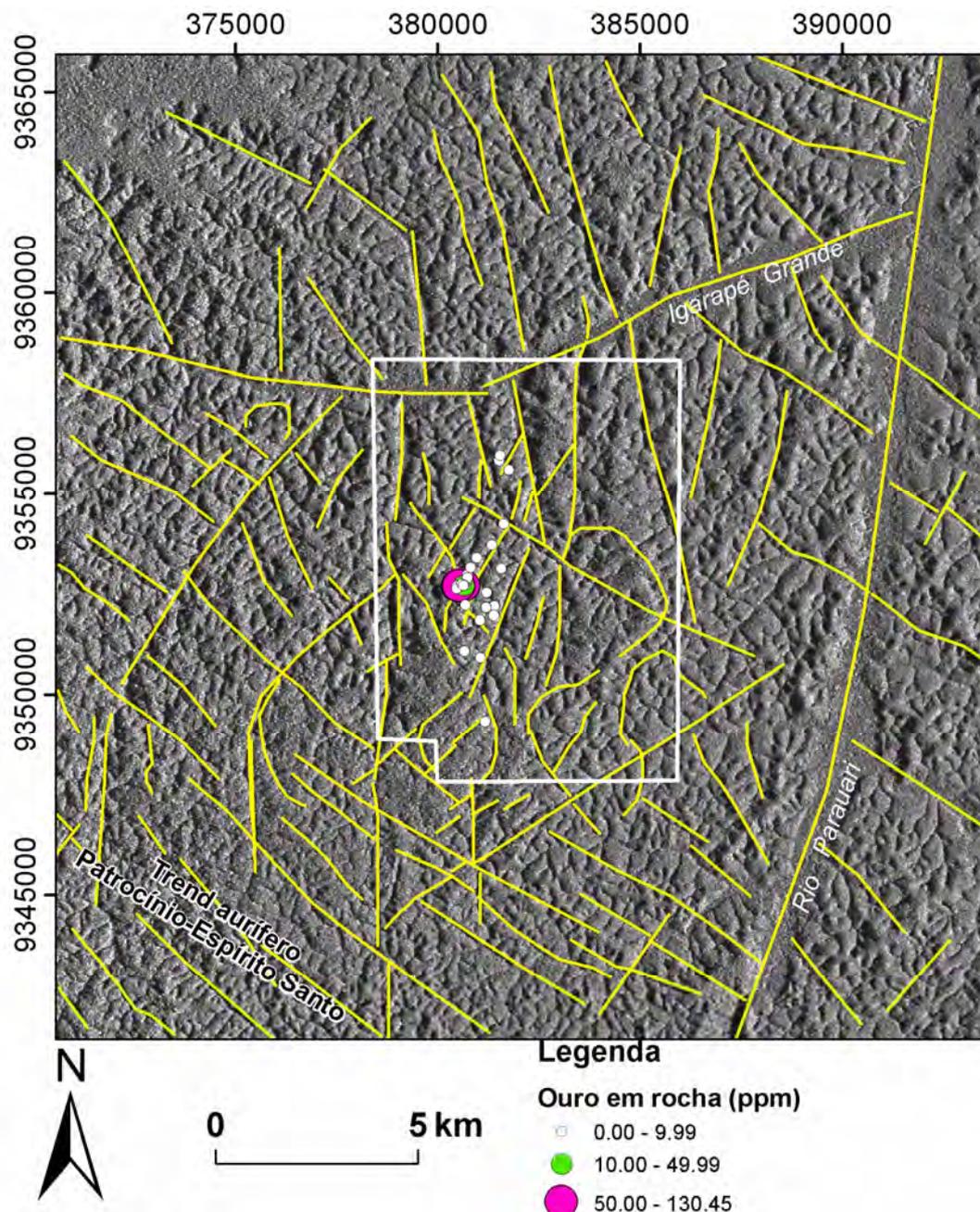


Figura 4.34. Imagem SAR-R99B (Lhh) e interpretação de principais lineamentos. Dados de geoquímica de rocha estão integrados.

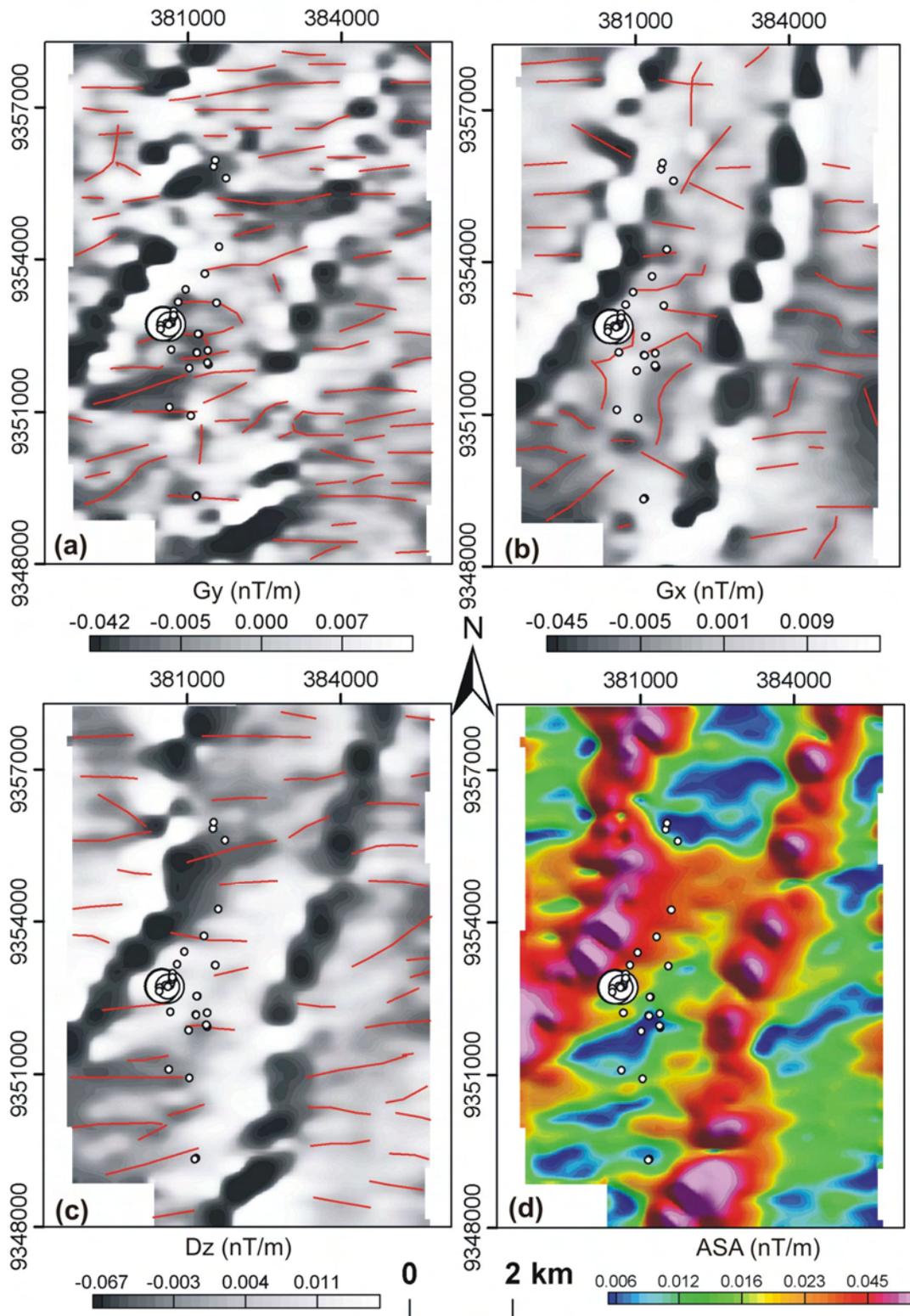


Figura 4.35. Imagens magnetométricas da região do prospecto Bandeirante, integradas com dados geoquímicos de ouro em rocha: **(a)** gradiente horizontal medido na direção y (G_y); **(b)** gradiente horizontal medido na direção x (G_x); **(c)** primeira derivada vertical do campo magnético anômalo (D_z); **(d)** amplitude do sinal analítico (ASA). A legenda dos dados geoquímicos equivale àquela mostrada na **figura 4.36**.

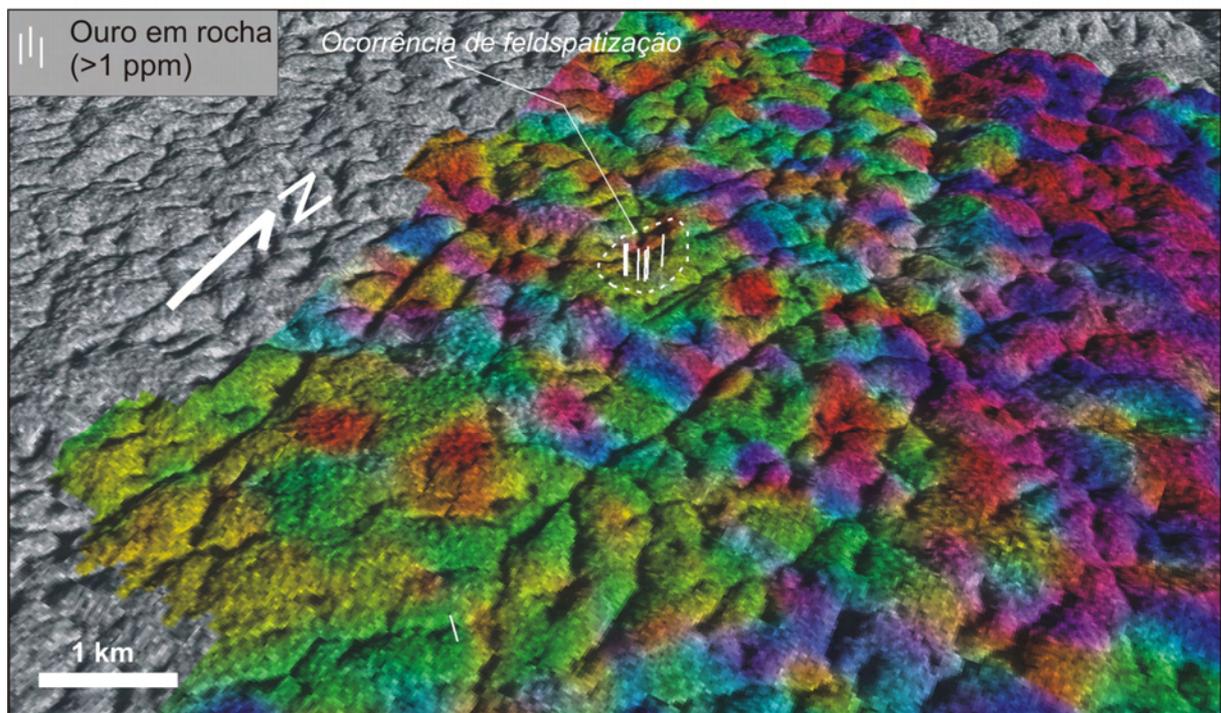
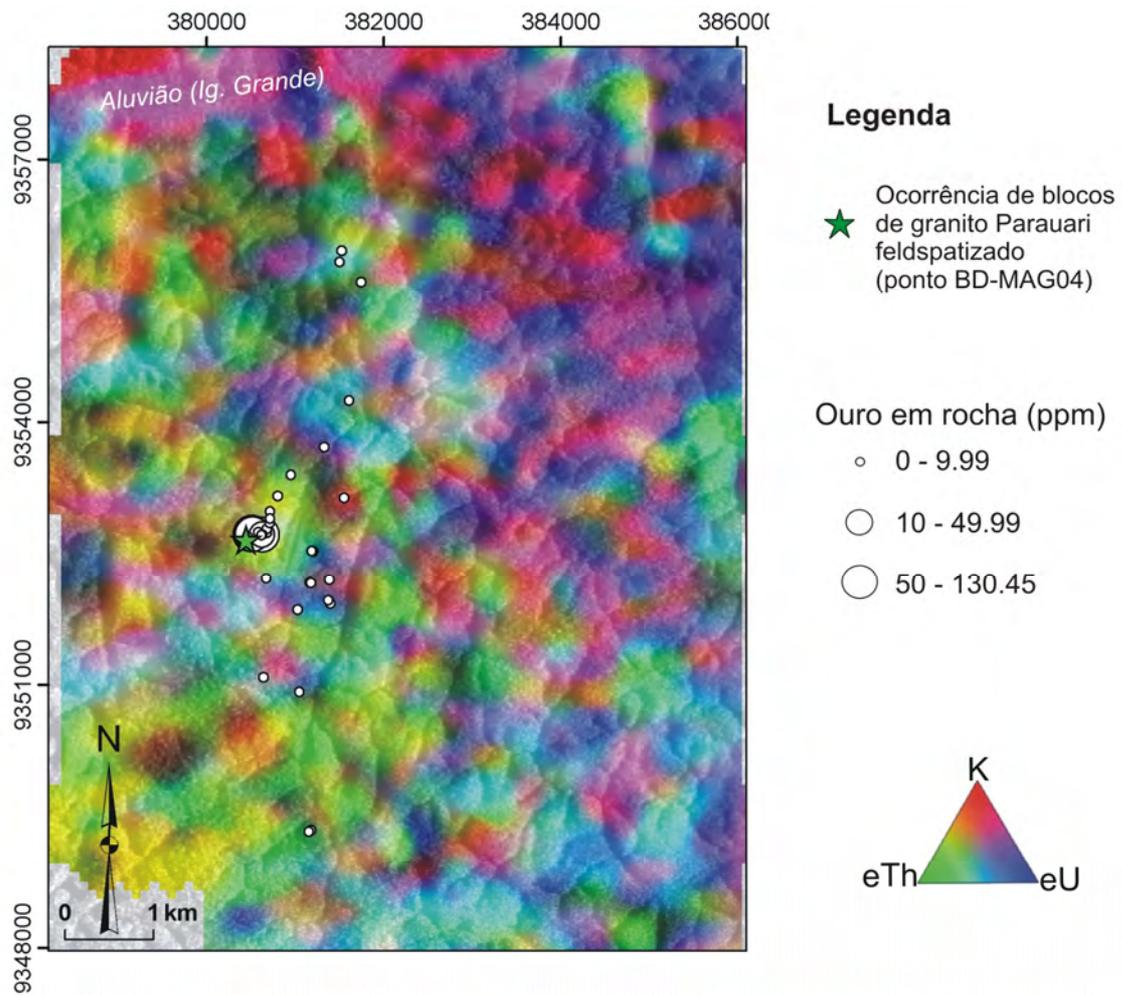


Figura 4.36. Imagem ternária RGB de K, eTh e eU, integrada com SAR-R99B (Lhh) e pontos geoquímicos de ouro em rocha.

Inicialmente, as imagens gamaespectrométricas seriam utilizadas na modelagem, a fim de realçar o radioelemento K. Entretanto, conforme observado anteriormente, as condições ambientais predominantes aliadas à boa resolução deste aerolevantamento, atuaram de forma a realçar aluviões e solos, os quais obliteram as respostas de rochas ou mesmo de alterações hidrotermais de interesse. Por tal razão, não se justifica aqui o uso de tal acervo de imagens na modelagem por redes neurais ou qualquer outra técnica.

A aplicação da RBFLN está sintetizada na **figura 4.37**, mostrando que a configuração da base das camadas evidenciais caracteriza-se por uma matriz do tipo 465615 x 5. Os pontos de treinamento empregados constituem 13 ocorrências anômalas de ouro em rocha, enquanto os pontos do tipo não depósito equivaleram a 21. Desta forma, 34 vetores de treinamento foram utilizados na etapa inicial da modelagem da rede neural, o treinamento. Os dados obtidos durante esta fase de aprendizado da rede foram empregados para a fase da classificação de todos os 465615 vetores de entrada, resultando na imagem final classificada (**Figura 4.37**).

O resultado foi reclassificado, posteriormente, em graus de favorabilidade baixa, moderada, alta e muito alta, conforme apresentado no mapa final da **figura 4.38**, sobreposto à imagem SAR-R99B (Lhh). Como parte do pós-processamento, foram computadas as áreas classificadas (**Tabela 4.2**) e realizada a validação do resultado final a partir da integração de ocorrências pontuais de ouro em rocha maior que 1 ppm. Esta integração está mostrada na **figura 4.38**, com destaque à porção central do prospecto. Com base neste resultado, pode-se computar uma validação de 70,67% (53) das 75 ocorrências de ouro em rocha maior que 1 ppm, para uma área total de 6,798 km² (áreas classificadas com graus de favorabilidade moderado, alto e muito alto – *cf.*, **Tabela 4.2**).

Em função dos poucos dados utilizados na modelagem, o resultado gerado (**Figura 4.38**) mostrou uma grande dependência relacionada à camada evidencial de ouro em solo. Desta forma, é interessante obter mais dados que possam ser integrados ao banco de dados para aplicação de técnicas de modelagens espaciais ou outros tipos de classificação, na tentativa de realçar alvos ou padrões que possam ser interessantes sob a perspectiva prospectiva. Dados como os de polarização induzida, podem ser úteis para discriminação de áreas com presença de sulfetos disseminados.

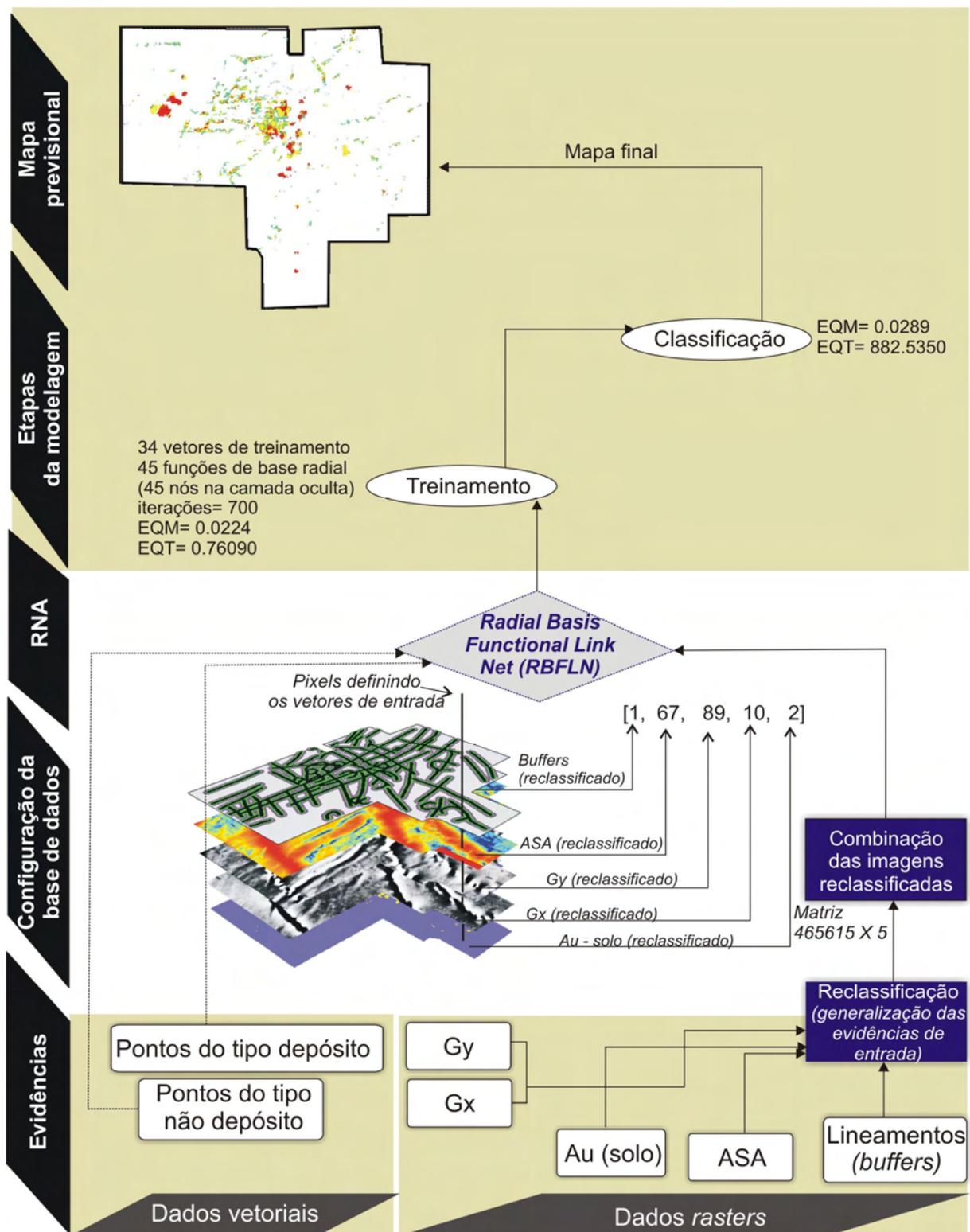


Figura 4.37. Síntese dos passos envolvidos para a aplicação da RBFLN, mostrando a configuração da base de dados e os parâmetros utilizados nas etapas de treinamento e classificação. EQT= erro quadrático total; EQM = erro quadrático médio.

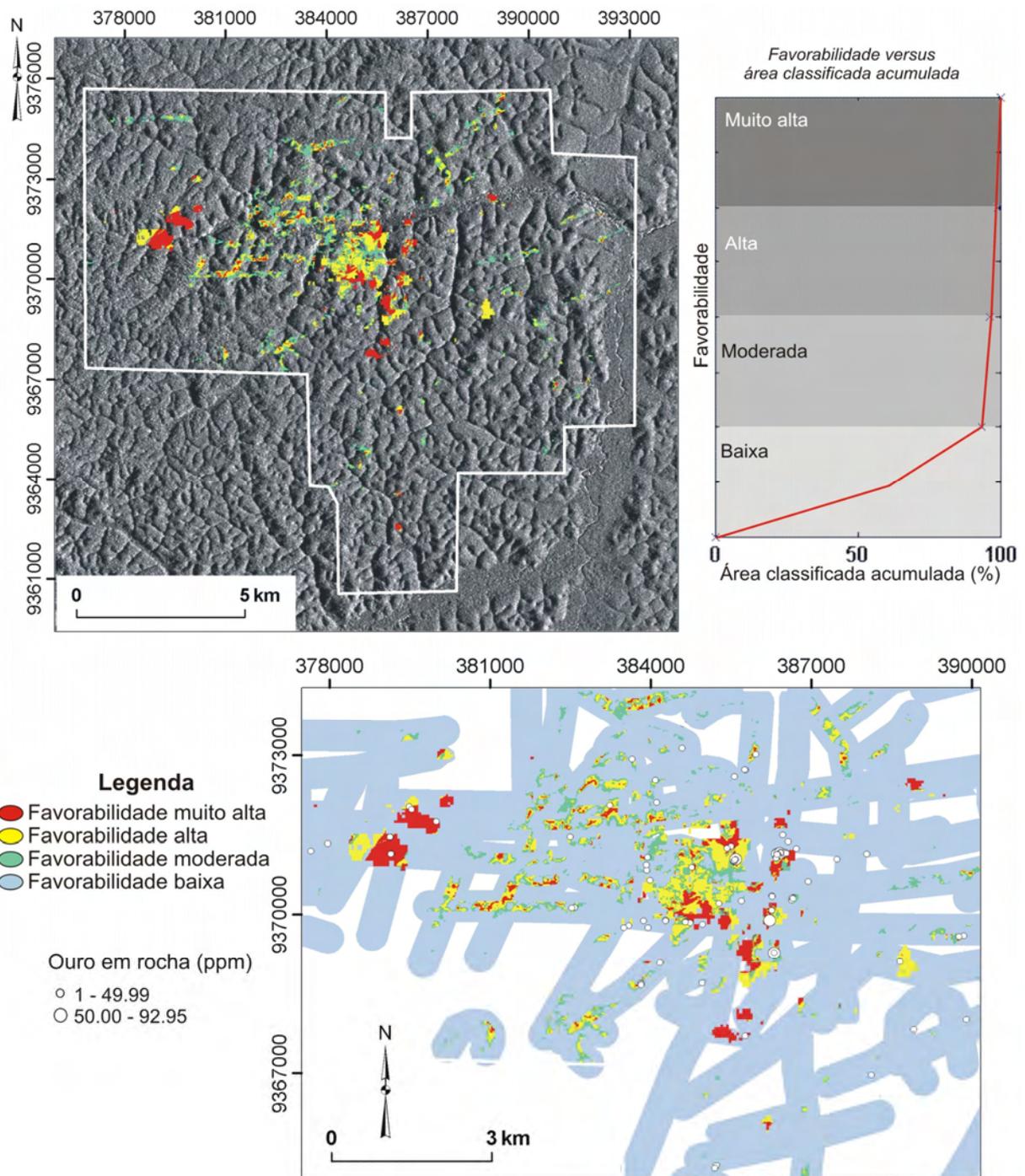


Figura 4.38. Modelo de favorabilidade gerado a partir da aplicação da RBFLN nos dados multifonte associados ao prospecto Rosa de Maio. Gráfico de favorabilidade *versus* área classificada acumulada e integração dos resultados com dados de geoquímica de rocha >1ppm estão apresentados.

Tabela 4.2. Quantificação de áreas classificadas por intervalos de favorabilidade (baixa, moderada, alta e muito alta) em referência à aplicação da técnica RBFLN na região do prospecto Rosa de Maio.

Mapa de favorabilidade gerado pela técnica RBFLN (Figura 4.38)		
Favorabilidade	Área classificada (km²)	Área classificada acumulada (km²)
<i>Muito Alta</i>	1,123	1,123
<i>Alta</i>	2,690	3,812
<i>Moderada</i>	2,985	6,798
<i>Baixa</i>	97,965	(<i>área total classificada</i>) 104,763

4.3. Prospecto Maués

4.3.1. INTERPRETAÇÕES E INTEGRAÇÃO DE DADOS

Regionalmente, a região do prospecto Maués insere-se no alto curso do rio Parauari, e está incluída no *trend* aurífero Patrocínio-Espírito Santo (Coutinho 2008), bem evidenciado pelo predomínio de lineamentos de direção NW-SE (**Figura 4.39 (b, c)**) e pelo condicionamento da drenagem com a mesma orientação (**Figuras 4.39 (a)**).

A região do prospecto Maués é caracterizada pelas rochas típicas do Grupo Jacareacanga, como os quartzo-muscovita xistos, com foliação subvertical a vertical e orientada na direção N20W. *Boudins* de quartzo com espessura de 1 a 2 cm são paralelos a esta foliação (**Figura 4.40**). Entretanto, não foram observados afloramentos de veios de quartzo mineralizados. Apenas em uma localização (ponto MA-MAG07), blocos centimétricos de veios de quartzo sulfetados (pirita) foram encontrados (**Figura 4.40**).

A ausência de bons afloramentos refletiu na qualidade dos dados gamaespectrométricos terrestres medidos. Assim como nos prospectos 12 de Outubro e Rosa de Maio, as medidas de solos, derivados de metassedimentos, caracterizam-se por quedas nos canais radiométricos. Os menores valores, entretanto, estão associados com dique gabróico (ponto MA-MAG06) aflorante em área de drenagem (**Figura 4.41**), e que pertence ao enxame quilométrico de diques NNE-SSW datados por Santos *et al.* (2002) em cerca de 510 Ma. As medidas gamaespectrométricas do dique equivalem a 2.3 cps no canal do K, 1.7 cps no canal do U, 1.3 cps no canal do Th e 43 cps no canal da contagem total. As medidas de solo referentes ao ponto MA-MAG11 mostram 5.4 cps no canal do K, 4.7 cps no canal do U, 3.5 cps no canal do Th e 115 cps no canal da contagem total. Outra medida de solo, referente ao ponto MA-MAG08, é caracterizada também por baixos valores radiométricos, com 2.6 cps no canal do K, 1.7 cps no canal do U, 1.4 cps no canal do th e 52 cps no canal da contagem total (**Figura 4.41**).

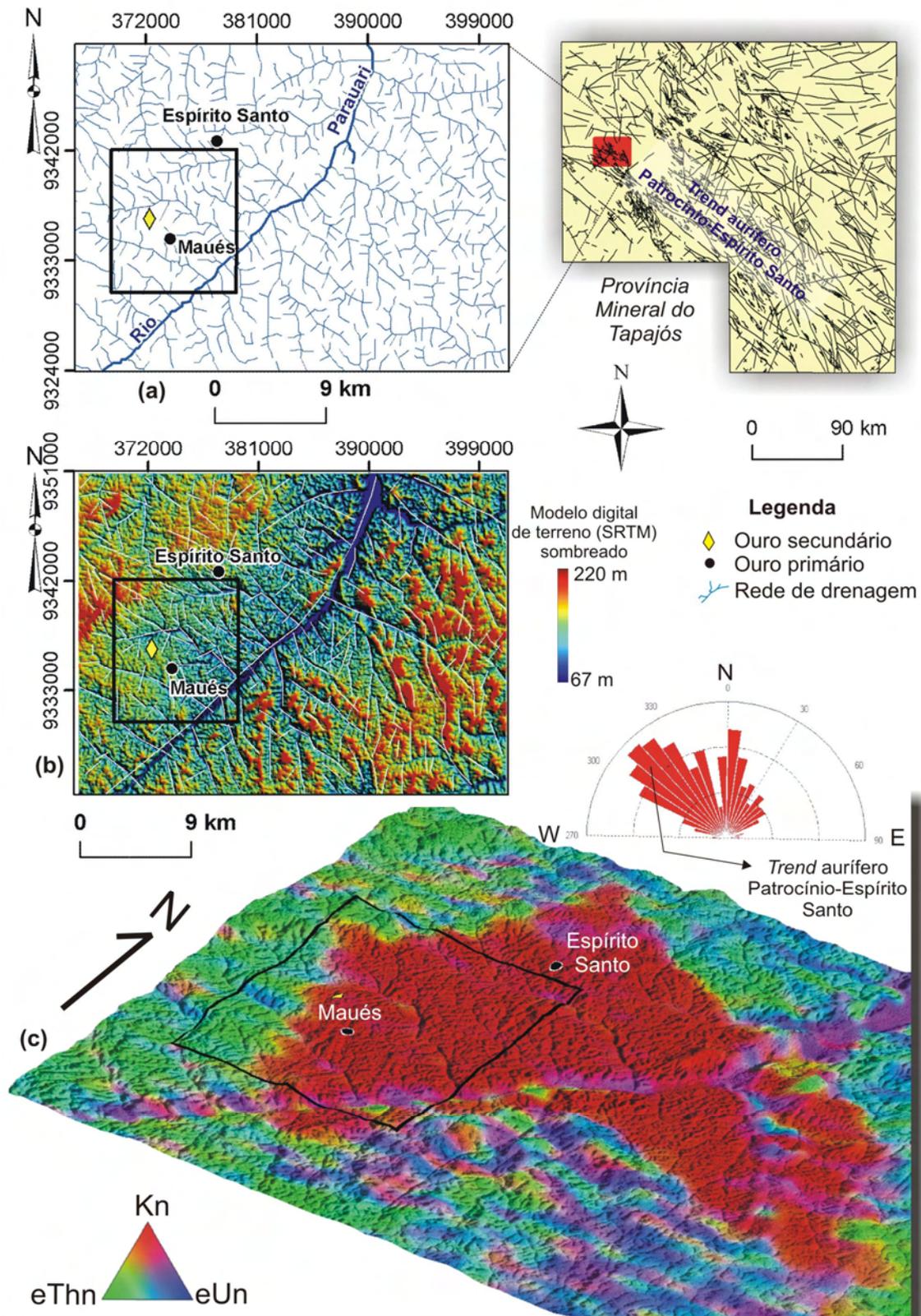


Figura 4.39. Localização do prospecto Maués, indicada pelo polígono preto. Observa-se o condicionamento de drenagem (a) e principais lineamentos (b) na direção predominante NW-SE, pertencente ao *trend* aurífero Patrocínio-Espírito Santo (Coutinho 2008). A partir da imagem ternária de Kn, eThn e eUn, verifica-se a inserção da área em apreço no domínio do Grupo Jacareacanga, caracterizado por altos valores de K normalizado (c).

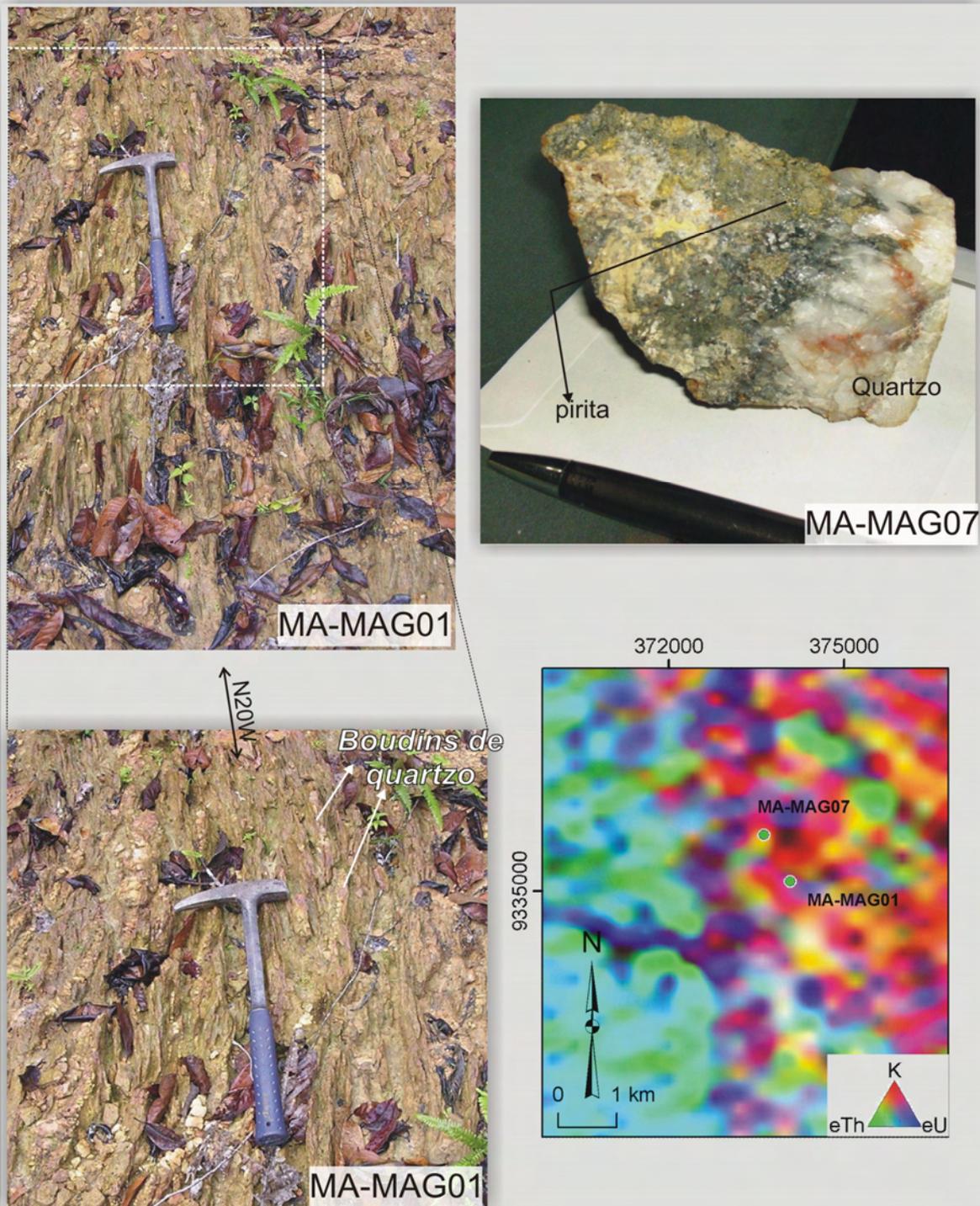
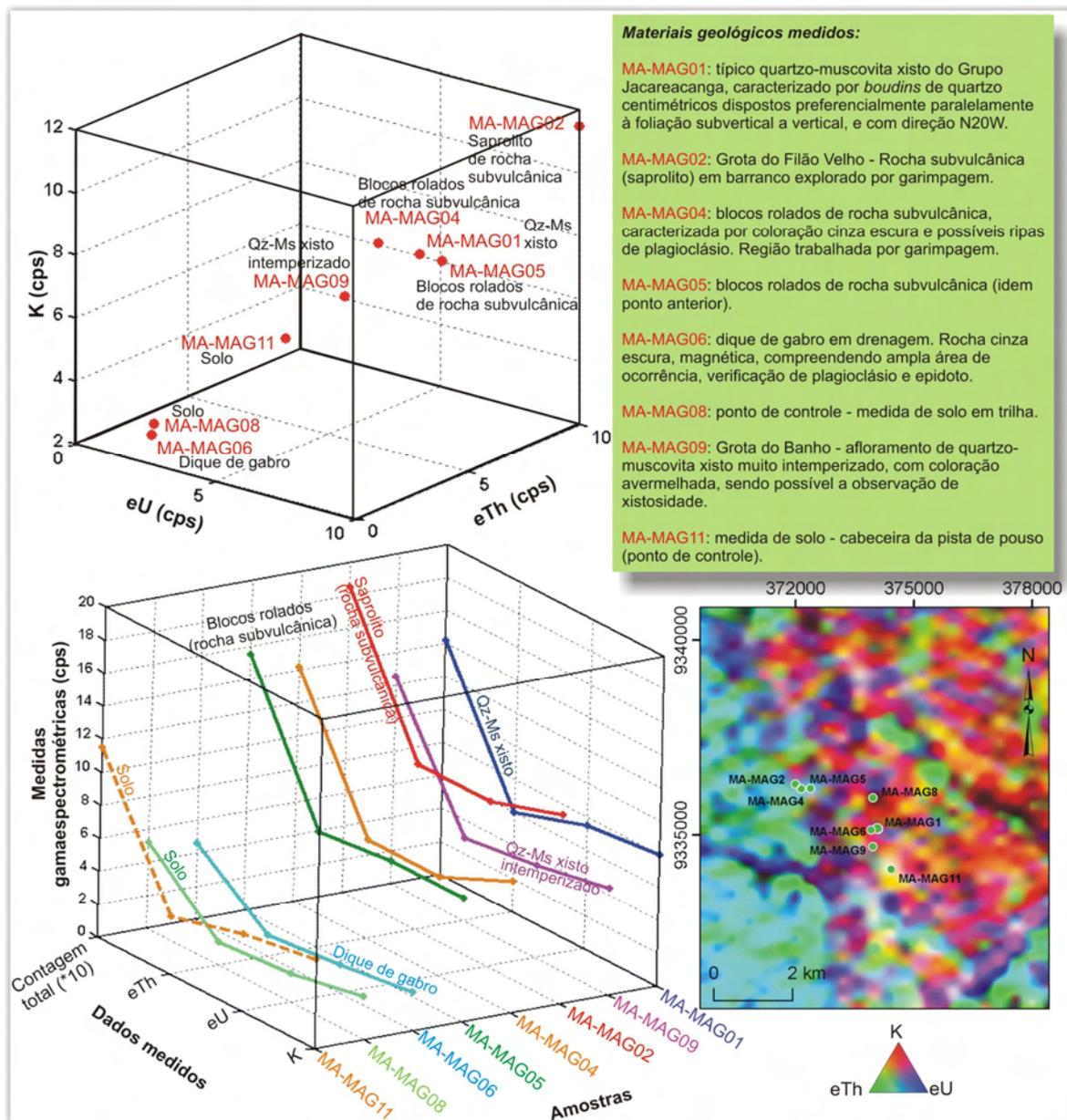


Figura 4.40. Localização e fotografias da amostra de veio sulfetado (MA-MAG07) e do típico afloramento de quartzo-muscovita xisto (MA-MAG01) pertencente ao Grupo Jacareacanga no prospecto Maués.

As medidas gamaespectrométricas intermediárias equivalem a dos quartzo-muscovita xistos que, tendo como exemplo o ponto MA-MAG01 (**Figura 4.40**), caracterizam-se por 8 cps no canal do K, 7.5 cps no canal do U, 6 cps no canal do Th e 142 cps no canal da

contagem total (**Figura 4.41**).

Os maiores valores gamaespectrométricos medidos são correspondentes a saprolitos e blocos de rocha subvulcânica (**Figura 4.41**). Tal litotipo é sugerido como portador de mineralizações auríferas, conforme verificado no garimpo denominado Filão Velho onde, aparentemente, o *megatrend* NW-SE, que é muito questionável quanto a um importante papel na origem das mineralizações, não está claramente relacionado em campo (*cf.*, Pinto *et al.* 2009). As medidas gamaespectrométricas pontuais neste filão equivalem a 11.5 cps no canal do K, 10 cps no canal do U, 10 cps no canal do Th e 185 cps no canal da contagem total (Ponto MA-MAG02 - **Figura 4.41**).



A partir da imagem SAR-R99B (Lhh), foram interpretados os principais lineamentos da região do prospecto Maués. Com base nesta interpretação, apresentada na **figura 4.42**, pode-se analisar o registro de estruturas relacionadas a uma primeira fase de deformação de direção NE-SW. Posteriormente, as estruturas NE-SW foram transpostas pelas de direção NW-SE, numa segunda fase de deformação paleoproterozóica que afetou a região, marcada também por movimentação sinistral. Confrontando estas interpretações com dados provenientes do PROMIN-Tapajós (Klein *et al.*, 2001a), considera-se que a estruturação NE-SW esteja associada com o período de ~2,00 Ga, enquanto a estruturação de direção NW-SE está relacionada ao período de 1,99 a 1,60 Ga, e que está bem registrada, por exemplo, nos xistos do Grupo Jacareacanga, como observado em campo (*vide* ponto MA-MAG01 na **figura 4.40**).

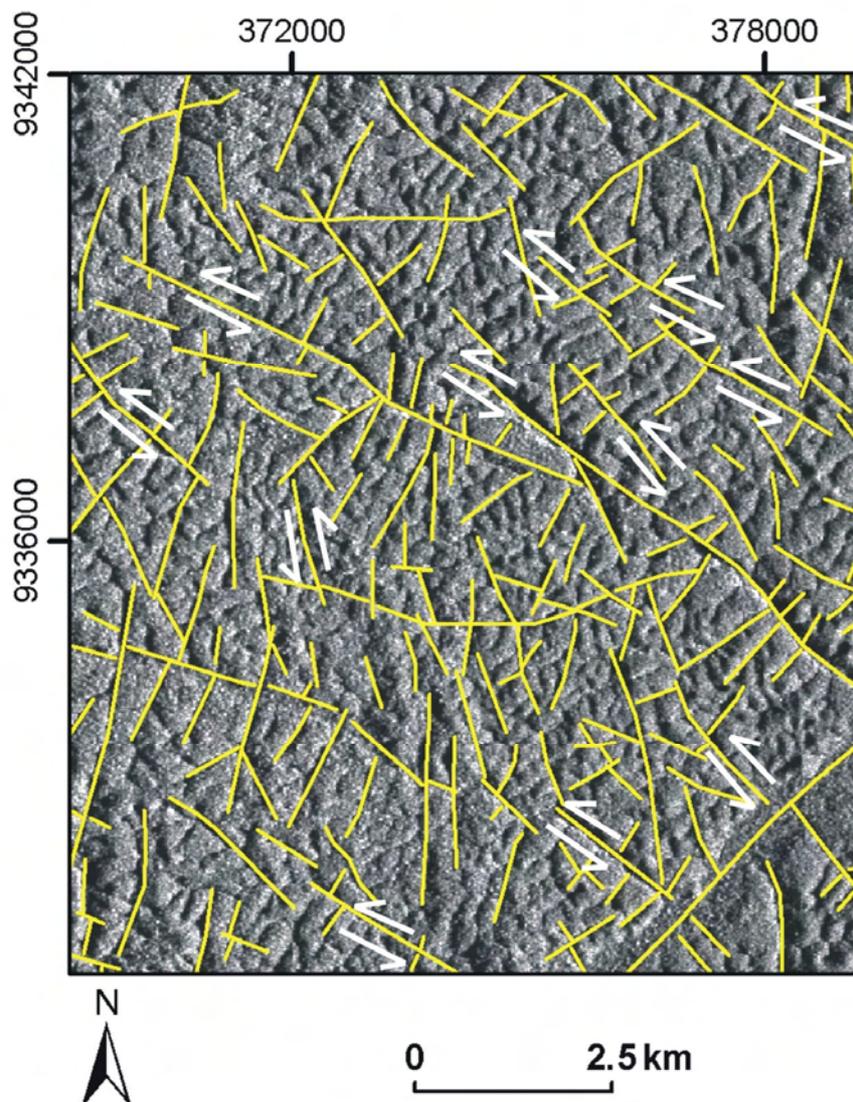


Figura 4.42. Interpretação de lineamentos na região do prospecto Maués. Observar estruturas NE-SW transpostas por aquelas de direção NW-SE e sinistrais.

Este padrão de estruturas NW-SE é muito discutido na literatura como um sistema de falhas que teria sido o principal conduto de fluidos hidrotermais que originaram as mineralizações auríferas nesta porção da PMT. De fato, veios de quartzo estão alojados nos planos paralelos da foliação de xistos. Santos *et al.* (2001b) e Pinto *et al.* (2009) caracterizam as mineralizações como do tipo orogênica.

Como não foi possível realizar medidas gamaespectrométricas de afloramento mineralizado e preservado a fim de melhor caracterizar alterações hidrotermais em termos das respostas da radiação gama, procedeu-se à análise de imagens gamaespectrométricas e integrações com dados geoquímicos de ouro em solo e em rocha. Na **figura 4.43 (a)**, verifica-se que os pontos geoquímicos de ouro em rocha >1 ppm estão associados com o domínio limítrofe entre os metassedimentos do Grupo Jacareacanga, estes caracterizados por valores altos de K, e o domínio de granitos pós-colisionais pertencentes à Suíte Intrusiva Parauari. Os maiores valores de ouro em rocha associados com veios de quartzo estão relacionados com a região do Filão do Baixão, marcado por 133.48 ppm de ouro, seguido da região da Grota do Bibiu (2.06 ppm de ouro), e da Grota da Gono (2.33 ppm, 1.117 ppm e 1.62 ppm de ouro).

A integração da imagem do K normalizado (K_n) com dados de geoquímica de ouro em solo (**Figura 4.43 (b)**) reforça as considerações anteriores, de que as maiores anomalias auríferas encontram-se nas proximidades espaciais com os granitos da Suíte Intrusiva Parauari e relacionadas com altos valores de K normalizado. A linha magenta tracejada demarca este domínio mineralizado, e compreende também a região mais intensamente explorada pela garimpagem (**Figura 4.43 (b)**). Nota-se também que há anomalias de ouro em solo associadas à região da Grota do Edse.

Da mesma forma, a integração de dados de geoquímica de ouro em solo com as imagens do parâmetro F e da razão K/eTh (**Figura 4.44**) mostra que há forte correlação de altos valores destas variáveis com a maior concentração de anomalias de ouro em solo.

De forma a avaliar localmente áreas mais anômalas para ouro, procedeu-se à análise de perfis de linhas de vôo. As linhas de vôo L10120, L10110 e L10080 foram selecionadas por serem compatíveis com a localização de três anomalias auríferas detectadas em solo, conforme mostrado na **figura 4.45**. As anomalias de ouro em solo de 87 ppb, 143 ppb e 149 ppb estão associadas com altas assinaturas de K (entre 2.5% e mais de 2.8%), assim como da razão de K/eTh (entre 0.30 e 0.40) e do parâmetro F (entre 0.8 e 1).

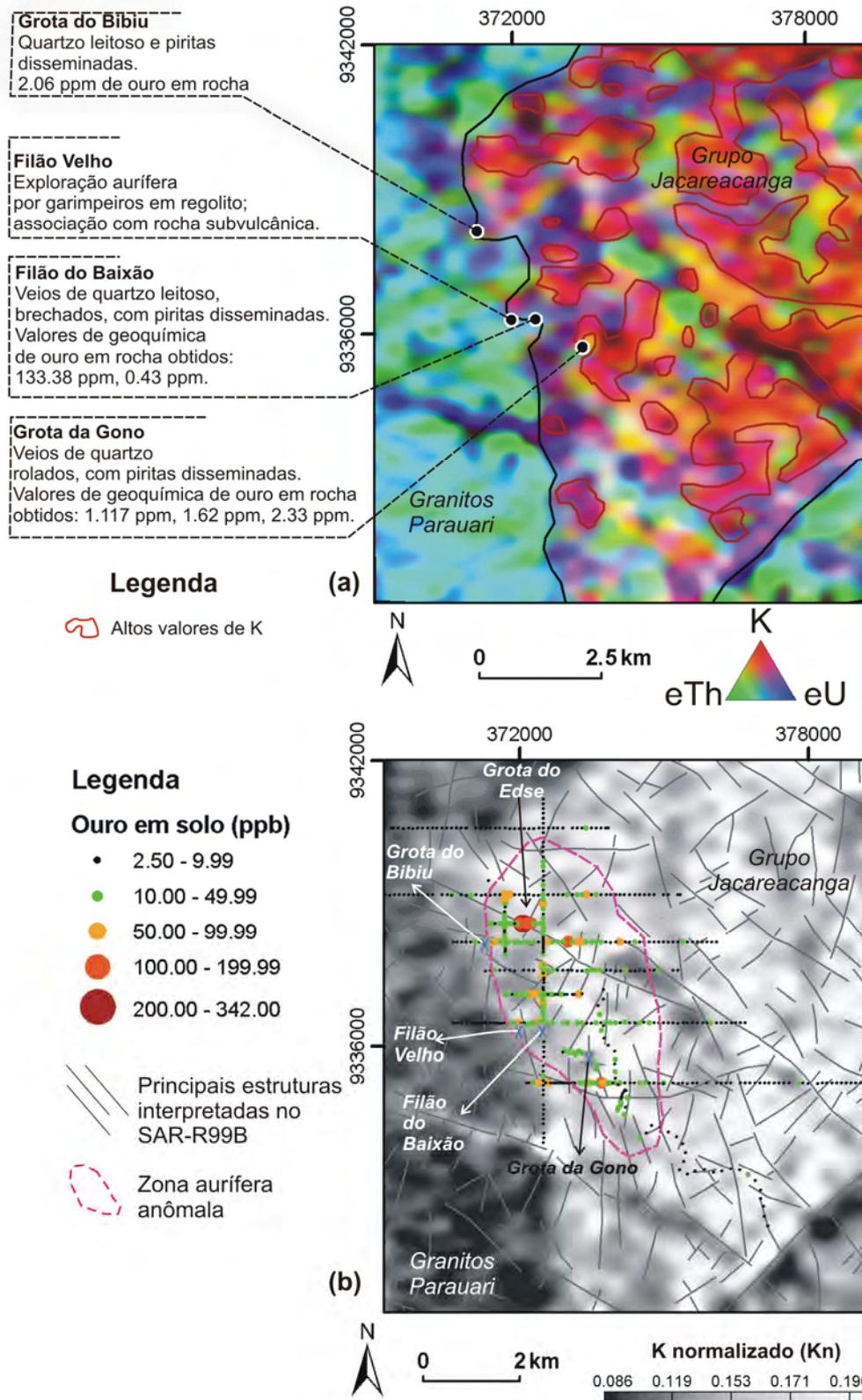


Figura 4.43. Integração de imagens gamaespectrométricas com dados de geoquímica: **(a)** imagem ternária RGB (K, eTh e eU) e pontos anômalos de ouro em rocha; **(b)** imagem do K normalizado (Kn) integrada com dados de geoquímica de ouro em solo. Observar as diferentes respostas gamaespectrométricas dos domínios das rochas supracrustais (Grupo Jacareacanga) e de granitos Parauari.

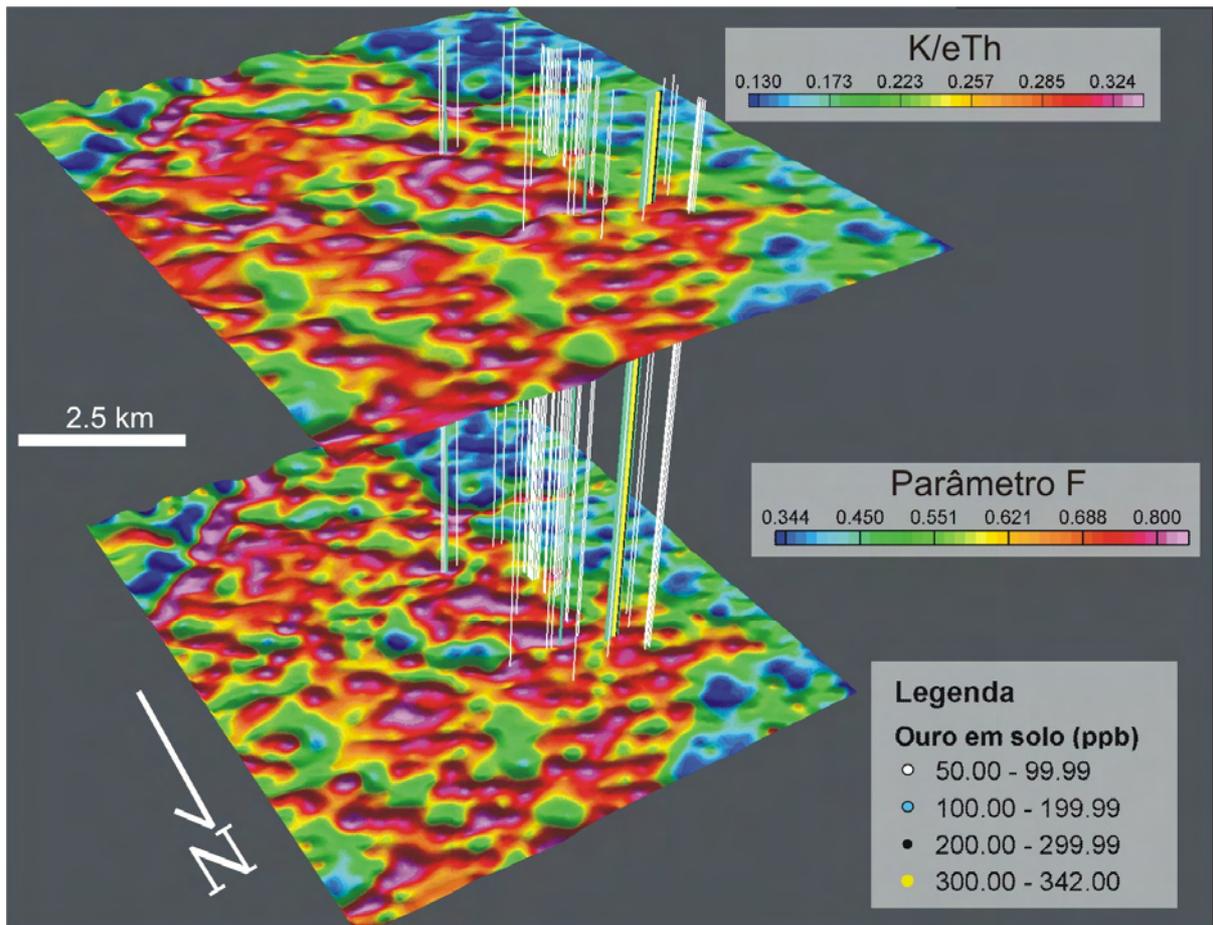


Figura 4.44. Integração de imagens gamaespectrométricas do parâmetro F e da razão K/eTh com os dados de geoquímica de ouro em solo. Observar que as ocorrências pontuais de ouro em solo >50 ppb estão associadas com médios e altos valores de parâmetro F e da razão K/eTh, e que caracterizam o domínio de rochas do Grupo Jacareacanga.

Em virtude da dificuldade de boa caracterização de alteração hidrotermal (em campo e na literatura), a não ser a presença da sulfetação com predomínio de pirita, é complicado afirmar algum enriquecimento em K, por exemplo. De todas as formas, estas assinaturas constatadas nas abrangências de anomalias geoquímicas de ouro em solo caracterizam um domínio de metassedimentos ricos em K, e pertencentes ao Grupo Jacareacanga.

Com o intuito de fornecer subsídios quantitativos que individualizem as rochas metassedimentares, hospedeiras de mineralizações, de outras unidades, também foi analisado o perfil da linha de vôo L10030 que abrange a região de granitos paleoproterozóicos da Suíte Intrusiva Parauari (**Figura 4.45**). Estes granitos da região do prospecto Maués são caracterizados por valores de K entre 1.9 a 2.1%, assim como menores valores da razão K/eTh e do parâmetro F.

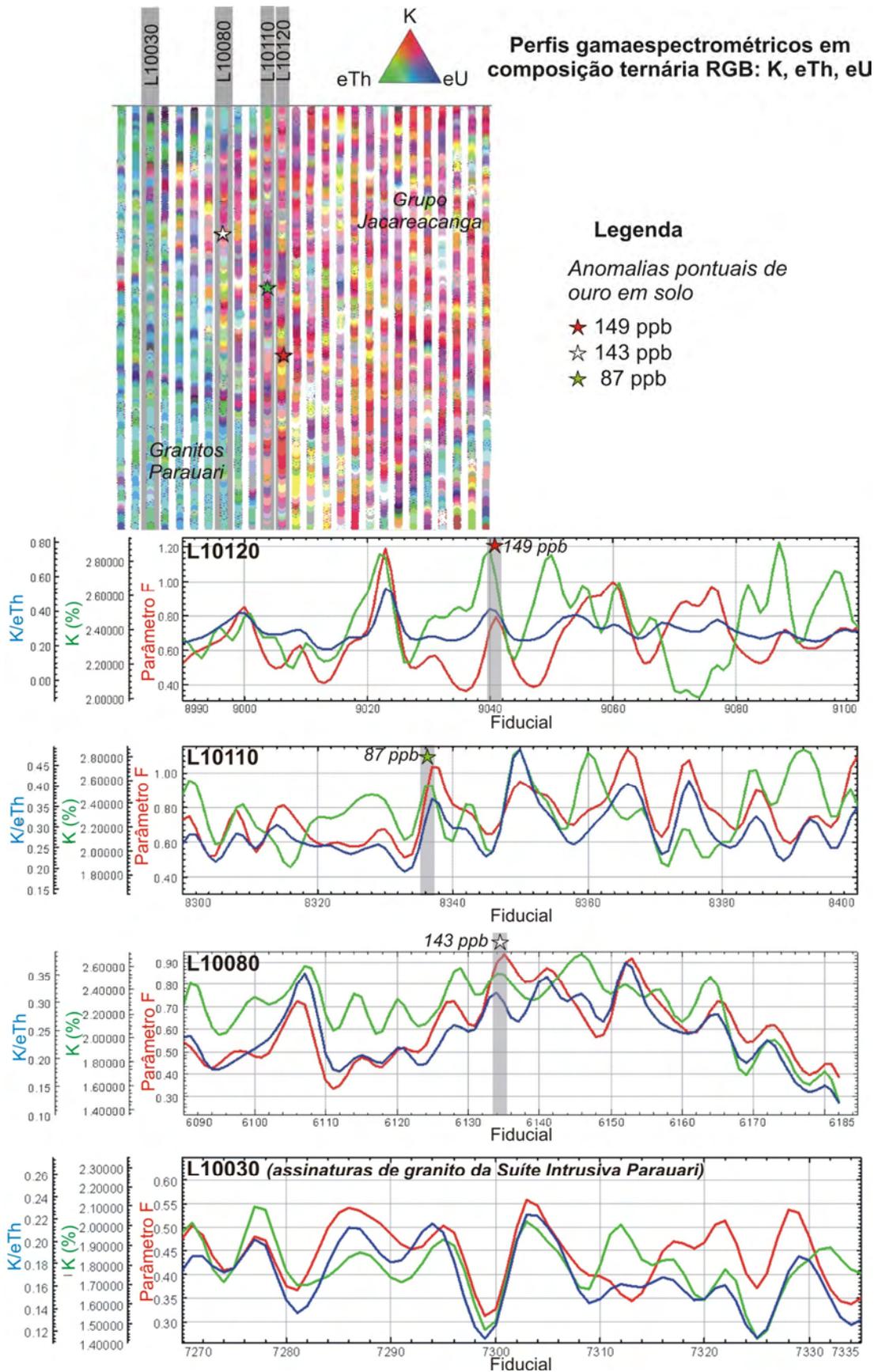


Figura 4.45. Perfis gamaespectrométricos em composição colorida RGB e indicação das linhas de vôo selecionadas para análise.

Com relação à magnetometria, o prospecto Maués é caracterizado pela intrusão de dique máfico, orientado na direção aproximada N-S, e marcado por altas amplitudes do sinal analítico. O ponto MA-MAG06 obtido em campo, caracteriza-se como um dique gabrótico, marcado por baixos valores gamaespectrométrico (*cf.*, **Figura 4.41**). A **figura 4.46** mostra regionalmente a inclusão do dique máfico observado no prospecto Maués como pertencente ao enxame quilométrico do Diabásio Piranhas.

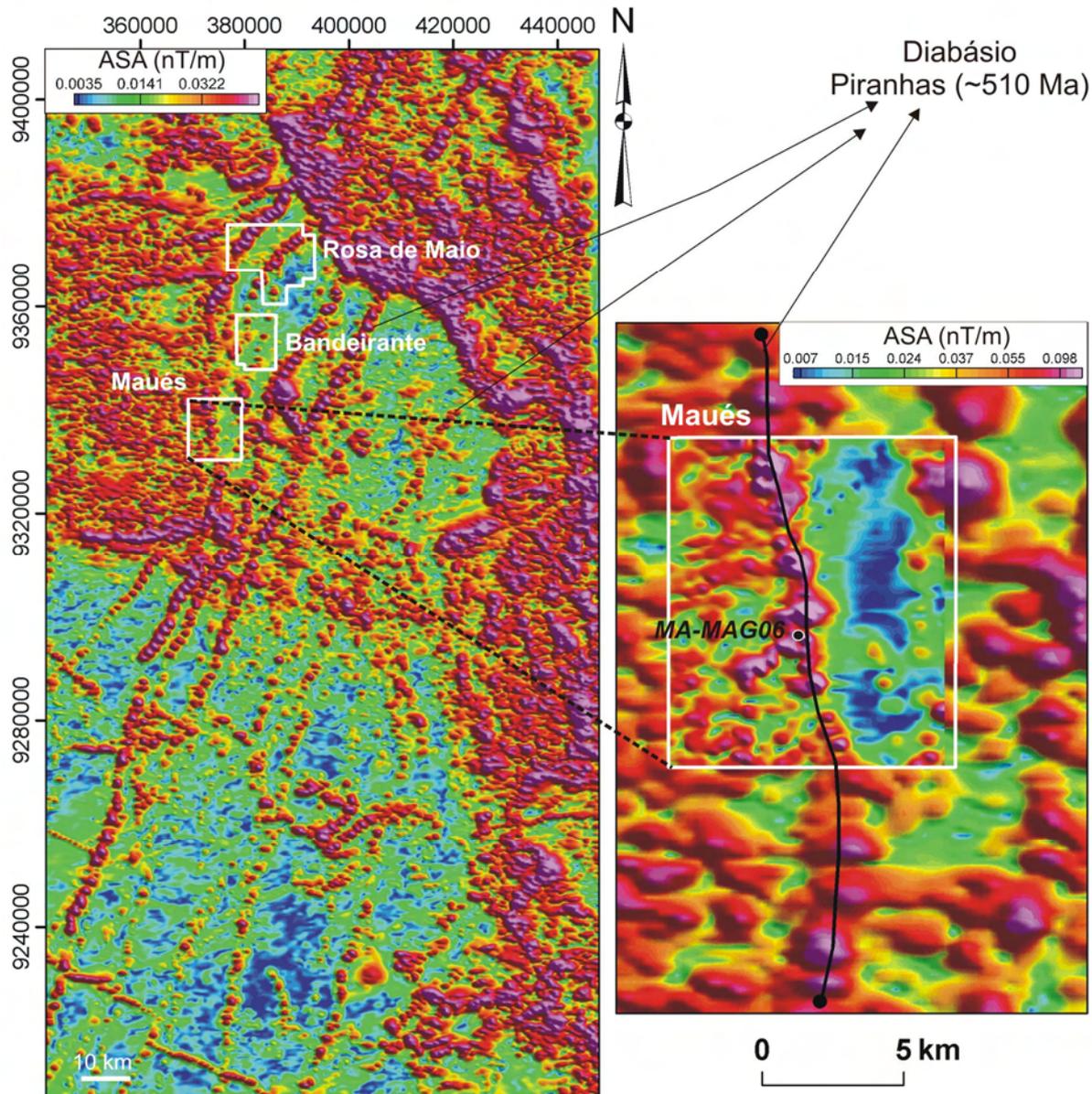


Figura 4.46. Imagem regional da amplitude do sinal analítico e inserção do aerolevante Maués. Notar que dique máfico de orientação aproximada N-S e atribuído ao enxame datado em ~510 Ma (Santos *et al.* 2002), está presente na região, conforme também verificado em campo (Ponto MA-MAG06).

Analisando-se as imagens dos gradientes medidos Gx e Gy, de seus equivalentes calculados (primeiras derivadas horizontais em x e y do campo magnético anômalo) (**Figura 4.47**), e da primeira derivada vertical do campo magnético anômalo (**Figura 4.48 (a)**), é possível verificar que há um domínio a leste do aerolevante marcado por relevo magnético suave. Tal feição está relacionada ao pacote de sedimentos metamorfizados do Grupo Jacareacanga. A intrusão posterior do enxame de diques máficos explica o relevo magnético mais rugoso na parte centro-oeste do aerolevante. Outra característica importante observada é que as principais anomalias auríferas de ouro em solo encontram-se associadas a esta última região, pertencente também a médios e altos valores de amplitude do sinal analítico (**Figura 4.48 (b)**), sendo que há poucos gradientes compatíveis com a marcante estruturação NW-SE que foi verificada claramente na imagem SAR-R99B (*cf.*, **Figura 4.42**).

Um padrão já verificado em outros prospectos da PMT compreende a ocorrência de diques máficos atuando como barreira geoquímica para a precipitação de ouro. Entretanto, devido à idade obtida de 510 Ma (Santos *et al.* 2002), torna-se difícil considerar este dique em particular como uma barreira geoquímica importante e contemporânea à origem paleoproterozóica das mineralizações. Uma melhor associação compreende um papel de possível remobilização do ouro num período pós-mineralização (pós-paleoproterozóico), caso realmente tal dique possua a idade de 510 Ma. Todavia, tais conjecturas ainda não foram bem caracterizadas neste prospecto, similarmente ao que ocorre nos prospectos Rosa de Maio e Bandeirante, anteriormente abordados.

4.3.2. MODELAGEM DE DADOS ESPACIAIS

A técnica *Radial Basis Functional Link Net* (RBFLN) (Looney & Yu 2000) foi empregada na tentativa de gerar mapas previsionais considerando-se duas abordagens. A primeira, utilizando-se, além dos pontos de treinamento (cinco ocorrências de ouro – Grotas da Gono, do Edse e do Bibiu, Filão Velho, Baixão do Filão), e dos pontos do tipo não depósito (33), as camadas evidenciais associadas às imagens de K, eTh, eU, da razão K/eTh, parâmetro F e ASA (**Figura 4.49**). A segunda abordagem caracteriza-se por incluir a camada de *buffers* de lineamentos NW-SE interpretados com base na imagem SAR-R99B, no conjunto de dados evidenciais acima mencionados (**Figura 4.50**). Este *layer* foi escolhido porque configura um dos controles da mineralização de acordo com alguns modelos metalogenéticos propostos (*cf.*, Santos *et al.* 2001b). Destaca-se que as distâncias dos *buffers* equivaleram aos intervalos de 0-100m e 100-200 m.

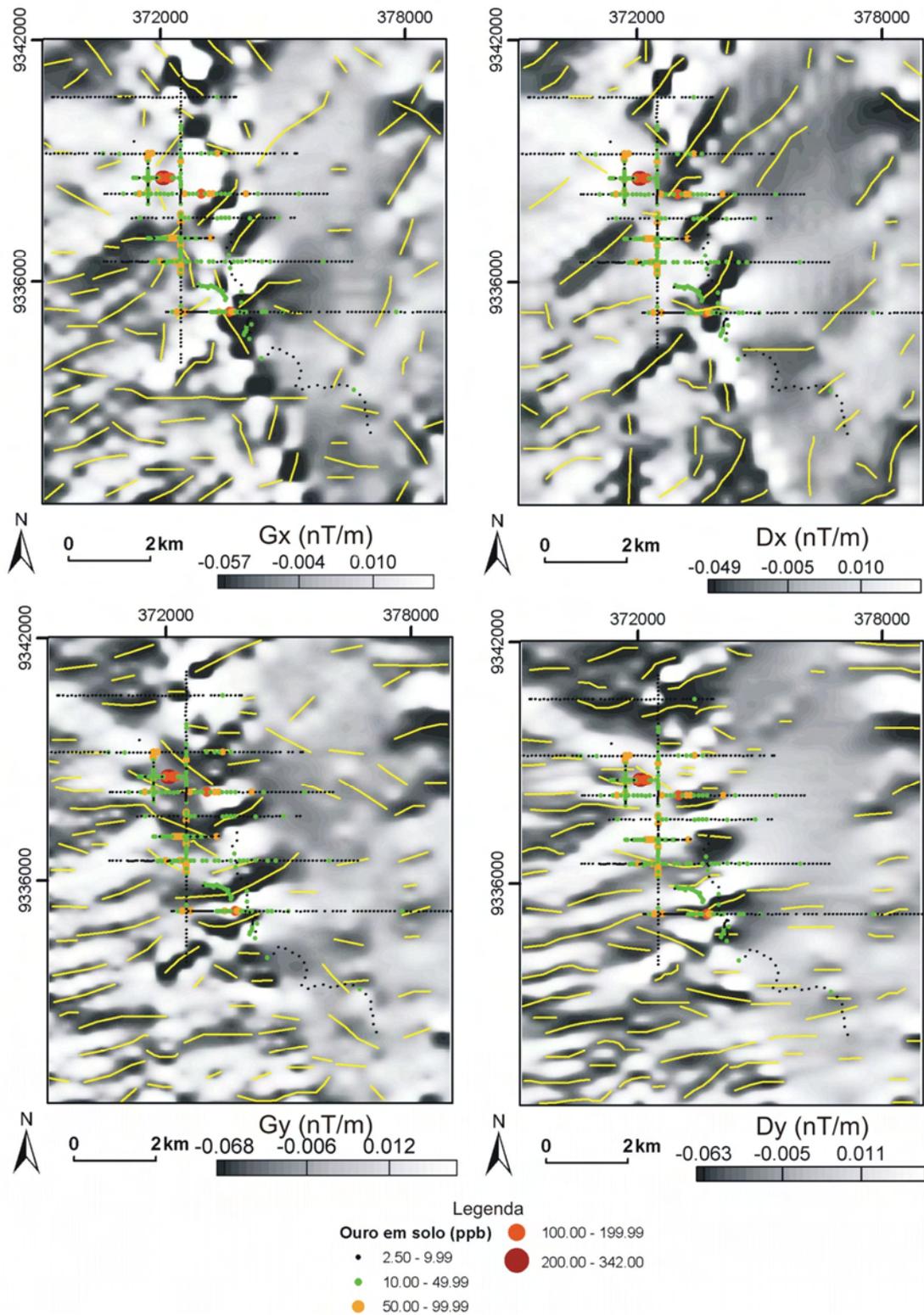


Figura 4.47. Comparação de produtos magnetométricos integrados com dados de geoquímica de ouro em solo: **(a)** imagem do gradiente horizontal medido G_x ; **(b)** imagem da primeira derivada horizontal em x do campo magnético anômalo; **(c)** imagem do gradiente horizontal medido G_y ; **(d)** imagem da primeira derivada horizontal em y do campo magnético anômalo. Observar maior resolução das feições de baixo gradiente proporcionada pelas imagens de G_x e G_y em relação às imagens calculadas das respectivas derivadas. Os lineamentos magnéticos interpretados a cada imagem também se encontram integrados.

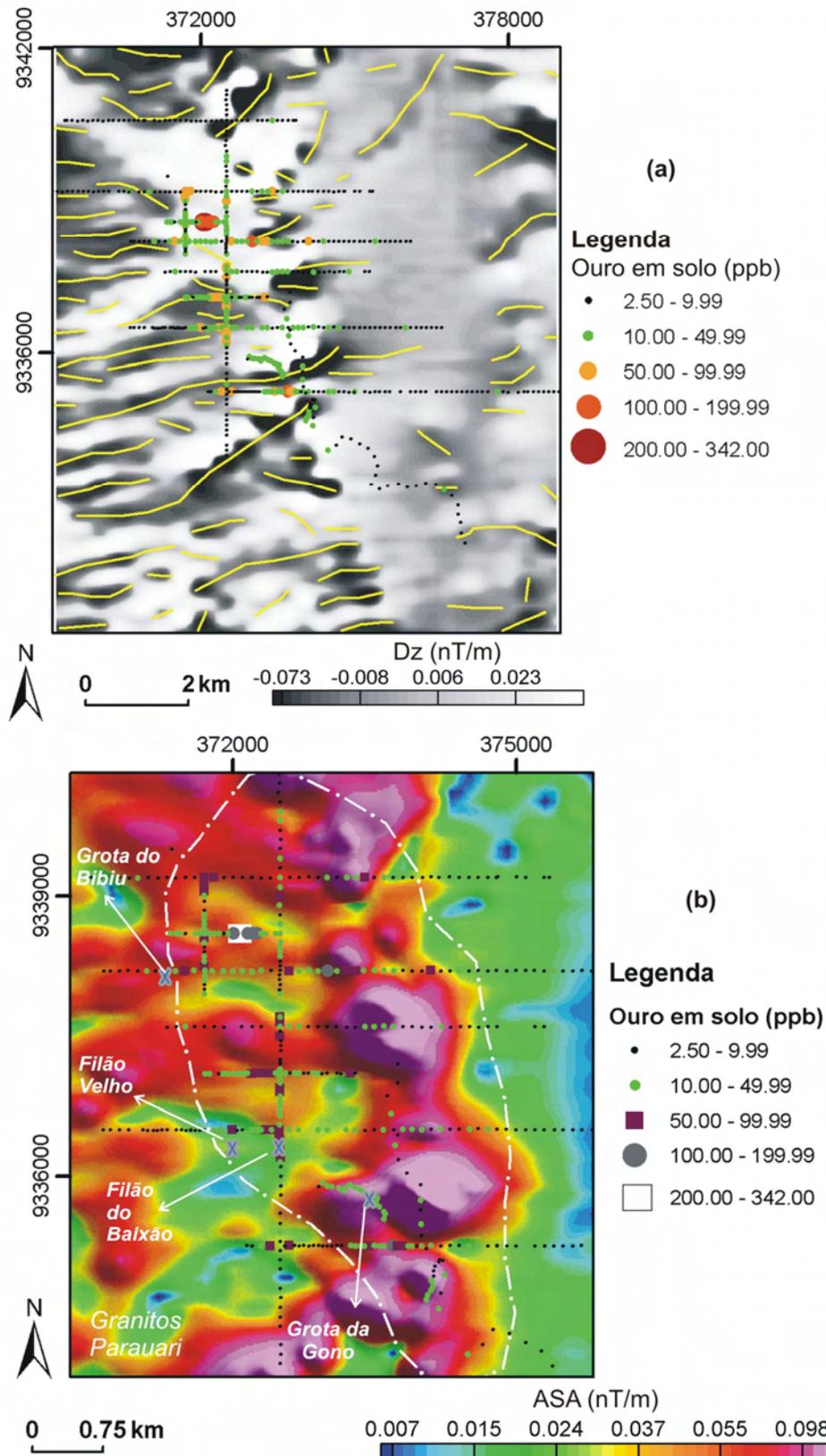


Figura 4.48. Imagem da primeira derivada vertical do campo magnético anômalo (Dz) integrada com dados geoquímicos e feições lineares interpretadas (a). Em (b), detalhe da imagem da amplitude do sinal analítico na área de maior favorabilidade aurífera do prospecto Maués, e integração de dados de geoquímica de ouro em solo.

A base de dados foi similarmente configurada a exemplo daquela realizada para a aplicação da RBFLN nos dados dos prospectos 12 de Outubro e Rosa de Maio. As **figuras 4.49** e **4.50** sintetizam as etapas das modelagens, com os procedimentos e parâmetros envolvidos para a geração de mapas previsionais.

No caso do prospecto Maués, a matriz dos dados combinados foi do tipo 101655 x 6 para a primeira abordagem de modelagem por RBFLN (**Figura 4.49**), e do tipo 91294 x 7, para a segunda abordagem (**Figura 4.50**). Os resultados produzidos estão apresentados nas **figuras 4.51** e **4.52**, e foram reclassificados por prioridade de favorabilidade para ouro por meio da designação de alto, moderado e baixo grau.

A análise dos resultados mostra que a maior favorabilidade na região do prospecto Maués está associada à região limítrofe dos metassedimentos do Grupo Jacareacanga com os granitos da Suíte Intrusiva Parauari. Neste sentido, considerando-se que os alvos de interesse estão demarcados pelo alto e moderado grau de prospectividade, pode-se verificar que a ocorrência aurífera mapeada pela CPRM (Klein *et al.* 2001a) está validada na área de moderada favorabilidade (**Figura 4.51**) e alta favorabilidade (**Figura 4.52**).

Complementarmente, em função da existência de uma base de dados pontuais de ouro em solo, estes foram empregados para validação das modelagens, considerando-se o valor de corte de 50 ppb (48 ocorrências no total). A integração destes dados pontuais com os mapas de favorabilidade está mostrada em perspectiva nas **figuras 4.51** e **4.52**.

Considerando-se o resultado prospectivo mostrado na **figura 4.51**, houve uma validação de 70,83% (34) das anomalias de ouro em solo, existentes numa área total de 20,077 km² (**Tabela 4.3**). No caso do mapa prospectivo da **figura 4.52**, para uma área total de 16,475 km², houve a validação de 67% (32) das ocorrências de anomalias de ouro em solo maiores que 50 ppb (**Tabela 4.3**).

4.4. Discussões

O estudo efetuado nesta dissertação de mestrado a partir de dados multifonte mostram que é possível traçar alguns vetores importantes para prospecção aurífera na área oeste da PMT, especificadamente na região dos prospectos 12 de Outubro, Rosa de Maio, Bandeirante e Maués. Nesse sentido, algumas observações são pertinentes.

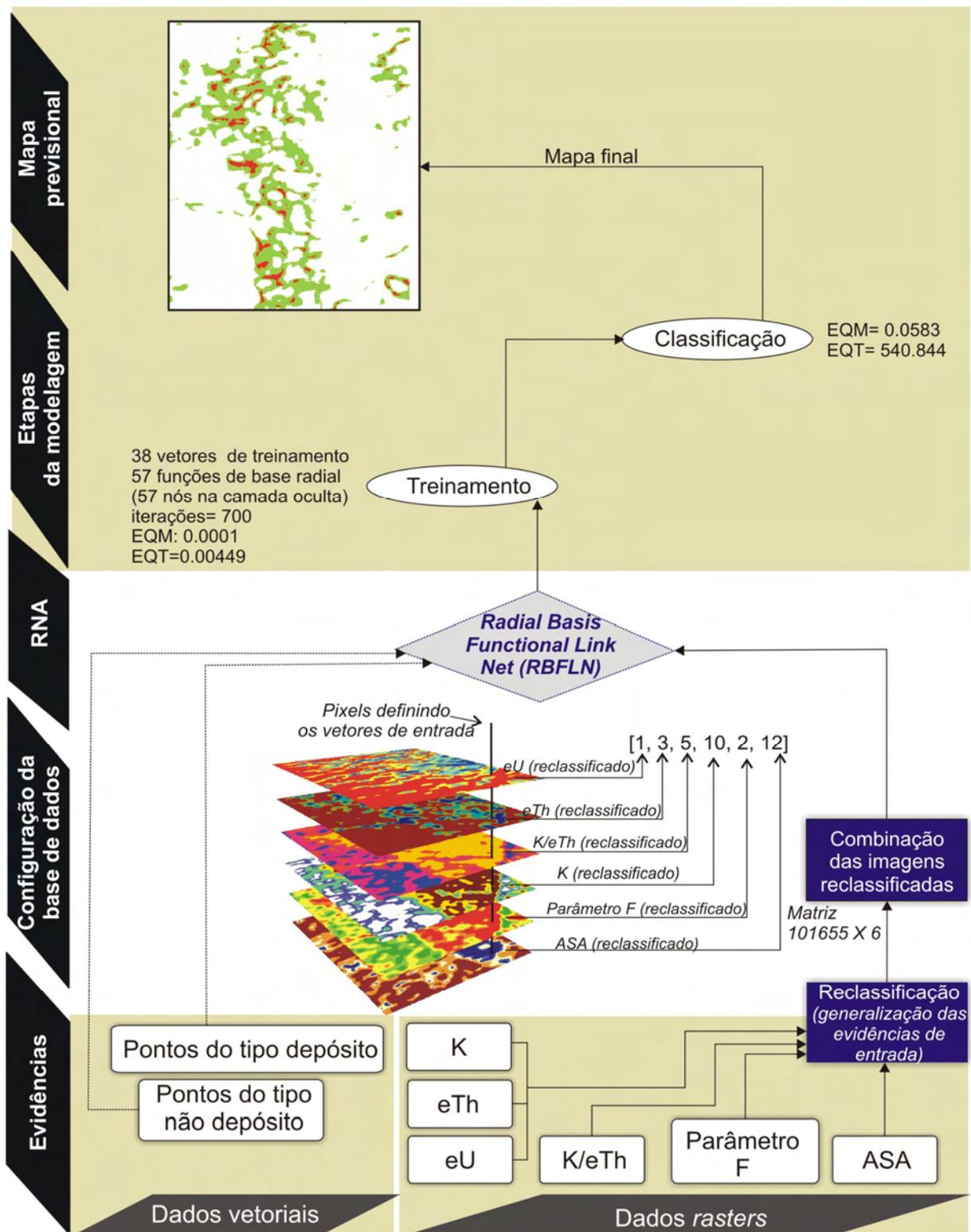


Figura 4.49. Síntese dos passos envolvidos para a aplicação da RBFLN, considerando-se seis camadas evidenciais, além dos dados vetoriais do tipo depósito e não depósito. A configuração da base de dados e os parâmetros utilizados nas etapas de treinamento e classificação também estão apresentados. EQT= erro quadrático total; EQM = erro quadrático médio.

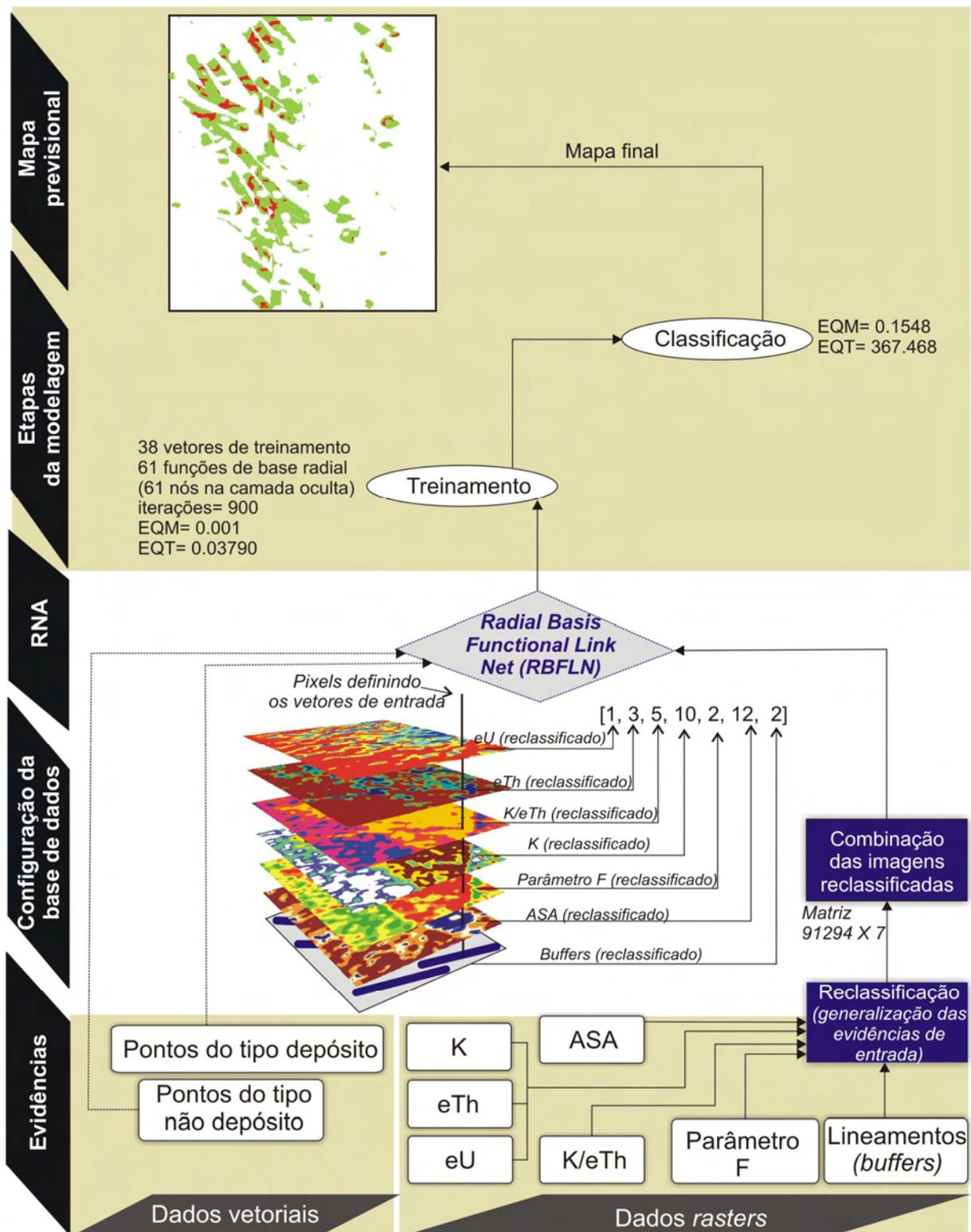


Figura 4.50. Síntese dos passos envolvidos para a aplicação da RBFLN, considerando-se sete camadas evidenciais, além dos dados vetoriais do tipo depósito e não depósito. A configuração da base de dados e os parâmetros utilizados nas etapas de treinamento e classificação também estão apresentados. EQT= erro quadrático total; EQM = erro quadrático médio.

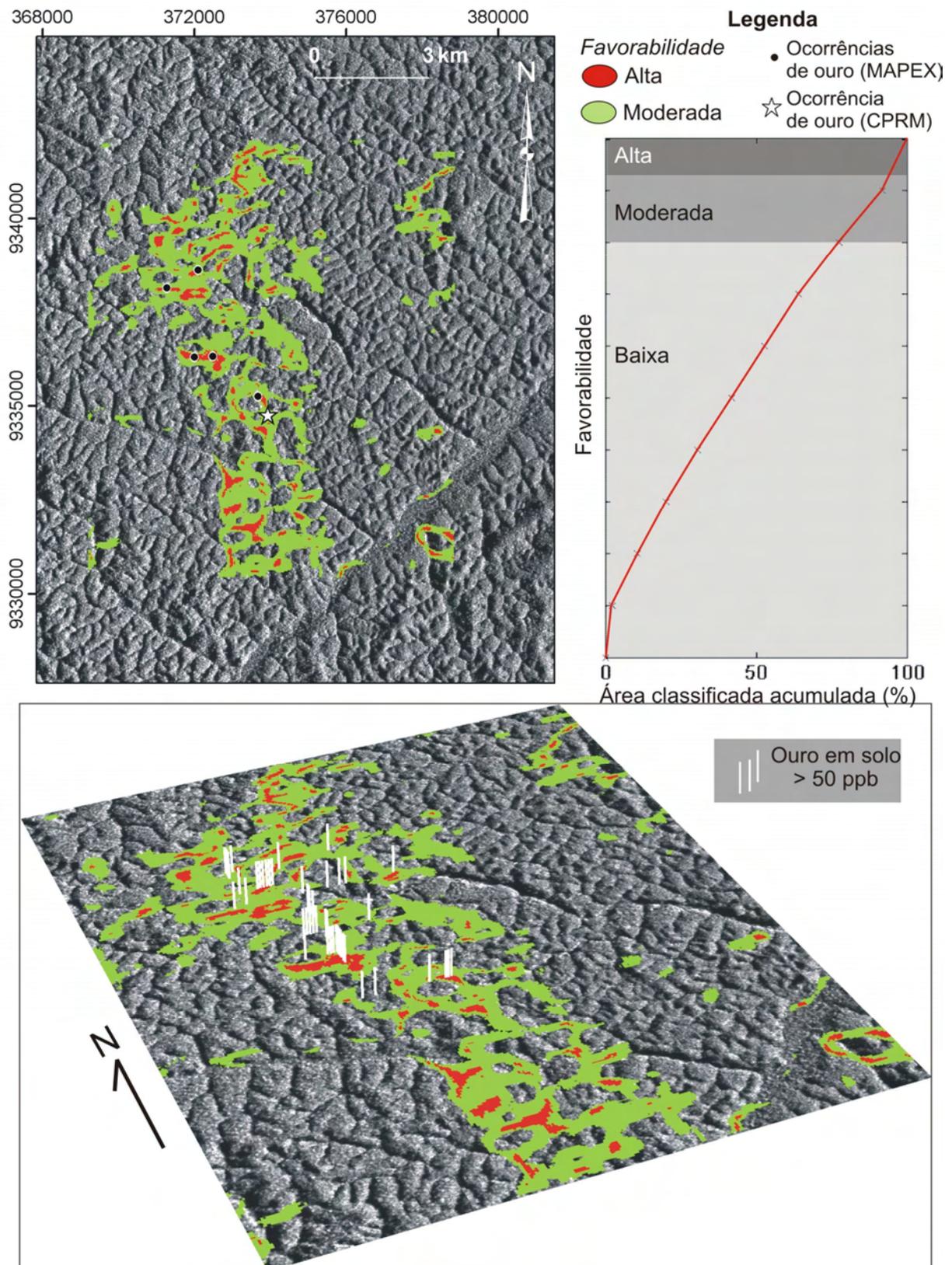


Figura 4.51. Modelo de favorabilidade gerado a partir da aplicação da RBFLN nos dados associados à aerogeofísica da região do prospecto Maués. Gráfico de favorabilidade *versus* área classificada acumulada e integração dos resultados com dados de geoquímica de solo > 50 ppm estão apresentados. A **figura 4.49** mostra a síntese da aplicação desta técnica.

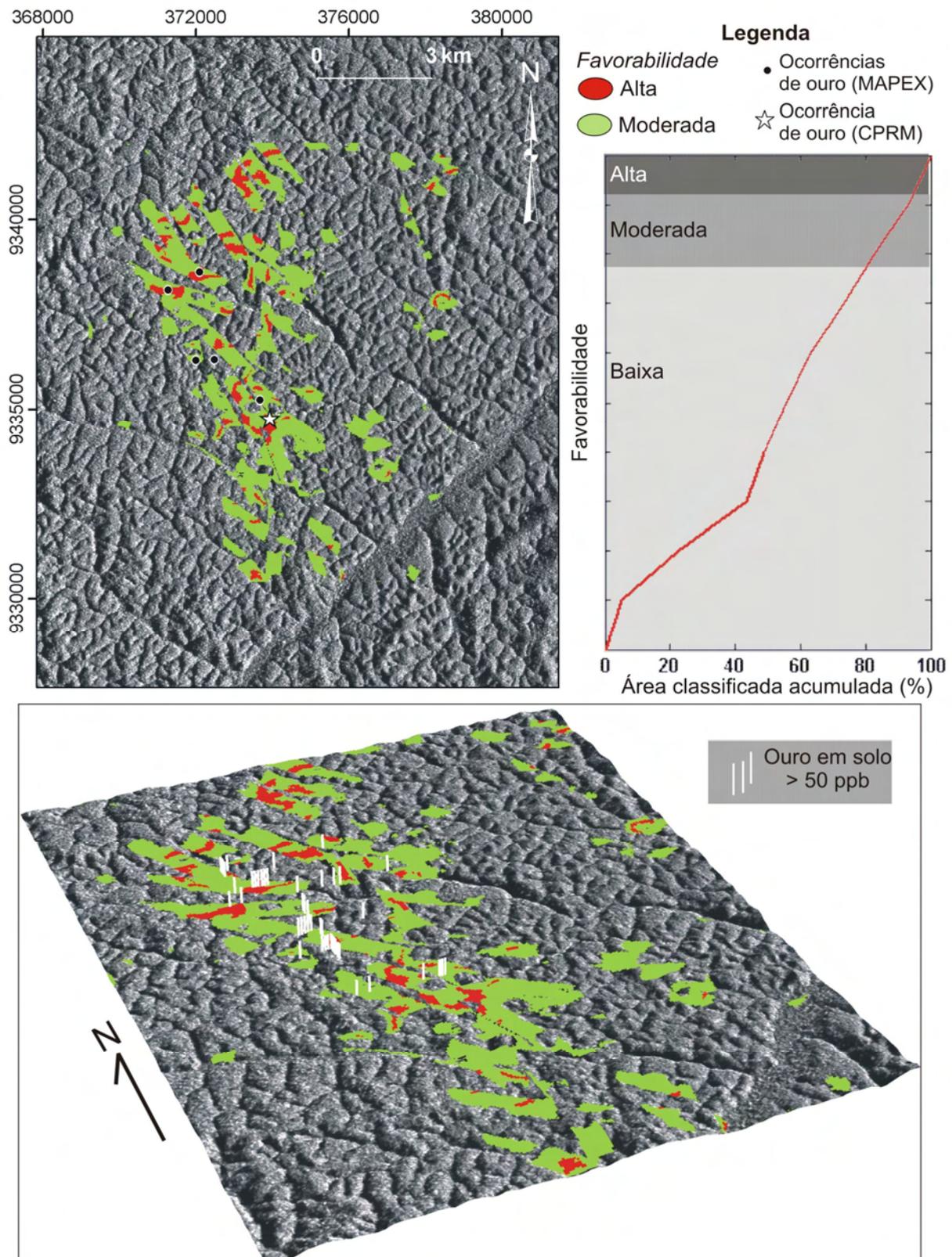


Figura 4.52. Modelo de favorabilidade gerado a partir da aplicação da RBFLN nos dados associados à aerogeofísica e de lineamentos da região do prospecto Maués. Gráfico de favorabilidade *versus* área classificada acumulada e integração dos resultados com dados de geoquímica de solo > 50 ppm estão apresentados. A **figura 4.50** mostra a síntese da aplicação desta técnica.

Tabela 4.3. Quantificação de áreas classificadas por intervalos de favorabilidade (baixa, moderada e alta) em referência à aplicação da técnica RBFLN na região do prospecto Maués.

Mapa de favorabilidade gerado pela técnica RBFLN (Figura 4.51)		
Favorabilidade	Área classificada (km²)	Área classificada acumulada (km²)
<i>Alta</i>	2,048	2,048
<i>Moderada</i>	18,029	20,077
<i>Baixa</i>	71,408	(<i>área total classificada</i>) 91,485

Mapa de favorabilidade gerado pela técnica RBFLN (Figura 4.52)		
Favorabilidade	Área classificada (km²)	Área classificada acumulada (km²)
<i>Alta</i>	1,918	1,918
<i>Moderada</i>	14,558	16,475
<i>Baixa</i>	65,687	(<i>área total classificada</i>) 82,163

A magnetometria gradiométria revelou, de forma superior em relação à magnetometria convencional, feições geofísicas rasas, caracterizadas por baixos gradientes, nos prospectos 12 de Outubro e Rosa de Maio. As feições de baixos gradientes de direção preferencial ENE-WSW estão associadas com o alinhamento dos *pits* dos prospectos 12 de Outubro, assim como com anomalias de ouro em solo e em rocha, e devem representar um sistema de fraturas ou falhas rúpteis as quais foram importantes para percolação de fluidos hidrotermais e origem de *stockworks* relacionados com a mineralização em rochas vulcânicas ácidas do Grupo Iriri. Com relação ao prospecto Rosa de Maio, baixos gradientes E-W além de feições semi-circulares foram verificadas e são consideradas, neste trabalho, como de alta prioridade prospectiva, assim como o padrão estrutural E-W, NE-SW e NNE-SSW associado com a direção preferencial de zonas hidrotermais. Ainda neste prospecto, os diques máficos, *a priori* inclusos na unidade Diabásio Piranhas, aparentemente devem ter um papel importante, pelo menos em um evento remobilizador do ouro, já que tais enxames foram datados em 510 Ma (Santos *et al.* 2002), e a grande maioria das anomalias de ouro em solo e em rocha estão espacialmente relacionadas com tal unidade. Entretanto, dados isotópicos devem ser obtidos para caracterizar a idade deste enxame.

Com respeito a esses dois prospectos, apesar dos aerolevantamentos serem caracterizados por maior resolução, houve o registro de respostas gamaespectrométricas relacionadas com solos e aluviões, obliterando as assinaturas esperadas para rochas hospedeiras de mineralizações ou mesmo de possíveis assinaturas que diagnosticassem alteração hidrotermal (principalmente analisando-se os dados amostrados nas linhas de vôo).

Estruturas paleoproterozóicas de direção NW-SE apontadas por alguns autores (Santos *et al.* 2001b, Pinto *et al.* 2009) como importantes feições associadas com mineralizações na região do prospecto Maués, foram identificadas na imagem SAR-R99B e associadas como

importantes zonas de influência metalogenética. Por isso, foram inclusas como dados de entrada ao processamento de modelagem espacial por meio da aplicação da técnica RBFLN.

No caso do prospecto Bandeirante, o nível de informações geológicas é o mais escasso dentre os quatro prospectos abordados neste capítulo. Em virtude do mesmo contexto de rocha hospedeira granítica (Suíte Intrusiva Parauari), seria interessante a aquisição de dados magnetométricos gradiométricos com espaçamento das linhas de vôo o mais próximo possível daqueles empregados para o prospecto Rosa de Maio (75 m). No entanto, os poucos dados geoquímicos disponíveis enfatizam preliminarmente que as anomalias de ouro estão espacialmente associadas à influência do mesmo enxame de diques como ocorre no prospecto Rosa de Maio.

Em síntese, com base na análise de dados multifonte nos quatro prospectos abordados, nota-se que existe uma diversidade de padrões estruturais e feições geofísicas (sobretudo magnetométricas) em cada um dos mesmos, o que implica em diferentes tipos de alvos prioritários para a prospecção de ouro. Este fato alia-se às características gamaespectrométricas (principalmente aquelas derivadas do uso do gamaespectrômetro portátil), que revelaram diferentes padrões de radiação gama quando da ocorrência de alterações hidrotermais distintas, especificadamente a silicificação (prospecto 12 de Outubro) e a potassificação (prospectos Rosa de Maio e Bandeirante).

Com relação a essas observações gamaespectrométricas terrestres, o gráfico da **Figura 4.53** mostra *clusters* de assinaturas radiométricas provenientes de 18 pontos medidos em campo. Este quadro foi confeccionado por meio da aplicação da Análise por Principais Componentes (APC) nos dados de K, eTh, eU e contagem total medidos, e posterior agrupamento em classes através do uso do classificador K-médias (6 classes). Esta metodologia é uma reprodução do trabalho de Sancevero *et al.* (2008), o qual teve foco na aplicação destas técnicas de estatística multivariada em dados geofísicos de perfilagem de poços de petróleo.

A Análise por Principais Componentes (APC) compreende uma abordagem estatística usada para analisar inter-relações entre um grande número de variáveis e explicar essas variáveis em termos de suas dimensões inerentes comuns. O objetivo consiste em encontrar um meio de condensar a informação contida nas variáveis originais em um conjunto menor de variáveis estatísticas com perda mínima de informações (Hair *et al.* 1998). A técnica K-médias compreende uma classificação não supervisionada que objetiva o agrupamento de dados similares, fato que produz melhor visualização dos mesmos. Simplificadamente, este

método trabalha com o cálculo de distâncias para realizar o agrupamento, sendo que ao usuário cabe a informação do número de classes desejadas. Desta forma, se k classes são definidas, então k diferentes conjuntos com a maior distinção possível entre eles serão discriminados (MacQueen 1967).

Com base nos autovetores produzidos (**Tabela 4.4**), pode-se verificar que a primeira componente principal (PC1) é caracterizada por variância total de 91.916% além de alta contribuição positiva (>0.9) de todas as quatro variáveis (K, eTh, eU e contagem total). Os *scores* obtidos a cada um dos 18 pontos de medidas e referentes a esta primeira componente principal designam de maneira geral, por meio dos maiores valores, as medidas que são caracterizadas por maiores contagens de radiação gama (**Tabela 4.5**). Em contrapartida, os valores de *scores* da PC1 marcados pelos valores mais baixos, caracterizam as rochas com menores contagens da radiação gama (**Tabela 4.5**).

Essa relação é observada no gráfico da **figura 4.53**, em cujo eixo da PC1 é possível analisar claramente dois grandes domínios: um referente às medidas gamaespectrométricas com menores *scores*, ou seja, que caracterizam as rochas com baixas contagens da radiação gama e que perfazem rochas máficas (e.g., MA-MAG06 e DO-MAG11) e solos provenientes de rochas metassedimentares, graníticas e vulcânicas; o outro domínio no gráfico é marcado por maiores valores de *scores*, abrangendo rochas félsicas mineralizadas e aquelas félsicas não mineralizadas e menos afetadas pelo intemperismo. Neste último domínio, ainda analisando-se o eixo da PC1, nota-se que as contagens da radiação gama vão aumentando dos granitos Parauari não-mineralizados (e.g., RM-MAG02 – K = 8 cps, eTh = 5 cps, eU = 6 cps, contagem total = 140 cps), passando para o quartzo-muscovita xisto do Grupo Jacareacanga (MA-MAG01 - K= 8 cps, eTh= 6 cps, eU= 7.5 cps, contagem total = 142 cps), os riolitos brechados mineralizados e silicificados do Grupo Iriri (DO-MAG01, DO-MAG02, DO-MAG03 – K=10 cps, eTh = 8 cps, eU = 10 cps, contagem total = 200 cps), granitos Parauari mineralizados (e.g., RM-MAG04 - K=13 cps, eTh = 10 cps, eU = 10 cps, contagem total = 235 cps), riolitos Iriri não-silicificados (e.g., R001-071 – K=13 cps, eTh = 10 cps, eU = 11 cps, contagem total = 245 cps), até o granito Parauari feldspatizado constatado no prospecto Bandeirante, o qual é caracterizado pelos maiores valores gamaespectrométricos (BD-MAG04 - K= 18 cps, eTh= 14 cps, eU= 15 cps, contagem total = 220 cps).

Essa forma didática da representação das assinaturas geológico-gamaespectrométricas torna possível analisar características pontuais que diferenciam rochas hidrotermalizadas e aquelas que não foram afetadas por tal processo, além de enfatizar que para cada tipo de

alteração hidrotermal predominante (silicificação e enriquecimento em K), o comportamento dos radioelementos torna-se diferente (Figura 4.53). É claro que este compreende uma tentativa inicial de estudo de comparação de assinaturas gamaespectrométricas terrestres na PMT, o que ainda não havia sido feita. Uma maior densidade de medidas gamaespectrométricas terrestres deve ser efetuada a fim de melhorar a caracterização e individualização de grupos associados com diferentes tipos de alteração hidrotermal.

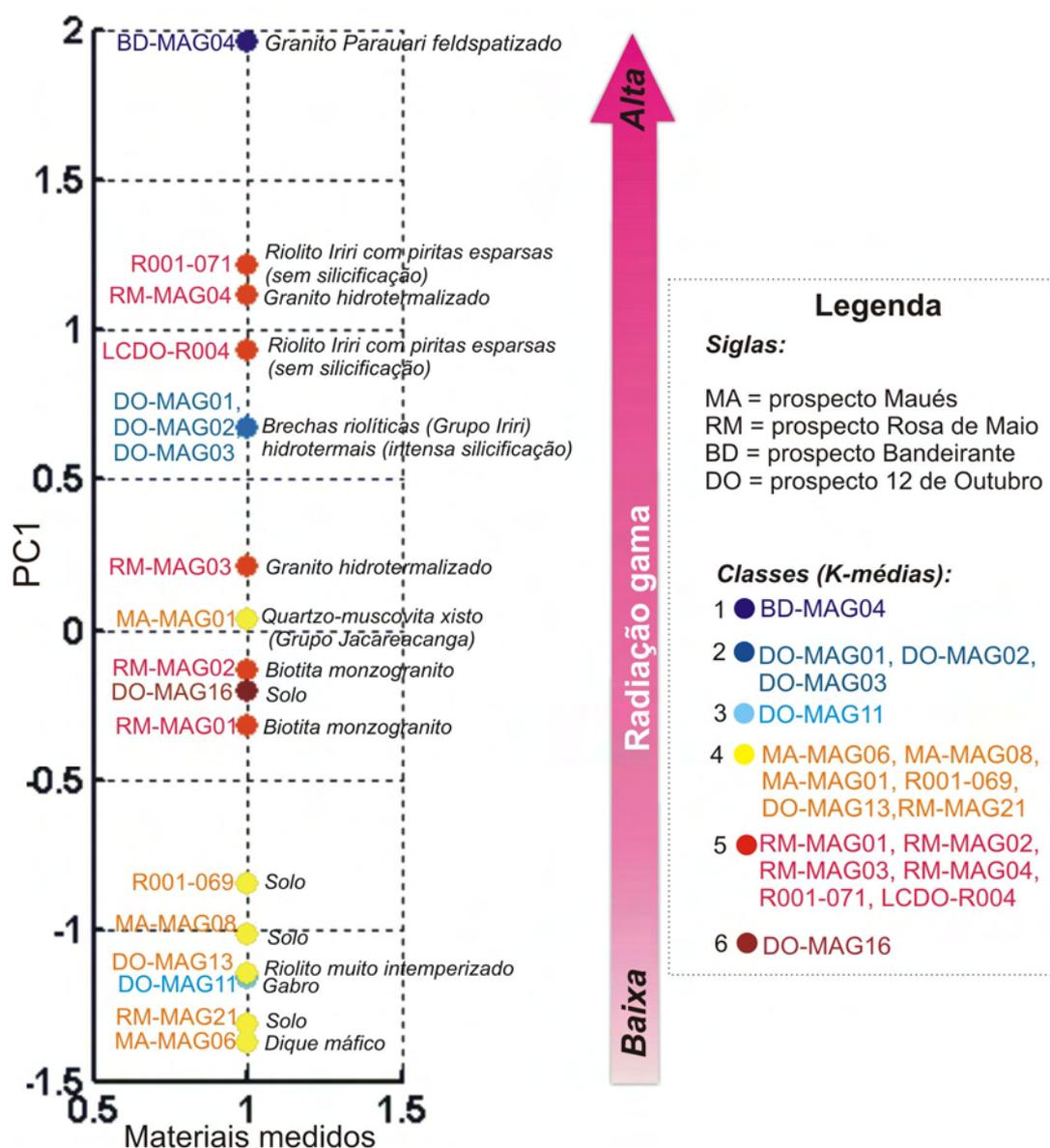


Figura 4.53. Gráfico da PC1 e individualização de domínios geológico-gamaespectrométricos a partir de dados pontuais medidos pelo gamaespectrômetro portátil.

Nota-se também que foi possível diferenciar rochas vulcânicas ácidas do Grupo Iriri mineralizadas e silicificadas (Classe 2) daquelas não afetadas por este tipo de alteração hidrotermal (Classe 5), assim como distinguir granito Parauari K-feldspatizado (Classe 1) daqueles sem este tipo de alteração hidrotermal (Classe 5) (Figura 4.53), por meio da

aplicação da técnica K-médias nos dados de *scores* das componentes principais geradas (cf., Tabela 4.5).

Tabela 4.4. Autovetores e variância característicos da geração de quatro componentes principais.

Variáveis	Componentes principais			
	PC1	PC2	PC3	PC4
<i>K</i>	0.962	-0.185	0.202	-0.014
<i>eTh</i>	0.982	-0.085	-0.131	-0.102
<i>eU</i>	0.982	-0.121	-0.098	0.111
<i>CT</i>	0.907	0.419	0.034	0.005
% de variância	91.916	5.787	1.724	0.573

Tabela 4.5. Scores das componentes principais e agrupamento de classes por meio do uso do classificador K-médias.

Medidas	Scores da PC1	Scores da PC2	Scores da PC3	Scores da PC4	Classes (K-médias)
<i>BD-MAG04</i>	1.9604	0.71786	-3.22047	-0.17956	1
<i>DO-MAG01</i>	0.67401	-0.47206	0.5329	1.56441	2
<i>DO-MAG03</i>	0.67401	-0.47206	0.5329	1.56441	2
<i>DO-MAG02</i>	0.67401	-0.47206	0.5329	1.56441	2
<i>RM-MAG04</i>	1.1125	-0.1961	0.92106	-1.67749	5
<i>RM-MAG03</i>	0.21363	-0.04919	0.50247	-0.93106	5
<i>RM-MAG01</i>	-0.32021	-0.08237	0.20787	-1.17066	5
<i>RM-MAG02</i>	-0.1346	-0.47071	0.02285	-1.06785	5
<i>MA-MAG06</i>	-1.37092	-0.02372	-0.37853	-0.02463	4
<i>DO-MAG11</i>	-1.15705	-0.27345	-1.49171	-0.14256	3
<i>R001-071</i>	1.21844	-0.44393	0.96595	-0.51048	5
<i>LCDO-R004</i>	0.93309	-0.40434	0.61203	-0.58864	5
<i>MA-MAG01</i>	0.03928	-0.23527	-0.32135	0.84954	4
<i>RM-MAG21</i>	-1.01213	-0.28081	0.07049	-0.75139	4
<i>DO-MAG13</i>	-1.14458	-0.41383	-0.22869	0.71348	4
<i>DO-MAG16</i>	-0.2006	3.84278	0.88286	0.32597	6
<i>R001-069</i>	-0.84621	-0.16668	-0.01855	0.86259	4
<i>MA-MAG08</i>	-1.31309	-0.10404	-0.125	-0.40048	4

Sabe-se que processos hidrotermais podem resultar na mudança de conteúdo de radioelementos das rochas hospedeiras. Dos três radioelementos, o K é o mais frequentemente afetado por tais processos, Th é menos freqüente e o U é muito pouco afetado. Apesar do K ser usualmente acrescido durante a alteração hidrotermal, o intemperismo químico geralmente oblitera a intensidade da assinatura de tal alteração (Dickson & Scott 1997). Esta última explicação pode justificar o por que dos granitos hidrotermalizados RM-MAG03 e RM-MAG04 terem sido agrupados na mesma classe (Classe 5) com os granitos não mineralizados representantes da Suíte Intrusiva Parauari (RM-MAG01 e RM-MAG02) (Figura 4.53).

Os mapas prospectivos gerados com base na rede neural artificial RBFLN objetivam a tentativa de distinção de padrões que possam estar relacionados com áreas mais prospectivas a ouro. Tais mapas para os prospectos 12 de Outubro, Rosa de Maio e Maués tentam proporcionar guias para tomadas de decisão sob o enfoque local, como locação de furos de sondagem.

No entanto, o uso de imagens gamaespectrométricas mostrou-se parcialmente útil, pois quanto maior a resolução dos dados, maior foi também o discernimento de assinaturas associadas com coberturas de solos e aluviões, conforme já mencionado anteriormente. Para o prospecto Rosa de Maio, tais obliterações foram fundamentais como justificativa à retirada de imagens gamaespectrométricas do processo de modelagem, pois de forma alguma iriam dar representatividade a um ambiente geológico associado diretamente com o sistema mineralizador.

Com relação à validação dos mapas prospectivos produzidos, apenas dados de geoquímica (ouro em rocha e em solo) e ocorrências de ouro mapeadas pela CPRM puderam ser empregados, pois compreendem os únicos disponíveis para estas regiões dos prospectos abordados. Assim que a fase de sondagem for finalizada, estes dados poderão ser inclusos no processo de validação dos mapas aqui gerados.



CAPÍTULO V. OUTRAS ÁREAS CHAVES À EXPLORAÇÃO AURÍFERA NO TAPAJÓS

Imagem SAR-R99B (Lhh) da região do prospecto Cantagalo

5. APRESENTAÇÃO

De maneira complementar ao estudo inicialmente proposto, outras regiões da porção oeste da Província Mineral do Tapajós, conhecidas pelo potencial aurífero de acordo com os trabalhos do PROMIN-Tapajós (Klein *et al.* 2001a) (**Figura 5.1**), foram investigadas a partir de dados aerogeofísicos regionais e imagens SAR-R99B disponibilizados.

5.1. Contexto geológico

5.1.1. OURO ROXO-CANTAGALO

As principais unidades litoestratigráficas presentes na área Ouro Roxo-Cantagalo compreendem o Complexo Cuiú-Cuiú, a Suíte Intrusiva Parauari, o Grupo Iriri (Formação Salustiano), a Suíte Intrusiva Maloquinha e aluviões (Klein *et al.* 2001a) (**Figura 5.2 (a)**).

Na proposta de Santos *et al.* (2001b), estes depósitos estão inclusos na categoria de ouro orogênico hospedado em arco magmático, enquanto que, de acordo com Coutinho (2008), essa região está localizada no *trend* aurífero Santa Isabel-Ouro Roxo (*cf.*, **Figura 2.6**).

A principal zona de cisalhamento, Ouro Roxo-Cantagalo (também já denominada de Centrinho-Cantagalo (Santos *et al.* 2001b) e São José (Klein *et al.* 2001a)), está orientada na direção aproximada N-S (Santos *et al.* 2001b) (**Figura 5.2 (a)**). Há um forte controle estrutural das mineralizações, com depósitos distribuídos principalmente a leste da principal zona de cisalhamento (Klein *et al.* 2001a, Santos *et al.* 2001b). Estas mineralizações estão associadas com zonas de cisalhamento secundárias, com cerca de 3 km de extensão e orientadas entre as direções N10E e N30E. As rochas hospedeiras são pertencentes ao Complexo Cuiú-Cuiú (Klein *et al.* 2001a, Veloso *et al.* 2008) ou à Suíte Intrusiva Tropas (tonalitos, granodioritos, com xenólitos de basalto e de andesito derivados do arco Cuiú-Cuiú e da Suíte Intrusiva Creporizão), conforme proposto por Santos *et al.* (2001b), os quais dataram zircões de granito pelo método U-Pb, obtendo idades variando de 1905 Ma a 1886 Ma.

Segundo Klein *et al.* (2001), a região é caracterizada por alto potencial aurífero, marcado por veios de quartzo conjugados, lenticularizados e *boudinados*, contendo ouro e

sulfetos, e encaixados em ortognaisses do Complexo Cuiú-Cuiú. À norte, há alta frequência de ocorrências primárias de ouro em veios de quartzo simples, extensionais, encaixados em granitos da Suíte Parauari.

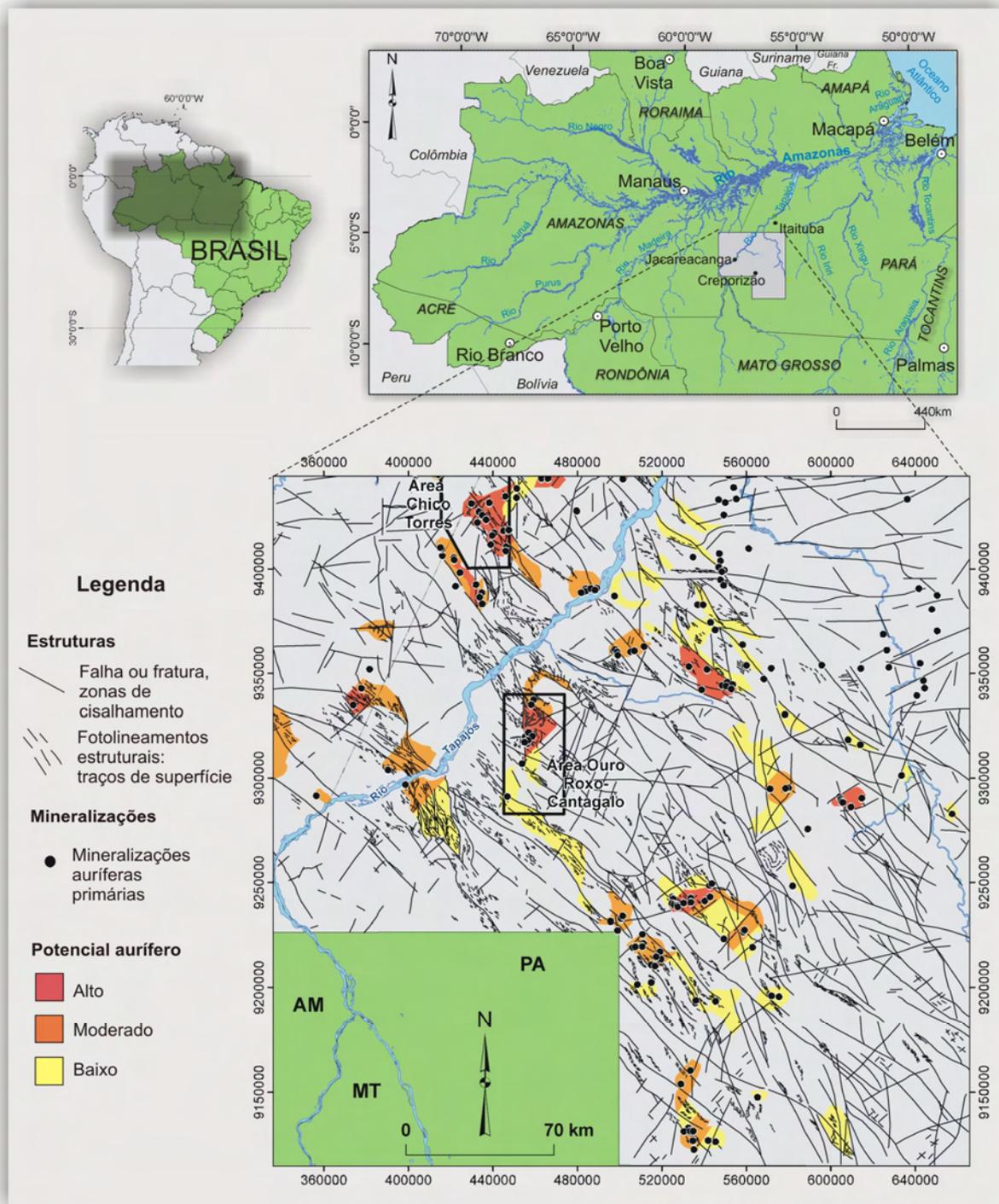


Figura 5.1. Mapa metalogenético da Província Mineral do Tapajós, indicando-se as duas áreas investigadas e caracterizadas por alto potencial aurífero (Modificado de Klein *et al.* 2001a).

Já Santos *et al.* (2001b), analisando o depósito Ouro Roxo, encontraram pirita

disseminada em veios de quartzo, além da forte correlação entre o conteúdo de pirita e a abundância de ouro. Foram constatadas ocorrências de ouro como inclusões de finas partículas em pirita e na forma livre visível. Veloso *et al.* (2008) também estudaram o depósito Ouro Roxo, concluindo preliminarmente, que a mineralização é compatível com um depósito do tipo orogênico. Segundo estes autores, a zona de cisalhamento transcorrente Ouro Roxo-Cantagalo afetou os granitos, gerando-se protomilonitos e milonitos intercalados com zonas de brechas mais restritas. Além da pirita, observa-se a ocorrência de calcopirita, esfalerita e bismutita. As principais alterações hidrotermais consistem na sericitização/fengitização, silicificação, sulfetação, cloritização e carbonatação.

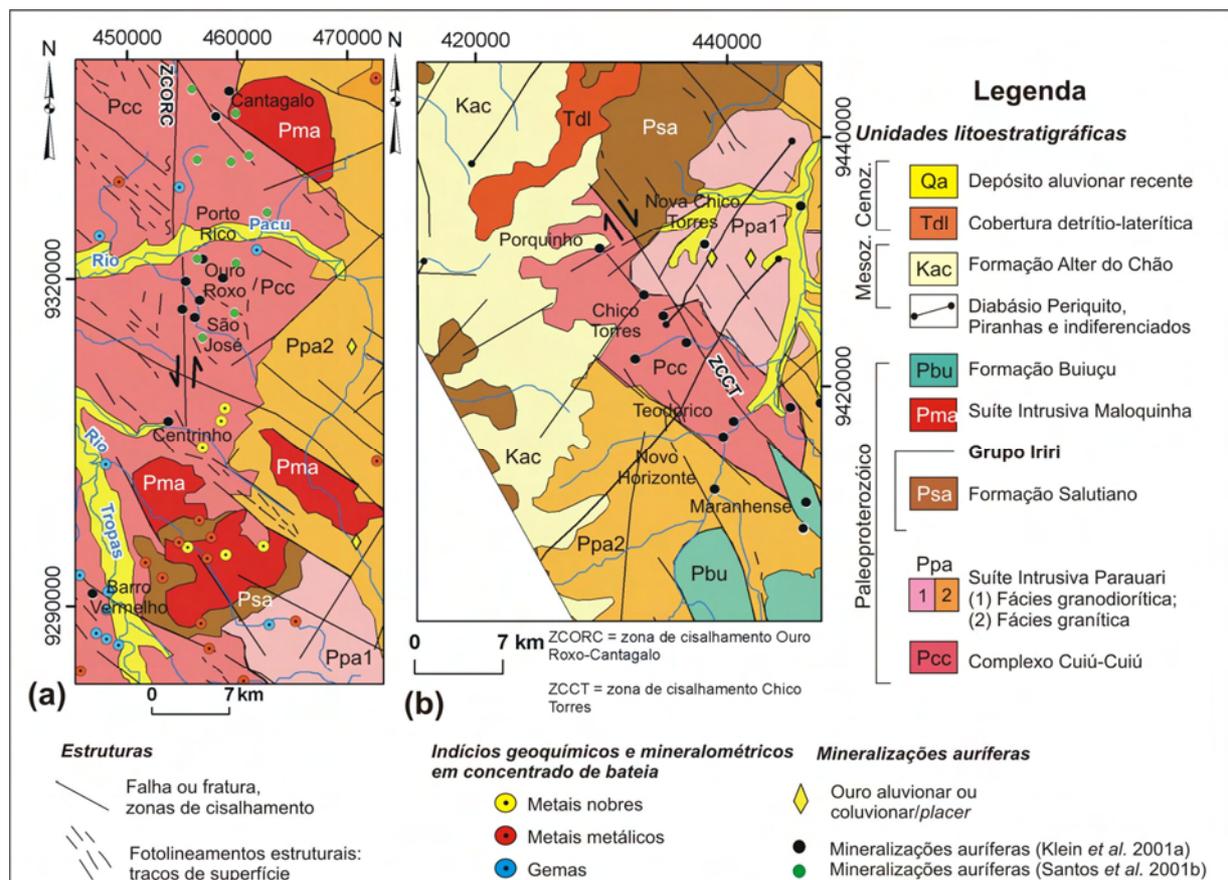


Figura 5.2. Mapas geológicos das áreas em estudo: **(a)** região da zona de cisalhamento Ouro Roxo-Cantagalo (Klein *et al.* 2001a); **(b)** região Chico Torres (Klein *et al.* 2001a).

Cristais prismáticos de hornblenda e lamelas de biotita encontram-se intensamente substituídos por clorita e carbonato e associados com titanita e magnetita. Há também frequentes xenólitos centimétricos a métricos de basaltos e andesitos alterados hidrotermalmente em clorita, epidoto, albita, leucoxênio e pirita (Santos *et al.* 2001b).

Na região do prospecto São José, Coutinho (2008) relata a presença de veios de quartzo orientados na direção N-S e N25E, intercalados no granito da Suíte Intrusiva Parauari.

A mineralogia mostra pirita, calcopirita, calcosita, covelita, goethita e limonita.

Análises de dados aerogeofísicos regionais revelaram altos valores de K associados com áreas mineralizadas, como foi reconhecido por Klein *et al.* (2001a), por meio de altos valores das razões de K/eTh e K/eU, e reforçado por Pedroso *et al.* (2001), Silva (2003) e Silva *et al.* (2007).

5.1.2. CHICO TORRES

Esta área consiste numa porção noroeste da PMT (**Figura 5.2 (b)**) incluída no *trend* aurífero São Jorge-Chico Torres (Coutinho 2008) (*cf.*, **Figura 2.6**).

As unidades mais antigas dessa região consistem no Complexo Cuiú-Cuiú, nos granitos da Suíte Intrusiva Parauari, diabásios e monzogabros da Suíte Intrusiva Ingarana, rochas vulcânicas ácidas (formações Salustiano e Aruri), granitos da Suíte Intrusiva Maloquinha, arenitos da Formação Buiucu, além da sedimentação mais recente representada pela Formação Alter do Chão, diques máficos, coberturas detrito-lateríticas e aluviões (**Figura 5.2 (b)**).

A região é caracterizada por mineralizações de ouro em veios de quartzo sulfetados (Klein *et al.* 2001a). Regiões hidrotermalizadas são mapeadas ao longo da zona de cisalhamento e em rochas hospedeiras como os ortognaisses do Complexo Cuiú-Cuiú (Prospecto Porquinho e algumas lavras do Chico Torres), em granitos da Suíte Intrusiva Parauari (Prospectos Chico Torres, Nova Chico Torres, Cara Preta, Maranhense) e vulcânicas Iriri (Lavra Melechete do prospecto Chico Torres) (Klein *et al.* 2001a). Há o predomínio de alterações hidrotermais como silicificação, sulfetação, cloritização, sericitização e epidotização. São observados controles estruturais de direção NE-SW e NW-SE e mergulhos verticais e subverticais (Klein *et al.* 2001a). O *trend* NW-SE, o qual se relaciona à instalação da zona de cisalhamento Chico Torres, compreende uma zona de transcorrência dextral do sistema de falhas transcorrentes paleoproterozóicas da PMT (**Figura 5.2 (b)**).

Amostras de sulfetos (pirita e galena) em veios de quartzo portadores de ouro do prospecto Chico Torres foram datadas pelo método Pb-Pb, revelando uma idade de 1939 Ma (Coutinho 2008). De acordo com Coutinho (2008), foram observados, especificamente neste prospecto, veios com direção N40W controlados por transcorrência dextral, e alteração hidrotermal filica, com domínio de sericita.

Já segundo Santos *et al.* (2001b), o prospecto Chico Torres está classificado como um depósito do tipo *intrusion related*, tendo sido observados veios de quartzo-pirita-ouro

bandados, com cerca de 30g/t Au.

5.2. Materiais

Foram selecionados dados aerogeofísicos referentes ao levantamento Bloco 1 – Província Aurífera do Tapajós, dados SAR-R99B da Missão Terra do Meio Oeste, além de imagens SRTM, todos já descritos no Capítulo III.

5.3. Abordagem metodológica

5.3.1. AVALIAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS SAR

As correções radiométricas e geométricas das imagens SAR-R99B foram as mesmas realizadas para as áreas dos prospectos Maués, Rosa de Maio, Bandeirante e 12 de Outubro.

As imagens de radar foram utilizadas na integração de dados e para etapa de fotointerpretação. Esta etapa baseou-se principalmente em parte da metodologia apresentada em Santos *et al.* (2001a), e análogo ao realizado para as regiões dos prospectos Maués, 12 de Outubro, Rosa de Maio e Bandeirante.

5.3.2. IMAGENS GEOFÍSICAS AÉREAS

O banco de dados aerogeofísicos utilizado foi pré-processado por Silva (2003).

A partir deste banco de dados, optou-se pela produção de imagens normalizadas do K (Kn), eTh (eThn) e eU (eUn), efetuadas a partir da divisão dos canais radiométricos pela somatória de K, eTh e eU. Composições coloridas dos canais radiométricos em RGB também foram geradas. A este acervo, foram acrescentadas as imagens do parâmetro F (Efimov 1978) e do potássio anômalo (Pires 1995), ressaltando-se que para esta última, o procedimento foi restringido a áreas marcadas pela ausência de expressivos aluviões, pois estes são caracterizados na região da PMT por altos valores no canal do K e, sabidamente, não estão relacionados com processos hidrotermais.

No caso da magnetometria, recortes dos *grids* processados por Silva (2003) foram realizados, a saber: derivadas horizontais nas direções x e y e a derivada vertical de primeira ordem do campo magnético anômalo, amplitude do sinal analítico (Nabighian 1972, Nabighian 1974, Roest *et al.* 1992), amplitude do gradiente horizontal total e inclinação do sinal analítico (Graunch & Cordell 1987). A partir destas imagens foi possível interpretar as principais estruturas e unidades magnéticas.

Os resultados para as regiões Ouro Roxo-Cantagalo e Chico Torres, integrando aerogeofísica com dados SAR e interpretações, estão apresentados nas **figuras 5.3, 5.4, 5.6, 5.7**.

5.3.3. MAPAS DE POTENCIAL AURÍFERO

A lógica *fuzzy* (An *et al.* 1991, Bonham-Carter 1994) foi selecionada para a geração de mapas prospectivos das regiões Ouro Roxo-Cantagalo (**Figura 5.5**) e Chico Torres (**Figura 5.8**), como uma tentativa de gerar mapas previsionais que possam auxiliar a tomada de decisão nestas áreas da PMT. Esta técnica está inclusa no grupo de métodos guiados pelo conhecimento (Bonham-Carter 1994), e é caracterizada, basicamente, pela etapa de fuzificação de dados previamente rasterizados a partir da determinação de pertinências *fuzzy* que permitem o escalonamento dos dados originais em graus de variabilidade entre 0 (pertinência ausente) e 1 (pertinência total). Posteriormente, estes resultados são combinados por meio de operadores *fuzzy* (An *et al.* 1991, Bonham-Carter 1994) para se obter um mapa final de favorabilidade.

5.4. Resultados

5.4.1. OURO ROXO-CANTAGALO

A interpretação da imagem ternária (RGB) de K, eTh e eU da região da zona de cisalhamento Ouro Roxo-Cantagalo (**Figura 5.3 (a)**), refinou as considerações já existentes em Klein *et al.* (2001a), Pedroso *et al.* (2001), Silva (2003) e Silva *et al.* (2007), referentes à unidade hospedeira das mineralizações de ouro, caracterizada por altos valores de K. Nota-se claramente um contato aproximado N-S onde está instalada a zona de cisalhamento Ouro Roxo-Cantagalo e que determina o contato tectônico a oeste desta unidade (**Figura 5.3**). Outros contatos são visíveis pelos produtos gamaespectrométricos, como o de direção NE-SW na região limítrofe com os granitos Parauari e Maloquinha (**Figura 5.3**).

Com base nestas observações e daquelas derivadas do acervo de imagens gamaespectrométricas, que inclui a razão eTh/K, parâmetro F, K anômalo, K normalizado, além da imagem SAR-R99B, foi possível realizar uma interpretação da principal área mineralizada, conforme apresentado na **figura 5.3 (b)**.

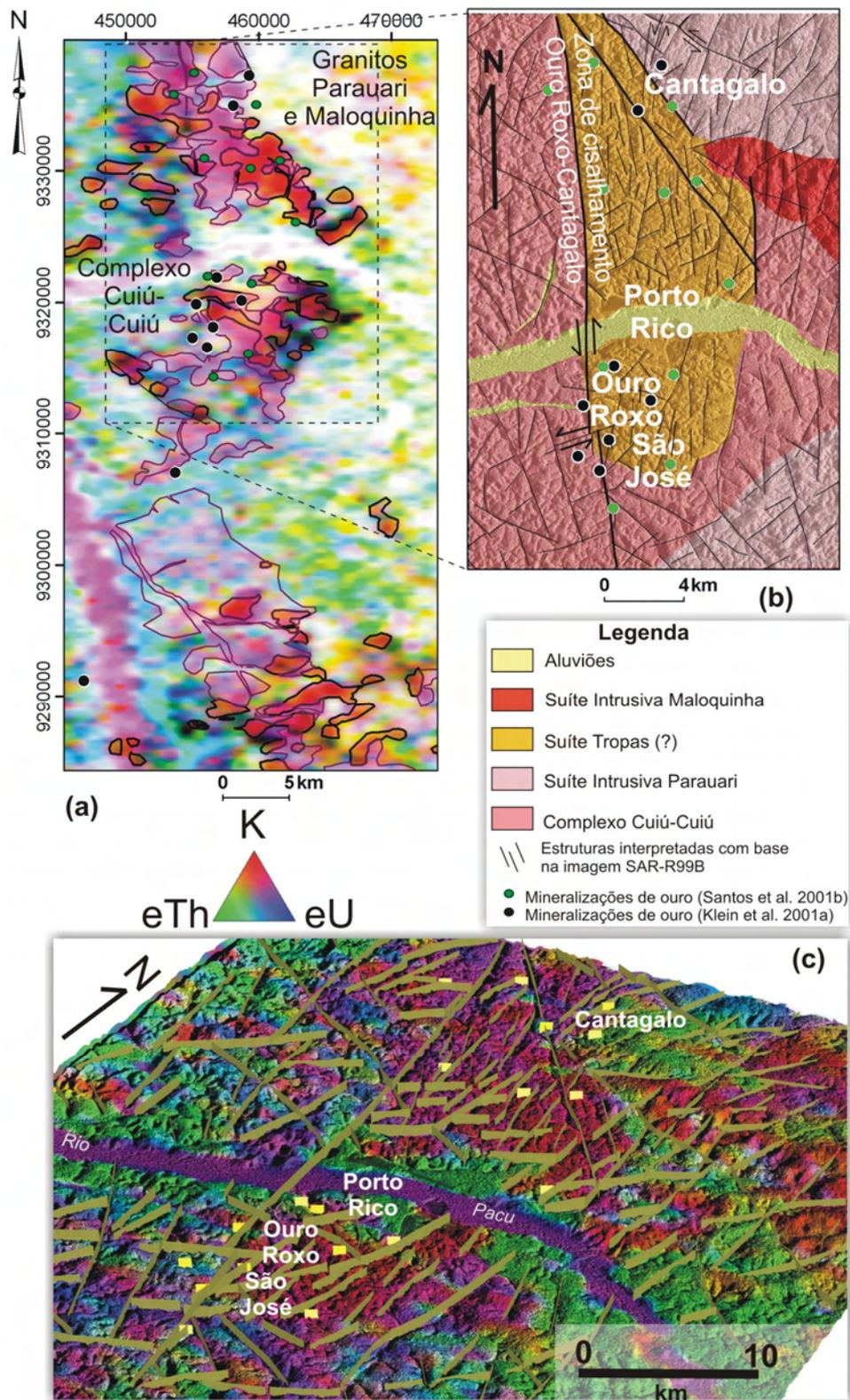


Figura 5.3. Resultados gerados para a área Ouro Roxo-Cantagalo: **(a)** imagem de K, eTh e eU (RGB) com interpretação de unidades de médio a alto K; **(b)** interpretação integrada de dados gamaespectrométricos e do SAR-R99B para a principal área mineralizada; e **(c)** destaque da unidade geofísica de alto K normalizado e caracterizada por proeminente *trend* NNE-SSW, assim como pela zona de cisalhamento Ouro Roxo-Cantagalo, de direção aproximada N-S. As mineralizações estão indicadas pelos polígonos em amarelo.

Observa-se que a unidade central atribuída à Suíte Tropas por Santos *et al.* (2001b) é caracterizada por grande densidade de lineamentos de direção NNE-SSW, com aproximadamente 3 a 5 km de extensão, e que configura o principal controle estrutural das mineralizações auríferas, conforme analisado por Santos *et al.* (2001b). Esta mesma configuração estrutural está visualizada mais claramente na **figura 5.3 (c)**, podendo-se observá-la na região central marcada por altos valores de K normalizado (Kn) (controle litológico) e classificá-la como a principal zona de influência metalogenética desta região.

Com relação às assinaturas magnetométricas, a região é caracterizada por altos valores da ASA, em um ambiente interpretado por Silva (2003) como relacionado ao possível registro de subducção de crosta oceânica e formação do arco Cuiú-Cuiú. A **figura 5.4 (a)** apresenta esta interpretação de Silva (2003) por meio de linha tracejada branca, além das ocorrências auríferas já reconhecidas no domínio de altas amplitudes do sinal analítico.

Adicionalmente, a partir da imagem da primeira derivada vertical do campo magnético anômalo, é possível identificar o domínio mineralizado como associado a relevo magnético mais movimentado (**Figura 5.4 (b)**). Lineamentos magnéticos interpretados com base nas imagens das derivadas, ASA, AGHT e ISA estão apresentados na imagem da derivada vertical (**Figura 5.4 (b)**) e relacionam-se aos *trends* NW-SE e NE-SW paleoproterozóicos.

As setas mostradas na **figura 5.4 (b)** revelam um contraponto existente nas bases georreferenciadas das ocorrências auríferas para a localização do prospecto Ouro Roxo. A seta azul compreende a base proveniente de Klein *et al.* (2001a) enquanto a seta vermelha indica a localização do prospecto estudado em detalhe por Santos *et al.* (2001b). A **figura 5.4 (c)** mostra a caracterização pontual destas duas ocorrências por meio da extração de valores dos *pixels* de imagens gamaespectrométricas e da ASA. Nota-se que há diferenças principalmente quanto às assinaturas de K anômalo, K normalizado, parâmetro F e da razão K/eTh, que são maiores para a ocorrência apresentada em mapa em Santos *et al.* (2001b). Em virtude destas diferenças, as duas bases foram empregadas de maneira individual para validação do processamento por meio da lógica *fuzzy*, conforme descrito abaixo.

Todo o acervo de dados mencionados acima foi utilizado para a produção de mapas de favorabilidade com base na lógica *fuzzy* a partir da determinação de uma hipótese prospectiva. O modelo conceitual proposto para esta região da PMT compreende a associação da mineralização com altos valores magnéticos e de K, além de condicionamento estrutural, visto, por exemplo, na análise da relação das ocorrências auríferas conhecidas pela CPRM com os temas mostrados na **figura 5.3**, e baseando-se nas descrições de campo de alguns

depósitos (Klein *et al.* 2001a, Santos *et al.* 2001b, Veloso *et al.* 2008).

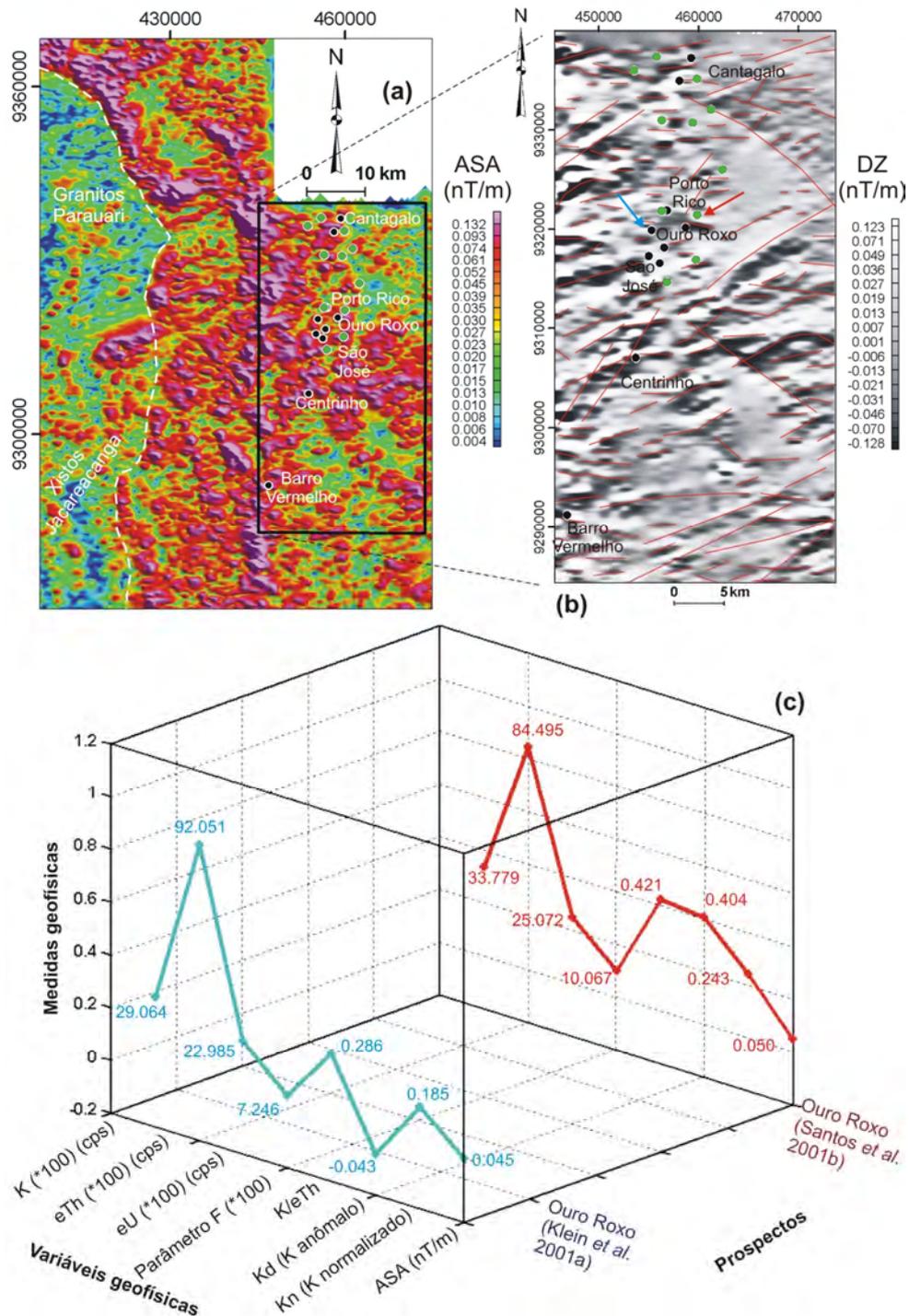


Figura 5.4. Imagens magnetométricas da região Ouro Roxo-Cantagalo: **(a)** a ASA e a interpretação, em linha tracejada branca, de Silva (2003) equivalente ao possível registro da subducção de crosta oceânica e formação do arco Cuiú-Cuiú; **(b)** imagem da primeira derivada vertical do campo magnético anômalo e interpretação de feições lineares magnéticas. Seta azul indica a localização do prospecto Ouro Roxo por Klein *et al.* (2001a), enquanto a seta vermelha refere-se ao mesmo prospecto de acordo com Santos *et al.* (2001b). As características gamaespectrométricas e magnetométricas pontuais destas duas bases georreferenciadas do prospecto Ouro Roxo são mostradas em **(c)**, podendo-se verificar grandes diferenças, principalmente das medidas gamaespectrométricas que realçam o K.

Desta maneira, foram selecionados os seguintes dados para modelagens:

- (a) estruturas magnéticas, gamaespectrométricas e principalmente aquelas visualizadas por meio do SAR-R99B (**Figura 5.3 (b, c)**), e caracterizadas por direção preferencial N10-30E e N-S, em analogia ao depósito Ouro Roxo (*cf.*, Santos *et al.* 2001b);
- (b) imagem da ASA, reclassificada em 256 classes, por caracterizar a região das ocorrências atualmente conhecidas por meio de altas amplitudes. Esta caracterização está associada à ocorrência do arco Cuiú-Cuiú conforme já observado por Silva (2003);
- (c) imagens gamaespectrométricas reclassificadas em 256 classes: imagens da razão de eTh/K (baixos valores caracterizando o possível hidrotermalismo), e do parâmetro F, K anômalo e K normalizado, cujos maiores valores possuem maior probabilidade de associação com a mineralização de ouro.

Definido o modelo conceitual, a lógica *fuzzy* foi aplicada da seguinte maneira (**Figura 5.5**):

- (a) fuzificação de todos os dados de entrada a partir da seleção das seguintes funções de pertinência *fuzzy*: *large* (para as imagens de Kn, Kd, do parâmetro F e da ASA), *small* (para a imagem de eTh/K), e *categórico* (para a imagem de *buffers*, estabelecendo pertinência de 0,95 para o intervalo de 0-250 m e 0,5 para o intervalo de 250-500 m) (**Figura 5.5**);
- (b) uso do operador *E fuzzy* considerando-se todos os dados gamaespectrométricos fuzificados, a fim de resultar em uma única imagem representativa, evitando-se o forte condicionamento destes dados que visam o realce de K (**Figura 5.5**);
- (c) aplicação do operador *fuzzy* gama considerando-se os mapas fuzificados da ASA, de *buffers* e o resultado do operador *E fuzzy* para as imagens gamaespectrométricas. Os parâmetros gama são equivalentes a 0.7 (**Figura 5.5(a)**) e 0.9 (**Figura 5.5 (b)**).

Os dois modelos propostos, observados na **figura 5.5**, caracterizam potencialmente a parte leste da zona de cisalhamento Ouro Roxo-Cantagalo, conforme já questionado por Klein *et al.* (2001a). Como parte do pós-processamento da lógica *fuzzy*, realizou-se a validação destes resultados por meio da computação da classificação ou não das 8 ocorrências auríferas conhecidas por Klein *et al.* (2001a) na principal área mineralizada para possibilidade *fuzzy* de até 0,5 (corte estabelecido), e análise quantitativa das áreas classificadas por intervalos de possibilidades *fuzzy*, incluindo-se as áreas acumuladas totais (**Tabela 5.1**).

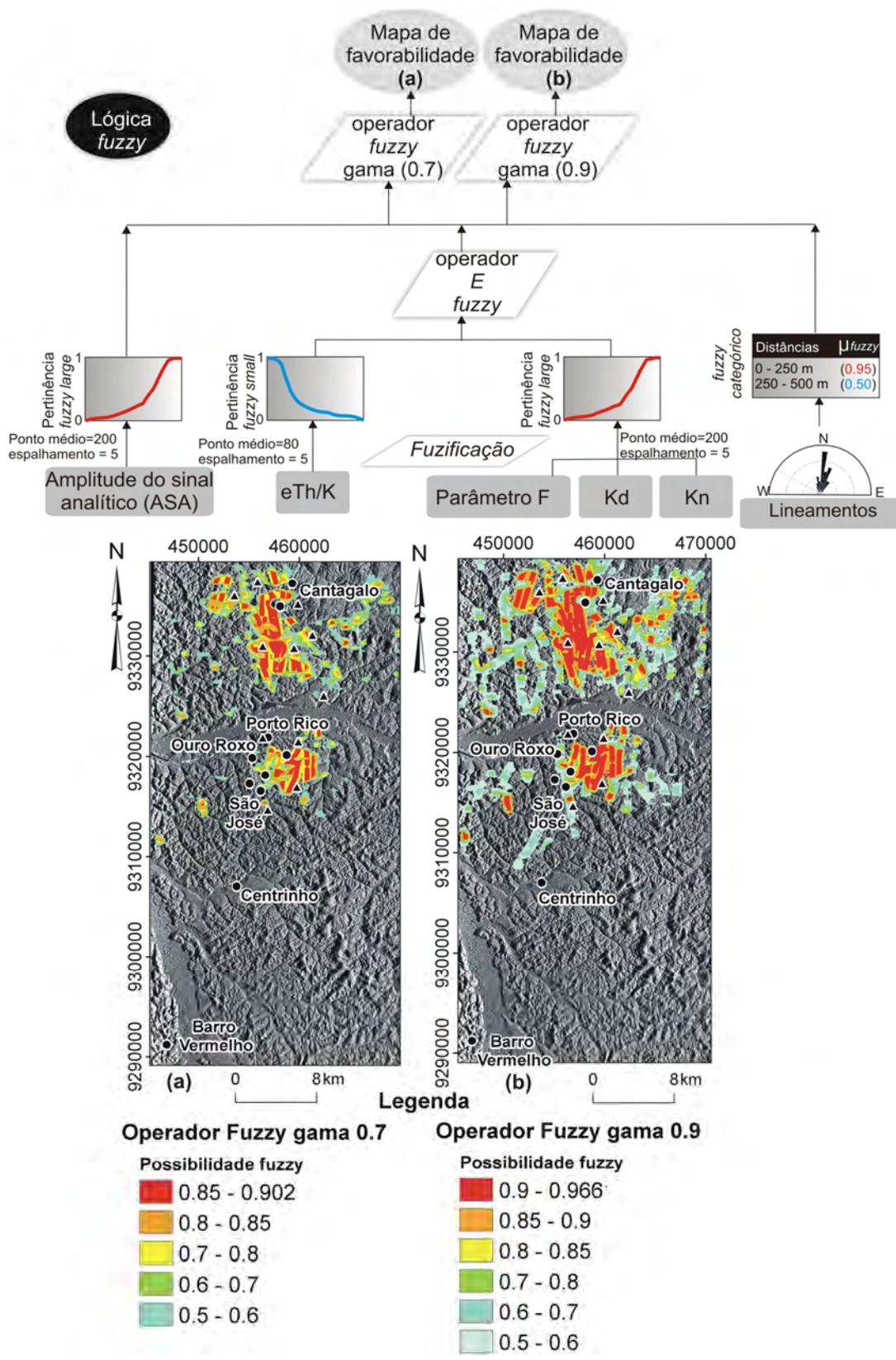


Figura 5.5. Aplicação da lógica *fuzzy* na região Ouro Roxo-Cantagalo. Os mapas de favorabilidade aurífera foram produzidos pelos seguintes operadores *fuzzy*: **(a)** *fuzzy* gama (0,7); **(b)** *fuzzy* gama (0,9). Triângulos pretos compreendem as ocorrências de ouro identificadas em Santos *et al.* (2001b), e círculo pretos aquelas indicadas em Klein *et al.* (2001a).

Desta forma, para o mapa potencial gerado pelo operador *fuzzy* gama 0,7 (**Figura 5.5 (a)**), houve a validação de 5 (62,5%) ocorrências auríferas conhecidas na área favorável que ocupa 99,0846 km² (**Tabela 5.1**), enquanto que com relação ao mapa potencial produzido pelo operador *fuzzy* gama 0.9 (**Figura 5.5 (b)**), ocorreu uma validação de 6 (75%) ocorrências existentes na área classificada total de 244,5534 km² (**Tabela 5.1**).

Com relação aos 11 registros de ouro provenientes de Santos *et al.* (2001b), houve uma validação de 54,44 % (6 ocorrências) e 72,73 % (8 ocorrências), respectivamente, para os mapas prospectivos gerados pelo operador *fuzzy* gama 0.7 e *fuzzy* gama 0.9 (**Figura 5.5**).

Tabela 5.1. Quantificação de áreas classificadas por intervalos de possibilidades *fuzzy* resultantes da aplicação de operadores *fuzzy* gama na região Ouro Roxo Cantagalo.

Mapa de favorabilidade (operador <i>fuzzy</i> gama 0,7) (Figura 5.5 (a))		
Intervalo de μ_{fuzzy}	Área classificada	Área classificada acumulada
0,9-0,902	1,1619 km ²	1,1619 km ²
0,8-0,9	35,1648 km ²	36,3267 km ²
0,7-0,8	24,2388 km ²	60,5655 km ²
0,6-0,7	21,0474 km ²	81,6129 km ²
0,5-0,6	17,4717 km ²	99,0846 km²
0,4-0,5	20,2302 km ²	119,3148 km ²
0,3-0,4	25,2441 km ²	144,5589 km ²
0,2-0,3	53,2665 km ²	197,8254 km ²
0,1-0,2	76,9788 km ²	274,8042 km ²
0-0,1	52,6707 km ²	(Área total classificada) 327,4749 km²
Mapa de favorabilidade (operador <i>fuzzy</i> gama 0,9) (Figura 5.5 (b))		
Intervalo de μ_{fuzzy}	Área classificada	Área classificada acumulada
0,9-0,966	46,8207 km ²	46,8207 km ²
0,8-0,9	45,7182 km ²	92,5389 km ²
0,7-0,8	32,5512 km ²	125,0901 km ²
0,6-0,7	50,0679 km ²	175,1580 km ²
0,5-0,6	69,3954 km ²	244,5534 km²
0,4-0,5	36,0495 km ²	280,6029 km ²
0,3-0,4	21,2625 km ²	301,8654 km ²
0,2-0,3	14,1696 km ²	316,0350 km ²
0,1-0,2	5,1246 km ²	321,1596 km ²
0-0,1	6,3153 km ²	(Área total classificada) 327,4749 km²

Nota-se, claramente, que os modelos prospectivos efetuados para tomada de decisão na região Ouro Roxo-Cantagalo (**Figura 5.5**) devem ser melhorados com base em dados aerogeofísicos de maior resolução, pois estes permitiriam discriminar potencialmente áreas marcadas por alteração hidrotermal rica em K (levando-se em conta que o intemperismo químico não haja obliterando em demasiado as assinaturas esperadas, como verificado no prospecto Rosa de Maio). Os dados com espaçamento de linhas de vôo de 1 km aqui

empregados generalizam a unidade não mapeada, mas não suprem totalmente a questão de reconhecimento hidrotermal.

5.4.2. CHICO TORRES

Esta região da PMT é caracterizada pelo *trend* NW-SE conforme observado pelas imagens ternárias em RGB de K, eTh, eU (**Figura 5.6 (a)**) e de Kn, eThn e eUn (**Figura 5.7**), que realçam as assinaturas chaves de médio a alto K e alto Kn (K normalizado) completamente associadas com as ocorrências já cartografadas pela CPRM (Klein *et al.* 2001a) e, aparentemente, com a instalação da zona de cisalhamento Chico Torres.

O fato mais interessante compreende a verificação de que esta unidade geofísica não se associa com uma resposta dependente de uma única unidade litoestratigráfica (*cf.*, mapa geológico da **figura 5.2 (b)**), mas sim à interface do contato entre as três principais unidades portadoras de ouro nesta região: granitos Cuiú-Cuiú e Parauari, além de rochas vulcânicas Iriri.

Destaque também é dado à imagem do K anômalo (Kd) (**Figura 5.6 (b)**), a partir da qual foi possível interpretar dois *trends* paralelos com direção N40W, marcados por valores anômalos e com extensão de cerca de 46,170 km. Esta direção é a mesma da orientação de veios auríferos sulfetados constatados no prospecto Chico Torres (Coutinho 2008). Este mesmo padrão estrutural é reconhecido na imagem de radar, e está representado na **Figura 5.7** pelos principais alinhamentos de drenagem interpretados.

Com a integração de dados mostrada na **figura 5.6 (d)** é possível observar que a região em apreço está inclusa, regionalmente, no *megatrend* aurífero São Jorge-Chico Torres (Coutinho 2008), assim como outros importantes distritos auríferos da PMT.

A análise 1D dos dados geofísicos compreendeu outro artifício usado na região da zona de cisalhamento Chico Torres, pois tal procedimento permite averiguar assinaturas com maior resolução, já que uma medida gamaespectrométrica foi realizada a cada 55 m. Os perfis de linhas de vôo selecionados (L11030, L11050, L11060) caracterizam claramente as ocorrências de ouro desta região nos pico anômalos da razão K/eTh, Kn e parâmetro F, a exemplo dos prospectos aqui indicados como Chico Torres 1 e 2. Por sua vez, assinaturas ambíguas permitiram o reconhecimento de alvos potenciais, como aqueles indicados por A1 e A2 (**Figura 5.6 (c)**).

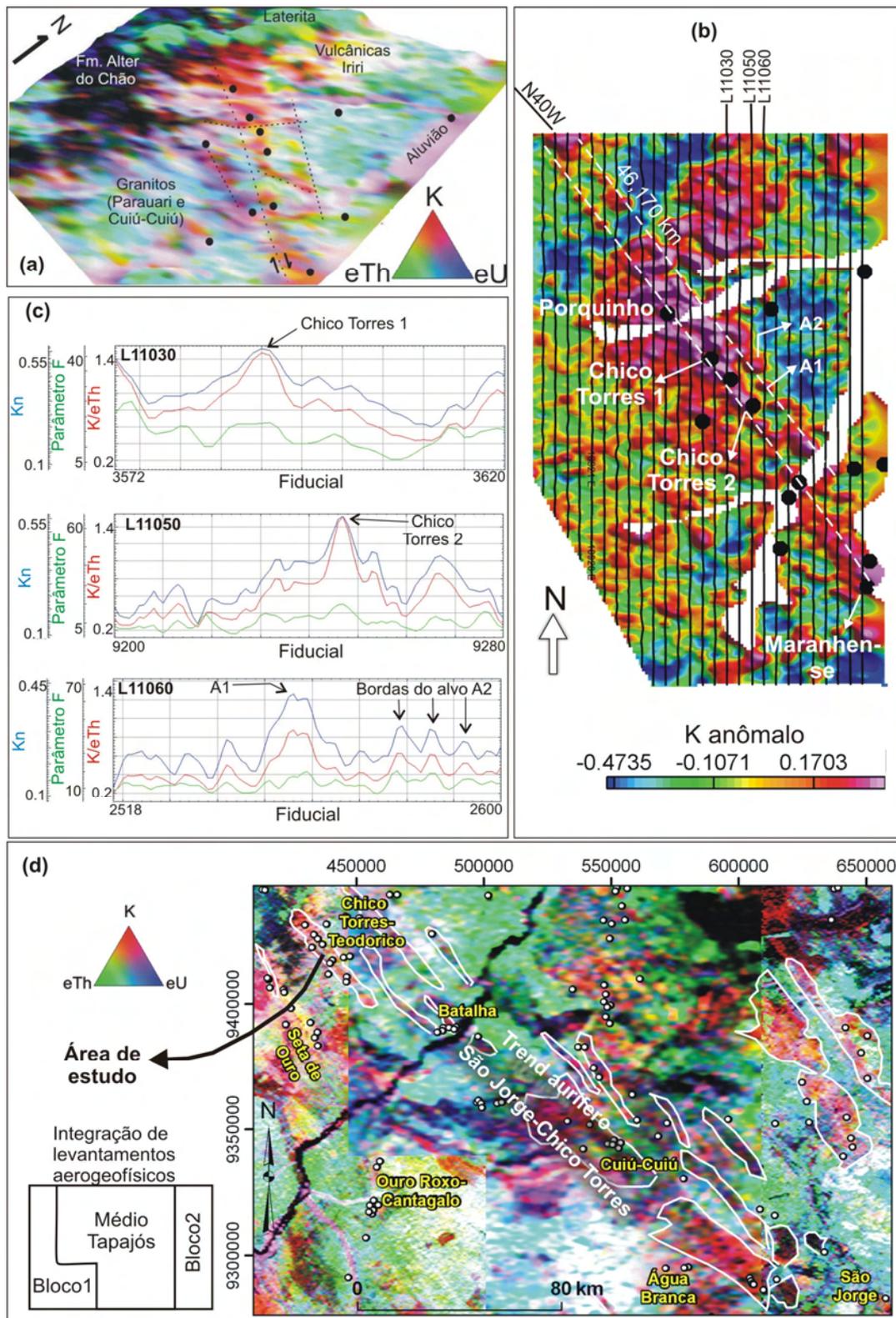


Figura 5.6. Resultados referentes à região da zona de cisalhamento Chico Torres: **(a)** imagem ternária (RGB) de K, eTh e eU integrada com o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), e visualização de importante estrutura delgada e de médio a alto K orientada na direção NW-SE; **(b)** imagem do K anômalo, destacando-se o *trend* N40W; **(c)** perfis gamaespectrométricos, ressaltando anomalias potenciais associadas com a mineralização; **(d)** inserção da região do prospecto Chico Torres no *trend* aurífero São Jorge-Chico Torres.

A formulação de um modelo conceitual para a previsão de ouro na região da zona de cisalhamento Chico Torres foi realizada considerando-se as informações provenientes do PROMIN-Tapajós (Klein *et al.* 2001a) e outros trabalhos importantes (e.g., Coutinho 2008), que relataram típicos halos hidrotermais bem desenvolvidos, com alterações na qual o enriquecimento em K é marcante (e.g., fílica, com domínio de sericita), e havendo intenso condicionamento estrutural, principalmente com a disposição de veios auríferos em direções NW-SE. Frente a estas considerações, imagens de realce do radioelemento K foram selecionadas como dados de entrada para modelagem através da lógica *fuzzy*, a saber: eTh/K, parâmetro F, K normalizado e K anômalo.

No caso das estruturas interpretadas com base no radar (**Figura 5.7 (a)**), as assinaturas delgadas provenientes da unidade gamaespectrométrica de médio a alto K refletem os próprios lineamentos principais da região de estudo e que, por sua vez, correlacionam-se com as mineralizações auríferas já identificadas. Desta maneira, lineamentos gamaespectrométricos (**Figura 5.6 (a)**) ou mesmo interpretados por meio do radar (**Figura 5.7**) não foram acrescidos ao banco de dados para as modelagens, somente as imagens gamaespectrométricas supracitadas. Com relação às assinaturas magnetométricas, é possível observar, na **figura 5.6 (b)**, a caracterização pontual das principais ocorrências de ouro desta região em função da ASA, e analisar que os extensos diques de diabásio com idades entre 510 a 180 Ma e de direção NE-SW são típicos de alguns prospectos, como o Chico Torres. Como ainda não há estudos que informem consistentemente uma possível relação destas intrusões mais recentes com uma remobilização do ouro paleoproterozóico, por exemplo, este tipo de imagem foi retirado do processo de modelagem espacial.

As unidades litoestratigráficas referentes ao mapa geológico do PROMIN-Tapajós (*cf.*, **Figura 5.2 (b)**) foram utilizadas para o processamento da lógica *fuzzy*, diferentemente da área Ouro Roxo-Cantagalo, pois nesta última é muito questionável a presença de outra unidade, denominada Suíte Tropas (Santos *et al.* 2001b), ao invés do Complexo Cuiú-Cuiú onde há registros das mineralizações auríferas.

O primeiro passo na aplicação da lógica *fuzzy* consistiu na reclassificação das imagens gamaespectrométricas para 256 classes, e posterior determinação de funções de pertinência *fuzzy*.

Essas funções foram estabelecidas durante o processo de fuzificação: às imagens de K normalizado, K anômalo, parâmetro F, e à imagem da razão eTh/K, estabeleceu-se uma relação de favorabilidade aos altos (função *large*) e baixos valores (função *small*),

respectivamente, aos dois conjuntos de imagens mencionados (**Figura 5.8**). No caso do mapa geológico, a função de pertinência *fuzzy categórico* foi empregada da seguinte maneira (**Figura 5.8**): possibilidade de 0,95 à unidade Complexo Cuiú-Cuiú (onde, majoritariamente, há maior intensidade de ocorrências auríferas), 0,90 à unidade Suíte Parauari, 0,70 à unidade Grupo Iriri (Formação Salustiano), e possibilidade 0 às demais unidades onde ocorrências de ouro não são observadas (Formação Buiçu, Formação Alter do Chão, coberturas detrítico-lateríticas e aluviões).

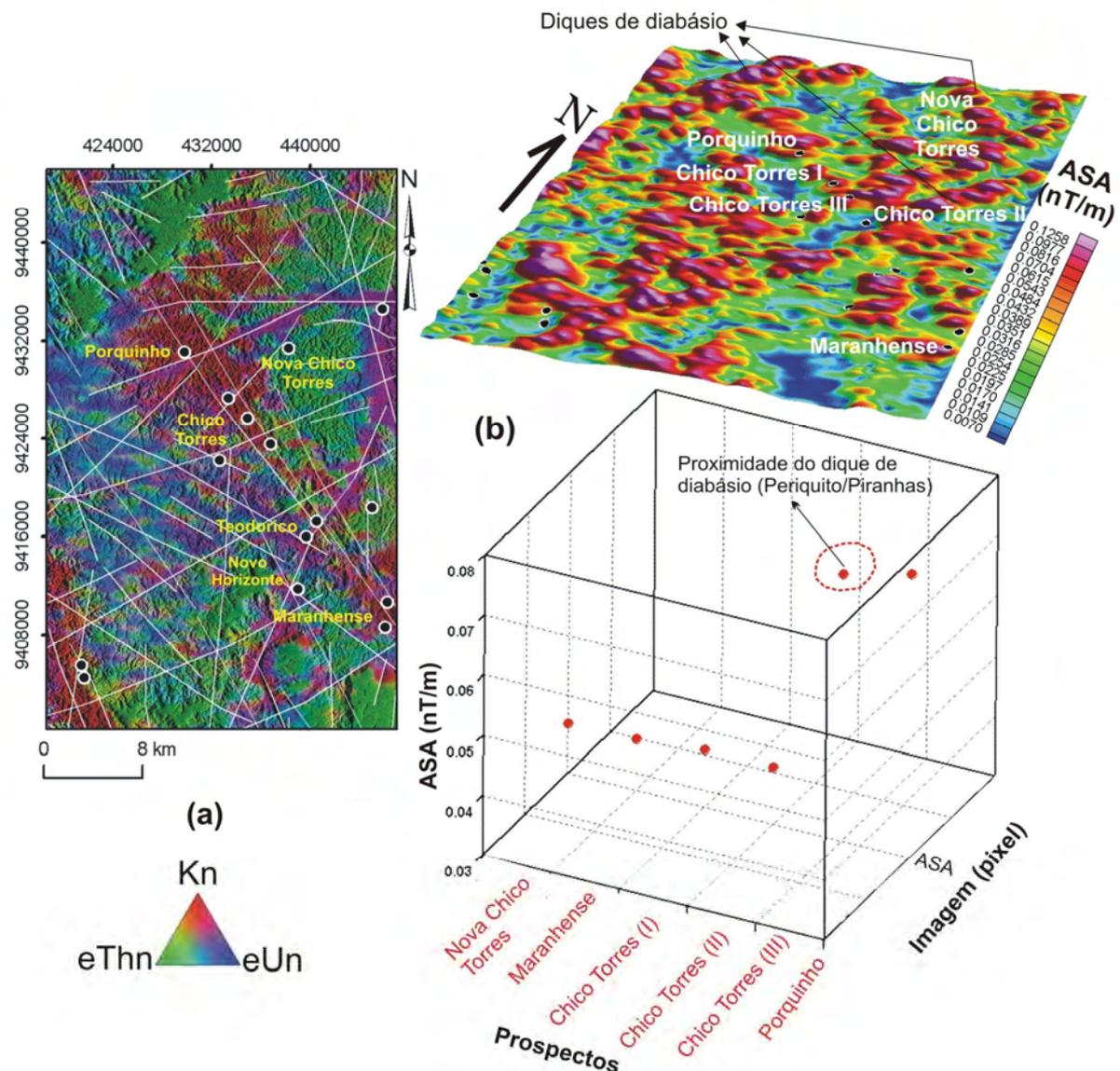


Figura 5.7. Integração da imagem SAR-R99B (Lhh) com a da composição ternária RGB de Kn, eThn e eUn, incluindo os principais alinhamentos de drenagem (a). Em (b), gráfico tridimensional acerca das respostas típicas da ASA referentes aos principais prospectos da região, e extraídas de pixels da imagem correspondente. Notar que altas amplitudes do sinal analítico estão associadas a alguns prospectos, e devem-se às respostas de diques máficos, os quais ainda não estão claramente definidos quanto a uma possível relação com as mineralizações auríferas.

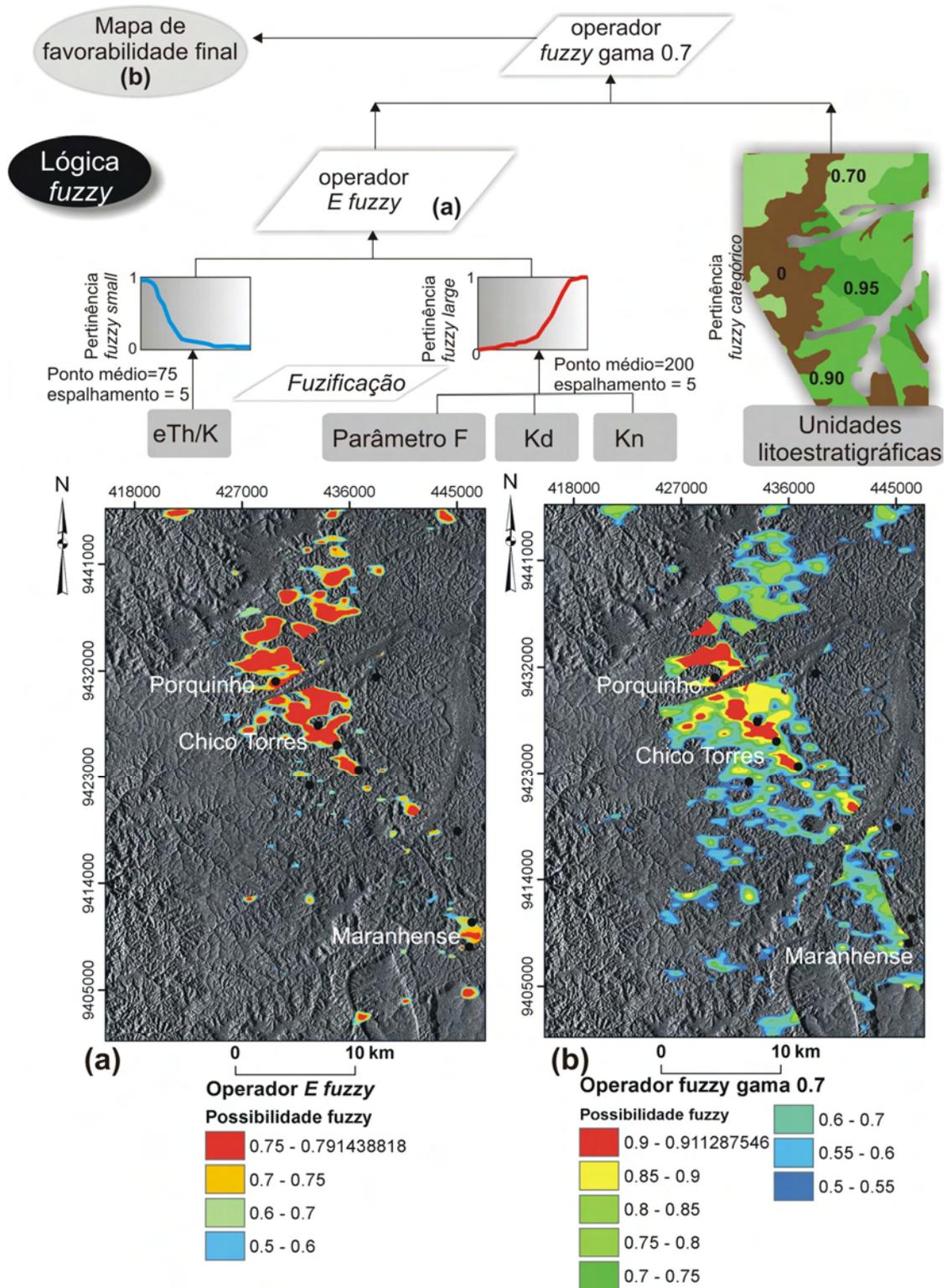


Figura 5.8. Aplicação da lógica *fuzzy* na região da zona de cisalhamento Chico Torres. Os mapas de favorabilidade aurífera foram produzidos pelos seguintes operadores *fuzzy*: (a) *E fuzzy*; (b) *fuzzy gama (0.7)*.

O segundo passo compreendeu a combinação dos quatro mapas de produtos gamaespectrométricos fuzificados por meio da escolha do operador *E fuzzy*, objetivando a

redução do condicionamento destes dados (**Figura 5.8 (a)**). Posteriormente, este resultado gerado pela aplicação do operador *E fuzzy* foi combinado, por meio do operador *fuzzy gama* 0,7, com o mapa geológico fuzificado, resultando no mapa de favorabilidade final mostrado na **Figura 5.8 (b)**.

Como pós-processamento dos resultados previsionais, a **tabela 5.2** apresenta a quantificação das áreas classificadas segundo intervalos de possibilidades *fuzzy*, além das áreas acumuladas. Neste sentido, utilizando o corte de possibilidade *fuzzy* de 0,5, observa-se uma validação de 6 ocorrências de ouro (66,67%) na área total de 91,5129 km² (**Tabela 5.2**) para o mapa gerado pelo operador *E fuzzy* (**Figura 5.8 (a)**). No caso do mapa potencial produzido pelo operador *fuzzy gama* 0,7 (**Figura 5.8 (b)**), a validação foi de 7 ocorrências conhecidas (77,78%) e que, espacialmente, estão inseridas na área total de 246,7998 km² (**Tabela 5.2**).

Tabela 5.2. Quantificação de áreas classificadas por intervalos de possibilidades *fuzzy* resultantes da aplicação da lógica *fuzzy* na região Chico Torres.

Mapa gerado pelo operador <i>E fuzzy</i> (Figura 5.8 (a))		
Intervalo de μ_{fuzzy}	Área classificada	Área classificada acumulada
0,7-0,791	56,5308 km ²	56,5308 km ²
0,6-0,7	20,7090 km ²	77,2398 km ²
0,5-0,6	14,2731 km ²	91,5129 km²
0,4-0,5	23,0463 km ²	114,5592 km ²
0,3-0,4	47,3715 km ²	161,9307 km ²
0,2-0,3	75,9375 km ²	237,8682 km ²
0,1-0,2	147,2800 km ²	385,1482 km ²
0-0,1	650,1900 km ²	(Área total classificada) 1.035,3380 km²
Mapa de favorabilidade final (operador <i>fuzzy gama</i> 0,7) (Figura 5.8 (b))		
Intervalo de μ_{fuzzy}	Área classificada	Área classificada acumulada
0,9-0,911	16,6230 km ²	16,6230 km ²
0,8-0,9	28,7361 km ²	45,3591 km ²
0,7-0,8	50,5710 km ²	95,9301 km ²
0,6-0,7	60,8895 km ²	156,8196 km ²
0,5-0,6	89,9802 km ²	246,7998 km²
0,4-0,5	111,4515 km ²	358,2513 km ²
0,3-0,4	92,4012 km ²	450,6525 km ²
0,2-0,3	74,5677 km ²	525,2202 km ²
0,1-0,2	81,9036 km ²	607,1238 km ²
0-0,1	428,2074 km ²	(Área total classificada) 1.035,3313 km²

Os modelos previsionais para ouro gerados com base na lógica *fuzzy* (**Figura 5.8**), apesar da simplicidade, foram condizentes com o modelo conceitual estabelecido, definindo-se favorabilidades com variação ora mais ‘pessimistas’ (**Figura 5.8 (a)**, **Tabela 5.2**) ora mais

‘otimistas’ (**Figura 5.8 (b)**, **Tabela 5.2**) à seleção de alvos exploratórios. Esta seleção é dependente da natureza dos operadores *fuzzy*, conforme caracterizados conceitualmente (*cf.*, An *et al.* 1991, Bonham-Carter 1994). Uma maior cautela deve ser considerada na porção N-NE, na qual a existência de rochas vulcânicas ácidas Iriri permitiu a atribuição de uma possibilidade média a alta para alvos auríferos. Esta seleção por meio da lógica *fuzzy* não está descartada, porém a prioridade litológica nesta área associa-se principalmente aos litotipos Cuiú-Cuiú e Parauari e, secundariamente, às rochas vulcânicas (*cf.*, **Figura 5.2 (b)**, Klein *et al.* 2001a).

5.5. Discussões

As principais conclusões obtidas para as duas áreas abordadas na Província Mineral do Tapajós incluem a definição de novas estruturas e assinaturas geofísicas chaves à exploração aurífera.

Essa abordagem também demonstra a complexidade em se propor modelos prospectivos na PMT, visto a carência de informações geológicas em grande parte desta província, além do fato de ser recomendável a aquisição de dados aerogeofísicos de alta resolução para esta região, com destaque à magnetometria gradiométrica. Os mapas previsionais das **Figuras 5.5 e 5.8** exemplificam modelos exploratórios aplicados a conjunto de dados regionais que, por sua vez, são muito comuns para regiões do tipo *greenfield*.

Os estudos de caso considerando as áreas Ouro Roxo-Cantagalo e Chico Torres deixam explícitos a necessidade de se criar modelos prospectivos específicos para regiões, ao invés de considerar toda a Província Mineral do Tapajós. Isto porque a complexidade estrutural para cada setor da província é variável, como por exemplo, nos prospectos Ouro Roxo (estruturas mineralizadas com direção preferencial NNE-SSW) e Chico Torres (controle estrutural das mineralizações predominante em ~N40W), assim como o tipo das mineralizações, alterações hidrotermais etc.

Com respeito aos mapas prospectivos gerados (**Figuras 5.5 e 5.8**), estes foram baseados no conhecimento obtido dos prospectos-tipo Ouro Roxo e Chico Torres. Desta forma, e em virtude da grande discussão sobre a origem das mineralizações na PMT, há a necessidade de estudos mais detalhados nos demais prospectos de cada uma destas duas regiões a fim de verificar se a mesma dependência estrutural e alterações hidrotermais são verificadas. Dados de inclusões fluidas, de geoquímica isotópica entre outros serão capazes de propiciar um entendimento sobre a metalogênese das regiões dos prospectos aqui abordados.

Este estudo também ressalta que modelagens prospectivas dirigidas pelos dados, tais como, redes neurais, pesos de evidência entre outras, não possuiriam grande consistência utilizando-se o mesmo banco de dados aqui selecionado. Este fato é bem ilustrado no caso da região da zona de cisalhamento Ouro Roxo-Cantagalo, cujas ocorrências auríferas primárias provenientes de Klein *et al.* (2001a) e Santos *et al.* (2001b) não coincidem espacialmente, a exemplo do prospecto Ouro Roxo (e.g., **Figura 5.4 (b)**). Para dados mais precisos e de maior resolução, estas técnicas devem ter resultados mais coerentes.

CAPÍTULO VI. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Imagem SAR-R99B (Lhh) da região garimpeira do 'Distrito de Pacu' (Santos et al. 2001b)

Os resultados e considerações obtidos nesta dissertação de mestrado visam contribuir para a caracterização geofísico-estrutural de prospectos abordados da porção oeste da PMT, que compreende um segmento desta província muito pouco investigado geologicamente.

As principais características geofísicas e correlações com aparentes controles estruturais dos prospectos 12 de Outubro, Rosa de Maio, Bandeirante e Maués, além das observações regionais advindas das regiões aqui denominadas Chico Torres e Ouro Roxo-Cantagalo, estão sintetizadas na **figura 6.1**. Os resultados obtidos indicam a grande variedade existente na porção oeste da PMT quanto às assinaturas geofísicas características de rochas hospedeiras metassedimentares, vulcânicas e graníticas, somando-se as respostas esperadas para as alterações hidrotermais predominantes em cada prospecto, assim como diferentes feições geofísicas e estruturais que possam estar relacionadas a cada setor abordado (**Figura 6.1**).

As principais conclusões obtidas a partir da interpretação de estruturas em imagens de sensoriamento remoto e dos dados magnetométricos acerca dos prospectos abordados consistem em (*cf.*, **Figura 6.1**):

- **prospecto 12 de Outubro:** assim como no prospecto Rosa de Maio, o uso da aeromagnetometria gradiométrica revelou as feições geofísicas mais interessantes de todas as áreas de estudo desta dissertação de mestrado, em função destes dados serem os de maior resolução frente a todo o acervo cedido pela empresa Mapex Mineração, Importação e Exportação Ltda. Para o prospecto 12 de Outubro, as feições lineares de baixo gradiente com direção preferencial ENE-WSW foram interpretadas como de alta prioridade para a exploração de ouro;
- **prospecto Rosa de Maio:** a utilização dos dados de magnetometria gradiométrica consistiu no melhor produto geofísico para determinação das feições semi-circulares verificadas no prospecto Rosa de Maio. As imagens dos gradientes medidos G_x e G_y realçam as feições mencionadas com maior precisão quando comparadas com os produtos calculados a partir das derivadas horizontais de primeira ordem do campo magnético anômalo. Tais feições podem estar relacionadas com cúpulas de granitos da Suíte Intrusiva Parauari. Um padrão similar destas feições também foi verificado nas imagens do modelo digital de elevação e SAR-

R99B, assim como estruturas E-W, NE-SW e NNE-SSW, as quais configuram as principais direções de zonas de alteração hidrotermal. Pinto *et al.* (2009) sugerem que as mineralizações auríferas estão associadas com cúpulas de granitos, implicando em uma gênese associada ao tipo *intrusion related*. Estas feições foram mapeadas neste trabalho e fornecem mais um componente para o modelo proposto por estes autores;

- **prospecto Bandeirante:** há a necessidade de aquisição de levantamento aeromagnetométrico gradiométrico com espaçamento das linhas de vôo similar àquele empregado no prospecto Rosa de Maio (75 m), objetivando a análise de possíveis feições semi-circulares, assim como observado neste último O *trend* aurífero Patrocínio-Espírito Santo é observado na região do prospecto Bandeirante, além de estruturas E-W e NNE-SSW e NE-SW (similar ao verificado no prospecto Rosa de Maio). O papel dos diques máficos (Diabásio Piranhas) também é ainda preliminar, a respeito de uma possível remobilização do ouro paleoproterozóico, assim como aparentemente parece ocorrer no prospecto Rosa de Maio. Além disso, é necessário maior adensamento de dados de geoquímica de rocha e de solo, visto que o reconhecimento geológico neste prospecto está em fase inicial;

- **prospecto Maués:** as feições mais importantes foram observadas na imagem SAR-R99B, compreendendo lineamentos quilométricos de direção NW-SE que já foram destacados na literatura como um importante sistema transcorrente que atuou como conduto de fluidos hidrotermais;

- **região Ouro Roxo-Cantagalo:** estruturas NNE-SSW, associadas com zonas de cisalhamento de segunda ordem (Santos *et al.* 2001b), foram verificadas a partir da imagem SAR-R99B (Lhh), e estão espacialmente relacionadas com unidade geofísica de alto K, onde inserem-se as principais ocorrências auríferas conhecidas;

- **região Chico Torres:** alinhamentos de drenagem interpretados na imagem SAR-R99B (Lhh) e unidade geofísica de alto K estão, aparentemente, associados com a instalação da zona de cisalhamento Chico Torres-Teodorico, caracterizada por direção N40W, a mesma orientação de veios auríferos constatados em campo por Coutinho (2008). Todavia, mais trabalhos de reconhecimento geológico são necessários a fim de verificar se o ambiente das outras ocorrências auríferas presentes nesta região é controlado por mesmo *trend*.

Coberturas superficiais como solos e a densa vegetação reduzem a detecção das respostas gamaespectrométricas (Minty 1997, IAEA 2003). Esta situação é dominante na região da PMT, e é um importante fator de atenuação de sinal de raios gama, como verificado pelas medidas em cps provenientes do gamaespectrômetro portátil, devendo haver cautela

quanto à interpretação das mesmas.

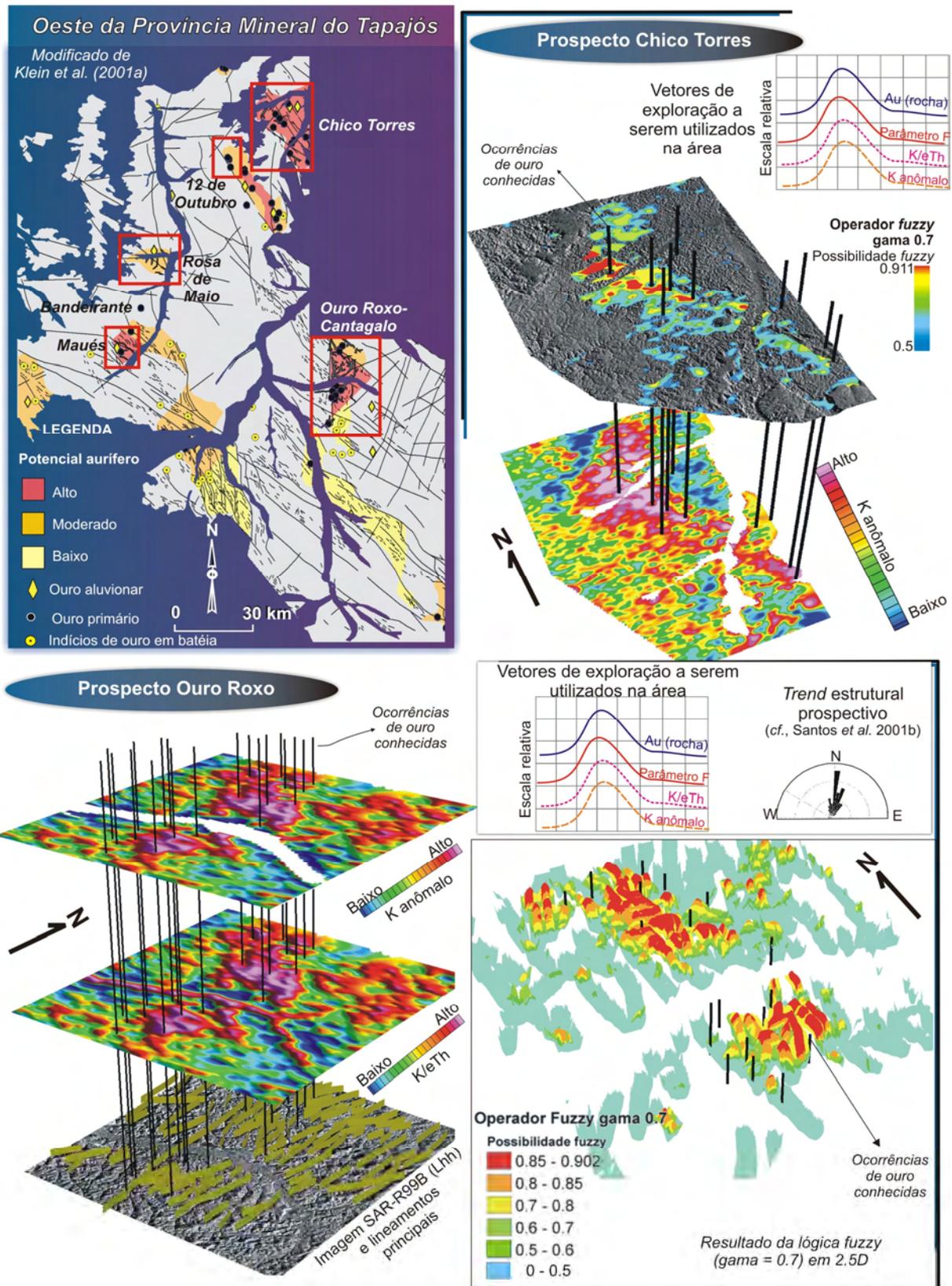


Figura 6.1. Síntese das principais características geológico-geofísicas e feições estruturais dos prospectos abordados nesta dissertação de mestrado e inclusos na porção oeste da Província Mineral do Tapajós (Continua).

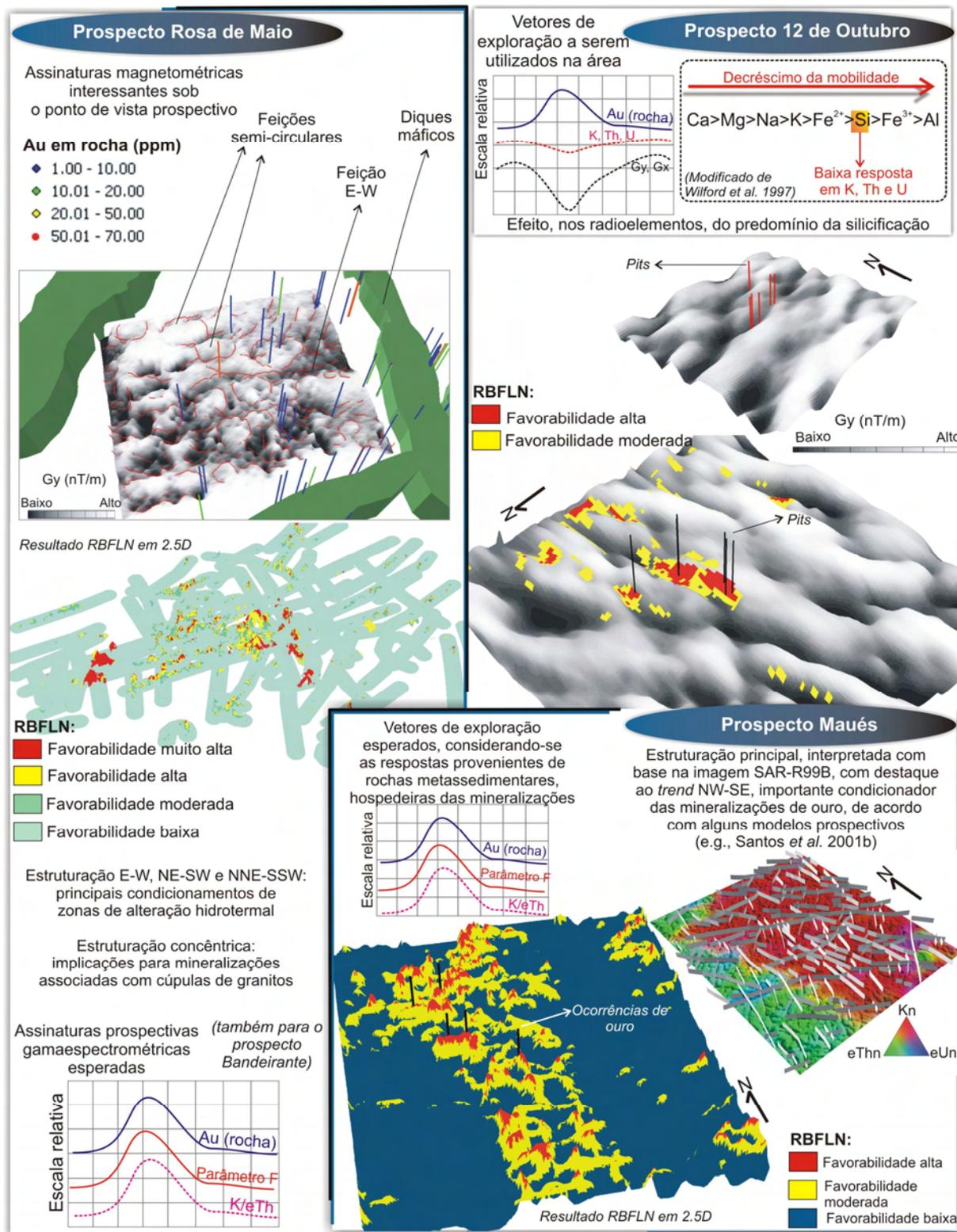


Figura 6.1. (Continuação).

Essa atenuação de sinal foi verificada de maneira notável na região do prospecto Rosa de Maio conforme analisado nas imagens aerogamaespectrométricas, sobretudo através da composição colorida RGB de K, eTh e eU. Há uma maior mobilidade do elemento K, seguida do elemento U, durante eventos de intemperismo químico. Esta mobilidade é intensamente

favorecida pela presença de relevo suave em platôs (que permite maior infiltração de água da chuva), além do clima quente e úmido associado. Em contrapartida, o elemento Th é resistente, pois relaciona-se com minerais resistentes como a monazita, o zircão e a apatita (Wilford *et al.* 1997). Nestas circunstâncias ambientais, espera-se uma resposta mais intensa no canal gamaespectrométrico relativo ao Th e uma queda da medida radioativa associada ao K e ao U. A **figura 6.2** ilustra, esquematicamente, esta situação.

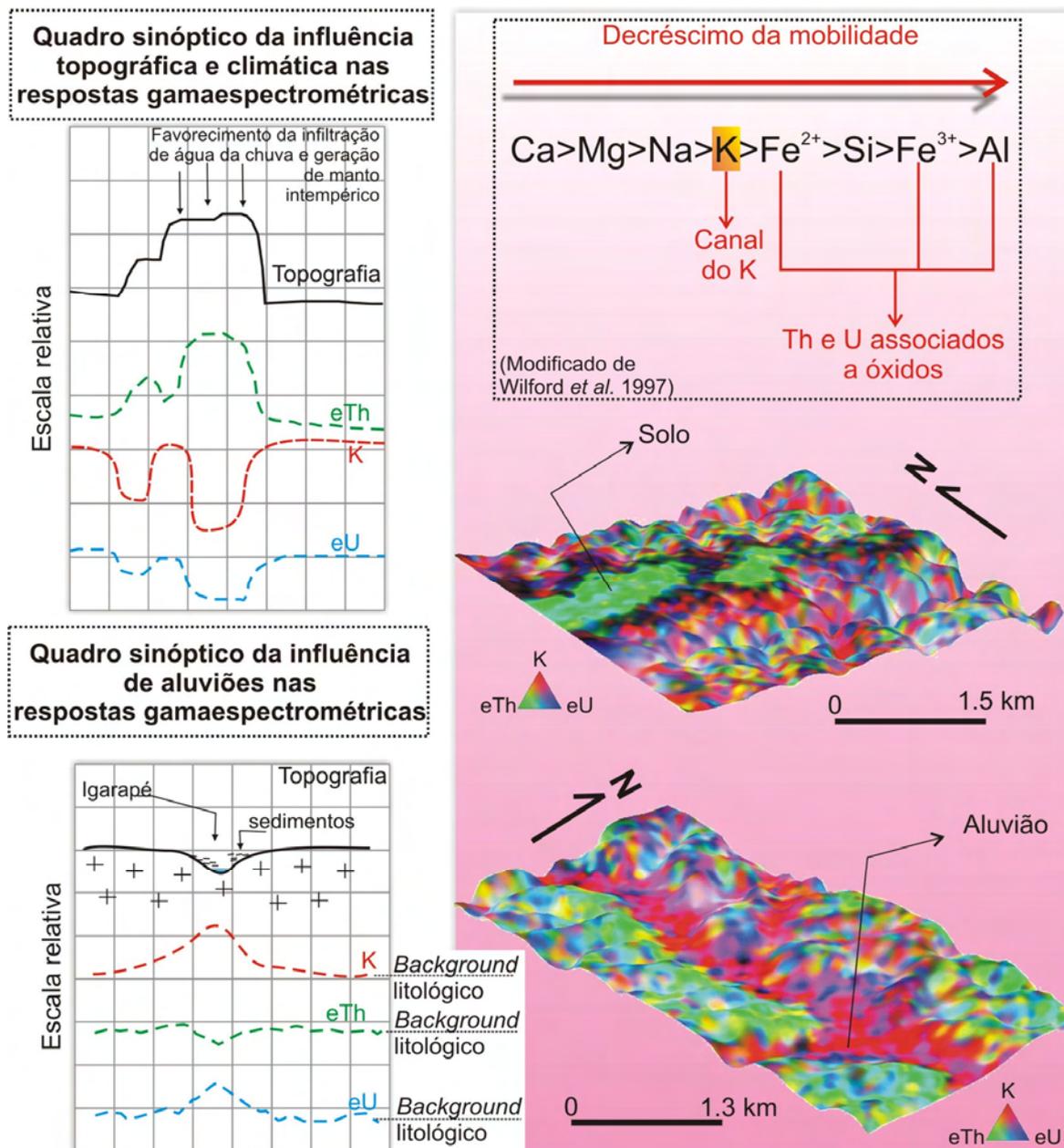


Figura 6.2. Resumo das principais assinaturas gamaespectrométricas decorrentes da ação conjunta de fatores topográficos, climáticos e de mobilidade de elementos químicos maiores.

Aluviões, muitas vezes de grande extensão, também agem de forma a obliterar as respostas gamaespectrométricas das rochas *in situ*, no caso, dispostas abaixo desta cobertura.

Assinaturas de alto K e de médio a alto U estão comumente relacionadas a aluviões na PMT (**Figura 6.2**), por constituírem elementos mais móveis que o Th, conforme exposto acima.

Desta maneira, o método gamaespectrométrico, principalmente o aéreo, compreende uma ferramenta cuja utilidade mostrou-se, em parte, afetada por conta das condições ambientais na PMT. Entretanto, ainda foi possível observar, com cautela, algumas respostas interessantes com relação ao contexto metalogênico nas seguintes regiões da porção oeste da PMT (**Figura 6.1**):

- **prospecto 12 de Outubro:** queda sutil de contagens nos canais do K, eTh e eU (medidas provenientes do gamaespectrômetro portátil) quando da ocorrência de riolitos brechados, mineralizados e caracterizados por intensa silicificação;
- **prospecto Rosa de Maio:** apesar de forte atenuação da radiação gama por conta da presença de espessa cobertura de solos e ausência de bons afloramentos, foi possível diagnosticar contagens da radiação gama maiores quando da medição, por meio do gamaespectrômetro portátil, de rochas graníticas mineralizadas e caracterizadas por alteração hidrotermal potássica;
- **prospecto Bandeirante:** observação das maiores contagens nos canais radiométricos, principalmente no canal do K, por meio do uso do gamaespectrômetro portátil quando da ocorrência de granito feldspatizado;
- **região Ouro Roxo-Cantagalo:** a unidade hospedeira de mineralizações auríferas é caracterizada regionalmente, através de imagens aerogamaespectrométricas, por altos valores de K e enriquecimento deste radioelemento conforme visualizado por meio de variáveis como o parâmetro F e o K anômalo;
- **região Chico Torres:** averiguação de ocorrências auríferas associadas a picos no canal do K e de variáveis como o parâmetro F e a razão K/eTh, conforme quantificado por meio da análise de linhas de vôo dos dados aerogamaespectrométricos regionais;
- **prospecto Maués:** não há uma boa caracterização geológica e de assinaturas aerogamaespectrométricas bem definidas. Há uma resposta de altos valores no canal do K que, sem arriscar-se em analogias a tipos de alteração hidrotermal, deve estar relacionada ao *background* dos metassedimentos paleoproterozóicos que são hospedeiros das mineralizações de ouro.

Em relação às considerações regionais acerca das regiões Chico Torres e Ouro Roxo-Cantagalo, foi possível demonstrar a grande dificuldade de produção de mapas mais consistentes, principalmente em virtude da escassez de dados digitais de alta resolução, baixo

conhecimento geológico e que ainda não esclarece com eficiência os eventos mineralizadores no Tapajós, retratando um típico contexto esperado para áreas do tipo *greenfield*. É recomendável, a estas duas regiões, a aquisição de dados aerogeofísicos de alta resolução, principalmente os magnetométricos gradiométricos, para que a tomada de decisão seja efetuada mais localmente, e não tão regionalmente.

Diferentemente, os resultados integrados e os mapas prospectivos gerados para os prospectos 12 de Outubro e Rosa de Maio permitem a tomada de decisão local, como locação de furos de sondagem, já que dados de maior qualidade foram disponibilizados.

Uma metodologia que pode ser utilizada com sucesso para a caracterização de ambientes mineralizados consiste, portanto, na determinação de propriedades petrofísicas, uma etapa importantíssima a ser utilizada nos primeiros estágios de estudo de prospectos na PMT, uma vez que auxiliará de maneira mais robusta a identificação das principais características de um depósito e posterior seleção dos métodos geofísicos mais adequados a se empregar, conforme recomendado por Robert *et al.* (2007). Desta forma, um banco de dados consistente derivado da extração de respostas gamaespectrométricas terrestres e de susceptibilidade magnética, por exemplo, poderá ser analisado conjuntamente com os aspectos mineralógicos e outros dados geológicos intrínsecos às rochas mineralizadas em diferentes contextos nesta província.

Cabe ainda fazer algumas críticas a respeito da qualidade dos dados multifonte disponíveis a esta dissertação de mestrado, e recomendações para estudos futuros na PMT.

As áreas abordadas são caracterizadas por variação topográfica de até aproximadamente 200 metros. Para este tipo de relevo relativamente plano, dados de radar imageados com ângulos de incidência baixos são preferenciais, evitando-se forte sombreamento que implica em perda de informações do pulso microondas a ser registrado (Santos *et al.* 2001a). Esta é uma recomendação para futuras aquisições de dados SAR distintos dos altos ângulos empregados na Missão Terra do Meio Oeste (ângulos de incidência do *near ao far range* de 45° a 81,10°).

A desfocagem de algumas porções dos segmentos imageados da Missão Terra do Meio Oeste compreendeu o principal problema destes dados. Este fato, também já observado em outras missões, deve ser verificado durante as aquisições de dados de radar na plataforma R99B.

A precipitação afeta principalmente a estimativa de urânio, pois os isótopos filhos do radônio (^{214}Bi e ^{214}Pb), durante a chuva, aderem-se a partículas atmosféricas e chegam à

superfície e solos. Estas partículas enriquecidas nos isótopos filhos do radônio (que, por sua vez, são os mesmos da série de decaimento do ^{238}U), geram um aumento da estimativa de urânio em até 2000 vezes. Desta forma, há a recomendação que aerolevantamentos não sejam realizados nos períodos chuvosos, havendo a necessidade de espera de cerca de 3 h após a precipitação para a realização de vôo. Neste contexto encontram-se os dados adquiridos pela empresa MAPEX Mineração, Importação e Exportação Ltda., visto que os vôos foram realizados em Janeiro de 2006, ou seja, época de intensas chuvas na região amazônica. Já os dados do Bloco 1 – Província Aurífera do Tapajós foram obtidos coerentemente na época de seca na região, entre Junho e Novembro de 1997.

Recomenda-se o desenvolvimento de outros trabalhos envolvendo o uso de imagens SAR-R99B, visto a atual disponibilidade para as universidades, resolução espacial satisfatória (3 m, 6 m, ou 18 m), e várias possibilidades de geometria de visada, objetivando o reconhecimento geológico de outras regiões da PMT ou do Cráton Amazônico como um todo. Concomitantemente a estas imagens de radar, estão os novos dados geofísicos aéreos que vem sendo recentemente adquiridos pelo Serviço Geológico do Brasil. Merecem destaque os dados aerogamaespectrométricos e aeromagnetométricos do levantamento Itaituba, cuja programação pela CPRM foi prevista para 2008. Estes dados são equivalentes à área do levantamento Médio Tapajós de 1986 (espaçamento das linhas de vôo de 2 km) (Lasa Engenharia e Prospecções S.A.1987), e caracterizados por espaçamento das linhas de vôo (N-S) e de controle (E-W), respectivamente, de 500 m e 10 km (CPRM 2009). A importância deste segmento da PMT equivale à instalação de um dos principais *trends* auríferos, o São Jorge-Chico Torres (Coutinho 2008), abrangendo ocorrências auríferas importantes como os prospectos Cuiú-Cuiú (Empresa Magellan), Palito (Empresa Serabi Mining PLC), Água Branca, Tocantinzinho, Creporizão e Patrocínio.

Outros métodos geofísicos podem ser empregados para o contexto de mineralizações sulfetadas disseminadas, destacando-se a aplicação do IP (*Induced Polarization*), por exemplo.

Dentro das possibilidades de aquisição, recomenda-se o uso de dados aerogeofísicos com pelo menos 200 m de espaçamento das linhas de vôo (entendidos como preferenciais para a exploração mineral), ou, idealmente, aqueles com espaçamentos próximos a 50 m (Horsfall 1997). Este último conjunto de dados é análogo aos do prospecto Rosa de Maio, caracterizado por espaçamento das linhas de vôo de 75 m, além de empregar a magnetometria gradiométrica, uma ferramenta potencial para realce de feições estruturais rasas, conforme

demonstrado nesta dissertação de mestrado nos estudos de caso dos prospectos 12 de Outubro e Rosa de Maio. Recomenda-se também a aquisição de dados magnetométricos utilizando-se gradiômetro triaxial, a fim de obter os três gradientes (x, y, z) medidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Imagem SAR-R99B (Lhh) da região do prospecto Bandeirante

Almeida M.E., Ferreira A.L., Brito M.F.L., Monteiro M.A.S. 2001. Evolução tectono-estrutural da Província Tapajós com base na geologia das Folhas Vila Mamãe Anã e Jacareacanga (1:250.000), região limítrofe dos Estados do Amazonas e Pará. In: Reis N.J. & Monteiro M.A.S. (Coord.). Contribuições à geologia da Amazônia. Manaus, SBG-Núcleo Norte, 2: 57-114 p.

Almeida M.E., Brito M.F.L., Ferreira A.L., Monteiro M.A.S. (orgs) 2000. Projeto Especial Província Mineral do Tapajós (PROMIN-TAPAJÓS). Geologia e recursos minerais da Folha Vila Mamãe Anã (SB.21-V-D), Estados do Amazonas e Pará. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 67 p.

Amaral G. 1984. Províncias Tapajós e Rio Branco. In: Almeida F. F. M. & Hasui Y. (Coords.) *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo, Edgard Blucher, 6-35.

Amaral G. 1974. *Geologia pré-cambriana da região Amazônica*. Tese de livre docência, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 212 p.

An P., Moon W.M., Rencz A. 1991. Application of *fuzzy* set theory to integrated mineral exploration. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, **27**(1): 1-11.

Bahia R.B.C., Quadros, M.L.E.S. (orgs) 2000. Projeto Especial Província Mineral do Tapajós (PROMIN-TAPAJÓS). Geologia e recursos minerais da Folha Caracol (SB.21-X-C), Estados do Amazonas e Pará. Escala 1:250.000. Manaus: CPRM, 53 p.

Blum M.L. 1999. *Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral*. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília-DF, 229 p.

Bonham-Carter G.F. 1994. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Oxford, Pergamon, 398p.

Botelho N.F., Pereira K.M.S., Moura M.A., Clerot L.C., Pinto M., Lopes G.C. 2009. Geoquímica e inclusões fluidas das mineralizações auíferas dos prospectos Doze de Outubro e Rosa de Maio, Província Aurífera Tapajós, Amazonas. In: II Simpósio Brasileiro de Metalogenia, Gramado, *Anais....SBG*, em CD-ROM.

Briggs I.C. 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, **39**(1), 39-48.

Brown W.M., Gedeon T.D., Groves D.I., Barnes R.G. 2000. Artificial neural networks: a new method for mineral prospectivity mapping. *Australian Journal of Earth Sciences*, **47**(4): 757-770.

CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) 2009. Levantamentos geofísicos. Programação 2008. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/geo/pgb/inicio/pgb2_45.htm>. Acesso: 25 de maio de 2009.

CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) 2004. Carta geológica do Brasil ao milionésimo (em CD-ROM).

Costa S.S.C., Campos M.A.A., Rogério A.P.C. 2007. Imageamentos realizados pelo sistema aerotransportado SAR/SIPAM. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, *Anais...*, 6661-6665.

Coutinho M.G.N. (ed.) 2008. *Província Mineral do Tapajós: geologia, metalogenia e mapa provisional para ouro em SIG*. Rio de Janeiro, CPRM, 402p.

Coutinho M.G.N., Santos J.O.S., Fallick A.E., Lafon J.M. 2000. Orogenic gold deposits in Tapajós Mineral Province, Amazon, Brazil. In: International Geological Congress, 31, Rio de Janeiro, *abstracts* (CD-ROM).

Dardenne M.A., Schobbenhaus C. 2001a. Épocas metalogenéticas no Cráton Amazônico. In: VII Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, *Anais ...*, SBG–Núcleo Norte, em CD-ROM.

Dardenne M.A., Schobbenhaus, C. 2001b. *Metalogênese do Brasil*. Brasília, Ed. UnB, p 78-83.

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.

Dreher A.M., Vlach S.R.F., Martini S.L. 1998. Adularia associated with epithermal gold veins in the Tapajós Mineral Province, Pará State, northern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **28**(3): 397-404.

Efimov A.V. 1978. Multiplikativniyi pokazatel dlja vydelenija endogennykh rud aerogamma-spectrometriceskim dannym. In: *Metody rudnoj geofiziki*, Leningrado, Naucnoproizvodstvennoje objedinenie geofizica Ed., 59-68.

Erazo G.J.O. 2001. Interpretação de dados gamaespectrométricos e magnetométricos na Província Aurífera de Tapajós. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Brasília-DF.

Faraco M.T.L., Carvalho J.M.A., Klein E.L. 1997. Carta metalogenética da Província Aurífera do Tapajós. In: Costa M. L. & Angélica R. S. (Coord.). *Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém, SBG–Núcleo Norte, **1**: 423-437.

Ferreira AL., Almeida M.E., Brito M.F.L., Monteiro M.S.A. (orgs.). 2000. Projeto Especial Província Mineral do Tapajós (PROMIN-TAPAJÓS). Geologia e recursos minerais da Folha Jacareacanga (SB.21-Y-B), Estados do Amazonas e Pará. Escala 1:250.000. Manaus: CPRM, 60 p.

Graunch V.J.S., Cordell L. 1987. Limitations of determining density or magnetic boundaries from the horizontal gradient of gravity or pseudogravity data. *Geophysics*, **52**:118-121.

Goovaerts P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. London, Oxford University Press, 483 p.

Hair J.F., Tatham R.L., Anderson R.E., Black W. 1998. Chapter 1 - Introduction. In: Hair J.F.,

Tatham R.L., Anderson R.E., Black W. (Ed.). *Multivariate Data Analysis*. 5 ed., Nova Jersey, Pearson Education Inc., 23-45.

Hartmann L.A., Delgado I.M. 2001. Cratons and orogenic belts of the Brazilian Shield and their contained gold deposits. *Mineralium Deposita*, **36**(3): 207-217.

Horsfall K.R. 1997. Airborne magnetic and gamma-ray data acquisition. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2): 23-30.

IAEA (International Atomic Energy Agency) 2003. *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. Viena, IAEA-TECDOC, 173p.

Juliani C., Fernandes C.M.D., Mapa F.B., Misas C.M.E., Monteiro L.V.S. 2008. A gênese do vulcano-plutonismo Uatumã e das mineralizações de Au e de metais de base associadas nas regiões do Tapajós, Iriti e Xingu (PA). In: IV Simpósio de Vulcanismo e Ambientes Associados, Foz de Iguaçu-PR, *Anais...*, 10 p.

Juliani C. 2007. Field observations in the Rosa de Maio Project, Tapajós Gold Province (PA). *Relatório inédito*, 13 p.

Juliani C., Rye R.O., Nunes C.M.D., Snee L.W., Corrêa Silva R.H., Monteiro L.V.S., Bettencourt J.S., Neumann R., Alcover Neto A. 2005. Paleoproterozoic high-sulfidation mineralization in the Tapajós gold province, Amazonian Craton, Brazil: geology, mineralogy, alunite argon age, and stable-isotope constraints. *Chemical Geology*, **215**: 95-125.

Juliani C., Corrêa-Silva R.H., Monteiro L.V.S., Bettencourt J.S., Nunes C.M.D. 2002. The Batalha Au-granite system-Tapajós Gold Province, Amazonian craton, Brazil: hydrothermal alteration and regional implications. *Precambrian Research*, **119**:225-256.

Klein E.L., Vasquez, M.L., Sousa, C.S., Carvalho, J.M.A., Santos Jr., P.S.M. 2008. Mapa de recursos minerais do Estado do Pará: tipos, distribuição e relação com domínios tectônicos. In: XLIV Congresso Brasileiro de Geologia, Curitiba, *Anais...*, p. 162.

Klein E.L., Rosa-Costa L.T., Carvalho J.M.A. 2004. Estudo de inclusões fluidas em veio de quartzo aurífero do prospecto Patinhas, Província Aurífera do Tapajós, Cráton Amazônico. *Revista Brasileira de Geociências*, **34**(1): 59-66.

Klein E.L., Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T., Carvalho J.M.A. 2002. Geology of Paleoproterozoic gneiss- and granitoid-hosted gold mineralization in Southern Tapajós Province, Amazonian Craton, Brazil. *Int. Geol. Review*, **44**:544-558.

Klein E.L., Almeida M.E., Vasquez M.L., Bahia R.B.C., Santos M.L.E., Ferreira A.L. 2001a. Geologia e recursos minerais da Província Mineral do Tapajós. Folhas Vila Mamães Anã (SB.21-V-D), Jacareacanga (SB.21-Y-B), Caracol (SB.21-X-X), Vila Riozinho (SB.21-Z-A) e Rio Novo (SB.21-Z-C). Estados do Pará e Amazonas. Escala 1:500.000. Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2001, 81 p.

Klein E.L., Santos R.A., Fuzikawa K., Angélica R.S. 2001b. Hydrothermal fluid evolution and structural control of the Guarim gold mineralisation, Tapajós province, Amazonian Craton, Brazil. *Mineralium Deposita*, **36**: 149-164.

Klein E.L., Vasquez M.L. (orgs.) 2000. Projeto Especial Província Mineral do Tapajós (PROMIN-TAPAJÓS). Geologia e recursos minerais da Folha Vila Riozinho (SB.21-Z-A), Estados do Amazonas e Pará. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 45 p.

Lamarão C.N., Dall’Agnol R., Pimentel M.M. 2005. Isotopic composition of Paleoproterozoic volcanic and granitoid rocks of Vila Riozinho: implications for the crustal evolution of the Tapajós gold province, Amazon craton. *Journal of South American Earth Sciences*, **18**: 277-292.

Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2006a. Levantamento aeromagnetométrico gradiométrico e aerogamaespectrométrico. Blocos Bandeirante, Maués e Doze de Outubro: relatório final de aquisição e processamento de dados. Volume 1. Textos técnicos e anexos. 41 p.

Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2006b. Levantamento aeromagnetométrico gradiométrico e aerogamaespectrométrico. Bloco Rosa de Maio: relatório final de aquisição e processamento de dados. Volume 1. Textos técnicos e anexos. 37 p.

Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 1998. Projeto aerogeofísico Província Aurífera do Tapajós (Bloco I e II): relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Volume 1. Texto técnico.

Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 1987. Projeto Médio Tapajós. Levantamento e Processamento dos Dados. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral - DNPM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM. Convênio DNPM/CPRM, Relatório Final, 3 vol., texto e anexos, Rio de Janeiro, 1987.

Looney C.G, Yu H. 2000. Special software development for Neural Network and Fuzzy Clustering analysis in Geological Information Systems. *Geological Survey of Canada*, 34 p.

Luyendyk A.P.J. 1997. Processing of airborne magnetic data. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2): 31-38.

MacQueen J. 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: University of Blerkely, Blerkely Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 5th, Blerkely, 325-350.

Martini S.L. 1998. An overview of main auriferous regions of Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **28**(3):307-314.

Minty B.R.S. 1991. Simple micro-levelling for aeromagnetic data. *Exploration Geophysics*, **22**: 591-592.

Moura M.A., Botelho N.F., Rossi P. 1997. Geology, lithogeochemistry and age of the Matupá granitoid massif in the Serrinha gold deposit, State of Mato Grosso, central Brazil. In: USGAM, Salvador, *Anais...*, 1997, SBGq, 133-134.

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

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*, 669-678.

Peregovich B., Mathis A., Gomes R.S.S. 2008. Transition from small-scale artisanal gold mining to large-scale corporate mining in the Tapajós Mineral Province, Brazil. In: XLIV Congr. Bras. Geol., 44: 2008, Curitiba. *Anais...Curitiba*: SBG, 2008, p. 188.

Pereira K.M.S, Moura M.A., Botelho N.F. 2008. Caracterização do fluido mineralizador em garimpos de ouro da Província Aurífera Tapajós, Amazonas. In: XLIV Congr. Bras. Geol., 44: 2008, Curitiba. *Anais...Curitiba*: SBG, 2008, p. 867.

Pinto M., Botelho N.F., Clerot L.C., Cunha L.M., Carrino T.A., Corrêa P.M. 2009. Geologia e geoquímica dos prospectos auríferos Doze de Outubro, Rosa de Maio, Bandeirante e Maués, Província Mineral do Tapajós, Amazonas. In: XI Simpósio de Geologia da Amazônia, 9: 2009, Manaus, *Anais... Manaus*: SBG, 2009, em CD-ROM.

Pires A.C.B. 1995. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, **25**(1): 61-68.

Rabus B, Eineder M, Roth A., Bamler R. 2003. The shuttle radar topography mission - A new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, **57**: 241-262.

Robert F., Brommecker R., Bourne B.T., Dobak P.J., McEwan C.J., Rowe R.R., Zhou X. 2007. Models and exploration methods for major gold deposit types. In: Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, 691-711.

Robert F. 1996. Gold project in the Tapajós river, Pará State, Brazil. Mission report. Geological Survey of Canada, não publicado.

Rodrigues J.L., Braga J.B.P., Oliveira R.A.F., Danin T. 2008. Tapajós Mineral: um novo ciclo de oportunidades e domínios. In: XLIV Congr. Bras. Geol., 44: 2008, Curitiba. *Anais...Curitiba*: SBG, 2008, p. 187.

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

Santos A.R., Paradella W.R., Veneziani P., Morais M.C. 2001a. *Radar aplicado ao mapeamento geológico e prospecção mineral: aplicações*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 103 p. (INPE-8117-PUD/45).

Santos J.O.S., Hartmann L.A., Riker S.R., Souza M.M., Almeida M.E., McNaughton N.J. 2006. A compartimentação do cráton Amazonas em províncias: avanços ocorridos no período 2000-2006. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, SBG, Belém, resumos expandidos (CD-ROM).

Santos J.O.S., Van Breemen O.B., Groves D.I., Hartmann L.A., Almeida M.E., McNaughton

N.J., Fletcher I.R. 2004. Timing and evolution of multiple paleoproterozoic magmatic arcs in the Tapajós Domain, Amazon craton: constraints from SHRIMP and TIMS zircon, baddeleyite and titanite U-Pb geochronology. *Precambrian Research*, **131**: 73-109.

Santos J.O.S., Hartmann L.A., McNaughton N.J., Fletcher I.R. 2002. Timing of mafic magmatism in the Tapajós Province (Brazil) and implications for the evolution of the Amazon Craton: evidence from baddeleyite and zircon U-Pb SHRIMP geochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, **15**: 409-429.

Santos J.O.S., Groves D.I., Hartmann L.A., Moura M.A., McNaughton N.J. 2001b. Gold deposits of the Tapajós and Alta Floresta domains, Tapajós-Parima orogenic belt, Amazon Craton, Brazil. *Mineralium Deposita*, **36**: 278-299.

Santos J.O.S., Hartmann L.A., Gaudette H. E., Groves D.I., Macnaughton 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 R.A. 1999. Controle estrutural das mineralizações de ouro da Província Mineral do Tapajós. Síntese da análise estrutural dos prospectos. Relatório inédito. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Superintendência de Salvador, Bahia.

Santos R.A. 1997. Contribuição à análise estrutural de jazimentos auríferos do rio Tapajós, SW do Pará e SE do Amazonas. Relatório de viagem. Relatório inédito. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Superintendência de Salvador, Bahia.

Sato K & Tassinari C.C.G. 1997. Principais eventos de acreção continental no Cráton Amazônico baseados em idade-modelo Sm-Nd, calculada em evoluções de estágio único e estágio duplo. In: Costa M.L. & Angélica R.S. (coord.). *Contribuições à geologia da Amazônica*. Belém: FINEP/SBG, 91-142.

Schmidt P.W., Clark D.A. 2006. The magnetic gradient tensor: its properties and uses in sources characterization. *The Leading Edge*, 75-78.

Silva A.A.C., Silva A.M., Fuck R.A. 2007. Interpretação de dados aerogeofísicos da Província Mineral do Tapajós aplicada à geologia regional e prospecção de ouro. In: Lúcia Travassos da Rosa-Costa; Evandro Luiz Klein; Eduardo Paim Viglio. (Org.). In: *Contribuições à Geologia da Amazônia*. Belém: SBG - Núcleo Norte, 5:63-74.

Silva A.A.C. 2003. *Processamento, interpretação e integração de dados geológicos e geofísicos da Província Mineral do Tapajós*. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade de Brasília, Brasília-DF, 137 p.

Silva G.G., Lima M.I.C., Andrade A.R.F., Issler R.S., Guimarães G. 1974. Geologia da folha SB.22 – Araguaia e parte da Folha SC.22 – Tocantins. Levantamento de Recursos Minerais 4. DNPM/RADAM: Rio de Janeiro, 1-172.

Soares P.C. & Pio Fiori A. 1976. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Not. Geomorfol.*, Campinas, **16** (32): 71- 104.

Tassinari C.C.G., Macambira M. 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazonico. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. (org.). *Geologia do*

Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: BECA, 471-486.

Tassinari C.C.G., Macambira M. 1999. Geochronological Provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, **22**(3): 174-182.

Tassinari C.G.C. 1996. *O mapa geocronológico do cráton amazônico no Brasil: revisão dos dados isotópicos*. Tese de livre docência. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 139p.

Travassos W.A.S., Barbosa Filho C.M. 1990. Tectonismo terciário na área do Rio Tapajós, Bacia do Amazonas. *Boletim de Geociências*. Petrobrás, **4**(3): 299-314.

Vasconcellos R.M., Metelo M.J., Motta A.C., Gomes R.D. 1994. *Geofísica em levantamentos geológicos no Brasil*. Rio de Janeiro, CPRM, 165 p.

Vasquez M.L., Ricci P.S.F., Klein E.L. 2002. Granitóides pós-colisionais da porção leste da Província Tapajós. In Klein E. L., Vasquez M. L., Rosa-Costa L. T. (eds.) Contribuições à geologia da Amazônia. Belém, SBG-Núcleo Norte, **3**: 67-83.

Vasquez M.L., Klein E.L. (orgs.) 2000. Projeto Especial Província Mineral do Tapajós (PROMIN-TAPAJÓS). Geologia e recursos minerais da Folha Rio Novo (SB.21-Z-C), Estados do Amazonas e Pará. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 45 p.

Veloso A.S.R., Santos M.D., Santos W.P., Snee L.W. 2008. Relação entre a mineralização aurífera do depósito Ouro Roxo e a zona de cisalhamento Ouro Roxo-Cantagalo, Província Tapajós, Pará. *Anais... XLIV Congr. Bras. Geol.*, Curitiba, p. 169.

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

APÊNDICE I

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE SAR

Um radar de abertura sintética (SAR) é definido como um radar de antena artificial, artifício que permite a obtenção de maior resolução espacial, uma vez que se simula uma dimensão maior da antena a partir das diversas posições ocupadas pela mesma ao longo da linha de vôo (Werle 1988). Este tipo de radar possui uma geometria de visada lateral, sendo um plano bidimensional gerado pelos movimentos da plataforma sensora (azimute) e de pulsos transmitidos da plataforma (alcance) (Crósta & Souza Filho 1997) (**Figura 1**).

O radar (*radio detection and ranging*) é um sensor ativo que opera na faixa das microondas do espectro eletromagnético ($\lambda = 1 \text{ mm}$ a 1 m ou $\nu = 300 \text{ GHz}$ a 3 GHz). Por atuar em uma frequência específica, somente registra o sinal de retorno de um alvo terrestre no comprimento de onda equivalente. Este comprimento de onda usado é um fator importante no espalhamento das ondas eletromagnéticas na superfície de um terreno, sendo a intensidade da energia espalhada controlada pelos parâmetros do sensor (polarização, geometria de imageamento, comprimento de onda ou frequência) e dos alvos (constante dielétrica, rugosidade e coeficiente de retroespalhamento).

A polarização é entendida como a orientação do plano do campo elétrico da onda eletromagnética, podendo ser de quatro tipos: HH (transmissão e recepção horizontais), VV (transmissão e recepção verticais), HV (transmissão horizontal e recepção vertical) e VH (transmissão vertical e recepção horizontal) (Werle 1988, Paradella 1996, Lewis *et al.* 1998).

A geometria de imageamento é definida pelo ângulo de depressão e de incidência. O ângulo de depressão consiste no ângulo entre o plano horizontal e a antena do radar. O ângulo de incidência compreende o ângulo entre a antena do radar e o plano vertical (**Figura 1**), sendo que a sombra de radar determina o sentido da visada. O excesso de sombra ocasiona perda de informações e, neste sentido, quanto menor o ângulo de depressão, mais intensa será a sombra no *far range* que no *near range* (Werle 1988).

A seleção do comprimento de onda implica nos graus de penetração de diferentes tipos de coberturas superficiais. Para a maioria dos materiais, o grau de penetração varia linearmente com o comprimento de onda usado (Werle 1988).

A constante dielétrica compreende a medida de ‘dificuldade’ de penetração da energia microondas nos diferentes materiais superficiais (Lewis *et al.* 1998), quantificando-se propriedades elétricas de alvos superficiais (Werle 1988). Esta propriedade é influenciada pela habilidade dos alvos em absorver energia microondas, estando relacionada à umidade, à estrutura do alvo e à frequência da energia incidente. Os valores desta constante para

materiais secos variam entre cerca de 3 a 8 e, para alvos úmidos ou corpos d'água, pode chegar a 80. Quanto menor o comprimento de onda, maior é a atenuação por centímetro (Werle 1988).

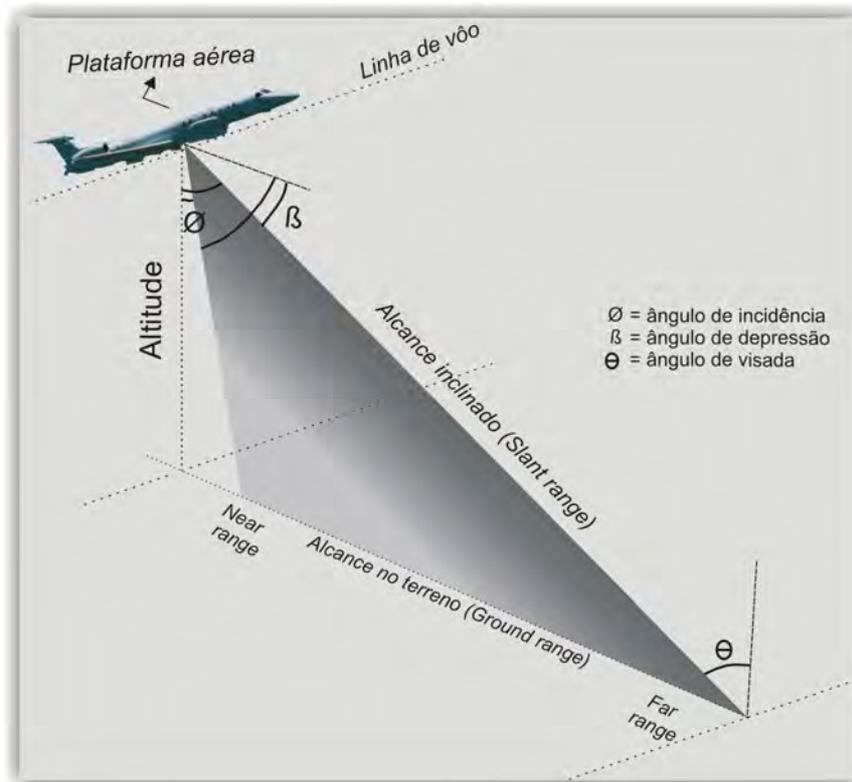


Figura 1. Elementos componentes de um radar de abertura sintética quanto a sua geometria de visada (Adaptado de Lewis *et al.* 1998).

A rugosidade refere-se a variações estatísticas da componente altura da superfície em relação a uma superfície de referência. A medida é da ordem de centímetros. A rugosidade varia de acordo com a frequência e o ângulo de incidência utilizados (Werle 1988). Uma superfície rugosa dispersa a energia microondas incidente em todas as direções e com intensidades similares. Diferente deste espalhamento difuso, pode ocorrer o espalhamento especular, quando a energia microondas após interagir com o alvo superficial, não possui uma componente de retorno à antena devido à pequena rugosidade do terreno para o comprimento de onda utilizado (Werle 1988). Há ainda o espalhamento volumétrico, relacionado com processos de espalhamentos múltiplos em alvos como vegetação, ou dentro de camadas limitantes.

O conceito de textura compreende a variação espacial da tonalidade em uma cena e está relacionada com as propriedades de rugosidade, suavidade, granulação e outras (GLOBESAR 2006). Pode ser atribuído a duas fontes: a textura própria da cena e o ruído (*speckle*). A textura da cena é observada em três diferentes escalas: microescala (relacionada com a rugosidade na escala de algumas frações do comprimento de onda usado, e associada aos tons da imagem), mesoescala (referente ao arranjo espacial da tonalidade) e macroescala

(relação com efeitos topográficos regionais resultantes de um complexo arranjo das tonalidades de uma imagem). Isto permite o realce de feições da macro e microtopografia do terreno de modo superior ao imageamento óptico e o seu uso efetivo como ferramenta em mapeamento geológico, particularmente na geologia estrutural (Ford *et al.* 1998). A presença de ruído *speckle* corresponde à componente textural de aspecto granular resultante da interação destrutiva (pixels escuros) ou construtiva (pixels brilhantes) das ondas que são recebidas pelo sensor, e que deve ser removida para processamentos e interpretações geológicas (GLOBESAR 2006).

A seção cruzada de radar indica a quantidade total de energia retroespalhada por um alvo. O coeficiente de retroespalhamento, ou sigma zero, compreende a seção cruzada de radar por unidade de área no plano horizontal. Este coeficiente, em uma superfície plana, caracteriza-se por ser constante. O coeficiente de retroespalhamento é afetado por variações do ângulo de incidência do radar, mas tal efeito não é tão pronunciado em superfícies rugosas em geral (Werle 1988).

As vantagens do emprego de imagens SAR são as seguintes (Werle 1988, Paradella 1996): (a) a emissão de pulsos de energia microondas permite, na maioria das vezes, a aquisição de imagens em condições atmosféricas adversas, como presença de nuvens e brumas; (b) possibilidade de distinção mais apurada da morfologia dos terrenos imageados; (c) em especial, dados SAR de comprimento de onda mais longo favorecem maior penetração na cobertura vegetal. As limitações compreendem a umidade e o espalhamento proporcionado pela densidade da vegetação (galhos, folhas, troncos etc, em dependência do comprimento de onda e geometria de visada selecionados); (d) é um sistema sensor que independe da iluminação solar; (e) a informação proveniente do SAR é única e diferente de outros sensores, como os ópticos; (f) são ótimos para determinação de limites geológicos e tectônicos.

Alguns processamentos devem ser realizados em etapa anterior à análise monoscópica (*cf.*, Santos *et al.* 2001a), tais como a correção radiométrica, geométrica e supressão do ruído.

A radiometria da imagem SAR é afetada por variações da intensidade do sinal em função da geometria de espalhamento da superfície e do padrão da antena. O padrão da antena gera distorções radiométricas na dimensão do alcance, pois se transmite maior intensidade da energia microondas no centro da antena que em suas bordas. Assim, há um retroespalhamento mais intenso no centro das imagens que no *near* e no *far range* (Werle 1988, Lewis *et al.* 1998), ocasionando a necessidade de processamentos que visem corrigir tal padrão e prover a homogeneização dos níveis de cinza.

A correção geométrica das imagens SAR tem por objetivo manter a fidelidade geométrica da mesma. Distorções geométricas externas são produzidas por variações da altitude da plataforma, velocidade e efeitos da rotação da Terra (Werle 1988, Lewis *et al.* 1998). Os métodos de correção mais comuns consistem em (Werle 1988): (a) retificação com uso de modelo digital de elevação (MDE), com pontos de controle definidos, e estimativa de coeficientes polinomiais; (b) ou por uso do MDE e informações da imagem SAR, como altitude da plataforma, parâmetros do sinal *Doppler*, elevação do terreno (efemérides). Poucos pontos de controle são usados.

A correção do *speckle* pode ser realizada por meio de filtragem adaptativa ou com base no imageamento *multilook* (múltiplas visadas). O aumento do número de *looks* provém a redução do *speckle* em contrapartida a uma degradação da resolução espacial (Werle 1988, Lewis *et al.* 1998).

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE MAGNETOMETRIA E GAMAESPECTROMETRIA

MAGNETOMETRIA

A intensidade do campo magnético total, medido em aerolevantamentos, é composta por três fontes distintas:

(a) o campo magnético principal (geomagnético), que possui origem no interior do planeta, e é responsável por cerca de 99% do campo magnético total. Segundo a teoria atual, a causa do campo geomagnético está associada a correntes de convecção que ocorrem no interior do planeta. A fonte magnética é estabelecida como uma espécie de dínamo auto-excitado no qual fluidos altamente condutivos (Fe, Ni) se movem de uma maneira complexa causada por convecção (Telford *et al.* 1990a).

(b) o campo magnético externo é representado pelas variações diurnas, com um período de 24 h e uma variação de 30 nT que varia com a latitude e sazonalidade e que, provavelmente, devem ser controladas pela ação de ventos solares sob correntes ionosféricas. Além disso, também é ocasionada por tempestades magnéticas (distúrbios transientes com amplitude acima de 1000 nT) e a variações lunares (variações cíclicas por todo o mês, sendo associadas à interação ionosfera-Lua) (Telford *et al.* 1990a).

(c) o campo magnético anômalo, compreende as anomalias magnéticas locais que são dependentes do conteúdo mineral magnético. As fontes magnéticas não podem ser muito profundas, pois devem estar em regiões acima do ponto Curie, ou seja, profundidade abaixo

da temperatura na qual as rochas perdem suas propriedades magnéticas. Como exemplo, a temperatura Curie da magnetita ocorre em torno de 580°C. Desta maneira, as anomalias locais devem estar relacionadas a fontes na crosta superior (Telford *et al.* 1990a).

Para estudos geológicos, as medidas do campo magnético total devem ser subtraídas de um modelo matemático calculado para a data, declinação e inclinação magnética presentes na região, e que é denominado IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*). Desta maneira, é possível suprimir as respostas magnéticas dos materiais do núcleo terrestre que, por sua vez, não são de interesse à prospecção mineral ou ao mapeamento. O resultado final compreende o campo magnético anômalo, referindo-se à porção superior da crosta terrestre.

O magnetismo das rochas depende do conteúdo mineral magnético, da influência do atual campo magnético, e da remanescência (associação à história de magnetização da rocha, sobretudo durante o resfriamento da mesma) (Telford *et al.* 1990a).

O grau no qual um corpo está magnetizado é determinado pela susceptibilidade magnética (k), conforme mostrado na **Eq. 1**:

$$M = kG \quad , \quad (\text{Eq. 1})$$

onde M é a intensidade da magnetização, k é a susceptibilidade magnética, e G é o campo magnético.

Há uma classificação de materiais baseada na interação dos mesmos com o campo magnético externo. Os materiais são denominados de diamagnéticos quando seu campo é dominado por átomos com elétrons orbitais orientados em oposição ao campo externo, ou seja, quando apresentam uma susceptibilidade magnética negativa. Exemplos compreendem minerais como a grafita, quartzo e o sal. Os materiais que apresentam susceptibilidade magnética positiva, momento magnético diferente de zero quando o campo magnético G é nulo são denominados de paramagnéticos. O ferromagnetismo ocorre quando há forte interação magnética, na qual os momentos magnéticos se alinham em grandes regiões (domínios). O efeito compreende cerca de 10^6 vezes ao efeito do diamagnetismo e paramagnetismo, por exemplo. O ferrimagnetismo ocorre em certos minerais nos quais subdomínios magnéticos se alinham em oposição, porém seus momentos não são zero, pois um conjunto de subdomínios possui forte alinhamento magnético que os demais (e.g., magnetita, titanomagnetita), ou porque há mais subdomínios de um tipo que do outro (e.g., pirrotita). Já o antiferrimagnetismo ocorre quando os domínios em alguns materiais são subdivididos em subdomínios que alinham-se em direções opostas e seus momentos quase se cancelam. Estes minerais, como é o caso da hematita, caracterizam-se por baixa

susceptibilidade magnética. (Telford *et al.* 1990a, Clark 1997, 1999).

MAGNETOMETRIA GRADIOMÉTRICA

A magnetometria aérea vem avançando na melhoria da aquisição e qualidade dos dados, destacando-se dentre outros fatores empregados, a redução da altura de vôo, a determinação de linhas de vôo menos espaçadas, e medidas de gradientes e do campo magnético total, estas últimas permitindo a coleta de dados com maior resolução e detalhamento de feições magnéticas rasas (Thompson *et al.* 2007).

A indústria de exploração de óleo e gás incentivou o uso dos primeiros gradiômetros magnéticos aéreos, objetivando aumentar a resolução dos dados, o que implica na melhoria da caracterização estrutural de bacias produtoras. Dois, três e mais recentemente quatro sensores dispostos nas asas e cauda de aviões compreendem as configurações mais utilizadas. Com o uso de quatro sensores, é possível medir o gradiente vertical que, juntamente com os gradientes horizontais, são utilizados para o cálculo de profundidade de fontes magnéticas com maior acurácia (McMullea & MacLellan 1997, Reford 2006).

Um gradiente é medido para encontrar a diferença entre duas leituras de magnetômetros. Quando normalizado com respeito à separação dos sensores, a diferença forma um gradiente na direção da linha entre os dois sensores. Genericamente, um gradiente G é dado pela **Eq. 2**:

$$\frac{\partial G}{\partial h} = \frac{(G_2 - G_1)}{\Delta h}, \quad (\text{Eq. 2})$$

onde G_1 e G_2 são as leituras dos magnetômetros e Δh consiste na separação dos mesmos (Telford *et al.* 1990b).

O objetivo de medidas de gradientes ou mesmo o cálculo de derivadas é resolver os componentes vetoriais individuais do campo magnético. Em uma configuração de três sensores, a normal do vetor ao plano dos sensores não pode se exclusivamente resolvida, havendo a necessidade de definir o vetor campo total com um conjunto de quatro sensores. Ou seja, na configuração de três sensores, apenas os gradientes longitudinal (G_y) e lateral (G_x) no plano dos 3 sensores são medidos e G_z é calculado, não sendo possível resolver as três componentes do campo total. Entretanto, é possível obter gradientes não medidos do campo total utilizando as transformações de *Fourier* ou de *Hilbert*. Todavia, estes processos necessitam de um conhecimento *a priori* sobre a geometria do corpo/fonte. Em função destas limitações teóricas, recomenda-se fortemente a medida dos três gradientes ortogonais

simultaneamente, ou seja, usando quatro sensores (McMullean & MacLellan 1997).

A gradiometria proporciona melhora na discriminação de anomalias rasas, além da minimização de efeitos de variação diurna do campo magnético terrestre, principalmente em latitudes magnéticas altas (Telford *et al.* 1990b). De acordo com McMullean & MacLellan (1997) e Schmidt & Clark (2006), as principais considerações a respeito da magnetometria gradiométrica compreendem:

(a) medidas de gradientes não sofrem influência do campo magnético de *background*, ou seja, aquele relacionado ao núcleo da Terra. Por tal, apenas as componentes de alta frequência são registradas, o que implica em dados relativos ao nível mais crustal da Terra e que são os de maior interesse à exploração de recursos naturais; (b) redução da necessidade de correções regionais que são requeridas para levantamentos convencionais de campo magnético total; (c) maior resolução que levantamentos convencionais que usam um único sensor, além de melhora na definição de feições subparalelas às linhas de vôo e de fontes alongadas na direção N-S em baixas latitudes; (d) o uso de gradientes medidos permite o cálculo de parâmetros com resolução superior e acurácia, como uso dos gradientes para deconvoluções do tipo *Euler*.

Kurimo & Multala (1995) utilizaram dados magnetométricos gradiométricos na Finlândia, e observaram a alta precisão de informações magnéticas, além da melhora da qualidade dos dados interpolados. Comparações de dados provenientes de gradientes horizontais medidos com dados coletados por um único sensor magnetométrico mostraram a qualidade superior dos primeiros.

A principal limitação na precisão de gradientes medidos compreende os efeitos magnéticos da aeronave. Com o melhor registro do movimento da aeronave, principalmente em vôos turbulentos, e medidas da resposta magnética estática da aeronave, a compensação pode ser melhorada por meio de pós-processamento para remover a resposta do sistema (McMullean & MacLellan 1997).

GAMAESPECTROMETRIA

A gamaespectrometria compreende um método geofísico superficial, pois mais de 90% da radiação gama emanada da superfície terrestre origina-se, aproximadamente, nos 35 cm da crosta do planeta. Isto implica que três principais grupos podem constituir a fonte da radiação: (a) rocha não intemperizada; (b) rocha intemperizada; (c) material transportado (Gunn *et al.* 1997).

A radiação gama relaciona-se com três radioelementos passíveis de medição que consistem no K, U e Th, cujas concentrações médias na crosta equivalem a 2-2,35%, 2,7-3 ppm e 8,5-12 ppm, respectivamente (Telford *et al.* 1990b, Dickson & Scott 1997, Minty 1997). A aquisição convencional de dados gamaespectrométricos consiste no monitoramento de quatro janelas espectrais centradas nos seguintes fotopicos: 1,46 MeV (K); em 1,76 MeV (U); em 2,62 MeV (Th) e a janela da contagem total (0,41-2,81 MeV) (Minty 1997).

O K é medido diretamente a partir do pico de decaimento isotópico do ^{40}K (0,012% do K natural), o qual emite raios gama quando decai para ^{40}Ar . Cerca de 88% de ^{40}K decai por emissão de elétron (partícula beta) para ^{40}Ca , enquanto 11% decai por captura de elétron para ^{40}Ar . Isto é seguido pela emissão de um simples fóton de raios gama com energia de 1,46 MeV. O K apresenta-se comum em álcali-feldspatos, micas, e em grande concentração em rochas félsicas e baixa em rochas máficas e ultramáficas (Dickson & Scott 1997, Minty 1997).

O Th e o U possuem suas respectivas concentrações estimadas por meio de medidas mais complexas, pois estes radioelementos decaem em uma série de nuclídeos filhos.

O urânio ocorre naturalmente como radioisótopo ^{238}U e ^{235}U que iniciam a série de decaimento e terminam nos isótopos estáveis ^{206}Pb e ^{207}Pb , respectivamente. Como o ^{235}U compreende cerca de 0,72% da ocorrência natural de U, a energia dos raios gama emitida com o decaimento do mesmo é muito baixa para ser detectada, e para este fim o U é estimado pelo radioisótopo ^{238}U . O tório ocorre naturalmente como o radioisótopo ^{232}Th que inicia a série de decaimento que se finaliza no isótopo estável ^{208}Tl .

Nota-se que o cálculo de abundâncias de Th (^{232}Th) e U (^{238}U) ocorre por meio de fotopicos de emissão associados a ^{208}Tl (2,614 MeV) e ^{214}Bi (1,765 MeV), respectivamente (Minty 1997, IAEA 2003). Estimativas de U e de Th usualmente são reportadas como U equivalente (eU) e Th equivalente (eTh), reforçando que a acurácia destas estimativas é dependente de condições de equilíbrio (Minty 1997).

O U está presente em pegmatitos, sienitos, carbonatitos, granitos radioativos e alguns folhelhos escuros. Este radioelemento e o Th também estão na composição mineralógica de minerais traços, formadores de rochas, e em minerais acessórios e resistatos (e.g., zircão, monazita, alanita). A concentração de U e Th tende a aumentar com o acréscimo do conteúdo de sílica nas rochas (Dickson & Scott 1997, Minty 1997).

A intensidade dos raios gama emitida da superfície associa-se à mineralogia e à geoquímica da rocha, material transportado ou da natureza do intemperismo. Durante o

intemperismo, os radioelementos são liberados dos constituintes minerais primários e incorporados a argilas, óxidos de ferro, água subterrânea e matéria orgânica. O K é solúvel e móvel sob condições intempéricas, sendo que minerais primários (micas, K-feldspatos) são destruídos e passam a incorporar solução e/ou são adsorvido em argilas como a illita, montmorilonita e, em menor grau, a caolinita. Em contrapartida, o U e Th são menos móveis que o K (Wilford *et al.* 1997). O U é lixiviado e liberado de minerais solúveis sob condições oxidantes e precipita em condições redutoras. O Th pode tornar-se altamente móvel quando combinado com complexos orgânicos em solos e água subterrânea. Entretanto, tende a se concentrar em perfis intempéricos, associando-se a minerais resistentes (Wilford *et al.* 1997).

Os principais efeitos ambientais que afetam o sinal gamaespectrométrico consistem na topografia, espessa cobertura de solos, densa vegetação, além da precipitação que afeta, principalmente, a estimativa de urânio. Mudanças de temperatura e pressão promovem a alteração da densidade do ar, o que atenua a radiação gama, além do aumento da umidade do solo também gerar um acréscimo da concentração do radônio existente no mesmo. Adicionalmente, raios gama são atenuados de forma exponencial com a distância da fonte (Minty 1997, IAEA 2003).

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DE PROCESSAMENTOS EMPREGADOS

IMAGENS SAR-R99B

Em áreas com cobertura vegetal expressiva, os diferentes tipos de rochas não possuem relação direta com o sinal microondas de retorno, sendo a litologia por tal expressa indiretamente, com base na topografia (análise de categorias do terreno e sua distribuição). Outro elemento fundamental para a fotointerpretação consiste no padrão de drenagem, que está associado à litologia e sua à resistência à erosão, ao controle tectônico, à permeabilidade e à composição (Werle 1988).

A etapa de fotointerpretação das imagens SAR-R99B baseou-se principalmente em parte da metodologia apresentada em Soares & Fiori (1976) e Santos *et al.* (2001a). Esta metodologia caracteriza-se pela análise e extração visual da rede de drenagem e relevo (quebras positivas, negativas e feições lineares), seguida das feições lineares e alinhamentos de drenagem, objetivando identificar os principais condicionamentos estruturais e sua possível relação tectono-evolutiva e/ou metalogenética para cada região da PMT abordada.

GERAÇÃO DE IMAGENS AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS

As imagens microniveladas dos canais radiométricos foram processadas conforme discutido nos itens abaixo.

Imagens ternárias e normalização dos radioelementos

Imagens ternárias utilizando o espaço de cores RGB (vermelho-verde-azul) e CMY (ciano-magenta-amarelo) foram geradas para todos os levantamentos gamaespectrométricos aéreos disponíveis.

Adicionalmente, optou-se pela geração de imagens normalizadas do K (K_n), eTh (eTh_n) e eU (eU_n), objetivando a análise da abundância relativa dos mesmos em cada área garimpeira. Este procedimento pode ser usado para a redução de efeitos de atenuação de raios gama, como presença de solos e vegetação (IAEA 2003). Posteriormente, composições coloridas foram realizadas com as imagens de K_n , eTh_n e eU_n em RGB, respectivamente.

Imagens de razões de radioelementos

Silva (2003) gerou razões de radioelementos do tipo K/eTh , K/eU e eU/eTh nos *grids* produzidos e referentes aos dados do levantamento Bloco 1 – Província Aurífera do Tapajós. Esta mesma metodologia foi estendida aos dados dos levantamentos Maués, 12 de Outubro, Rosa de Maio e Bandeirante.

As duas primeiras razões acima citadas já foram discutidas e aplicadas por vários autores visando o uso em prospecção mineral. Entende-se que o K é comumente adicionado às rochas hospedeiras por meio de soluções hidrotermais e, dessa maneira, um enriquecimento neste radioelemento poderia ser empregado como guia prospectivo.

Entretanto, nota-se que as assinaturas gamaespectrométricas são muito variáveis para a detecção de diferentes tipos de depósitos de ouro, havendo a necessidade de cautela quanto a sua interpretação. Por vezes, pode ocorrer depleção de Th na rocha alterada (antagonismo K e Th), ou mesmo um aumento ou decréscimo de K em diferentes tipos de depósitos auríferos, além do fato da resposta do K diminuir em função do intemperismo. Com respeito a alterações hidrotermais marcadas por intensa silicificação, Dickson & Scott (1997) verificaram que moderadas quantidades deste processo promovem um decréscimo de K e retenção de Th. Contrariamente, na situação de intensa silicificação, ocorre perda completa dos três radioelementos. Neste último caso, é comum a ocorrência concomitante de outro tipo de alteração hidrotermal, como a potassificação, fato que aumentaria a concentração do K.

A partir destas observações, nota-se que as razões do tipo K/eTh e K/eU tornam-se ferramentas muito úteis para verificação de enriquecimento potássico, ou mesmo de assinaturas gamaespectrométricas antagônicas, a depender do tipo de alteração hidrotermal analisada. Particularmente, no caso da razão K/eTh, o radioelemento Th, por possuir menor mobilidade em condições de intemperismo químico, atua de forma a eliminar as informações de *background* geológico, evidenciando o possível acréscimo de K secundário (Dickson & Scott 1997, Airo 2002).

Imagem do parâmetro F

A técnica do parâmetro F (Efimov 1978) compreende uma tentativa de distinção de enriquecimento hidrotermal de K em relação à informação de *background* geológico, ou seja, as variações litológicas do meio. Este parâmetro consiste na relação de abundância de K associada à razão eTh/U e da abundância de eU relacionada à razão eTh/K. Trabalhos como o de Fornazzari Neto & Ferreira (2003) e Quadros *et al.* (2003) exemplificam com sucesso o uso do parâmetro F para a prospecção de ouro, uma vez que o K pode servir de elemento-guia para a localização de depósitos. Da mesma forma que a razão K/eTh, o parâmetro F também baseia-se no uso do normalizador geológico eTh. A fórmula está apresentada na **Eq. 3**:

$$\text{Parâmetro F} = \frac{(\text{Kc} * \text{eUc})}{\text{eThc}}, \quad (\text{Eq. 3})$$

onde Kc é o *grid* do canal do potássio, eUc é o *grid* do canal de urânio equivalente, e eThc é o *grid* do canal de tório equivalente.

Imagem do potássio anômalo

O K anômalo foi desenvolvido por Pires (1995), objetivando uma metodologia para realce do acúmulo secundário de K associado ao hidrotermalismo por meio da normalização deste radioelemento em função dos valores de eTh. Parte-se da premissa que os efeitos litológicos influenciam a concentração de eTh, havendo também uma influência similar nos canais de urânio e de potássio (Pires 1995). Entretanto, tal relação pode não ser verificada, quando, por exemplo, ocorre um enriquecimento hidrotermal, em que há constatação de K secundário, ou seja, em uma concentração acima do ideal previsto.

Para a detecção do K secundário ou anômalo, o uso do normalizador eTh é assumido, pois compreende o radioelemento controlador de efeitos litológicos e ambientais, visto ser resistente ao intemperismo, além de estar presentes em minerais resistentes como monazita e zircão. Pires (1995) empregou este normalizador objetivando suprimir contribuições

primárias, ou seja, aquelas referentes a variações geológicas não associadas com o evento hidrotermal potássico.

Dessa maneira, inicialmente calculam-se os valores de K ideal (K_i), a partir da relação mostrada na **Eq. 4**:

$$K_i = \left(\frac{\overline{K_c}}{eThc} \right) * eThc, \quad (\text{Eq. 4})$$

onde $\overline{K_c}$ é o valor médio do *grid* do potássio, $eThc$ é o *grid* de tório equivalente, e \overline{eThc} é o valor médio do *grid* do tório.

O K ideal é então comparado com o K medido, obtendo-se o K anômalo (**Eq. 5**):

$$K_d = \frac{(K_c - K_i)}{K_i}, \quad (\text{Eq. 5})$$

onde K_c é o *grid* do potássio e K_i é o *grid* do potássio ideal.

Considerando-se a natureza estatística da técnica, a aplicação da técnica do K anômalo foi restringida a áreas marcadas pela ausência de aluviões, pois tais são caracterizados na região por altos valores no canal do K, e sabidamente não relacionados aos processos hidrotermais.

GERAÇÃO DE IMAGENS MAGNETOMÉTRICAS

A partir da confecção do *grid* do campo magnético anômalo para cada aerolevante utilizado, realizou-se a aplicação de transformações lineares do mesmo além de outros procedimentos, similarmente ao que Silva (2003) realizou com os dados do levantamento Bloco 1 – Província Aurífera Tapajós.

Transformações lineares do campo magnético anômalo

As transformações lineares do campo magnético anômalo aqui aplicadas equivalem a processamentos tratados de forma genérica como filtros passa-alta, objetivando a observação de informações de alta frequência relacionadas a fontes anômalas rasas e diretamente associadas a descontinuidades, contatos, unidades geológicas entre outras feições. Estas transformações geralmente não definem diretamente a distribuição das fontes causativas, mas facilitam a construção de um entendimento geral da natureza das mesmas e as interpretações geológicas (Blakely 1996).

Comumente, as transformações lineares são obtidas por meio de procedimentos resultantes da aplicação do teorema da convolução no domínio *Fourier*.

As derivadas horizontais realçam altas frequências, produzindo picos anômalos

aproximadamente localizados sobre as bordas de grandes corpos, aumentando a definição das bordas dos mesmos (Milligan & Gunn 1997). São derivadas facilmente produzidas no domínio de *Fourier* (Blakely 1996).

As derivadas verticais baseiam-se na estimativa da variação do campo magnético anômalo a medida que distância-se ou aproxima-se verticalmente da fonte causativa. A primeira derivada vertical (ou gradiente vertical) é fisicamente equivalente à medida do campo magnético simultaneamente em dois pontos verticalmente separados por uma distância h , subtraindo-se estes dois valores e dividindo este resultado pela separação espacial vertical dos pontos medidos (Milligan & Gunn 1997). A segunda derivada vertical compreende o gradiente vertical da primeira derivada vertical, ressaltando fontes rasas. Destaca-se que as derivadas de maior ordem ressaltam maiores frequências, ou seja, eliminam efeitos regionais de grande comprimento de onda, solucionando os efeitos de anomalias adjacentes. Entretanto, também tendem a realçar ruídos (Milligan & Gunn 1997).

É importante diferenciar derivadas calculadas de gradientes medidos. As derivadas podem ser calculadas a partir do campo magnético anômalo, utilizando-se operadores do domínio do espaço ou da frequência. Em geral, as componentes de alta frequência dos gradientes são perdidas nos cálculos das derivadas. Desta maneira, os gradientes medidos retêm a fidelidade das componentes de alta frequência que são causadas por fontes magnéticas rasas/estreitas. Se menos de três gradientes são medidos, então os vetores não compreendem os gradientes verdadeiros, e sim às componentes do campo total no plano de medida (McMullean & MacLellan 1997).

A amplitude do gradiente horizontal total (AGHT) resulta em um produto que permite o posicionamento de limites de fontes causativas anômalas, objetivando a análise de mudanças laterais destas fontes (Blakely 1996). A magnitude da AGHT é dada pela **Eq. 6**, ou seja, pela raiz quadrada da soma dos quadrados das derivadas parciais de um campo potencial (Blakely 1996):

$$h(x, y) = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial G(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial G(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right]}, \quad (\text{Eq. 6})$$

onde $G(x, y)$ é o campo potencial em relação a x e y .

A interpretação de uma imagem da AGHT em termos de contraste de magnetização e da geologia, requer cautela. A magnetização pode variar em todas as direções dentro de uma unidade geológica, além dos contatos entre unidades não serem verticais em geral (Graunch & Cordell 1987).

O sinal analítico é formado pela combinação de gradientes horizontais e verticais de uma anomalia magnética (Blakely 1996). Consiste em uma técnica independente da direção de magnetização da fonte e da direção do campo magnético terrestre. Isto implica que todos os corpos com mesma geometria possuem o mesmo sinal analítico. Os picos do sinal analítico são simétricos e ocorrem diretamente sobre as bordas de grandes corpos e no centro de corpos estreitos. Este tipo de filtro permite uma rápida identificação da posição das fontes e da geometria magnética (Nabighian 1972, 1974, Roest *et al.* 1992, Milligan & Gunn 1997).

As derivadas horizontais e verticais são empregadas para o cálculo do sinal analítico. A partir do uso destes gradientes ortogonais, é possível calcular a amplitude do sinal analítico que está simplesmente associada à amplitude da magnetização (Roest *et al.* 1992). A **Eq. 7** equivale ao cálculo da amplitude do sinal analítico:

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial z}\right)^2\right]}, \quad (\text{Eq. 7})$$

onde G consiste na anomalia de campo potencial.

A Inclinação do Sinal Analítico (ISA) permite a estimativa do mergulho da fonte causativa dentre outros aspectos (Thurston & Smith 1997), a partir da definição do ângulo ϕ resultante do quociente entre a primeira derivada vertical e a amplitude do gradiente horizontal. A **Eq. 8** compreende a fórmula genérica empregada para o cálculo da ISA:

$$\phi = \arctan\left(\frac{\frac{\partial G}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2}}\right), \quad (\text{Eq. 8})$$

onde $\frac{\partial G}{\partial z}$ é a derivada vertical do campo magnético anômalo, $\frac{\partial G}{\partial x}$ é a derivada horizontal na direção x, e $\frac{\partial G}{\partial y}$ corresponde à derivada horizontal na direção y.

PROCESSAMENTO DE DADOS GEOQUÍMICOS

Os dados geoquímicos para ouro em solos foram processados por meio da simulação indicatriz sequencial, a partir da transformação binária dos dados a fim de analisar cortes das variáveis.

A primeira etapa da avaliação geoestatística aplicada a variáveis contínuas ou discretas compreende a análise variográfica, que consiste numa técnica de análise estrutural e espacial

das variáveis regionalizadas (Matheron 1963). Em geral, utilizam-se variogramas que abrangem a metade da distância bidimensional da base de dados espaciais (Deutsch & Journel 1992).

Sabe-se que uma variável regionalizada possui uma diminuição progressiva da associabilidade entre um ponto e outro com o afastamento. O variograma mede, portanto, a variabilidade a partir das distâncias, utilizando-se do passo (h), um vetor que contabiliza a magnitude da separação dos dados. Matematicamente, representa uma variância calculada para várias distâncias, sendo que o comportamento desta variância determina o padrão de continuidade do fenômeno. As principais propriedades dos variogramas consistem em: (a) alcance (distância em que as amostras passam a ser independentes, fato que ocorre a partir do patamar.); (b) patamar (valor que designa a estabilização do variograma no campo aleatório.); (c) continuidade na origem; (d) anisotropia (Matheron 1963).

Por meio da análise variográfica é possível identificar fenômenos anisotrópicos, ou seja, a ocorrência da variação do comportamento do variograma com a direção em que é calculado. Há, desta maneira, direções preferenciais de variabilidade, sendo a direção preferencial aquela que mostra maior continuidade. Possíveis descontinuidades na origem podem ocorrer, apresentando-se o efeito pepita. Este é decorrente de erros de amostragem, de análise ou é proveniente da variabilidade natural do meio amostrado (Matheron 1963, Yamamoto 2001).

Depois de calcular o variograma experimental, procede-se ao ajuste de uma função matemática representada por um modelo teórico do variograma que descreve continuamente a variabilidade espacial dos dados a partir dos parâmetros e dos pontos do variograma experimental. A partir desta definição, procede-se à escolha de um método para estimativas, como as krigagens ou as simulações estocásticas.

O método da krigagem tende a suavizar detalhes e valores extremos do conjunto de dados originais (Deutsch & Journel 1992). Esta técnica baseia-se na média ponderada das amostras, diferindo dos métodos tradicionais pelo fato de que os pesos atribuídos a estas amostras serem determinados com base na análise de dependência no espaço. Esta análise é determinada pelo variograma experimental, encontrando-se pesos ótimos a serem associados às amostras que irão estimar um ponto, área ou volume (Isaaks & Srivastava 1989, Yamamoto 2001).

As krigagens geram estimativas pontuais, ou seja, independentemente das estimativas vizinhas, compreendendo a melhor estimativa local associada a uma variância de erro mínima

possível. O mapa, entretanto, pode não ser o melhor como um todo, visto que a técnica tende a suavizar dados, observando-se, tipicamente, as seguintes situações: baixos valores amostrais tendem a ser superestimados, e altos valores subestimados. Isto é uma problemática quando o objetivo compreende a verificação de padrões de valores extremos, como anomalias auríferas, por exemplo. Além disso, a suavização não é uniforme, e é dependente da configuração dos dados. Um mapa krigado também parece mais variável quando resultante de muitas amostragens, e menos quando há porções pouco amostradas. Isto pode gerar artefatos na imagem krigada final (Goovaerts 1997).

Por isso, para fins de avaliação de dados extremos, a krigagem não é muito indicada. Objetivando-se um produto mais eficiente para esta questão, aparecem as simulações estocásticas, que se valem da geração de L realizações $z^{(l)}(\mathbf{u})$, $l=1, \dots, L$ para células \mathbf{u} (Goovaerts 1997).

As simulações estocásticas foram idealizadas para a reprodução da variabilidade da variável regionalizada em estudo de maneira probabilística. A medida da incerteza espacial dos valores amostrados é feita de forma conjunta e não individual como na krigagem (Goovaerts 1997). O objetivo da aplicação destas simulações compreende a reprodução da textura geológica (características globais) a partir da produção de modelos ilimitados (L realizações), onde cada um é uma representação da realidade, fato que permite obter a incerteza de forma mais realística acerca das heterogeneidades da variável. Desta maneira, não se produz o cenário mais provável dos valores de uma variável regionalizada, mas sim imagens equiprováveis com mesma média, histograma e variabilidade espacial dos valores experimentais (Goovaerts 1997).

Dentre os grupos de simulações destacam-se as sequenciais que, em suma, baseiam-se na extensão do condicionamento a toda a informação existente na vizinhança do ponto a simular e que é fornecida tanto pelos valores amostrados da variável quanto pelos valores simulados anteriormente. Esta relação pode ser observada pela simulação do primeiro valor z_1 a partir da distribuição $F(x_1; z_1 | (n))$, seguindo-se da simulação do segundo valor z_2 por meio da distribuição condicional $F(x_2; z_2 | (n+1))$, onde $n+1$ equivale ao condicionamento aos n dados experimentais acrescidos do valor simulado na simulação anterior. O princípio sequencial é utilizado para simular variáveis categóricas (Simulação Indicatriz Sequencial) ou contínuas (Simulação Gaussiana Sequencial)

A SIS corresponde a técnica não-gaussiana mais comumente utilizada. A produção da variável indicatriz, do variograma experimental e modelado é feito da mesma forma que se

realiza quando da aplicação da krigagem indicatriz. Este enfoque permite identificar padrões de uma classe específica com continuidade espacial por meio de diferentes modelos de semivariograma (Goovaerts 1997).

A análise dos resultados das n simulações somente é realizada com o pós-processamento a fim de verificar somente um resultado, a exemplo do cálculo da média, desvio-padrão, além de cortes de probabilidade, estes últimos úteis para análise da incerteza. Esse tipo de análise foca a inferência das distribuições de probabilidade para cada posição do espaço considerado. O que interessa não é inferir exatamente um certo valor, porém definir áreas com maior probabilidade que o evento ocorra (Felgueiras *et al.* 2002). Para tal, são determinados os níveis de corte a partir dos quais serão obtidos os mapas de probabilidade de ocorrência.

A distribuição espacial de variáveis como teor de minério ou elementos químicos tendem a caracterizar-se por zonas anômalas com orientação preferencial dentro de um *background* isotrópico. Nestas situações, a SIS tende a ser útil (até mesmo mais que aplicando-se a simulação gaussiana sequencial aos dados originalmente contínuos) ao se definir variável(is) indicatriz(es) com padrão(ões) bem definido(s) (Goovaerts 1997).

TÉCNICAS DE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

A estatística multivariada refere-se a todos os métodos estatísticos que, simultaneamente, analisam múltiplas medidas sobre cada indivíduo ou objeto investigado. Qualquer análise simultânea de mais de duas variáveis de certo modo pode ser considerada análise multivariada. Para ser considerada verdadeiramente uma análise multivariada, todas as variáveis devem ser aleatórias e inter-relacionadas de maneira que seus diferentes efeitos não podem ser significadamente interpretados de forma separada. De acordo com alguns autores, o propósito da análise multivariada é medir, explicar e prever o grau de relacionamento entre variáveis estatísticas (Hair *et al.* 1998).

A Análise por Principais Componentes (APC) compreende uma abordagem estatística usada para analisar inter-relações entre um grande número de variáveis e explicar essas variáveis em termos de suas dimensões inerentes comuns. O objetivo consiste em encontrar um meio de condensar a informação contida nas variáveis originais em um conjunto menor de variáveis estatísticas com perda mínima de informações (Hair *et al.* 1998).

As componentes principais são apresentadas na ordem decrescente de variabilidade, sendo que a última componente caracteriza-se pela menor contribuição que dá para a

explicação da variabilidade total dos dados originais.

O foco da APC para a redução da dimensionalidade dos dados torna possível identificar padrões nos dados anteriormente não visualizados por possuírem alta correlação entre os mesmos. Tal técnica pode ser aplicada em imagens e dados pontuais, como por exemplo, a geoquímica e geofísica.

Os autovetores representam a contribuição de cada imagem original a cada componente principal (PC) e podem ser positivos ou negativos devido ao reposicionamento da origem da distribuição das N variáveis. Como cada PC resultante representa uma adição ponderada pelo respectivo coeficiente da matriz de autovetores das variáveis amostradas, é possível selecionar a PC que contém a informação sobre o alvo analisado, e que está associada a valores mais altos dos autovetores específicos, com sinais positivos ou mesmo negativos.

Assim como discutido por autores como Sancevero *et al.* (2008), o uso da ACP está intrinsecamente associado ao pré-processamento de dados multivariados, tendo como consequência direta uma aplicação dentro de um processo de classificação, como a técnica multivariada K-médias.

A técnica K-médias compreende uma classificação não supervisionada que objetiva o agrupamento de dados similares, fato que produz melhor visualização dos mesmos. Simplificadamente, este método trabalha com o cálculo de distâncias para realizar o agrupamento, sendo que ao usuário cabe a informação do número de classes desejadas. Desta forma, se k classes são definidas, então k diferentes conjuntos com a maior distinção possível entre eles serão discriminados (MacQueen 1967).

MODELAGENS ESPACIAIS

A previsão da distribuição espacial de depósitos minerais baseada na integração quantitativa de conjuntos de dados multifonte vem sendo crescentemente utilizada por meio da inclusão de diferentes técnicas de modelagens espaciais em Sistemas de Informações Georreferenciadas (SIGs). Exemplos podem ser verificados em An *et al.* (1991), Wright & Bonham-Carter (1996), Haris & Pan (1999), Raines (1999), Venkataraman *et al.* (2000), Carranza & Hale (2001), Harris *et al.* (2001), Porwal *et al.* (2003a, b), Carranza (2004), Silva *et al.* (2005), Behnia (2007), Nykänen *et al.* (2007), Nykänen & Ojala (2007), Tissari *et al.* (2007), Andrade (2008).

As vantagens do uso de modelagens previsionais foram revistas por Raines (1999)

que, baseando-se em outros autores, reuniu os principais argumentos que justificam a modelagem como uma poderosa ferramenta para investigação de recursos naturais, a saber: (a) os modelos são fundamentais quando a resposta não está clara; (b) os modelos clareiam as questões de debate na avaliação de uma resposta; (c) os modelos não implicam em uma verdade absoluta, porém provêm resultados refinados baseados em um ponto de vista.

Dentre os diversos tipos de métodos existentes, duas linhas principais possuem destaque. A primeira reúne as modelagens dependentes de uma hipótese previamente entendida por *experts*. Desta maneira, são denominadas de modelagens de dados espaciais guiadas pelo conhecimento, das quais se destacam as lógicas booleana e *fuzzy* (Bonham-Carter 1994). Já as técnicas de modelagens espaciais guiadas pelos dados (e.g., redes neurais, pesos de evidência, regressão logística) caracterizam-se pelos parâmetros dos modelos serem calculados a partir de pontos de treinamento conhecidos (Bonham-Carter 1994).

Dentre estas vastas possibilidades, foram escolhidas duas técnicas para geração de mapas prospectivos na PMT: a lógica *fuzzy* e as redes neurais artificiais.

Lógica fuzzy

Este método compreende uma modelagem de dados espaciais a partir da qual os dados de entrada, previamente rasterizados, devem ser inicialmente simplificados por meio da fuzificação, ou seja, seleção de funções de pertinência *fuzzy* que permitem o escalonamento dos dados originais em graus de variabilidade entre 0 (pertinência ausente) e 1 (pertinência total). Desta maneira, o uso de uma função de pertinência *fuzzy*, determinada de maneira subjetiva, permite a modificação do mapa em dados ordenados ou intervalares, gerando as possibilidades *fuzzy* (Bonham-Carter 1994).

Dentre as funções de pertinência *fuzzy* mais utilizadas, estão o *categorical*, *small*, *large*. As funções *small* e *large* são usadas para indicar que valores pequenos ou grandes, respectivamente, dos dados numéricos originais, compreendem o intervalo de maior possibilidade *fuzzy*. Os parâmetros ponto médio (*mid point*) e espalhamento (*spread*) são determinados de maneira subjetiva. O primeiro consiste no valor que indicará a pertinência *fuzzy* de 0,5. Já o espalhamento determina o quão rápido a pertinência *fuzzy* decresce do valor 1 ao 0, sendo que quanto maior, mais rápida é a transição de valores de pertinência *fuzzy* 1 (presente) a 0 (ausente).

A equação do algoritmo *small* é dada pela **Eq. 9**:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{f_2}\right)^{f_1}}, \quad (\text{Eq. 9})$$

onde $\mu(x)$ é a possibilidade *fuzzy* resultante, x compreende o valor original do dado numérico, f_1 é o espalhamento da transição de valor de pertinência de 1 a 0, e f_2 consiste no ponto médio em que o valor da pertinência equivale a 0,5.

A equação da função *large* está apresentada na **Eq. 10**:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{f_2}\right)^{-f_1}} \quad (\text{Eq. 10})$$

Em se tratando de dados originais categóricos (e.g., unidades geológicas), a função *fuzzy categorical* deve ser aplicada a fim da determinação de qual categoria deva ser atrelada a altas ou baixas pertinências *fuzzy*.

Posterior ao processo de fuzificação, as possibilidades *fuzzy* referentes a cada mapa evidencial de entrada são combinadas por meio da escolha de operadores *fuzzy*, tais como: E, OU, produto algébrico, soma algébrica, *fuzzy* gama (Bonham-Carter 1994).

O operador **OU fuzzy** (equivalente do **OU** booleano) faz com que os valores de possibilidade *fuzzy* de saída sejam controlados pelos valores máximos existentes em cada mapa fuzificado. O operador **E fuzzy** (equivalente do **E** booleano) produz resultados para cada locação (pixel) equivalente aos menores valores de possibilidades *fuzzy* dos mapas evidenciais (Bonham-Carter 1994).

O operador produto algébrico *fuzzy* compreende o produtório das possibilidades *fuzzy* dos mapas de evidência, sendo o resultado final inferior ou igual à menor contribuição de valores de pertinência *fuzzy* dos mapas de entrada (Bonham-Carter 1994). A **Eq. 11** mostra esta relação:

$$\mu_{\text{produto}} = \prod_{i=1}^n \mu_i, \quad (\text{Eq. 11})$$

onde μ_i é a possibilidade *fuzzy* para o i -ésimo mapa, $i=1, 2, \dots, n$ mapas fuzificados a serem combinados, e μ_{produto} é a possibilidade *fuzzy* resultante (An *et al.* 1991, Bonham-Carter 1994).

O operador soma algébrica *fuzzy* compreende a relação de diferença de uma unidade em relação ao produtório das diferenças de uma unidade e possibilidades *fuzzy* dos mapas evidenciais a serem combinados. O resultado final compreende valores superiores ou iguais à maior contribuição de valores de pertinência *fuzzy* dos mapas de entrada (An *et al.* 1991,

Bonham-Carter 1994). A **Eq. 12** apresenta esta relação matemática:

$$\mu_{\text{soma}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i), \quad (\text{Eq. 12})$$

onde μ_{soma} é a possibilidade *fuzzy* resultante (Bonham-Carter 1994).

Com a finalidade de contrabalancear os efeitos minimizantes do produto algébrico *fuzzy* com os valores maximizantes do operador soma algébrica *fuzzy*, aplica-se o operador *fuzzy* gama, caracterizado pela ausência de influência tendenciosa para a seleção de alvos (Bonham-Carter 1994) (**Eq. 13**).

$$\mu_{\text{gama}} = (\mu_{\text{soma}})^\gamma * (\mu_{\text{produto}})^{1-\gamma}, \quad (\text{Eq. 13})$$

onde γ é o parâmetro escolhido na variação entre 0 e 1. Quando γ é 1, a combinação *fuzzy* gama compreende o resultado da soma algébrica *fuzzy*. Quando γ é 0, o resultado final consiste somente na contribuição do produto algébrico *fuzzy* (An *et al.* 1991, Bonham-Carter 1994).

Redes neurais artificiais

As Redes Neurais Artificiais (RNAs) compreendem técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado no raciocínio humano. São ainda caracterizadas por permitir o processamento de grandes conjuntos de dados, por não necessitar do entendimento de um modelo de depósito específico, além de tornar possível a extração de padrões ocultos de dados, que podem ser imperceptíveis aos seres humanos e aos métodos estatísticos convencionais (Brown *et al.* 2000).

As RNAs são formadas por elementos de processamento denominados *neurônios*, que compreendem funções matemáticas que se apresentam interconectadas por meio de ligações relacionadas a coeficientes numéricos (pesos sinápticos). Estes pesos mostram a intensidade de cada conexão e tendem a ser alterados a fim de adaptar, da melhor forma possível, os modelos à realidade existente (Porwal *et al.* 2003b).

De maneira geral, as camadas relacionadas às RNAs são classificadas em três grupos: (a) a *camada de entrada*, compreendendo os vetores de entrada (planos de informação); (b) a *camada oculta*, na qual uma determinada função irá estabelecer uma conexão ponderada entre os neurônios da camada de entrada e de saída; e (c) a *camada de saída*, consistindo no resultado final (Brown *et al.* 2000).

As RNAs imitam o aprendizado humano e tentam “aprender” por meio de treinamento a partir dos vetores de entrada e dos processos de ajustes aplicados aos pesos. O aprendizado

se realiza a partir da implementação de um algoritmo de treinamento (conjunto de regras para a solução de um certo problema), que pode ser, por exemplo, supervisionado (*Probabilistic Neural Network, Radial Basis Functional Link Net* etc) ou não-supervisionado (e.g., *Fuzzy Clustering*, mapas auto-organizáveis etc). De maneira geral, no treinamento realiza-se o mapeamento de cada vetor de entrada do conjunto de dados de treinamento para derivar seus respectivos vetores alvos de saída (t). Depois que a rede está treinada, os parâmetros são aplicados a toda base de dados (evidências), resultando, a cada vetor de entrada, uma saída, ou resultado da classificação (**Figura 2**).

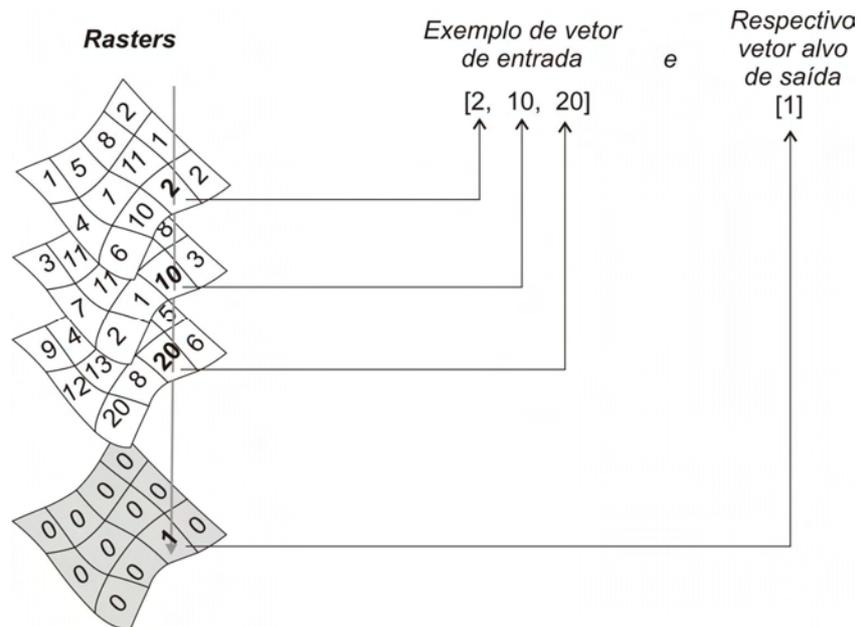


Figura 2. Esquema de dados de entrada para aplicação das redes neurais artificiais e resultado de saída (Modificado de Brown *et al.* 2000).

Nesta dissertação de mestrado, a rede neural denominada *Radial Basis Functional Link Net* (RBFLN) foi selecionada para uma tentativa de determinar padrões que possam estar relacionados com a prospecção aurífera na PMT.

Radial Basis Functional Link Net

Uma função de base radial (y) está ilustrada, esquematicamente, na **figura 3**. Uma função deste tipo, com vetor central em \mathbf{v} , é geralmente definida nos vetores \mathbf{x} n -dimensionais pela **Eq. 14** (Looney & Yu 2000):

$$y = f(\mathbf{x}; \mathbf{v}, \sigma) = \exp\left[-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{v}\|^2}{2\sigma^2}\right], \text{ (Eq. 14)}$$

onde σ consiste no parâmetro espalhamento, significando a variância da função.

O nome *radial* implica que todos os pontos x equidistantes do centro v retornam os mesmos valores de y na superfície gerada, sendo que tais valores decrescem a medida que os pontos x se afastam do centro v . Um número de M funções de base radial pode ser centrado em M vetores centrais, gerando-se uma base circular de raio σ_m cobrindo a região de interesse. A seção yx_1 mostrada na **figura 3** permite analisar a forma gaussiana da função de base radial, além de indicar a região de interesse, também denominada de campo receptivo (Looney & Yu 2000). O uso de funções de base radial permite determinar a proximidade do vetor de entrada (plano de informação na camada de entrada) com aqueles que foram determinados na fase de treinamento.

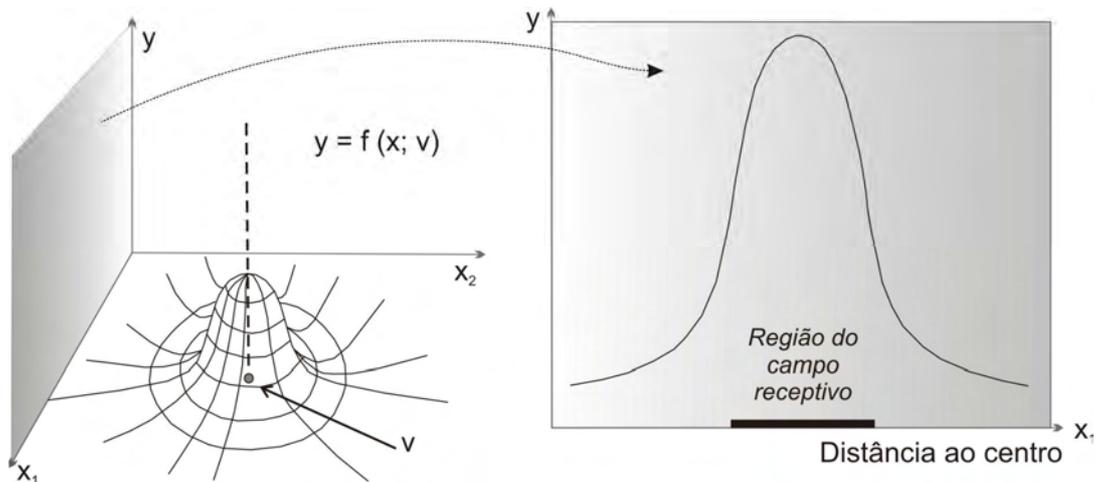


Figura 3. Gráfico mostrando uma função de base radial centrada em v , e a seção yx_1 da mesma, caracterizando a função com do tipo gaussiana (Modificado de Looney & Yu 2000).

A arquitetura de uma RBFLN é formada por três camadas: a camada de entrada (composta por N neurônios que estão associados com os vetores de treinamento), a camada oculta (formada por M neurônios, estes representados pelas funções de base radial), e a camada de saída (formada por J neurônios) (Looney & Yu 2000). A **figura 4** ilustra a configuração das três camadas de uma RBFLN.

Cada vetor x presente na camada de entrada ativa as funções de base radial na camada oculta. Cada um dos M neurônios da camada oculta retorna um valor y para os N neurônios da camada de entrada, sendo que os valores de y são multiplicados pelos pesos sinápticos u_{mj} nas conexões entre os neurônios da camada oculta e aqueles da camada de saída. Os vetores da camada de entrada são então conectados diretamente aos vetores da camada de saída de forma ponderada pelos pesos sinápticos w_{nj} . Desta maneira, cada um dos J neurônios da camada de saída é calculado por meio do somatório dos valores de y multiplicados pelos pesos sinápticos u_{mj} e dos valores de x multiplicados pelos pesos sinápticos w_{nj} (**Figura 4**).

As respectivas saídas (z_j) para um m -ésimo neurônio da camada oculta, um j -ésimo nó da camada de saída e um q -ésimo vetor \mathbf{x} da camada de entrada é dada pela Eq. 15 (Looney & Yu 2000):

$$z_j^{(q)} = \left[\frac{1}{(M+N)} \right] \left\{ \sum_{(m=1,M)} u_{mj} y_m^{(q)} + \sum_{(n=1,N)} w_{nj} x_n^{(q)} \right\} \text{ (Eq. 15)}$$

Dessa maneira, a RBFLN diferencia-se das redes neurais baseadas em funções de base radial convencionais por incluir, além de um modelo não-linear, outro modelo linear que faz a conexão direta entre os nós da camada de entrada com os nós da camada de saída, sem haver conexão com a camada oculta (Looney & Yu 2000) (*cf.*, Figura 4).

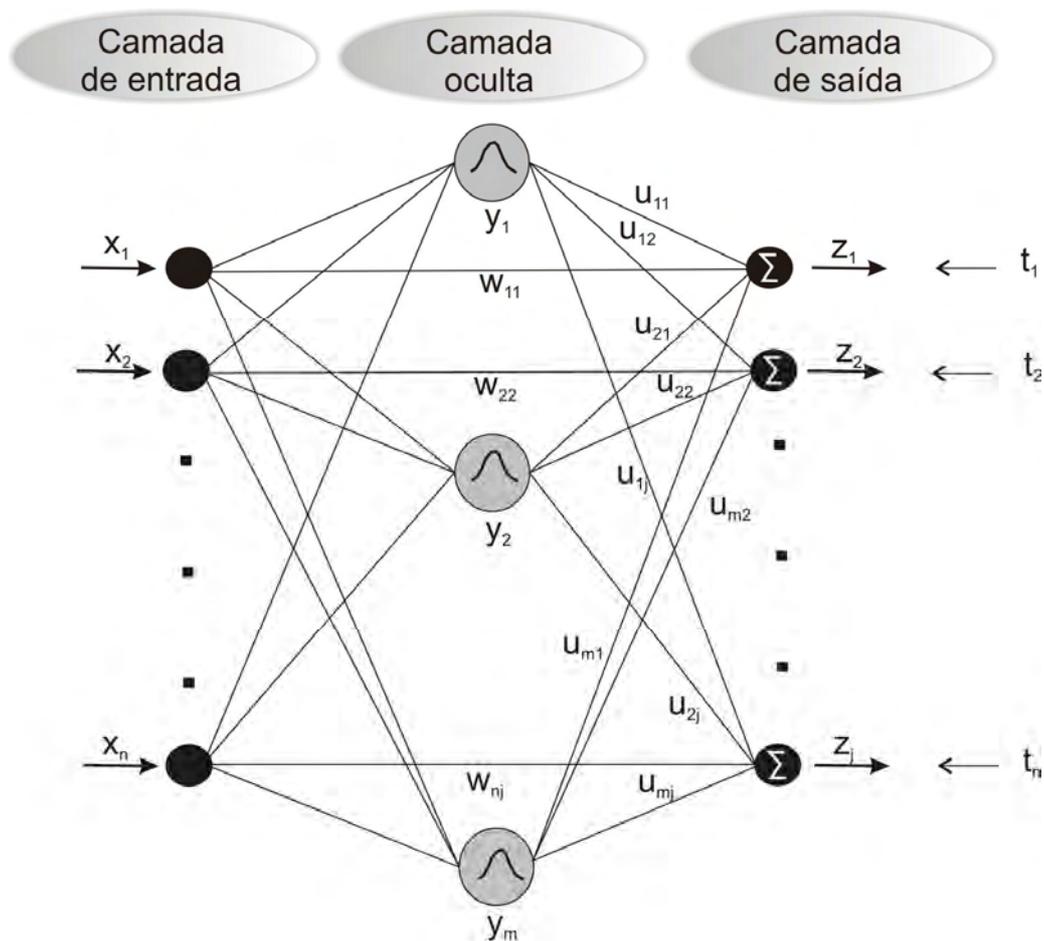


Figura 4. Esquema da arquitetura de uma RBFLN, com indicação de N vetores de entrada, M nós na camada oculta e J nós na camada de saída, além dos pesos sinápticos w_{nj} e u_{mj} (Modificado de Looney & Yu 2000). \mathbf{t} = vetor alvo de saída.

A fase de treinamento é realizada com uma amostra de Q vetores de entrada (vetores de treinamento), com um conjunto de Q vetores de saída associados. Os vetores de treinamento compreendem aqueles associados com ocorrências de ouro conhecidas e com pontos previamente determinados pelo usuário onde tais ocorrências não existem. Esta etapa

caracteriza-se por armazenamento dos parâmetros ajustados da rede neural que são ‘aprendidos’ durante o treinamento, a saber: (a) os valores dos centros dos vetores e dos espalhamentos (σ) das funções de base radial; (b) ajuste dos pesos sinápticos u_{mj} da conexão entre os nós da camada oculta com os nós da camada de saída; e (c) ajuste dos pesos sinápticos w_{nj} da conexão entre os vetores da camada de entrada com os nós da camada de saída. Destaca-se que os ajustes dos parâmetros das funções de base radial e dos pesos sinápticos são realizados de forma a minimizar, a cada iteração, o erro quadrático total (Looney & Yu 2000). Este erro é dado pela **Eq. 16**:

$$E = \sum_{(q=1,Q)} \sum_{(j=1,J)} (t_j^{(q)} - z_j^{(q)})^2 \quad (\mathbf{Eq. 16})$$

Após o treinamento dos n vetores de treinamento, os parâmetros estimados na etapa de aprendizado com a definição da arquitetura da rede são aplicados a todos os vetores de entrada do banco de dados, resultando em vetores alvos, ou resultado final equivalente, a cada pixel, a um valor previsionial entre 0 e 1, indicando a favorabilidade do bem prospectado (Porwal *et al.* 2003b).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Airo M.L. 2002. Aeromagnetic and aeroradiometric response to hydrothermal alteration. *Surveys in Geophysics*, **23**:273-302.

An P., Moon W.M., Rencz A. 1991. Application of fuzzy set theory to integrated mineral exploration. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, **27**(1): 1-11.

Andrade L.B. 2008. *Mapeamento do potencial mineral para níquel e ouro no Cinturão Metassedimentar Nova Brasilândia – Rondônia por meio de lógica nebulosa (fuzzy) e redes neurais artificiais*. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 69 p.

Behnia P. 2007. Application of Radial Basis Functional Link Networks to exploration of proterozoic mineral deposits in central Iran. *Natural Resources Research*, **16** (2): 147-155.

Blakely R.J. 1996. *Potential theory in gravity & magnetic applications*. Cambridge, Cambridge University Press. 441p.

Bonham-Carter G.F. 1994. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Oxford, Pergamon, 398p.

Brown W.M., Gedeon T.D., Groves D.I., Barnes R.G. 2000. Artificial neural networks: a new method for mineral prospectivity mapping. *Australian Journal of Earth Sciences*, **47**(4): 757-770.

- Carranza E.J. 2004. Weights of evidence modeling of mineral potencial: a case study using small number of prospects, Abra, Philippines. *Natural Resources Research*, **13** (3): 173-187.
- Carranza E.J., Hale M. 2001. Geologically constrained fuzzy mapping of gold mineralization potential, Baguio district, Philippines. *Natural Resources Research*, **10** (2): 125-136.
- Clark D.A. 1999. Magnetic petrology of igneous intrusions: implication for exploration and magnetic interpretation. *Exploration Geophysics*, **30**:5-26.
- Clark D.A. 1997. Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2): 83-103.
- Crósta A.P., Souza Filho C.R. 1997. Sensoriamento Remoto. *Anuário Fator GIS*, C-10 – C-22.
- Deutsch C.V. & Journel A.G. 1992. GSLIB – Geostatistical software library and user's guide. Oxford University Press, Nova York, 340 pp.
- 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.
- Efimov A.V. 1978. Multiplikativniyi pokazatel dlja vydelenija endogennykh rud aerogamma-spectrometriceskim dannym. In: *Metody rudnoj geofiziki*, Leningrado, Naucnoproizvodstvennoje objedinenie geofizica Ed., 59-68.
- Felgueiras C.A, Druck S., Monteiro A.M.V. 2002. *Análise espacial de superfícies: o enfoque da geoestatística por indicação*. Ministério da Ciência e Tecnologia/INPE, 25 p.
- Ford J.P., Blom R.G., Coleman J.L., Farr T.G., Plaut J.J., Pohn H.A., Sabins F.F. 1998. Radar Geology. In: Lewis A.J., Henderson F.M. *Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radar*. 3 ed., New York: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 511-565.
- Fornazzari Neto L., Ferreira F.J.F. 2003. Gamaespectrometria integrada a dados geológicos multifonte em ambiente SIG aplicada à prospecção de ouro na folha Botuverá, SC. *Revista Brasileira de Geociências*, **33** (2- Suplemento): 197-208.
- Grauch V.J.S., Cordell L. 1987. Limitations of determining density or magnetic boundaries from the horizontal gradient of gravity or pseudogravity data. *Geophysics*, **52**:118-121.
- Goovaerts P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. London, Oxford University Press, 483 p.
- GLOBESAR 2006. *Apostila de radar*. Disponível em: <http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/gsarcd/index_e.php>. Acesso: 10 de Março de 2006.
- Gunn P.J., Minty B.R.S., Milligan P.R. 1997. The airborne gamma-ray spectrometry response over arid Australian terranes. In: *Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, 733-740.
- Hair J.F., Tatham R.L., Anderson R.E., Black W. 1998. Chapter 1 - Introduction. In: Hair J.F., Tatham R.L., Anderson R.E., Black W. (Ed.). *Multivariate Data Analysis*. 5 ed., Nova Jersey,

Pearson Education Inc., 23-45.

Harris J.R., Wilkinson L., Heather K., Fumerton S., Bernier M.A., Ayer J., Dahn R. 2001. Application of GIS processing techniques for producing mineral prospectivity maps – a case study: mesothermal Au in the Swayze greenstone belt, Ontario, Canada. *Natural Resources Research*, **10**(2): 91-124.

Harris J.R., Pan G. 1999. Mineral favorability mapping: a comparison of artificial neural networks, logistic regression, and discriminant analysis. *Natural Resources Research*, **8** (2): 93-109.

IAEA (International Atomic Energy Agency) 2003. *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. Viena, IAEA-TECDOC, 173p.

Isaaks E.H., Srivastava R.M. 1989. Ordinary kriging. In: Isaaks E.H., Srivastava R.M. (ed). *An introduction to applied geostatistics*. Nova York, Oxford University Press, 278-322.

Kurimo M. & Multala J. 1995. Aeromagnetic horizontal gradiometer system of the Geological Survey of Finland. *Journal of Applied Geophysics*, Abstracts, p. 139.

Lewis A.J., Henderson P.M., Holcomb D.W. 1998. Radar fundamentals: the geoscience perspective. In: Lewis A.J., Henderson F.M. *Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radar*. 3 ed., New York, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 131-181.

Looney C.G, Yu H. 2000. Special software development for Neural Network and Fuzzy Clustering analysis in Geological Information Systems. *Geological Survey of Canada*, 34 p.

Luyendyk A.P.J. 1997. Processing of airborne magnetic data. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2): 31-38.

MacQueen J. 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: University of Blerkely, Blerkely Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 5th, Blerkely, 325-350.

Matheron G. 1963. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, **58**: 1276-1266.

Minty B.R.S. 1997. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2): 39-50.

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

Nykänen V.M., Ojala V.J. 2007. Spatial analysis techniques as successful mineral potential mapping tools for orogenic gold deposits in the northern Fennoscandian shield, Finland. *Natural Resources Research*, **16** (2): 85-92.

Nykänen V.M, Ojala V.S., Sarapää O., Hulkkih H., Sarala P. 2007. Spatial modelling

techniques and data integration using GIS for target scale gold exploration in Finland. In: *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, 911-917.

Paradella W.R. 1996. Imagens de radar. Fundamentação e experiência com o SAR na Amazônia. *FATOR GIS*, **14**: 40-43.

Pires A.C.B. 1995. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, **25**(1): 61-68.

Porwal A., Carranza E.J.M., Hale M. 2003a. Knowledge-driven and data-driven fuzzy models for predictive mineral potential mapping. *Natural Resources Research*, **12**(1): 1-25.

Porwal A., Carranza E.J.M., Hale M. 2003b. Artificial neural networks for mineral-potential mapping: a case study from Aravalli province, western India. *Natural Resources Research*, **12**(3): 155-171.

Quadros T.F.P., Koppe J.C., Strieder A.J., Costa J.F.C.L. 2003. Gamma-ray data processing and integration for lode-Au deposits exploration. *Natural Resources Research*, **12**(1): 57-65.

Raines G.L. 1999. Evaluation of weight of evidence to predict epithermal gold deposits in the Great Basin of the western United States. *Natural Resources Research*, **8**(4), 257-276.

Reford S. 2006. Gradient enhancement of the total magnetic field. *The leading Edge*, 59-66.

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

Rowan L.C., MARS J.C. 2003. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, **84**: 350-366.

Sancevero S.S., Remacre A.Z., Vidal A.C., Portugal R.S. 2008. Aplicação de técnicas de estatística multivariada na definição da litologia a partir de perfis geofísicos de poços. *Revista Brasileira de Geociências*, **38**(1-Suplemento): 61-74.

Schmidt P.W., Clark D.A. 2006. The magnetic gradient tensor: its properties and uses in sources characterization. *The Leading Edge*, 75-78.

Silva A.M., Teixeira A.A., McCafferty A., PIRES A.C.B., Moraes R.A.V., Souza Filho C.R. 2005. Mapping Archean Greenstone-Hosted Deposits with Probability Ratio and Weights of Evidence Models, Quadrilátero Ferriífero, Brazil. *GIS and Spatial Analysis*, Toronto, Canadá, **1**: 551-556.

Silva A.A.C. 2003. *Processamento, interpretação e integração de dados geológicos e geofísicos da Província Mineral do Tapajós*. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade de Brasília, Brasília-DF, 137 p.

Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. 1990a. Magnetic methods. In: Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. (ed.) *Applied geophysics*. Cambridge, Cambridge University Press, 62-135.

Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. 1990b. Radioactivity method. In: Telford W.M.,

Geldart L.P., Sheriff R.E. (ed.) *Applied geophysics*. Cambridge, Cambridge University Press, 611-644.

Tissari S., Nykänen V.M., Lerssi J., Kolehmainen M. 2007. Classification of soil groups using weights-of-evidence-method and RBFLN-neural nets. *Natural Resources Research*, **16** (2): 159-169.

Venkataraman G., Madhavan B.B., Ratha D.S., Antony J.P., Goyal R.S., Banglani S., Roy S.S. 2000. Spatial modeling for base-metal mineral exploration through integration of geological data sets. *Natural Resources Research*, **9**(1): 27-42.

Werle D. 1988. Radar remote sensing. A training manual. *Canada Center for Remote Sensing*. 9-73.

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

Wright D.F., Bonham-Carter G.F. 1996. VHMS favourability mapping with GIS-based integration models, Chisel Lake-Anderson Lake area. In: Bonham-Carter G.F., Galley A.G., Hall G.E.M. (eds.). *EXTECH I: A multidisciplinary approach to massive sulphide research in the Rusty Lake-Snow Lake greenstone belts, Manitoba*. Geological Survey of Canada, Bulletin 426, p. 339-376, 387-401.

Yamamoto J.K. 2001. Análise geoestatística. In: Yamamoto J.K. (ed.) *Avaliação e classificação de reservas minerais*. São Paulo-SP, Ed. Universidade de São Paulo, 69-92.