

Ministério de Educação e do Desporto
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,
Metalúrgica e de Materiais

Integração de Dados em ambiente SIG para Mapeamento de
Favorabilidade Mineral de Ouro na Ilha Cristalina de Rivera
(Uruguai)

Telmo Fernando Perez de Quadros
Geólogo

Porto Alegre, 2000

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais -PPGEM

Integração de Dados em ambiente SIG para Mapeamento de Favorabilidade Mineral de Ouro na Ilha Cristalina de Rivera (Uruguai)

Telmo Fernando Perez de Quadros

Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre
2000

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais -PPGEM

Integração de Dados em ambiente SIG para Mapeamento de Favorabilidade Mineral de Ouro na Ilha Cristalina de Rivera (Uruguai)

Telmo Fernando Perez de Quadros

Geólogo

Trabalho realizado no Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa/Tecnologia Mineral

Porto Alegre
2000

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração Metalurgia Extrativa/Tecnologia Mineral e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-graduação.

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

Co-orientador: Prof. Dr. Adelir José Strieder

Banca Examinadora:

Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa
PPGEM - UFRGS

Prof. Dr. Léo Afraneo Hartmann
CPGeo - UFRGS

Prof. Dr. Ardemírio de Barros Silva
UNICAMP

Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira
UFPR

Coordenador do PPGEM

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Esse trabalho é dedicado à minha esposa Mariléa, pela compreensão e pelo constante apoio recebido, e ao meu filho Pedro, pelo carinho e pelas horas de ausência.

É dedicado também aos meus pais, Durval e Oda, pela ajuda constante, pela minha formação profissional e, principalmente, pelo exemplo de vida, de caráter, de ética, de honestidade e trabalho.

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração desse trabalho, o meu reconhecimento.

Ao professor Jair Carlos Koppe pela orientação, estímulo, confiança no meu trabalho e apoio financeiro.

Ao professor Adelir José Strieder pela co-orientação, dedicação e esforço pessoal proporcionado, e pelas valiosas sugestões e discussões.

Ao professor João Felipe Coimbra Costa Leite pelas esclarecedoras discussões e pelo aprendizado na área de geoestatística.

Ao professor Francisco J. F. Ferreira, da UFPR, pelo aprendizado na área de geofísica aplicada.

Ao professor Paulo Meneses, da UNB, pela disponibilidade do Laboratório de Radiância Espectral da EMBRAPA-UNB.

Ao professor Ardemírio de Barros Silva, da UNICAMP, pela acolhida no curso Sistemas de Informações Geográficas na Exploração Mineral e no Mapeamento Geológico ministrado na UNICAMP e pelas interessantes discussões sobre geoprocessamento.

Ao professor Vitor Haertel pelo aprendizado na área de sensoriamento remoto.

Ao Dr. Graeme F. Bonham-Carter, do Geological Survey of Canada, pelos esclarecimentos a respeito do método de integração Pesos de Evidência.

Ao Dr. A. Glikson, do Australian Geological Survey Organisation (AGSO), pelas sugestões a respeito da eliminação da vegetação em classificações de imagens orbitais.

Aos bolsistas do projeto Eng. Minas Eduardo Papaléo e Geólogo Sérgio Buffon, pela importante colaboração na execução do trabalho, dedicação e valiosas sugestões.

Ao Geólogo Jorge Pimentel, da CPRM, pelo constante auxílio, e pelos valiosos ensinamentos na área de SIG.

Ao colega Eng. Minas Gustavo G. Pilger pelo auxílio na área de programação e pelas interessantes discussões na área de geoestatística.

Ao Dr. Luca Riccio (Crystallex Int. Corp.) pela confiança depositada no projeto.

Aos Geólogos Marcelo Gindri, Jorge Camargo Souto e aos demais funcionários da Crystallex International Corporation, Divisão Mineradora San Gregorio, pela acolhida e constante apoio recebidos.

Aos colegas do Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro do PPGEM, EE/UFRGS, pelas sugestões e observações valiosas.

Aos funcionários e professores do DEMIN, da Fundação Luiz Englert e do PPGEM, EE/UFRGS, pela atenção dispensada às minhas solicitações.

A todos os antigos amigos pelo apoio recebido e a todos os novos amigos feitos por ocasião da elaboração dessa Tese de Doutorado.

À Capes e às empresas Rea Gold Inc. e Crystallex International Corporation pelo apoio financeiro.

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xvii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xxii
RESUMO.....	xxiii
ABSTRACT.....	xxv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Localização, Acessos e Aspectos Fisiográficos.....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Organização do Trabalho.....	6
1.4 Aspectos Históricos.....	7
1.5 Geologia Regional.....	9
1.5.1 Trabalhos Anteriores.....	9
1.5.2 Aspectos Estratigráficos.....	11
1.5.3 Estruturação da Ilha Cristalina de Rivera.....	14
1.5.4 Arcabouço Tectônico da Ilha Cristalina de Rivera.....	17
1.6 Geologia e Mineralização da Mina San Gregorio.....	20
2 GEOPROCESSAMENTO NA EXPLORAÇÃO MINERAL.....	25

2.1. Generalidades e alguns exemplos de mapeamento de favorabilidade mineral.....	25
2.2 Mapeamento de Favorabilidade Mineral baseado na integração de dados suportada em SIG – uma breve introdução.....	28
2.2.1 Modelos e Estruturas de dados espaciais.....	30
2.2.2 Entrada de dados espaciais.....	32
2.2.3 Visualização e Interrogação de dados espaciais.....	34
2.2.4 Transformação de dados espaciais.....	34
2.2.4.1 Conversões de pontos em áreas.....	35
2.2.4.2 Dilatação de entidades espaciais.....	36
2.2.4.3 Operações de Amostragem e Reamostragem.....	37
2.2.5 Análise e Modelamento de dados espaciais.....	38
2.2.5.1 Análise em mapas únicos (single maps).....	39
2.2.5.2 Análise em pares de mapas (map pairs).....	39
2.2.5.2.1 Correlações entre pares de mapas.....	40
2.2.5.3 Análises em Mapas Múltiplos.....	42
2.2.5.3.1 Lógica Booleana.....	43
2.2.5.3.2 Sobreposição Indexada.....	43
2.2.5.3.3 Lógica Difusa.....	45
2.2.5.3.4 Pesos de Evidência.....	50
3 METODOLOGIA DE INTEGRAÇÃO DE DADOS PARA A PESQUISA MINERAL DE OURO NA ICR.....	58

3.1 Modelo Conceitual e Modelo de Exploração.....	59
3.2 Construção e Processamento da Base de Dados.....	65
3.3 Aplicação de Modelos de Integração para geração de Mapas de Favorabilidade Mineral	67
3.4 Equipamentos e Infra-estrutura.....	68
4 CONSTRUÇÃO E PROCESSAMENTO DOS PLANOS DE INFORMAÇÃO PARA A INTEGRAÇÃO DE DADOS.....	69
4.1 Área de Trabalho.....	72
4.2 Fator Infraestrutura.....	72
4.3 Fator Ocorrências Minerais.....	74
4.4 Fator Landsat.....	77
4.5 Fator Geoquímico.....	92
4.6 Fator Geofísico.....	109
4.6.1 Dados de Gamaespectrometria.....	114
4.6.2 Dados de Magnetometria.....	132
4.7 Fator Estrutural.....	140
4.8 Fator Altimetria.....	144
5 INTEGRAÇÃO DE DADOS: MAPEAMENTO DO POTENCIAL AURÍFERO DA ICR.....	153
5.1. Método de Integração Pesos de Evidência.....	154

5.1.1. Seleção dos Mapas Evidência e Reclassificação.....	155
5.1.2. Testes de Independência Condicional.....	172
5.1.3. Integração dos Mapas Evidência e geração do Mapa de Favorabilidade Mineral.....	193
5.2. Método de Integração Lógica Difusa.....	196
5.2.1 Seleção das Evidências e atribuição de valores de função-membro Lógica Difusa.....	198
5.2.2 Integração dos Mapas Evidência e geração dos Mapas de Favorabilidade Mineral.....	207
5.2.2.1 Fator LANDSAT.....	207
5.2.2.2 Fator Geoquímico.....	209
5.2.2.3 Fator Geofísico.....	209
5.2.2.4 Fator Estrutural.....	210
5.2.2.5 Fator Altimetria.....	211
5.2.2.6 Geração dos Mapas de Favorabilidade Mineral.....	211
5.3. Análise Comparativa dos Resultados	216
6 ANÁLISE DA FAVORABILIDADE MINERAL, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	229
6.1 Análise da Favorabilidade Mineral na ICR.....	229
6.2 Conclusões e Recomendações.....	237
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	244

Lista de Figuras

Figura 1.1 –	Mapa de Localização.....	5
Figura 1.2 –	Esboço geológico do Escudo Uruguaio-sul-riograndense e áreas adjacentes.....	12
Figura 1.3 –	Mapa da Mina San Gregorio	21
Figura 2.1 –	Gráfico operador gama (?) Lógica Difusa.....	49
Figura 3.1 –	Esquema geral da metodologia usada no trabalho	61
Figura 4.1 –	Relação seqüencial das etapas de Construção e Processamento da base de dados.....	71
Figura 4.2 –	Fluxograma de procedimentos para geração da Área de Trabalho	73
Figura 4.3 –	PI original Estradas	75
Figura 4.4 –	Fluxograma do Fator Infraestrutura	76
Figura 4.5 –	Mapa da ICR	78
Figura 4.6 –	Fluxograma do Fator Ocorrências Minerais	79
Figura 4.7 –	Assinaturas Espectrais de amostras de rocha coletadas na Ilha Cristalina de Rivera.....	81
Figura 4.8 –	Mapa temático rgbg, produzido com base na técnica desenvolvida por Glikson (1997).....	88
Figura 4.9 –	Mapa temático acpc, produzido com base em técnica desenvolvida por Crosta & Mc Moore (1989) e Loughlin (1991).....	91
Figura 4.10 –	PI derivado rgb2ar (MD1).....	93
Figura 4.11 –	PI derivado rgb3ar (MD2).....	94
Figura 4.12 –	PI derivado rgb4ar (MD3).....	95

Figura 4.13 –	PI derivado acp1ar (MD4)	96
Figura 4.14 –	PI derivado acp2ar (MD5)	97
Figura 4.15 –	PI derivado acp3ar (MD6)	98
Figura 4.16 –	Fluxograma do Fator LANDSAT	99
Figura 4.17 –	PI original drenagem.....	102
Figura 4.18 –	<i>Scree plot</i> de Autovalor x Numero de Autovalores	104
Figura 4.19 –	PI derivado bacpann (MD7).....	106
Figura 4.20 –	PI derivado bacsedn (MD8).....	107
Figura 4.21 –	PI derivado babgcp2n (MD9)	108
Figura 4.22 –	Fluxograma do Fator Geoquímico	109
Figura 4.23 –	Histogramas dos dados originais provenientes do levantamento aerogeofísico	112
Figura 4.24 –	Variogramas dos dados gamaespectrométricos.....	113
Figura 4.25 –	Variogramas dos dados aeromagnetométricos	114
Figura 4.26 –	Histogramas dos dados aerogeofísicos após Krigagem.....	115
Figura 4.27 –	Mapa Aerogamaespectrométrico – Contagem Total (PI original).....	116
Figura 4.28 –	Mapa Aerogamaespectrométrico, canal K (PI original).....	117
Figura 4.29 –	Mapa Aerogamaespectrométrico, canal U (PI original).....	118
Figura 4.30 –	Mapa Aerogamaespectrométrico, canal Th (PI original).....	119
Figura 4.31 –	Mapa Aeromagnetométrico (PI original), com sobreposição de Fotolneamentos tipo 1	120
Figura 4.32 –	Mapa Aerogamaespectrométrico razão U/K	121

Figura 4.33 –	Mapa Aerogamaespectrométrico razão U/Th	122
Figura 4.34 –	Mapa Aerogamaespetrométrico razão Th/K	123
Figura 4.35 –	Mapa Aerogamaespectrométrico Fator F	126
Figura 4.36 –	Mapa Aerogamaespectrométrico Kd.....	127
Figura 4.37 –	Mapa Aerogamaespectrométrico Ud	128
Figura 4.38 –	Mapa Aerogamaespectrométrico Kdn (PI derivado MD10).....	133
Figura 4.39 –	Mapa Aerogamaespectrométrico FatFn (PI derivado MD 11)	134
Figura 4.40 –	Mapa Aeromagnetométrico com filtro Integral Vertical.....	135
Figura 4.41 –	Mapa Aeromagnetométrico com filtro Sinal Analítico.....	136
Figura 4.42 –	Mapa Aeromagnetométrico com filtro Sinal Analítico e Relevo sombreado	137
Figura 4.43 –	Fluxograma do Fator Geofísico.....	141
Figura 4.44 –	Mapa de Fotolineamentos tipo 1, extraídos de imagem orbital LANDSAT TM 5	145
Figura 4.45 –	Mapa de Fotolineamentos tipo 1 e alvos definidos como áreas de dilatância	146
Figura 4.46 –	Mapa de Fotolineamentos tipo 1 11bufn (PI derivado MD12) com geração de corredores de proximidade (<i>buffers</i>).	147
Figura 4.47 –	Mapa alvoest6n (PI derivado MD13). Alvos com corredores de proximidade (<i>buffers</i>)	148
Figura 4.48 –	Fluxograma do Fator Estrutural	149
Figura 4.49 –	Mapa icrfn (PI derivado MD14). Modelo Digital de Terreno da ICR....	151
Figura 4.50 –	Fluxograma do Fator Altimetria.....	152

Figura 5.1 –	Mapa l1bufnb . Análise de proximidade feita sobre os lineamentos tipo 1.....	160
Figura 5.2 –	Mapa alvest6b . Análise de proximidade feita sobre alvos estruturais, reclassificada para o padrão binário	161
Figura 5.3 –	Mapa acp1arb . Resultado da reclassificação do mapa (imagem de satélite) acp1ar para o padrão binário	164
Figura 5.4 –	Mapa acp2arb . Resultado da reclassificação do mapa (imagem de satélite) acp2ar para o padrão binário	165
Figura 5.5 –	Mapa acp3arb . Resultado da reclassificação do mapa (imagem de satélite) acp3ar para o padrão binário	166
Figura 5.6 –	Mapa rgb2arb . Resultado da reclassificação do mapa (imagem de satélite) rgb2ar para o padrão binário	167
Figura 5.7 –	Mapa rgb3arb . Resultado da reclassificação do mapa (imagem de satélite) rgb3ar para o padrão binário	168
Figura 5.8 –	Mapa rgb4arb . Resultado da reclassificação do mapa (imagem de satélite) rgb4ar para o padrão binário	169
Figura 5.9 –	Mapa bacsednb . Resultado da reclassificação do mapa bacsedn para o padrão binário.....	173
Figura 5.10 –	Mapa bacpannb . Resultado da reclassificação do mapa bacpann para o padrão binário	174
Figura 5.11 –	Mapa bbgcp2nb . Resultado da reclassificação do mapa bbgcp2n para o padrão binário	175
Figura 5.12 –	Mapa kdnb . Resultado da reclassificação do mapa kdn para o padrão binário. Ocorrências	177
Figura 5.13 –	Mapa fatfnb . Resultado da reclassificação do mapa fatfn para o padrão binário.....	178

Figura 5.14 –	Mapa icrfnb . Resultado da reclassificação do mapa icrfn para o padrão binário.....	179
Figura 5.15 –	Mapa acpbr . Resultado da combinação dos mapas acp1arb , acp2arb , acp3arb	184
Figura 5.16 –	Mapa rgbb . Resultado da combinação dos mapas rgb3arb , rgb4arb ...	185
Figura 5.17 –	Mapa geoqa . Resultado da combinação dos mapas bacpannb e bacsednb	186
Figura 5.18 –	Mapa geoqb . Resultado da combinação dos mapas geoqa e bbgcp2nb	187
Figura 5.19 –	Mapa geofb1 . Resultado da combinação dos mapas kdnb e fatfnb	189
Figura 5.20 –	Mapa estrb . Resultado da combinação dos mapas l1bufnb e alvest6b .	190
Figura 5.21 –	Fluxograma da integração de dados desenvolvido segundo o Método Pesos de Evidência	195
Figura 5.22 –	Mapa uniq4b . Mapa Previsional resultante da integração pela metodologia Pesos de Evidência	197
Figura 5.23 –	Rede de inferências desenvolvida para a integração de dados de acordo com o Método Lógica Difusa	208
Figura 5.24 –	Mapa fuzzy95 . Mapa Previsional resultante da integração de dados de acordo com a metodologia Lógica Difusa. Evidências combinadas: EMI 2, EMI 3, EMI 4, EMI 5 e EM 14.....	214
Figura 5.25 –	Mapa fuzzy95b . Mapa Previsional resultante da integração de dados de acordo com a metodologia Lógica Difusa. Evidências combinadas: EMI 2, EMI 3, EMI 4, EMI 6 e EM 14.....	215
Figura 5.26 –	Mapa compf . Resultado da combinação por análise comparativa dos mapas fuzzy95 e fuzzy95b	218

Figura 5.27 –	Mapa compfp . Resultado da combinação por análise comparativa dos mapas fuzzy95 e uniq4b	219
Figura 5.28 –	Mapa compfbp . Resultado da combinação por análise comparativa dos mapas fuzzy95b e uniq4b	220
Figura 5.29 –	Mapa mpf . Resultado da combinação dos mapas fuzzy95 e fuzzy95b ..	222
Figura 5.30 –	Mapa mpfa . Resultado da combinação dos mapas fuzzy95b e uniq4b .	223

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 –	Exemplos de transformações de dados em ambiente SIG	35
Tabela 2.2 –	Exemplo de valores de função-membro Lógica Difusa	46
Tabela 2.3 –	Tabela de Contingência para teste de IC.....	55
Tabela 4.1 –	Matriz de autovetores gerada por ACP das bandas 1, 4, 5 e 7.....	89
Tabela 4.2 –	Matriz de autovetores gerada por ACP das bandas 1, 3, 4, 5	89
Tabela 4.3 –	Autovalores das duas primeiras componentes resultantes da Análise de Componentes Principais sobre os dados de BLEG.....	104
Tabela 4.4 –	<i>Factor Loadings</i> mostrando a correlação entre as variáveis e os fatores	105
Tabela 5.1 –	Mapas derivados para integração pelo Método dos Pesos de Evidência	156
Tabela 5.2 –	Pesos de Evidência cumulativos calculados para o mapa de proximidade dos lineamentos l1bufn	157
Tabela 5.3 –	Pesos de Evidência cumulativos calculados para o mapa de proximidade dos alvos estruturais alvoest6	158
Tabela 5.4 –	Pesos de Evidência cumulativos calculados para o mapa de proximidade dos alvos estruturais alvoest6	159
Tabela 5.5 –	Pesos de Evidência não cumulativos calculados para a imagem de satélite acp2ar	159
Tabela 5.6 –	Pesos de Evidência não cumulativos calculados para a imagem de satélite acp3ar	162
Tabela 5.7 –	Pesos de Evidência não cumulativos calculados para a imagem de satélite rgb2ar	162

Tabela 5.8 –	Pesos de Evidência não cumulativos calculados para a imagem de satélite rgb3ar	162
Tabela 5.9 –	Pesos de Evidência não cumulativos calculados para a imagem de satélite rgb4ar	162
Tabela 5.10 –	Pesos de Evidência não cumulativos (referentes a classe 2 dos mapas binários) recalculados para as imagens de satélite do Fator LANDSAT.....	163
Tabela 5.11 –	Pesos de Evidência não cumulativos calculados para o mapa bacsedn	170
Tabela 5.12 –	Pesos de Evidência não cumulativos calculados para o mapa bacpann	171
Tabela 5.13 –	Pesos de Evidência não cumulativos calculados para o mapa babgcp2n	171
Tabela 5.14 –	Pesos de Evidência não cumulativos (referentes à classe 2 dos mapas binários) recalculados para os mapas do Fator Geoquímica.....	171
Tabela 5.15 –	Pesos de Evidência não cumulativos calculados para o mapa kdn	172
Tabela 5.16 –	Pesos de Evidência não cumulativos calculados para o mapa fatfn	176
Tabela 5.17 –	Pesos de Evidência não cumulativos recalculados referentes a classe 2 do mapa binário kdnb	176
Tabela 5.18 –	Pesos de Evidência não cumulativos calculados para o mapa icrfn	180
Tabela 5.19 –	Teste de Independência Condicional para as evidências selecionadas	181
Tabela 5.20 –	Teste de Independência Condicional com correção de Yates para as evidências selecionadas	181
Tabela 5.21 –	Matriz de sobreposição usada para gerar o mapa rgbb	182
Tabela 5.22 –	Matriz de sobreposição usada para gerar o mapa geoqa	183
Tabela 5.23 –	Matriz de sobreposição usada para gerar o mapa geoqb	183

Tabela 5.24 –	Matriz de sobreposição usada para gerar o mapa geofb1	188
Tabela 5.25 –	Matriz de sobreposição usada para gerar o mapa estrb	188
Tabela 5.26 –	Pesos calculados para as evidências binárias selecionadas para a integração pelo método Pesos de Evidência.....	191
Tabela 5.27 –	Teste de Independência Condicional para as evidências selecionadas	191
Tabela 5.28 –	Teste de Independência Condicional com correção de Yates para as evidências selecionadas	192
Tabela 5.29 –	Teste de Independência Condicional para as evidências selecionadas	192
Tabela 5.30 –	Teste de Independência Condicional com correção de Yates para as evidências selecionadas	192
Tabela 5.31 –	Análise de área do mapa uniq4b	196
Tabela 5.32 –	Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a Método Lógica Difusa para o mapa evidência acp1ar	200
Tabela 5.33 –	Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência acp2ar	200
Tabela 5.34 –	Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência acp3ar	201
Tabela 5.35 –	Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência rgb2ar	201
Tabela 5.36 –	Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência rgb3ar	202
Tabela 5.37 –	Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência rgb4ar	202
Tabela 5.38 –	Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência bacpann	203

Tabela 5.39 –	Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência bacedn	203
Tabela 5.40 –	Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência babgcp2n	204
Tabela 5.41 –	Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência kdn	204
Tabela 5.42 –	Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência fatfn	205
Tabela 5.43 –	Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência l1bufn	205
Tabela 5.44 –	Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência alvoest6n	206
Tabela 5.45 -	Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência icrfn	206
Tabela 5.46 –	Programa para integração dos mapas evidência intermediários por meio do Método Lógica Difusa	212
Tabela 5.47 –	Análise de área do mapa fuzzy95	213
Tabela 5.48 –	Análise de área do mapa fuzzy95b	213
Tabela 5.49 –	Matriz de sobreposição usada para gerar o mapa compf	216
Tabela 5.50 –	Matriz de sobreposição usada para gerar o mapa compfp . Legenda das classes com valores iniciais	217
Tabela 5.51 –	Matriz de sobreposição usada para gerar o mapa compfbp . Legenda das classes com valores iniciais	217
Tabela 5.52 –	Matriz de sobreposição criada para gerar o mapa mpf	224
Tabela 5.53 –	Matriz de sobreposição criada para gerar o mapa mpfa	224
Tabela 5.54 –	Análise de área do mapa mpf	225

Tabela 5.55 –	Análise de área do mapa mpfa	225
Tabela 5.56 –	Tabela relacionando as ocorrências minerais conhecidas na ICR com as classes dos mapas previsionais finais.....	227
Tabela 5.57 –	Tabela mostrando os resultados dos cálculos de correlação entre os mapas previsionais finais.....	228
Tabela 5.58 –	Tabela mostrando os resultados dos cálculos de correlação entre os mapas previsionais integrados finais	228

Lista de Abreviaturas e Simbolos

SIG – Sistemas de Informações Geográficas

ICR – Ilha Cristalina de Rivera

ESG – Estrutura San Gregorio

SCR – Sistema de Cisalhamento Rivera

BLEG – Análise de ouro por processo de lixiviação em pilha. A amostra é colocada em solução com 0.5% NaCN por 24 hs. O ouro é analisado por ICP/MS.

PI – Plano de Informação

W^+ - Peso positivo de evidência no método Pesos de Evidência

W^- -Peso negativo de evidência no método Pesos de Evidência

LS – Razão Suficiência no método Pesos de Evidência

LN – Razão Necessidade no método Pesos de Evidência

χ^2 – qui quadrado

ACP – Análise de Componentes Principais

ND – Número Digital

UC – Mapa *unique conditions*

MPF – Mapa Previsional Final

RESUMO

Guias para exploração mineral são normalmente baseados em modelos conceituais de depósitos. Esses guias são, normalmente, baseados na experiência dos geólogos, em dados descritivos e em dados genéticos. Modelamentos numéricos, probabilísticos e não probabilísticos, para estimar a ocorrência de depósitos minerais é um novo procedimento que vem a cada dia aumentando sua utilização e aceitação pela comunidade geológica.

Essa tese utiliza recentes metodologias para a geração de mapas de favorabilidade mineral. A denominada Ilha Cristalina de Rivera, uma janela erosional da Bacia do Paraná, situada na porção norte do Uruguai, foi escolhida como estudo de caso para a aplicação das metodologias.

A construção dos mapas de favorabilidade mineral foi feita com base nos seguintes tipos de dados, informações e resultados de prospecção: 1) imagens orbitais; 2) prospecção geoquímica; 3) prospecção aerogeofísica; 4) mapeamento geo-estrutural e 5) altimetria. Essas informações foram selecionadas e processadas com base em um modelo de depósito mineral (modelo conceitual), desenvolvido com base na Mina de Ouro San Gregorio. O modelo conceitual (modelo San Gregorio), incluiu características descritivas e genéticas da Mina San Gregorio, a qual abrange os elementos característicos significativos das demais ocorrências minerais conhecidas na Ilha Cristalina de Rivera. A geração dos mapas de favorabilidade mineral envolveu a construção de um banco de dados, o processamento dos dados, e a integração dos dados.

As etapas de construção e processamento dos dados, compreenderam a coleta, a seleção e o tratamento dos dados de maneira a constituírem os denominados Planos de Informação. Esses Planos de Informação foram gerados e processados organizadamente em agrupamentos, de modo a constituírem os Fatores de Integração para o mapeamento de favorabilidade mineral na Ilha Cristalina de Rivera.

Os dados foram integrados por meio da utilização de duas diferentes metodologias: 1) Pesos de Evidência (dirigida pelos dados) e 2) Lógica Difusa (dirigida pelo conhecimento).

Os mapas de favorabilidade mineral resultantes da implementação das duas metodologias de integração foram primeiramente analisados e interpretados de maneira individual. Após foi feita uma análise comparativa entre os resultados. As duas metodologias

obtiveram sucesso em identificar, como áreas de alta favorabilidade, as áreas mineralizadas conhecidas, além de outras áreas ainda não trabalhadas. Os mapas de favorabilidade mineral resultantes das duas metodologias mostraram-se coincidentes em relação as áreas de mais alta favorabilidade. A metodologia Pesos de Evidência apresentou o mapa de favorabilidade mineral mais conservador em termos de extensão areal, porém mais otimista em termos de valores de favorabilidade em comparação aos mapas de favorabilidade mineral resultantes da implementação da metodologia Lógica Difusa. Novos alvos para exploração mineral foram identificados e deverão ser objeto de investigação em detalhe.

ABSTRACT

Guidelines for mineral exploration are normally based on models conceptualized for a certain type of deposit been investigated. These guidelines are normally based on geologists experience in a certain kind of mineralization, descriptive and genetical data, and expertise judgement. A numerical probabilistic and not probabilistic approach to predict the occurrence of a certain type of deposit at a certain place is a new procedure which started to gain acceptance among the exploration community.

This thesis uses recent methodologies based on Geographical Information Systems (GIS) to generate mineral favorability maps for gold exploration. A case study at Rivera Crystalline Island, Paraná's basin erosion, situated in northern Uruguay illustrate the method.

To build favorability maps five sources of data and information were used and integrated, including: 1) satellite images; 2) geochemical survey; 3) airborne geophysical survey; 4) geo-structural mapping and 5) altimetry. These informations were combined with a conceptual model based on the characteristics of existent mines in region, mainly the San Gregorio Mine. The conceptual model included descriptive and genetic characteristics of San Gregorio Gold Mine, which is the most significant known gold occurrence in the region.

The construction of favorability maps involved database preparation, data processing and the use of tools to integrate all different informations. During data processing distinct maps were generated and disposed in layers (Information Layers) for further integration. The multiple layers were organised in various groups named Integration Factors; i.e. geophysical factor, geochemical factor, etc. Afterwards, the layers were combined using two distinct methodologies, named: 1) Weights of Evidence (data driven) and 2) Fuzzy Logic (knowledge driven).

Favorability maps resulted from using the two above mentioned techniques. Resultant maps from both methods indicated high favorability at known occurrences validating the approach. The maps also coincides in showing high favorability at various other sites within the Rivera Crystalline Island. Weights of Evidence delineated smaller high favorable areas when compared to Fuzzy Logic based maps. However, Weights of Evidence produced higher probability within the favorable zone when compared to the maps generated using Fuzzy

Logic framework. New exploration targets were identified and should be object of detailed investigation.

Capítulo 1

Introdução

A exploração mineral é uma tarefa que envolve a coleta, a análise e a integração de dados provenientes das mais variadas origens. Geralmente, a exploração mineral é iniciada em pequena escala (grandes áreas) e, após, progride para grande escala (pequenas áreas), com o objetivo de definir alvos para pesquisa mais detalhada de depósitos minerais.

A integração dos dados de exploração envolvia tradicionalmente a investigação das relações de sobreposição espacial de anomalias e era feita manualmente, com a ajuda de mesas de luz. Esse processo dificultava sobremaneira a análise, o manuseio e a atualização dos dados, aumentando a relação custo-benefício.

Durante a década de 80, avanços em *hardware*, particularmente em relação à velocidade de processamento e à capacidade de armazenamento de dados e de visualização gráfica, propiciou o desenvolvimento de programas específicos para o tratamento de dados espaciais. Nesse contexto, o **Geoprocessamento**, que constitui a disciplina que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica, vem apresentando um importante e fundamental crescimento nas áreas de cartografia, transportes, comunicações, energia e planejamento urbano e regional, recursos naturais e problemas ambientais. Um dos produtos mais importantes desse período de rápido desenvolvimento tecnológico, que hoje constitui a principal ferramenta computacional da área de Geoprocessamento, é o **Sistema de Informações Geográficas – SIG**. O **SIG** é um conjunto *hardware + software* projetado para permitir o gerenciamento de dados espaciais e possibilitar a realização de análises complexas, integrando diversos tipos de dados e criando bancos de dados georreferenciados. Esses sistemas possuem funções que permitem armazenar, recuperar, combinar, analisar e exibir dados espaciais e seus atributos em uma base georreferenciada (Burrough, 1986; Star & Estes, 1990; Aronof, 1991). Câmara (1999) ressalta que “*se onde é importante para seu negócio, então, Geoprocessamento é sua*

ferramenta de trabalho. Sempre que o onde aparece dentre as questões e problemas que precisam ser resolvidos por um sistema informatizado, haverá uma oportunidade para considerar a adoção de um SIG”.

O número de empresas e de organizações que utilizam a tecnologia **SIG** é atualmente elevado, principalmente pelos decrescentes custos de *hardware* e de *software*, por alternativas menos custosas de construção de bancos de dados espaciais e pela incorporação, por parte dos **SIGs**, de novas e variadas funções de análise espacial.

Na área das geociências, os **SIG** têm sido aplicados em estudos de recursos minerais, em mapeamentos geotécnicos e na seleção de áreas de depósito de lixo, entre outras aplicações. Os **SIG** comerciais têm possibilitado a execução de estudos geológicos suportados por grandes quantidades de dados espaciais e de seus atributos associados, nos mais variados formatos; isso tem permitido a integração, o manuseio, o processamento e a análise dos dados espacialmente distribuídos. Além disso, os **SIG** têm aumentado sua capacidade de se conectar e de se relacionar com outros tipos de programas, tais como: Sistemas de Processamento de Imagens, Sistemas de Banco de Dados, Sistemas Estatísticos e Geoestatísticos, Sistemas de Análise com janelas interativas, Sistemas CAD e outros. Essa melhoria na conexão com outros sistemas, também, se deve à introdução dos chamados Sistemas de Conversão, que tem aumentado a possibilidade de exportação e importação de dados entre programas que utilizam diferentes formatos de dados.

A integração de dados em um ambiente **SIG** permite atingir os principais objetivos relacionados à atividade de manuseio e de gerenciamento de dados espaciais como: organização, visualização, interrogação, combinação, análise e predição. Em termos de mapeamento de potencial mineral, os **SIG** 1) fornecem ferramentas de trabalho para o processo de construção da base de dados nos mais variados formatos; 2) permitem a quantificação e a extração de feições dos dados tratados, que evidenciam a mineralização procurada; 3) permitem a combinação das evidências com o auxílio de modelos matemáticos; e ainda 4) propiciam a visualização e a formulação de interrogações dos resultados (Bonham-Carter, 1990).

Os **SIG** ligados a Sistemas de Processamento de Imagens Digitais habilitam os profissionais a criar sobreposições visuais de conjuntos de dados digitais provenientes de sensores remotos (Harris & Murray, 1990); esse procedimento constitui atualmente um importante processo na integração de dados para pesquisa mineral. De acordo com Crósta

(1996), Serra (1996) Carlson (1997), Valente (1995, 1999) e Crosta & Souza (1999), o aprimoramento das resoluções espacial, espectral, e radiométrica dos sistemas sensores orbitais e aeroportados, aliado ao desenvolvimento de técnicas de processamento e de classificação de imagens digitais, têm possibilitado a extração de um maior número de informações a partir de imagens provenientes desses sensores.

Uma imensa quantidade de métodos matemáticos foi desenvolvida nos últimos vinte anos e aplicada diretamente na predição de ocorrências minerais (Singer & Kouda, 1988; Agterberg, 1989; Bonham-Carter, 1988; Bonham-Carter *et al.*, 1989; Agterberg & Bonham-Carter, 1990; An *et al.*, 1991; Harris & Pan, 1991; Bonham-Carter, 1991; Agterberg, 1992; Pan, 1993; Bonham-Carter, 1994a; Pan, 1996; Singer & Kouda, 1996; Agterberg & Bonham-Carter, 1999; Harris & Pan, 1999). Esses métodos matemáticos podem ser aplicados, com graus diferentes de facilidade, em um ambiente **SIG**.

O geólogo de exploração tem atualmente à sua disposição todo um suporte fornecido pelo Geoprocessamento e pela tecnologia **SIG** para atingir seu objetivo básico: a obtenção de padrões (variáveis correlacionadas à ocorrências minerais segundo modelos de exploração pré-estabelecidos) de dados georreferenciados na forma de mapas e/ou de tabelas, ponderados por índices de favorabilidade, que permitam a definição de áreas de potencial mineral e que possibilitem a tomada de decisões para a continuidade do programa de exploração.

1.1 Localização, acessos e aspectos fisiográficos

A área de trabalho escolhida para esse estudo é conhecida por Ilha Cristalina de Rivera (**ICR**) e localiza-se no Departamento de Rivera (República Oriental do Uruguai). A área tem, como limites extremos, as coordenadas Gauss-Uruguai 513266 (55° 39' 37" W) a 619221 (54° 32' 31" W) de longitude e 6527977 (31° 24' 00" S) a 6470579 (31° 55' 00" S) de latitude, perfazendo 2610.79 Km² (Fig. 1.1).

O acesso à área, a partir da capital Montevideo, é feito pela **Ruta Nacional Nº 5**, percorrendo-se aproximadamente 445 Km no sentido Norte, até o entroncamento com a **Ruta Nº 29**. Nessa **Ruta Nº 29**, percorre-se mais 25 Km até a cidade de Minas de Corrales e, a partir daí, segue-se por uma estrada secundária, não pavimentada, na direção sul por mais 6 Km, chegando-se à Mina San Gregorio, já dentro da área de pesquisa.

O clima é classificado como mesotérmico brando do tipo temperado (Koppen, 1977) e é caracterizado por quatro estações bem definidas. Os verões são quentes com chuvas esparsas e torrenciais, enquanto os invernos são frios, com chuvas fracas e constantes com geadas e ventos fortes. A temperatura média dos meses mais quentes é de 23°C, enquanto a dos meses mais frios é de 12°C. A precipitação pluviométrica anual alcança os 1500 milímetros.

De acordo com Daroczi *et al.* (1987), a fisiografia da região, resultado da constituição litológica, da evolução geológica e da ação intempérica é caracterizada principalmente pela redução da altura das formas de relevo originais que atualmente dão lugar a formas geomorfológicas relativamente arredondadas. A distribuição geométrica das estruturas componentes do Sistema de Cisalhamento Rivera (Quadros *et al.*, 1995 e Quadros, 1995) na direção preferencial E/SE-W/NW, balizou as feições geomorfológicas, tornando comum a ocorrência de cerros alinhados e alongados nessa direção.

1.2 Objetivos

A principal meta dessa Tese de Doutorado é a definição do potencial mineral aurífero da Ilha Cristalina de Rivera (Uruguai), assinalado por meio de mapas de favorabilidade mineral que permitam apoiar o processo de tomada de decisão a respeito da continuação dos trabalhos de exploração, em escalas de semi-detalle e detalle nas possíveis áreas alvo detectadas. Essa meta leva em consideração o significado econômico da Ilha Cristalina de Rivera e a necessidade de descoberta de novos depósitos minerais por parte da empresa Crystallex International Corporation, financiadora principal desse projeto.

Essa Tese de Doutorado visa, paralelamente, a aplicação, a experimentação e a comparação de recentes metodologias de integração e de tratamento de dados para mapeamento de favorabilidade mineral. Secundariamente, a partir da interpretação dos diferentes tipos de dados integrados, procura-se avançar no conhecimento geológico da área e em especial na definição dos modelos prospectivos.

O processo de integração de dados foi realizado por meio de dois tipos de modelamentos:

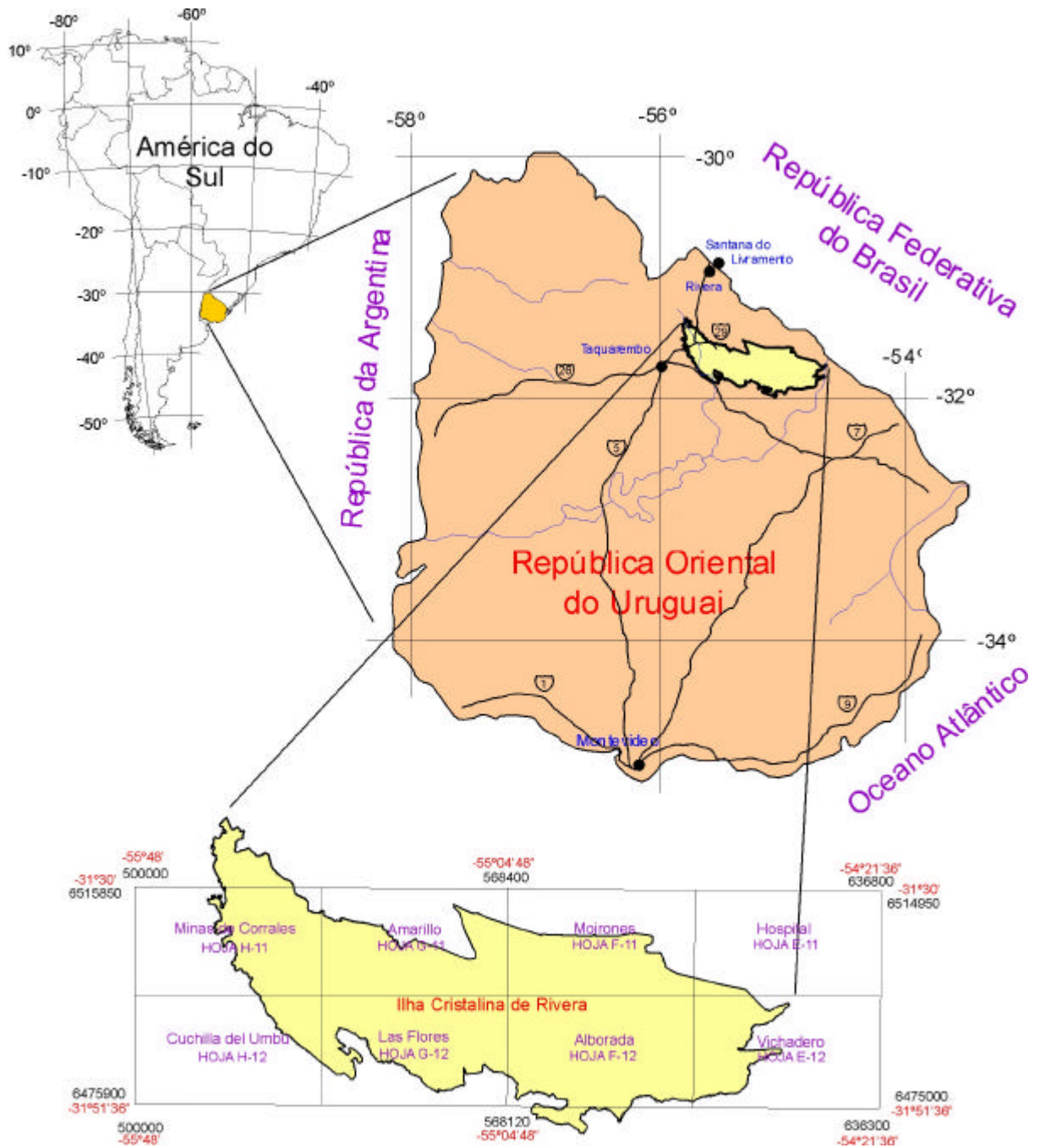


Figura 1.1 – Mapa de Localização.

- 1) Modelamento dirigido pelos dados: metodologia Pesos de Evidência, de caráter objetivo, onde os pesos são calculados estatisticamente por meio de uma estrutura de probabilidades que estabelece correlações entre as ocorrências conhecidas e as evidências;

2) Modelamento dirigido pelo conhecimento: metodologia Lógica Difusa, de caráter subjetivo, onde os pesos são atribuídos de acordo com a experiência e o conhecimento das evidências e da área de pesquisa.

A elaboração dos mapas de favorabilidade mineral foi baseada e condicionada por um modelo de depósito mineral (Modelo San Gregorio). Esse modelo de depósito mineral foi caracterizado basicamente por dados de imagens orbitais, dados geoquímicos, dados aerogeofísicos, dados geológico-estruturais e dados de altimetria.

A presente Tese de Doutorado, apesar de ter objetivos claramente dirigidos à estimar o potencial mineral da área estudada, mostra um caráter multidisciplinar, evidenciado tanto pela natureza e diversidade das informações envolvidas, quanto pelas metodologias, técnicas e processamentos utilizados no decorrer das etapas de trabalho. Com isso, para sua implementação, foi necessário o conhecimento, mesmo que de maneira generalizada, em várias áreas, ou subáreas das geociências, da matemática e da informática, o qual foi adquirido, na medida do possível, por meio de leituras, discussões, cursos e da colaboração de pesquisadores e especialistas nessas áreas.

1.3 Organização do trabalho

A presente tese de Doutorado foi desenvolvida junto ao Laboratório de Pesquisa Mineral e de Planejamento Mineiro (Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, PPGEM-EE-UFRGS), com o apoio das empresas Rea Gold Inc. e, posteriormente, da Crystallex International Corporation. Essa tese de Doutorado está organizada em seis (6) capítulos, de maneira a possibilitar uma melhor e mais clara compreensão dos conceitos, dos procedimentos e das metodologias utilizadas.

O **Capítulo 1** tem por finalidade introduzir os seguintes temas: Geoprocessamento e a tecnologia **SIG** e comentar, sucintamente, sua importância na área das Geociências. Além disso, são estabelecidos os objetivos do estudo e é situada a área de trabalho em relação à localização geográfica e ao contexto geológico.

O **Capítulo 2** apresenta uma discussão de caráter introdutório a respeito do Geoprocessamento e da tecnologia **SIG**, de maneira a delinear a filosofia geral da utilização

da integração de dados para mapeamento de favorabilidade mineral suportada em ambiente SIG.

O **Capítulo 3** discute o modelo de depósito estabelecido para esse estudo e descreve a metodologia proposta para alcançar os objetivos definidos.

O **Capítulo 4** engloba todo o trabalho de construção do banco de dados originais e também o processamento dos planos de informação, o qual resultou na geração das evidências utilizadas nos processos de integração.

O **Capítulo 5** discute e apresenta os procedimentos e os resultados da integração de dados feitos com base nas duas metodologias de integração de dados espaciais propostas. É realizado, ainda, um estudo comparativo entre os resultados de ambas as metodologias de integração de dados.

Finalmente, o **Capítulo 6** discute os resultados da análise de favorabilidade mineral da área estudada e apresenta as conclusões e recomendações referentes ao trabalho realizado.

1.4 Aspectos históricos

A **ICR** é uma região de fundamental importância econômica para o Uruguai, tendo em vista as inúmeras minas e ocorrências auríferas existentes na região. A seguir, descreve-se os principais trabalhos de prospecção e de exploração efetuados na área.

A área foi inicialmente descrita por Marstrander (1915, *apud* MacMillan, 1931), o qual fez referências a respeito de veios auríferos que cortavam rochas dioríticas localizadas próximo à cidade de Minas de Corrales. MacMillan (1931) fez um relato bem mais detalhado, tanto dos trabalhos anteriores, quanto da geologia da área da Mina San Gregorio. MacMillan (1931) salientou que *'la parte sur del Departamento de Rivera se ha beneficiado mineral aurífero en la vencia del pueblo de Minas de Corrales'* e ainda comentou que *'las venas auríferas de Corrales arman en granito que se extienden en dirección este'*. De acordo com esse autor, em 1869, foi formada a primeira empresa de mineração, denominada Companhia de Minas de Oro de Cunapirú, com o objetivo de trabalhar no distrito, principalmente nos veios de ouro aflorantes nas encaixantes graníticas e nos aluviões. Esses trabalhos foram de curta duração e não produziram muita lucratividade na época.

Outras empresas foram formadas, a partir de então, para trabalhar nesses veios de pequena espessura. Somente no ano de 1888, foi constituída a Compañia Goldfields of Uruguay Ltd., com o objetivo de explorar a Mina San Gregorio, maior mina conhecida da região. Essa empresa operou até 1894 e, em 1897, foi vendida à Compañia de los Establecimientos Franceses de Minas de Oro del Uruguay, a qual trabalhou desmontando o minério manualmente e transportando-o por aproximadamente 18 Km por meio de um *aerocarrill* até a planta de beneficiamento localizada nas margens do Arroyo Cunapirú.

Problemas causados por um planejamento mineiro equivocado, desde a grande distância da planta de beneficiamento até a falta de energia para operação da usina e do *aerocarrill* simultaneamente, resultaram na venda da mina, no ano de 1909, para a empresa Uruguay Consolidated Gold Mines Ltd. Essa empresa inaugurou a fase de exploração subterrânea, abriu galerias até uma profundidade de 80m e trabalhou até o ano de 1914, usando moinhos e mesas de amalgamação pelo método de *sand-leaching*, quando se desfez da mina por problemas financeiros. Algum tempo depois, o novo arrendatário causou o desmoronamento das galerias principais da mina, inutilizando-a por décadas.

Os trabalhos na Mina San Gregorio permaneceram suspensos até o ano de 1936, quando a mina foi comprada pela empresa UTE (empresa estatal de transmissões elétricas do Uruguai), que operou até o ano de 1943. Até essa data, foram extraídos cerca de 2200 Kg de ouro na mina. A partir daí, muito pouco minério foi extraído.

Entre os anos de 1973 e 1975, a **ICR** foi prospectada superficialmente pela empresa Noranda Mines. De 1975 até 1983, a região foi explorada por uma empresa chilena, a qual implantou uma pequena planta de beneficiamento em San Gregorio; essa planta foi interdita logo no início de sua operação, por problemas de contaminação do meio ambiente. De 1983 até 1985, a empresa Amax Gold Inc. executou alguns trabalhos prospectivos na região.

Em 1988, a empresa CMP (Companhia Mineira de Participações) passou a realizar trabalhos de prospecção em toda a **ICR**, por meio de mapeamentos geológicos preliminares, prospecção geoquímica, prospecção geofísica e algumas sondagens. Em 1992, a CMP transferiu os direitos de pesquisa para a empresa American Resource Corporation, a qual, por meio de sua subsidiária STEL S.A., concentrou os trabalhos na Mina San Gregorio e iniciou os estudos de viabilidade do empreendimento. Em 1996, essa empresa foi incorporada pela Rea Gold Inc., a qual iniciou, em 1997, os procedimentos de lavra na mina com uma extração aproximada de 200 Kg/mês de ouro (reserva mineral em 1996: 5 milhões de ton., 13100 Kg

Au, teor médio 2.59 ppm). No final de 1998, a empresa Crystallex International Corporation (Minera San Gregorio) comprou os alvarás de pesquisa na **ICR** e a Mina San Gregorio e segue operando a mina e fazendo trabalhos de exploração mineral na **ICR**.

1.5 Geologia regional

Esse item descreve os principais trabalhos de cunho geológico realizados na **ICR** e o atual estado do conhecimento a respeito dos aspectos estratigráficos e tectônicos da área.

1.5.1 Trabalhos anteriores

MacMillan (1931) realizou o primeiro levantamento geológico na Ilha Cristalina de Rivera e dividiu as litologias da área em três unidades, a saber: 1) Embasamento, composto por gnaisses e rochas xistosas; 2) Intrusivas, onde o autor identifica granitos à biotita e à hornblenda, bem como granitos félsicos, ambos na região de *Minas de Corrales*; 3) Série Minas, constituída por metassedimentos de baixo grau metamórfico.

Bossi (1965) propõe a eliminação dos esquemas estratigráficos prévios, baseados apenas em critérios litológicos associados a idades relativas, e introduz uma metodologia baseada em levantamentos geológicos regionais, que buscam a separação de ciclos orogênicos, apoiados em determinações de idades absolutas. Bossi (1966) descreve sucintamente a geologia do Departamento de Rivera e cita a existência de um extenso batólito granítico no extremo ocidental da Ilha Cristalina, que inclui restos de quartzitos à magnetita.

Ferrando & Fernandez (1971) separam as rochas Pré-Devonianas uruguaias em duas grandes unidades: 1) um núcleo cratônico Transamazônico, que aflora na porção sudoeste do país, e 2) uma unidade composta por rochas de idade Brasileira, situada na parte leste do Uruguai. Ferrando & Fernandez (1971) também fazem referência à existência de duas Ilhas Cristalinas ao norte (Cuñapirú – Vichadero – Rivera e Aceguá), caracterizam-nas como essencialmente graníticas e indicam uma estruturação geral de rumo N70°/80°W.

Bossi (1979) indica a existência de várias minas na zona aurífera de Rivera e dividem-nas em duas sub-províncias: Minas de Corrales e Zapucay. Bossi (1983) divide as áreas Pré-

devonianas uruguaias em três grandes unidades: Núcleo Primitivo, Ciclo Orogênico Antigo e Ciclo Orogênico Moderno. A Ilha Cristalina de Rivera estaria situada na primeira unidade.

Preciozzi *et al.* (1985) elaboraram o mapa geológico do Uruguai (escala 1:500.000), onde identificam, cartografam e descrevem superficialmente as rochas da Ilha Cristalina de Rivera; também indicam a ocorrência de uma zona tectônica de orientação aproximada N70°W. Na falta de datações diretas, Preciozzi *et al.* (1985) consideram todas as rochas granitóides da **ICR** como pertencentes ao Proterozóico Médio, por correlação litológica com rochas similares, de idade Transamazônica, que ocorrem mais ao sul (Umpierre & Halpern, 1971).

Soliani Jr. (1986) e Cordani & Soliani Jr. (1990), baseados em datações por isócronas de referência (método Rb-Sr), sugerem uma correspondência entre a Ilha Cristalina de Rivera e o Bloco Taquarembó de Naumann *et al.* (1984). Nesse mesmo contexto, Bossi (1987) apresenta evidências baseadas em dados geológico-estruturais para sugerir a existência de um núcleo cratônico com idade superior a 2000 Ma (Núcleo Primitivo de Bossi, 1983), localizado a norte do lineamento Fray Bentos-Valentines; o bloco cratônico localizado a sul do referido lineamento seria mais jovem. A Ilha Cristalina de Rivera estaria situada nesse núcleo setentrional mais antigo. Monteiro (1990) também indica a correspondência e evolução conjunta da Ilha Cristalina de Rivera e do Bloco Taquarembó (Naumann, 1984).

Arcelus (1990), em seu relatório sobre o potencial aurífero do Uruguai, comenta genericamente a geologia regional e os trabalhos já realizados na região, denominada pelo autor de Província Aurífera de Rivera. Lenzi (1993) em seus trabalhos de exploração regional estuda o condicionamento e potencial econômico de grande parte das minas da zona aurífera de Rivera.

Bossi & Campal (1991, *apud* Bossi & Campal, 1993) indicam a existência de três grandes províncias estruturais para o Uruguai: 1) Cráton do Rio da Prata (situado a oeste do Uruguai), 2) Terreno Nico Perez (situado entre as duas outras províncias) e 3) Cinturão Cuchilla Dionisio (situado a leste). Essas três províncias estariam limitadas por duas zonas de cisalhamento: 1) Lineamento Sarandi Del Piriápolis, que separa o Terreno Nico Perez do Cráton do Rio de La Plata, e 2) a Zona de Cisalhamento Sierra Ballena, que limita o Terreno Nico Perez do Cinturão Cuchilla Dionísio. A Ilha Cristalina de Rivera pertenceria, então, ao Terreno Nico Perez.

Masquelin (1993) discute a petrografia e algumas feições estruturais de gnaisses de fácies granulito encontrados na porção leste da Ilha Cristalina de Rivera e relata que a estrutura desses granulitos é comparável àquelas do Complexo Granulítico Santa Maria Chico (Nardi & Hartmann, 1979; Hartmann & Nardi, 1983; Hartmann, 1987). Quadros (1995), ao trabalhar na porção oeste da Ilha Cristalina de Rivera e estudar a Mina San Gregorio, também sugere a correspondência da **ICR** e, conseqüentemente, do Terreno Nico Perez com o Bloco Taquarembó. Viana (1998) também discorre sobre a geologia e o potencial aurífero da extensão ocidental do Sistema de Cisalhamento Rivera (Quadros *et al.*, 1995; Quadros, 1995).

Hartmann *et al.* (1998) descrevem a evolução geotectônica do sul do Brasil e Uruguai entre 3.3 Ga e 470 Ma com determinação de idades U/Th/Pb em zircão por *Sensitive High-Resolution Ion MicroProbe* – *SHRIMP*. De acordo com Hartmann *et al.* (1998), o Bloco Taquarembó e a Isla de Rivera fariam parte da borda retrabalhada do Cráton de La Plata, com idades entre 2.2 e 2.0 Ga, remanescente do Supercontinente Atlântico (Rogers *et al.*, 1994).

1.5.2 Aspectos estratigráficos

A Ilha Cristalina de Rivera constitui uma janela do embasamento pré-cambriano, que está circundada por sedimentos gonduânicos da Bacia do Paraná e que se expõe no norte do Uruguai. No contexto geotectônico, essa porção do embasamento é relativamente reduzida e perfaz cerca de 110 Km de comprimento e aproximadamente 40 Km de largura máxima. No entanto, apesar de sua pequena dimensão, possui fundamental importância de ordem geotectônica para as possíveis correlações entre as parcelas da borda oriental do Cráton do Rio de La Plata, no Rio Grande do Sul e no Uruguai. (Fig. 1.2).

Segundo Preciozzi *et al.* (1985), que constitui a referência geológica mais recente em termos de esboço geológico regional para a Ilha Cristalina de Rivera (Carta Geológica del Uruguay, escala 1: 500.000), são identificadas as seguintes unidades:

- Granitóides tardi a pós-tectônicos
- Granitos indiferenciados
- Complexo Basal
- Metamorfitos de baixo grau

- Ectinitos Indiferenciados

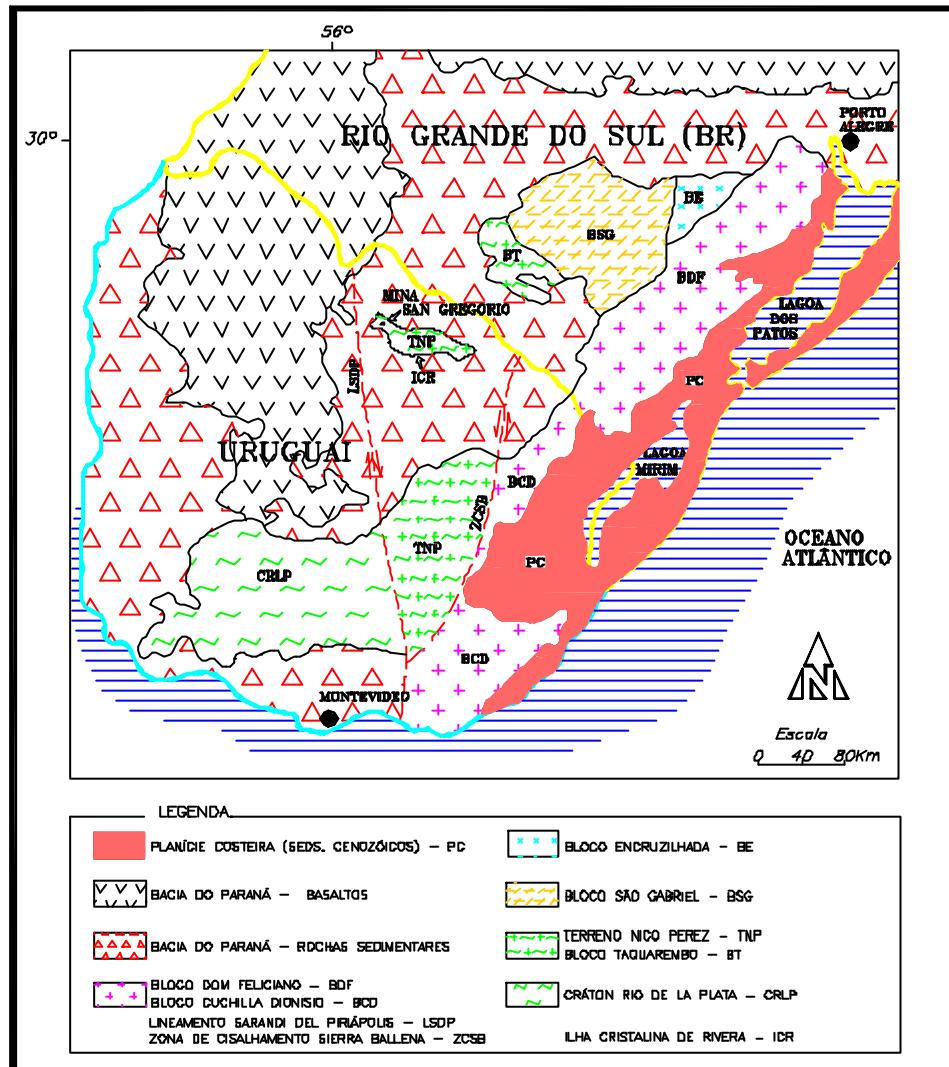


Figura 1.2 – Esboço geológico do Escudo Uruguaio-sul-riograndense e áreas adjacentes. Modificado de Quadros (1995).

Essas unidades, na ausência de datações diretas, foram posicionadas no Proterozóico Médio, por correlação litológica com litologias similares, de idade Transamazônica, que ocorrem mais ao sul (Unpierre & Halpern, 1971).

Soliani Jr. (1986) e Cordani & Soliani Jr. (1990), baseados em seus levantamentos geocronológicos da Ilha Cristalina de Rivera, encontram quatro grupos de idades Rb-Sr em rocha total (três grupos com isócronas de referência). A primeira idade alinha-se segundo uma isócrona de 2.204?65Ma e $R_o = 0,703$, é formada por rochas do Complexo Basal de Preciozzi *et al.* (1985) e é considerada como representando a época do metamorfismo regional

principal; a razão inicial relativamente baixa indicaria uma origem possivelmente ígnea dos protólitos e a participação relevante de componentes mantélicos.

A segunda idade equivale a uma isócrona de 680 ± 22 Ma e $R_o = 0,707$ e representa os Granitóides Indiferenciados, predominantemente sintectônicos, de Preciozzi *et al.* (1985). O terceiro grupo é formado pelos Granitos tardi a pós-tectônicos de Preciozzi *et al.* (1985), que mostram uma isócrona de 574 Ma. e $R_o = 0,707$. Finalmente, um conjunto de rochas subvulcânicas mostra idades concordantes da ordem de 530 Ma.

Soliani Jr. (1986) e Cordani & Soliani Jr. (1990), subsidiados por esses dados isotópicos, indicam a existência de três grandes eventos formadores de rochas: o primeiro deles, do Proterozóico Inferior (Ciclo Transamazônico), foi responsável pela geração dos metamorfitos de médio a alto grau do Complexo Basal (Preciozzi *et al.*, 1985) e os dois restantes, do Proterozóico Superior (Ciclo Brasileiro), produziram os granitóides intrusivos correlacionáveis às fases sintectônica e tardi a pós tectônica do Ciclo Brasileiro, que representam os episódios magmáticos sobre a borda cratônica durante a evolução geotectônica do Cinturão Dom Feliciano (Cinturão Cuchilla Dionisio, no Uruguai). A colocação dos tipos magmáticos subvulcânicos corresponderia ao resfriamento regional, após o encerramento das atividades tectônicas do Cinturão Dom Feliciano.

Por fim, Soliani Jr. (1986) e Cordani & Soliani Jr. (1990), sugerem uma correspondência da Ilha Cristalina de Rivera ao Bloco Taquarembó de Naumann *et al.* (1984). Monteiro (1990), ao estudar a Mina Zapucay e área adjacente, também indica a correspondência e evolução conjunta dessas duas regiões.

Também é importante salientar que Lenzi (1993), em seus trabalhos regionais entre os anos de 1989 e 1993, indicou a existência de rochas submetidas ao fácies granulito na Ilha Cristalina de Rivera, a partir de estudos petrográficos em lâmina delgada; da mesma forma, Preciozzi *et al.* (1985) citam a existência do fácies granulito na Ilha Cristalina de Rivera. A respeito desses litotipos, Masquelin (1993) refere a existência de gnaisses de alto grau metamorfizados no Ciclo Transamazônico. Além disso, Masquelin (1993) separa os gnaisses em dois tipos: gnaisses charno-enderbíticos e pertitos de origem ígnea e gnaisses de origem sedimentar, incluindo rochas anortosíticas, mármore, granada-quartzitos, piroxenitos e prováveis formações ferríferas.

Bossi & Campal (1991, *apud* Bossi & Campal, 1993), baseados em dados litológicos e estruturais, correlacionam a Ilha Cristalina de Rivera à região de Valentines no Uruguai (Fig. 1.2), porção sul do Terreno Nico Perez) e sugerem a denominação de Terreno Nico Perez para esse conjunto. Bossi & Campal (1991, *apud* Bossi & Campal, 1993) definem o Terreno Nico Perez como um bloco que funcionou como antepaís do Cinturão Cuchilla Dionísio e que, da mesma maneira que o Bloco Taquarembó de Naumann *et al.* (1984), sofreu episódios magmáticos decorrentes do cinturão posicionado a leste.

Hartmann *et al.* (1998) acrescentam novas informações ao trabalho de Cordani & Soliani Jr. (1990) ao estabelecerem, a partir de datações U/Th/Pb em zircão por SHRIMP, a existência de uma geração de crosta continental mais antiga que o Complexo Basal de Preciozzi *et al.* (1985), de idade Transamazônica. Essa crosta teria sido formada no Ciclo Jequié, entre 2.45 e 2.6 Ga. Além disso, Hartmann *et al.* (1998) separam o Ciclo Brasileiro em três orogêneses principais: Orogênese Passinho (datação SHRIMP 900 a 860 Ma), Orogênese São Gabriel (idades entre 781 Ma e 700 Ma), Orogênese Dom Feliciano (idades entre 631 Ma e 540 Ma).

1.5.3. Estruturação da Ilha Cristalina de Rivera

Apesar da pequena quantidade de trabalhos de mapeamento geológico executados na **ICR**, as informações obtidas até o momento permitem postular a existência de dois grandes compartimentos estruturais na região: o Bloco oeste e o Bloco Leste. O limite aproximado entre esses blocos seria a região das Minas Zapucay e Zapucay II.

No **Bloco Oeste**, na região de entorno da Mina San Gregorio, onde está a maioria das ocorrências minerais da **ICR**, há grande predominância de granitóides classificados predominantemente como granodioritos, de granulação média a grosseira, em geral heterogranulares, localmente porfiróides. Localmente, esses granitóides apresentam minerais de alteração, principalmente clorita e limonita em fraturas. Os granitóides do Bloco oeste da **ICR** são estruturalmente semelhantes aos granitos não deformados descritos por Frey *et al.* (1976), nos quais predominam as estruturas e texturas da rocha ígnea original.

Os corpos granitóides são cortados por um Sistema de Cisalhamento (Rivera) transcorrente de dimensão regional. Os granitóides foram predominantemente alojados durante pré-transcorrência e desenvolveram desde clivagens de fratura, até uma leve foliação,

dada pelo alongamento de alguns grãos de quartzo e de feldspato nas adjacências das zonas de mais alta deformação.

Deve-se notar que Cordani & Soliani Jr. (1990) indicam uma idade Rb-Sr de 680? 22 Ma para esses granitóides e relacionam-nos a episódios magmáticos reflexos de borda cratônica, sintectônicos ao Ciclo Brasileiro. Porém, de acordo com a postulada evolução geotectônica de Hartmann *et al.* (1998), esses granitóides talvez fossem um pouco mais recentes e poderiam, então, ser posicionados com a Orogênese Dom Feliciano.

Associados aos granitóides, também ocorrem metassedimentos (arenitos, siltitos, calcáreos), em geral separados por falhas com geração de filonitos de pequena possança, por vezes brechados, algumas vezes portadores de raros sulfetos. Esses corpos formam ilhas relativamente preservadas entre as zonas de cisalhamento. De modo semelhante, também ocorrem corpos lenticulares de média espessura (2-10 m), constituídos por bandas centimétricas de magnetita alternadas com bandas quartzosas, de maneira relativamente desordenada. Essas rochas bandadas com quartzo+magnetita mostram-se fortemente deformadas, possuem cristais fitados de quartzo (*ribbon quartz*) alongados paralelamente à estrutura (Spry, 1969), e freqüentemente assumem aspecto gnáissico. Esses litotipos (quartzo+magnetita gnaiss) também ocorrem próximo a Vichadero (bloco leste da ICR) e na área de Valentines, mais a sul (Bossi, 1966 e 1987).

Internamente às zonas de cisalhamento que cortam as rochas granodioríticas, ocorrem granitóides mais diferenciados, classificados predominantemente como sienogranitos protomiloníticos, em geral equigranulares de grão fino a médio. Esses granitos estão freqüentemente mais deformados, por vezes hidrotermalizados; mostram clivagens de fratura como uma feição comum, além de faixas miloníticas de espessura variada. Nas porções menos deformadas, mostram estruturas de fluxo magmático, dadas pelo feldspato potássico e pelos raros minerais máficos; muitas vezes, essas estruturas têm a mesma orientação do fluxo tectônico e das estruturas frágeis principais das zonas de cisalhamento. As porções mais deformadas exibem variável alteração hidrotermal, caracterizada por minerais como sericita, carbonato, clorita, limonita e alguma silicificação.

Também interna às zonas de cisalhamento, ocorrem rochas dioríticas, de granulação fina a média, de coloração cinza a verde escuro e de textura tipo sal/pimenta (grãos claros de plagioclásio e escuros de minerais ferromagnesianos). Essas rochas exibem vários graus de

milonitização e, principalmente, hidrotermalização (carbonatação, sericitização, cloritização, silicificação, sulfetação e oxidação).

A associação litológica contida nas zonas de cisalhamento é a associação característica da Mina San Gregorio. O sienogranito (minério B) forma a lapa da Estrutura San Gregorio e mostra, nas zonas de maior deformação, faixas miloníticas com marcante alteração hidrotermal. O diorito (minério A), por outro lado, constitui a capa da mesma estrutura e forma, nas zonas mais deformadas, faixas miloníticas também muito hidrotermalizadas. Essas duas litologias são, na área da mina, separadas por um K-feldspato granito de granulação grossa, deformado em caráter mais frágil, e por um veio de quartzo, que marca a falha principal (denominada F1) da zona de cisalhamento. As litologias internas da Estrutura San Gregorio (sienogranito e diorito) mostram feições de *magma mingling* e são admitidas como sin-transcorrentes.

Ao sul-sudoeste da Mina San Gregorio, foi detectada, a partir da extração de fotolinesamentos em imagens de satélite (Fig. 4.44) e dos mapas aerogeofísicos (Cap. 4), a existência de uma estrutura elíptica. Essa estrutura está sendo interpretada como um corpo intrusivo de composição básica a partir dos mapas temáticos de imagem de satélite (Figs. 4.8 e 4.9). Não foram observados importantes afloramentos em campo, pois se trata de uma área de relevo muito arrasado. Essa intrusão desenvolve um padrão sin-deformacional de lineamentos em relação à zona de cisalhamento que contém a Mina San Gregorio e pode estar relacionada ao processo de formação das Minas San Gregorio, Santa Tereza e San Antônio. O padrão sindeformacional é indicado pelos lineamentos e curvilineamentos tipo 1, posicionados em um padrão circular a elíptico de acordo com Strieder & Amaro (1997).

Na porção leste do bloco oeste, ocorrem granitos alcalinos que exibem vários graus de deformação, mas predominantemente de caráter frágil, e que apresentam uma possível estrutura elíptica de grandes dimensões (aproximadamente 20Km de diâmetro). Essa estrutura foi evidenciada nos mapas aerogeofísicos (Cap. 4). A existência dessa importante estrutura, muito semelhante à estrutura de menor dimensão existente próximo à Mina San Gregorio, ainda precisa ser melhor avaliada.

O bloco leste dispõe de menos informações de cunho geológico, visto que essa região começou recentemente a ser estudada em mais detalhe. Essa porção da **ICR** apresenta maior variedade litológica e é predominantemente constituída por rochas do Complexo Basal de idade Transamazônica (idade Rb-Sr 2.2Ga, Cordani & Soliani Jr., 1990). As rochas que

ocorrem nesse Bloco são granito-gnaisses, milonito-granitos, quartzo+magnetita gnaisses e raros metassedimentos, que mostram feições metamórficas relacionadas aos fácies anfíbolito e granulito. Essas rochas são cortadas e intrudidas por diques e por pequenos *stocks* básicos, intermediários e ácidos (dioritos, monzonitos, granitos, riolitos, dacitos), possivelmente relacionadas ao Ciclo Brasileiro.

O bloco leste também é marcado por zonas de cisalhamento transcorrente dextróginas (Sistema de Cisalhamento Rivera); na verdade, o mapa de lineamentos **tipo 1** (Fig. 4.44) mostra uma continuidade das zonas de cisalhamento do setor oeste para o setor leste. Uma das diferenças entre os dois blocos estruturais definidos nessa Tese de Doutorado está no caráter geométrico das zonas de cisalhamento: no bloco oeste, as zonas de cisalhamento (vistas a partir dos lineamentos estruturais) são fortemente ramificadas, desenvolvem inflexões transtrativas no sentido horário que estão associadas com as principais ocorrências de veios de quartzo com Au, enquanto as zonas de cisalhamento do bloco leste são mais retilíneas, com pequeno número de inflexões transtrativas.

As zonas de cisalhamento do bloco leste mostram feições estruturais frágil-dúcteis, principalmente porque impressas sobre rochas gnáissicas. No entanto, as zonas de cisalhamento ainda mostram ramificações sintéticas (transtrativas); porém, pode-se verificar a formação de dobras *en échelon* balizadas por zonas de cisalhamento paralelas. Essa articulação de estruturas é o grande diferencial do comportamento estrutural entre os dois blocos definidos. A alteração hidrotermal e a formação de veios está, então, relacionada com estruturas transtrativas e com a charneira de dobras *en échelon*. Os minerais de alteração hidrotermal são basicamente clorita, sericita, óxidos e Au.

1.5.4 Arcabouço tectônico da Ilha Cristalina de Rivera

Bossi (1987), ao descrever a área *Cunapirú-Vichadero* (Ilha Cristalina de Rivera), observa que a principal fase tectônica da área gerou linhas estruturais de direção NW e que não houve uma segunda fase tectônica sobreposta. Bossi & Campal (1991, *apud* Bossi & Campal, 1993), ao caracterizarem o Terreno Nico Perez, indicam o deslocamento para sul do bloco triangular delimitado pelo lineamento *Sarandí del Yi-Piriápolis* (direção NNW e sentido de movimento dextrógiro) e pela faixa milonítica *Isla Patrulla* (direção NE e sentido de movimento levógiro) (Fig. 1.3). Bossi & Campal (1991, *apud* Bossi & Campal, 1993)

situam essa movimentação tectônica numa idade aproximada de 530 Ma, a partir de uma datação Rb-Sr em rocha total em um granito foliado, interno ao lineamento *Sarandi del Yipiriápolis*.

Masquelin (1993, 1998) refere a importante orientação E-W das estruturas deformacionais na **ICR** e no restante da área cratônica do Uruguai. Quadros *et al.* (1995) e Quadros (1995), ao estudar a Mina San Gregorio e uma importante extensão do bloco oeste, observam um conjunto de estruturas com orientação azimutal principal WNW, a qual sofre inflexões para azimutes NW. Os autores referem dois outros conjuntos de estruturas, de caráter secundário, cujas orientações estão dispostas nos azimutes 330-360 (NNW) e 010-040 (NE), respectivamente. A análise estrutural dessas zonas de falha indicou um caráter transcorrente dextral para as estruturas WNW (principal) e NNW (secundária) e um caráter também transcorrente, porém sinistral, para a estrutura NE (secundária) (Quadros *et al.*, 1995; Quadros, 1995). A partir da análise estrutural, observou-se a ocorrência de pelo menos duas fases tectônicas: 1) a primeira (Fase D1) produziu as estruturas WNW, é responsável pela formação das áreas de transtração e foi nitidamente predominante em toda a Ilha Cristalina de Rivera; 2) a segunda (Fase D2) produziu as estruturas NNW e NE, as quais deslocaram e rotacionaram as estruturas da Fase D1. As zonas de cisalhamento formadas na fase D1 atravessam toda a **ICR** e formam o denominado Sistema de Cisalhamento Rivera (Quadros *et al.*, 1995; Quadros, 1995).

Regional e localmente, as zonas de cisalhamento foram formadas durante a fase D1 e mostram um padrão anastomosado cuja direção geral é WNW; em detalhe, observa-se que a direção principal é E-W e que essa direção está infletida para NW-SE, constituindo inflexões subsidiárias transtrativas. Em nível local, as inflexões produziram estruturas do tipo *bend* dilatacionais e *duplexing at bends* (Woodcock & Fischer, 1986), as quais caracterizam a denominada **Estrutura San Gregorio**. A Estrutura San Gregorio está constituída por falhas e por faixas miloníticas do tipo **P** (direção principal E-W) e **R** (inflexão subsidiária NW), que formam o sítio extensional onde se instalou o depósito aurífero da Mina San Gregorio.

O bloco oeste da **ICR** parece, então, ter sido estruturado em níveis crustais mais rasos, onde a deformação tem caráter frágil-dúctil e as pressões e temperaturas equivalentes ao fácies xistos-verde predominam. Nessa região, então, as zonas de cisalhamento formam dilatâncias relacionadas às inflexões, de modo que o fluxo de fluidos seja preferencialmente canalizado nessas estruturas e, assim, sejam iniciados os processos de alteração hidrotermal e de mineralização. Os principais minerais de alteração ocorrentes e estáveis nesse ambiente de

menor temperatura da **ICR** são: quartzo, epidoto, clorita, carbonato, sericita, óxidos, sulfetos e Au.

Em direção a leste, os lineamentos estruturais (zonas de cisalhamento; Fig. 4.44) tendem a coalescer a partir da região das minas Zapucay e Zapucay II (região central da **ICR**) e a manifestar um padrão geométrico mais retilíneo. Porém, mesmo no Bloco Leste da **ICR**, pode-se observar estruturas do tipo *splays* e *duplexes*, que geram zonas de dilatância favoráveis à ocorrência de depósitos minerais; essas estruturas, no entanto, têm menor largura e comprimento. Nesse bloco leste, também foi observada a ocorrência de estruturas relacionadas a um padrão do tipo *wrench tectonics* (Wilcox *et al.*, 1973), onde há a geração simultânea, ou quase simultânea, de dobras *en échelon* e de falhas por deformação frágil-dúctil em rochas anisótropas. As dobras *en échelon* foram instaladas sobre rochas gnáissicas e foram produzidas por mecanismo de deslizamento flexural, o que propiciou a abertura de espaços dilatacionais nas charneiras de maneira a permitir o alojamento de veios de quartzo. Assim, a variedade de estruturas dilatacionais no bloco leste da **ICR** (charneira e plano axial de dobras e ramificações de fraturas, por exemplo) é maior, porém, o fluxo de fluidos hidrotermais e mineralizantes pode ter sido mais disperso.

O padrão estrutural (*wrench tectonics*), as petrotramas e estruturas deformacionais (foliação milonítica, lineações de alongamento, etc.) e a composição litológica (gnaiesses) no bloco leste da **ICR** mostram que os mecanismos de deformação têm caráter mais dúctil do que no Bloco oeste. Para o bloco leste, postula-se, então, um nível crustal mais profundo, onde as temperaturas e pressões equivalem aos fácies anfíbolito e, em algumas porções localizadas, fácies granulito. Esses elementos estão em acordo com as referências de alguns autores que avaliaram as condições regionais de metamorfismo na **ICR** (Masquelin, 1993, p.ex.). Além disso, é importante notar que em níveis crustais mais profundos, a ocorrência de depósitos minerais é naturalmente condicionada a menores espaços dilatacionais, que forçam a geração de depósitos de menor volume. Apesar disso, importantes depósitos nesse tipo de ambiente deformacional são conhecidos, como por exemplo o distrito de Golden Mile, Kalgoorlie, Western Australia (Mueller & Harris, 1987; Boulter *et al.*, 1987).

A compartimentação da **ICR** em dois grandes setores estruturais pode, como hipótese, estar relacionada ao soerguimento da região, erosão dos sedimentos da Bacia do Paraná e exposição do seu embasamento. O mapa aeromagnetométrico com filtro integral vertical (Fig. 4.40) mostra uma passagem gradual do segmento oeste para o segmento leste, o que é corroborado pela estruturação das zonas de cisalhamento (Fig. 4.44). Dessa forma, é plausível

supor que a **ICR** tenha sido exposta por soerguimento e erosão diferencial durante o Cenozóico, apesar que trabalhos de mapeamento geológico-estrutural de detalhe são necessários para uma definitiva avaliação dessa hipótese. Durante esse processo, o segmento leste sofreu um maior soerguimento, o que permitiu a exposição das estruturas e das litologias geradas em maior profundidade crustal. O bloco oeste, então, preservou estruturas e litologias de níveis crustais mais rasos.

1.6 Geologia e mineralização da Mina San Gregorio

A Mina San Gregorio (Fig. 1.3) encontra-se encaixada em uma estrutura transtrativa do tipo *duplexing at bend*, denominada Estrutura San Gregorio (**ESG**) por Quadros *et al.* (1995) e Quadros (1995). Essa estrutura ocorre sobre granodioritos localmente porfiríticos e pouco afetados pela deformação; não foram encontradas evidências de metamorfismo regional nas rochas hospedeiras da Estrutura San Gregorio.

Localmente, próximo às zonas de cisalhamento, os granodioritos registram aumento de intensidade de deformação, com modificações estruturais e texturais, como a ocorrência de clivagens de fratura e a orientação secundária (alongamento) de grãos de quartzo e de feldspatos. No interior dessa zona de cisalhamento, ocorrem dois conjuntos de faixas miloníticas paralelas, onde os processos de deformação e metamorfismo dinâmico foram mais intensos (principalmente durante a Fase D1); um conjunto ocorre sobre o diorito e gera um diorito protomilonítico hidrotermalizado, enquanto o outro ocorre sobre o sienogranito e forma um sienogranito protomilonítico hidrotermalizado; o K-feldspato granito que ocorre junto às demais litologias não se mostra mineralizado.

Quadros (1995) sugere a possibilidade de que o K-feldspato granito tenha se formado posteriormente às demais rochas da ESG, por meio de uma injeção magmática tardia e enriquecida em voláteis, aproveitando reaberturas da zona de cisalhamento produzidas nos pulsos finais da deformação multifásica D1.

A respeito das rochas encaixantes do minério (diorito e sienogranito milonitizados e hidrotermalizados), Quadros (1995) observa a existência de feições indicativas de processo tipo *magma mingling* (interpenetração de magmas sem *mixing* pervasivo), o qual permitiu a coexistência de magmas de diferentes composições em uma situação e não favoreceu a formação de rochas híbridas. Quadros (1995) também indica que “*um alojamento passivo,*

parece ter sido predominante no interior da Estrutura San Gregorio, onde a orientação e deflexão do fluxo magmático (Paterson *et. al.*, 1989), ou da fábrica *pre-full crystallization* (Hutton, 1988) das rochas aflorantes, aproximadamente paralela e sobreposta pelo fluxo tectônico (Paterson *et. al.* 1989), ou pela fábrica *crystal plastic strain* (Hutton, 1988; aqui, diferentemente do autor, considerada como formada também por esforços tectônicos), parecem operar em um processo contínuo durante a formação das foliações. Além disso, a concordância geral da forma e da estrutura geométrica alongadas das rochas graníticas e dioríticas alojadas na zona de cisalhamento reativada, com o eixo maior das intrusões paralelo à zona de cisalhamento, constitui mais uma evidência para o modelo de alojamento passivo e sin-transcorrente dessas litologias, dentro da estrutura do tipo *bend*, que caracterizou a Estrutura San Gregorio”. Análises litoquímicas sugerem cogeneticidade para todo o conjunto de rochas que ocorre na ESG e as suas encaixantes; essas rochas mostram padrões cálcio-alcálico e metaluminoso e indicam um ambiente relacionado à orogênese de margem continental ativa.

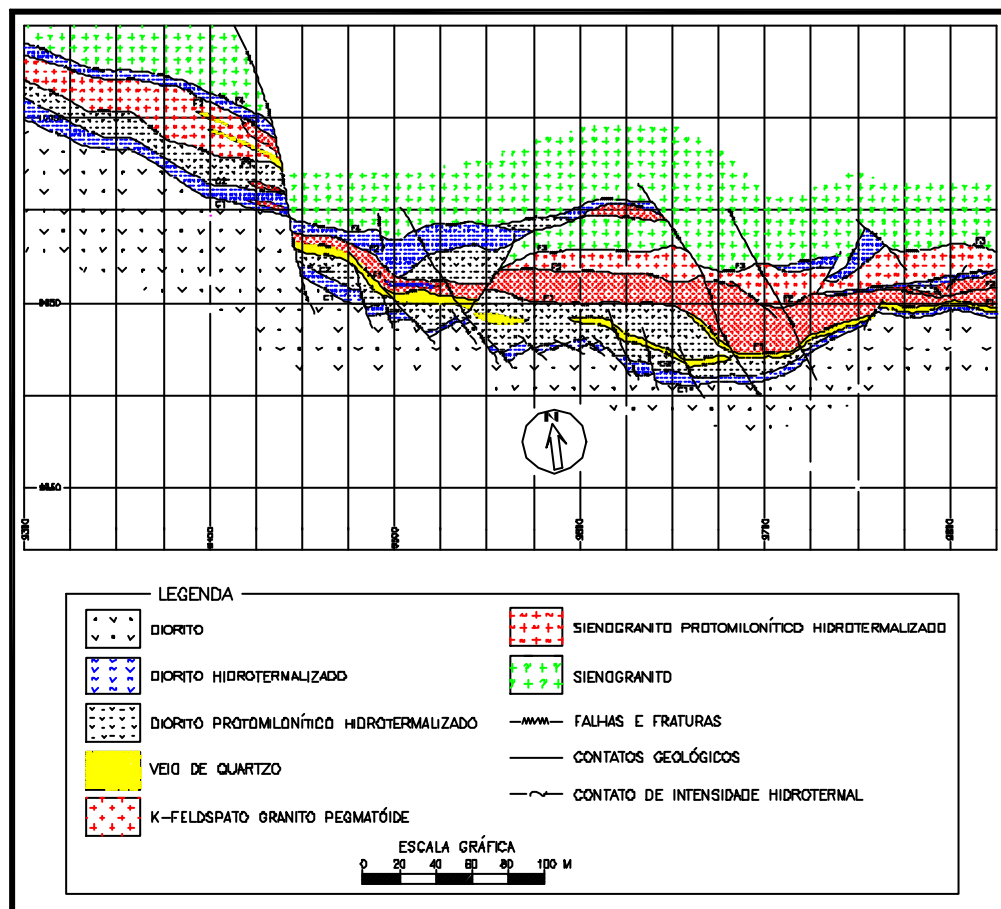


Figura 1.3 – Mapa Geológico da Mina San Gregorio. Modificado de Quadros (1995).

Durante e após o alojamento das litologias sin-transcorrentes, a zona de cisalhamento concentrou um processo deformacional, caracterizado por sucessivos pulsos de desagregação mecânica, que foram seguidos de recuperação, recristalização e neomineralização e que estiveram condicionados a um processo, de um modo geral, retrogressivo (Barker, 1990) em um ambiente frágil-dúctil a frágil. A diminuição da temperatura logo após a cristalização da mineralogia primária das rochas e após um período deformacional caracterizado por baixa a média razão fluido-rocha, novos pulsos deformacionais aumentaram a permeabilidade das rochas e facilitaram a percolação intensa de fluidos, focalizados na zona de cisalhamento e principalmente na Estrutura San Gregorio. Um período posterior pode ser caracterizado por alta razão fluido-rocha, onde as reações entre as soluções e as encaixantes produziram mineralogias predominantemente hidrotermais, formadas por processos de recristalização e neomineralização sob a influência dominante de soluções independente de suas origens.

As paragêneses hidrotermais foram formadas durante os processos deformacionais, o que resultou na sobreposição de texturas miloníticas e cataclásticas. As condições de pressão e temperatura impostas pela deformação e pelo metamorfismo dinâmico geraram paragêneses hidrotermais equivalentes ao fácies metamórfico xistos verde em um ambiente caracterizado por pressões e temperaturas abaixo de 2Kb e 350°C, respectivamente (Quadros, 1995).

A Mina San Gregorio foi classificada por Quadros (1995) como um depósito hidrotermal, epigenético, meso a epitermal (epizonal), segundo os conceitos de Lindgren (1933) e como um depósito oxidado de baixa temperatura (segundo classificação de Mickuki & Ridley, 1993). Quadros (1995) sugere que a formação do depósito resultou da participação de fluidos magmáticos e metamórficos profundos, canalizados no Sistema de Cisalhamento Rivera (**SCR**), em um modelo semelhante ao *Continuum Crustal* de Groves *et al.* (1992), estendido para áreas mais jovens por Kerrich (1993). Esse modelo parecer ser corroborado pelos resultados obtidos a partir do processamento dos dados de aeromagnetometria (ver discussão no item anterior).

A mineralização na Mina San Gregorio foi relacionada e condicionada por altas razões fluido-rocha, com descarga focalizada de fluidos (zona de dilatância do **SCR**), de modo que o volume de fluidos excedeu a capacidade de tamponamento das rochas. Essa condição favoreceu a ocorrência de reações entre os fluidos e as rochas encaixantes e causou, por consequência, modificações recíprocas nas rochas e nos fluidos. Como decorrência desses processos, instalou-se um evento multifásico hidrotermal composto por seis fases hidrotermais, três delas mineralizadas em Au.

A tendência evolutiva das interações fluido-encaixantes ocorreu no sentido da formação de paragêneses mais simples e homogêneas no final do processo. O zoneamento hidrotermal com a formação de halos, constituiu-se na principal evidência da tendência das rochas encaixantes em direção ao equilíbrio químico com o fluido. O hidrotermalismo e a mineralização estiveram associados às reativações da zona de cisalhamento em um período retrogressivo sin a pós-deformacional (Quadros, 1995). A intensidade do hidrotermalismo e da deformação atuou no sentido do aumento em direção ao interior da zona de cisalhamento. As primeiras fases, apesar de menos intensas, estabeleceram-se sobre uma maior área de cobertura, enquanto as fases posteriores cobriram áreas menores, mais no interior da zona de cisalhamento. Em virtude das diferenças composicionais e reológicas das encaixantes (diorito e sienogranito), os processos deformacionais e de alteração hidrotermal atuaram de maneira diversa. Com isso, as paragêneses iniciais, pervasivas, estão dispostas concordantemente às texturas protomiloníticas e estabeleceram-se mais intensamente nos dioritos, composicionalmente mais reativos; as paragêneses finais, por outro lado, estão mais freqüentemente em vênulas e são dispostas principalmente sobre os granitos, reologicamente mais frágeis. Essas fases venulares tiveram sua formação relacionada aos pulsos deformacionais da fase D1 e aos processos de fraturamento hidráulico, em resposta à diminuição de porosidade das encaixantes causada pela instalação da mineralogia hidrotermal e conseqüente aumento da pressão de fluidos.

Quadros (1995) e Quadros & Koppe (1996 e 1997) estabeleceram seis fases hidrotermais em San Gregorio, que são referidas em ordem cronológica:

- 1) Fase 1 – Clorita-Carbonato;
- 2) Fase 2 – Feldspato Potássico-Quartzo;
- 3) Fase 3 - Carbonato-Mica branca-Sulfeto-Ouro;
- 4) Fase 4 – Quartzo-Carbonato-Sulfeto-Ouro;
- 5) Fase 5 – Carbonato venular;
- 6) Fase 6 – Óxido-Ouro.

De acordo com Quadros (1995) e Quadros & Koppe (1996), ao se observar o processo hidrotermal como um todo, foi verificada a importância dos processos de cloritização, carbonatação, sericitização, sulfetação, silicificação e oxidação. O hidrotermalismo atuou no

sentido do aumento na atividade de CO_2 , S e O_2 . O pH manteve-se próximo a valores neutros durante todo o processo evolutivo. O Eh teve um aumento considerável, evidenciado pelo aumento na atividade do O_2 , a partir das interações fluido-rocha, o que culminou no processo de oxidação no final do hidrotermalismo. O ouro foi possivelmente transportado por complexos bissulfídicos do tipo $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ e foi precipitado: 1) por sulfetação das encaixantes na primeira fase de mineralização e 2) por mecanismos do tipo *boiling* na segunda fase de mineralização. A terceira fase de mineralização constituiu-se provavelmente em um processo de remobilização, onde complexos polissulfídicos do tipo AuS_2 podem ter sido importantes.

Capítulo 2

Geoprocessamento na exploração mineral

A utilização de Sistemas de Informação Geográfica (**SIG**) é o suporte para tomadas de decisão em projetos com base em dados espacialmente referenciados. Na exploração mineral, o uso do **SIG** pode ser de fundamental importância no processo de utilização dos dados, pois pode produzir resultados de extrema utilidade, por exemplo: mapas de favorabilidade mineral. A correta interpretação e análise desses dados permite a tomada de decisão a respeito da continuação dos trabalhos prospectivos e, em caso positivo, da seleção de áreas prioritárias para futura exploração. Um trabalho de mapeamento de potencial mineral pode valorizar sobremaneira uma área de pesquisa, visto que permite o descarte de considerável extensão em área para trabalhos de exploração, diminuindo os custos da pesquisa e potencializando a área em estudo.

Nesse capítulo, é feita uma revisão bibliográfica condensada, com o objetivo de informar o leitor sobre os conceitos e terminologias de geoprocessamento usados nesse estudo.

2.1 Generalidades e alguns exemplos de mapeamento de favorabilidade mineral

Os métodos de exploração mineral tem experimentado uma grande evolução nos últimos tempos. Com o advento da informática, os profissionais da área das geociências, entre outros, têm se deparado com um processo de avanço tecnológico complexo e extremamente rápido, mas ainda em fase inicial de desenvolvimento. Esse processo aumentará a operacionalidade e a rapidez dos serviços de escritório, como por exemplo: o manuseio e a análise da grande quantidade de dados georreferenciados, que hoje têm sido possível obter a partir das inúmeras técnicas e ferramentas de exploração mineral existentes. A integração dessa grande quantidade de diferentes tipos de dados tem sido possível graças ao uso dos Sistemas de Informação Geográfica (**SIG**). O sucesso crescente da utilização dos

SIG na integração de dados aplicada à pesquisa mineral não é baseada no uso indiscriminado de programas computacionais, mas do uso criterioso dos dados no **SIG** a partir da definição de modelos de depósito e, conseqüentemente, de modelos de exploração, que direcionam a seleção dos dados a serem usados, bem como a extração das evidências distribuídas espacialmente críticas à predição de áreas de favorabilidade de ocorrência de depósitos minerais ainda não descobertos.

Em escala regional, um grande número de fenômenos espacialmente distribuídos pode ser registrado como pontos em um mapa, por exemplo: as localizações de ocorrências minerais. A distribuição desses pontos pode ser visualizada e analisada em conjunto com imagens e mapas temáticos de outra natureza (geológicas, geofísicas, geoquímicas e outros dados pertinentes). Muitas vezes, não há uma grande correlação entre duas variáveis que estão sendo estudadas, mas, quando combinadas muitas variáveis, uma associação fortemente direcionada à potencialidade mineral pode ser detectada, de maneira a prover resultados que auxiliem na predição de áreas de maior favorabilidade mineral.

A seguir, são resumidamente comentados alguns trabalhos de exploração mineral, de maneira a permitir uma rápida visualização do conceito de integração de dados aplicada à pesquisa mineral com a utilização do **SIG**.

Caso 1 – Bonham-Carter *et al.* (1988) usaram a integração de dados geológicos para exploração de ouro em Nova Scotia (Canadá). Nesse trabalho, os autores integraram os seguintes dados: mapa geológico-estrutural (com informações das falhas e eixos das dobras), dados geoquímicos de sedimentos de lagos e dados de ocorrências minerais. O modelo de depósito foi caracterizado pelas seguintes feições: 1) veios de quartzo auríferos usualmente confinados na Formação Goldenville; 2) veios auríferos concordantes que ocorrem próximo, ou no interior das cristas das dobras; 3) ouro em veios com carbonato e sulfetos; 4) ocorrências minerais no contato das Formações Halifax-Goldenville; 5) ocorrências minerais relacionadas à falhas com direção NW-SE.

A partir desses modelos os seguintes mapas foram criados para análise, por adição de zonas de *buffer*: 1) distância dos eixos das dobras, 2) distância dos lineamentos de direção NW-SE, 3) distância do contato de granitos intrusivos, 4) distância do contato Halifax-Goldenville.

Os mapas precedentes, na forma binária, foram então combinados com a utilização do método Bayesiano Pesos de Evidência, de maneira a permitir a avaliação da importância da presença, ou da ausência, de uma evidência baseada na presença de ocorrência mineral conhecida na área. Os dados geoquímicos foram combinados em uma única variável com o uso de análise de regressão multielementar, de maneira a predizer zonas anômalas por meio de mapa binário. A combinação final dos mapas de evidência foi feita com a utilização da linguagem de modelamento SPANS GIS e regras Bayesianas, o que resultou em um mapa final com as probabilidades de ocorrência de depósitos auríferos na região estudada.

Caso 2 – Bonham-Carter (1996) e Reddy *et al.* (1991) usaram integração de dados baseados em **SIG** com o objetivo de mapear o potencial mineral na área de Snow-Lake em Manitoba (Canadá). A área de estudo contém vários depósitos de sulfeto maciço vulcanogênico, que foram usados como modelo conceitual em um estudo baseado no método Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*). As seguintes características principais foram usadas no modelamento: 1) os depósitos ocorrem em seqüências de rochas vulcânicas subaquosas. Nessas áreas, os depósitos são muitas vezes associados a fluxos de lava félsica; 2) proximidade do contato entre os fluxos félsicos e as unidades vulcanoclásticas são importantes; 3) intrusões félsicas atuaram como fontes de calor que auxiliaram a circulação dos fluidos hidrotermais relacionados à mineralização; 4) áreas mineralizadas são associadas com diques e fraturas verticais que focalizaram o fluxo hidrotermal. O calor associado aos diques também auxiliou a circulação hidrotermal; 5) os fluidos hidrotermais reagiram com as encaixantes vulcânicas para produzir processos de alteração do tipo silicificação; 6) intemperismo e erosão dos depósitos produziram halos de dispersão de elementos metálicos nos sedimentos de drenagem e nos *tills*. Com base nesse modelo, o estudo foi dividido em três fases:

?? Fase 1: nessa etapa, foram reunidos, na forma digital, todos os dados de entrada (mapa geológico, mapa de alteração hidrotermal, dados geoquímicos de sedimentos de lago na forma de uma tabela e de um mapa de bacias de captação, dados geoquímicos provenientes de *till* na forma de uma tabela, dados de aeromagnetometria na forma de um mapa *raster*).

?? Fase 2: essa segunda etapa foi usada para processar os *layers* de entrada, de maneira a extrair as evidências críticas à predição dos depósitos de sulfeto. Os mapas geológico e de alteração foram reclassificados e transformados em mapas de proximidade (*buffers*); o mapa geoquímico de sedimentos de lago foi reclassificado; os dados de geoquímica de *till*

foram transformados em um mapa por interpolação e o mapa aerogeofísico sofreu cálculos derivativos.

?? Fase 3: os vários mapas de evidência resultantes foram combinados com base em operadores de Lógica Difusa, de maneira a gerar um mapa final de favorabilidade, ou potencial mineral. Valores de funções Lógica Difusa foram impostos subjetivamente aos mapas de evidência, controlando o peso empiricamente dado a cada evidência.

Caso 3 – Bhattacharya *et al.* (1993) estudaram o potencial para mineralizações de Pb-Zn da área Rajpura-Dariba em Rajasthan (Índia). Para esse trabalho, os autores usaram três modelos matemáticos para a integração de vários tipos de dados: mapa de ocorrências minerais conhecidas, mapa geológico, mapa de estruturas e dados geofísicos. O primeiro modelo matemático foi baseado em um índice de favorabilidade suportado por coeficientes de ajuste, ou correlação entre as evidências e as células contendo depósitos conhecidos. O segundo modelo foi baseado em probabilidades condicionais Bayesianas, que usam a probabilidade de ocorrência de um depósito conhecido. O terceiro modelo foi baseado em Lógica Booleana, onde os pesos para as evidências foram definidos empiricamente. Os três mapas de favorabilidade finais foram, então, combinados, de maneira a gerar um mapa de correlação composto pelas áreas sobrepostas de maior favorabilidade detectadas pelos três modelos.

2.2 Mapeamento de favorabilidade mineral baseado na integração de dados suportada em SIG – uma breve introdução

De maneira a delinear, mesmo que sucintamente, a filosofia geral do uso da integração de dados para pesquisa mineral suportada em um ambiente **SIG**, é necessário comentar alguns tópicos relevantes, como: **1) modelos e estruturas dos dados espaciais, 2) entrada de dados espaciais, 3) visualização e interrogação de dados espaciais, 4) transformações de dados espaciais e 5) análise e modelamento de dados espaciais.** Esses tópicos serão discutidos nos itens a seguir, os quais foram baseados em uma revisão bibliográfica feita pelo autor. Nessa revisão deve ser salientada a importante contribuição de Bonham-Carter (1994a).

Antes, porém, é importante definir o que é um Sistema de Informações Geográficas. Burrrough (1986), Star & Estes (1990) e Aronoff (1991) definem o **SIG** como um poderoso conjunto de ferramentas que permitem o armazenamento, a recuperação, a transformação, a combinação, a análise e a visualização de dados espacialmente georreferenciados do mundo

real. Bonham-Carter (1994a) refere-se ao **SIG** como um sistema para gerenciamento de dados espaciais. Teixeira (1995), em uma definição mais ampla, salienta que os **SIGs** abrangem todo um conjunto de programas, equipamentos, metodologias, dados e usuários, integrados de forma a tornar possível a coleta, o armazenamento, o processamento e a análise de dados georreferenciados, bem como a produção de informação derivada de sua aplicação. Por fim, Silva (1999) propõe a seguinte definição de **SIG**: “o **SIG** é uma tecnologia que necessita usar o meio digital, devendo agir sobre uma base de dados georreferenciada, para proceder operações algébricas não cumulativas (operações lógicas) e operações algébricas cumulativas (operações aritméticas), com finalidades específicas”.

De uma maneira geral, os Sistemas de Informação Geográfica são fundamentalmente constituídos pelas seguintes funções básicas:

- ?? entrada de dados e funções de conversão de dados;
- ?? base georreferenciada de dados (banco de dados, armazenamento e recuperação de dados);
- ?? funções de interrogações (interface com o usuário);
- ?? funções de transformações, reclassificações e combinações;
- ?? funções de análise e modelamento;
- ?? funções de visualização e impressão.

Ainda é importante salientar que os **SIGs** trabalham, de uma maneira geral, como o **centro** de uma estrutura voltada para trabalhos de Geotecnologia, que também compreende os denominados **sistemas periféricos**: **sistemas de gerenciamento de banco de dados, sistemas de processamento de imagens, sistemas CAD, sistemas estatísticos e geoestatísticos, sistemas de geração de superfícies**. Nesse sentido, Câmara (1996) salienta que as várias definições de **SIG** refletem a multiplicidade de usos e visões possíveis dessa tecnologia e apontam para uma perspectiva interdisciplinar de sua utilização. Segundo Câmara (1996), os **SIG** possibilitam a integração, numa única base de dados, de informações geográficas provenientes de diversas fontes e oferecem mecanismos para recuperar, manipular, e visualizar esses dados por meio de algoritmos de manipulação e análise.

2.2.1 Modelos e estruturas de dados espaciais

Os fenômenos do mundo real, para serem manipulados em um **SIG**, precisam ser apresentados de maneira simbólica. Com isso, o processo de abstração que representa fenômenos como estruturas, litologias e outras propriedades da terra envolve o uso de modelos simbólicos, que são, na verdade, simplificações da realidade. Os componentes desses modelos são os objetos, ou dados espaciais, que são definidos por elementos de posicionamento espacial (x e y: sistema de coordenadas) e por um elemento qualificador de magnitude (z). Esses dados devem ser organizados de uma maneira lógica e compreensível, de acordo com um modelo, ou tipo, ou ainda formato de dados (descrição detalhada de como os dados estão organizados em um arquivo), que, por sua vez, é representado por uma estrutura dos dados e armazenado em um banco de dados, segundo um formato de arquivo de dados compatível. Por exemplo: um modelo de elevação digital pode ser organizado segundo um modelo, ou formato *raster*, representado por uma estrutura do tipo *run-length encoded* e armazenado em um formato de arquivo com extensão **.cut*.

Três são os modelos, ou formatos de dados espaciais mais importantes para uso em um **SIG**: o *modelo raster*, o *modelo vetorial* e o *modelo ASCII*.

O **Modelo Raster** pode ser representado como uma matriz retangular de células, ou *picture x element* (*pixel*: a menor unidade espacial, célula), que pode ser armazenada em disco como uma estrutura de arquivo simples em forma seqüencial. Nesse modelo, dados de diferentes tipos podem ser sobrepostos sem a necessidade de cálculos geométricos complexos. Cada Plano de Informação (**PI**: *layer* de dados, camada de dados) registra um atributo separado. As células (*pixel*) têm um tamanho constante e forma em geral quadrada. As coordenadas espaciais são dispostas em linhas e colunas. O processamento dos dados é muito eficiente para casos como operações de filtragem, de superposição, de combinação e de modelamento de *layers*, pois o modelo tem uma estrutura simples. Esse modelo também é muito bem aceito no tratamento de dados espaciais contínuos que apresentam grande variabilidade espacial, como é o caso das imagens de satélite. Esse modelo possui as desvantagens de ocupar muito espaço de disco e de apresentar um produto final esteticamente pouco agradável.

O modelo de dados *raster* pode ser representado por vários tipos de estruturas. A estrutura do tipo *Full Raster*, muito usada em sistemas de processamento de imagens por exemplo, pode ser organizada de maneira que cada **PI** de dados seja representado por um

atributo (banda), dividido em células com valores inteiros de 0 a 255 (isto é, 1 byte por *pixel*); para dados de mais alta frequência, como os dados geofísicos, é muitas vezes usado um intervalo de valores mais alto. Devido ao grande espaço de memória necessária para esse tipo de modelo de dados, são muitas vezes usadas estruturas que permitem o armazenamento comprimido dos dados, como a estrutura **Run-Length Encoding (RLE)** e a estrutura em **quadtree**. A estrutura **RLE** permite comprimir os dados combinando os *pixel* vizinhos com valores iguais e gerando pares de números nx, onde n é o número de *pixel* com o mesmo valor e x são os atributos. A estrutura em **quadtree** organiza hierarquicamente os dados com base em quadrantes de *pixel* (nas áreas mais heterogêneas, os blocos têm mais subdivisões, enquanto nas porções mais homogêneas, os blocos são menos subdivididos).

O **Modelo Vetorial** representa o mundo real baseado em pontos, nós, linhas, cadeias e áreas compreendidas por linhas, chamadas polígonos. Uma das representações mais conhecidas desse modelo é conhecida como estrutura **spaghetti**. Nessa estruturação, os pontos são representados como pares de coordenadas espaciais e as áreas são representadas por regiões compreendidas por linhas, definidas por vértices cujas localizações espaciais são registradas em tabelas de coordenadas geográficas. Esse tipo de estrutura é muito usada em sistemas tipo **Computer Aided Design – CAD**. Uma estruturação mais funcional é a estrutura **topológica**, onde os polígonos são divididos em arcos e nós e as relações espaciais entre os arcos, os nós e os polígonos são definidos em tabelas de atributos. Na estrutura topológica, as tabelas de atributos contêm informações de adjacência, conteúdo e associação dos arcos e polígonos, o que diminui o espaço de armazenamento, pois, por exemplo, as bordas de dois polígonos adjacentes não precisam ser armazenadas duas vezes (uma para cada polígono) como na estrutura **spaghetti**. Na estrutura topológica, considera-se como atributos topológicos dos objetos espaciais aquelas características que não são modificadas por transformações como translação, rotação, cisalhamento e modificações de escala. Coordenadas espaciais e alguns atributos geométricos, como área, perímetro e orientação, são afetadas por essas mudanças. Na estrutura topológica, os atributos dos objetos espaciais são definidos em adição às coordenadas espaciais da estrutura **spaghetti**.

O modelo de dados vetorial é muito usado para representar mapas, ao contrário do modelo **raster**, pois pontos, linhas e polígonos são difíceis de representar com fidelidade nesse último modelo sem usar células muito pequenas, o que tornaria o arquivo de dados muito grande. Por outro lado, a estruturação do modelo de dado vetorial possui um caráter que

dificulta operações de superposição, combinação e modelamento de **PIs**, pois suas unidades espaciais tem formas topológicas diferentes.

O modelamento de superfícies, comumente usado na interpolação de variáveis contínuas para geração de grades *raster* regulares, também pode ser feito no modelo vetorial, com o uso de redes de triângulos irregulares (TIN); por exemplo: os pontos irregularmente distribuídos são unidos para formar uma rede irregular de triângulos cujos nós são os pontos originais. As faces triangulares resultantes formam um mosaico de superfícies planares cuja geometria espacial é definida pela altura dos nós. A triangulação Delaunay é um exemplo dessa estruturação. Esse tipo de estrutura é muito usada para representar superfícies de elevação digital.

O modelo *American Standard Code for Information Interchange* – **ASCII** refere-se aos dados organizados na forma de texto plano (sem qualquer formatação), cujos arquivos tem extensão do tipo *.dat, *.txt, *.dxf, entre outras.

Por último, é importante acrescentar que os atributos dos dados espaciais devem usualmente ser organizados em tabelas de atributos, principalmente quando se trabalha com grandes quantidades de dados, pois, nesses casos, a organização dos dados é crucial para uma eficiente manipulação e gerenciamento dos dados. Os sistemas de gerenciamento dos dados são em geral baseados em modelos hierárquicos, ou em modelos relacionais (Burrough, 1986; Bonham-Carter, 1994a).

2.2.2 Entrada de dados espaciais

Boa parte do esforço e do tempo gastos em um projeto **SIG**, algo em torno de 70% do tempo, é dispensado na coleta, preparação, organização, digitalização e construção da base de dados, na qual os mapas, imagens e tabelas de dados são georreferenciados. Além disso, em virtude da diversidade de *softwares SIG* e *softwares* periféricos existentes, ainda há muitos problemas de conversão de formatos. Recentemente, a chegada ao mercado de Sistemas de Conversão tem tentado diminuir o problema. Além disso, os **SIG** mais modernos têm aumentado sua capacidade de importar arquivos de formatos diferentes do seu formato padrão.

Após a decisão de quais dados serão usados em um determinado projeto, eles devem ser digitalizados se estiverem ainda na forma analógica. Para esse procedimento, existem *softwares* especializados, como os sistemas CAD, muito usados para digitalização de dados no modelo vetorial. A transformação digital de dados para a forma *raster* pode ser feita por meio de *scanners* de mesa ou de tambor, esse último evita distorções de borda. Dados na forma de entidades ponto, como os dados provenientes de uma campanha geoquímica de solos, por exemplo, podem ser digitalizados na forma de tabelas e, após, transformados em superfície contínua com o auxílio de *softwares* específicos.

Muitos dados precisam ser extensivamente pré-processados antes de serem importados para um **SIG**. Esse é o caso, por exemplo, das imagens de satélite, que necessitam uma grande quantidade de calibrações, pré-processamentos e classificações antes da geração da imagem, ou imagens que será(ão) utilizada(s) na integração de dados propriamente dita. Para esse pré-processamento, existem *softwares* específicos de tratamento de imagens, que devem ser usados antes da entrada dos dados em um sistema **SIG**.

É importante, ainda, comentar um processo muito importante na construção da base de dados: a conversão geométrica das coordenadas espaciais dos dados em uma projeção cartográfica comum. A localização espacial das entidades que compõem a superfície da terra é definida em termos matemáticos com o uso de coordenadas geográficas (latitude e longitude), ou com o uso de coordenadas planares de acordo com a projeção escolhida, como a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM). Maling (1992) e Snyder (1987) trazem um bom estudo do tema. Evidentemente, projeções de coordenadas planas introduzem distorções geométricas, que podem ser visualizadas como um círculo que representa o globo terrestre e que se transforma em uma elipse no processo de projeção. As projeções podem ser classificadas de acordo com suas distorções geométricas características em:

- a) Projeções conformais, ou equiangulares (ex.: UTM): preservam as relações angulares entre as feições em detrimento das áreas. Nessa projeção, pequenas áreas permanecem relativamente não distorcidas;
- b) Projeções de igual área (ex.: Projeção de Albert): preservam as áreas em detrimento das relações angulares.

c) Projeções equidistantes (ex.: projeção azimutal equidistante): mantêm corretas as direções de todas as linhas que partem de um ponto. Essa projeção é muito usada em atlas que cobrem grandes regiões e na confecção de cartas aéreas de distâncias.

A escolha da projeção a ser usada em um trabalho de integração de dados vai depender da proposta de trabalho e do tipo de projeção usado na área do projeto pelos órgãos competentes.

2.2.3 Visualização e interrogação de dados espaciais

Os geocientistas estão acostumados a visualizar, reconhecer estruturas e padrões e interpretar dados na forma de mapas. Com isso, a capacidade dos sistemas **SIG** de transformar tabelas de dados em mapas é muito útil. Por outro lado, há, com frequência, a necessidade de examinar dados específicos em detalhe e isso pode ser feito facilmente em um ambiente **SIG** para complementar o processo de visualização. Além disso, novas tecnologias em *software* estão trazendo um grande avanço no tratamento de dados espaciais. Recentes desenvolvimentos incluem a introdução de *displays* gráficos conectados (janelas interligadas), onde o analista pode gerar e testar idéias diretamente no computador, de maneira que, quando introduzidas modificações em um *display*, pode-se visualizar as modificações instantaneamente nos outros *displays*. Isso permite um tratamento dos dados mais aberto, dinâmico, e possibilita a análise dos dados no espaço físico.

O uso dessas novas tecnologias pode trazer grandes benefícios às ciências da Terra, principalmente para a prospecção geoquímica, prospecção geofísica, sensoriamento remoto (região do visível, infravermelho e microondas) aplicado à prospecção e à análise ambiental. O *software* REGARD e sua atualização MANET (Haslett, Wills & Unwin, 1990; Haslett, et al. 1991; Haslett, 1992; Haslett & Bradley, 1992; Haslett & Power, 1995; Manet, 1995) são exemplos de *softwares* visualizadores interativos de dados, que podem ser usados em conjunto com um **SIG** clássico.

2.2.4 Transformações de dados espaciais

Muitas operações em um ambiente **SIG** podem ser registradas como verdadeiras transformações dos dados. Além das transformações comuns e automáticas vetor-*raster*-vetor

e das transformações de estrutura de dados (transformação de *full raster* para *quadtree*), são muito importantes as transformações entre as principais entidades espaciais: **pontos, linhas e áreas**. Alguns exemplos dessas transformações podem ser vistos na tabela 2.1.

Na área da integração de dados geológicos para pesquisa mineral, são de particular importância as seguintes transformações: 1) conversão de pontos para áreas; 2) dilatação (*buffering*) de entidades espaciais; e 3) operações de amostragem e reamostragem.

Tabela 2.1 - Exemplos de transformações de dados em ambiente **SIG** (Bonham-Carter, 1994a).

De/Para	Pontos	Linhas	Áreas
Pontos	Interpolação	Linhas de contorno	Polígonos Thiessen
Linhas	Interseção de linhas	Suavização de linhas	Zonas de dilatação
Áreas	Amostragem de áreas como pontos	Linha de eixo médio	Reamostragem de áreas

2.2.4.1 Conversão de pontos em áreas

Grande parcela dos dados geocientíficos é coletada e registrada na forma de pontos, como os pontos de coleta de uma campanha geoquímica, por exemplo. Dispondo-se da localização de todas as ocorrências minerais conhecidas na área em estudo, por exemplo, um método interessante que se pode usar é o mapeamento de densidade, no qual é criado um modelo numérico de superfície, onde o atributo associado à superfície é a densidade de pontos. Essa superfície pode ser modelada como uma imagem *raster*, ou como polígonos irregulares em um modelo vetorial.

De maneira geral, a conversão de entidades ponto em entidades área pode ser subdividida em dois grupos: a) métodos não interpolativos e b) métodos interpolativos.

Os métodos não interpolativos envolvem a substituição dos pontos por polígonos. As tabelas de atributos associadas aos pontos são transferidas aos polígonos. Os polígonos podem ser gerados por algum algoritmo, ou podem ser desenhados manualmente ao redor dos pontos de acordo com alguma evidência subjetiva. Um exemplo dos métodos não interpolativos é o método de geração de polígonos Thiessen ou de Voronoi.

Os métodos interpolativos envolvem a estimativa dos valores das variáveis modeladas em uma sucessão de locais-ponto, que em geral formam uma grade regular. Os valores interpolados são então tratados como células em uma imagem *raster*. Alternativamente, os dados podem ser representados por linhas de contorno (isolinhas) em uma estrutura vetorial. O processo de transformação de pontos em áreas que representam uma superfície contínua é chamado modelamento de superfície, ou de contorno (Bonham-Carter, 1994a).

Há vários métodos de interpolação comumente usados em pesquisa mineral. A escolha de um determinado método, depende primeiramente em identificar se os dados possuem autocorrelação positiva. Em seguida determina-se o método mais conveniente a ser usado. No método Triangulação Delaunay, os pontos originais são ligados no sentido de formar um mosaico de triângulos tão equiláteros quanto possível. Cada triângulo é tratado como uma superfície plana. A equação para formar cada faceta triangular-planar é determinada pelos valores dos três vértices. Uma vez que a superfície é definida como um mosaico triangular, os valores de cada ponto na superfície podem ser calculados. O método do Inverso da Distância utiliza médias móveis dos pontos originais dentro de uma zona de influência determinada, onde os pesos são inversamente proporcionais as distâncias a partir do centro das zonas de influência. O método geoestatístico de krigagem envolve a utilização de pesos dentro de uma zona de influência; porém, o inverso da distância do método anterior é substituído pela covariância espacial. A zona de influência é determinada a partir da distância do centro da zona em que as variáveis analisadas tornam-se independentes, ou seja, não correlacionadas. Na prática, a krigagem requer que a covariância (ou a correlação, ou o variograma) seja modelada matematicamente (por ex.: com ajuste linear, esférico, gaussiano) para várias orientações devido à anisotropia dos materiais naturais. Uma boa revisão desses métodos pode ser encontrada em Isaaks & Srivastava (1989).

2.2.4.2 Dilatação de entidades espaciais

A dilatação (*buffering*) de objetos, ou de entidades espaciais, como pontos, linhas e áreas, produz a expansão desses objetos a partir da formação de corredores de proximidade ao seu redor. Algoritmos para operações de dilatação podem ser usados tanto em modelos *raster*, como em modelos vetoriais. A proposta do processo de dilatação é, em geral, a criação de um mapa que mostre proximidades em relação à feição selecionada. No mapeamento de potencial mineral, a proximidade de ocorrências minerais, ou de determinadas estruturas, ou contatos

pode ser de grande significância na pesquisa de determinados tipos de depósitos minerais. Para o modelo *raster*, as denominadas operações de morfologia matemática estendem a idéia de dilatação para incluir operações de erosão (contração dos objetos), abertura (erosão seguida de dilatação) e fechamento (dilatação seguida de erosão). Serra (1982) e Fabbri (1984) discutem exemplos geológicos e fornecem uma revisão teórica desses processos.

2.2.4.3 Operações de amostragem e reamostragem

As operações de amostragem e de reamostragem são essenciais tanto no ambiente **SIG**, como nos procedimentos de pré-processamento. Esse é o caso, por exemplo, da operação de reamostragem usada no procedimento de georreferenciamento de imagens de satélite.

No ambiente **SIG**, a transformação de áreas em pontos (amostragem) pode ser feita por meio: 1) da rotulação das áreas compreendidas por polígonos com pontos, também chamados centróides, e 2) da ligação dos atributos dos polígonos e dos centróides com tabelas de atributos. Em alguns casos, os pontos usados para amostragem são as localizações das coletas de campo; em outros casos, as entidades ponto são geradas especificamente para amostragem. Com isso, operações específicas no **SIG** fazem a transferência dos atributos das áreas (polígonos) para tabelas de atributos dos pontos; nessas tabelas, as linhas representam as localizações dos pontos e as colunas representam os atributos das áreas (polígonos). No caso da combinação de uma série de **PIs** amostrados com entidades ponto objetivando uma posterior análise estatística, por exemplo, as colunas podem representar os atributos dos *layers*. Essas tabelas resultantes podem ser analisadas no próprio **SIG**, ou, alternativamente, em *softwares* estatísticos e geoestatísticos.

A transformação de área para área é uma operação de amostragem, ou de reamostragem muito comum em trabalhos de integração de dados. Na operação de sobreposição (*overlay*) de dois, ou mais **PIs**, as áreas (polígonos) de um mapa são sobrepostas às áreas de outro. O resultado é a produção de um novo conjunto de polígonos comuns aos dois mapas. As tabelas de atributos dos mapas usados na integração podem ser unidas e analisadas estatisticamente. Outra operação comum é a reamostragem dos polígonos (que representam as litologias, p.ex.) de um mapa geológico para fazer um mapa crono-

estratigráfico. Essa transformação pode ser feita simplesmente com uma operação de conversão de tabelas de atributos de um mapa para outro.

Por fim, é importante discutir, mesmo que brevemente, as transformações vetor-*raster*-vetor. Clarke (1990) discute os algoritmos para essas transformações. Bonham-Carter (1994a) apresenta um método para conversão de dados vetoriais, na forma de polígonos, para uma estrutura tipo *run-length encoded raster*; nesse método, uma série de linhas da largura de uma célula, paralelas ao eixo x, são desenhadas no mapa a ser transformado. As interseções entre as linhas e os limites dos polígonos são calculadas e a distância dos limites dos polígonos podem ser medidas em unidades de célula pelo movimento ao longo das linhas; os pares (*run-length*, classe) são então ligados para criar a estrutura *run-length encoded*. Para a transformação inversa, um algoritmo procura as células com valores diferentes (limites dos polígonos). Os limites dos polígonos são ligados para formar os arcos, os quais terminam em nós; finalmente, os polígonos são rotulados de acordo com as classes.

2.2.5 Análise e modelamento de dados espaciais

No ambiente **SIG**, o modelamento de dados espaciais é, em geral, aplicado na análise dos dados. Essa análise de dados espaciais pode ser definida como o processo de extração de padrões e associações dos dados espaciais que auxiliem na caracterização, no entendimento e na predição dos fenômenos espaciais. Isso pode ser melhor visualizado quando se considera, por exemplo, a análise das relações entre as características geoquímicas do elemento ouro no solo de uma região e a distribuição das rochas subjacentes. O entendimento dessas relações pode ser essencial para os trabalhos de exploração mineral. A análise das relações entre os dados pode conduzir ao reconhecimento de um padrão e de uma associação espacial do elemento com uma determinada litologia. Como resultado, um modelo que descreva a associação pode ser proposto. A partir desse modelo, a associação detectada pode ser quantificada e trabalhada de maneira a possibilitar, inclusive, modificações no modelo original. O modelo é, portanto, um ingrediente muito importante da análise dos dados, visto que ele significa a representação simbólica das relações entre os objetos espaciais e seus atributos.

O modelamento faz parte do processo analítico de descoberta, de descrição e de predição dos fenômenos espaciais. Davis (1986) oferece uma descrição das operações de

análise espacial aplicadas a dados geológicos. Richards (1993) e Jensen (1996) apresentam excelentes discussões a respeito das operações de análise espacial aplicadas em imagens de sensoriamento remoto.

Alguns **SIGs** fornecem ferramentas para auxiliar o especialista na definição de modelos, permitindo o uso de operações de modelamento para predição das associações e dos padrões entre os dados. Essas operações podem ser feitas diretamente em *map layers*, ou indiretamente nas tabelas de atributos ligadas aos dados espaciais. Bonham-Carter (1994a) implementa uma interessante linguagem básica e genérica para o modelamento de dados espaciais, a qual denominou *pseudo-code modelling*. Essa linguagem pode ser usada de acordo com as convenções particulares de cada **SIG** e é baseada em álgebra de mapas e em modelos de mapas, que são seqüências de declarações algébricas que resultam na geração de novos mapas a partir de operações em um, ou em mais mapas de entrada.

A análise e o modelamento de dados espaciais podem ser divididos em: 1) análise em mapas únicos; 2) análise em pares de mapas; e 3) análise em mapas múltiplos. Uma divisão alternativa seria a classificação em abordagens cumulativa e não-cumulativa.

2.2.5.1 Análise em mapas únicos (*single maps*)

A análise de dados em mapas únicos é constituída por operações corriqueiras no ambiente **SIG** (o próprio **SIG** e os *softwares* periféricos associados). As operações típicas em *single maps* e em suas tabelas de atributos associadas são as operações de reclassificação, as quais podem ser feitas diretamente com modelamento de mapas, ou indiretamente com operações em tabelas de atributos. Análises estatísticas e geoestatísticas, operações de filtragem e de classificações espaciais, análises de superfície de tendência, análises de morfologia matemática e análises de auto-correlação são outros exemplos de operações típicas em *single maps*. Muitas vezes, pode ser interessante gerar mapas únicos a partir de mapas em pares, ou de mapas múltiplos e, então, aplicar as operações típicas de mapas únicos nesses mapas derivados.

2.2.5.2 Análise em pares de mapas (*map pairs*)

Um dos aspectos mais significativos dos **SIG** é a possibilidade da combinação de dados espaciais de diferentes origens, com o objetivo de identificar e de descrever as associações presentes nos dados e usá-las para predição de fenômenos espaciais. O mapeamento de potencial mineral é um bom exemplo desse procedimento, pois as associações espaciais entre depósitos minerais conhecidos e dados geológicos, geofísicos, geoquímicos e de sensores remotos podem ser exploradas com o uso de **SIG** e de modelos de depósitos minerais para prever depósitos ainda não descobertos. Essa combinação pode ser feita a partir de pares de mapas, ou de mapas múltiplos. De qualquer maneira, no caso da combinação de mapas com escalas de trabalho diferente (resolução espacial), deve-se usar a escala de trabalho menor (pixel menor para pixel maior).

O estudo de sobreposições de mapas com operadores aritméticos e Booleanos é uma ferramenta poderosa no exame dos padrões espaciais que ocorrem em interações de um par de mapas. Nesse procedimento, procura-se combinar os mapas de entrada com base em um conjunto de regras pré-determinadas de acordo com o caso; essas regras definem, para todas as localizações, a classe do mapa de saída a partir das classes dos mapas de entrada. Esse procedimento pode ser feito diretamente a partir das classes dos mapas de entrada, ou indiretamente com base nas tabelas de atributos ligadas aos mapas e com base em outros itens de atributos registrados nas tabelas que não sejam classes dos mapas.

2.2.5.2.1 Correlações entre pares de mapas

Quando dois mapas são combinados de acordo com um modelo, o mapa resultante pode ser analisado visualmente. Porém, é muitas vezes mais interessante quantificar as associações espaciais entre os mapas, de maneira a permitir um melhor entendimento dessas associações. Isso pode ser feito a partir de medidas de correlação. No entanto, deve-se ter em mente que, mesmo que a associação entre dois mapas possa ser medida e descrita quantitativamente, a significância das correlações em termos de probabilidade será de difícil avaliação, pois os dados espaciais, em geral, não satisfazem completamente as suposições de independência das amostras da teoria estatística clássica. Isso ocorre porque dados espaciais são essencialmente variáveis regionalizadas e tais variáveis tem sempre um componente randômico local e um componente estrutural regional que geram dependência entre os dados espaciais.

Freqüentemente, as associações espaciais entre dois mapas podem ser medidas com o auxílio de áreas de tabulação cruzada (matriz de sobreposição), que é uma tabela bi-dimensional onde estão sumarizadas as áreas de sobreposição de todas as combinações possíveis dos dois mapas de entrada; nessa tabela, as classes de um mapa são as linhas enquanto as classes do outro mapa são as colunas. Dessa forma, os dados podem ser visualmente inspecionados e graficamente dispostos, o que facilita seu tratamento por medidas de correlação.

As medidas de correlação a serem usadas vão depender da escala dos dados que estiverem sendo estudados: se nominal (p.ex.: litologia), ordinal (p.ex.: mapa geoquímico em classes percentuais), intervalo (p.ex.: temperatura), ou razão (p.ex.: distância).

Muitas medidas de associação têm sido propostas para dados em escala nominal (Bonham-Carter 1994a). No caso mais geral, onde dois mapas com classes múltiplas estão para ser comparados, medidas baseadas no teste **chi-quadrado**, ou baseadas na **entropia** podem ser usadas. No caso especial da combinação de dois mapas com o mesmo número de classes, o **coeficiente Kappa de concordância** pode ser usado. Quando os dois mapas a serem combinados são binários, outras medidas podem ser usadas, como o **coeficiente de ajuste, ou de similaridade de Jaccard**, ou como medidas baseadas em probabilidade condicional (p.ex.: **razões Odd, coeficiente de associação de Yule** e o **contraste** do método dos pesos de evidência).

Para dados em escala ordinal, onde as medidas originais foram transformadas em dados hierarquizados, ou ordenados de maneira a possibilitar uma melhor interpretação dos dados, uma medida de correlação apropriada é o **coeficiente de correlação de ranks de Spearman**. No caso de dados em escala intervalo e em escala razão, como os valores de intensidade em imagens de sensoriamento remoto, pode ser usado o **coeficiente de correlação momento**.

No caso da correlação de mapas de escalas diferentes, uma solução prática é transformar os mapas em mapas binários e, então, usar as medidas de correlação pertinentes citadas anteriormente. Uma alternativa a essa solução, no caso da combinação de dados em escala nominal com dados em escala ordinal, seria o uso de gráficos tipo **boxplot**, que emprega a variável ordinal (ex. distribuição de freqüência de ouro) para cada classe nominal (ex. litologia). O **boxplot** não fornecerá um valor representativo da correlação, mas graficamente mostrará se a variável ordinal é separada em grupos distintos para cada classe

nominal. O mesmo tipo de gráfico também pode ser usado para comparar dados em escala nominal com dados em escala intervalo, ou escala razão. Para a comparação de mapas em escala ordinal com mapas em escala intervalo, ou razão pode ser usado o coeficiente de correlação de *ranks* de Spearman, que trata os dados em escala intervalo, ou razão, como dados ordenados. Uma boa revisão das medidas de correlação citadas acima, aplicadas a dados geológicos, pode ser encontrada em Bonham-Carter (1994a).

A combinação e a visualização de *map layers* em pares de mapas é um importante aspecto dos trabalhos em ambiente **SIG**, visto que as relações entre pares de mapas são o primeiro passo exploratório importante para determinar como as feições de um, ou de ambos mapas podem ser extraídas e amplificadas para análises subseqüentes feitas em *layers* múltiplos de dados.

2.2.5.3 Análise em mapas múltiplos (*multiple maps*)

O processamento final da maioria dos projetos executados em **SIG** é a combinação de dados espaciais de diferentes origens, de maneira a descrever e analisar as relações entre os *layers*, fazer predições com base em modelos e fornecer suporte para tomadas de decisão.

O modelamento de potencial mineral em ambiente **SIG** é fundamentado basicamente em **modelos de predição de potencial mineral**, também chamados de **modelos de exploração**. Esses modelos são, em sua maior parte, empíricos e baseados em relações estatísticas, ou em relações heurísticas. Os princípios físicos e químicos que governam a formação dos depósitos minerais são em geral muito complexos para que se possa fazer predições baseadas diretamente em modelos matemáticos. A predição de depósitos minerais baseia-se, portanto, em relações principalmente empíricas alicerçadas em modelos, classes, ou tipos básicos e largamente reconhecidos de depósitos. Cada classe, ou tipo de depósito mineral é constituído por um bom número de depósitos registrados como portadores de características, feições e estruturas geológicas similares, que são comuns ao amplo grupo de depósitos minerais estudados e que serão facilmente reconhecíveis em diversas escalas de investigação. Tal arranjo de elementos é usualmente tratado como um modelo descritivo de depósito, o qual serve de guia na pesquisa de novos depósitos do mesmo tipo, ou classe.

A descrição de um modelo de depósito inclui, tanto quanto possível, a avaliação dos processos químicos e físicos que controlaram a formação do depósito; evidentemente que um

fator interpretativo a respeito das variáveis de mineralização e em função dos processos que estariam envolvidos na sua formação são também usados na tentativa de postular uma hipótese genética para a formação do depósito, e produzir um modelo genético. Segundo Barton (1986), os modelos descritivos existentes são, muitas vezes, ainda bastante incompletos, enquanto os modelos genéticos são, em geral, muito especulativos. A esse respeito, Figueiredo (1992) sustenta que mesmo com esses problemas, os modelos de depósitos são de extrema importância na exploração mineral e ainda possibilitam seu refinamento e correção se necessário, a partir de novos testes e análises produzidos pelo desenvolvimento de novas tecnologias.

A utilização de modelos de depósitos aplicada ao mapeamento mineral por meio de **SIG** tem fundamental importância, visto que eles são usados como orientação na seleção dos dados que serão usados no modelamento e também na atribuição dos pesos a serem adotados por um especialista nos mapas previsionais, ou evidências. Esse procedimento de modelamento de potencial mineral é conhecido pela designação de **Dirigido pelo Conhecimento**. Exemplos desse tipo de modelamento são o modelo de Lógica Difusa (não necessariamente) e o modelo de **Dempster-Shafer**. Alternativamente, a atribuição de pesos pode ser feita usando-se critérios estatísticos baseados em um conjunto de dados de treinamento relacionados ao potencial mineral que ocorrem na região em estudo (p.ex.: localizações das ocorrências minerais conhecidas). Esse procedimento é denominado **Modelamento de potencial mineral Dirigido pelos Dados**. Exemplos desse procedimento são o Método dos **Pesos de Evidência**, o Método de **Regressão Linear** e as **Redes Neurais**.

A seguir são comentados alguns dos métodos que atualmente estão sendo testados em trabalhos de mapeamento de favorabilidade mineral.

2.2.5.3.1 Lógica Booleana

O modelamento Booleano envolve a combinação lógica de mapas binários com a aplicação de operadores condicionais tipo **E** (interseção lógica), **OU** (união lógica), **XOU** (não interseção lógica), ou **NÃO** (negação). Os mapas são tratados como condições que podem ser usadas como evidências. Os vários mapas evidência são, então, combinados para dar suporte a uma hipótese, ou proposição tipo "*esta área é favorável para conter depósitos auríferos?*", no caso de um projeto de mapeamento mineral. Todos os locais da região

estudada são testados com relação à satisfação da proposição e recebem valores **1**, se verdadeiro (satisfaz à proposição), ou **0**, se falso (não satisfaz à proposição). O resultado final é um mapa binário que mostra somente as áreas que satisfazem a proposição.

O modelamento Booleano tem seu ponto forte na simplicidade e na facilidade de implementação. Na prática, entretanto, dificilmente se atribui pesos iguais às diferentes evidências que serão combinadas; ao contrário, as evidências precisam ser ponderadas de acordo com suas significâncias em relação à proposição. Essa metodologia é representativa do modelamento dirigido pelo conhecimento, pois a rede de evidências resultante, também chamada *árvore de decisões*, é montada por um especialista.

2.2.5.3.2 Sobreposição indexada (*index overlay*)

Esse método propicia uma combinação de evidências mais flexível que o método anterior, pois permite a atribuição de pesos às evidências de acordo com sua significância. Os pesos são atribuídos de acordo com o julgamento de um especialista; portanto, também é dirigido pelo conhecimento. Os pesos escolhidos devem ser valores inteiros positivos. O método pode ser utilizado com mapas de entrada binários, ou mapas multiclasse. Nesse último caso, é atribuído um peso para cada classe.

Se os mapas evidência são binários, cada mapa é simplesmente multiplicado pelo seu fator de peso e, após, são somados todos os mapas combinados e normalizados pela soma dos pesos. Para cada localização, o valor de saída (S), é definido como:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \text{classe (mapa } i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2.1)$$

onde W_i é o peso do “mapa i ” e a classe “mapa i ” é **1** para presença, ou **0** para ausência da condição binária. O valor de saída situa-se entre 0 (condição extremamente desfavorável) e 1 (condição extremamente favorável). O mapa final mostra as regiões classificadas de acordo com o seu escore resultante.

Se os mapas evidência são multiclasse, além dos mapas, as classes desses mapas também recebem pesos. Nesse caso, é conveniente definir os valores das classes de cada mapa em uma tabela de atributos associada, de maneira que qualquer modificação nos valores das classes poderá ser feita diretamente sem modificar os passos do procedimento de modelamento. Os pesos dos mapas são atribuídos como no processo binário; porém, os pesos das classes de cada mapa são recuperados automaticamente nas tabelas de atributos, de acordo com a classe presente na localização que está sendo analisada. Nessa metodologia, o valor de saída (S) é definido por:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n S_{ij} \cdot W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2.2)$$

onde **S** é o valor resultante de cada entidade área (polígono, *pixel*), **W_i** é o peso do "mapa i" e **S_{ij}** é o peso da "classe i" do "mapa i" (o valor de S_{ij} depende da classe ocorrente na localização sob análise).

2.2.5.3.3 Lógica Difusa

A maioria dos sistemas geológicos são muito complexos, ou pobremente definidos e caracterizados. Isso dificulta a utilização de modelamentos matemáticos para explicar processos geológicos. Modelamentos com base na Lógica Difusa podem minimizar esse problema, na medida em que permitem o uso de **possibilidades** (grau, ou nível de certeza, ou de crédito em determinada informação, ou dado a partir do conhecimento e do entendimento desse dado dentro do contexto de trabalho) no lugar de probabilidades matemáticas. Segundo Fang (1997), a Lógica Difusa, em sua essência, trabalha e considera as variáveis (padrões, feições e fenômenos) geológicas como variáveis lingüísticas, ou conceituais, mais do que numéricas, e ainda consegue estabelecer valores numéricos para essas variáveis com base no crédito, no uso de possibilidades.

A metodologia Lógica Difusa é, em alguns aspectos, similar às anteriores; também é, pois, um método que pode ser dirigido pelo conhecimento, onde os valores Lógica Difusa, denominados valores de função-membro, são atribuídos por um especialista com base no julgamento subjetivo da importância das evidências em relação à proposição estabelecida. As regras de combinação, porém, são mais flexíveis e, assim, potencializam sobremaneira o método. Além disso, os valores de função-membro de um conjunto Lógica Difusa são expressos de uma forma contínua em uma escala crescente de 0 a 1, o que facilita análises comparativas. Essa escala de valores, porém, não constitui funções densidade de probabilidade. Assim, a soma de todos os valores de função-membro de um conjunto Lógica Difusa não precisa necessariamente ser igual a 1. Valores de função-membro de um conjunto Lógica Difusa são estabelecidos para cada mapa evidência que será combinado. Um conjunto Lógica Difusa pode ser definido da seguinte maneira: se $X = \{x\}$ representa um espaço dos objetos, então o conjunto Lógica Difusa A em X é o conjunto de pares ordenados $A = \{x, \mu_A(x)\}$, onde x pertence a X e $\mu_A(x)$ é a função-membro Lógica Difusa. Supondo, por exemplo, que A é o conjunto de células que contém depósitos de ouro e $X = \{x\}$ é o espaço de objetos que refletem teores de ouro em solo, então, a função membro Lógica Difusa para A em relação aos valores de ouro pode ser representada segundo a tabela 2.2.

Isso implica que, por exemplo, dado um conjunto de dados geoquímicos (teor de Au em solo), a possibilidade, ou a favorabilidade de uma localização particular no mapa conter um depósito de ouro é dado pelo conjunto de valores de função-membro Lógica Difusa. As evidências, ou as suas respectivas classes com valores de significância altos constituem valores de função-membro Lógica Difusa próximos a 1, enquanto as evidências, ou suas classes com valores de significância baixos constituem valores de função-membro Lógica Difusa próximos a 0.

Tabela 2.2 – Exemplo de valores de função-membro Lógica Difusa

Au (ppb)	Número da Classe	Valor de Função-Membro Lógica Difusa
> 100	1	0.9
50 – 100	2	0.7
< 50	3	0.3

A combinação de mapas evidência como membros Lógica Difusa de um conjunto relacionado a uma proposição, ou hipótese é feita com o auxílio dos **Operadores Lógica Difusa**. An *et al.* (1991) apresentam uma discussão dos Operadores Lógica Difusa mais importantes para a combinação de dados comumente usados em exploração mineral. Esses operadores são analisados a seguir:

1) *Operador Lógica Difusa E* é equivalente ao operador Booleano **E** (interseção lógica) e é definido como

$$\mu_{\text{combinação}} = \text{Min} (\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad (2.3)$$

onde μ_A é o valor da função-membro Lógica Difusa do mapa A em uma localização particular, μ_B é o valor do mapa B e assim por diante, com todos os membros pertencentes a um conjunto Lógica Difusa relativo à uma dada proposição. A combinação de dois mapas como membros Lógica Difusa de uma mesma proposição resultaria o seguinte equacionamento: supondo que o mapa A em uma dada localização (ex. *pixel*, polígono) tenha o valor 0.5 e que o mapa B, na mesma localização, mostre o valor 0.75, o membro Lógica Difusa resultante da combinação pelo operador E terá um valor 0.5. Como pode ser observado, o mapa resultante adotará o menor valor daquela localização, o que é considerado, por isso, um resultado conservador. Esse operador é apropriado quando as evidências devem ser apresentadas juntas para que a hipótese, ou a proposição seja verdadeira.

2) *Operador Lógica Difusa OU*: é similar ao operador Booleano **OU** (união lógica), onde os valores dos membros Lógica Difusa são controlados pelos valores máximos dos mapas evidência para cada localização. Esse operador é definido como:

$$\mu_{\text{combinação}} = \text{Max} (\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad (2.4)$$

Por esse operador, apenas as evidências mais positivas em relação à proposição são usadas nos mapas resultantes. Muitas vezes, isso pode ser interessante em trabalhos de

mapeamento mineral, onde indicadores favoráveis são raros e a presença de qualquer evidência positiva pode ser suficiente para sugerir favorabilidade.

3) *Operador Lógica Difusa Produto Algébrico*. Nesse e nos operadores Lógica Difusa seguintes, as evidências combinadas geram um resultado combinado, onde cada dado contribui com algum efeito para o resultado final. A função que descreve esse operador pode ser apresentada como:

$$\text{? combinação ? } \prod_{i=1}^n \text{?}_i \quad (2.5)$$

onde ?_i é o valor do membro Lógica Difusa do mapa A em uma localização particular e $i = 1, 2, \dots, n$ mapas são os mapas evidência a serem combinados. O resultado da combinação de evidências com esse operador é o produto algébrico dos valores das evidências. Como o produto algébrico é calculado com valores menores do que 1, os valores resultantes serão sempre menores, ou iguais ao menor valor das evidências; por exemplo: se os valores das evidências em uma determinada localização forem 0.75 e 0.5, o produto algébrico Lógica Difusa será 0.375.

4) *Operador Lógica Difusa Soma algébrica*. Esse operador Lógica Difusa é complementar ao operador anterior e é definido como:

$$\text{? combinação ? } 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \text{?}_i) \quad (2.6)$$

O resultado será sempre maior, ou igual aos maiores valores das evidências; por exemplo: se os valores das evidências em uma determinada localização forem 0.75 e 0.5, a soma algébrica Lógica Difusa será $1 - (1 - 0.75) \cdot (1 - 0.5)$, cujo resultado será 0.875.

5) *Operador Lógica Difusa Gama*. Esse operador Lógica Difusa é definido com base no produto algébrico Lógica Difusa e na soma algébrica Lógica Difusa e é descrito como:

$$\mu_{\text{combinação}} = (\text{Soma algébrica Lógica Difusa})^\gamma * (\text{Produto algébrico Lógica Difusa})^{1-\gamma} \quad (2.7)$$

onde γ é um parâmetro escolhido com valores dentro do intervalo entre 0 e 1. Quando γ for 1, a combinação será igual a soma algébrica Lógica Difusa; quando γ for 0, a combinação resultante será igual ao produto algébrico Lógica Difusa. Valores de γ entre 0 e 1 resultarão em valores com tendências positivas, para valores próximos a 1, ou negativas para valores próximos a 0 (Fig. 2.1). An *et al.* (1991) usou um valor de $\gamma = 0.975$ na combinação de evidências geológicas e geofísicas no mapeamento mineral de Fe e metais base em Manitoba (Canadá). Boham-Carter (1994a) usou um valor de $\gamma = 0.95$ no mapeamento de favorabilidade de depósitos de sulfeto maciço com SIG na área Chisel Lake-Anderson Lake (Canadá).

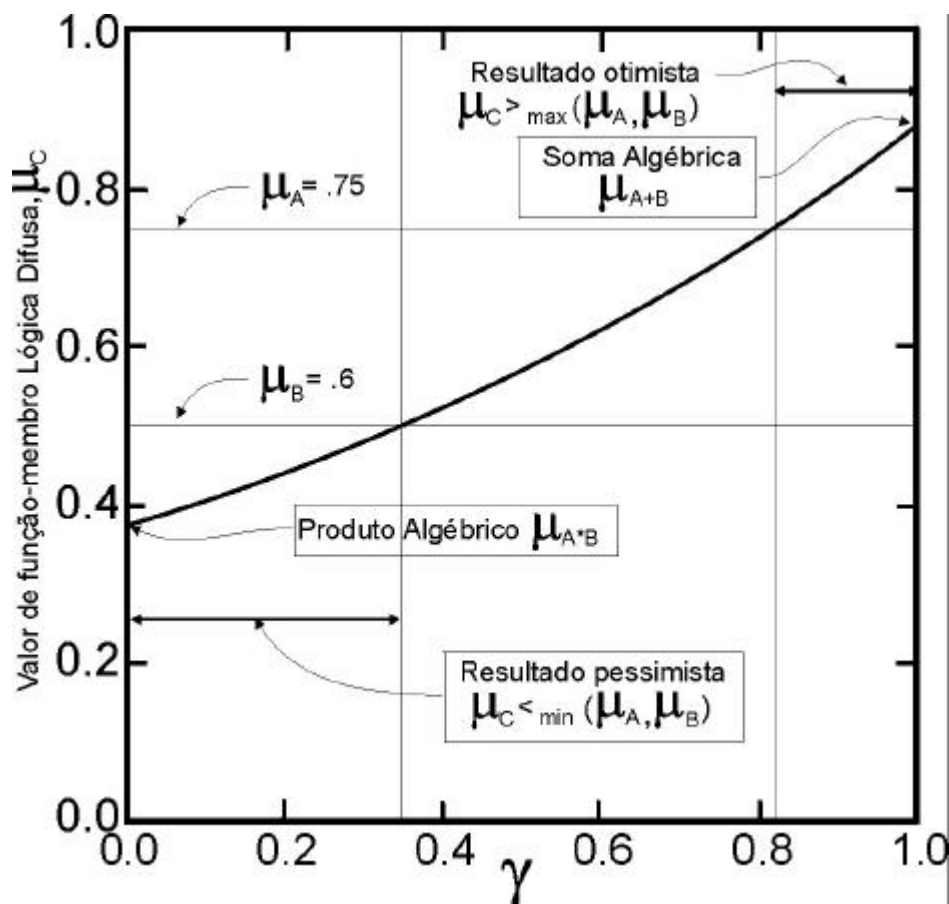


Figura 2.1 – Gráfico mostrando as possibilidades de combinação com o operador gama (γ) de dois membros Lógica Difusa μ_A e μ_B . Modificado de Bonham-Carter (1994a).

Na metodologia Lógica Difusa, mapas evidência podem ser combinados em uma série de passos numa **rede de inferências** (fluxograma), em vez da combinação em uma única operação. Muitas vezes, é mais apropriado combinar subconjuntos de mapas evidência com operadores Lógica Difusa **E**, ou **OU**, para constituir hipóteses intermediárias, e somente então unir evidências e hipóteses intermediárias (agora, também evidências) com o operador Lógica Difusa Gama. A rede de inferências é, na verdade, um meio de simulação do processo lógico pensado por um especialista. Nessa simulação, as evidências, ou membros Lógica Difusa são a base do conhecimento e a rede de inferências combinada com os operadores Lógica Difusa é a **engenharia das inferências**.

2.2.5.3.4 Pesos de Evidência

Esse método, diferentemente dos anteriores, é uma versão do modelo geral Bayesiano, que normalmente é aplicado quando as evidências são binárias. Esse método tem sido aplicado quando existem dados *a priori* suficientes para estimar a importância relativa das evidências de uma maneira estatística; é, portanto, um método dirigido pelos dados. Bonham-Carter (1988), Agterberg (1990), e Wright & Bonham-Carter (1996) têm aplicado o método para mapeamento de potencial mineral.

Como no modelo Bayesiano, o Método Pesos de Evidência considera a combinação de dados por meio de probabilidades *a priori* e *a posteriori*. Essas probabilidades podem ser explicadas com o uso, por exemplo, da probabilidade que uma anomalia de zinco ocorrer em uma região definida com valores maiores que 300 ppm. Essa probabilidade (proporção de amostras com teor maior que 300 ppm) pode ser a probabilidade *a priori*, na ausência de outras informações. Porém, se houver um mapa geológico da região, a probabilidade de zinco anômalo ocorrer poderá variar consideravelmente, de acordo com a litologia; haverá, então, uma probabilidade *a posteriori*, que será a probabilidade *a priori* anomalia de zinco combinada com o fator litologia. A adição de outros fatores, como presença de alteração, dados geofísicos, etc., também afetam a probabilidade *a posteriori* e podem ser combinados na predição relacionada a uma proposição do tipo “essa área é favorável a depósitos de zinco?”.

A favorabilidade de encontrar um depósito mineral dada à presença de uma evidência pode ser expressa por

$$P\{D \mid B\} = P\{D\} \frac{P\{B \mid D\}}{P\{B\}} \quad (2.8)$$

onde $P\{D \mid B\}$ é a probabilidade condicional *a posteriori* de um depósito existir dada a presença de um padrão binário (B). $P\{D\}$ é a probabilidade *a priori* de um depósito existir e $P\{B \mid D\} \setminus P\{B\}$ é o fator a ser multiplicado.

O mesmo modelo pode ser expresso na forma de *Odds*, os quais podem ser definidos como a razão da probabilidade de um evento ocorrer pela probabilidade de ele não ocorrer; ou seja, $P\{D\} \setminus (1-P\{D\})$, ou $P\{D\} \setminus P\{\text{Não}D\}$. O Método Pesos de Evidência usa o logaritmo natural dos *Odds*, então

$$\frac{P\{D \mid B\}}{P\{\text{Não}D \mid B\}} = \frac{P\{D\} \cdot P\{B \mid D\}}{P\{\text{Não}D \mid B\} \cdot P\{B\}} \quad (2.9)$$

porém, pela definição de probabilidade condicional:

$$P\{\text{Não}D \mid B\} = \frac{P\{\text{Não}D \cap B\}}{P\{B\}} = \frac{P\{B \mid \text{Não}D\} \cdot P\{\text{Não}D\}}{P\{B\}} \quad (2.10)$$

então, substituindo a expressão $P\{\text{Não}D \mid B\}$ de (2.10) pelo denominador do lado direito da equação (2.9), obtém-se a seguinte equação:

$$\frac{P\{D \mid B\}}{P\{\text{Não}D \mid B\}} = \frac{P\{D\}}{P\{\text{Não}D\}} \cdot \frac{P\{B\}}{P\{B\}} \cdot \frac{P\{B \mid D\}}{P\{B \mid \text{Não}D\}} \quad (2.11)$$

e, substituindo a equação anterior por *Odds*, obtém-se:

$$O\{D \setminus B\} = O\{D\} \frac{P\{B \setminus D\}}{P\{B \setminus \text{Não}D\}} \quad (2.12)$$

onde $O\{D \setminus B\}$ é o *Odds a posteriori* de D dada a presença de um padrão binário indicador B, $O\{D\}$ é o *Odds a priori* de D e $P\{B \setminus D\} \setminus P\{B \setminus \text{Não}D\}$ é conhecido como **Razão Suficiência LS**.

No Método Pesos de Evidência, é usado o log n dos *Odds* e o log n de **LS** é o peso positivo de evidência (W^+), o qual é calculado a partir dos dados; com isso, chega-se a seguinte equação:

$$\text{Log n } O\{D \setminus B\} = \text{Log n } O\{D\} + W^+ \quad (2.13)$$

Manipulações algébricas similares conduzem à derivação da expressão *Odds* para a probabilidade condicional de D ocorrer dada a ausência de um padrão binário indicador, o que gera a seguinte equação:

$$O\{D \setminus \text{Não}B\} = O\{D\} \frac{P\{\text{Não}B \setminus D\}}{P\{\text{Não}B \setminus \text{Não}D\}} \quad (2.14)$$

O termo $P\{\text{Não}B \setminus D\} \setminus P\{\text{Não}B \setminus \text{Não}D\}$ é chamado **Razão Necessidade LN** e o log n de LN é, nesse método, o peso negativo de evidência (W^-). Obtém-se, então, a equação:

$$\text{Log n } O\{D \setminus \text{Não}B\} = \text{Log n } O\{D\} + W^- \quad (2.15)$$

LS e **LN** são também chamados Razões de Probabilidade. O objetivo de usar os pesos nesse método dos Pesos de Evidência é a necessidade de calculá-los para cada mapa evidência

independente e, somente após, combiná-los em uma única equação. Isso requer a suposição de Independência Condicional, à qual, como em muitos modelos, não se ajusta perfeitamente aos dados, mas produz uma simplificação que, quando tratada com cuidado, é passível de utilização em predições. A suposição de Independência Condicional ocorrer na combinação de dois mapas evidência B1 e B2 (probabilidade condicional de um depósito mineral ocorrer dada à presença de dois mapas evidência) pode ser expressa como:

$$P\{B1 \cap B2 \mid D\} = P\{B1 \mid D\} \cdot P\{B2 \mid D\} \quad (2.16)$$

Com isso, a probabilidade de um depósito ocorrer dada à presença de dois mapas evidência pode ser expressa como:

$$P\{D \mid B1 \cap B2\} = P\{D\} \cdot \frac{P\{B1 \mid D\}}{P\{B1\}} \cdot \frac{P\{B2 \mid D\}}{P\{B2\}} \quad (2.17)$$

Usando a formulação *Odds*, o *Odds a posteriori* pode ser expresso como:

$$O\{D \mid B1 \cap B2\} = O\{D\} \cdot LS1 \cdot LS2 \quad (2.18)$$

ou, na forma log natural com os pesos de evidência:

$$\ln O\{D \mid B1 \cap B2\} = \ln O\{D\} + W_1 + W_2 \quad (2.19)$$

Quando da combinação de dois mapas evidência, três outras possibilidades ainda existem e podem ser expressas como:

$$\ln O\{D \setminus B1 \cap \text{Não}B2\} = \ln O\{D\} \cdot W_1^? \cdot W_2^? \quad (2.20)$$

$$\ln O\{D \setminus \text{Não}B1 \cap B2\} = \ln O\{D\} \cdot W_1^? \cdot W_2^? \quad (2.21)$$

$$\ln O\{D \setminus \text{Não}B1 \cap \text{Não}B2\} = \ln O\{D\} \cdot W_1^? \cdot W_2^? \quad (2.22)$$

Por fim, quando n mapas evidência existirem, haverá 2^n combinações possíveis. Nesse caso, a expressão geral será:

$$\ln O\{D \setminus B1 \cap B2 \cap B3 \cap \dots \cap Bn\} = \ln O\{D\} \cdot \prod_{i=1}^n W_i^? \quad (2.23)$$

Com relação ao problema da Independência Condicional (IC), na prática, ela provavelmente será sempre violada em algum grau. Porém, quando os Pesos de Evidência são calculados a partir dos dados, é possível o exame da magnitude do problema IC com o auxílio de testes estatísticos, de maneira a permitir a rejeição, ou a modificação das evidências com problemas sérios de IC. Para o exame da existência de IC, dois métodos são habitualmente executados: Teste Par a Par e Teste Geral.

O **Teste Par a Par**, envolve, como o próprio nome diz, testes para todos os pares de mapas binários a serem usados na integração para mapeamento de favorabilidade mineral. A partir da consideração de IC de dois mapas a serem integrados, ou seja, que a probabilidade condicional de B1 estar presente é independente da presença de B2 e vice-versa, pode-se declarar que:

$$P\{B1 \setminus B2\} = P\{B1\} \text{ e } P\{B2 \setminus B1\} = P\{B2\} \quad (2.24)$$

Com isso, tabelas de contingência e qui quadrado (χ^2) podem ser usadas para caracterizar o grau de associação entre os dois padrões binários e, com cuidados, também podem ser usadas como testes de independência estatística. A variação dos valores de χ^2 para dados de área em função da unidade de medida pode ser minimizada com o uso de IC dos padrões em relação a um conjunto de depósitos considerados como pontos, ou como pequenas unidades de área (*pixel*). A equação (2.16) satisfaz a relação de IC de dois padrões em relação aos depósitos minerais. Com base nessa equação, pode-se estabelecer que:

$$N\{B1 \cap B2 \cap D\} \approx \frac{N\{B1 \cap D\}N\{B2 \cap D\}}{N\{D\}} \quad (2.25)$$

O lado esquerdo dessa equação (2.25) estabelece o número de depósitos observados em uma região de sobreposição dos padrões B1 e B2 (os dois padrões estão presentes), enquanto o lado direito da equação estabelece o número de depósitos esperados, ou previstos nessa região de sobreposição. Essa equação representa uma tabela de contingência com os valores observados e esperados (2x2) para teste de IC se as demais possibilidades (presença somente de um padrão (B1), presença somente do outro padrão (B2), ausência dos dois padrões) forem utilizadas (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Tabela de Contingência para teste de IC, baseada em células que contêm somente um depósito. Os quatro valores dentro da tabela correspondem aos valores observados e aos valores esperados, com a suposição de independência e os valores calculados pela equação 2.25. Há 1 grau de liberdade.

	B1 Presente	B1 Ausente	
B2 Presente	$N\{B1 \cap B2 \cap D\}$	$N\{\text{Não}B1 \cap B2 \cap D\}$	$N\{B2 \cap D\}$
B2 Ausente	$N\{B1 \cap \text{Não}B2 \cap D\}$	$N\{\text{Não}B1 \cap \text{Não}B2 \cap D\}$	$N\{\text{Não}B2 \cap D\}$
	$N\{B1 \cap D\}$	$N\{\text{Não}B1 \cap D\}$	$N\{D\}$

Com base em tabelas de contingência, pode-se então calcular os valores de χ^2 por meio da equação:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^4 \frac{(\text{Observado}_i - \text{Esperado}_i)^2}{\text{Esperado}_i} \quad (2.26)$$

Esses valores são então comparados com os valores tabelados de χ^2 com 1 grau de liberdade. Em um nível de probabilidade de 98%, não há razão para se rejeitar hipóteses de IC com valores de χ^2 menores que 5.4. Com correção de Yates (Walker & Lev, 1953), usada nos casos de frequências esperadas menores, o valor limite de χ^2 reduz-se para 3.24, de acordo com a equação:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^4 \frac{(|\text{Observado}_i - \text{Esperado}_i| - 0.5)^2}{\text{Esperado}_i} \quad (2.27)$$

Nos casos em que o valor absoluto da diferença entre o valor observado e o valor esperado é menor que 0.5, a correção de Yates não é feita.

Os cálculos de IC par a par para todos os pares de mapas possíveis em uma integração podem se tornar dispendiosos se forem usados muitos mapas binários. Nesses casos, planilhas eletrônicas devem ser usadas, de maneira a facilitar a execução do procedimento.

Em mapeamentos de favorabilidade mineral, onde se assume que probabilidade *a priori* deve ser a densidade média de depósitos minerais conhecidos, o denominado **Teste Geral** também pode ser aplicado. Esse teste faz uma previsão do número total de depósitos para a área em estudo. O método sugere que, se o número de depósitos previstos for muito maior que o número de depósitos observados, pode haver violação de IC. A seguinte equação estabelece essas relações:

$$N\{D\} = \sum_{k=1}^m P_k \cdot N\{A\}_k \quad (2.28)$$

onde $N\{D\}$ é o número de depósitos previstos, calculado a partir do somatório dos produtos das áreas em unidades de cela ou *pixel* $N\{A\}$ pela probabilidade a posteriori P de todas as classes ($k = 1,2,3,4,\dots,m$) do mapa.

Por último, apresenta-se um resumo dos passos a serem seguidos na aplicação do método Pesos de Evidência no mapeamento de potencial mineral. As etapas podem ser assim descritas:

- 1) escolha dos mapas que serão usados como evidência na predição de áreas favoráveis à ocorrência de depósitos minerais. Para esse processo de seleção, um tipo de depósito e o seu modelo conceitual associado devem ser utilizados.
- 2) para cada mapa, assumido que sejam multi-classe, deve-se determinar um esquema de reclassificação otimizado, de maneira a convertê-lo para binário (mapa com duas classes), maximizar a associação espacial entre o mapa e os depósitos conhecidos e calcular os pesos respectivos.
- 3) exame do problema de Independência Condicional entre as evidências binárias. As evidências com problemas devem ser rejeitadas, ou combinadas, de maneira a reduzi-lo.
- 4) combinação dos mapas evidência com os pesos calculados no passo 2, por meio da equação (2.23). Esse processo pode ser feito com a linguagem de modelamento interna ao **SIG** que está sendo utilizado.
- 5) produção dos novos mapas de probabilidade *a posteriori* com as áreas de favorabilidade.

O Método Pesos de Evidência necessita um maior tempo computacional; porém, produz uma estimativa mais objetiva dos pesos utilizados, que refletem associações espaciais entre as evidências e os depósitos conhecidos. Por outro lado, é necessário a existência de uma razoável quantidade de dados para a probabilidade *a priori* (ex.: depósitos minerais conhecidos), de maneira que os novos depósitos encontrados não modifiquem consideravelmente a classificação de favorabilidade das áreas. Opcionalmente, existem outros métodos de estimativa da potencialidade de áreas (McCammon & Kork, 1992), que podem ser usados. A estimativa resultante pode então ser escolhida como probabilidade *a priori* no Método Pesos de Evidências, no caso de áreas pouco conhecidas.

Capítulo 3

Metodologia da integração de dados para a pesquisa mineral de Au na ICR

A exploração mineral envolve a redução progressiva da área de pesquisa em uma série de estágios, ou fases. Em cada estágio, há uma tomada de decisão em relação às áreas que serão descartadas e às áreas que continuarão a ser estudadas em maior detalhe. Essa tomada de decisão baseia-se na presença, ou na ausência de uma série de feições geológicas, geofísicas, geoquímicas, entre outras, as quais Hodgson (1990) denomina como “critérios de seleção de áreas para exploração”.

O trabalho do especialista em exploração consiste, principalmente, em definir prévia e claramente esses critérios de seleção de áreas. Hodgson (1990) chama esse trabalho de “estratégia de exploração”. A melhor estratégia de exploração é aquela que otimiza a relação custo-benefício e usa critérios apropriados e passíveis de identificação, espacial e geneticamente relacionados ao modelo de depósito mineral utilizado.

Com base nessas assertivas, o uso do **SIG**, principalmente nos estágios iniciais (pequena e média escalas) de exploração, onde o objetivo consiste em definir áreas de favorabilidade mineral em relação ao tipo de depósito procurado, parece ser extremamente importante, prático, eficiente e de baixo custo. Assim, a metodologia usada nesse trabalho é fundamentalmente baseada na integração de dados de várias origens por meio da utilização de técnicas de modelamento de potencial (ou favorabilidade mineral) em um ambiente **SIG**.

O processo de integração de dados para a produção de mapas de favorabilidade mineral foi caracterizado pelas seguintes fases, ou etapas (Fig. 3.1):

- 1) estabelecimento dos modelos conceituais de depósito mineral e de exploração mineral;
- 2) construção da base de dados espaciais;

- 3) processamento dos dados;
- 4) aplicação de modelos de integração para a geração de mapas de favorabilidade mineral.

3.1 Modelo conceitual de depósito mineral e modelo de exploração

As exigências sobre estratégias de exploração mineral das empresas de mineração ou de exploração requerem análises de risco cada vez mais criteriosas e precisas, especialmente em função do aumento de competitividade, da diminuição na disponibilidade financeira e dos baixos preços dos bens primários no mercado. Assim, os processos de tomada de decisão vêm diminuindo parte de seu caráter pessoal e progressivamente aumentando o caráter impessoal, numérico, quantitativo, baseado em critérios previamente definidos. Essa nova “tecnologia de exploração mineral” compreende primeiramente estudos de modelos de depósitos minerais; com base nesses modelos previamente definidos, é realizada a avaliação qualitativa e quantitativa de favorabilidade mineral regional e, por conseqüência, são identificados hierarquicamente os alvos para posterior avaliação individualizada.

A tecnologia de integração de dados para exploração mineral exige observações criteriosas a respeito da aquisição, do processamento e da análise das informações. Nesse sentido, o domínio completo da informação depende do desenvolvimento de uma crítica contínua sobre os dados, as técnicas de coleta dos dados, as técnicas de processamento, de análise, de modelamento e de interpretação, bem como estudos a respeito da eficácia das variáveis selecionadas e dos critérios prospectivos utilizados. Esse contínuo processo interrogativo e a necessidade de manipulação de um número cada vez maior de dados podem ser facilitados pelo uso da “Geotecnologia”, principalmente quando apoiada em **SIG**, entendendo Geotecnologia como a arte e a técnica de estudar a superfície da terra e adaptar as informações e o conhecimento às necessidades dos meios físicos, químicos e biológicos. O uso de **SIG** tem se tornado essencial, principalmente em função do caráter espacial e topológico das variáveis usadas no processo de análise de favorabilidade mineral.

Os indícios diretos da existência de depósitos minerais são cada vez mais raros, principalmente nos países desenvolvidos. A partir do crescente aumento no conhecimento geológico das províncias minerais, a seleção de alvos deve, então, ser baseada na análise e na quantificação de variáveis indiretas, o que determina um certo grau de incerteza nos resultados. Felizmente, essa incerteza pode ser drasticamente reduzida 1) com o

desenvolvimento dos modelos de depósito, 2) com o desenvolvimento nos métodos de análise e de modelamento a serem utilizados na exploração e 3) com um aumento na quantidade e na qualidade da informação existente.

Esse conjunto de informações, dentro da nova “tecnologia de exploração mineral”, pode ser otimizado se for organizado e processado na forma de níveis (camadas) georreferenciados. Os mapas podem ser divididos em células ou ainda polígonos, que delimitam unidades de área cujos atributos estão discriminados em tabelas e permitem avaliar a favorabilidade mineral de uma região. Tal configuração pode ser quantificada por meio da integração ponderada das n variáveis reconhecidas em cada célula, ou em cada polígono. A avaliação de favorabilidade compreende a atribuição ou ponderação de pesos para as variáveis utilizadas, o que depende de sua importância como guias prospectivos e de sua associação espacial e genética em relação aos processos de mineralização.

A seleção das variáveis a serem utilizadas e a posterior quantificação de um ponderador (análise numérica) que reflita a importância das variáveis diagnósticas são definidas no Modelo de Exploração, que, por sua vez, está baseado no Modelo Conceitual de Depósito Mineral definido para a área em estudo.

Os depósitos minerais são agrupados, ou classificados em diferentes classes e/ou tipos com base em suas características principais. Cada classe e/ou tipo de depósito mineral, independente da classificação usada, é representada por um depósito mineral idealizado e denominado **Modelo de Depósito Mineral**, o qual detém as características mais importantes e predominantes da classe, denominadas de “atributos essenciais” (Figueiredo, 1992). Esses modelos de depósito mineral são na verdade **Modelos Conceituais**, 1) que organizam e descrevem as características típicas de um grupo de depósitos minerais conhecidos e de sua forma de ocorrência (modelo descritivo) e 2) que são acompanhados por análises e interpretações dos processos de formação do tipo, ou classe de depósito considerado (modelo genético). Esses modelos, todavia, estão continuamente sendo desenvolvidos, em função da obtenção de novas informações; além disso, a gênese de um modelo de depósito mineral é muito sensível às modificações introduzidas a partir de quaisquer novas informações que sejam obtidas, ou a partir da utilização de sistemáticas novas de interpretação das informações existentes.

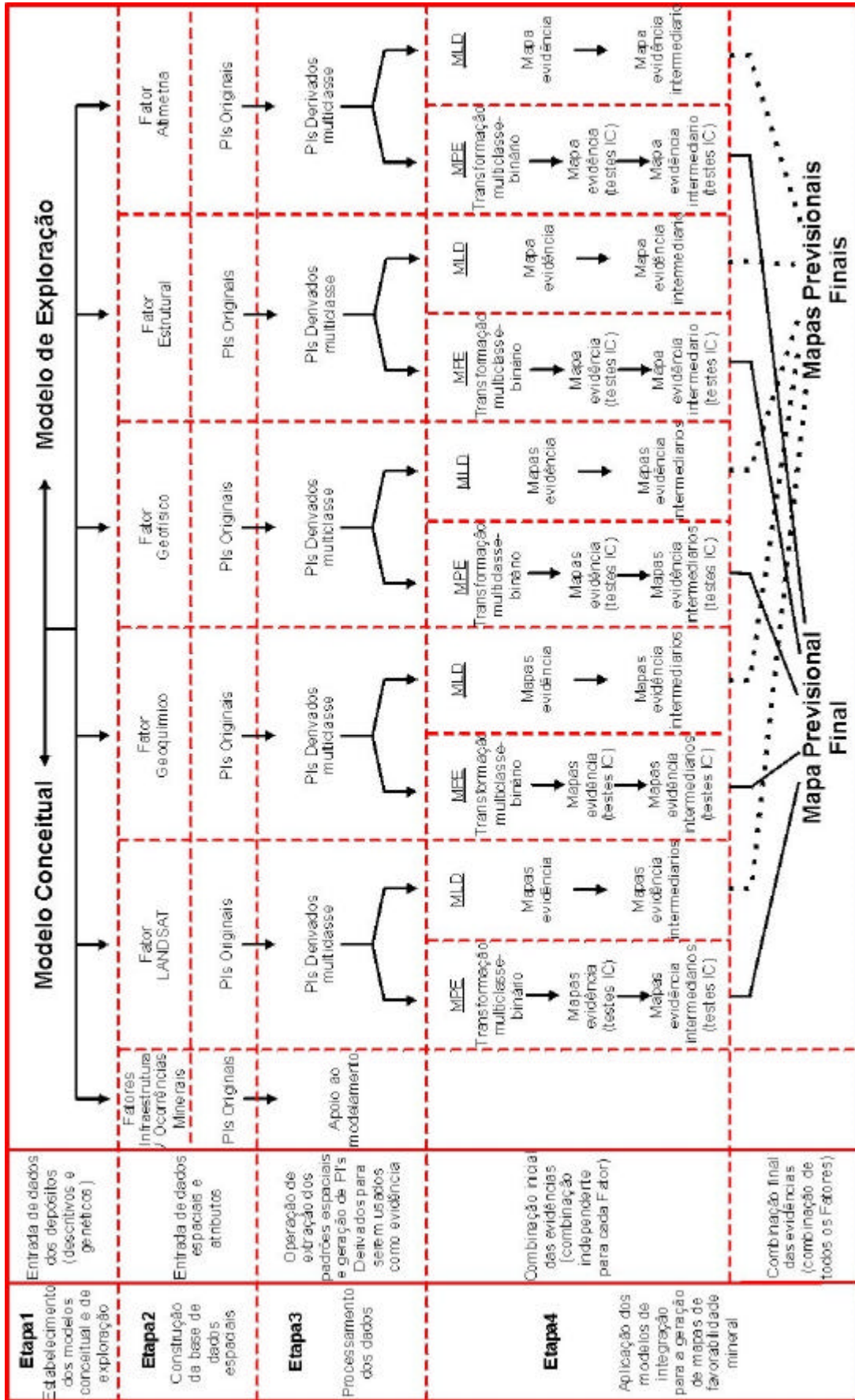


Figura 3.1 – Esquema geral do modelamento usado no trabalho. MPE = Modelamento Pesos de Evidência. MLD = Modelamento Lógica Difusa.

O **Modelo de Exploração** é composto pelas características exploratórias do Modelo Conceitual de depósito definido e forma um conjunto cognitivo baseado em uma ampla variedade de informações geocientíficas, econômicas e sócio-políticas, que objetiva indicar padrões que funcionem como guias exploratórios. O modelo de exploração orienta a seleção dos dados e a extração das feições e dos padrões importantes para o mapeamento de favorabilidade mineral; a partir disso, guia os procedimentos de combinação dos dados e a atribuição dos pesos a serem dados aos mapas previsionais, principalmente no caso da utilização de modelos de potencial mineral dirigidos pelo conhecimento.

O depósito tipo para o modelo conceitual utilizado nessa Tese de Doutorado é o **Depósito Aurífero San Gregorio**, principal depósito mineral da **ICR**. Esse depósito foi classificado por Quadros (1995) como um **depósito epigenético, meso a epitermal** (meso a epizonal) segundo os conceitos de Lindgren (1933) e como um **depósito oxidado de baixa temperatura** segundo a classificação de Mickuki & Ridley (1993). O Depósito Aurífero San Gregorio compreende a maioria das características diagnósticas apresentadas pelos demais depósitos e ocorrências minerais conhecidas na **ICR**; todas as ocorrências são epigenéticas, concentram-se em veios auríferos de quartzo e/ou ocorrem na forma disseminada juntos aos veios, são controlados por estruturas do Sistema de Cisalhamento de Rivera, possuem alteração hidrotermal associada e hospedam-se em rochas básicas e graníticas afetadas por deformação e por alteração hidrotermal.

As principais características do **depósito tipo San Gregorio** (Quadros, 1995) que constituem o **Modelo de Exploração** são as seguintes:

- 1) o Depósito Aurífero San Gregorio foi gerado em uma estrutura do tipo ***duplexing at bend***, denominada Estrutura San Gregorio, que é formada por falhas e faixas miloníticas do tipo P e R em arranjo transtrativo. Essas estruturas condicionaram o fluxo dos fluidos mineralizantes. A Estrutura San Gregorio (**ESG**) faz parte de um grande sistema de cisalhamento de caráter transcorrente e sentido dextrógiro de deslocamento, que possui um padrão anastomosado e transtrativo, que corta toda a Ilha Cristalina de Rivera (**ICR**) e que foi denominado Sistema de Cisalhamento Rivera (**SCR**). Esse sistema, visível em imagens de satélite, representa o guia mais importante do Modelo de Exploração definido para a **ICR**, visto que todas as ocorrências minerais conhecidas encontram-se associadas a essas estruturas. Uma segunda estrutura, também, definida em imagens de satélite a partir da extração de fotolineamentos e de processamentos específicos, mostra forma elíptica e

pode ter participado da geração do Depósito San Gregorio; mas, esse elemento estrutural ainda deve ser discutido e investigado adicionalmente.

- 2) O estudo das estruturas identificou a existência de duas fases de deformação, denominadas D1 e D2. A fase D1 produziu as estruturas denominadas WNW, que são predominantes no **SCR** e que foram responsáveis pela formação de áreas transtrativas (p.ex.: **ESG**) e pelo condicionamento estrutural do Depósito San Gregorio. A fase D2, posterior, produziu as estruturas denominadas NNW e NE, que deslocaram e rotacionaram as estruturas D1. Essas estruturas D1 são obtidas de imagens de satélite em papel com a utilização de técnicas de extração de lineamentos.
- 3) A zona de cisalhamento corta, na área do depósito San Gregorio, encaixantes granodioríticas e é preenchida principalmente por rochas dioríticas e sienograníticas sin-transcorrentes em relação ao **SCR**. Essas rochas são localmente milonitizadas e separadas, na **ESG**, por um veio de quartzo mineralizado e por um feldspato alcalino granito.
- 4) A alteração hidrotermal gerada na **ESG** a partir de interações entre os fluidos mineralizantes canalizados na zona de cisalhamento e as encaixantes reativas, sob um regime polifásico com elevadas razões fluido-rocha, produziu seis fases de paragênese, distribuídas e desenvolvidas no tempo e no espaço de maneira a formar halos de alteração. As fases iniciais, mais pervasivas, distribuíram-se em uma área maior, enquanto as fases posteriores, venulares, restringiram-se às porções mais centrais da zona de cisalhamento.
- 5) As paragêneses hidrotermais, as texturas e as estruturas que ocorrem no Depósito San Gregorio indicam um ambiente do tipo frágil-dúctil, sin a pós-deformacional durante a sua formação, onde as temperaturas e pressões atuaram em condições retrogressivas e equivalentes ao fácies metamórfico xistos-verde.
- 6) O hidrotermalismo caracterizou-se pela formação dos seguintes processos principais: cloritização, carbonatação, sericitização, sulfetação, silicificação e oxidação. A seqüência evolutiva da mineralização está associada aos cinco últimos processos, distribuídos em três fases auríferas: a primeira está associada à carbonatação, sericitização e sulfetação; a segunda está associada à silicificação, carbonatação e sulfetação; e a terceira está associada à oxidação. A mineralização foi mais importante nas rochas dioríticas, mais reativas em relação aos fluidos mineralizantes, e no veio de quartzo, formado pelos processos hidrotermal e deformacional. O processo de mineralização nos granitos ocorreu

principalmente devido ao comportamento mais competente (frágil) e, nesse caso, mais permeável ao final da deformação. A alteração hidrotermal associada à formação do depósito aurífero é um importante guia a ser utilizado nos trabalhos de mapeamento geológico e no tratamento de imagens de satélite e de dados aerogamaespectrométricos. A ocorrência de mineralização aurífera em encaixantes graníticas afetadas por eventos deformacionais e, principalmente, em rochas dioríticas reativas, transforma esses litotipos em importantes guias da mineralização.

- 7) As análises do minério, alicerçadas por dados geoquímicos, indicaram uma associação Au-Ag-Pb no Depósito San Gregorio, o que resultou na formação de electrum e de galena associados à pirita e ao quartzo nas duas fases mineralizadoras iniciais. A última fase, por outro lado, mostrou a ocorrência de ouro associado à goethita, o que sugere um caráter mais remobilizador para essa fase.

Essas características prospectivas foram analisadas e organizadas no Modelo de Exploração San Gregorio, de maneira a serem buscadas com os dados de exploração existentes e em processo de aquisição. Esses dados foram agrupados e implementados de modo a reunirem, em grupos distintos, as informações que possuíssem características relacionadas entre si em função do objetivo de mapeamento de favorabilidade mineral com base no Modelo de Exploração. Esses agrupamentos de padrões diagnósticos foram denominados de **Fatores de Integração**.

A **necessidade** e a **suficiência** de cada critério diagnóstico, propriedades mais importantes usadas em trabalhos de quantificação de favorabilidade (Rostirolla, 1997; Rostirolla *et al.*, 1998), foram consideradas nos processos de modelamento de favorabilidade mineral. A propriedade **necessidade** foi atribuída aos padrões que sempre ocorrem associados às ocorrências minerais conhecidas e representadas pelo depósito tipo do Modelo de Exploração, enquanto a propriedade **suficiência** foi atribuída aos padrões onde sua ocorrência representa um forte indício da existência de ocorrências minerais do tipo buscado pelo Modelo de Exploração. Essas propriedades foram usadas de uma maneira qualitativa (empírica) no modelamento suportado pelo conhecimento e de uma forma quantitativa no modelamento baseado nos dados.

3.2 Construção e processamento da base de dados

Os dados foram coletados, organizados e processados separadamente, por **Fator de Integração**, dispostos na forma de camadas (*layers*) denominadas **Planos de Informação (PIs)**. Os fatores de integração representam temas de interesse, de acordo com o objetivo de mapeamento de favorabilidade mineral e com o Modelo de Exploração definido.

A organização e o processamento dos dados são as fases de maior consumo de tempo do trabalho. A extensão da área de estudo e o sistema de projeção cartográfica foram definidos na etapa de construção da base de dados. Os dados foram coletados, organizados e preparados (transformados para o formato digital) para uso nos programas aplicativos do ambiente SIG e, posteriormente, no Sistema de Informações Geográficas. Na etapa de processamento, os dados passaram por inúmeras transformações, de maneira a otimizar a extração das informações neles contida para uso no processo de integração propriamente dito. Os resultados dessas duas etapas são apresentados na forma de mapas derivados e foram usados diretamente no processo de modelamento de favorabilidade mineral, que compreendeu a última etapa do trabalho.

O **Fator Infraestrutura** foi constituído pelos dados do sistema viário e da rede hidrográfica. Esses dados não foram utilizados diretamente no processo de integração para mapeamento de áreas de favorabilidade mineral; porém, serviram de base para a construção de outros **PIs**, os quais tiveram utilização direta no processo de predição mineral.

O **Fator Estratigráfico** foi planejado de maneira a conter o mapa geológico, com as unidades geológicas aflorantes na **ICR** e os mapas de proximidade às rochas-guia (rochas básicas, veios de quartzo sulfetados, granitos afetados por deformação). Esse fator não pôde ser gerado por insuficiência de informações provenientes do mapeamento geológico, não concluído à época do término desse trabalho.

O **Fator Alteração Hidrotermal** foi planejado de modo a compreender mapas de proximidade às zonas de alteração hidrotermal (carbonatação, sericitização, sulfetação, silicificação e oxidação) e seria gerado a partir de mapa de alterações hidrotermais. Os dados constituintes desse fator também não foram produzidos até o término desse trabalho.

O **Fator Ocorrências Minerai**s foi constituído por uma tabela e um *layer* correspondente, compostos pelas ocorrências minerais conhecidas da **ICR**. As informações

desse fator foram utilizadas como apoio fundamental para vários processos interrogativos, analíticos e de integração executados ao longo do trabalho.

O **Fator LANDSAT** foi formado por duas imagens temáticas, geradas a partir de imagens orbitais LANDSAT TM-5. As imagens temáticas resultaram de dois diferentes processamentos, que objetivaram gerar informações referentes às litologias da **ICR** e detectar alvos com base em feições que refletissem a ocorrência de hidrotermalismo com a mesma tipologia encontrada no Depósito San Gregorio.

O **Fator Geoquímico** gerou três mapas, que são constituídos pelas bacias de drenagem e que correspondem aos dados de sedimentos de corrente, concentrados de minerais pesados e *Bulk Cyanide Leach Method (BLEG)*. As bacias anômalas foram usadas no modelamento de favorabilidade mineral como necessárias, em função da resposta direta e relativamente confiável desse tipo de dado prospectivo, apesar dos problemas de ausência de dados em determinados setores da **ICR**.

Os dados de aerogamaespectrometria e aeromagnetometria provêm de levantamento aerogeofísico de alta resolução executado na **ICR** e serviram de base para o **Fator Geofísico**. Os dados aerogamaespectrométricos foram processados de maneira a gerar mapas que salientassem áreas afetadas por hidrotermalismo potássico. Os dados aeromagnetométricos foram processados e utilizados como apoio para análises e interpretações geológico-estruturais.

O **Fator Estrutural** foi constituído por mapas gerados com base na extração de fotolineamentos a partir de imagens orbitais LANDSAT TM-5. Os fotolineamentos refletem as estruturas do **SCR**, às quais possuem íntima relação com a geração das ocorrências minerais, já que atuaram como conduto para a percolação de fluidos e como zonas dilatacionais que possibilitaram a concentração de minério. Os mapas de fotolineamentos constituíram a base de mapas de proximidade que foram usados na integração de dados para mapeamento de favorabilidade mineral. Os dados desse fator foram considerados altamente necessários à formação de ocorrências minerais na **ICR**.

O **Fator Altimetria** foi formado pelo modelo digital de terreno, que representou as feições geomorfológicas da **ICR** e que refletem as estruturas mais marcantes do **SCR**.

Uma descrição detalhada das etapas de construção e de processamento dos dados é encontrada no capítulo 4.

3.3 Aplicação de modelos de integração para a geração de mapas de favorabilidade mineral

A última etapa do trabalho compreendeu a integração dos vários *layers*, ou mapas de evidência, para estimar o potencial mineral da **ICR** por meio de mapas de favorabilidade mineral. Como regra geral, o processo de integração envolveu a combinação das evidências inicialmente dentro de cada fator, para posteriormente ser realizada a integração com os mapas evidência de cada fator de integração. O processo de integração foi realizado com o método dirigido pelo conhecimento, denominado **Lógica Difusa**, e com o método dirigido pelos dados, denominado **Pesos de Evidência**. Ao final, foi realizado um estudo comparativo, em bases qualitativa e quantitativa, entre os resultados apresentados pelos dois métodos. A descrição detalhada desses procedimentos é apresentada no capítulo 5.

No método **Pesos de Evidência**, os mapas evidência multiclasse utilizados foram reclassificados para a forma binária (mapas com duas classes) com o uso do contraste otimizado como valor de limiar. A estimativa dos pesos foi feita de maneira a maximizar a associação espacial entre os depósitos conhecidos e os padrões previsionais (evidências). Testes de Independência Condicional (**IC**) foram executados para os mapas evidência, de maneira a permitir a rejeição, ou a combinação das evidências com problemas sérios de **IC**. A combinação dos mapas evidência foi realizada a partir de um mapa *Unique Conditions* e de uma tabela associada; o cálculo de probabilidade final foi feito em planilha eletrônica (Excel[#]). O produto final foi um mapa de probabilidades *a posteriori* com as áreas de favorabilidade.

Os elementos (feições e padrões classificados) espaciais constituintes dos mapas evidência usados na integração pelo método **Lógica Difusa**, foram tratados como funções-membro do conjunto Lógica Difusa (proposição) denominado “áreas favoráveis para conter um depósito aurífero tipo San Gregorio”. A atribuição dos valores de função-membro Lógica Difusa para as classes das evidências foi realizada de acordo com o julgamento da importância dessas evidências em relação à proposição estabelecida. Isso permitiu a combinação das evidências, de acordo com a rede de inferências previamente definida. A operação de combinação das evidências e a consequente geração do mapa de favorabilidade final foi executada com uma operação de modelamento de mapas no SPANS-GIS[#].

Os mapas de favorabilidade mineral produzidos pelos dois métodos (Lógica Difusa e Pesos de Evidência) foram qualitativa e quantitativamente comparados. A determinação da medida de correlação entre os mapas potenciais finais foi feita por meio da utilização do

coeficiente de correlação de *ranks* de Spearman e do coeficiente de contingência. A identificação visual das diferenças foi feita com matriz de sobreposição.

3.4 Equipamentos e infra-estrutura

A infra-estrutura de campo e os gastos com material de escritório e outros necessários à execução do trabalho, foram suportados pelas empresas Rea Gold Inc. e, posteriormente, pela Crystallex International Corporation. Os dados de geologia, geoquímica e aerogeofísica também foram fornecidos pelas empresas. As imagens LANDSAT TM 5 foram adquiridas junto ao INPE. Os dados cartográficos foram adquiridos junto ao Servicio Geografico Militar – Uruguay.

Os trabalhos de escritório foram feitos no Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro (LAPES) do Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia (UFRGS).

Para a execução desse trabalho de integração de dados em exploração mineral, o primeiro de uma série de trabalhos com utilização de SIG em desenvolvimento no LAPES, foram adquiridos os seguintes *softwares*:

- ?? ENVI 2.6[#], Research Systems Inc. (versões em Unix e Windows), utilizado nos trabalhos de processamento e de classificação de imagens de sensores remotos.
- ?? Oasis Montaj[#] (versões 4.1.b, 4.2 e 4.3 em Windows), foi usado no processamento dos dados aerogeofísicos.
- ?? SPANS[#] 6.0 TYDAC Research Inc. (versão Windows), foi o Sistema de Informações Geográficas utilizado nos trabalhos de integração de dados.
- ?? AutoCad 14[#] foi utilizado para os trabalhos de digitalização de dados na forma vetorial.
- ?? GSLIB e Statistica[#] V. 5.1 foram usados para os processamentos e análises estatísticas e geoestatísticas.

A extração dos padrões de reflectância espectro-radiométrica foi feita por meio do espectroradiômetro GER IRIS MK-V do Laboratório de Radiância Espectral da EMBRAPA-UnB, em Brasília (DF).

Os processamentos no ambiente Windows foram executados em PCs Pentium, enquanto os processamentos em ambiente Unix foram executados em estações de trabalho Sun e Sylicon Graphics.

Capítulo 4

Construção e processamento dos planos de informação para a integração de dados

O mundo real é constituído, em grande parte, por objetos distribuídos no espaço, cujas propriedades e/ou atributos são distintos e estão interrelacionados entre si ao longo do tempo (Aronoff, 1991). A complexidade da natureza pode ser traduzida na forma de dados geograficamente distribuídos, que são fundamentalmente caracterizados pela sua localização espacial, pelas dimensões/magnitudes das suas propriedades físicas e/ou químicas e pela sua posição no tempo.

Os modelos analógicos são simplificações do mundo real e são utilizados quando se pretende verificar a ocorrência, ou a distribuição espacial de determinados fenômenos da natureza. Segundo Valente *et al.* (1998) e Valente (1999), esses modelos procuram normalmente retratar a realidade de modo fracionado, pois enfocam principalmente as variáveis que se relacionam de forma mais relevante com o tema em análise e cujo comportamento espacial pode ser definido empiricamente, ou a partir de casos semelhantes.

No caso do estudo de variáveis distribuídas no espaço para fins de exploração mineral, o modelo conceitual e seu conseqüente modelo de exploração representam normalmente parte da complexidade do mundo físico. O mundo físico é então visualizado por meio de sucessivas camadas de informação (dados, variáveis), as quais reproduzem feições específicas da natureza, ou, em outras palavras, representam um determinado tema de interesse. Essas camadas são denominadas **Planos de Informações (PIs)** e podem ser relacionadas e combinadas, de modo a formar a nossa visão particular do mundo físico.

A metodologia usada nessa Tese classifica os **PIs** em dois tipos principais: os Planos de Informação Originais e os Planos de Informação Derivados. Os **Planos de Informação Originais** caracterizam-se principalmente por armazenarem informações provenientes

diretamente das fontes de dados originais. Os **Planos de Informação Derivados**, por outro lado, são aqueles padrões produzidos pela manipulação prévia dos outros **PIs**; nesse caso, podem ser o resultado de processamentos sobre os **PIs** originais, ou derivados, ou o resultado da combinação de **PIs**. Os **PIs** derivados selecionados para os processos de integração são denominados de **Evidências** por ocasião dos modelamentos de integração.

Os dados disponíveis para integração de dados em mapeamento de favorabilidade mineral na **ICR** foram coletados, selecionados e manipulados de maneira a constituírem os Planos de Informação Originais. Esses **PIs** foram gerados organizadamente em agrupamentos de modo a constituírem os **Fatores de Integração** para o mapeamento de favorabilidade mineral na **ICR**. Esses Fatores de Integração, ou simplesmente Fatores, foram implementados de modo a reunirem as informações que possuísem características relacionadas entre si em função do objetivo maior de mapeamento de potencial mineral segundo um Modelo de Exploração (Depósito San Gregorio).

Esse capítulo apresenta os procedimentos executados para cada Fator de Integração durante o desenvolvimento das etapas de construção do banco de dados e de processamento dos dados. A etapa de construção do banco de dados foi constituída basicamente pela coleta e pela preparação dos dados disponíveis relacionados ao tema mapeamento de favorabilidade mineral de ouro na **ICR**. A etapa de processamento dos dados caracterizou-se pela manipulação dos dados de maneira a possibilitar a extração das informações, feições e padrões importantes para a predição de áreas de favorabilidade mineral, sempre de acordo com o Modelo de Exploração desenvolvido para a área em estudo. Os resultados dessas etapas são mapas derivados e foram selecionados para a integração de dados propriamente dita, que é descrita no capítulo 5. A figura 4.1 apresenta uma relação sequencial dos **PIs** usados e gerados nessas etapas de construção e processamento dos dados.

O processo de transformação de dados analógicos para o formato digital foi realizado via mesa digitalizadora e os erros foram controlados de acordo com os parâmetros estabelecidos pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (**PEC**: Silva, 1999). Com isso, a geração dos produtos digitais (*layers* de dados no formato vetorial tipo ponto e tipo linha) teve seu erro médio quadrático **RMS** medido sempre abaixo de 40 m. Esse erro é permitido pelo **PEC** para a escala 1:50.000, usada na confecção das cartas topográficas feitas pelo *Servicio Geográfico Militar (R. O. del Uruguay)*.

Esquema Geral das Etapas de Construção e Processamento dos Dados

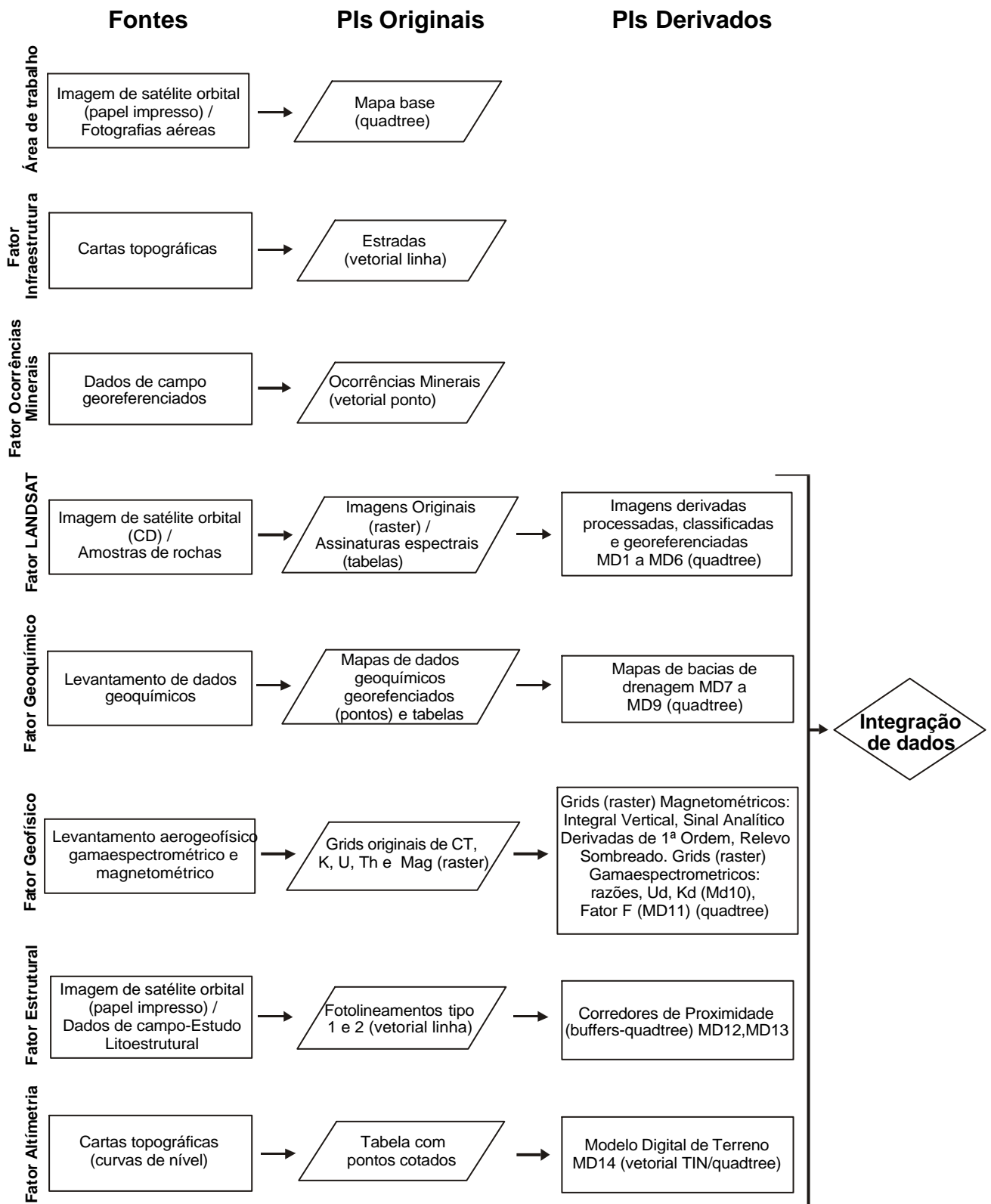


Figura 4.1 – Relação seqüencial das etapas de construção e processamento da base de dados.

4.1 Área de trabalho

A região compreendida pela Ilha Cristalina de Rivera (**ICR**) possui área de 2610,79 Km² e foi delimitada a partir de análise de imagens orbitais LANDSAT TM-5 e de fotografias aéreas em escala 1:20.000 do *Servicio Geográfico Militar (Republica Oriental del Uruguay)*. Os limites da área de trabalho foram digitalizados por processo manual, via mesa digitalizadora, com o auxílio do programa AutoCAD[#] (versão 14).

Esse dado vetorial foi transformado do formato AutoCAD[#] (*.dwg) para o formato *.dxf e, então, importado para o SPANS-GIS[#] por meio do módulo SPANS[#] *Vector Translator*. Esse módulo tem a capacidade de transformar arquivos vetoriais de várias extensões para o formato vetorial de importação *.vec / *.veh (extensão vec e cabeçalho veh), usado pelo SPANS-GIS[#]. No SPANS-GIS[#], esse arquivo (em par) foi então importado para a área de estudo como um *layer* (camada) de dados tipo linha no formato vetorial binário com extensão *.top / *.vtx. A área de estudo do SPANS-GIS[#] é um diretório onde são armazenados todos os dados espaciais e os atributos pertencentes a uma área geográfica específica, referenciada segundo um sistema de projeção cartográfico (Gauss-Uruguai). Essa área de estudo foi previamente aberta no SPANS-GIS[#], de maneira a cobrir toda a Ilha Cristalina de Rivera.

Esse *layer* área de trabalho (**contaton**) foi transformado para um *layer* vetorial tipo área e, então, para um arquivo tipo **quadtree** (Ebdon, 1992). Nesse trabalho, todos os **quadtrees** utilizam um fator **quadtree** 13, que correspondeu a uma resolução (tamanho de **pixel**) de aproximadamente 33 m. O **PI** original **contaton** foi, por fim, reclassificado para um padrão binário, que está definido como mapa base para a área de estudo no SPANS-GIS[#]. Desse modo, apenas a área correspondente à área de classe 1 do mapa base **contaton** de todos os demais **PIs** foi utilizada nas demais operações de processamento, análise e integração. Esse procedimento é semelhante à operação de mascaramento, que permite mascarar um **PI** qualquer usando o **PI** máscara (Felgueiras & Câmara, 1993). A figura 4.2 apresenta o fluxograma dos procedimentos gerais utilizados nesse item.

4.2 Fator infraestrutura

Os dados serviram de base para a construção de outros **PIs**, os quais tiveram utilização direta no processo de predição mineral. Nesse item, será descrita apenas a construção do

Plano de Informação **estradas**, visto que os demais **PIs** desse fator (drenagens e altimetria) serão descritos nos fatores onde sua utilização foi necessária.

Área de Trabalho - PI Mapa Base

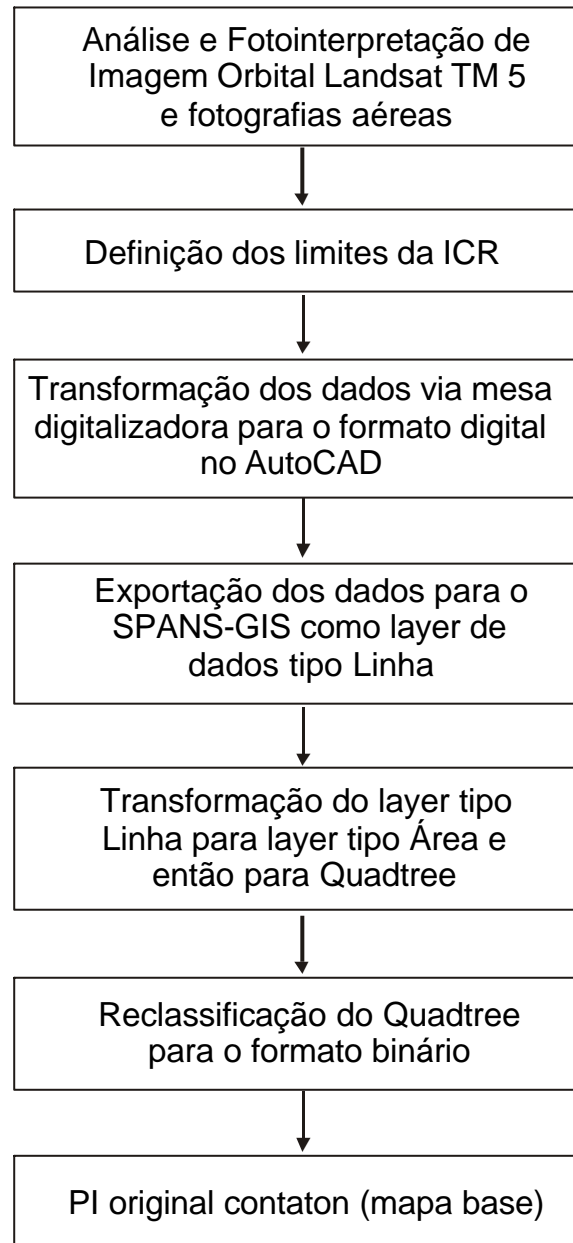


Figura 4.2 – Fluxograma de procedimentos para geração da área de trabalho.

O **PI estradas** foi extraído das seguintes cartas plani-altimétricas do *Servicio Geográfico Militar (Republica Oriental del Uruguay)* em escala 1:50000: Minas de Currales, Cuchilla del Umbú, Amarillo, Las Flores, Moirones, Alborada, Hospital e Vichadero. O sistema viário foi digitalizado manualmente por meio de mesa digitalizadora no AutoCAD.

Cada categoria de estrada (estrada principal e estrada secundária) foi digitalizada em *layers* separados no mesmo arquivo *.dwg. Esses *layers* foram usados no AutoCAD# como camadas que são comparadas a uma série de folhas transparentes sobrepostas e combinadas para formar um desenho completo de maneira a organizar suas diversas entidades (Kalameja, 1996).

Esses dados vetoriais (estradas) foram transformados do formato *.dwg para o formato *.dxf e, então, importados para o SPANS-GIS por meio do módulo SPANS *Vector Translator*, que os transformou em dois arquivos *.veh / *.vec. No SPANS-GIS, esses arquivos foram importados para a área de estudo como dois *layers* (estradas principais e estradas secundárias) de dados tipo linha no formato vetorial binário (extensão *.top / *.vtx). Esses *layers* (tipo ponto, linha, ou área) são armazenados como tabelas de atributos no SPANS-GIS, de forma que os dados podem ser visualizados diretamente como um mapa, ou podem ser usados como um *layer* tipo mapa em um SPANS *map composition* (composição de *layers* sobrepostos que formam um mapa com as feições geográficas, ou temas das entidades constituintes dos *layers* usados). Os *layers* (PIs originais) **estrada** foram armazenados na área de trabalho para servir como informação de apoio aos demais trabalhos (Fig. 4.3). A figura 4.4 apresenta o fluxograma dos procedimentos gerais utilizados nesse item.

4.3 Fator Ocorrências Minerais

As informações sobre ocorrências minerais de ouro na **ICR** foram resgatadas de relatórios e de mapas internos das empresas que efetuaram trabalhos na região, além de registros históricos e de visitas de campo. Esses dados constituíram o **PI** original, denominado **minas**. As localizações geográficas das ocorrências auríferas foram extraídas de mapas internos de posse da empresa Crystallex, por digitalização manual por meio de mesa digitalizadora e programa MDDC2 desenvolvido no (LAPES-DEMIN). Esse programa gerou uma tabela, no formato ASCII, com as ocorrências minerais e as suas respectivas posições geográficas (nome do arquivo.txt). Esse arquivo foi editado de acordo com o padrão de tabelas do SPANS-GIS e importado com a extensão *.tba, depois transformada para *.tbb, o formato binário de tabelas usado no SPANS-GIS.

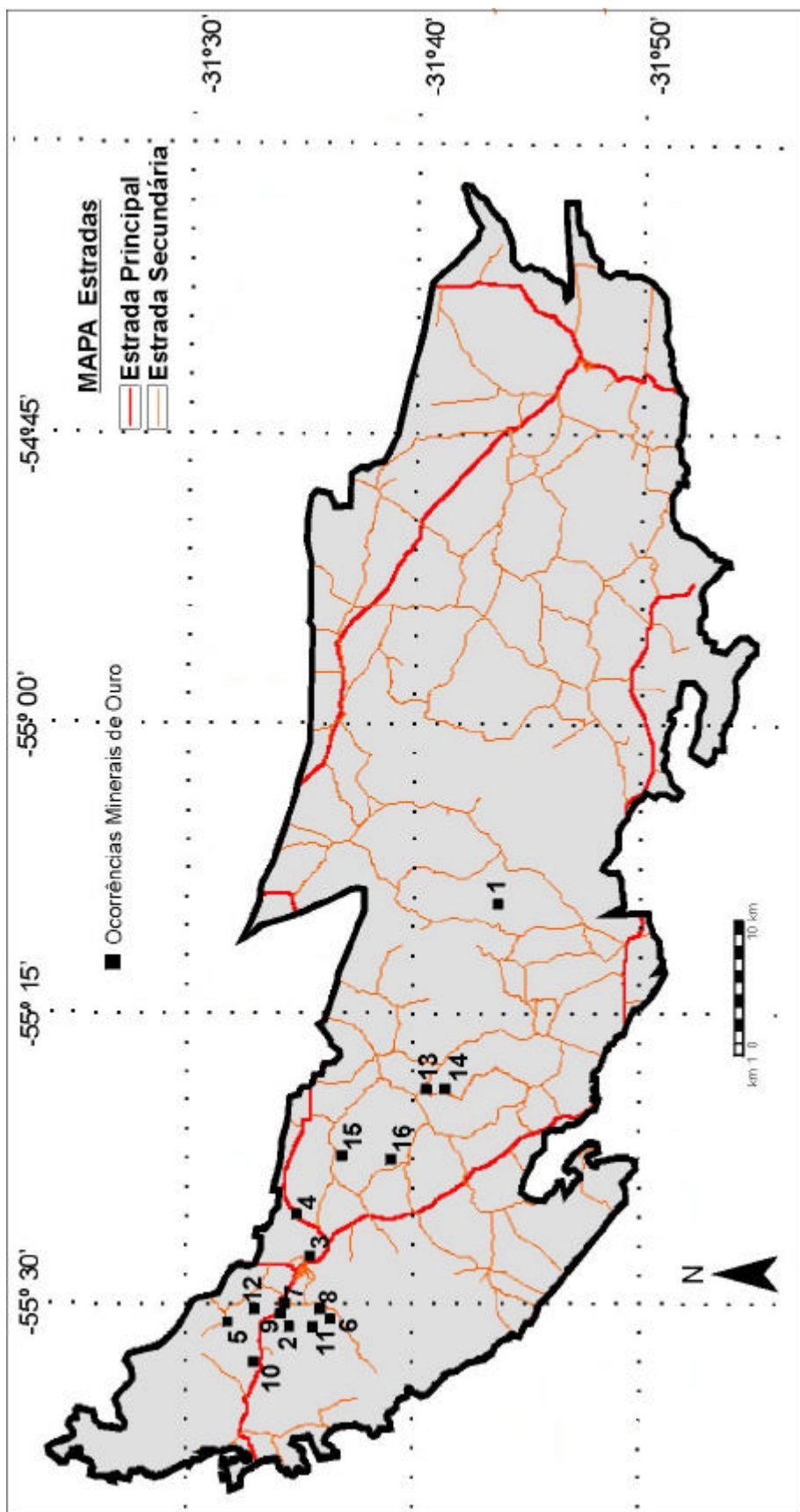


Figura 4.3 – PI original Estradas. Ocorrências mineralis identificadas no mapa da figura 4.5.

Fator Infraestrutura - Pls Estradas

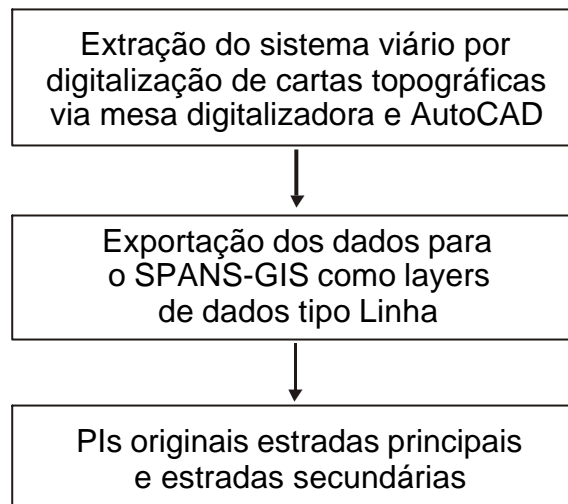


Figura 4.4 – Fluxograma do Fator Infraestrutura.

A tabela de ocorrências minerais passou automaticamente a constituir um *layer* de dados tipo ponto, constituído pelas entidades ponto (ocorrências minerais) e as suas respectivas coordenadas geográficas. Essa tabela foi sendo complementada com as informações pertinentes resgatadas dos demais *layers*, que foram sendo gerados e usados na integração, por exemplo: as classes dos mapas previsionais finais correspondentes espacialmente a cada ocorrência mineral conhecida. Dessa maneira, várias operações tipo *query* (pergunta, ou teste comparativo conduzido nos dados disponíveis, espaciais e não espaciais, de modo a se obter a informação desejada) puderam ser feitas, de maneira a aumentar o grau de conhecimento dos *layers* usados nessa Tese. Um exemplo de operação tipo *query* pode ser visualizado na tabela 5.53 do capítulo 5.

A tabela de ocorrências minerais também foi usada como informação básica para o cálculo da densidade média dos depósitos conhecidos, que constituiu a probabilidade *a priori* da integração segundo a metodologia Pesos de Evidência. Desse modo, a tabela de ocorrências minerais foi usada em todos os cálculos dos pesos e dos contrastes, bem como nos testes de Independência Condicional exigidos pela metodologia Pesos de Evidência.

A figura 4.5 apresenta a **ICR** com as ocorrências minerais de ouro conhecidas. A figura 4.6 apresenta o fluxograma dos procedimentos gerais utilizados nesse item.

4.4 Fator Landsat

As bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 da imagem orbital LANDSAT TM-5 (WRS 223/82) constituíram os **PIs** originais desse Fator e foram, antes de serem importadas para o SPANS-GIS, processadas com o auxílio do software ENVI.

A análise inicial do fator LANDSAT envolveu a coleta de amostras de rochas hidrotermalmente afetadas na **ICR**, principalmente aquelas alteradas com a mesma tipologia de alteração hidrotermal que afetou as encaixantes da Mina San Gregorio, depósito-tipo do Modelo Conceitual. Também, foram coletadas e analisadas, na medida do possível, amostras de rochas não afetadas pela alteração hidrotermal.

As amostras foram analisadas no Laboratório de Radiância Espectral da EMBRAPA-UnB, em Brasília (DF), para a determinação das assinaturas espectrais, ou, mais especificamente, para a determinação do Fator de Reflectância Espectral Bidirecional (razão entre a radiância espectral da amostra e a de uma superfície Lambertiana ideal nas mesmas condições de observação e iluminação). Essas medidas foram feitas no espectroradiômetro GER-IRIS MK-V. As assinaturas espectrais (Fig. 4.7) serviram de apoio para os estudos posteriores nas imagens orbitais.

As operações de pré-processamento na imagem de satélite em formato digital foram feitas no ENVI[#] (Better Solutions Consulting, 1997,1999), em estação Sun-Sparc 20, e estão descritas a seguir:

- 1) corte da cena adquirida, de maneira a restringir a área de trabalho à região compreendida pela **ICR** e adjacências;
- 2) remoção de linhas de *striping* da imagem, com a função *Destripe*. Essa função calcula a média de cada faixa de varredura do LANDSAT e normaliza as linhas de acordo com a média;

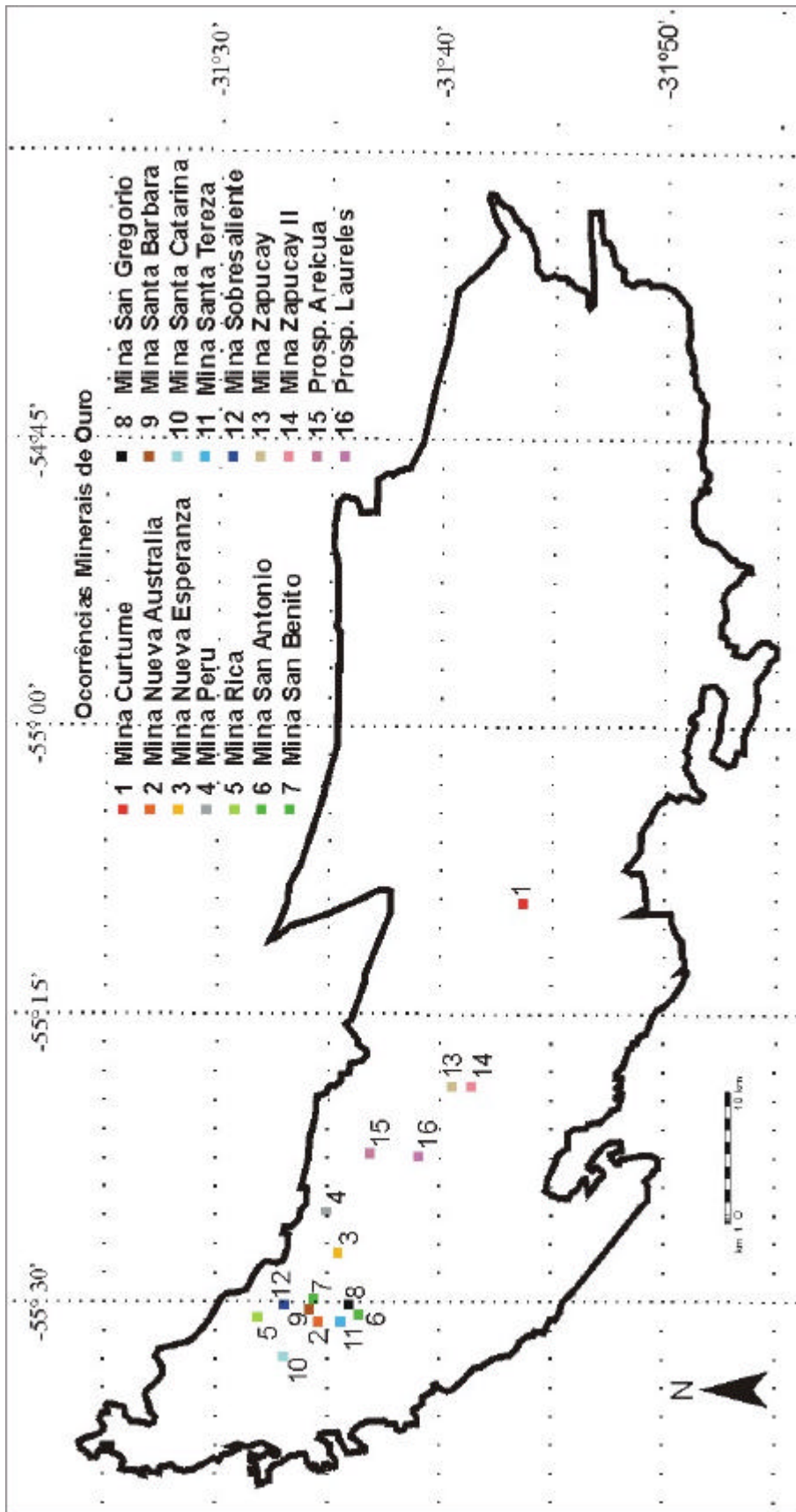


Figura 4.5 – Mapa da ICR com ocorrências minerais de ouro.

Fator Ocorrências Minerais - PI Minas

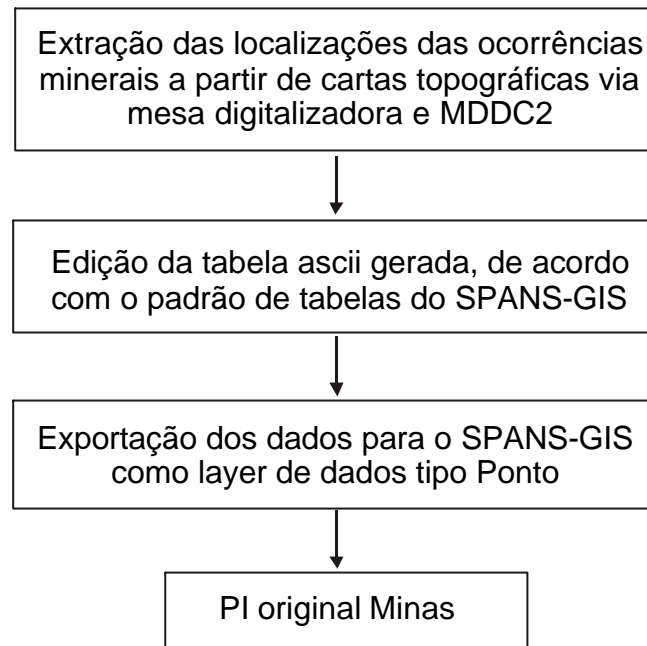


Figura 4.6 – Fluxograma do Fator Ocorrências Minerais.

- 3) correção dos efeitos de espalhamento (*scattering*) e absorção atmosféricas com o uso da função *Dark Subtraction*, a qual detecta o valor de número digital (ND) adicionado a cada banda pelos efeitos atmosféricos e subtrai esse valor de cada banda;
- 4) calibração *Flat Field*, a qual normaliza a imagem de acordo com uma região de reflectância plana, previamente escolhida na imagem com a seleção de uma Região de Interesse (*ROI*). O espectro médio é usado como espectro de referência para a normalização. A normalização consiste na divisão desse espectro médio da ROI pelo espectro de cada *pixel* da imagem.

Os espectros de reflectância das amostras coletadas no campo foram transformados em uma biblioteca espectral ENVI. Essa biblioteca espectral foi usada tentativamente na classificação da imagem, com o objetivo de gerar de um mapa geológico preliminar. Para essa operação, foram usadas a Classificação Supervisionada por Máxima Verossimilhança (*MaxVer*), cujo algoritmo assume que a distribuição estatística de cada classe, em cada banda, é normalmente distribuída e calcula a probabilidade que um dado *pixel* pertencer à uma classe específica. Cada *pixel* é assumido como pertencente à classe cuja probabilidade

seja a mais alta. As classes usadas para a classificação foram, nesse caso, baseadas nos espectros de reflectância das rochas coletadas no campo.

A classificação supervisionada *Spectral Angle Mapper* (**SAM**, Kruse *et al.*, 1993), também, foi usada com o objetivo de mapeamento geológico. Essa classificação usa o ângulo n-dimensional para ajustar os **pixel** da imagem a um espectro de referência. No caso, foram usados os espectros de reflectância das amostras coletadas no campo. O algoritmo **SAM** determina a similaridade entre os espectros por meio do cálculo dos ângulos entre pares, pois trata os espectros como vetores em um espaço com dimensão igual ao número de bandas.

Dois outros testes de classificação, também, foram testados. Os métodos de classificação **MaxVer** (Richards, 1994) e **SAM** foram testados para um espectro de reflectância similar ao espectro da área da Mina San Gregorio; esse espectro foi extraído de uma **ROI**. O objetivo dessa classificação foi determinar áreas com espectros similares àqueles da Mina San Gregorio. Por fim, foi testada a classificação da imagem com o uso do algoritmo **SAM** a partir de classes definidas em **ROIs** selecionadas diretamente na imagem de acordo com espectros diferentes; essas classes foram reclassificadas com o uso do visualizador n-dimensional ENVI, que permite a visualização dos **pixel** no espaço com dimensão igual ao número de bandas.

As várias tentativas de classificação (**MaxVer** e **SAM**) e de uso de diferentes espectros (rochas, **ROIs**) não forneceram um resultado adequado e foram, pois, rejeitadas. A última classificação produziu um resultado um pouco mais satisfatório do que as anteriores, mas também foi descartada em função dos resultados mais significativos obtidos nas operações que serão discutidas a seguir.

A análise dos dados espectrais de satélite (LANDSAT TM-5) prosseguiu com a utilização de dois outros procedimentos, que geraram os resultados mais significativos. Esses procedimentos utilizam a análise de componentes principais (**ACP**) e razões entre bandas para salientar características geológicas relacionadas com processos de mineralização; o processamento dos dados digitais foi realizado sempre a partir da análise das assinaturas espectrais das amostras coletadas em campo, de assinaturas desses materiais em bibliotecas espectrais e dos tipos de feição geológica. Os procedimentos adotados foram propostos por 1) Glikson (1997) e por 2) Crósta & McM. Moore (1989), esta última com revisão de Loughlin (1991).

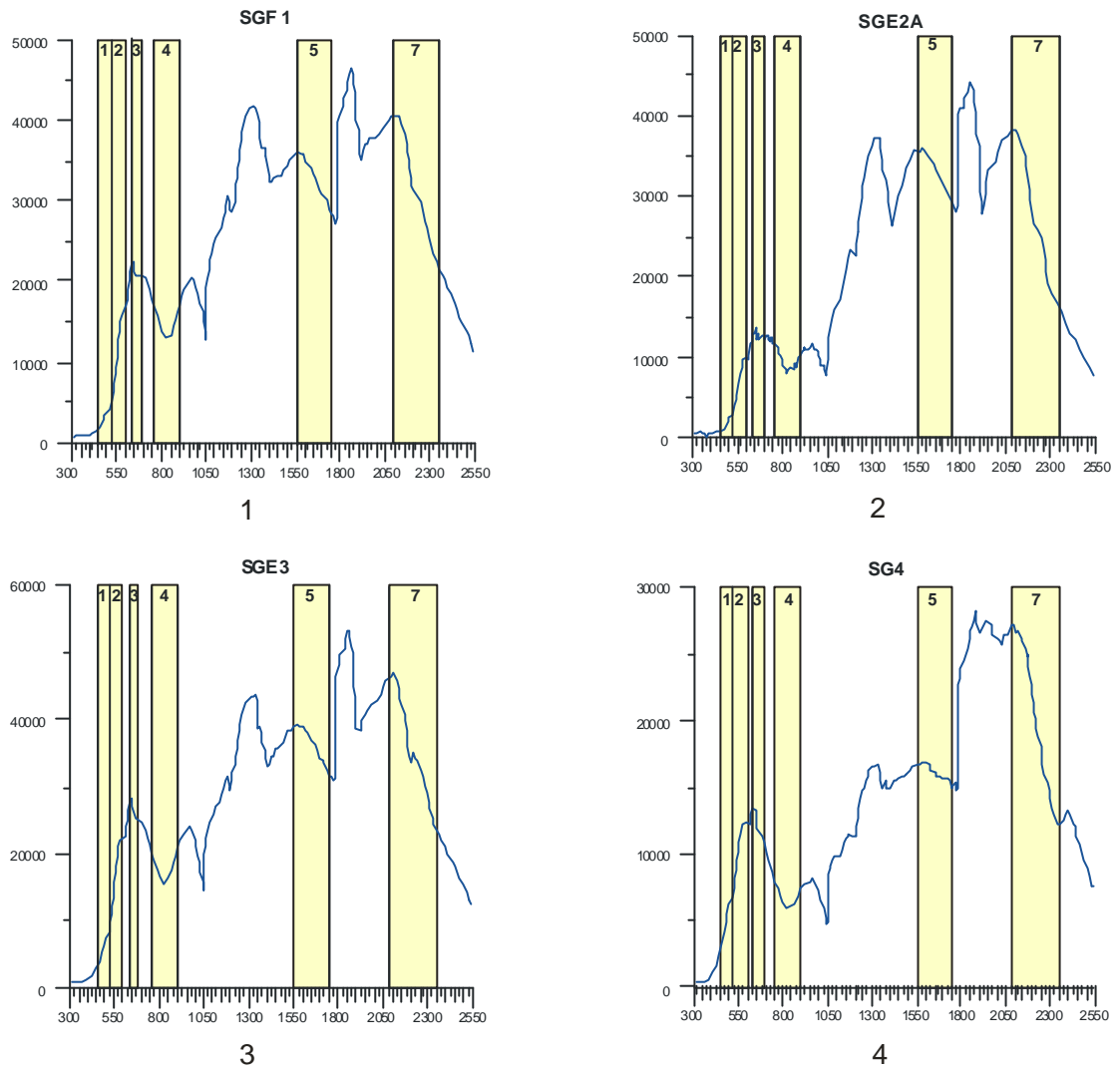
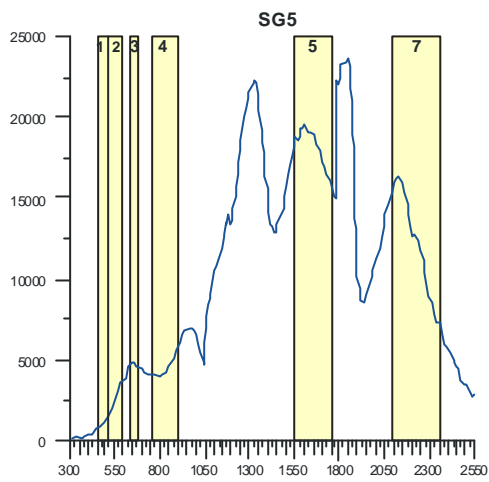
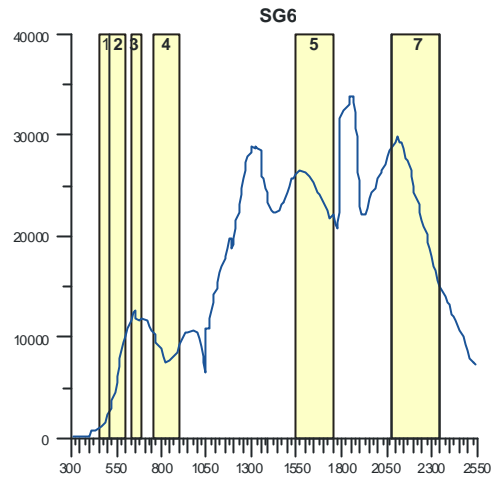


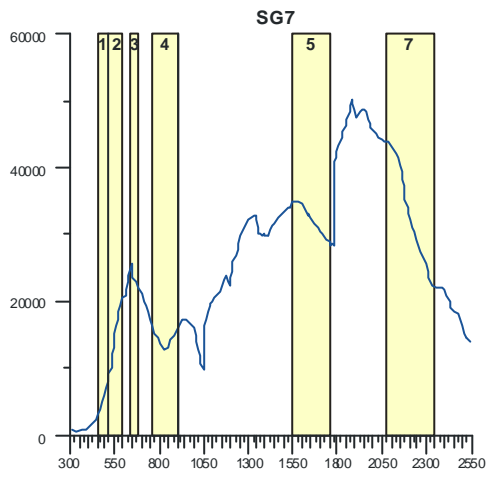
Figura 4.7 – Assinaturas espectrais de amostras de rocha coletadas na Ilha Cristalina de Rivera. Eixo x: comprimentos de onda (nm); Eixo y: fator de reflectância espectral bidirecional. As colunas representam os comprimentos de onda cobertos pelo satélite LANDSAT TM-5 (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7). **1-** Veio F1; **2-** Sienogranito oxidado (minério B de San Gregorio); **3-** Sienogranito hidrotermalizado (minério B de San Gregorio); **4-** Diorito; **5-** Diorito alterado; **6-** Diorito parcialmente hidrotermalizado; **7-** Diorito hidrotermalizado (minério A de San Gregorio); **8-** Diorito hidrotermalizado (minério A de San Gregorio); **9-** KF-granito; **10-** KF-granito; **11-** Sienogranito hidrotermalizado (minério B de San Gregorio); **12-** Diorito; **13-** Diorito; **14-** Diorito oxidado; **15-** Sienogranito Sta. Tereza; **16-** Veio de Quartzo (Sta. Tereza); **17-** Granito Fe-hidrotermalizado; **18-** Granodiorito (inconsolidado); **19-** Granodiorito (solo); **20-** Sienogranito milonitizado; **21-** Granodiorito (solo); **22-** Granodiorito; **23-** Veio de Quartzo (Mina Zapucay); **24-** Veio de Quartzo oxidado (Mina Zapucay); **25-** Granito-gnaiss; **26-** Granito-gnaiss; **27-** Riodacito.



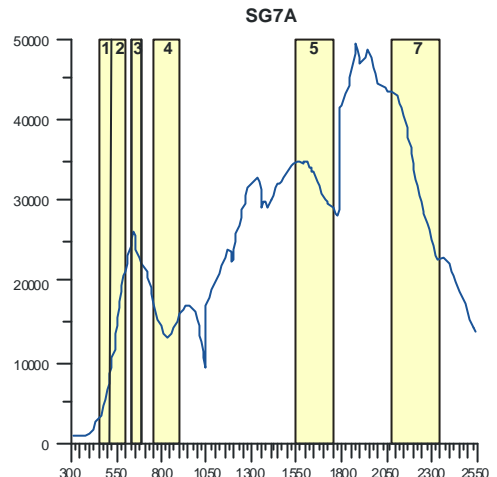
5



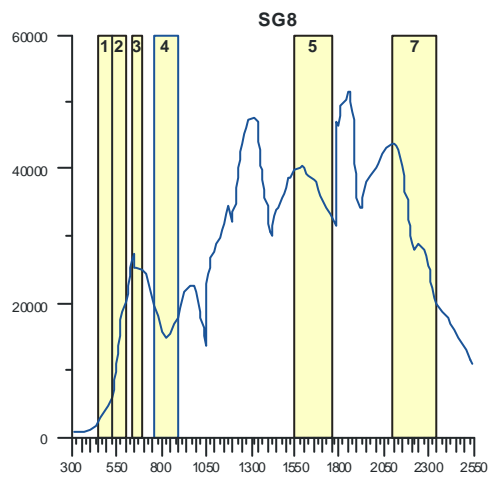
6



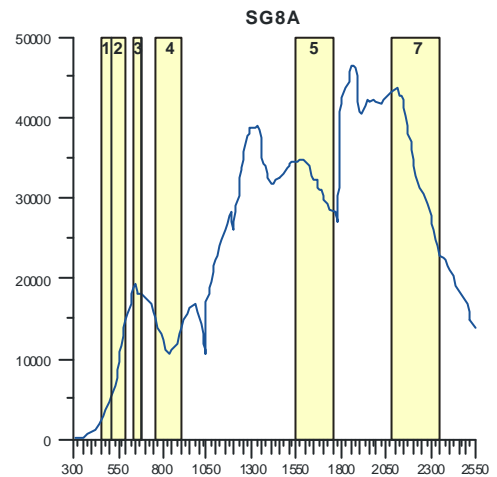
7



8

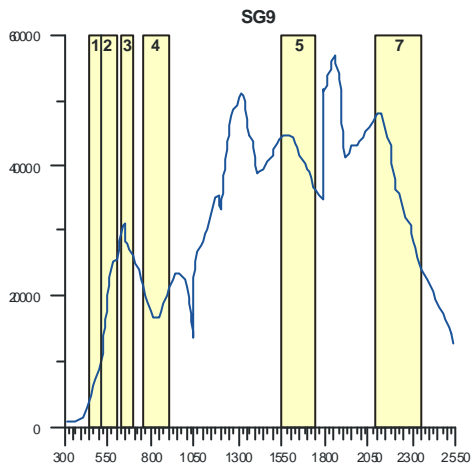


9

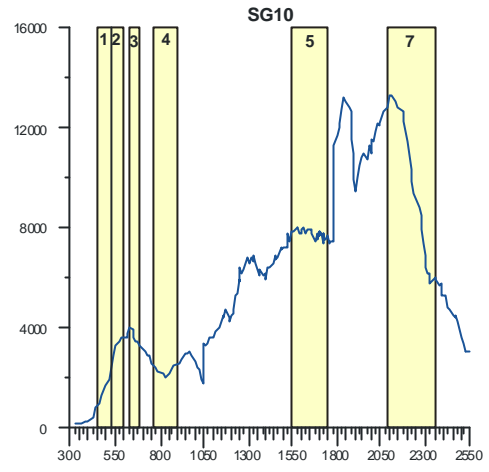


10

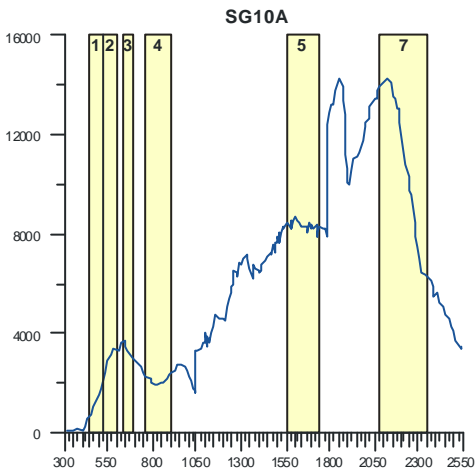
continuação Fig. 4.7



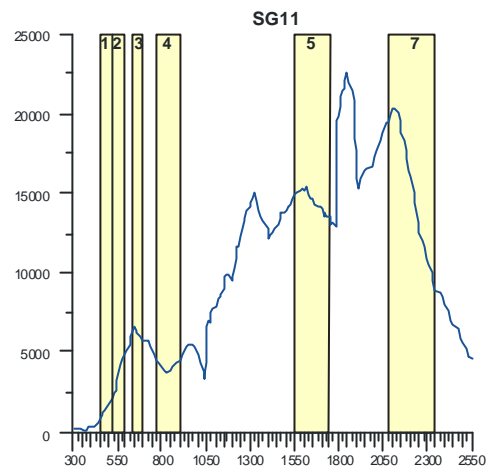
11



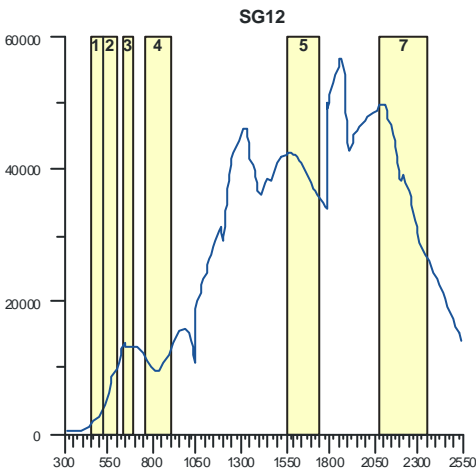
12



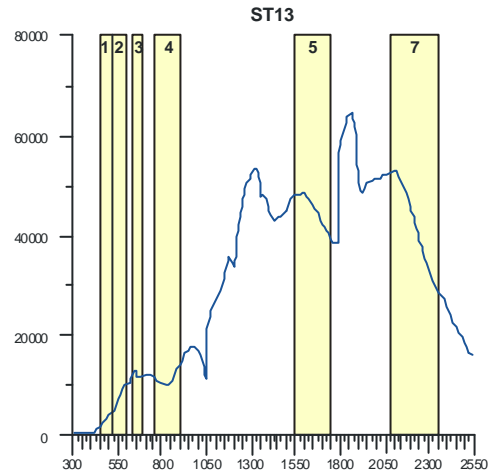
13



14

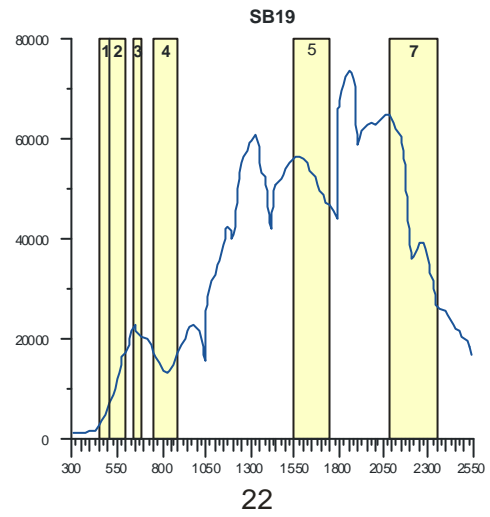
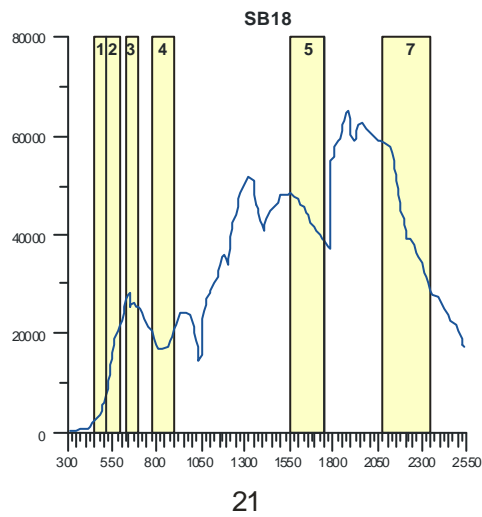
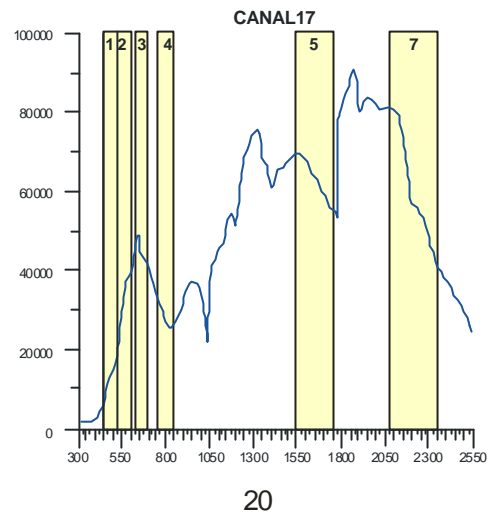
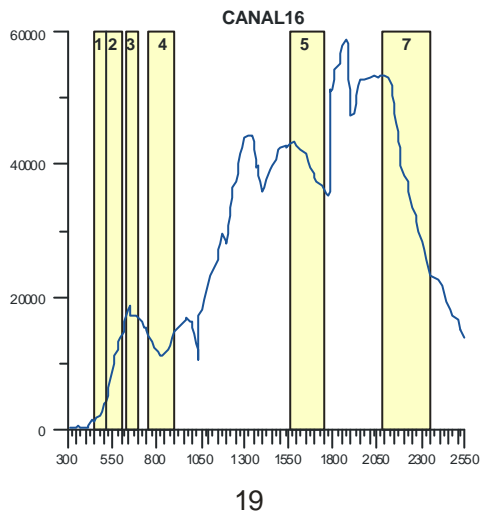
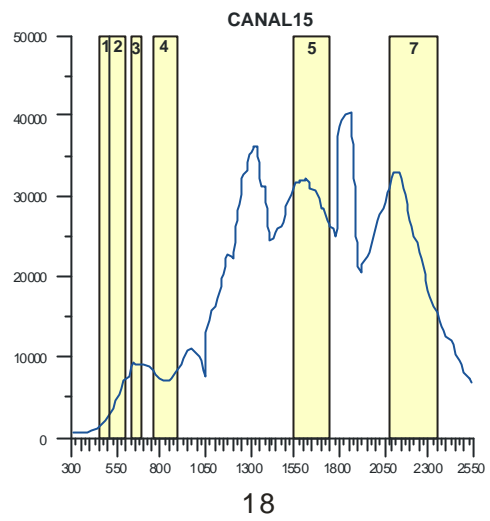
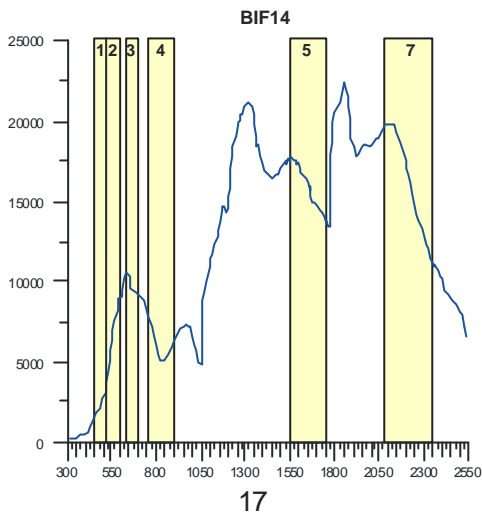


14

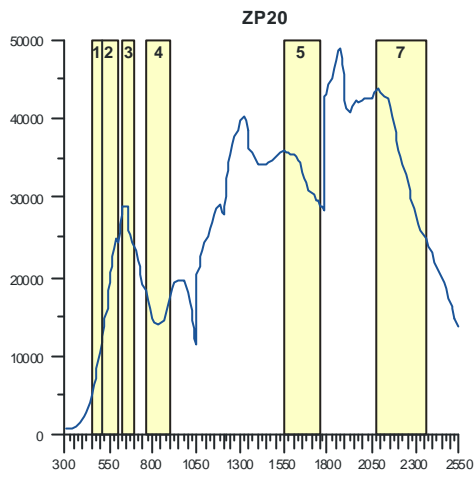


16

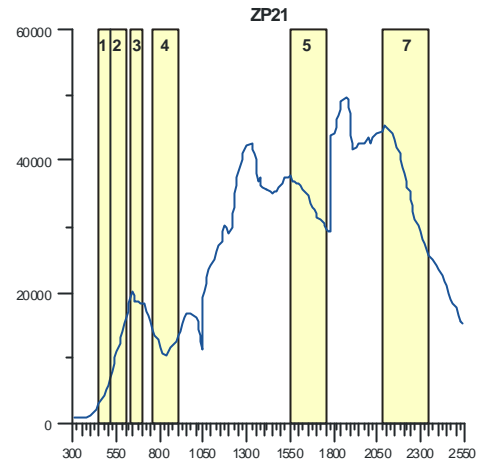
continuação Fig 4.7



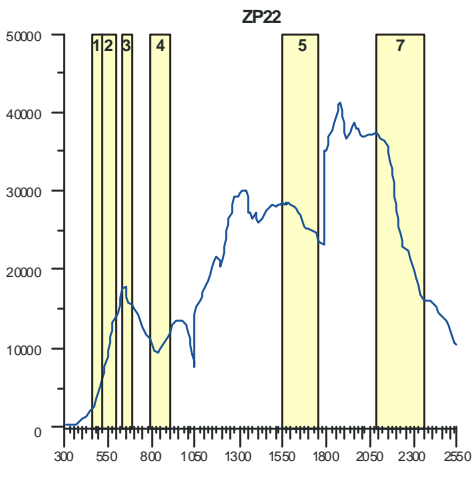
continuação Fig. 4.7



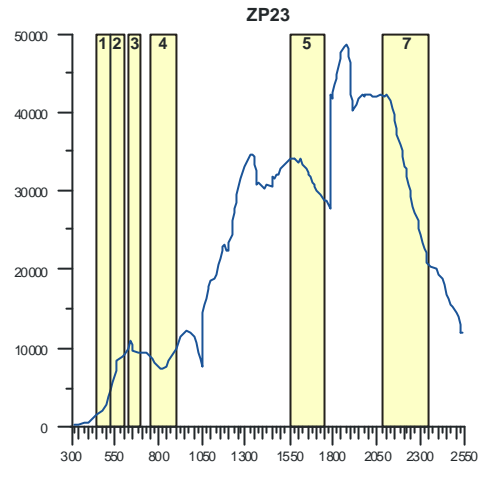
23



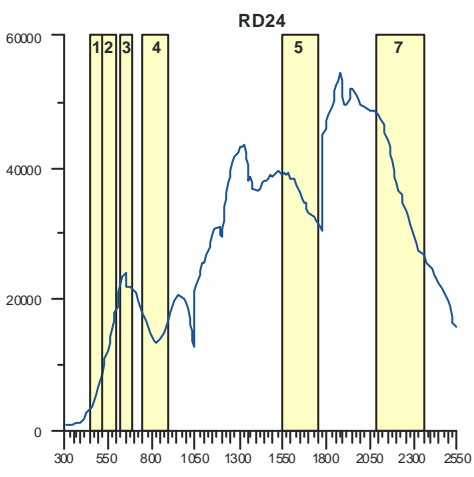
24



25



26



27

continuação Fig. 4.7

A técnica desenvolvida por Glikson (1997) foi inicialmente aplicada para o mapeamento geológico de uma área semi-árida no interior da Austrália. Essa técnica também foi utilizada para auxiliar o mapeamento geológico na **ICR** e para, tentativamente, salientar áreas de favorabilidade mineral. Para tanto, utilizou-se dos resultados da análise das assinaturas espectrais das amostras coletadas em campo, de assinaturas desses materiais em bibliotecas espectrais e dos tipos de feição (hidrotermalismo, veios de quartzo), semelhante aos materiais utilizados por Glikson (1997) como alvos.

A técnica de Glikson (1997) é baseada fundamentalmente em uma operação de combinação **RGB** de bandas da seguinte forma: CP2 (4/3, 5/7): 5/4: 1+7. A segunda componente principal (CP2) da razão entre as razões das bandas 4/3 e 5/7 é interpretada como uma excelente ferramenta para salientar áreas de alteração hidrotermal, visto que as razões 4/3 e 5/7, independentemente, salientam áreas argilosas, apesar de sofrerem a interferência da vegetação. Com o uso da Análise de Componentes Principais para essas razões, a primeira componente principal é constituída pela maior parte, ou peso, do espectro vegetação, o que deixa para a segunda componente o peso do espectro alteração hidrotermal. A razão das bandas 5/4 é importante para a detecção de áreas com oxidação e a adição de bandas 1+7 é significativa e confiável para a detecção de áreas constituídas por materiais quartzosos. Com isso, obteve-se a detecção de três guias importantes do Modelo de Exploração: 1) áreas com alteração hidrotermal de argilas (sericitas, etc.), que ocorrem associadas à Mina San Gregorio e em algumas das demais ocorrências na **ICR**; 2) áreas com oxidação (óxidos de ferro), que também ocorrem associadas à Mina San Gregorio e em outras ocorrências auríferas na **ICR**; e 3) áreas ricas em quartzo (veios de quartzo, etc.), que também estão associadas à mineralização aurífera em San Gregorio, bem como na grande maioria das demais ocorrências conhecidas na **ICR**.

A imagem resultante do processamento, segundo a técnica de Glikson (1997), denominada **rgbg**, mostra as seguintes feições básicas (Fig. 4.8):

?? rochas graníticas: aparecem como áreas azuladas com matiz esbranquiçado a levemente avermelhado. Essa coloração da combinação **RGB** indica a forte contribuição do quartzo como material de intemperismo (componente **B**). O matiz avermelhado representa a contribuição de argilas (componente **R**) provenientes do intemperismo dessas rochas, enquanto o matiz esbranquiçado representa áreas com forte contribuição de todas as componentes **RGB** e indica áreas interessantes para ocorrências auríferas, de acordo com o Modelo de Exploração. A grande distribuição das áreas azuladas evidencia a larga

ocorrência de granitóides na **ICR** e ainda pode representar a ocorrência de rochas metamórficas originadas por metamorfismo regional sobre granitóides antigos (granito-gnaisses);

?? rochas básicas (dioritos, gabros, etc.): aparecem como áreas esverdeadas com matiz levemente avermelhada. As áreas esverdeadas indicam forte contribuição do componente **G**, o qual representa áreas constituídas principalmente por óxidos de ferro como material de intemperismo. O matiz avermelhado indica a contribuição de argilas. As rochas designadas como magnetita-quartzo gnaiss, também, podem mostrar regiões esverdeadas. Nessa imagem, algumas áreas de inundação também aparecem em cores esverdeadas e talvez indiquem uma contribuição de óxidos de ferro.

?? áreas esbranquiçadas, como discutido anteriormente, indicam a possibilidade da ocorrência de áreas favoráveis à ocorrências auríferas, de acordo com o Modelo de Exploração. Porém, também podem indicar a ocorrência de regiões de solo exposto, cuja reflectância é alta em todas as componentes **RGB**.

A imagem **RGB** resultante desse processamento foi importada para o SPANS-GIS# separadamente, na forma de três bandas (**rgb2ar**, **rgb3ar** e **rgb4ar**), que constituíram respectivamente os **PIs** derivados **MD1**, **MD2** e **MD3**. Esses **PIs** derivados foram red denominados evidências **EM1**, **EM2** e **EM3** por ocasião dos procedimentos de integração.

A técnica desenvolvida por Crósta & McM. Moore (1989) e revisada por Loughlin (1991) foi modificada nessa Tese de Doutorado, de maneira à possibilitar a detecção de áreas de favorabilidade para ocorrências auríferas na **ICR**, sempre com base nas assinaturas espectrais das amostras coletadas em campo, nas assinaturas desses materiais em bibliotecas espectrais e nas feições de hidrotermalismo (argilas e óxidos de Fe) e de veios de quartzo.

A técnica de Crósta & McM. Moore (1989), chamada Seleção de Componentes Principais Orientada pelas Feições, é baseada no exame dos autovetores (combinações lineares dos pesos das bandas de entrada) produzidos pela **ACP**. Para tanto, foi usada a matriz de covariância da imagem em estudo, de maneira a decidir quais as componentes principais que concentram as informações diretamente relacionadas às assinaturas espectrais de prováveis áreas-alvo de favorabilidade mineral. No presente caso, foram usados, como alvos, os mesmos materiais utilizados no método anterior: argilização, representada pela sericitização, oxidação e silicificação.

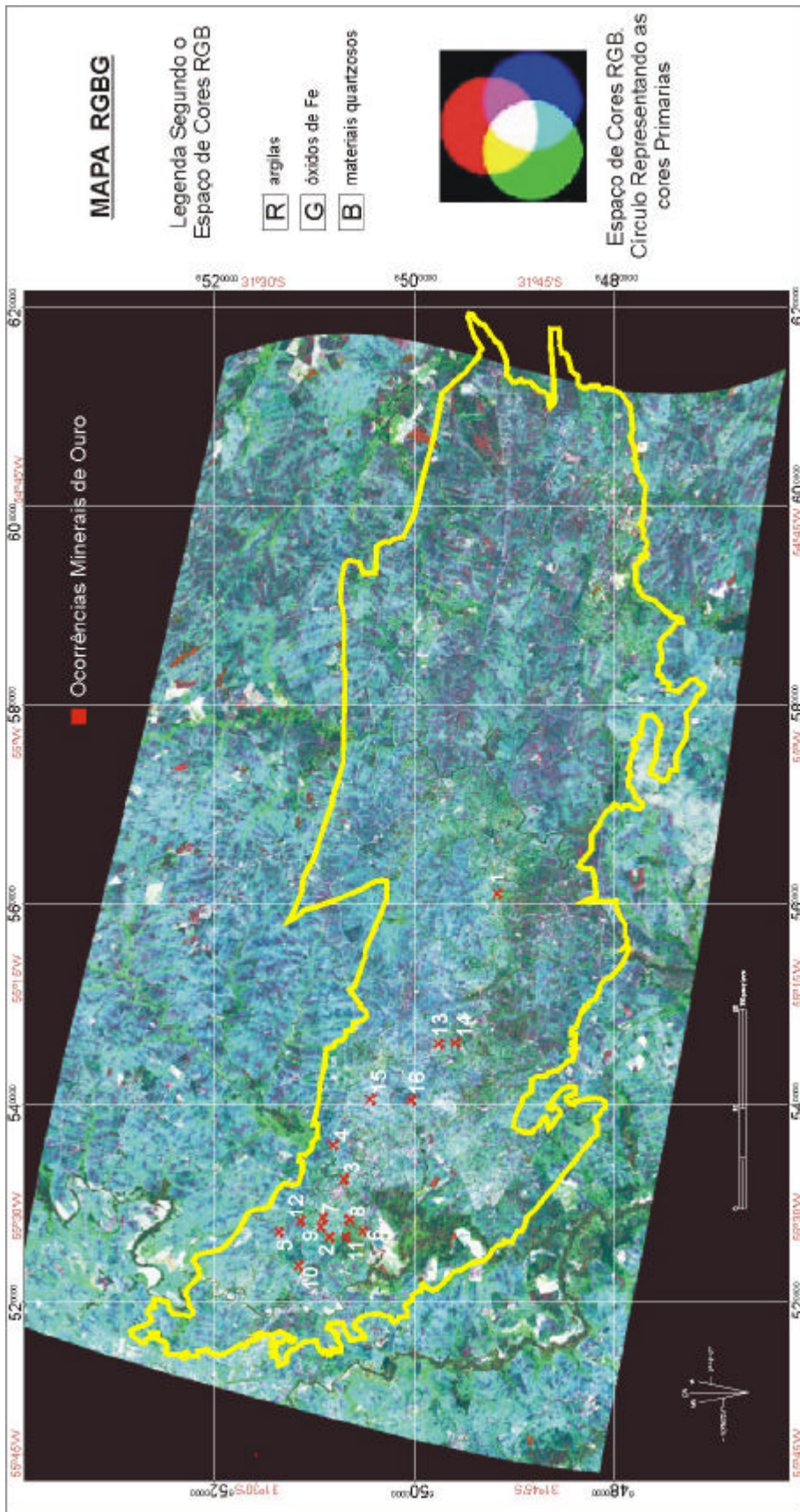


Figura 4.8 – Mapa temático **rgbg**, produzido com base na técnica desenvolvida por Glikson (1997). Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

Dois grupos de bandas foram escolhidos para a execução de **ACP** por meio da técnica de Crósta & McM. Moore (1989). O primeiro grupo foi constituído pelas bandas 1, 4, 5, 7 para a detecção de argilas, ou de hidroxilas (sericitas); as bandas 2 e 3 foram omitidas para evitar o mapeamento de óxidos. A Análise de Componentes Principais gerou então uma matriz de autovetores (Tab. 4.1), que serviu de base para a análise e para a tomada de decisões a respeito de quais **CPs** fornecem informações mais significantes em relação ao mapeamento mineral. A partir dessa matriz de autovetores (Tab. 4.1), a **CP4** foi escolhida como a componente que melhor representa a informação argila, em virtude da boa diferença entre as informações provenientes das bandas 5 (+) e 7 (-) e ainda pelo fato de negar a informação vegetação, fornecida pela banda 4.

Tabela 4.1 – Matriz de autovetores gerada por **ACP** das bandas 1, 4, 5 e 7.

Bandas de Entrada	Componente Principal 1	Componente Principal 2	Componente Principal 3	Componente Principal 4
Banda 1	0.090	- 0.125	0.568	0.808
Banda 4	0.456	0.866	0.196	- 0.054
Banda 5	0.845	- 0.351	- 0.384	0.122
Banda 7	0.263	- 0.333	0.701	- 0.573

O segundo grupo de bandas de entrada usado para **ACP** foi constituído pelas bandas 1, 3, 4 e 5. Essa análise objetivou a detecção de regiões ricas em óxidos de Fe. A banda 7 foi omitida para evitar informações de argila; a banda 2 foi omitida porque não forneceu resultados importantes para a detecção de Fe, quando combinada com a banda 3. A **ACP** forneceu uma nova matriz de autovetores (Tab. 4.2), que baseou a tomada de decisões para definir as **CPs** a serem usadas. A partir dessa matriz, foram selecionadas as **CP2** (invertida) e a **CP4**. A **CP2** invertida foi selecionada em virtude da grande diferença entre as contribuições fornecidas pelas bandas 5 (+) e 4 (-) e da negação da vegetação. A **CP4** foi selecionada devido à importante diferença entre as informações provenientes das bandas 3 (+) e 1 (-).

Tabela 4.2 - Matriz de autovetores gerada por **ACP** das bandas 1, 3, 4, 5.

Bandas de Entrada	Componente Principal 1	Componente Principal 2	Componente Principal 3	Componente Principal 4
Banda 1	0.090	- 0.141	- 0.606	- 0.778
Banda 3	0.122	- 0.228	- 0.735	0.627
Banda 4	0.486	0.858	- 0.162	0.027
Banda 5	0.861	- 0.438	0.259	- 0.023

As **CPs** selecionadas foram combinadas num padrão **RBG** de maneira a salientar argilas e óxidos de Fe na componente **R**, óxidos de Fe na componente **G** e materiais quartzosos na componente **B**. A componente **R** teve contribuição de óxidos além das argilas devido à contribuição mais fraca dessas últimas (valores de número digital (**ND**) mais baixos em relação aos componentes óxido e quartzo no depósito-tipo San Gregorio) a partir de análises das imagens anteriores. A combinação **RGB** foi produzida segundo a seguinte formulação: $CP4(1, 4, 5, 7) + CP2 \text{ inv.}(1, 3, 4, 5) + CP4(1, 3, 4, 5) : CP2 \text{ inv.}(1, 3, 4, 5) + CP4(1, 3, 4, 5) : 1 + 7$. A imagem resultante (Fig. 4.9) mostra, como áreas esbranquiçadas, as áreas com maior favorabilidade de conter depósitos auríferos; porém, também podem indicar a ocorrência de regiões de solo exposto, cuja reflectância é alta em todas as componentes **RGB**.

A imagem **RGB** resultante do processamento pela técnica de Crósta & McM. Moore (1989) foi importada para o SPANS-GIS separadamente, na forma de três bandas: **acp1ar**, **acp2ar** e **acp3ar**, que constituiram respectivamente os **PIs** derivados **MD4**, **MD5** e **MD6**. Os **PIs** derivados foram redenominados evidências **EM4**, **EM5** e **EM6** por ocasião dos procedimentos de integração.

As duas imagens de saída do ENVI[#], que constituíram os **PIs** derivados representados no Fator LANDSAT, foram georeferenciadas de acordo com o Sistema de Coordenadas Gauss usado no Uruguai. O georeferenciamento foi feito com base em 30 pontos de controle selecionados no terreno, cujas coordenadas foram calculadas a partir de cartas do *Servicio Geográfico Militar (Republica Oriental del Uruguay)* e cujo erro **RMS** máximo foi 1.1. Para a execução do georeferenciamento, foi utilizada a interpolação polinomial (polinômio de grau 2) e a re-amostragem foi feita com o método convolução cúbica.

A conversão das imagens do ENVI[#] para o SPANS-GIS[#] foi feita da seguinte maneira:

- 1) exportação das imagens banda por banda do ENVI[#] com extensão *.hdr / *.img de 8 bits;
- 2) edição dos cabeçalhos *.hdr para o padrão SPANS-GIS[#];
- 3) transformação das imagens *.hdr / *.img para o formato raster do SPANS-GIS[#] *.rnh / *.ml;
- 4) importação para o SPANS-GIS[#].

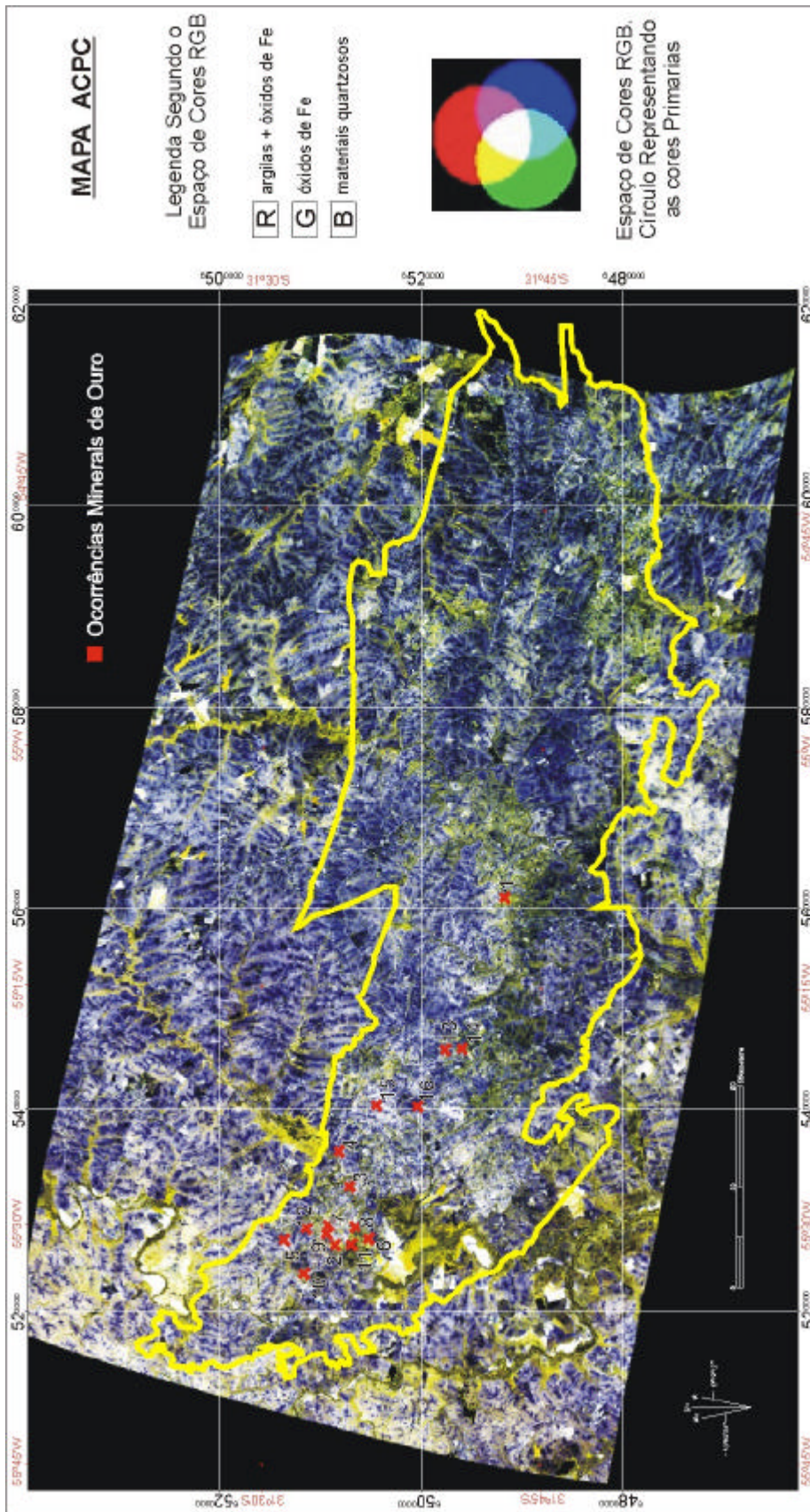


Figura 4.9 – Mapa temático *acpc*, produzido com base em técnica desenvolvida por Crosta & Mc Moore (1989) e Loughlin (1991). Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

As imagens *raster* importadas foram transformadas para *quadrees*, de maneira a permitir os demais modelamentos exigidos pelas metodologias de integração. Essas imagens também foram analisadas estatisticamente por meio dos softwares STATISTICA (STASOFT, 1995) e GSLIB (Deutsch & Journel, 1996); as imagens foram exportadas para esses *softwares* como tabelas xyz de extensão *.txt. A análise estatística por meio de curvas de probabilidade permitiu a separação dos *pixel* das imagens em populações distintas, cujos limites foram usados para reclassificá-las em classes de intervalos de Número Digital (ND) no SPANS-GIS. Dessa maneira, diminuiu-se o excessivo número de classes de NDs (255) das imagens para um número máximo de sete classes, de maneira a facilitar os processos de integração e de interpretação dos resultados.

O uso de curvas de probabilidade, de acordo com a metodologia proposta por Sinclair (1976), pareceu ser um método robusto e confiável, além de ser facilmente implementado e largamente utilizado na exploração mineral. Esse método é extremamente sensível a desvios da normalidade e tem a capacidade de identificar populações diferentes com boa confiabilidade. A utilização de intervalos percentuais (percentis) para classificar as populações definidas pelo uso das curvas de probabilidade aumentou a flexibilidade e a praticidade, quando da atribuição de pesos na integração.

As imagens (PIs) derivadas MD1, MD2, MD3, MD4, MD5 e MD6 do Fator LANDSAT podem ser visualizadas nas figuras 4.10 a 4.15 e encontram-se mascaradas pelo mapa base *contaton* que delimita a ICR. A figura 4.16 apresenta o fluxograma dos procedimentos gerais utilizados nesse item.

4.5 Fator geoquímico

Os dados de exploração geoquímica foram organizados a partir do banco de dados analógico disponibilizado pela empresa Crystallex. Esses dados compõem um conjunto de informações de amostragens de sedimentos ativos de drenagem (sedimentos de corrente), concentrados de minerais pesados, sedimentos de drenagem tipo *bulk cyanide leach method* - BLEG e litogeoquímica. Esses dados foram levantados pelas empresas que trabalharam anteriormente na área e pela equipe de explorações da Crystallex.

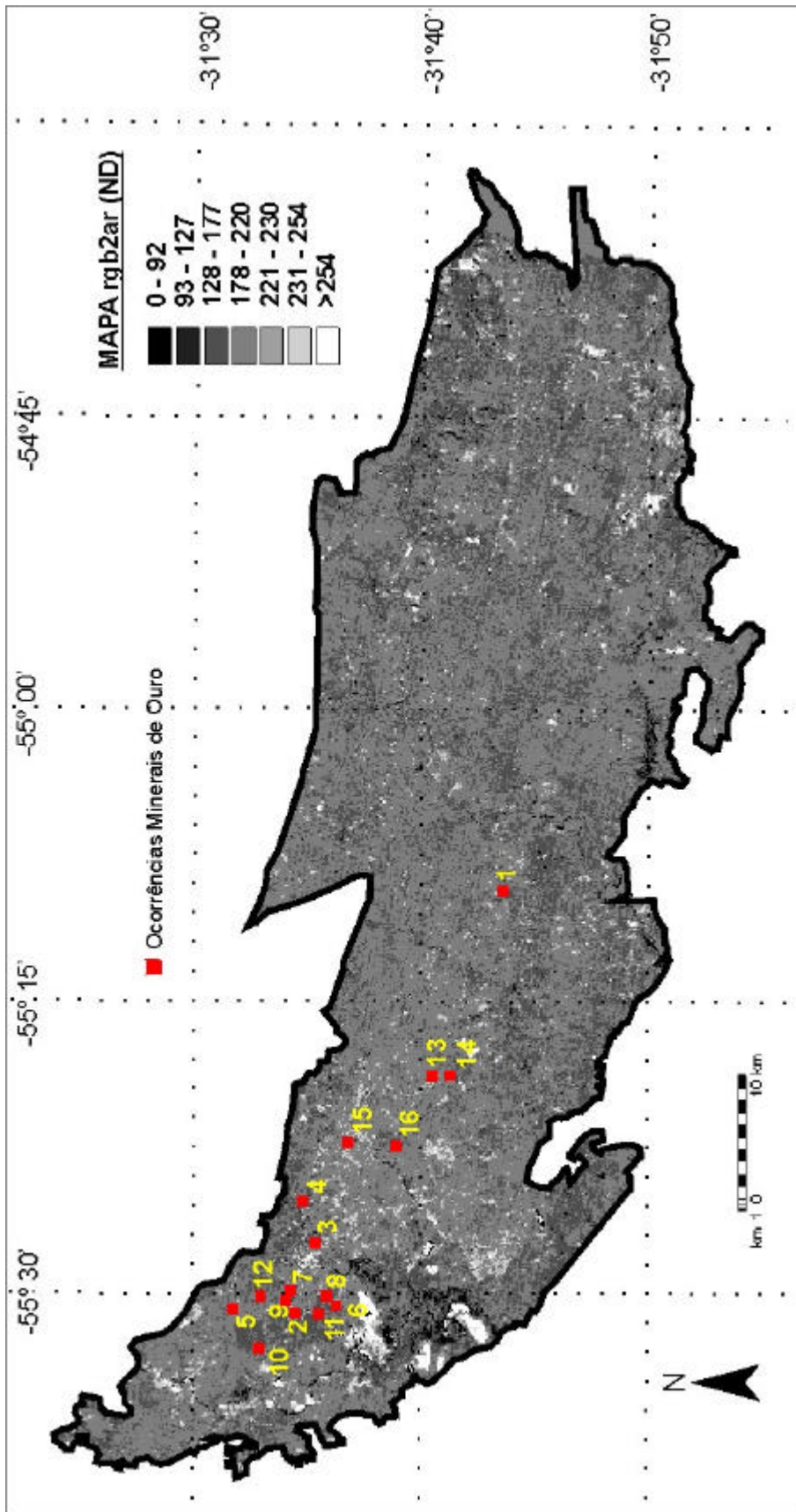


Figura 4.10 – PI derivado rgb2ar (MDI), produzido no Fator LANDSAT. Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

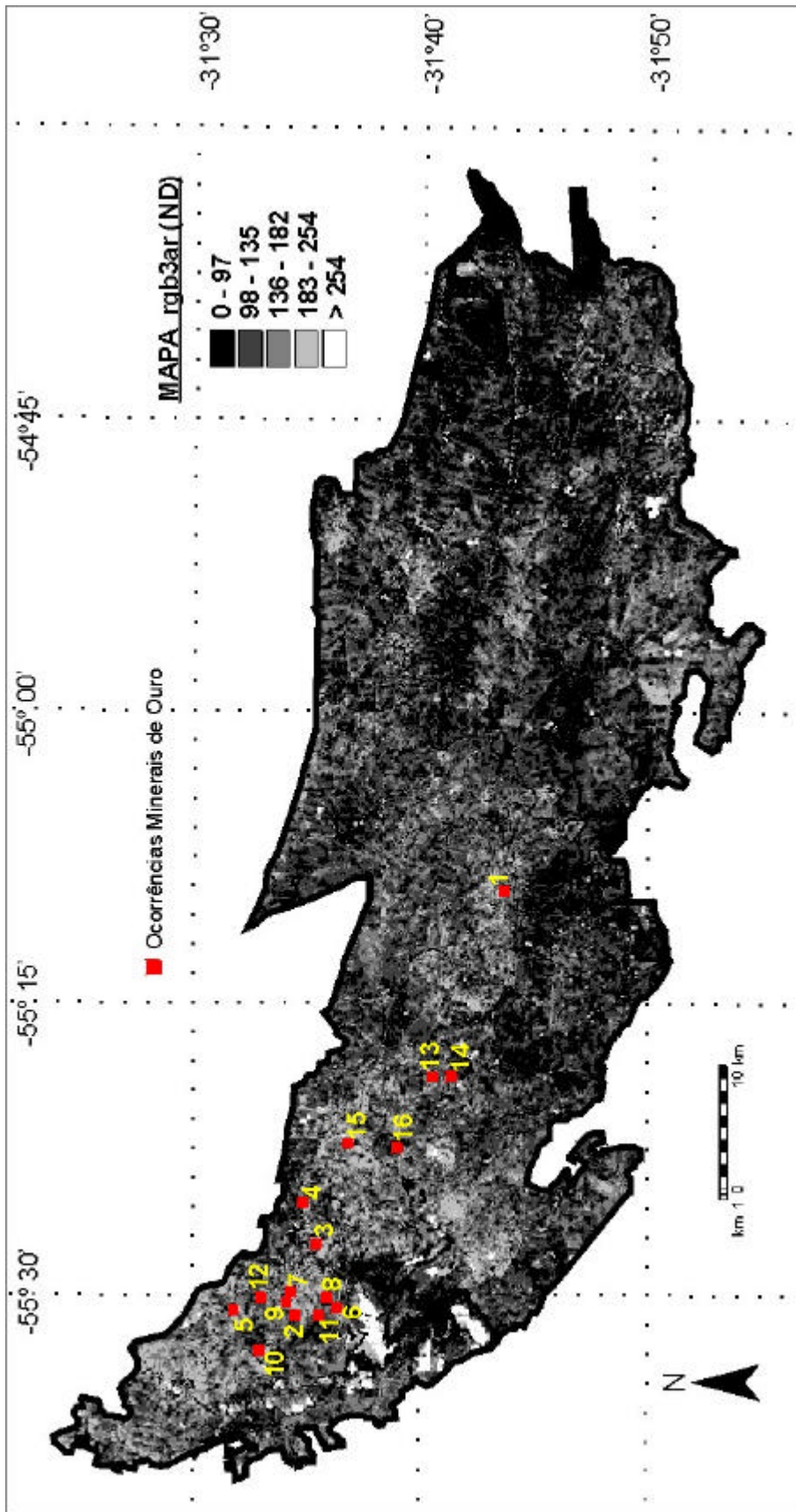


Figura 4.11 – PI derivado rgb3ar (MD2), produzido no Fator LANDSAT. Ocorrências mineralizadas no mapa da figura 4.5.

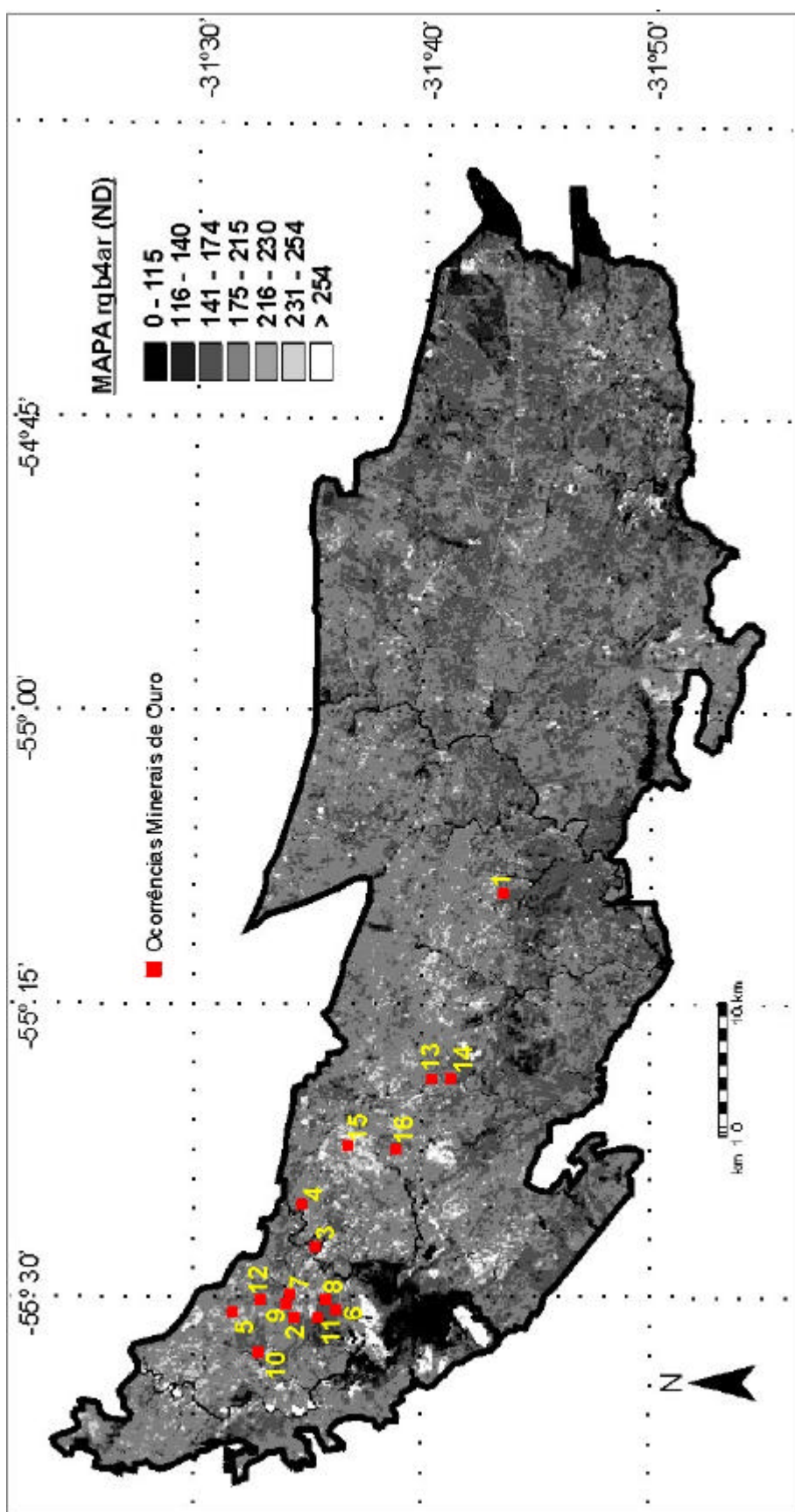


Figura 4.12 – PI derivado rgb4ar (MD3), produzido no Fator LANDSAT. Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

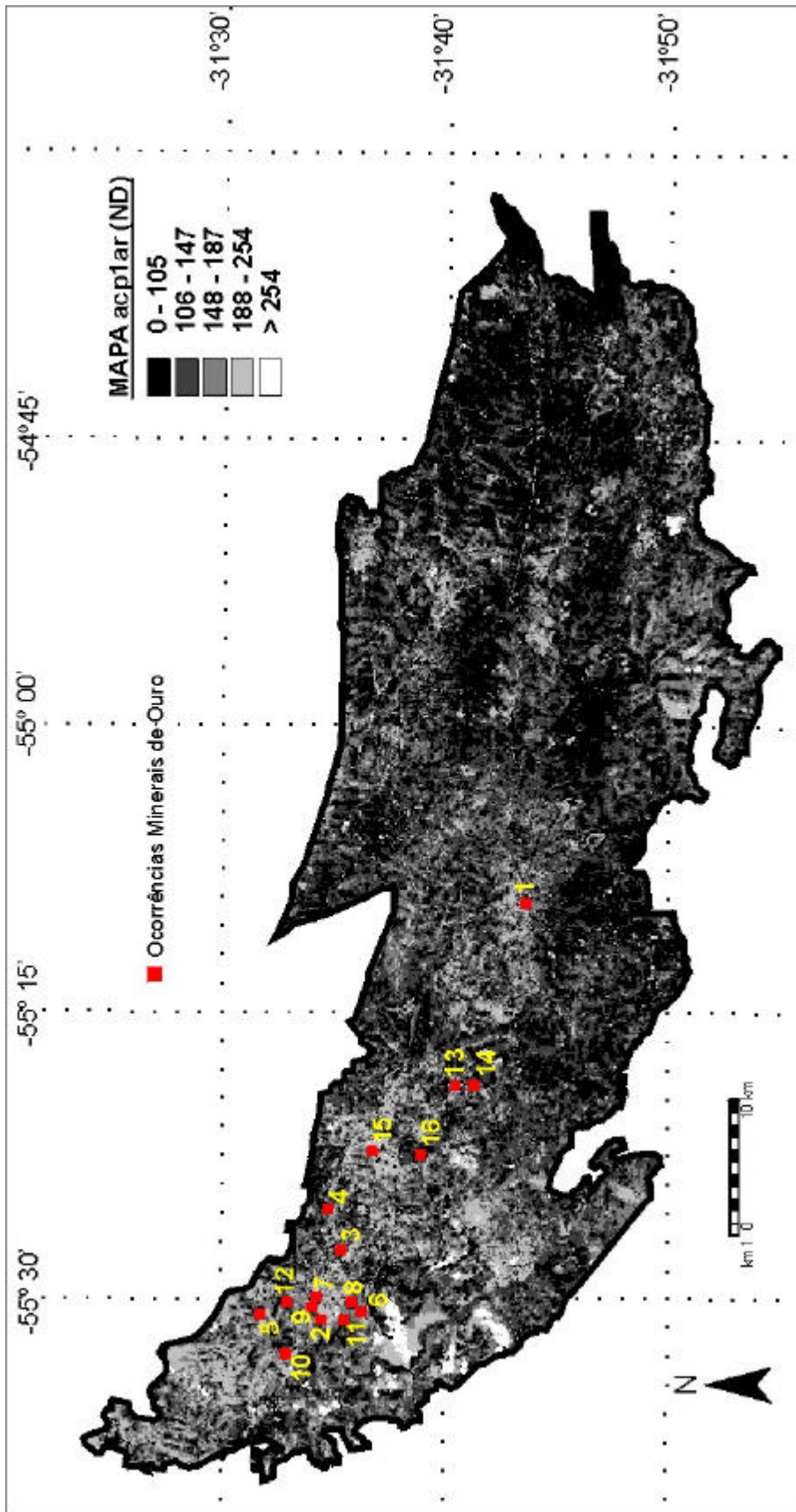


Figura 4.13 – PI derivado acp1ar (MD4), produzido no Fator LND4. Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

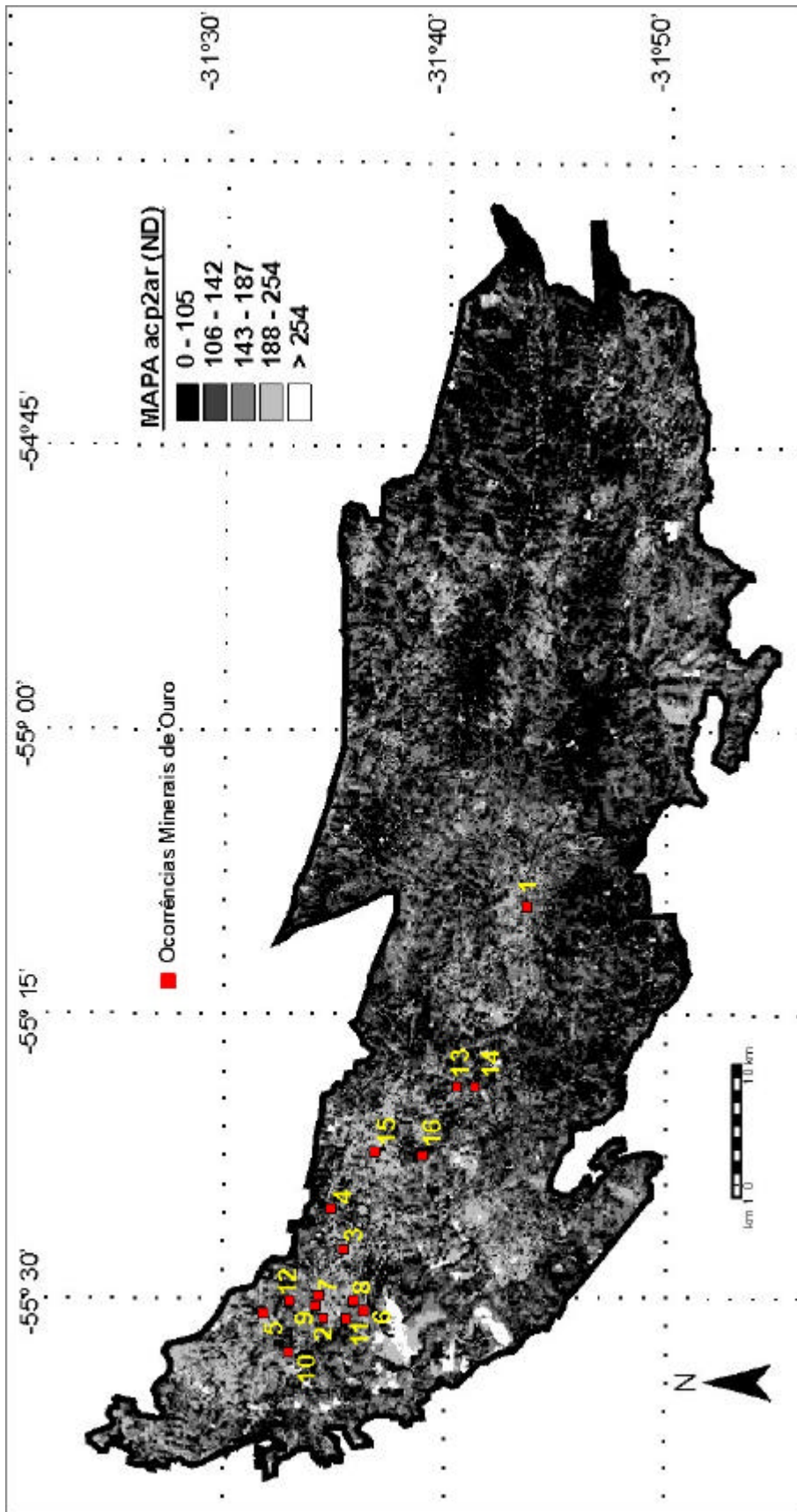


Figura 4.14 – PI derivado acp2ar (MD5), produzido no Fator LANDSAT. Ocorrências mineralizadas no mapa da figura 4.5.

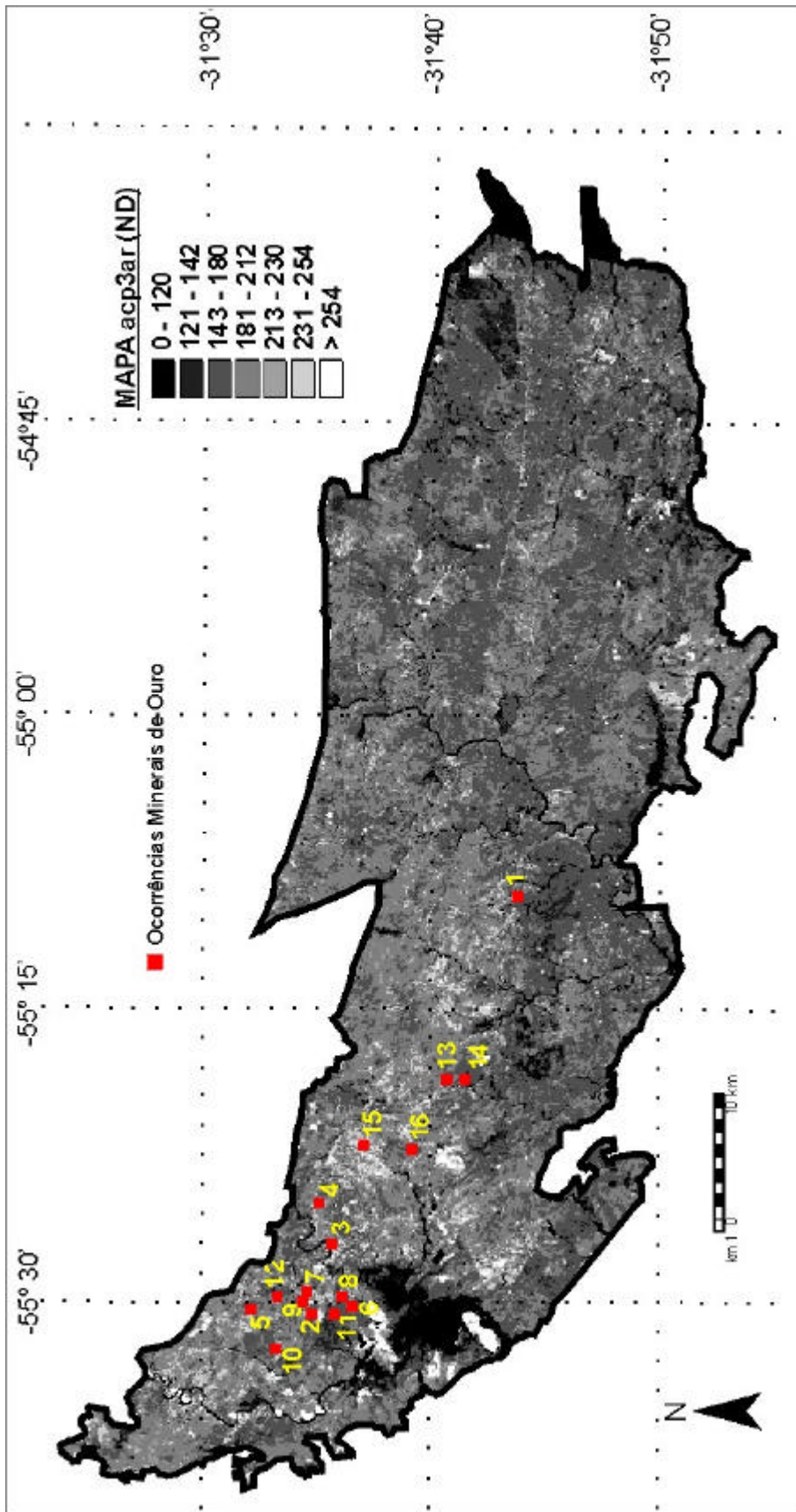


Figura 4.15 – PI derivado acp3ar (MD6), produzido no Fator LANDSAT. Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

Fator LANDSAT - Pls MD1 a MD6

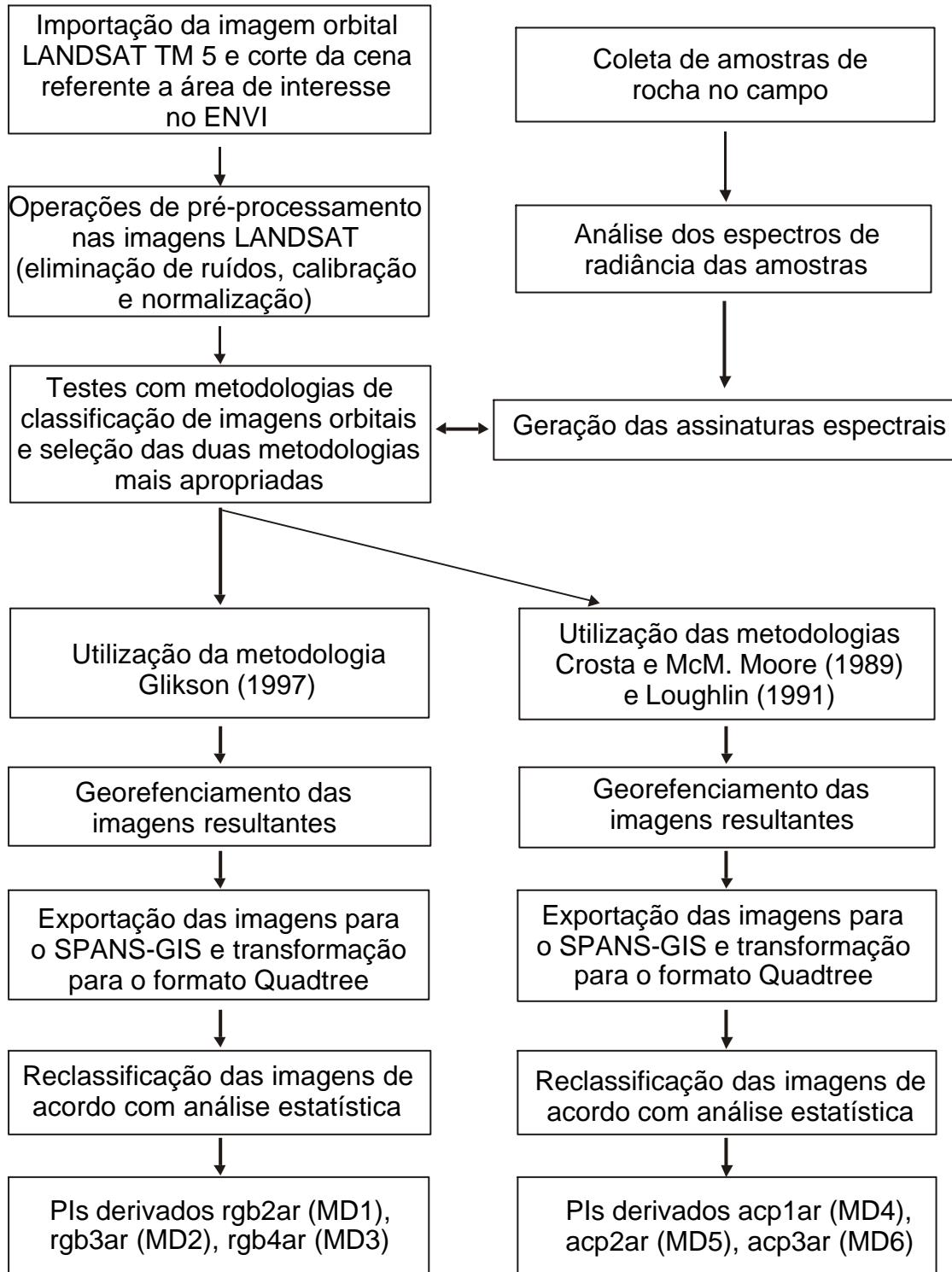


Figura 4.16 – Fluxograma do Fator LANDSAT.

Os dados impressos em mapas e croquis de exploração geoquímica foram transformados para o formato digital por meio de mesa digitalizadora e programa MDDC2. Esse procedimento resultou em quatro tabelas de dados no formato ASCII com extensão *.txt (sedimentos de drenagem, concentrados de minerais pesados, **BLEG** e amostras de litogeoquímica). As tabelas geoquímicas foram editadas de acordo com o padrão de tabelas do SPANS-GIS[#] e importados com a extensão *.tba, transformada para *.tbb, o formato binário de tabelas usado no SPANS-GIS[#].

As tabelas geoquímicas passaram automaticamente a constituir um *layer* de dados tipo ponto. Os dados dessas tabelas foram analisados estatisticamente (elaboração de histogramas, testes de lognormalidade, definições e análise de populações e suas distribuições) com auxílio dos programas STATISTICA[#] e GSLIB. Esse estudo preliminar serviu de base para a definição sobre a melhor maneira de tratar os dados existentes.

Os dados geoquímicos foram agrupados por bacias de drenagem, devido a: 1) escassez e má distribuição dos dados, principalmente em termos de áreas com ausência de dados, 2) modificações nas metodologias de amostragem e de análise laboratorial usadas ao longo dos vários anos de pesquisa feitas por diferentes empresas e, ainda, 3) premissa básica de não se usar dados de sedimentos de corrente, de concentrados de minerais pesados e de **BLEG** diretamente na geração de superfícies e curvas de contorno tendo em vista seu posicionamento espacial alóctone. O agrupamento dos dados geoquímicos procura, assim, aumentar a confiabilidade dos resultados e possibilitar o seu uso interpretativo mais adequado.

Os dados de sedimentos de corrente (Au), de concentrados de batéia (Au) e de **BLEG** (Au, Ag, Cu, Pb, Zn) foram separados em bacias de drenagem. As bacias de drenagem foram digitalizadas diretamente no SPANS-GIS[#] por meio de suas ferramentas de criação e de edição de dados espaciais. Concomitantemente, foram elaboradas tabelas de atributos associadas aos dados geoquímicos. A definição e a digitalização dessas bacias de drenagem foi feita sobre uma base tipo *map composition*, constituída pelo sistema de drenagem e pelos pontos de coleta de sedimentos (*layers* de dados tipo linha e tipo ponto, respectivamente) sobrepostos ao modelo digital de terreno da **ICR** (ver item 4.8, Fator Altimetria). A geração das bacias foi feita separadamente: um *layer* de dados tipo área para cada tipo de amostra (sedimento de corrente, concentrados de minerais pesados). Os dados de **BLEG** geraram cinco *layers*: um para cada elemento.

Os **PIs** do sistema de drenagem (Fator Infraestrutura) foram implementados da mesma maneira que os demais PIs no formato vetorial tipo linha: transformados da forma analógica, a partir de cartas topográficas do *Servicio Geográfico Militar (R. O. del Uruguay)* para a forma digital por meio de mesa digitalizadora em AutoCAD#. Os arquivos *.dwg resultantes (um para cada ordem de drenagem) foram transformados para o formato *.dxf e exportados para o SPANS-GIS#; esses arquivos foram seqüencialmente transformados em *.veh / *.vec e em *layers* (camadas) de dados tipo linha no formato vetorial binário com extensão *.top / *.vtx. A figura 4.17 mostra o *layer* drenagem composto com todas as ordens de drenagem.

Os dados geoquímicos estão muito mal distribuídos e formam agrupamentos muito densos (*clusters*) em determinadas áreas. Assim, foi aplicado um tratamento de desagrupamento segundo a técnica *cell-declustering* (Deutsch & Journel, 1996). Essa técnica separa as áreas em células quadradas, ou retangulares e atribui pesos inversamente proporcionais ao número de dados localizados em cada célula. Esse procedimento forneceu a média dos valores de cada bacia, que é mais próxima da média verdadeira. Para esse processamento, os dados foram exportados para o GSLIB como tabelas ASCII.

Os resultados (valores de média dos dados de cada bacia) foram acrescentados às tabelas de atributos das bacias no GSLIB e analisados estatisticamente; porém, a partir do desagrupamento, os dados foram tratados como dados tipo área (valor de média de cada bacia de drenagem). Essa análise permitiu a definição e a separação de populações de médias de bacias de drenagem, de maneira a possibilitar reclassificação dos dados em função das diferentes populações encontradas. Todos esses resultados também foram acrescentados posteriormente às tabelas de atributos no SPANS-GIS#.

Os dados de **BLEG** (valores de média das bacias de drenagem) foram tratados separadamente, antes do processo de reclassificação em função das populações, por meio da Análise de Componentes Principais (**ACP**), de maneira a reduzir o número de variáveis e a quantidade de informações provenientes dos elementos analisados. A **ACP** foi utilizada porque os dados, em geral, são muito correlacionados e, em consequência, apresentam comumente uma considerável quantidade de informação similar. Essa **ACP** foi executada com o auxílio do *software* STATISTICA sobre os dados de **BLEG** importados como tabelas ASCII do GSLIB.

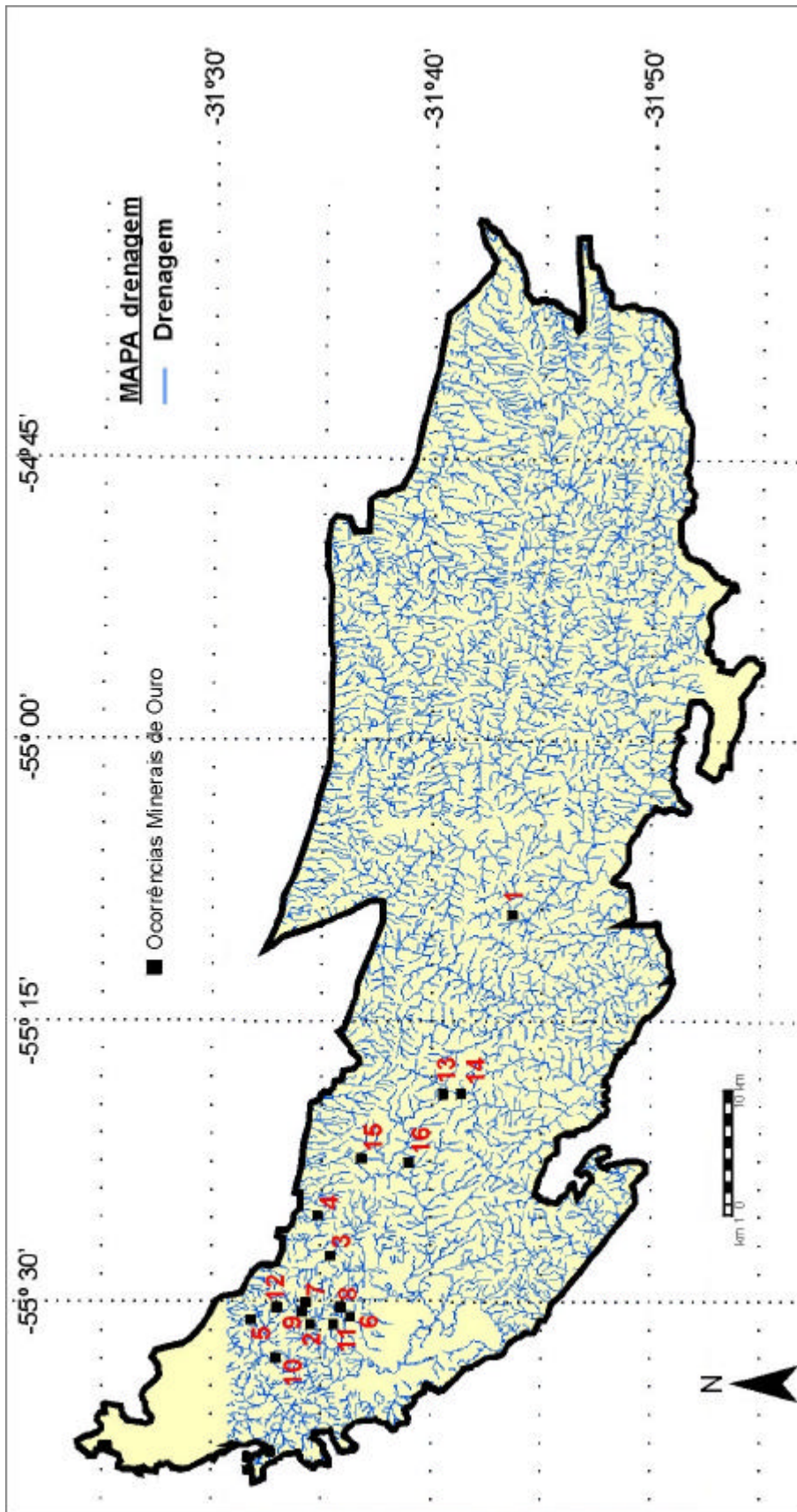


Figura 4.17 – PI original drenagem composto pela rede hidrográfica ocorrente na ICR. Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

Os valores das variáveis utilizadas na **ACP** foram processados utilizando-se o fator de rotação Varimax, normalizado sobre os dados de **BLEG** dos elementos Au, Ag, Cu, Pb e Zn. Esse mecanismo de rotação foi utilizado porque permite a maximização da variância dos componentes resultantes. Salienta-se que, para a implementação da **ACP**, foi retirado do banco de dados uma amostra (número 39), cujo valor de 2537 ppb foi considerado um *outlier*, talvez ocasionado por problemas na amostragem, ou na análise.

A seleção das componentes principais foi realizada de acordo com: 1) o critério de Kaiser (1960), que seleciona as componentes com autovalor superior a 1; e 2) o Teste de *Scree* (Cattell, 1966), que sugere a escolha das componentes cujo autovalor corresponda a pontos posicionados antes da quebra (horizontalização) da curva no gráfico correspondente (ver Figura 4.18).

As tabelas 4.3 e 4.4 mostram os autovalores apresentados pelas duas primeiras componentes principais selecionadas. Dessas componentes, a segunda foi escolhida para o processo de integração, por apresentar o maior autovetor (maior correlação extraída pelos fatores para o elemento Au) e trazer a maior quantidade de informações do elemento Au e, ainda, por conter informação a respeito da variância do elemento Ag. Deve-se notar que, a relação do elemento ouro (Au) com o elemento prata (Ag) também foi constatada por Quadros (1995), ao analisar a composição química dos minerais de minérios da alteração hidrotermal do depósito aurífero da Mina San Gregorio.

Os *layers* de dados geoquímicos tipo área (bacias de sedimentos de corrente, bacias concentradas de minerais pesados e bacias de **BLEG**) foram reclassificados por meio de curvas em gráficos de probabilidade, de acordo com a metodologia proposta por Sinclair (1976), já discutida no item referente ao Fator LANDSAT.

A técnica de seleção do limiar pela mediana somada à distância interquartil, de larga utilização na exploração geoquímica, foi descartada, em virtude dela diminuir a flexibilidade na atribuição posterior dos pesos para a integração. Isso decorre do fato de que os mapas binários seriam o resultado do uso de apenas um limiar. A adoção dos tradicionais conceitos de média + n-desvios padrão de Hawkes & Webb (1962) pareceu ser uma simplificação perigosa, pois poderia produzir uma suavização de anomalias sutis, ou, por outro lado, poderia criar anomalias não significativas; assim, também foi descartado.

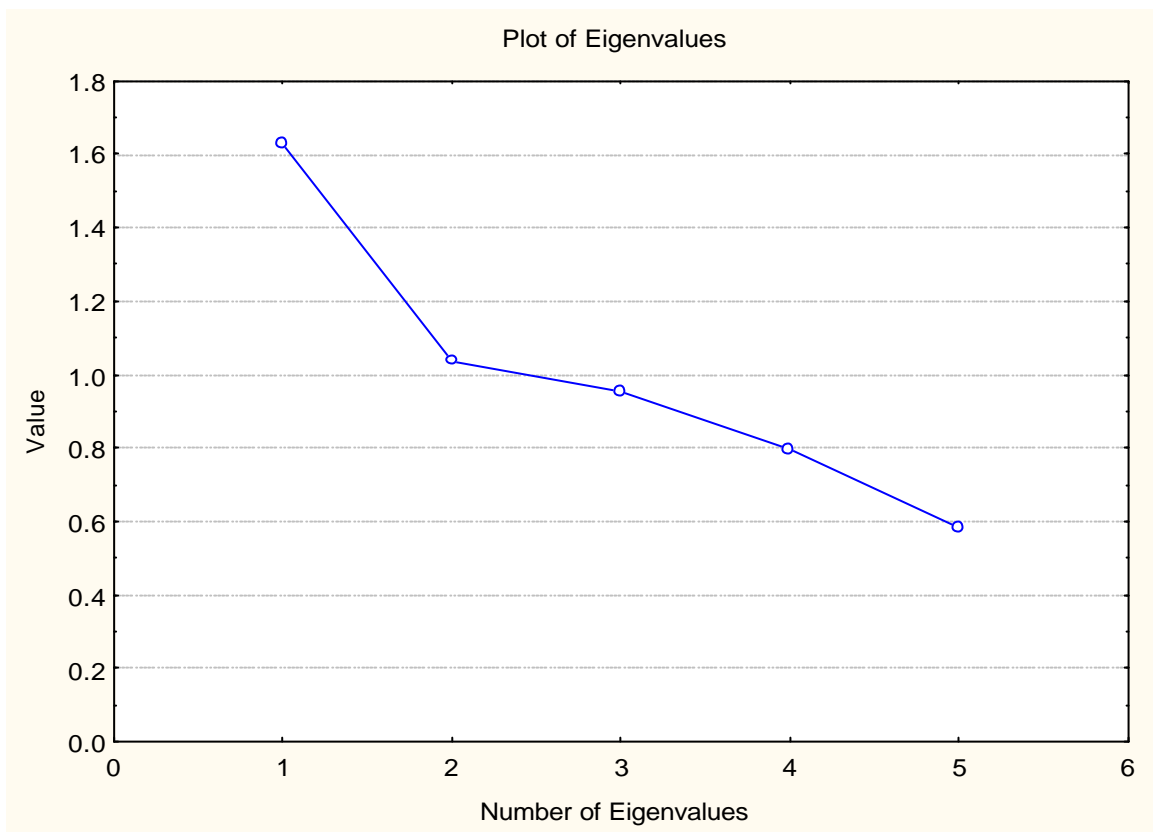


Figura 4.18 – *Scree plot* de autovalor x número de autovalores .

Tabela 4.3 – Autovalores das duas primeiras componentes resultantes da Análise de Componentes Principais sobre os dados de **BLEG**. Tabela padrão STATISTICA.

Eigenvalues (bgfacscoresnew.sta)				
Extraction: Principal components				
		% total	Cumul.	Cumul.
	Eigenval	Variance	Eigenval	%
1	1.628742	32.57484	1.628742	32.57484
2	1.036984	20.73968	2.665726	53.31451

A utilização da metodologia de Sinclair (1976) teve como objetivo principal a separação de possíveis populações de dados (valor de média de cada bacia de drenagem), de maneira a distinguir as populações de teor de fundo das populações anômalas. Os resultados permitiram, então, a reclassificação dos *layers* de dados tipo área desse fator em classes, uma para cada população reconhecida.

Tabela 4.4 – Autovetores mostrando a correlação entre as variáveis e os fatores. Notar a correlação entre as variáveis Au e Ag evidenciada no Fator 2. Tabela padrão STATISTICA.

Factor Loadings (Varimax normalized) (bgfacscores1.sta)		
Extraction: Principal components		
(Marked loadings are > .700000)		
	Factor 1	Factor 2
VARAu	.077866	.816272
VARAg	-.467123	.464354
VARCu	-.805162	-.127220
VARPb	.085504	-.478513
VARZn	-.788781	.191321
Expl.Var	1.502039	1.163687
Prp.Totl	.300408	.232737

A reclassificação foi realizada diretamente no SPANS-GIS, com base nas curvas dos gráficos de probabilidade gerados no GSLIB. Dessa forma, foram gerados os *layers* de dados tipo área reclassificados e denominados **bacpann** (Bacias de drenagem – concentrados de minerais pesados), **bacsedn** (Bacias de drenagem – sedimentos de corrente), **babgcp2n** (Bacias de drenagem – **BLEG** - segunda componente principal da **ACP**). Esses *layers* foram finalmente transformados para o formato **quadtree**, de maneira a permitir seu melhor uso nos processos posteriores de integração. Os **PIs** derivados gerados a partir dos dados geoquímicos são: MD7 (**bacpann**), MD8 (**bacsedn**) e MD9 (**babgcp2n**). Esses mapas podem ser visualizados nas figuras 4.19, 4.20 e 4.21, os quais já se encontram mascarados pelo mapa base que delimita a **ICR**. A figura 4.22 apresenta um resumo dos procedimentos usados no processamento desse Fator.

Os dados de litogeoquímica, após digitalizados, editados e submetidos à análise variográfica para posterior processo de geração do mapa por Krigagem Ordinária, não mostraram ser passíveis de interpolação; isso provavelmente se deve à grande escassez de dados. Assim, esses dados foram eliminados do atual processo de integração, mas foram armazenados em tabelas de atributos, de modo a possibilitar sua posterior utilização no caso de futura disponibilização de uma maior quantidade de dados.

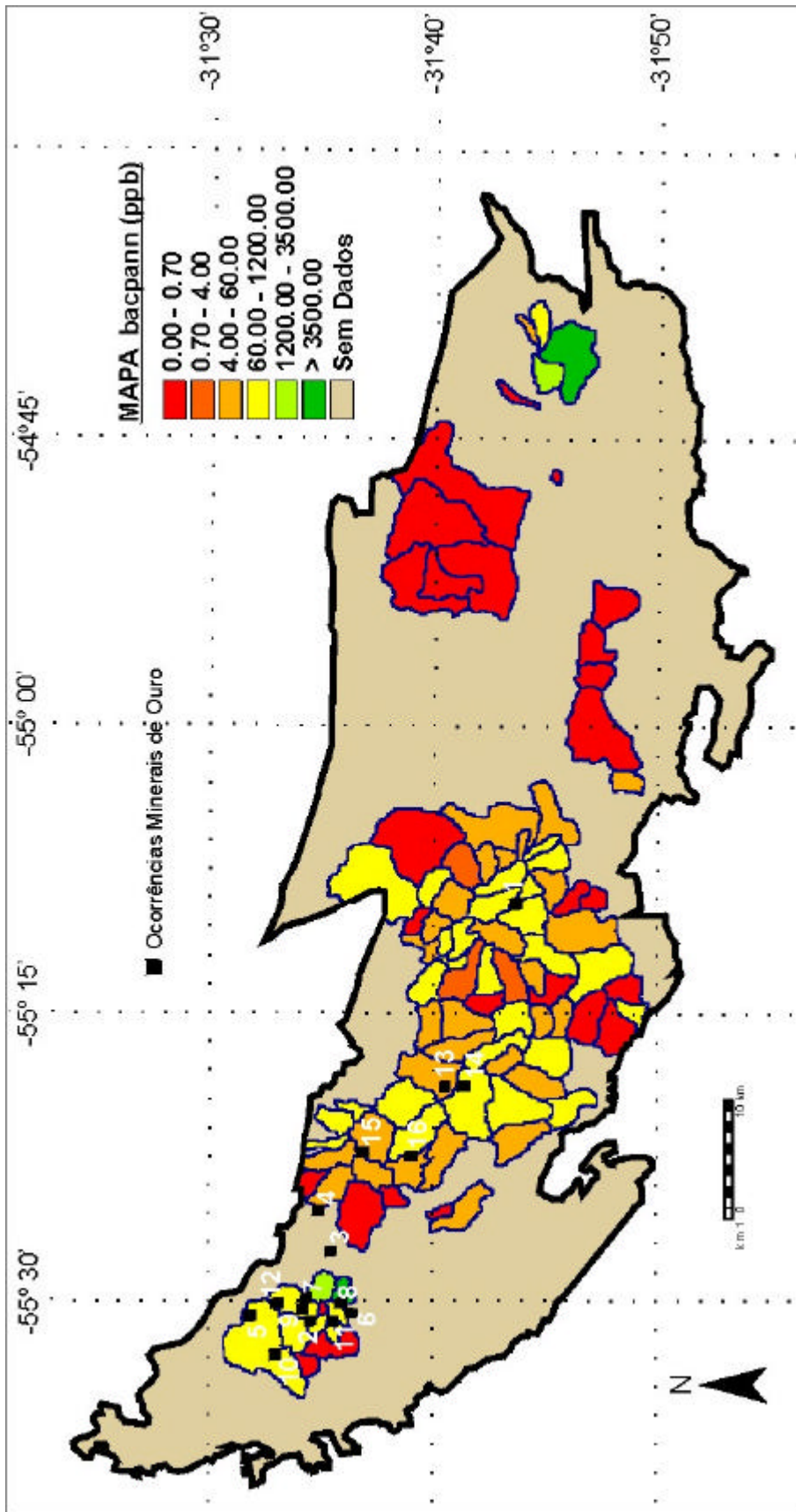


Figura 4.19 – PI derivado bacpann (MD7), constituído pelas bacias de drenagem com coleta de concentrados de minerais pesados. Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

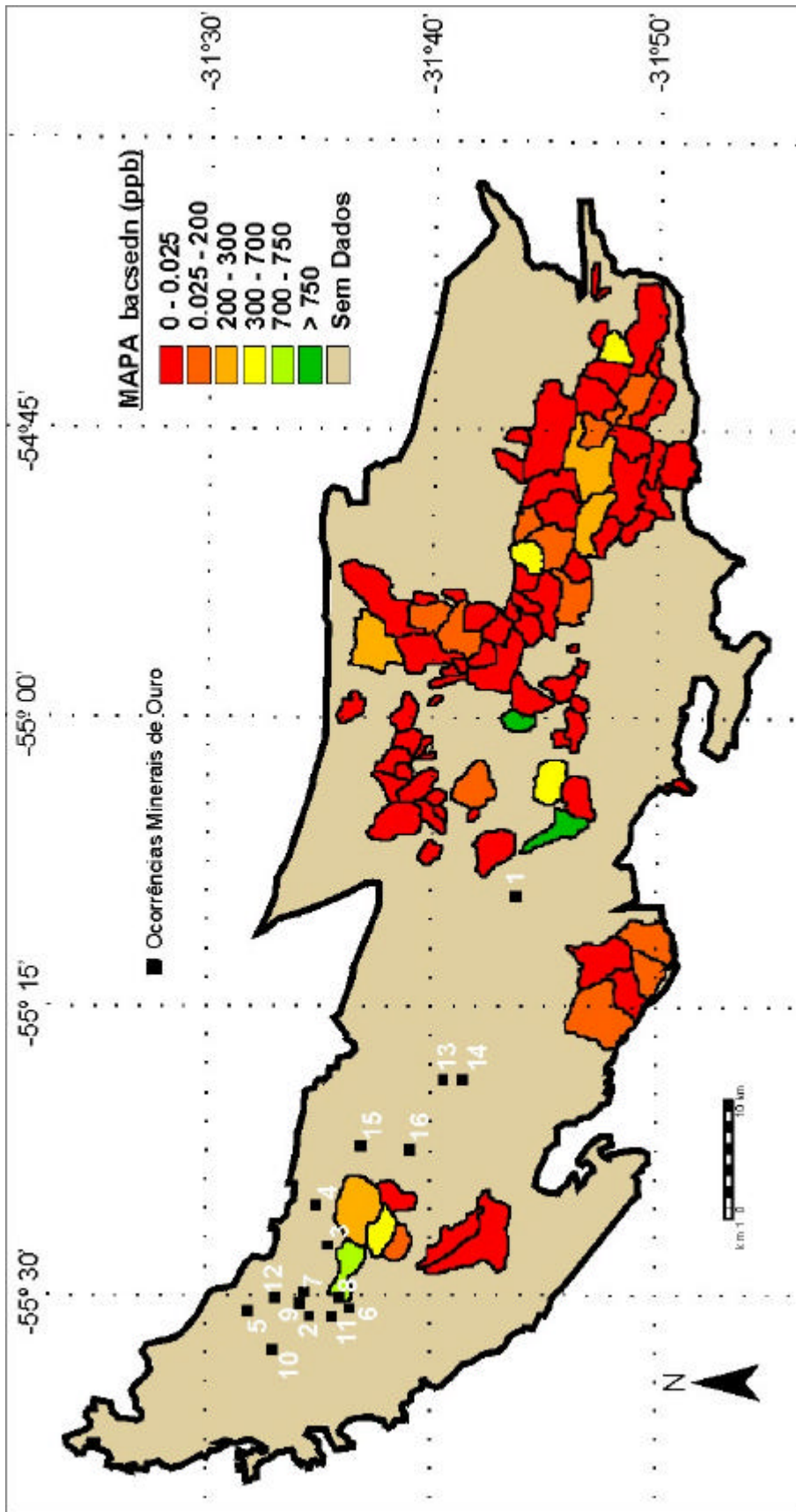


Figura 4.20 – PI derivado **bacedn** (MD8), constituído pelas bacias de drenagem com coleta de sedimentos ativos de drenagem. Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

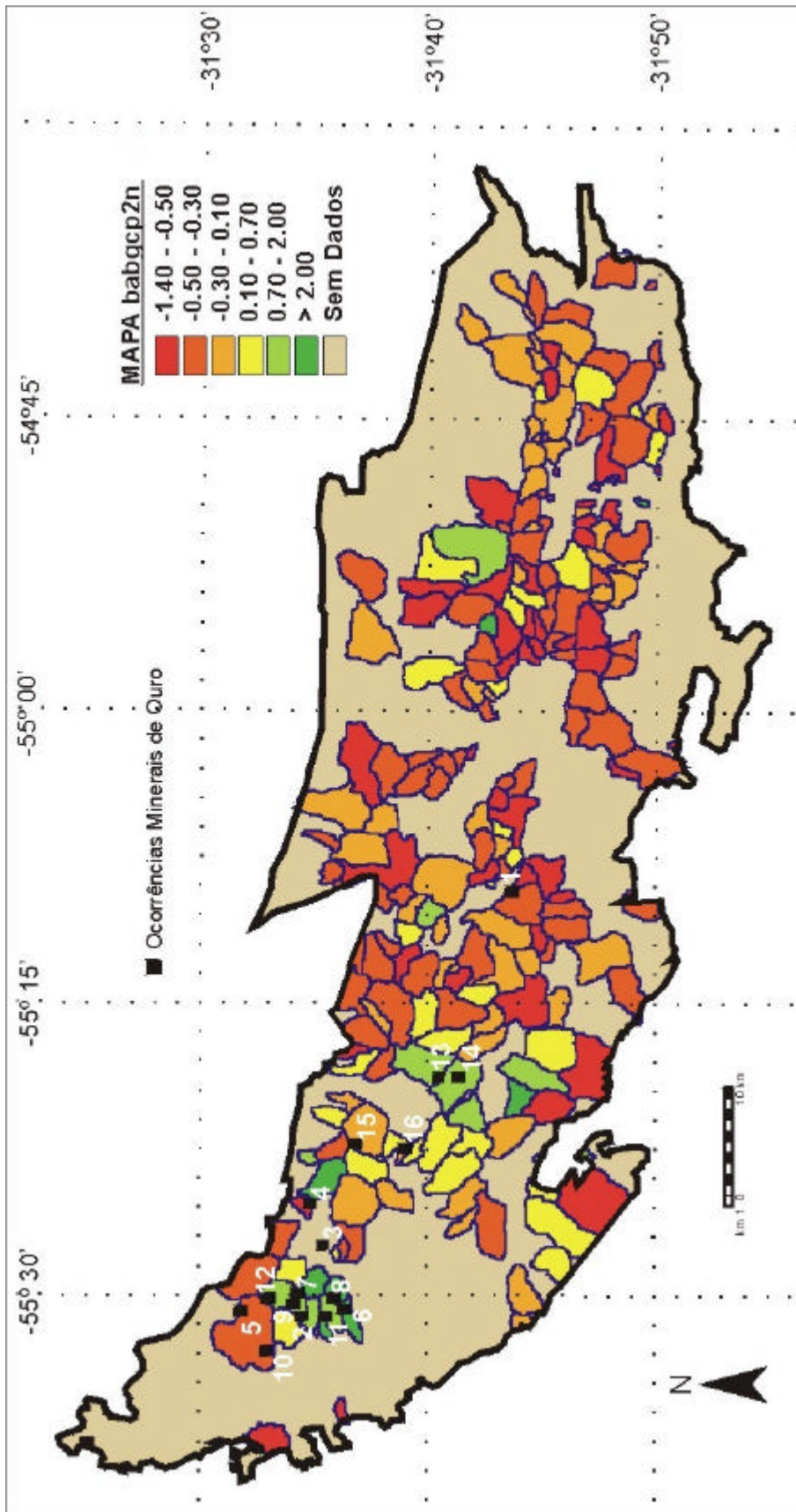


Figura 4.21 – PI derivado babgcp2n (MD9), constituído pelas bacias de drenagem com coleta de BLEG. Ocorrências mineraiis identificadas no mapa da figura 4.5.

Fator Geoquímico - Pls MD7 a MD9

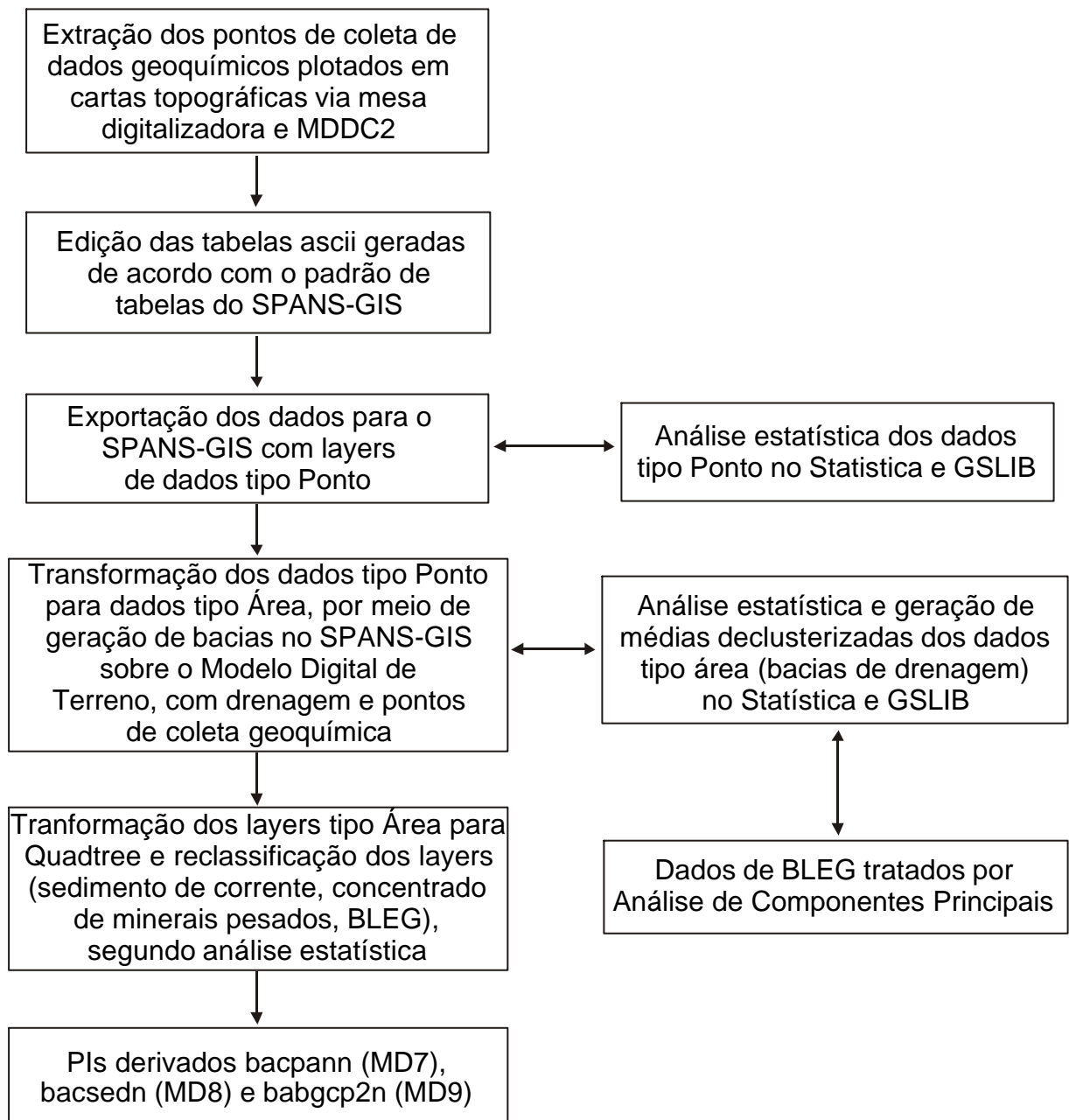


Figura 4.22 – Fluxograma do Fator Geoquímico.

4.6 Fator geofísico

O estudo de dados provenientes de levantamentos aerogeofísicos, como foi o caso dos dados do Fator LANDSAT, devem sofrer um pré-processamento antes que análises mais definitivas possam ser feitas e antes que esses dados possam ser usados em modelamentos de

integração. Assim, os dados aerogeofísicos passaram por uma série de correções e de calibrações, de maneira a eliminar problemas intrínsecos do levantamento aéreo e também problemas inerentes às características do tipo de dado coletado.

O levantamento aerogeofísico foi executado pela DIGHEM–CGG Canada Ltd, no ano de 1996. Os dados foram coletados por um magnetômetro de césio de alta sensibilidade e por um espectômetro de raios gama, ambos posicionados em helicóptero Bell 206. Um sistema de navegação eletrônica RT-DGPS foi usado para fornecer os dados de navegação. Também foram usados um altímetro por radar, uma video-câmara e registradores analógicos e digitais. Foram levantados 7416 Km de linha. As linhas de vôo foram realizadas na direção azimutal 000, com uma separação de 300m; a região de San Gregorio foi levantada com linhas separadas em 100m. O helicóptero voou a uma altitude média de 30m e a uma velocidade de 120 Km/h.

Os dados aeromagnéticos foram corrigidos em relação à variação diurna por meio de uma estação base e tiveram removido o *International Geomagnetic Reference Field (IGRF)* para a área de pesquisa.

Os dados aerogamaespectrométricos são basicamente fornecidos em quatro canais, que representam as radiações γ (gama) devidas ao U, ao Th, ao K e à Contagem Total (CT) de todas radiações γ do meio. Os dados aerogamaespectrométricos foram corrigidos de acordo com os procedimentos descritos no IAEA *Technical Report* (1991). Assim, os dados foram submetidos aos processos de: 1) Correção *Live Time*, que expressa o período relativo de tempo durante o qual o instrumento foi hábil para registrar novos pulsos por intervalo de amostragem; 2) Correção de teor de fundo cósmico e da aeronave; 3) Correção do teor de fundo proveniente do Radônio; 4) Correção de *stripping compton*, onde os dados de K, U e Th foram corrigidos em relação ao *spectral overlap*; 5) Correção de atenuação, onde os dados de CT, K, U e Th foram corrigidos em relação a altitude nominal. Todas essas correções foram feitas pela empresa que fez o aerolevanteamento.

Os dados aerogeofísicos, já na forma digital e georeferenciados, constituíram dois bancos de dados com extensão *.xyz: 1) dados de aeromagnetometria e 2) dados de aerogamaespectrometria. Esses dados foram importados para o *software* GEOSOFT OASIS MONTAJ versão 4.1 (GEOSOFT, 1997), onde passaram a ter a extensão *.gdb, formato padrão para banco de dados no OASIS MONTAJ.

Os dados aerogeofísicos foram inicialmente corrigidos em relação a alguns erros detectados nos bancos de dados (repetição de linhas de vôo, pontos sem coleta, ou com problemas de coleta, etc...). O passo seguinte do pré-processamento foi a geração de mapas, executados por meio do método de curvatura mínima (superfície de curvatura mínima similar a descrita por Briggs, 1974); porém, esse procedimento não apresentou resultados satisfatórios, pois, principalmente para os dados magnetométricos, não foi suficientemente removido o efeito puxamento nas linhas de vôo, que resultam de problemas de nivelamento. De outro modo, a forte anisotropia estrutural na **ICR**, causada pelas estruturas constituintes do Sistema de Cisalhamento Rivera (Quadros *et al.*, 1995; Quadros, 1995), pode ser utilizada como um controle de qualidade dos produtos gerados a partir desse pré-processamento. Assim, decidiu-se pela utilização do método de interpolação denominado Krigagem Ordinária (Isaacs & Srivastava, 1989; Goovaerts, 1997), conhecido como um dos métodos que melhor se ajusta às anisotropias do meio.

Os bancos de dados aerogeofísicos corrigidos foram reeditados de acordo com o formato de dados tipo ASCII exigido pelo *software* GSLIB (Deutsch & Journel, 1996), em estação Sylicon Graphics. No GSLIB, os dados foram submetidos aos processos de análise estatística e de continuidade espacial. A análise de continuidade espacial definiu um padrão elíptico de anisotropia, que é compatível com a anisotropia estrutural definida para a **ICR**; os azimutes que definiram as elipses de anisotropia para os dados aerogeofísicos foram: 112.5° (azimute de máxima anisotropia) e 22.5° (azimute de mínima anisotropia). Os histogramas dos dados originais podem ser visualizados na figura 4.23. Os correlogramas referentes às direções de anisotropia mostraram bom ajuste e podem ser visualizados nas figuras 4.24 e 4.25. Todos os correlogramas foram ajustados com o modelo exponencial.

Os histogramas de erro da validação cruzada dos dados gamaespectométricos e magnetométricos mostraram média zero, ou próximas a zero. Então, foram interpolados pelo processo de Krigagem Ordinária, de maneira a gerar superfícies contínuas (mapas). Os histogramas das superfícies resultantes podem ser vistos na figura 4.26 e mostram a boa confiabilidade da metodologia, conforme pode ser visto pela similaridade das médias dos dados originais e interpolados. A distribuição dos dados interpolados mostrou uma pequena diminuição do desvio padrão em relação a distribuição dos dados originais.

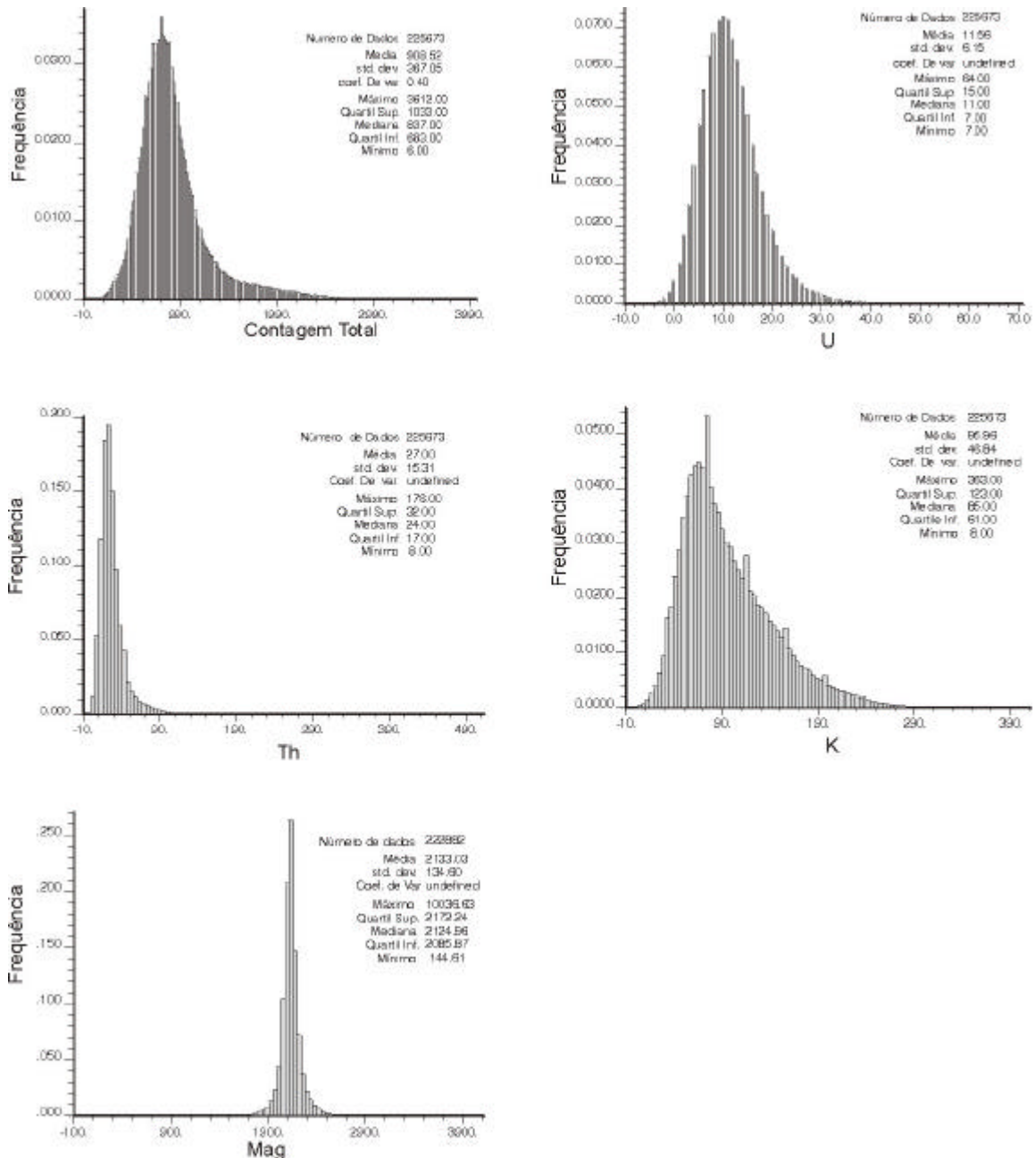


Figura 4.23 – Histogramas dos dados originais provenientes do levantamento aerogeofísico.

As superfícies geradas por krigagem no sistema GSLIB (mapas) foram reeditadas para o formato ASCII do *software* SURFER V-6.02 (Golden Software, 1996), de forma a serem transformados para o formato binário; nesse formato, foi possível importar novamente os dados para o sistema GEOSOFT[#], onde são transformados para o formato de superfície contínua (*grid*) padrão com extensão *.grd. Esses **PIs** originais, na forma de *grids* (mapas) de Contagem Total, K, U, Th e magnetometria (Figs. 4.27 a 4.31) serviram então de base inicial para todo o processamento geofísico realizado no OASIS MONTAJ[#].

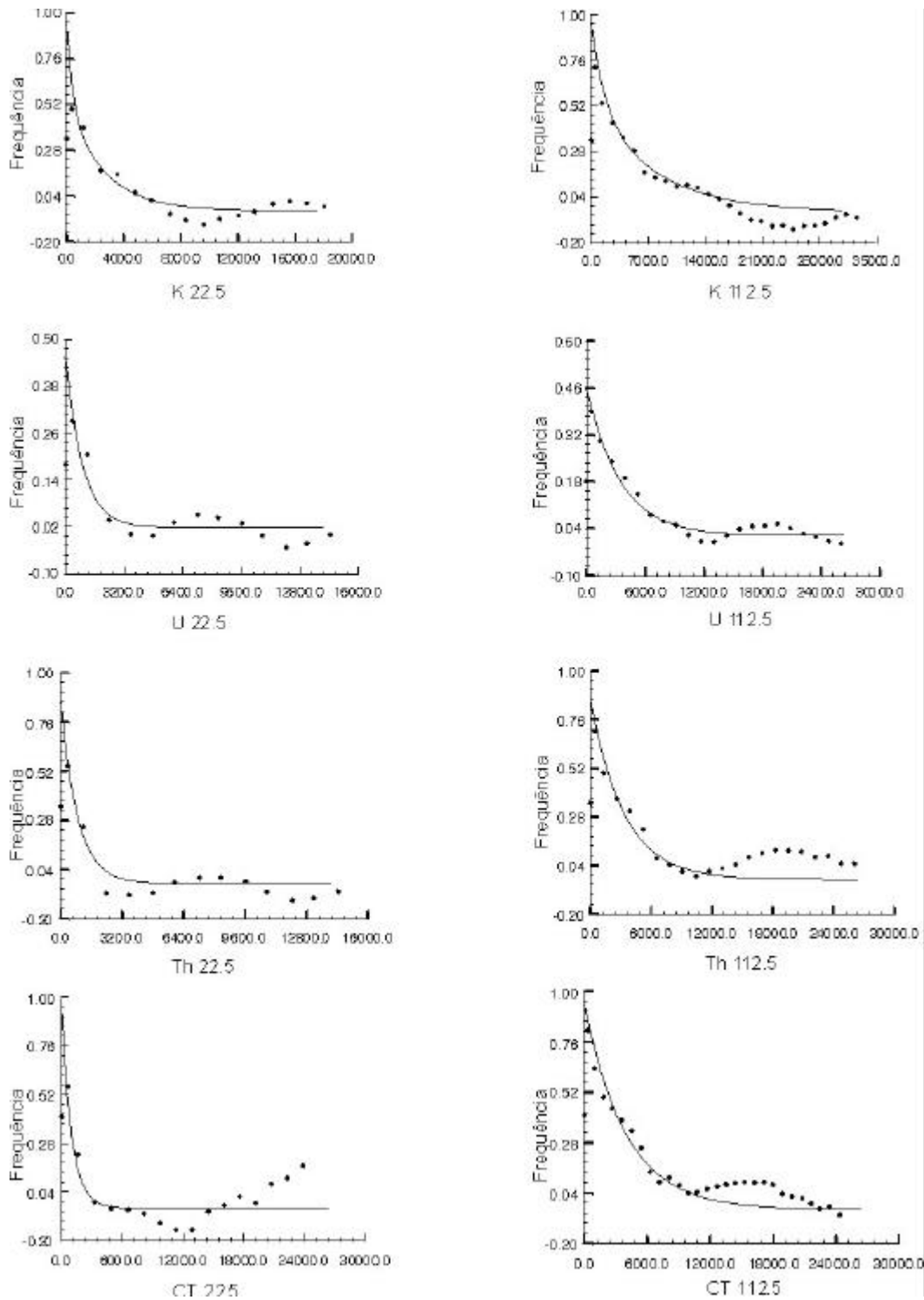


Figura 4.24 – Variogramas dos dados gamaespectométricos nas direções de mínima (22.5) e máxima (112.5) continuidade espacial. Correlograma com ajuste por modelo exponencial.

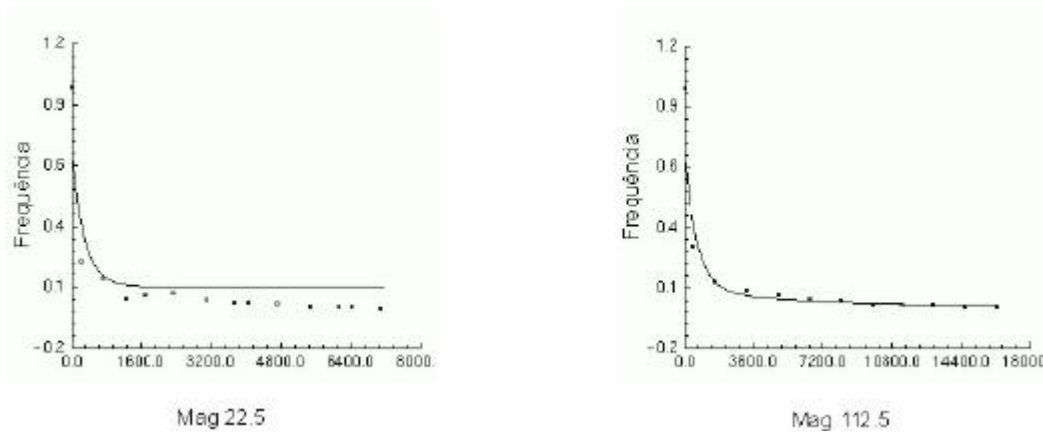


Figura 4.25 - Variogramas dos dados magnetométricos nas direções de mínima (22.5) e máxima (112.5) continuidade espacial. Correlograma com ajuste por modelo exponencial.

A qualidade dos mapas gerados pelo processo de Krigagem permitiu a sua utilização direta nos processamentos seguintes, sem a necessidade do uso de filtros de correção e de eliminação de ruídos, os quais sempre modificam os dados originais e geram incertezas nos resultados finais. O processo de krigagem, apesar de não ter eliminado o problema de nivelamento entre as linhas de vôo, minimizou-o mais acentuadamente do que a interpolação por curvatura mínima.

A partir desse ponto, os dados gamaespectrométricos e magnetométricos foram processados com fluxogramas distintos, os quais encontram-se descritos e discutidos a seguir.

4.6.1 Dados de gamaespectrometria

O processamento dos dados aerogamaespectrométricos, agora na forma de *grids* (mapas) de CT, K, U e Th, foi realizado por meio da seguinte seqüência de operações:

- a) construção das razões U/K, U/Th e Th/K e conseqüente geração dos mapas respectivos (Figs. 4.32 a 4.34);
- b) construção do Fator F, descrito pela equação a seguir, e geração do mapa respectivo (Fig. 4.35);

$$F = U/Th \times K \quad (4.1)$$

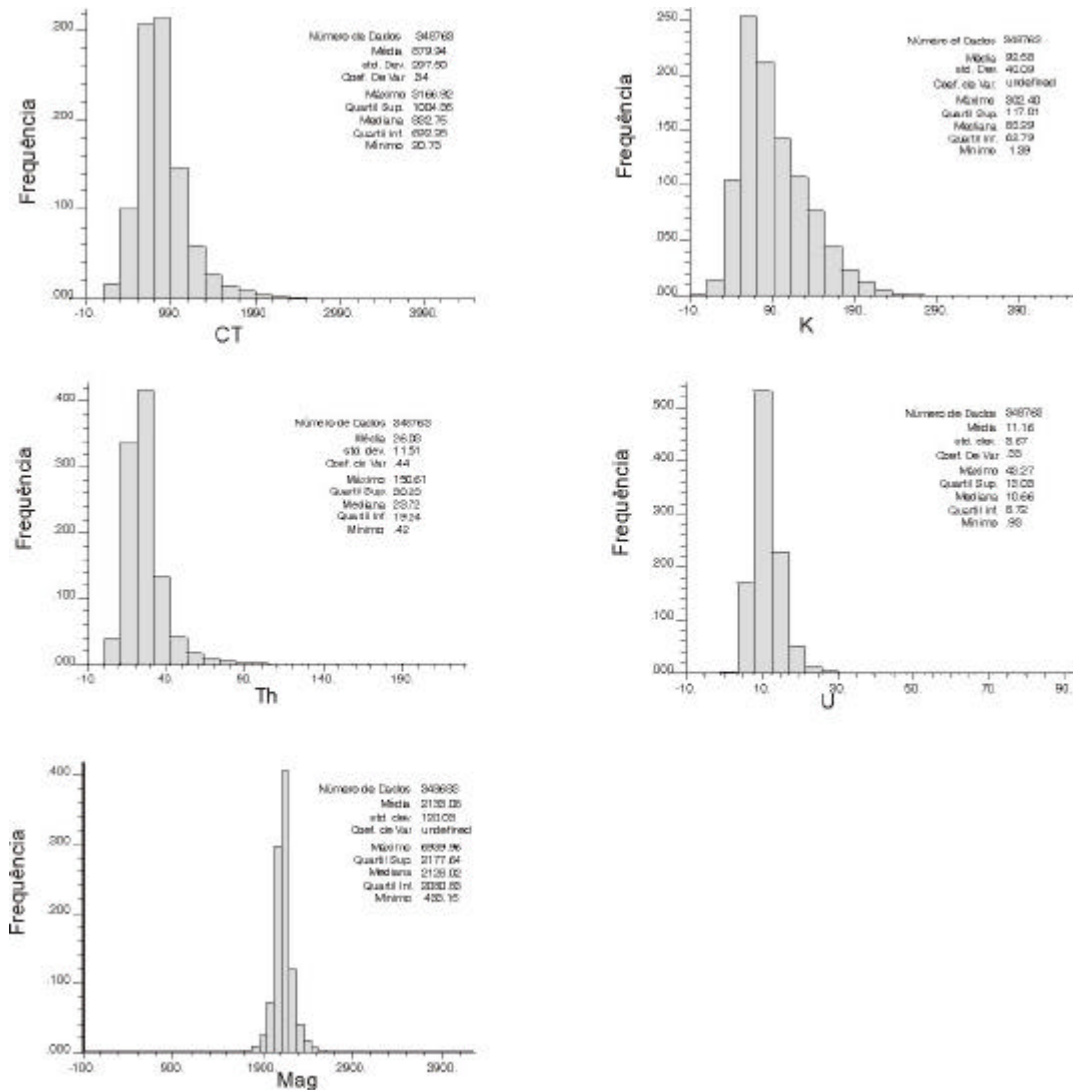


Figura 4.26 – Histogramas dos dados aerogeofísicos após krigagem.

c) construção do mapa Kd, K normalizado pelo Th (Fig. 4.36), baseado nas seguintes equações:

$$Kd = (K - Ki)/Ki, \text{ onde,} \tag{4.2}$$

$$Ki = (\text{média do mapa K}/\text{média do mapa Th}) \times \text{mapa Th} \tag{4.3}$$

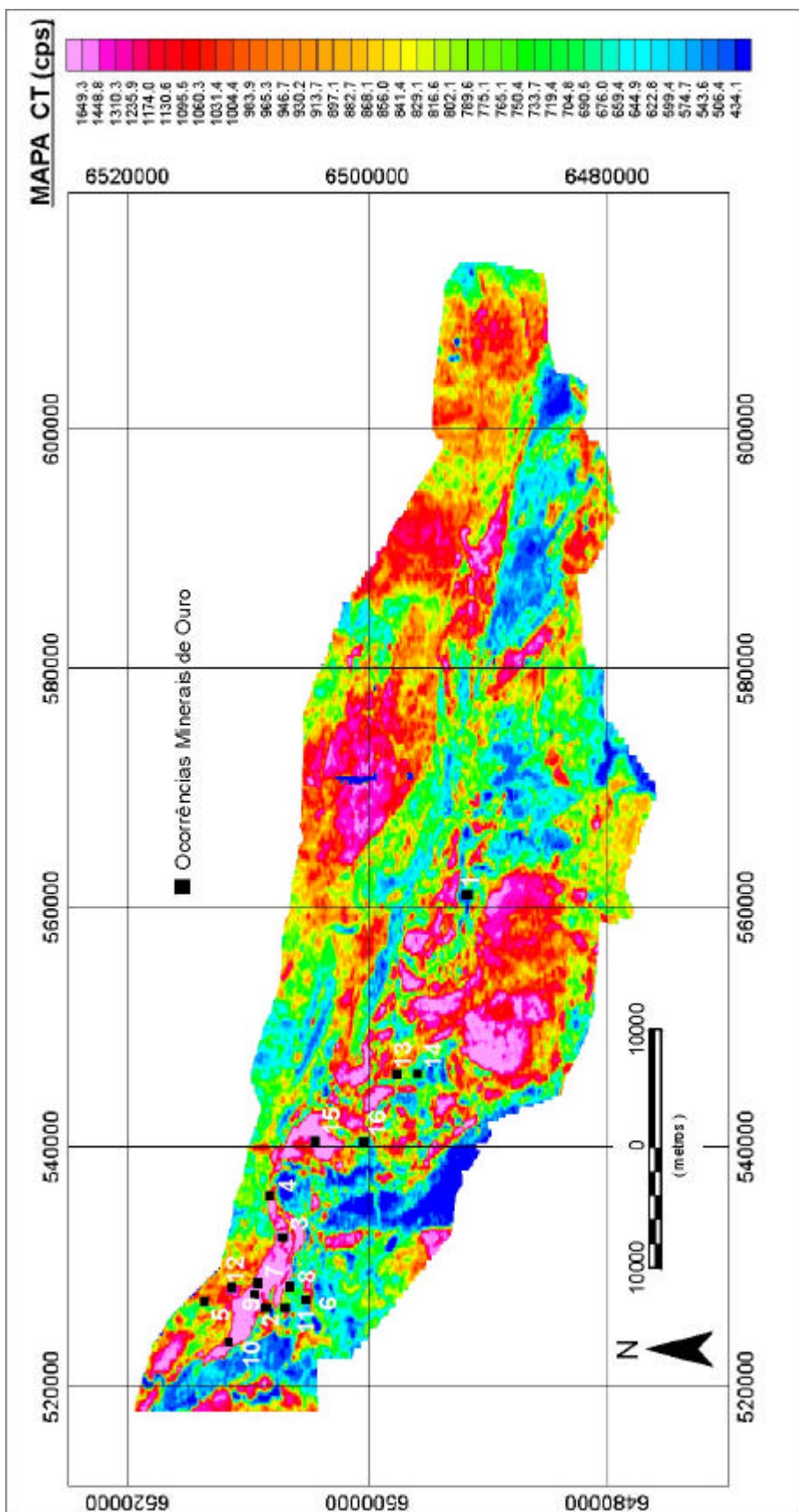


Figura 4.27 – Mapa aerogamaespectrométrico – Contagem Total (PI original). Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

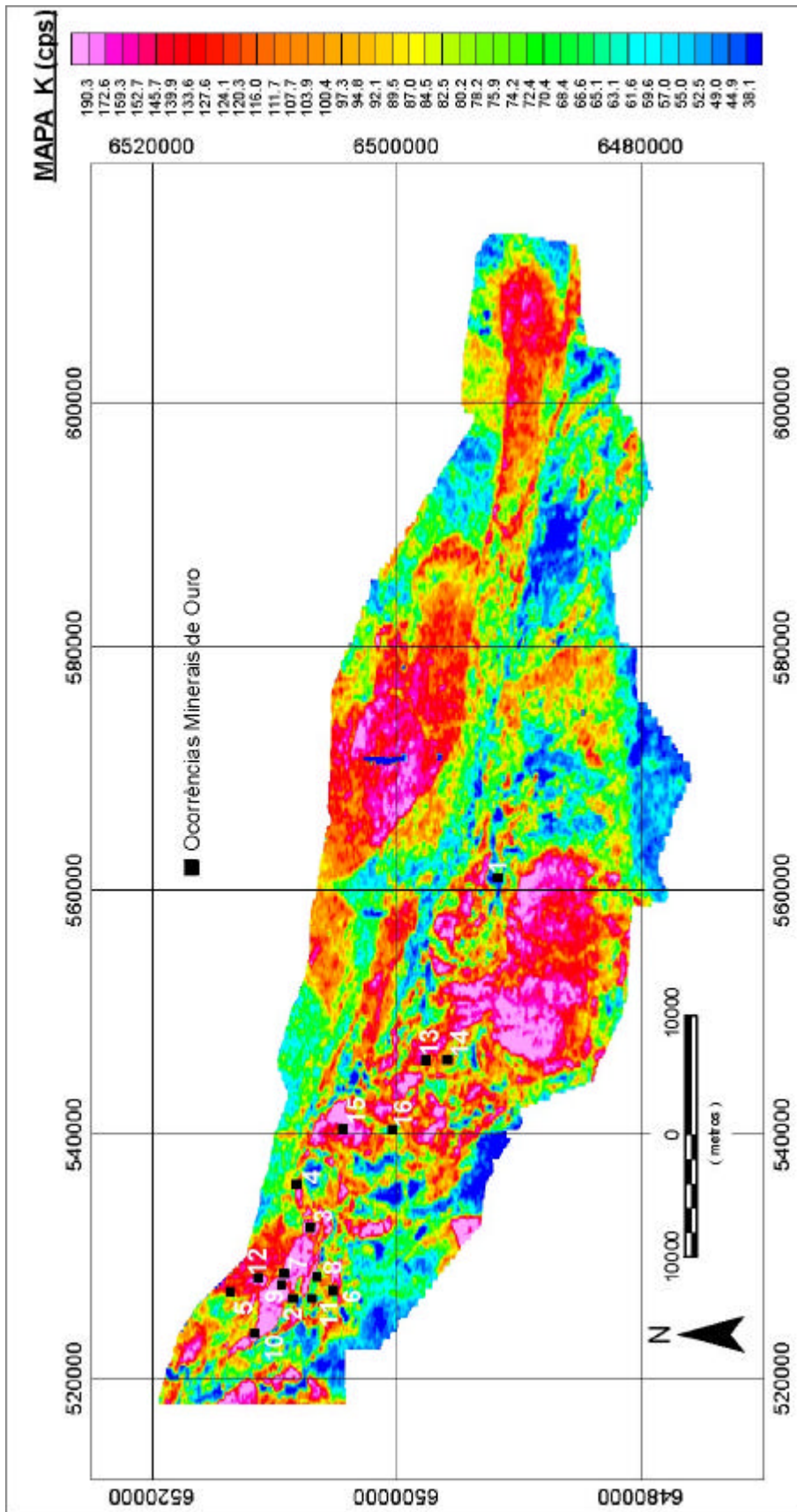


Figura 4.28 – Mapa aerogramaspectrométrico, canal K (PI original). Ocorrências mineralis identificadas no mapa da figura 4.5.

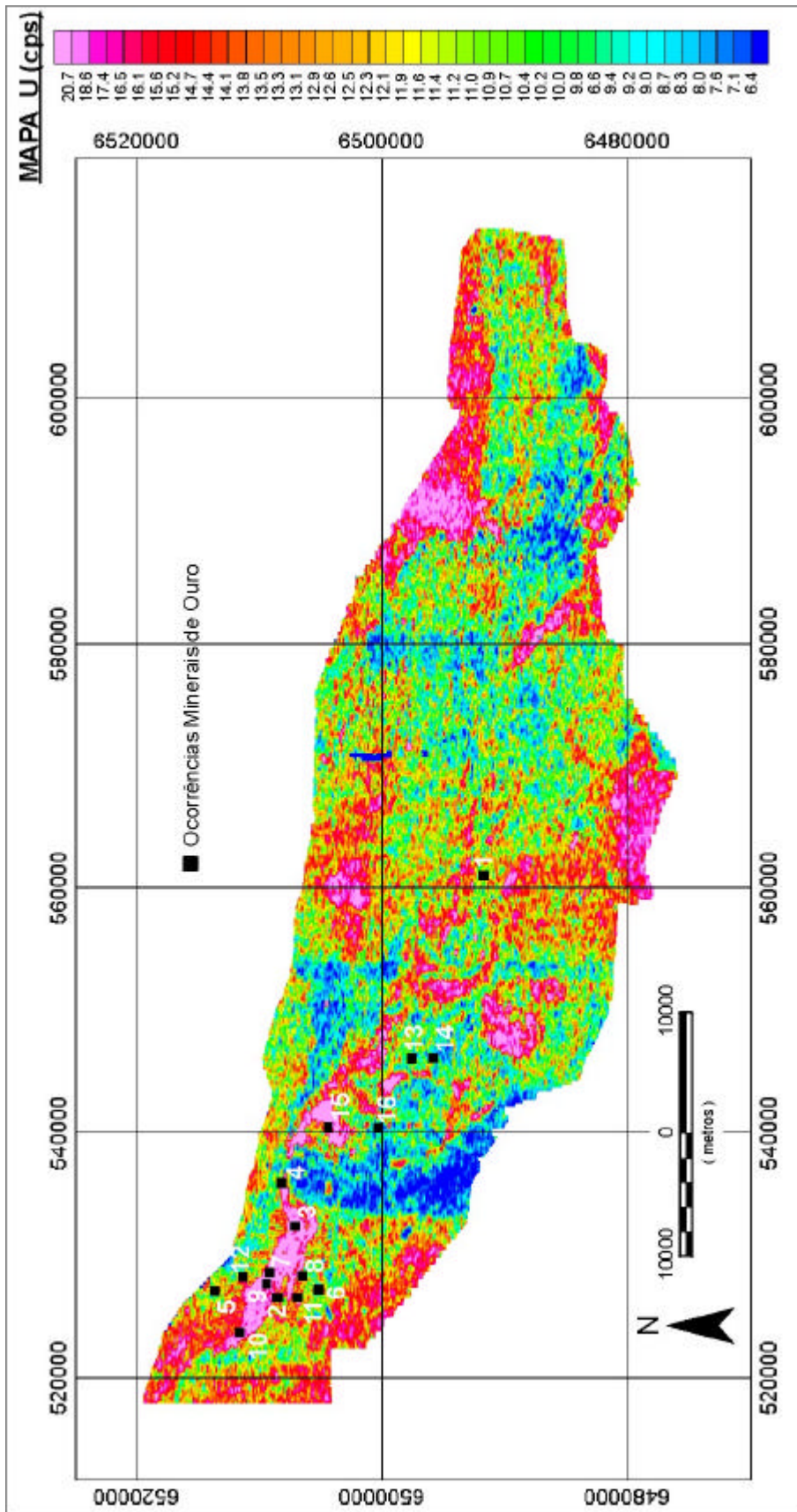


Figura 4.29 – Mapa aerogamaespectrométrico, canal U (PI original). Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

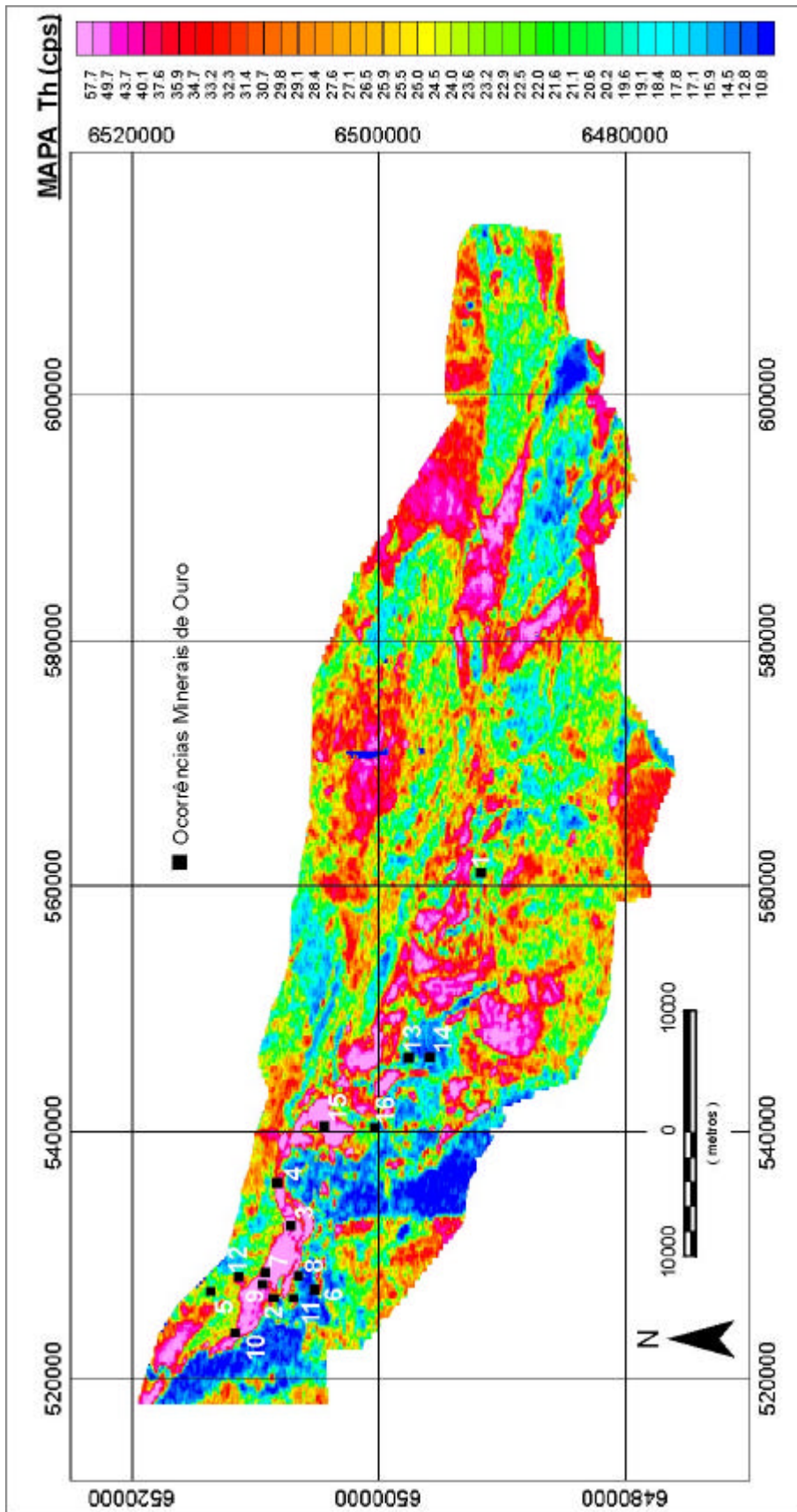


Figura 4.30 – Mapa aerogamaespectrométrico, canal Th (PI original). Ocorrências mineraias identificadas no mapa da figura 4.5.

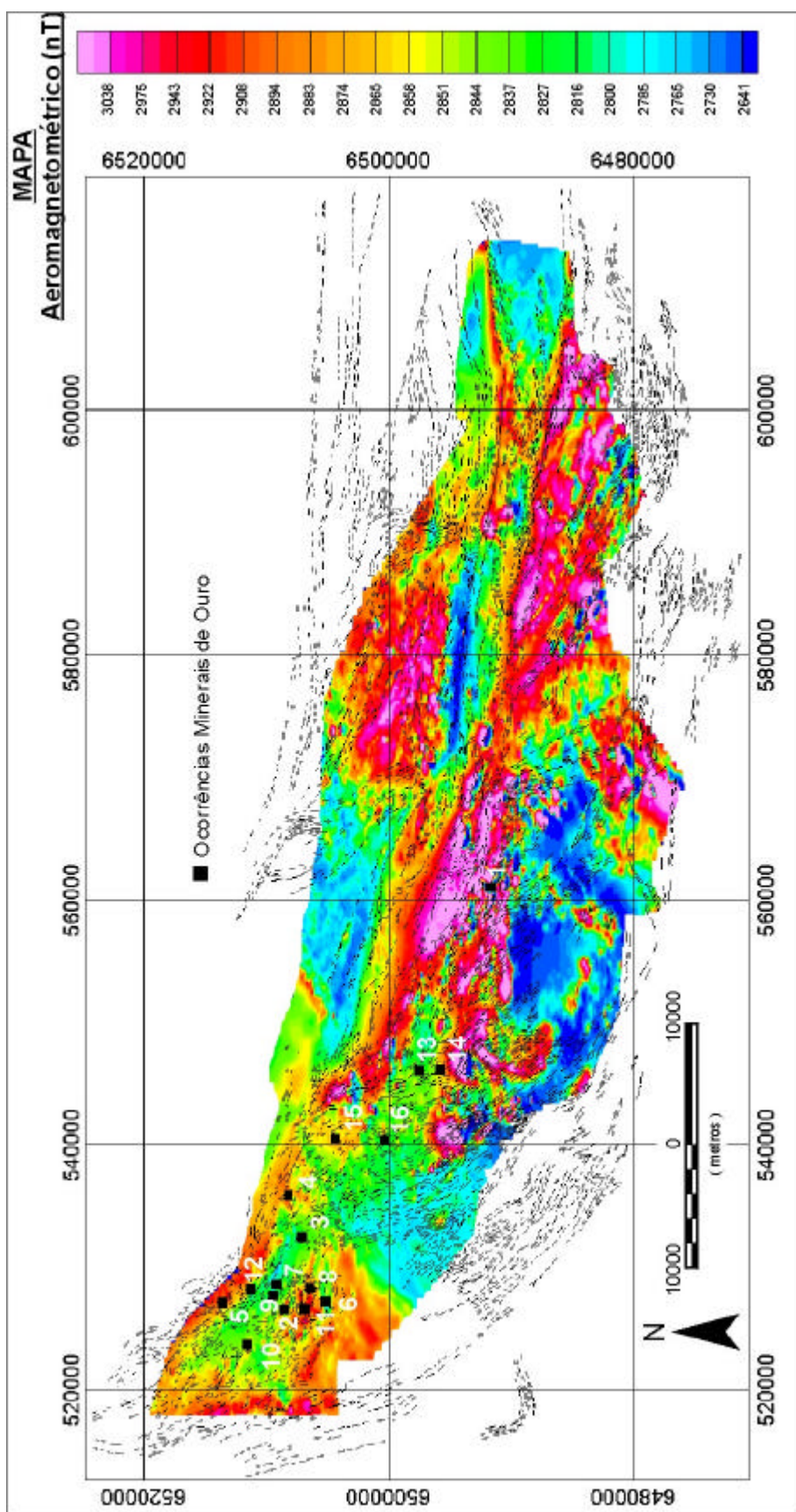


Figura 4.31 – Mapa aeromagnetométrico (PI original), com sobreposição de fotolocalizações tipo 1. Ocorrências mineraiis identificadas no mapa da figura 4.5.

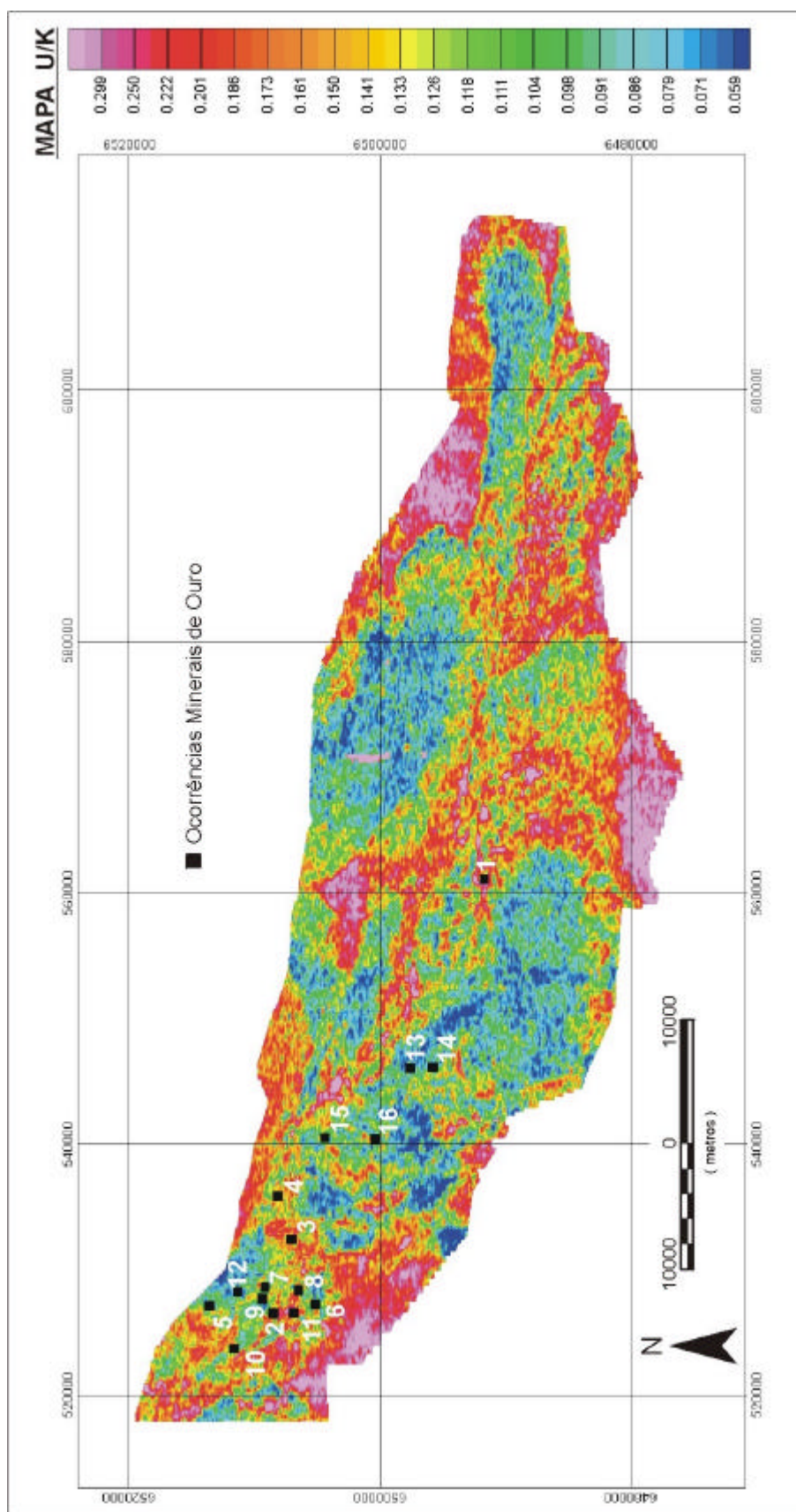


Figura 4.32 – Mapa aerogamaespectrométrico razão **U/K**. Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5

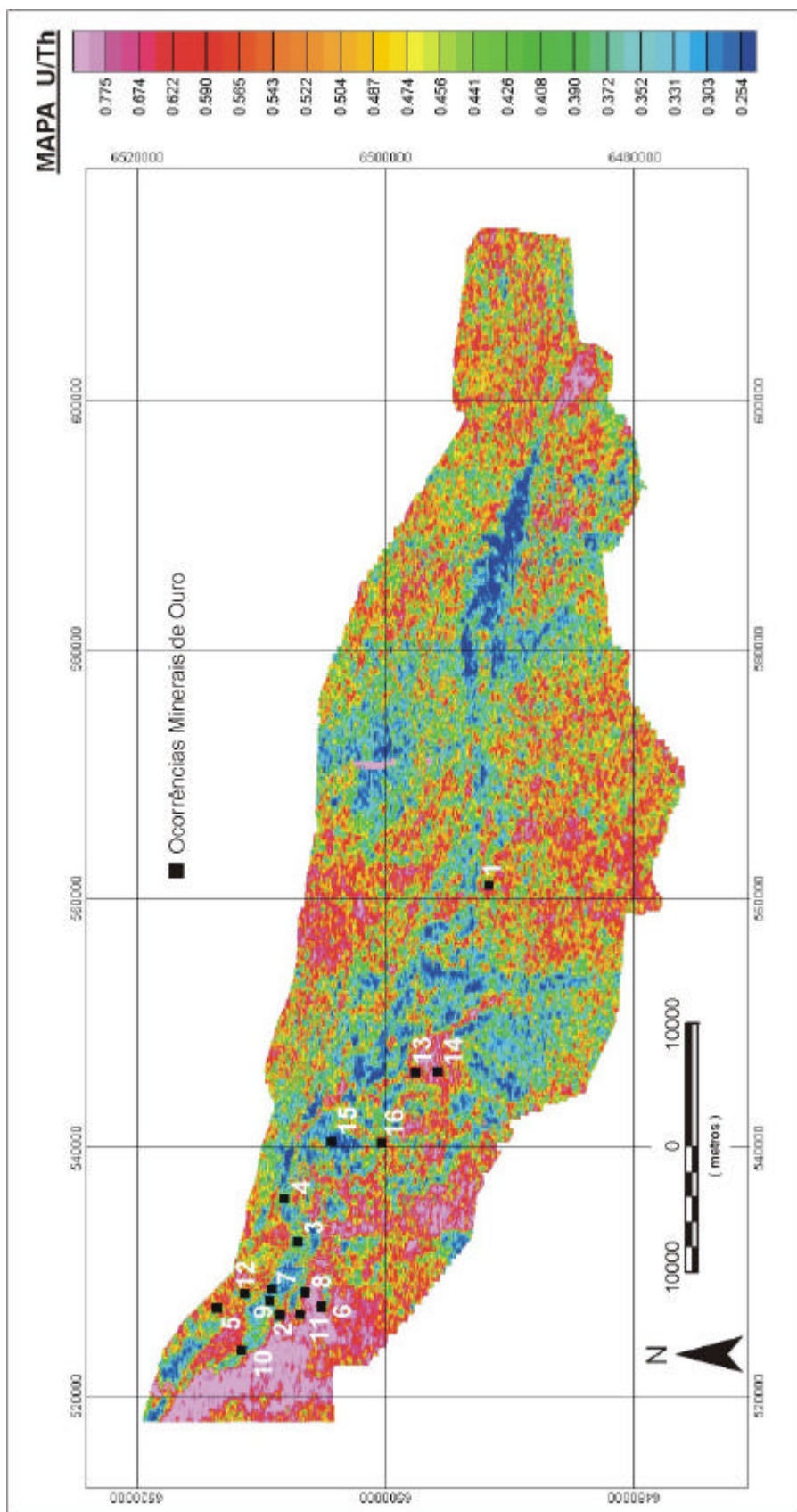


Figura 4.33 – Mapa aerogamaespectrométrico razão U/Th. Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

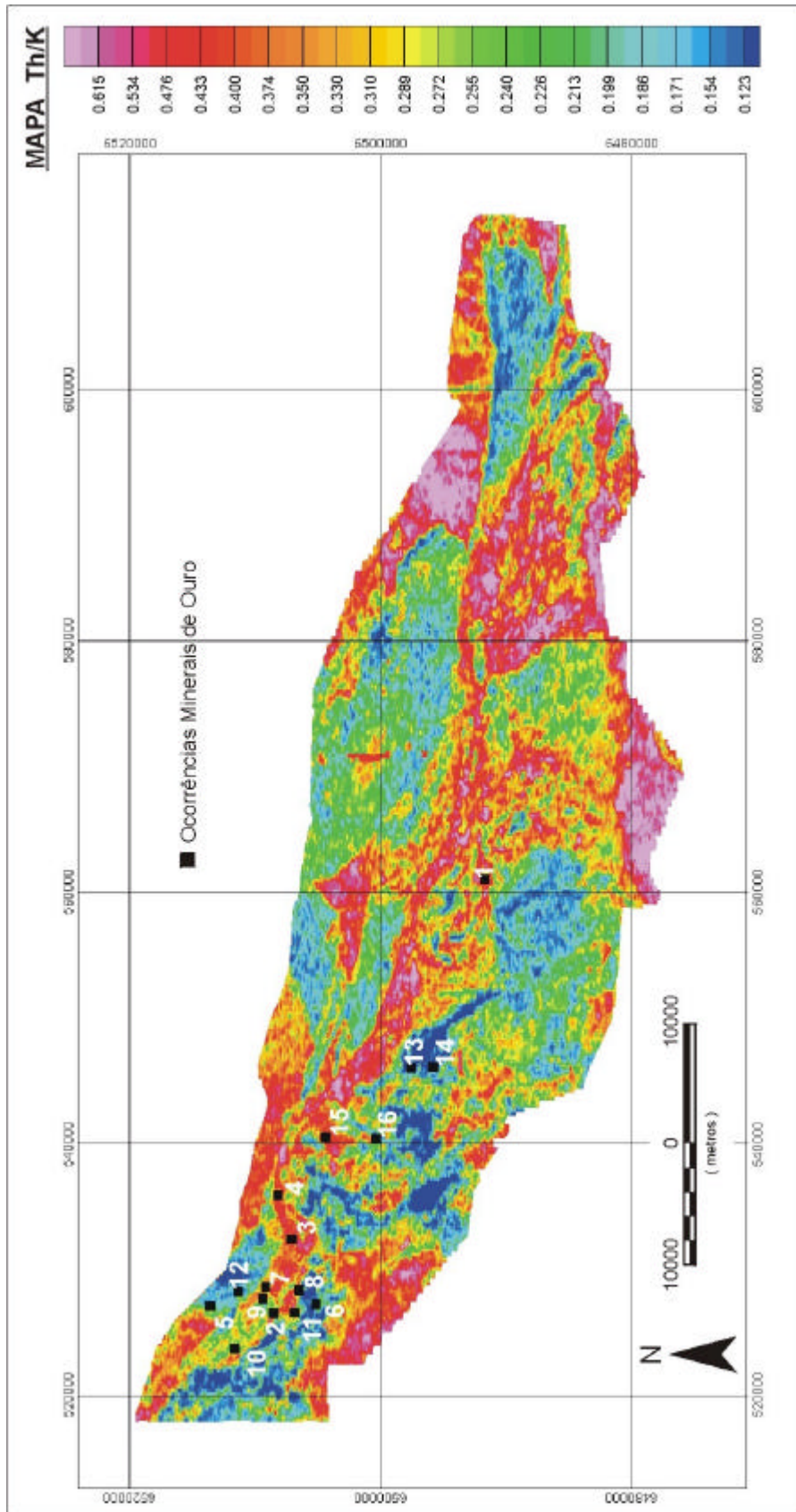


Figura 4.34 – Mapa aerogamaespetrométrico razão Th/K. Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5

d) construção do mapa U_d , U normalizado pelo Th (Fig. 4.37), segundo as seguintes equações:

$$U_d = (U - U_i)/U_i, \text{ onde} \quad (4.4)$$

$$U_i = (\text{média do mapa } U / \text{média do mapa } Th) \times \text{mapa } Th \quad (4.5)$$

Os valores negativos, em qualquer dos mapas, foram removidos a partir da adição de uma constante. Esses valores podem ser gerados por problemas 1) na amostragem, 2) nos processos de correção do teor de fundo atmosférico, 3) na calibração dos instrumentos, ou 4) ainda na aplicação das equações acima.

As concentrações de radioelementos são medidas de abundância de elementos radioativos nas rochas. Essa abundância original pode evidentemente ser modificada por processos posteriores de metamorfismo, hidrotermalismo, intemperismo, etc. Um grande número de depósitos minerais está associado a processos hidrotermais. Nesses processos, as soluções são enriquecidas muitas vezes em elementos como o K^+ . Uma revisão da aplicação de levantamentos aerogamaespectométricos à exploração de ouro, publicada por Hoover & Pierce (1990), indicou o K^+ como o melhor elemento indicador de depósitos minerais; por vezes, o K^+ está acompanhado por parcial empobrecimento em Th , principalmente nos casos de alteração hidrotermal mais intensa. Porém, em áreas afetadas por processos de oxidação, o Th pode ser fortemente concentrado em relação ao K^+ .

Os espectômetros de raio gama medem o elemento K^+ por meio da concentração do K^{40} . O K^{40} também é um importante constituinte das soluções hidrotermais e é um dos principais contribuintes da emissão de radiação gama da crosta terrestre. O U e o Th são medidos pelas concentrações do Bi^{214} e do Tl^{208} , respectivamente. Esses radioelementos tendem a ser concentrados nos líquidos residuais durante os processos de cristalização magmática; por isso, são freqüentemente incorporados nos últimos estágios de diferenciação magmática (Adams & Gasparini, 1970) e estão muitas vezes relacionados à geração de depósitos minerais. Desse modo, apesar da exploração baseada em aerogamaespectometria envolver a medição de parâmetros físicos, ela também pode ser considerada uma medida da variação geoquímica dos elementos na camada mais superficial do solo, em geral até 30 cm de profundidade (Dickson & Scott, 1997).

Na **ICR** não existem referências a acumulações de U e Th associadas a processos hidrotermais. Por outro lado, com relação ao K , existe uma forte relação desse elemento com

os processos hidrotermais que atuaram na formação de várias ocorrências minerais além do depósito San Gregorio (Quadros, 1995; Quadros & Koppe, 1996). Assim, a possibilidade de reconhecimento de áreas afetadas por processos hidrotermais por meio dos dados de aerogamaespectrometria é uma importante contribuição para a exploração mineral na **ICR**. Halos hidrotermais de 200 a 300m de espessura, como é o caso de San Gregorio, são passíveis de detecção em levantamentos aerogeofísicos regionais (Dikson & Scott, 1997), dependendo do espaçamento das linhas de vôo, o que torna a metodologia efetiva em termos de detecção de alvos caracterizados pela incidência de processos hidrotermais. Porém, o principal obstáculo à obtenção de informações importantes e confiáveis a partir desses dados é o efeito de **background** geológico, o que prejudica a definição adequada das zonas hidrotermalizadas.

Diversos procedimentos têm sido propostos para minimizar, ou para suprimir esses efeitos litológicos, além de efeitos ambientais (Saunders *et al.*, 1987,1993,1994; Galbraith & Saunders, 1983); no entanto, a maior parte desses estudos foi aplicado na prospecção de petróleo. Mais recentemente, Pires (1995) usou a metodologia proposta inicialmente por Saunders *et al.* (1987) para a identificação de áreas de alteração hidrotermal em Crixás-Guarinos (Goiás, Brasil). Essa metodologia utiliza os valores de Th como controle litológico para definir valores ideais de U e K. A idéia central é que os efeitos litológicos e ambientais que afetam as concentrações aparentes de Th influenciam as concentrações de U e K de maneira previsível (Saunders *et al.*, 1993).

A partir da inexistência de referências relativas à ocorrência de valores de Th associados aos processos hidrotermais que afetaram a área em estudo, a normalização dos dados para esse elemento suprimiria os efeitos primários de todas as variáveis indesejadas. A utilização desse elemento (Th) como normalizador, também se deve ao fato dele mostrar menor mobilidade geoquímica (Adams & Gasparini, 1970).

A metodologia proposta por Saunders *et al.* (1987) é baseada na relação dada por K_i , onde K_i é o valor ideal de potássio, definido a partir da concentração de tório (equação 4.3). Os desvios (anomalias) dos valores reais a partir dos valores ideais são obtidos pela equação do K_d (equação 4.2). O mapa calculado por meio dessas equações mostra a concentração e a distribuição de K gerado por processos hidrotermais.

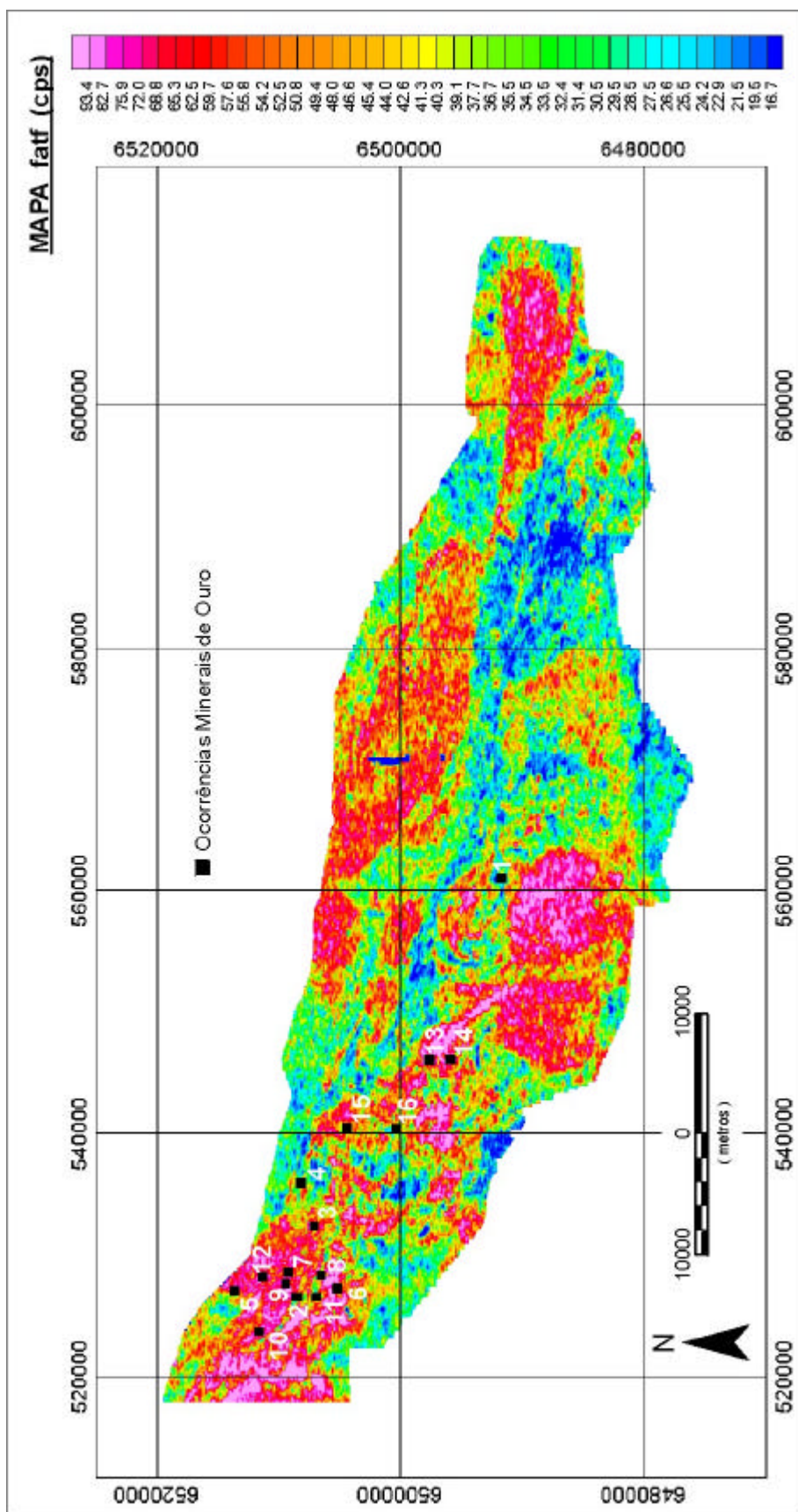


Figura 4.35 – Mapa aerogramaspectrométrico **Fator F**. Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

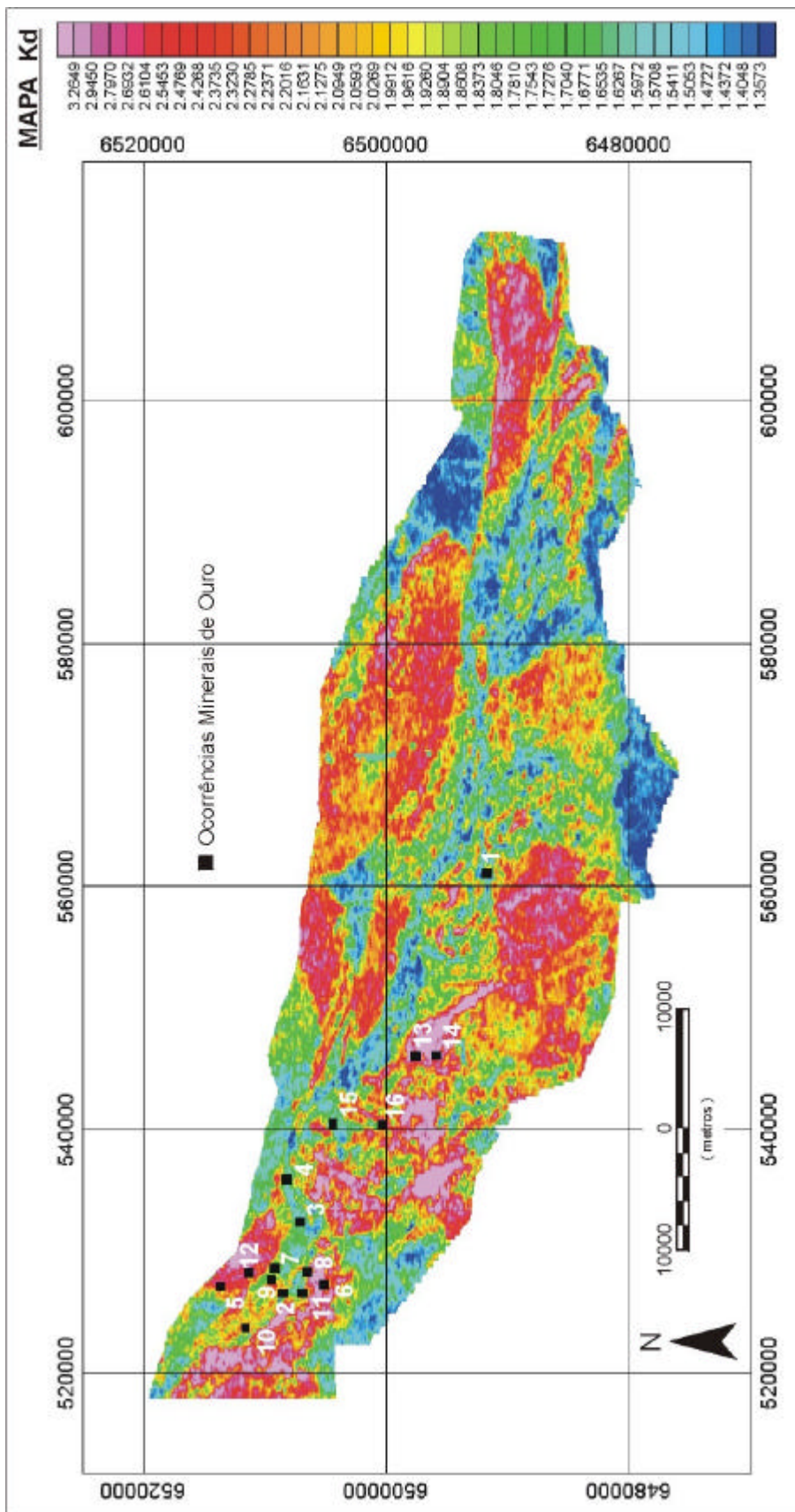


Figura 4.36 – Mapa aerogamaespectrométrico Kd. Ocorrências mineralis identificadas no mapa da figura 4.5.

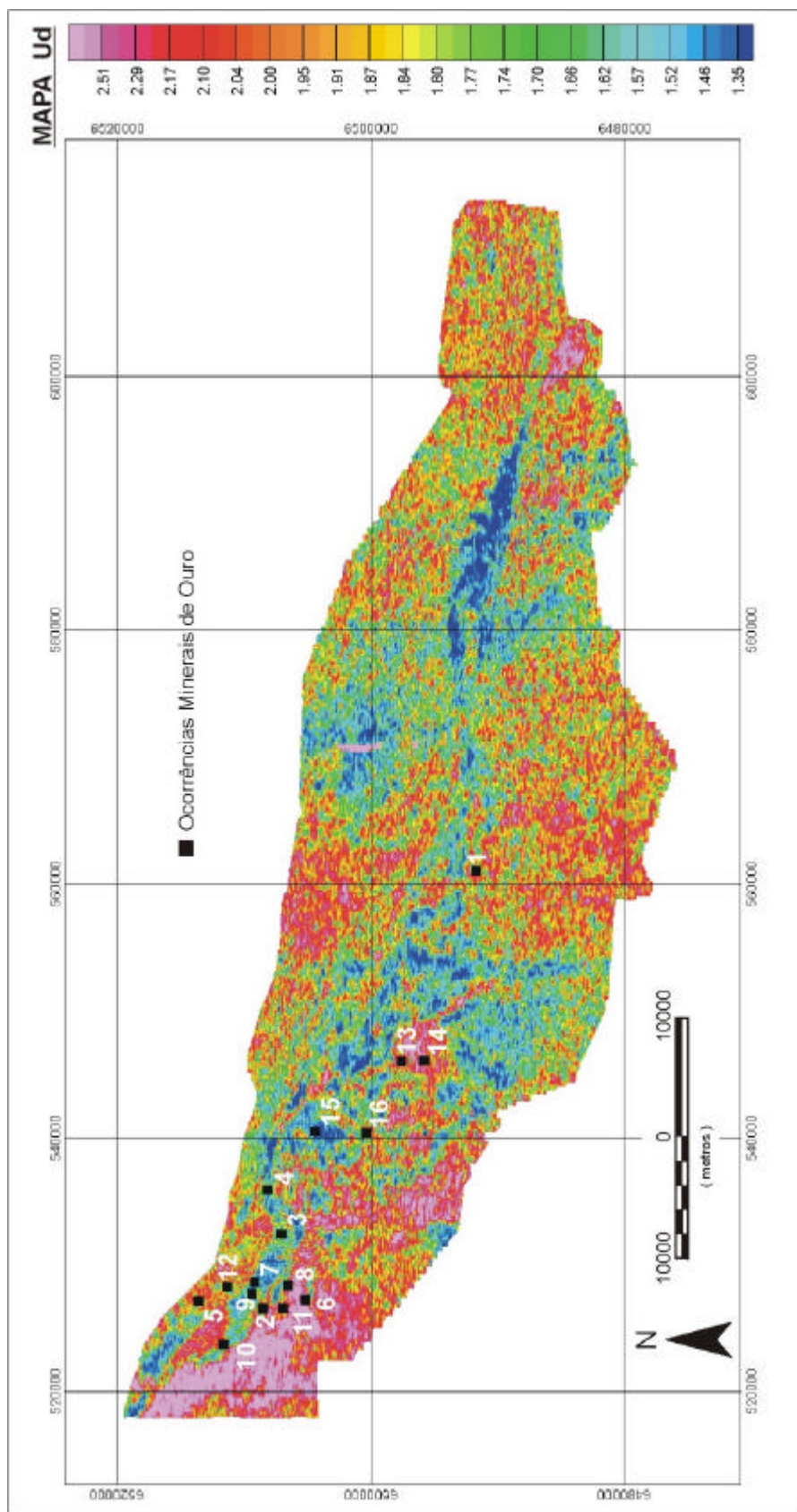


Figura 4.37 – Mapa aerogamaespectrométrico Ud. Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

O mesmo critério e as mesmas relações, também, foram utilizados para definir anomalias de Ud (U hidrotermal). Os resultados são significativamente menos expressivos, visto que esse elemento não parece ter participado efetivamente dos processos hidrotermais que afetaram a **ICR**. Apesar desse mapa também mostrar anomalias na área da Mina San Gregorio, fato que evidencia a importância dessa área em termos de atividade hidrotermal, apresentou muitas incompatibilidades em relação às áreas anômalas conhecidas e às anomalias salientadas pelo mapa Kd.

A razão Th/K também foi analisada em conjunto com os resultados do Kd, pois, nas regiões onde é conhecida a associação do K^+ com os processos hidrotermais e inexistente associação de Th com os mesmos processos, como parece ser o caso da **ICR**, baixos valores da razão Th/K são bons indicadores da ocorrência de processos hidrotermais. De acordo com Shives *et al.* (1997), baixas razões Th/K são excelentes indicadores da existência de alteração hidrotermal, pois na maioria das vezes o Th não acompanha o K nos processos hidrotermais. Gnojek & Prichystal (1985) referem-se ao uso da razão Th/K como indicador da ocorrência de alteração hidrotermal e afirmam a existência de um verdadeiro antagonismo entre o K e o Th; esse antagonismo é típico de processos de alteração hidrotermal acompanhados por enriquecimento de K (Gnojek & Prichystal, 1985).

Os seguintes aspectos dos resultados do **PI Kd** devem ser destacados:

- a) a definição de áreas anômalas de Kd próximas à maioria das ocorrências conhecidas na área;
- b) a definição de áreas anômalas de Kd posicionadas na porção sul-sudoeste e nas estruturas dilatacionais definidas por zonas de sombra de pressão associadas à estrutura intrusiva de forma elíptica próxima (sul-sudoeste) a Mina San Gregorio. Essa estrutura elíptica está associada, pelo menos espacialmente, as ocorrências minerais, já que atuou como encaixante e favoreceu a abertura da zona de dilatação na zona de cisalhamento que alojou a Mina San Gregorio (ver Fig. 4.44);
- c) a definição de áreas anômalas de Kd posicionadas em área a NW de San Gregorio, onde são conhecidos afloramentos de rocha básica hidrotermalizada, inclusive salientadas em imagem de satélite após processamento descrito em Quadros (1997);
- d) a definição de áreas anômalas de Kd na região da mina Zapucay;

- e) a definição de áreas anômalas de Kd nas regiões a norte e leste de Vichadero, em áreas de transtração definidas por fotolineamentos estruturais e próximo às bacias de drenagem com altos valores para concentrados de minerais pesados;
- f) é importante observar as demais áreas anômalas salientadas pelo processamento onde não se conhece, até o momento, nenhuma ocorrência importante;
- g) deve-se notar, por último, a expressiva concordância das regiões de baixos valores da razão Th/K com as regiões de altos valores de Kd e a não concordância das regiões de altos valores de Kd com as regiões de altos valores de K, interpretado como K significativamente de proveniência primária.

A outra metodologia usada com sucesso no processamento de dados aerogamaespectrométricos foi proposta por Efimov (1978) e implementada inicialmente por Gnojek & Prichystal (1985) para detectar mineralizações de zinco na Morávia (ex-Tchecoslováquia). Essa metodologia (Parâmetro F de Efimov, 1978) está designada nessa tese por Fator F de alteração e a sua expressão matemática está descrita pela equação 4.1. Segundo Efimov (1978) e Gnojek & Prichystal (1985), essa relação compreende duas importantes características: 1) a abundância de K em relação à razão Th/U e 2) a abundância de U em relação à razão Th/K; essas características podem ser expressas pela relação:

$$F = K \times U/Th = K \cdot (Th/U) = U \cdot (Th/K) \quad (4.6)$$

O parâmetro F (Fator F) também utiliza os valores de Th como controle litológico para definir valores ideais de U e K; porém, os resultados trazem informações conjuntas do K e do U relacionados a processos hidrotermais, salvo se um destes dois elementos tenha atuado como elemento neutro no processo.

Os seguintes aspectos dos resultados do **PI** Fator F devem ser destacados:

- a) a definição de áreas anômalas do Fator F próximas à maioria das ocorrências conhecidas na área;

- b) a definição de áreas anômalas do Fator F posicionadas na porção sul-sudoeste e nas estruturas dilatacionais definidas por zonas de sombra de pressão associadas à estrutura intrusiva de forma elíptica próxima (sul-sudoeste) a Mina San Gregorio;
- c) a definição de áreas anômalas do Fator F posicionadas em área a NW de San Gregorio, onde são conhecidos afloramentos de rocha básica hidrotermalizada, inclusive salientadas em imagem de satélite após processamento descrito em Quadros (1997);
- d) a definição de áreas anômalas do Fator F na região da mina Zapucay;
- e) a definição de áreas anômalas do Fator F nas regiões a norte e leste de Vichadero, em áreas de transtração definidas por lineamentos estruturais e próximas às bacias de drenagem com valores interessantes de concentrados de batéia;
- f) também é importante observar as demais áreas anômalas salientadas pelo processamento onde não se conhece, até o momento, nenhuma ocorrência importante;
- g) a ocorrência de algumas áreas anômalas no granito Las Flores (porção centro-sul da **ICR**) pode ser devido a ruídos causados por U não hidrotermal.

Os **PIs** derivados resultantes dos processamentos Kd e Fator F, denominados **kd** e **fatf**, foram selecionados para a fase de integração e estão apresentados nas figuras 4.36 e 4.35, respectivamente.

Os **PIs** derivados foram exportados do OASIS MONTAJ[#] para o SPANS-GIS[#]. Esse processo foi realizado com o auxílio dos *softwares* SURFER[#] e IDRISI[#] (Eastman, 1997). Os *grids* (mapas) com extensão *.grd foram exportados para o SURFER[#], onde foram transformados para o formato ASCII; com esse formato, foram importados pelo IDRISI[#] para serem transformados para o padrão de imagem ERDAS[#] (Earth Resources Data Analysis System) com extensão *.gis. A imagem *raster* *.gis foi importada pelo SPANS-GIS[#], por meio do módulo *spans translator*, que a transformou para o formato *raster* do SPANS-GIS[#] (extensão *.rnh / *.rnl). No SPANS-GIS[#], as imagens **kdn** e **fatfn** foram, então, transformadas para o formato **quadtree**.

Os dados em formato ASCII também foram analisados estatisticamente por meio dos *softwares* STATISTICA[#] (STATSOFT, 1995) e GSLIB (Deutsch & Journel, 1996). A análise estatística por meio de curvas em gráficos de probabilidade permitiu a separação dos dados das imagens **kd** e **fatf** em populações distintas, cujos limites foram usados para reclassificar,

no SPANS-GIS[#], as imagens em classes de valores gamaespectrométricos. A curva de probabilidade foi definida segundo a proposta de Sinclair (1976) e mostrou ser um método robusto e confiável, além de ser facilmente implementado. Os **quadtrees** reclassificados (**PIs** derivados) do Fator Geofísico, denominados **kdn** (MD10) e **fatfn** (MD11), podem ser visualizados nas figuras 4.38 e 4.39, as quais já se encontram mascaradas pelo mapa base **contaton** que delimita a **ICR**.

4.6.2 Dados de Magnetometria

Os dados de aeromagnetometria, já com as correções devidas, passaram pela seguinte seqüência de processamento:

- a) aplicação do filtro integral vertical (Fig. 4.40) sobre o **grid** (mapa) original;
- b) aplicação do filtro sinal analítico sobre o mapa original e conseqüente geração dos mapas constituídos pelas derivadas em X, Y e Z (1ª Derivada Vertical), além de um mapa composto (Fig. 4.41);
- c) aplicação de relevo sombreado sobre o mapa sinal analítico com iluminação à 22.5° de azimute e inclinação de 45° (Fig. 4.42);

As propriedades magnéticas dos materiais terrestres, definidas a partir do campo magnético total, podem ser usadas para auxiliar na localização de corpos magnéticos de interesse na exploração mineral. Essas propriedades também podem auxiliar na delimitação de unidades litológicas que apresentem contraste em suas propriedades magnéticas em relação às litologias vizinhas e, ainda, de estruturas, como falhas e zonas de cisalhamento caracterizadas por contrastes lineares e por quebras estruturais.

A resposta ao campo magnético total reflete principalmente a abundância de material magnético nas rochas. Entre os minerais magnéticos, a magnetita é o mineral que mostra maior resposta ao campo magnético, além de ser relativamente abundante. Com isso, rochas com abundância desse mineral mostram maior contraste magnético.

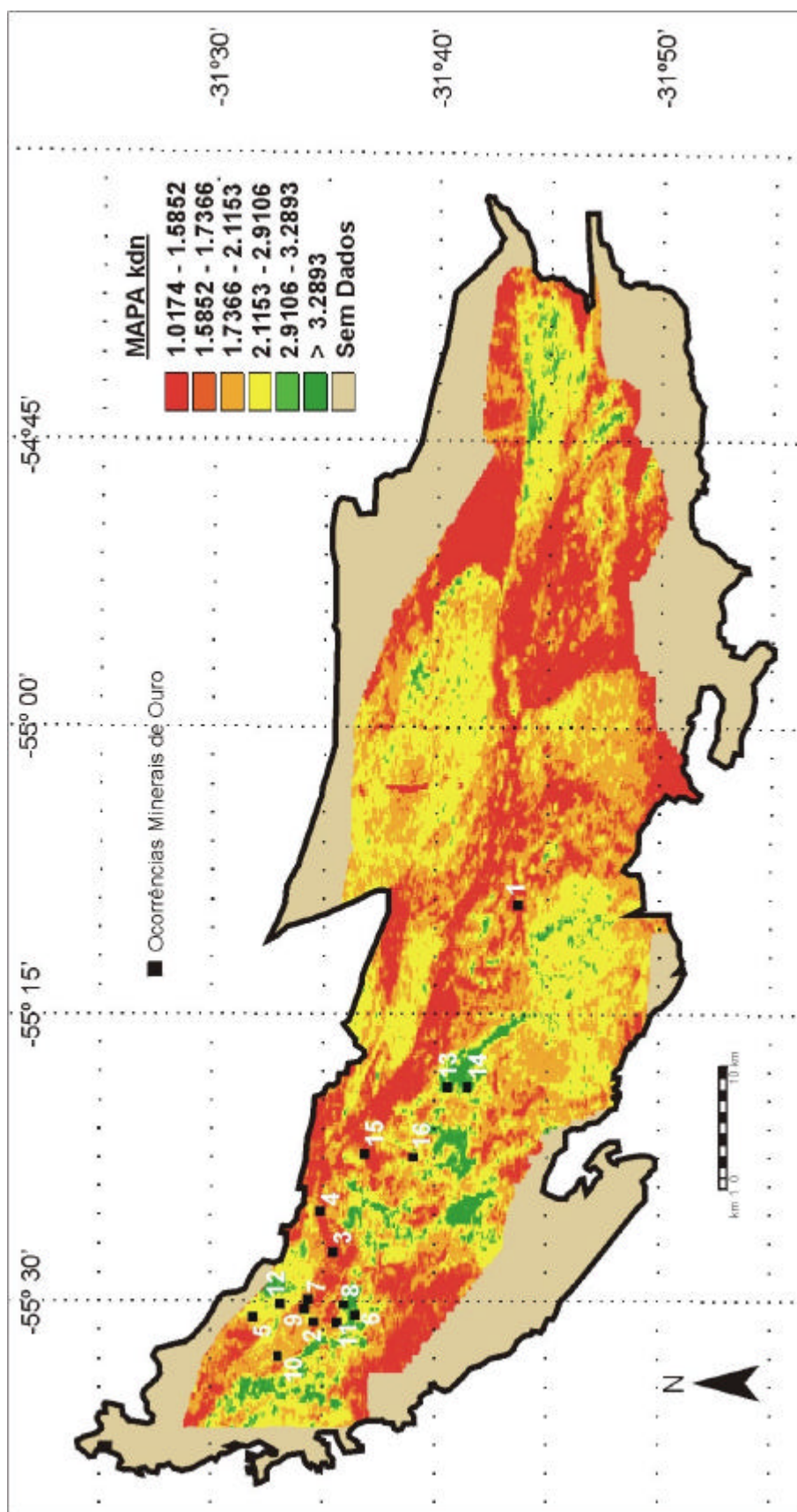


Figura 4.38 – Mapa aerogamaespectrométrico **Kdn** (PI derivado **MD10**). Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

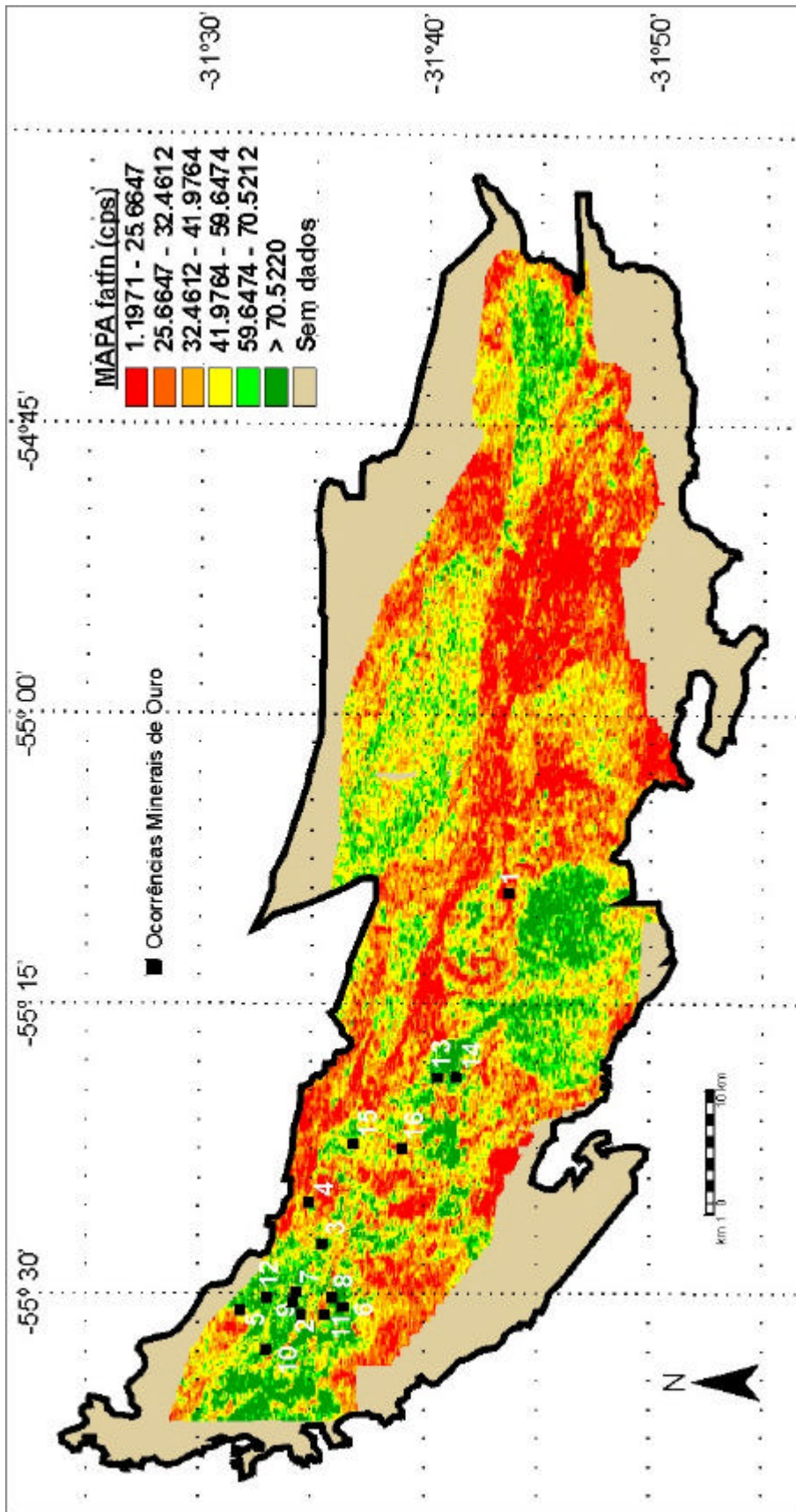


Figura 4.39 – Mapa aerogamaespectrométrico FatFn (PI derivado MD 11). Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

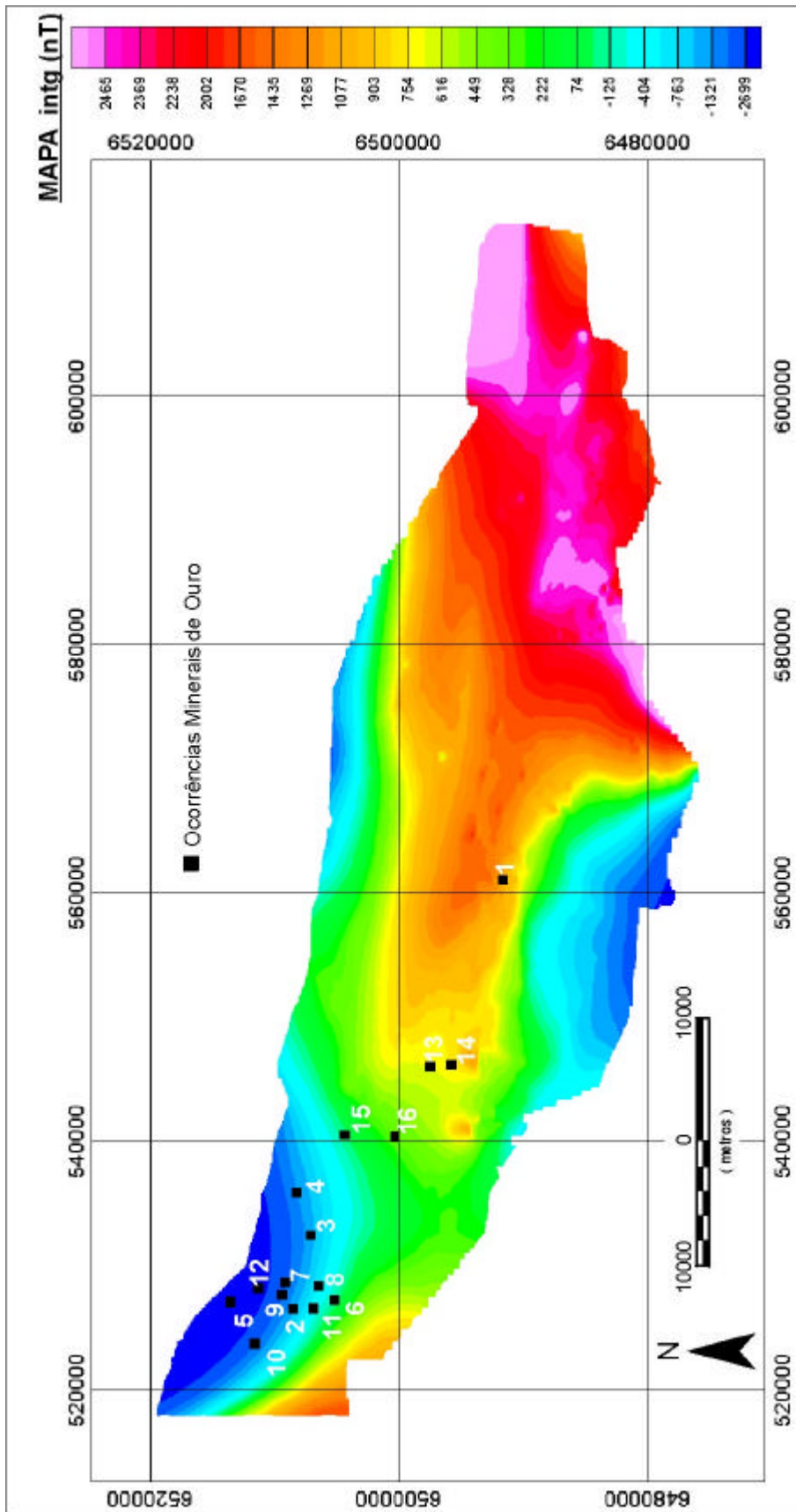


Figura 4.40 – Mapa aeromagnetométrico com filtro **Integral Vertical**. Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

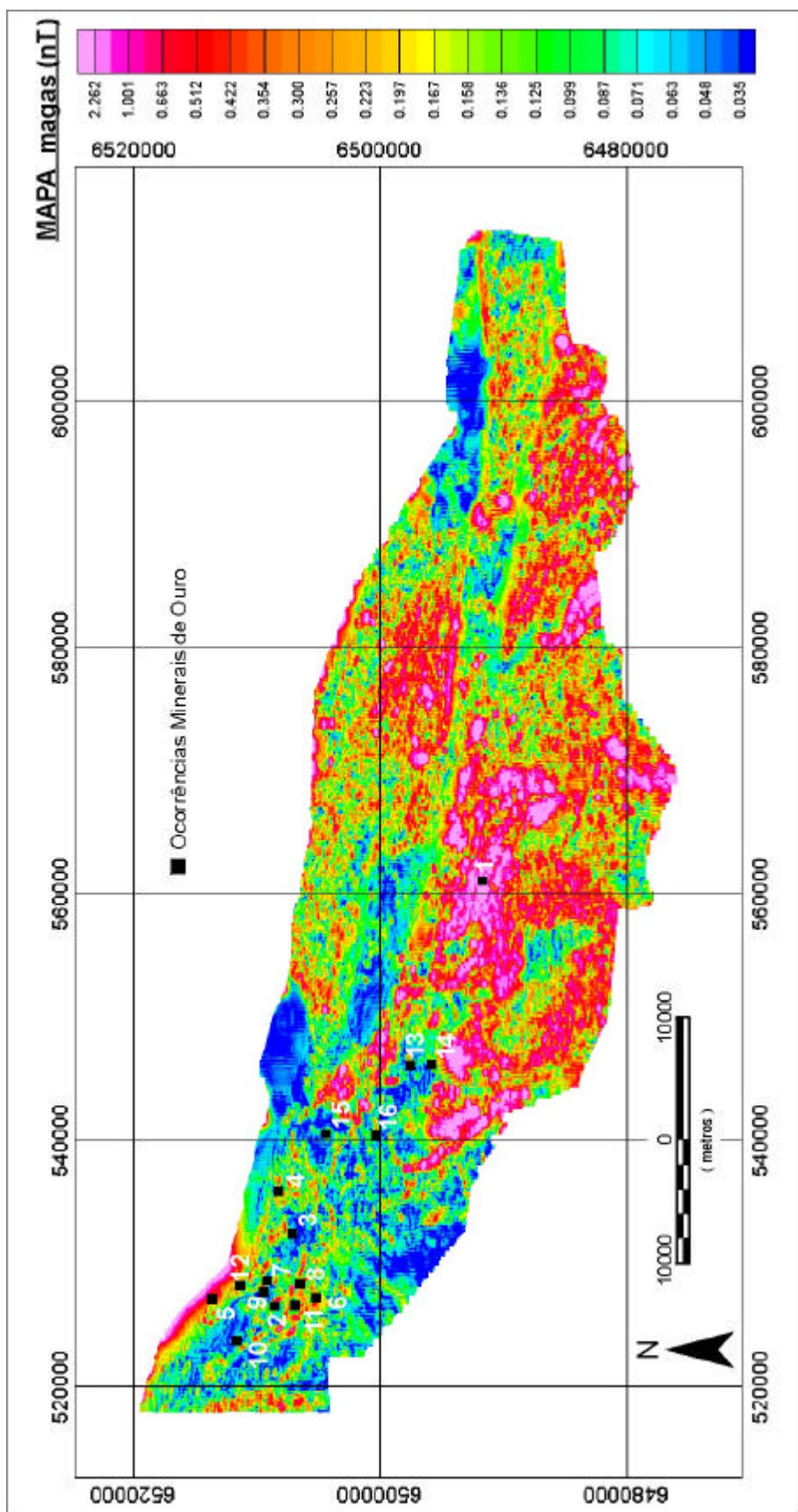


Figura 4.41 – Mapa aeromagnetométrico com filtro Sinal Analítico. Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

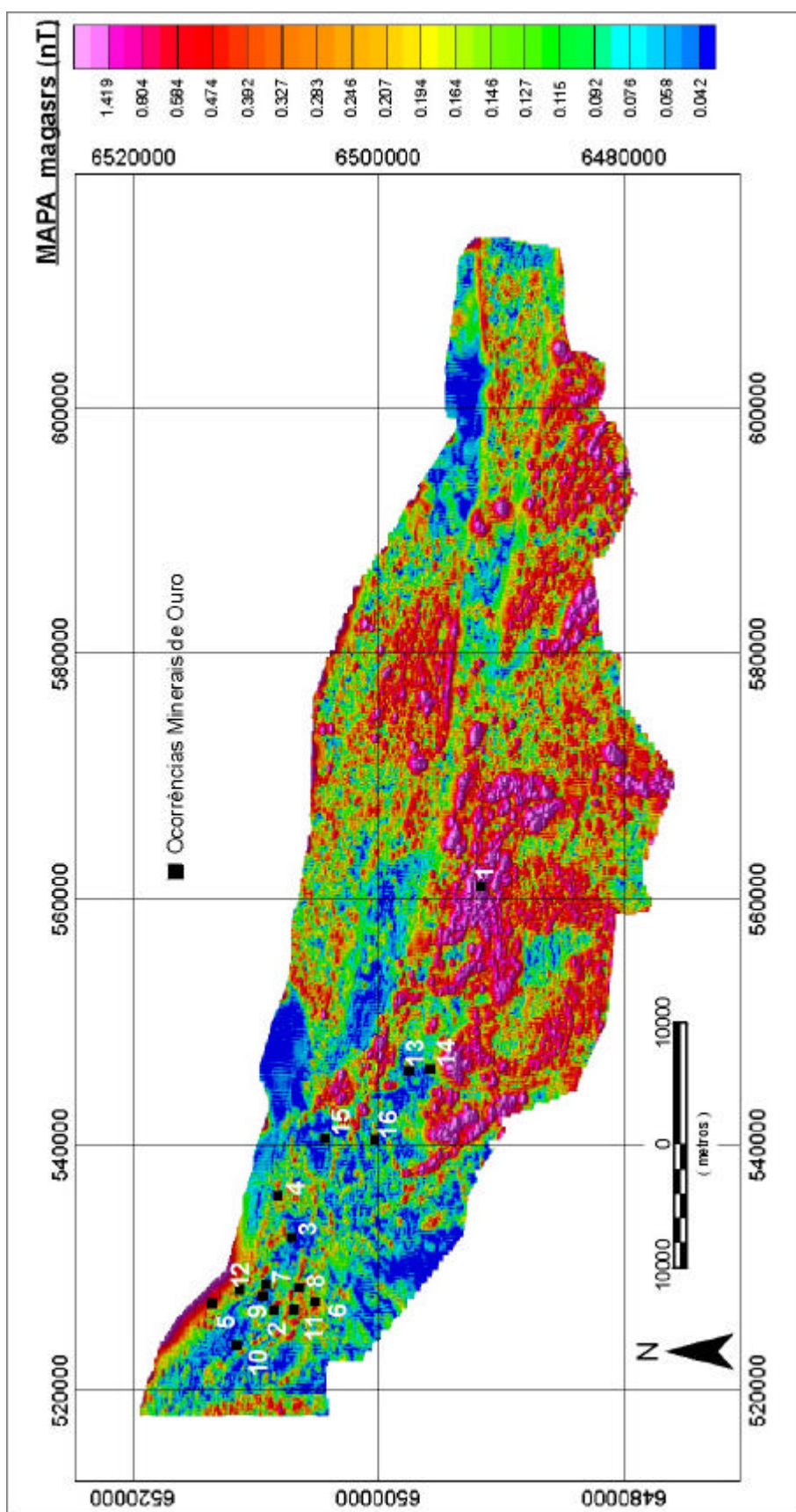


Figura 4.42 – Mapa aeromagnetométrico com filtro Sinal Analítico e Relevo sombreado. Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

Na **ICR**, as rochas básicas hidrotermalizadas, principalmente aquelas associadas às zonas de cisalhamento, ocorrem na forma de diques e foram definidas como importante guia de exploração (Quadros, 1997). A aplicação do filtro sinal analítico, executada no domínio de Fourier, e a aplicação de relevo sombreado sobre os *grids* (mapas) sinal analítico e 1ª derivada vertical na direção perpendicular às principais estruturas que afetaram a região teve como objetivo salientar esses diques básicos hidrotermalizados associados às zonas de cisalhamento. Esses diques deveriam se apresentar como baixos magnéticos, uma vez que o estudo magnetométrico piloto feito em San Gregorio por meio de modelamento magnetométrico 2-D (Barcellos *et al.*, 1997) revelou que as encaixantes básicas da ocorrência mineral expressam-se como baixos magnéticos; isso é devido ao fato de que a alteração hidrotermal imposta sobre essas litologias destruiu as magnetitas durante as reações de sulfetação (Quadros, 1995; Quadros & Koppe, 1996).

O filtro sinal analítico, também, teve o objetivo de substituir o processo de redução ao pólo, pois a sua aplicação salienta os contrastes magnéticos máximos, independente dos parâmetros do campo magnético terrestre e da direção de magnetização da origem do material. Isso eliminou os problemas de deslocamento das anomalias em relação a sua origem, que resulta da não verticalidade das direções do campo magnético nas posições distantes dos pólos magnéticos. Além disso, o filtro sinal analítico gerou os mapas de 1ª derivada vertical, 1ª derivada horizontal em X, 1ª derivada horizontal em Y e um mapa composto pelas três derivadas. O mapa 1ª derivada vertical salientou os contrastes magnéticos máximos e possibilitou a identificação da geometria principalmente dos materiais situados em profundidades mais rasas, de menor comprimento de onda, como a ocorrência de diques básicos; porém, esse mapa mostrou resultados muito intensos relacionados aos padrões de alta frequência, causando uma resposta visual muito ruidosa. O mapa sinal analítico composto pelas três derivadas, com relevo sombreado, mostrou uma melhor resposta visual e também permitiu a identificação da geometria dos materiais situados em profundidades mais rasas. A aplicação do filtro integral vertical, por outro lado, teve a função inversa; ou seja, objetivou salientar anomalias profundas, de maior comprimento de onda.

A partir do acima exposto, é importante salientar os seguintes aspectos observados nos mapas gerados:

a) o mapa resultante da aplicação do filtro integral vertical mostrou uma interessante compartimentação da **ICR** em duas grandes áreas. A área oeste é identificada por baixos magnéticos, enquanto a área leste está caracterizada por altos magnéticos. Essa

compartimentação não parece ser fortemente abrupta, apesar que são necessários trabalhos de mapeamento geológico-estrutural de detalhe para uma melhor definição dessa gradação na compartimentação, e permite a interpretação de um soerguimento diferenciado ao longo da extensão maior da **ICR**; a porção leste foi mais soerguida em relação à porção oeste, o que propiciou a detecção de corpos magnéticos originalmente mais profundos na porção leste. Esse soerguimento diferencial é indicado pelos dados de reconhecimento geológico na **ICR**, na medida em que a porção leste é composta predominantemente por granito-gnaisses, por rochas gnáissicas de alto grau e por intrusões graníticas de maior profundidade de alojamento; a porção oeste, por outro lado, é composta por rochas metassedimentares de baixo grau metamórfico, por gnaisses protomiloníticos, por granitos não deformados a pouco deformados e por intrusões básicas (diques de diorito). Além das características de associações litológicas, as estruturas deformacionais também mostram uma diferenciação entre a porção leste e a porção oeste, a qual é compatível com a exposição de níveis crustais distintos pelo soerguimento diferencial. A porção oeste mostra que as zonas de cisalhamento são mais anastomosadas e ramificadas e que a deformação ocorreu em caráter mais frágil (brechas, clivagens de fratura e protomilonitos); a porção leste, por outro lado, mostra que as zonas de cisalhamento são mais retilíneas e que a deformação ocorreu sob um regime mais dúctil (milonitos a ultramilonitos). As zonas de cisalhamento são, no entanto, contínuas de oeste para leste, apesar da sua mudança de padrão geométrico; assim, esses elementos indicam que as zonas de cisalhamento ramificadas a oeste (nível crustal mais raso) coalescem em direção ao leste (níveis crustais mais profundos), padrão comum em ambientes mais profundos (Naylor, 1986). Essa constatação leva a supor a existência de um modelo conceitual de mineralização parcialmente diferenciado, condicionado à área leste: um modelo mesotermal, padrões estruturais de maior profundidade (estruturas tipo *wrench*, Cap. 1) e alto grau de granitogênese. Isso poderia sugerir a diminuição da sua importância em termos de favorabilidade mineral, visto que depósitos desse tipo têm ocorrência mais restrita e menor volume. Essas condições estruturais e metamórficas devem ser observadas, na medida em que a maior parte das ocorrências minerais conhecidas está localizada na porção oeste da **ICR**. De qualquer maneira, o modelo de exploração definido para a área não muda, desde que as características geológicas da Mina San Gregorio usadas na elaboração do modelo de exploração também são, na sua quase totalidade, características de modelos mesotermais, visto que San Gregorio foi definido por Quadros (1995) como um depósito epitermal (epizonal) a mesotermal segundo os conceitos de Lindgren (1933).

b) o **grid** resultante da aplicação do filtro sinal analítico com aplicação de relevo sombreado mostrou o Depósito San Gregorio como uma área de baixo magnético associada a uma faixa de cisalhamento identificada no **grid** e também nos lineamentos (Fig. 4.44). Isso corrobora as observações já discutidas por Barcellos *et al.* (1997), Quadros (1995) e Quadros & Koppe (1996).

As informações obtidas a partir dos **grids** resultantes do processamento executado sobre os dados magnetométricos, foram usadas para aumentar o conhecimento da região estudada. Porém, esses **grids** não foram usados diretamente nos processos de integração de dados, pois as informações passíveis de uso (identificação da geometria de corpos, diques, básicos) não se mostraram compatíveis com a escala regional de trabalho utilizada, sem uma ampla análise de campo, auxiliada pela existência de um mapa geológico. O fluxograma geral dos procedimentos usados no desenvolvimento dos dados do Fator Geofísico pode ser visualizado na figura 4.43.

4.7 Fator estrutural

O desenvolvimento dos **PIs** desse fator iniciou com a extração de fotolineamentos. A metodologia de extração de fotolineamentos aqui utilizada tem obtido consistentes resultados nas Províncias Estruturais Pré-cambrianas da Borborema e do Tocantins (Amaro *et al.*, 1991,1993; Strieder, 1993; Strieder & Nilson, 1993; Cunha *et al.*, 1996; Strieder & Amaro, 1997).

A extração de fotolineamentos estruturais foi realizada a partir de imagens orbitais LANDSAT TM-5 em papel impresso, adquiridas junto ao INPE. A imagem papel é uma combinação **RGB** das bandas 3-4-5, cuja superposição possibilitou a geração de uma imagem que salienta feições lineares e curvilíneas de alta frequência como é o caso das estruturas geológicas (falhas, fraturas, contatos litológicos). Essas imagens foram impressas na escala 1:100.000 e ampliadas para a escala 1:50.000. A escala 1:50.000 foi usada por ser a mais adequada para traçar padrões estruturais locais, definir regiões com características texturais e tonais homólogas e, conseqüentemente, auxiliar na seleção de áreas alvo na exploração mineral.

Esse trabalho, na verdade, deu seqüência a uma análise estrutural executada em menor escala e realizada a partir da extração de fotolineamentos sobre imagens orbitais LANDSAT

TM-5 em papel impresso em escala 1:100.000 (Quadros *et al.*, 1995; Quadros, 1995). Os resultados desse trabalho possibilitaram a compreensão dos processos tectônicos em escala regional; porém, não permitiram a visualização de determinadas estruturas de escala local, importantes ao entendimento do controle das ocorrências minerais.

Fator Geofísico - Pls MD10 e MD11

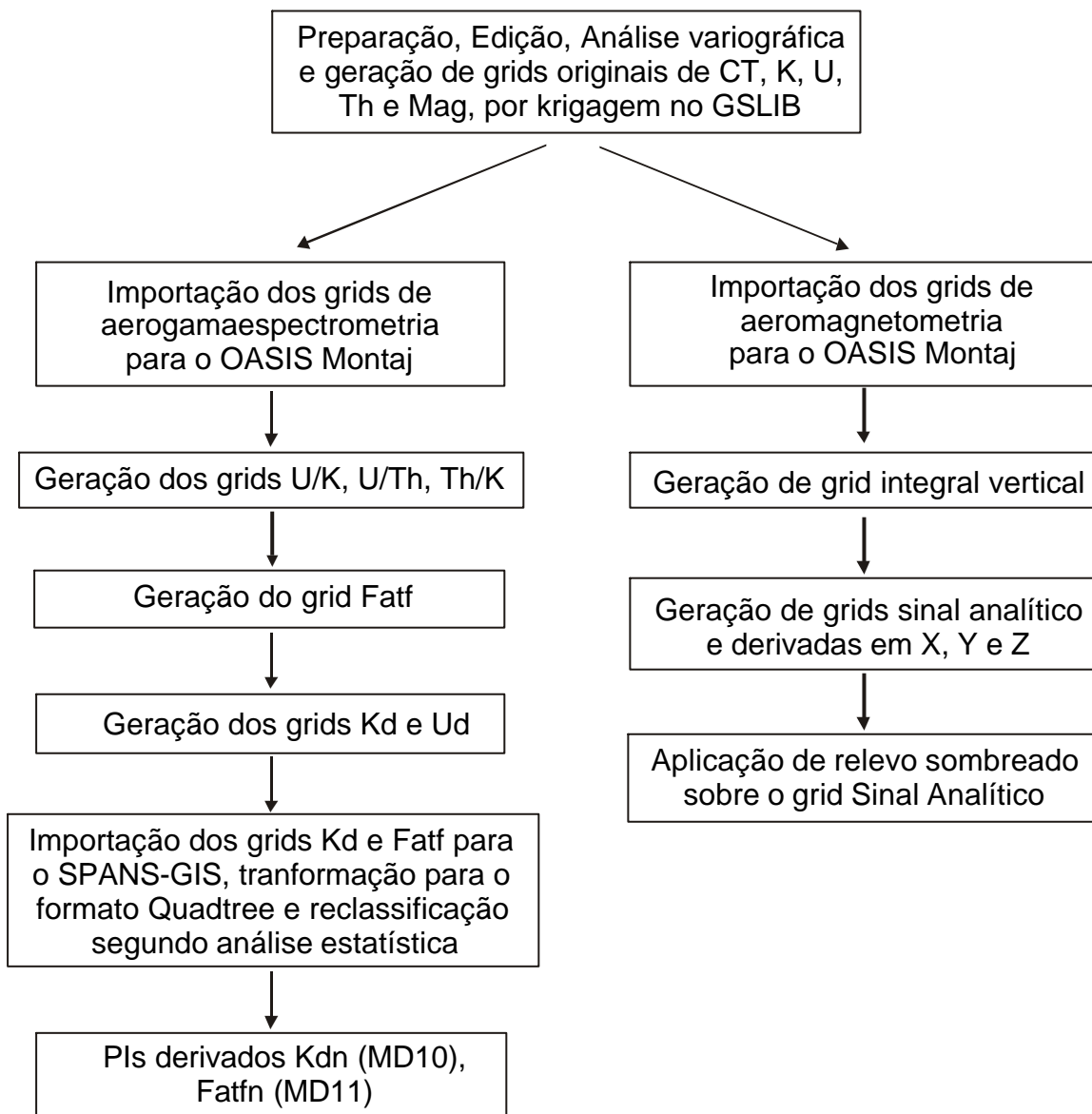


Figura 4.43 – Fluxograma do Fator Geofísico.

O termo lineamento foi usado, nessa Tese, segundo o conceito de O'Leary (1976): "lineamento é considerado como toda a feição linear, ou curvilinear mapeável, que possui um padrão diferente dos padrões apresentados pelas feições adjacentes e que presumivelmente reflete um fenômeno de sub-superfície". Nessa Tese, foram extraídos os lineamentos do **tipo 1** e do **tipo 2** (Amaro & Strieder, 1994; Strieder & Amaro, 1997).

Os lineamentos do tipo 1 são aqueles que ocorrem associados a estruturas penetrativas e que desenvolvem feições geomorfológicas paralelas positivas e negativas, em um padrão linear, ou curvilinear. Esses lineamentos apresentam-se freqüentemente associados a bandamentos tonais, muitas vezes gerados por contatos litológicos. Lineamentos desse tipo representam, em última análise, a erosão diferencial de feições estruturais penetrativas associadas a contatos litológicos, ou a zonas de cisalhamento. Mostram-se freqüentemente como curvilineamentos, que definem formas estruturais da superfície terrestre e que também são denominados lineamentos de forma estrutural.

Os lineamentos do tipo 2 associam-se às estruturas frágeis. Eles ocorrem principalmente na forma de feições geomorfológicas negativas, as quais freqüentemente podem truncar contatos litológicos e as estruturas penetrativas (lineamentos tipo 1). No campo mais dúctil (zonas de cisalhamento frágeis-dúcteis), entretanto, esses lineamentos podem desenvolver feições positivas e negativas associadas com bandamento tonal e, ainda, mostrar feições algo penetrativas. Os lineamentos do tipo 2 são retilineares ou, no máximo, suavemente curvilineares e ocorrem em localizações, orientações e extensões bem marcadas. Esse tipo de lineamentos caracteriza estruturas disjuntivas (frágeis), que podem ser desenvolvidas em um padrão específico (*en échelon, relay, anastomosing, righth stepping, overstep, overlapping, overstep, underlapping overstep, in line, oblique* e outras).

O potencial interpretativo desse tipo de mapa de lineamentos mostrou-se extremamente alto e constituiu uma ferramenta extremamente valiosa para a detecção de estruturas tectônicas em províncias marcadas por sistemas de cisalhamento, como é o caso da Ilha Cristalina de Rivera. O mapa de fotolineamentos tipo 1 permitiu a detecção das estruturas tectônicas de transtração do Sistema de Cisalhamento Rivera (**SCR**), que são representadas por *duplexes, splays*, intersecções de zonas de cisalhamento e zonas de sombra de pressão de estruturas intrusivas.

Essas estruturas transtrativas foram identificadas a partir da configuração da geometria apresentada pelos fotolineamentos do tipo 1, foram definidas como áreas-alvo

estruturais e constituem expressões da primeira fase deformacional do **SCR**. O processo de seleção dessas estruturas tomou por base a Estrutura San Gregorio, conforme definido por Quadros *et al.* (1995) e Quadros (1995); avaliações de campo e análise visual estereoscópica em fotografias aéreas em escala 1:20.000 auxiliaram na interpretação dessas feições dilatacionais. Uma discussão resumida do padrão tectônico que originou essas estruturas de transtração é encontrada no capítulo 1.

A extração dos fotolineamentos tipo 2 teve como objetivo complementar a extração de lineamentos de modo a aumentar a compreensão do padrão tectônico que afetou a **ICR**. Esses fotolineamentos representam as estruturas que constituem a segunda fase deformacional do **SCR** e tem sua importância em virtude de alguns deslocamentos que causaram às estruturas da primeira fase deformacional do **SCR**.

Os procedimentos para o desenvolvimento dos **PIs** resultantes desse fator são descritos a seguir:

- 1) extração dos fotolineamentos (tipo 1 e tipo 2), diretamente de imagens orbitais LANDSAT TM-5, com a utilização de lâmina de poliéster;
- 2) transformação dos dados analógicos de lineamentos para o formato digital por processo de digitalização e processamento em AutoCAD[#]. Isso gerou, por consequência, dois arquivos *.dwg: um para lineamentos tipo 1 e outro para lineamentos tipo 2;
- 3) análise dos resultados, seleção de áreas-alvo com base em estudo prévio do comportamento tectônico das estruturas existentes na região e digitalização de possíveis estruturas de transtração (alvos estruturais) no AutoCAD[#], o que resultou em um terceiro arquivo *.dwg;
- 4) esses três arquivos *.dwg foram transformados para o formato *.dxf e exportados para o SPANS-GIS, o que resultou em arquivos *.veh / *.vec posteriormente transformados em *layers* (camadas) de dados tipo linha no formato vetorial binário com extensão *.top / *.vtx;
- 5) o arquivo de lineamentos tipo 2 foi armazenado para utilização como apoio nas análises interpretativas dos demais padrões do Fator Estrutural;
- 6) os *layers* de dados tipo linha de lineamentos tipo 1 e de alvos estruturais (Figs. 4.44 e 4.45) foram transformados em mapas (*layers*) de isodistâncias, ou *buffers* (Serra, 1982).

Esses mapas de isodistâncias são processados no formato *raster* tipo **quadtree** no SPANS-GIS. Essa operação de dilatação de feições lineares teve por objetivo permitir a análise de potencialidade das áreas, ou dos corredores de proximidade às estruturas potencialmente importantes, marcadas pelos lineamentos **tipo 1** (zonas de cisalhamento) e pelos alvos estruturais (estruturas de transtração). Esse tipo de análise é denominado Análise de Proximidade (Silva, 1999). O **quadtree alvestón** (alvos estruturais) ainda foi submetido a uma operação tipo máscara, de tal forma que apenas as áreas localizadas fora dos alvos estruturais mantiveram os corredores de proximidade, enquanto as áreas internas dos alvos tiveram os corredores de proximidade substituídos pela classe alvo do mapa máscara.

Os *layers* **l1bufn** e **alvestón**, no formato **quadtree**, constituíram então os **PIs** derivados **MD12** e **MD13**, que podem ser visualizados nas figuras 4.46 e 4.47. O fluxograma geral dos procedimentos usados no desenvolvimento dos dados desse Fator é apresentado na figura 4.48.

4.8 Fator altimetria

O Fator altimetria é composto pelas informações de altimetria extraídas das cartas topográficas executadas pelo *Servicio Geográfico Militar (R. O. del Uruguay)* em escala 1:50.000, denominadas: Minas de Corrales, Cuchilla del Ombú, Amarillo, Las Flores, Moirones, Alborada, Hospital e Vichadero (Fig. 1.1). Esses dados foram utilizados para a construção de um Modelo Digital de Terreno (**MDT**), que constituiu o Plano de Informação derivado gerado nesse fator e que teve por objetivo principal fornecer informações sobre o relevo da área estudada e a sua relação com a localização das ocorrências minerais.

Modelos Digitais de Terreno, também conhecidos por Modelos Numéricos de Terreno ou ainda Modelos de Elevação Digital (terminologia melhor ajustada a dados altimétricos; Burrough, 1986), são representações matemáticas computacionais da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre em uma região da superfície terrestre. Entre os vários dados que podem ser representados por **MDT**, os dados de relevo são os mais comumente usados.

A Modelagem Digital de Terreno permite a geração de um modelo 2.5D, do terreno por meio de técnicas de interpolação com base em dados de distribuição regular ou irregular. O processo de construção de um **MDT** pode ser dividido em três etapas:

- 1) *amostragem*, que compreende a aquisição de um conjunto de amostras representativas do fenômeno de interesse. Em geral, representado por curvas de isovalores;

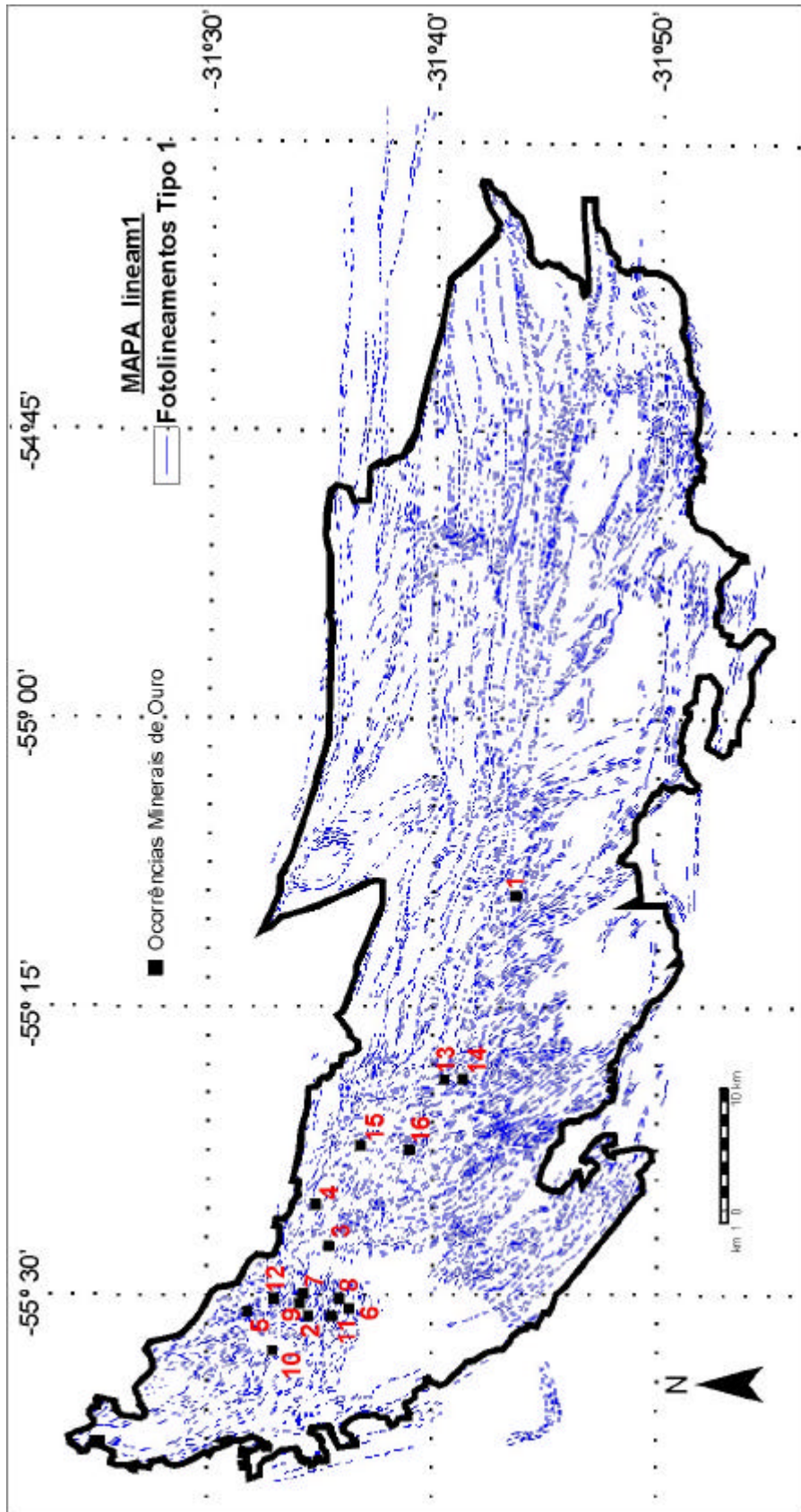


Figura 4.44 – Mapa de fotolineamentos tipo 1, extraídos de imagem orbital LANDSAT TM 5. Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

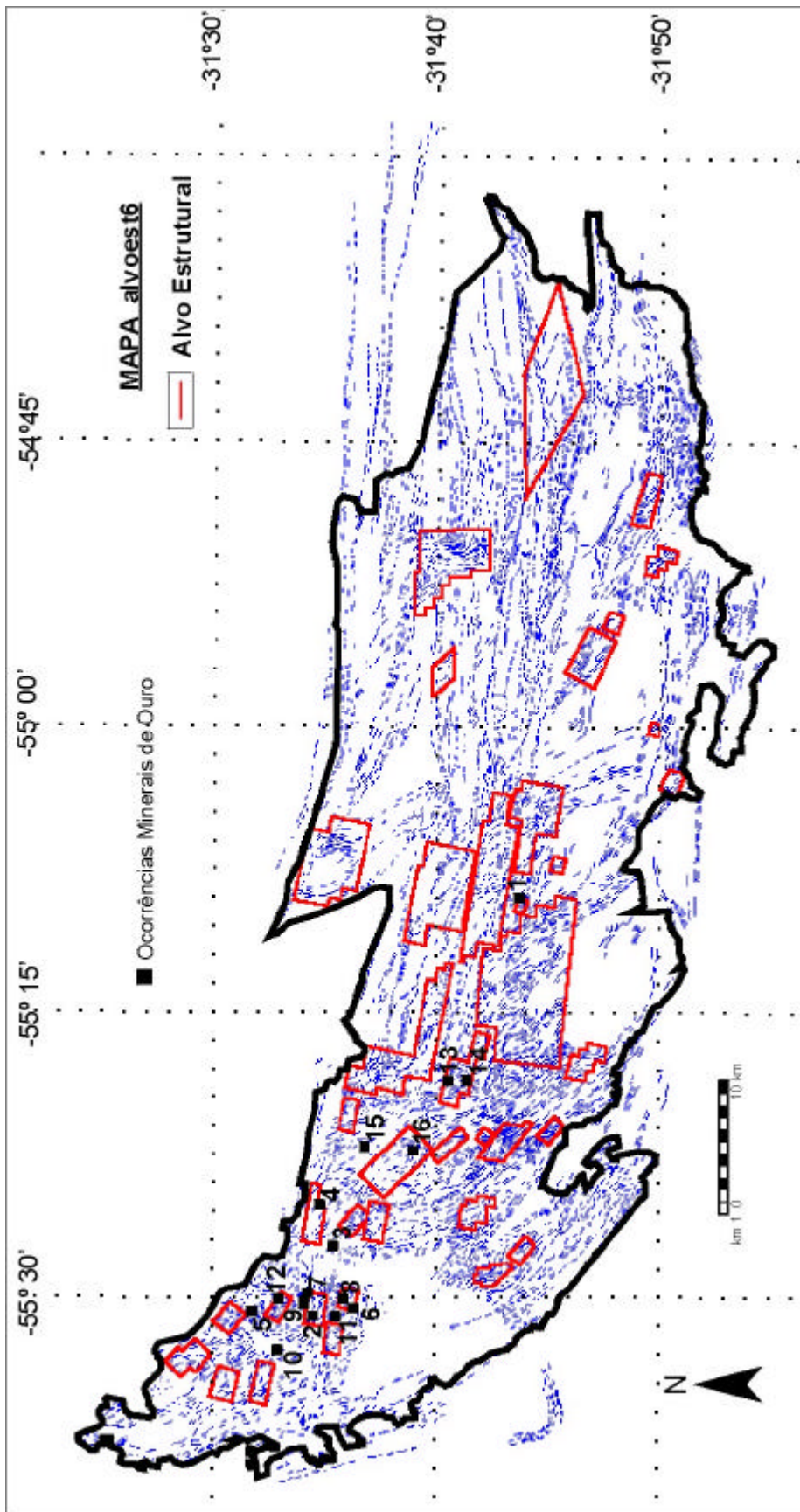


Figura 4.45– Mapa de fotolocalizações tipo 1 e alvos definidos como áreas de dilatação. Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

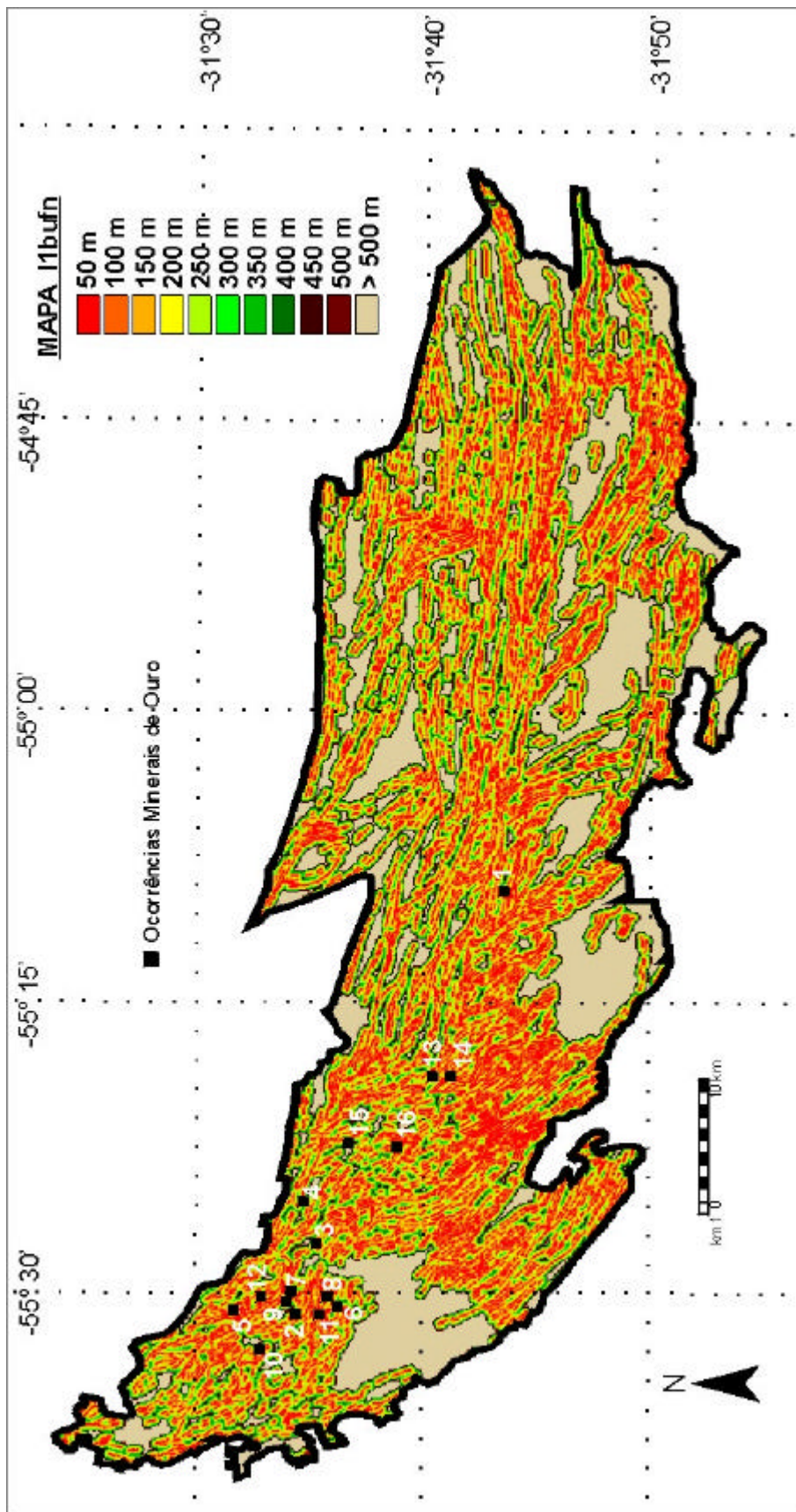


Figura 4.46 – Mapa de fotoloteamentos tipo 11bbufn (PI derivado MD12) com geração de corredores de proximidade (buffers). Ocorrências minerais identificadas no mapa da figura 4.5.

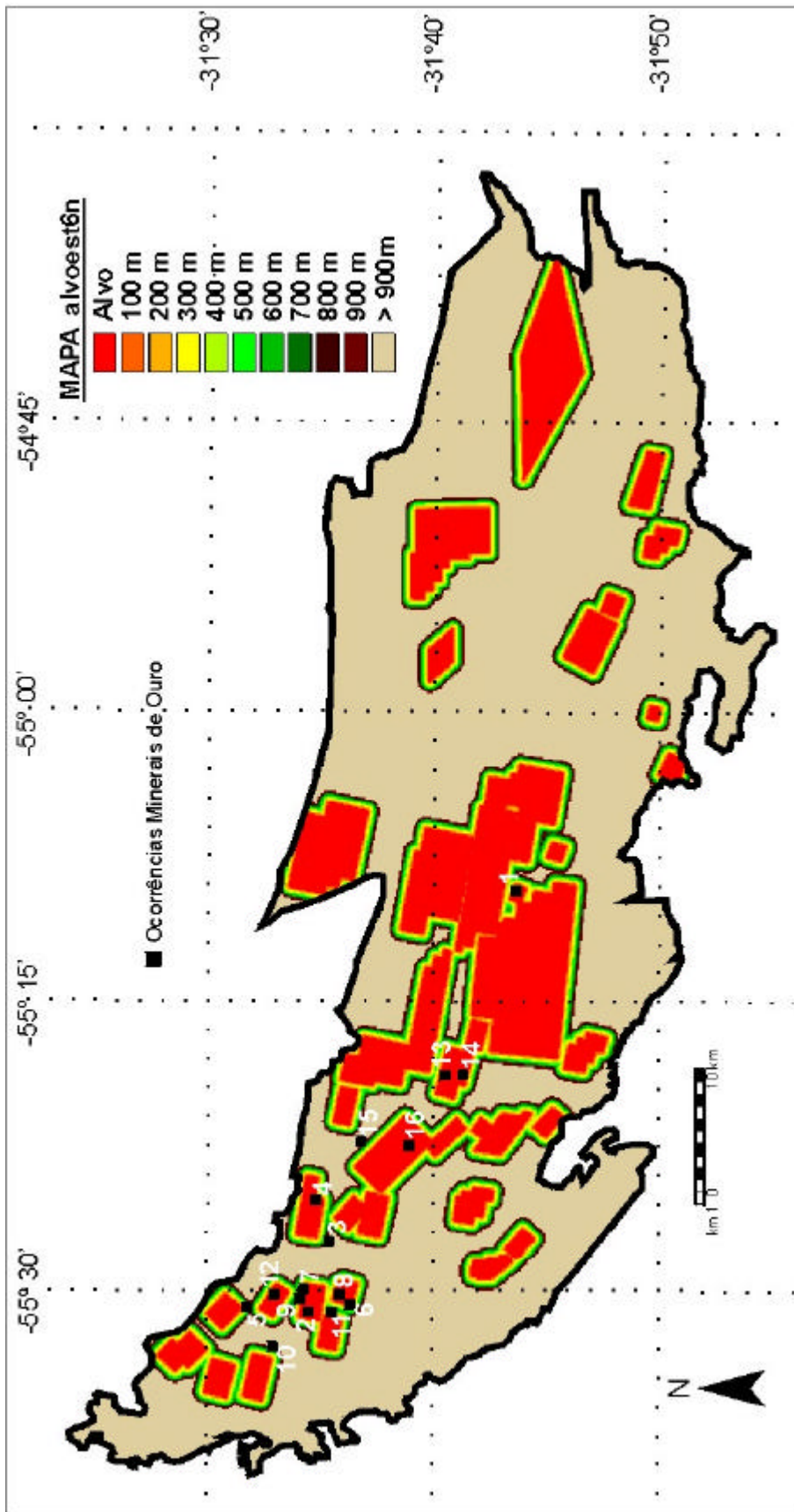


Figura 4.47– Mapa alvoest6n (PI derivado MD13). Alvos com corredores de proximidade (*buffers*). Ocorrências mineraiis identificadas no mapa 4.5.

Fator Estrutural - Pls MD12 e MD13

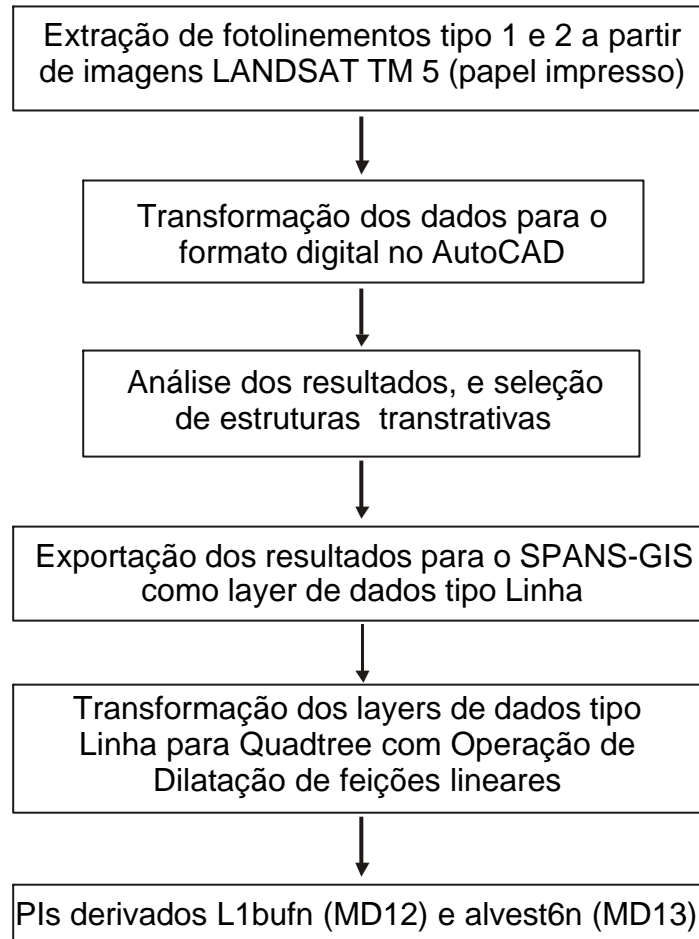


Figura 4.48 – Fluxograma do Fator Estrutural

- 2) *modelagem*, que envolve a criação de *estruturas de dados* e a definição de *superfícies de ajuste*. Essa etapa tem o objetivo de obter uma representação contínua do fenômeno com base no conjunto amostral;
- 3) *aplicações*, que são os procedimentos de análise executados sobre os modelos digitais.

Nessa Tese, o processo de *amostragem* foi feito via mesa digitalizadora apoiada no programa MDDC2, desenvolvido no Lapes (UFRGS), onde foram extraídos os valores de altimetria em malha irregular a partir de cartas topográficas. Esse trabalho gerou uma tabela no formato ASCII, que é constituída por valores (z) de altimetria e suas respectivas posições

geográficas (x,y). Essa tabela foi então editada de acordo com o padrão de tabela do SPANS-GIS e importada para esse sistema, onde gerou um *layer* de dados tipo ponto com extensão *.tba, depois transformada para *.tbb, o formato binário de tabelas usado no SPANS-GIS. Com base nessa tabela, foi então feita a *modelagem* para a construção do **MDT**; esse processo usou a metodologia de geração de rede irregular triangular (**TIN**), denominado Triangulação de Delaunay (Peucker *et al.*, 1978; Pettinati, 1983). Essa é a metodologia mais utilizadas para geração de estruturas de **MDT** nos **SIG** atualmente disponíveis (Felgueiras, 1999) e tem gerado ótimos resultados para representar a topografia, visto que sua estruturação permite uma boa delimitação de descontinuidades, sempre comuns em superfícies naturais; além disso, requer menos espaço para armazenamento em disco. Outro fator importante e que transmite confiabilidade ao método é que os vértices dos triângulos pertencem ao conjunto amostral. O critério geral utilizado para a geração dessa estrutura é a maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo; ou seja, a malha deverá conter triângulos tão equiláteros quanto possível. A interpolação dos pontos é feita dentro do domínio da célula triangular a que o mesmo pertence, com a utilização de funções matemáticas específicas.

Nessa Tese, a geração da superfície contínua na forma de um *grid* (mapa) no formato **quadtree** foi feita pelo método de interpolação linear denominado Inverso da Distância, onde o valor Z foi calculado diretamente a partir dos valores dos nós dos triângulos ponderados pela distância. A transformação para o formato **quadtree** foi feita para permitir e facilitar o posterior uso desse **PI** no processo de integração. A esse respeito, Moore *et al.* (1993) recomenda a utilização de **MDT** na forma de grades regulares em Sistemas de Informações Geográficas, pois essa estrutura facilita a integração de **PIs**. O *layer* gerado, denominado **icrfn**, constituiu o **PI** derivado MD14, classificado com 10 classes de altitude e uma classe de dados inexistentes e pode ser visualizado na figura 4.50.

A aplicação do **MDT** constituiu-se primeiramente na análise desse mapa e permitiu a constatação de uma forte relação geométrica das feições topográficas com os fotolaneamentos tipo 1 (Amaro & Strieder, 1994; Strieder & Amaro, 1997), que marcam as estruturas penetrativas da fase de deformação D1 do Sistema de Cisalhamento Rivera (Quadros *et al.*, 1995; Quadros, 1995) que afetou toda a **ICR** e que tem íntima associação com as ocorrências minerais conhecidas. Essas estruturas caracterizam-se por um caráter frágil-dúctil e marcam lineamentos posicionados em altitudes intermediárias, desenvolvidos entre estruturas geomorfológicas positivas e negativas paralelas. Essa relação geométrica também é notadamente visível em observações de campo, onde as estruturas do **SCR** marcam

nitidamente as feições topográficas alongadas nas direções NW/E a SE/W. Essas constatações incentivaram a aplicação do **MDT** diretamente no processo de integração para mapeamento de favorabilidade mineral. O fluxograma geral resumido com os procedimentos usados nesse fator podem ser visualizados na Figura 4.49.

Fator Altimetria - PI MD14

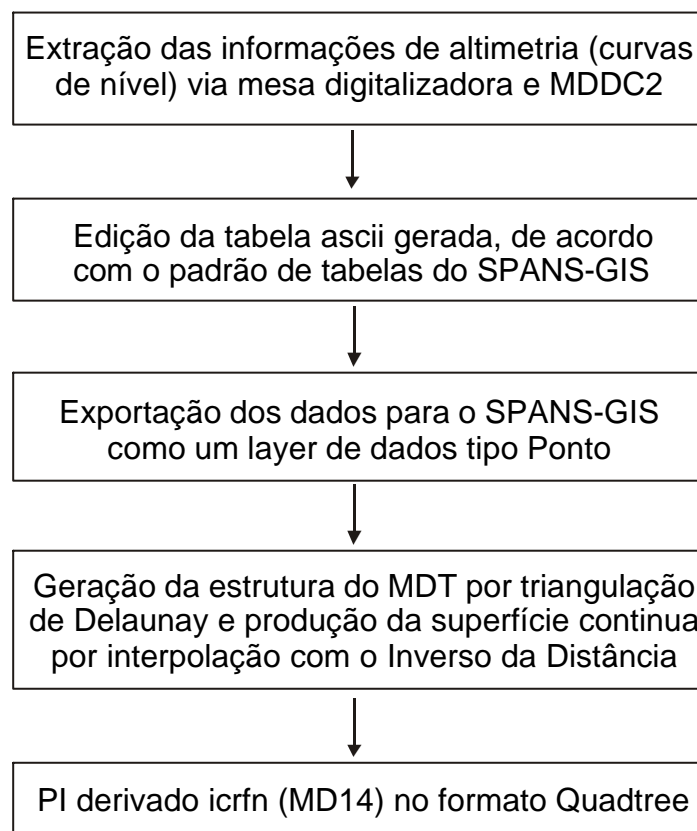


Figura 4.49 – Fluxograma do Fator Altimetria

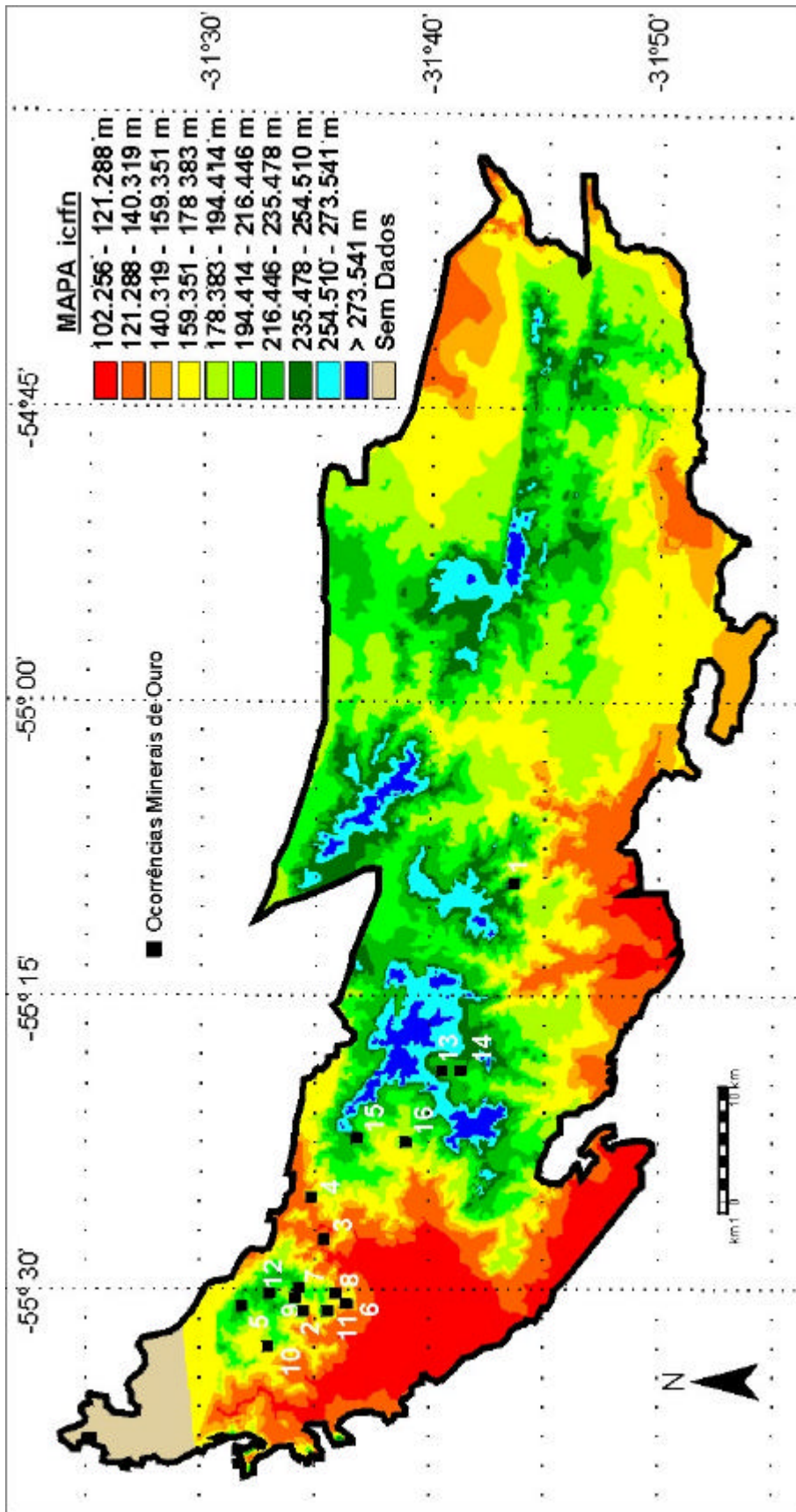


Figura 4.50 – Mapa icrfn (PI derivado MD14). Modelo Digital de Terreno da ICR. Ocorrências mineraiis identificadas no mapa da figura 4.5.

Capítulo 5

Integração de dados: mapeamento do potencial aurífero da ICR

O sucesso na aplicação dos Sistemas de Informação Geográfica para o mapeamento de potencial mineral não é proveniente de seu uso como uma caixa preta, mas provém de sua utilização baseada em um cuidadoso desenvolvimento de um modelo de depósito mineral e de seu conseqüente modelo de exploração. O modelo de exploração irá guiar a seleção dos dados a serem utilizados, a manipulação dos dados para a extração das evidências espaciais importantes para o processo de predição e a posterior integração dos dados com o objetivo de mapeamento de favorabilidade mineral.

Nesse sentido, a aplicação de mais de uma metodologia de integração é importante de maneira a permitir a produção de mais de um resultado, na forma de mapas previsionais. Com isso, pode-se fazer análises comparativas, tanto qualitativas, como quantitativas. A interpretação dessas análises, baseadas principalmente em medidas do grau de diferença entre os resultados (mapas previsionais), permite uma melhor percepção da sensibilidade dos métodos de integração. Assim, as análises comparativas constituem uma verdadeira medida da confiança dos resultados baseados em modelamentos diferentes.

Como citado e discutido no capítulo 3 dessa Tese, foram escolhidas duas metodologias para o mapeamento da favorabilidade mineral de ouro na **ICR**: 1) método pesos de evidência e 2) método lógica difusa.

O método dos Pesos de Evidência é analisado no item 5.1 e representa a categoria de metodologias quantitativas, que são dirigidas essencialmente pelos dados. Essa metodologia possibilita, de uma maneira quantitativa, medir e utilizar a associação espacial entre os depósitos conhecidos na área e as evidências usadas na integração.

O método Lógica Difusa é analisado no item 5.2 e representa a categoria de metodologias qualitativas, que se baseiam fundamentalmente no conhecimento do especialista e no estabelecimento de um modelo de depósito procurado na região estudada.

5.1 Método de Integração Pesos de Evidência

Nesse modelamento (Bonham-Carter, 1988; Bonham-Carter *et al.*, 1989; Bonham-Carter, 1991; Bonham-Carter, 1994a e Wright & Bonham-Carter, 1996), cujo embasamento teórico foi discutido no capítulo 2, a combinação das evidências foi realizada de uma maneira probabilística, pois cálculos estatísticos foram usados para a estimativa dos pesos. Os pesos estimados foram determinados com base nas associações medidas entre os depósitos e as evidências e com base em suas extensões em área.

Cada depósito, ou ocorrência mineral, dentro da área em estudo foi definido como pertencente a uma única célula (*pixel*), que possui uma unidade de área equivalente a 1 Km²; essa área foi considerada como suficientemente pequena para representar uma ocorrência mineral. Dentro dessa condição, o número total de células contendo um depósito mineral foi representado como N(D); a área total da região estudada foi definida como N(T); logo, a densidade média de depósitos conhecidos na área foi definida como N(D)/N(T). Essa razão N(D)/N(T) representa a probabilidade *a priori* P(D) de uma célula qualquer conter um depósito mineral. Esse valor, adicionado às informações trazidas pelos dados usados como evidências no modelamento, permitiu a estimação das probabilidades *a posteriori*.

A área da **ICR** escolhida para a aplicação do método foi implementada como mapa base no SPANS GIS[#] (Tydac, 1997). As seguintes etapas básicas de organização e processamento dos dados foram seguidas:

- 1) seleção dos mapas a serem usados como evidências para predição de depósitos minerais. A seleção dos mapas foi baseada em critérios estabelecidos pelo modelo de exploração previamente definido para a área em estudo (Cap. 3);
- 2) determinação de um esquema de reclassificação otimizado para cada mapa multiclasse, visando a transformação desses mapas para o formato binário e, assim, a maximização da associação espacial entre os depósitos e os mapas;
- 3) análise de Independência Condicional (**IC**) para cada par de mapas evidência. Mapas com problemas de **IC** foram eliminados, ou combinados. Por fim, foi feita uma análise de independência condicional com a utilização do teste de **IC** geral;

- 4) aplicação da integração propriamente dita pela metodologia Pesos de Evidência, com o objetivo de gerar um mapa previsional final com estimativa do potencial aurífero da região em termos de probabilidade *a posteriori* e conseqüente avaliação do resultado.

A região de estudo (**ICR**) possui uma área equivalente a 2610,80 Km² e pode ser visualizada na figura 4.5. Esse mapa também contém as ocorrências minerais de ouro usadas no modelamento.

5.1.1 Seleção dos mapas evidência e reclassificação

Os mapas evidência foram selecionados a partir dos planos de informação (**PIs**) existentes, com base no modelo conceitual e com base no modelo de exploração elaborado para a área (Modelo San Gregorio). A partir desse modelo, foram então selecionados 14 mapas (**PIs**) derivados multiclasse, produzidos na etapa de processamento dos dados e red denominados mapas evidência para o processo de integração. As características dos mapas derivados podem ser avaliadas na tabela 5.1.

Os mapas derivados, agora denominados mapas evidência foram, após sua seleção, reclassificados para o formato binário (mapas com duas classes). Os mapas binários resultantes mantiveram suas denominações acrescidas da letra b no final do nome. Essa transformação foi feita com o intuito de aumentar a robustez da estimativa dos pesos, diminuir o tempo de máquina na implementação do processo e facilitar a interpretação dos resultados. De acordo com Goodacre *et al.* (1993) e Bonham-Carter (1994b), não é recomendável o uso de mapas evidência multiclasse em áreas onde não há um grande número de ocorrências minerais conhecidas, pois, nesse caso, as estimativas dos pesos ficam instáveis e a variância fica muito grande.

A transformação dos mapas para o formato binário foi realizada com base no uso do contraste ótimo do método Pesos de Evidência; assim, foi possível maximizar a associação espacial entre as ocorrências minerais e as evidências. Esse contraste **C** é definido como a diferença entre **W⁺** e **W⁻** (pesos). Contrastes de valores positivos indicam correlação positiva entre as evidências e as ocorrências, enquanto contrastes de valores negativos indicam correlação negativa. O valor 0 (zero) indica independência entre as evidências e as ocorrências minerais. Esse procedimento de transformação com base no maior contraste,

Tabela 5.1 – Mapas derivados para integração pelo Método dos Pesos de Evidência.

Fatores de Integração	Mapas PIs derivados	Características dos mapas derivados
Fator Estrutural	llbufn	mapa gerado por análise de proximidade sobre mapa de lineamentos tipo 1
	alvoest6	mapa gerado por análise de proximidade sobre o mapa de alvos estruturais
Fator LANDSAT	acp1ar acp2ar acp3ar	mapas ACP derivados do processamento segundo metodologia desenvolvida por Crosta & Moore (1989) e Loughlin (1991)
	rgb2ar rgb3ar rgb4ar	mapas (imagens de satélite) RGB derivados do processamento desenvolvido por Glikson (1997)
Fator Geoquímica	bacpann	mapa derivado da geração de bacias de captação com coleta de concentrados de minerais pesados
	bacsedn	mapa derivado da geração de bacias de captação com coleta de sedimentos de corrente
	bbgcp2n	mapa derivado da geração de bacias de captação de dados ACP de blegs
Fator Geofísica	kdn	mapa gerado a partir do Kd: processamento do canal K normalizado pelo Th (Saunders <i>et al.</i> , 1987; Pires, 1995) sobre os mapas aerogamaespectométricos
	fatfn	mapa gerado a partir do processamento Fator F (Efimov, 1978; Gnojek & Prichystal, 1985) sobre os mapas aerogamaespectométricos.
Fator Altimetria	icrfn	mapa gerado por desenvolvimento de modelo digital de terreno

porém, nem sempre foi simples e automático; por vezes, foi necessária a utilização de julgamentos subjetivos com base no conhecimento e na análise da variância do contraste, que reflete a soma da variância dos pesos. Isso permitiu definir o contraste ótimo relacionado à evidência em questão. Para essa análise, foi usado o valor do contraste *student*, que é calculado pela equação:

$$Student = C/S, \quad (5.1)$$

onde **C** é o contraste e **S** é o seu desvio padrão. Essa razão (**C/S**) serve como um teste informal da confiança do contraste; quanto maior a razão, maior a diferença de seu desvio padrão e mais confiável é o contraste. A sugestão de Bonham-Carter (1994a) e Wright & Bonham-Carter (1996) para o uso de contrastes *Student* com valores acima de 1,5 foi seguida nessa tese.

O cálculo dos pesos W^+ e W^- , bem como do contraste de cada classe dos mapas evidência multiclasse foi feito com a implementação, no *software* FORTRAN F32 (Microsoft Corporation, 1993), de um programa, cujo corpo principal é descrito por Bonham-Carter (1994a).

Para a transformação multicritério – binário dos mapas do Fator Estrutural definidos como mapas de proximidade (*buffers*), os pesos W^+ e W^- foram calculados cumulativamente a partir da classe mais próxima da estrutura. Como classe de corte (limiar), foi usada a classe de maior contraste **C**. Os resultados dos cálculos encontram-se nas tabelas 5.2 e 5.3. Notar que os *buffers* a partir da classe 9 do mapa **l1bufn** não tiveram seus pesos calculados, pois o **LN** resultou em zero, indicando inexistência de ocorrências além de 450m das estruturas (probabilidade zero).

A reclassificação, então, resultou na geração de dois mapas binários: 1) o mapa **l1bufnb** (Fig. 5.1), gerado a partir do mapa **l1bufn** com a classe 2 (evidência favorável e atribuição de peso W^+) limitada à área com distância de até 250m das estruturas lineares, 2) o mapa **alvest6b** (Fig. 5.2), gerado a partir do mapa **alvoest6** com a classe 2 (evidência favorável e atribuição de peso W^+) limitada à área com distância de até 100m das estruturas. A classe 1 (evidência desfavorável e atribuição de peso W^-) foi definida para o restante das áreas das evidências. Notar que, no caso dos mapas do Fator Estrutural, não houve áreas com ausência de dados e sim áreas sem a geração de corredores de proximidade; nesse caso, as áreas foram computadas como classe 1.

Tabela 5.2 – Pesos de Evidência cumulativos calculados para o mapa de proximidade dos lineamentos **l1bufn**. A classe de contraste escolhida como limiar encontra-se em negrito. Símbolos: w^+ = peso de evidência positivo, w^- = peso de evidência negativo, $S(w)$ = desvio padrão dos pesos de evidência, **C** = contraste, $S(c)$ = desvio padrão do contraste, student = valor “estudentizado” do contraste.

Classe	Intervalos (m)	Área (km ²)	Ocorrências	w^+	$S(w^+)$	w^-	$S(w^-)$	C	$S(c)$	student
1	50	414.73	3	0.1669	0.5794	-0.0349	0.2782	0.2018	0.6428	0.3139
2	100	776.64	9	0.6426	0.3353	-0.4759	0.3787	1.1185	0.5058	2.2114
3	150	1174.08	11	0.4277	0.3029	-0.5685	0.4480	0.9963	0.5408	1.8422
4	200	1367.91	12	0.3614	0.2899	-0.6470	0.5008	1.0083	0.5787	1.7425
5	250	1641.20	14	0.3331	0.2684	-1.0930	0.7078	1.4261	0.7570	1.8838
6	300	1751.43	14	0.2676	0.2683	-0.9720	0.7079	1.2396	0.7571	1.6374
7	350	1915.81	14	0.1772	0.2682	-0.7592	0.7081	0.9363	0.7572	1.2365
8	400	1987.96	14	0.1399	0.2682	-0.6492	0.7082	0.7892	0.7573	1.0420
9	450	2096.51	16	Não calculado (LN=0)						
10	500	2149.94	16	Não calculado (LN=0)						
11	> 500	2610.80	16	Não calculado (LN=0)						

A transformação multicritério – binário dos mapas gerados pelos demais fatores utilizou pesos e contrastes calculados de maneira não cumulativa. A classe de corte também foi escolhida como a de maior contraste.

Os mapas derivados do Fator LANDSAT, com exceção da imagem **acp1ar**, tiveram, porém, os pesos e os contrastes recalculados para as classes definidas como limiar, visto que as classes selecionadas deveriam também representar a(s) classe(s) referente(s) aos valores de **ND** (número digital) mais altos da evidência, supostamente mais favoráveis de acordo com o processamento nelas executado. Com isso, as novas classes 2 dos mapas binários resultantes passariam a incorporar a totalidade das áreas e das ocorrências minerais representadas pelas classes referentes aos **NDs** mais altos, além das classes selecionadas como limiar. Por exemplo: no caso do mapa **acp3ar**, a classe selecionada como limiar foi a classe 6; porém, a classe 2 do mapa binário resultante incorporou também a área e as ocorrências relativas a classe 7 (classe referente aos valores de **ND** mais altos da evidência).

Tabela 5.3 – Pesos de Evidência cumulativos calculados para o mapa de proximidade dos alvos estruturais **alvoest6**. Classe de contraste escolhida como limiar encontra-se em negrito. Símbolos, idem tabela 5.2.

Classe	Intervalos (m)	Área (km ²)	Ocorrências	w ⁺	S(w ⁺)	w ⁻	S(w ⁻)	C	S(c)	student
1	alvo	504.82	10	1.1871	0.3194	-0.7692	0.4088	1.9563	0.5188	3.7708
2	100	557.86	11	1.1824	0.3045	-0.9265	0.4478	2.1088	0.5415	3.8944
3	200	610.99	11	1.0897	0.3043	-0.9002	0.4478	1.9898	0.5414	3.6756
4	300	663.54	11	1.0057	0.3040	-0.8735	0.4478	1.8792	0.5413	3.4719
5	400	716.06	11	0.9283	0.3039	-0.8461	0.4478	1.7744	0.5412	3.2788
6	500	767.16	12	0.9466	0.2910	-1.0424	0.5005	1.9890	0.5790	3.4354
7	600	818.30	12	0.8811	0.2908	-1.0142	0.5006	1.8953	0.5789	3.2739
8	700	867.83	12	0.8215	0.2907	-0.9861	0.5006	1.8076	0.5789	3.1227
9	800	917.23	13	0.8465	0.2793	-1.2455	0.5779	2.0921	0.6418	3.2595
10	900	965.63	13	0.7944	0.2792	-1.2165	0.5779	2.0109	0.6418	3.1332
11	>900	1645.2								Buffer não calculado

Foram reclassificadas como classe 2 (evidência favorável, atribuição de peso **W⁺**), as áreas representadas pelas seguintes classes multicritério:

?? **acp1ar** – classe 5;

?? **acp2ar** – classes 4 e 5;

?? **acp3ar** – classes 6 e 7;

?? **rgb2ar** – classes 5 a 7;

?? **rgb3ar** – classes 4 e 5;

?? **rgb4ar** – classes 6 e 7.

Como pode ser observado, as classes selecionadas como limiar foram classes representantes de valores altos de **ND**, fato que confere consistência ao processamento digital realizado nas imagens de satélite LANDSAT. Deve-se notar que o processamento digital foi implementado de maneira a atribuir as áreas de maior favorabilidade aos valores mais altos de **ND**.

As tabelas 5.4 a 5.9 mostram os resultados dos cálculos realizados para as imagens de satélite **acp** e **rgb**. A tabela 5.10 mostra os pesos e os contrastes recalculados para a classe 2 dos mapas binários, que correspondem à classe selecionada como limiar nos mapas multiclasse, acrescida da(s) classe(s) dos mapas multiclasse mais altas. As figuras 5.3 a 5.8 mostram as imagens reclassificadas binárias desse fator LANDSAT.

A partir desses cálculos, observou-se um valor de contraste extremamente baixo para a imagem **rgb2ar**, o que indica uma quase ausência de correlação com as ocorrências minerais. Em virtude disso, essa imagem foi previamente descartada da integração pelo método Pesos de Evidência. A classe 1 (evidência desfavorável e atribuição de peso **W**) foi definida para o restante das áreas das evidências.

Tabela 5.4 – Pesos de Evidência não cumulativos calculados para a imagem de satélite **acp1ar**. A classe selecionada como limiar encontra-se em negrito. Símbolos, idem tabela 5.2.

Classe	Intervalos (ND)	Area (km ²)	Ocorrências	w ⁺	S(w ⁺)	w ⁻	S(w ⁻)	C	S(c)	student
1	0 – 105	963.25	2	-1.0864	0.7078	0.3292	0.2684	-1.4156	0.7570	-1.8700
2	106 – 147	827.85	1	-1.6290	1.0006	0.3192	0.2593	-1.9481	1.0337	-1.8847
3	148 – 187	507.34	7	0.8193	0.3806	-0.3611	0.3340	1.1804	0.5064	2.3310
4	188 – 254	279.02	5	1.0849	0.4513	-0.2631	0.3022	1.3480	0.5431	2.4819
5	254 +	33.33	1	1.6127	1.0153	-0.0520	0.2590	1.6647	1.0478	1.5887

Tabela 5.5 – Pesos de Evidência não cumulativos calculados para a imagem de satélite **acp2ar**. A classe selecionada como limiar encontra-se em negrito. Símbolos, idem tabela 5.2.

Classe	Intervalos (ND)	Area (km ²)	Ocorrências	w ⁺	S(w ⁺)	w ⁻	S(w ⁻)	c	S(c)	student
1	0 – 105	989.25	1	-1.8073	1.0005	0.4149	0.2594	-2.2221	1.0336	-2.1499
2	106 – 142	743.18	1	-1.5209	1.0007	0.2724	0.2592	-1.7933	1.0337	-1.7348
3	143 – 187	578.75	6	0.5300	0.4104	-0.2206	0.3170	0.7506	0.5186	1.4474
4	188 – 254	264.63	8	1.6205	0.3590	-0.5890	0.3542	2.2095	0.5043	4.3812
5	254 +	34.97	0	Zero ocorrências						

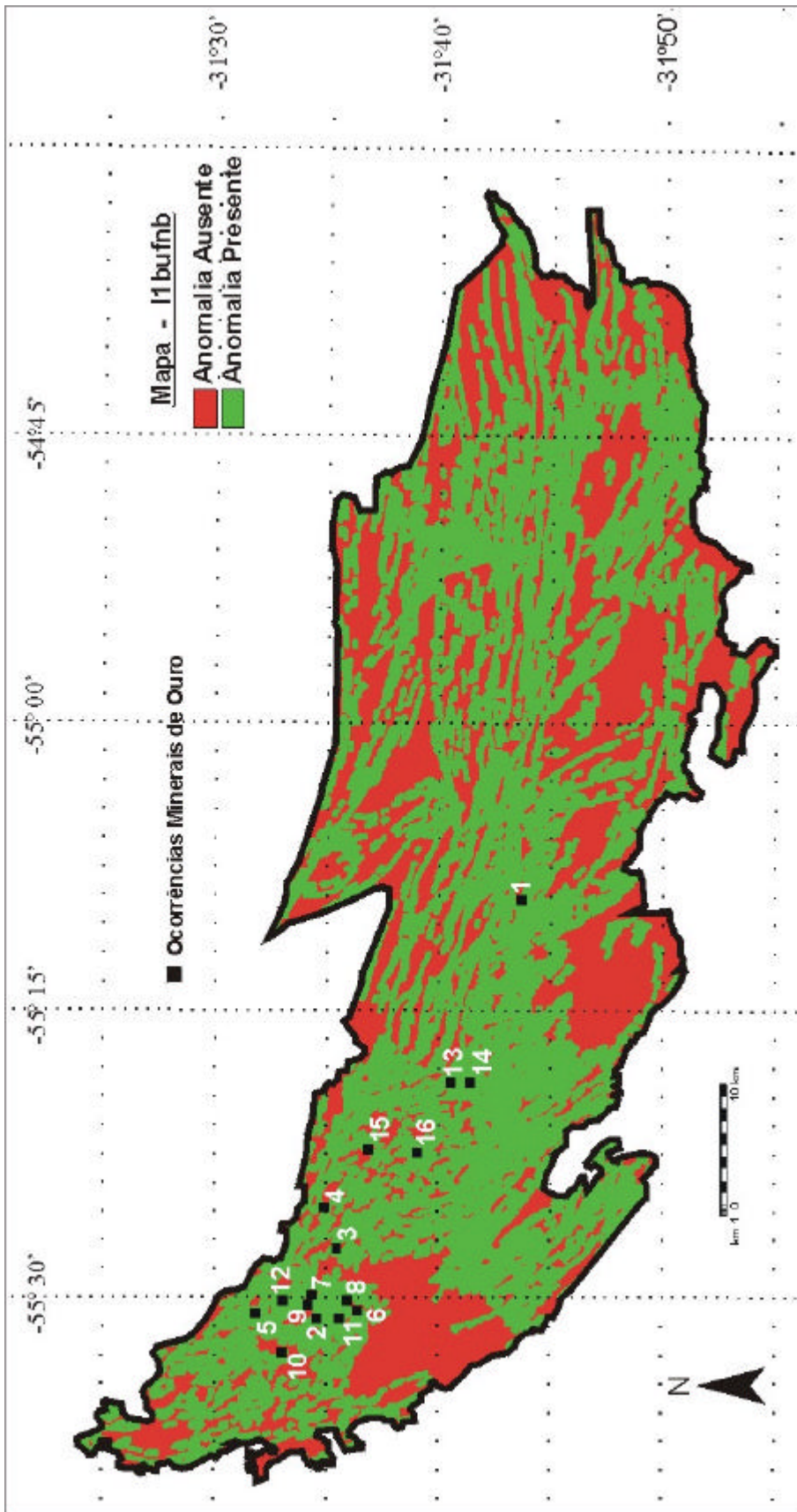


Figura 5.1 – Mapa Ilbufo. Análise de proximidade feita sobre os lineamentos tipo 1 extraídos de imagem LANDSAT TM-5, reclassificada para padrão binário. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

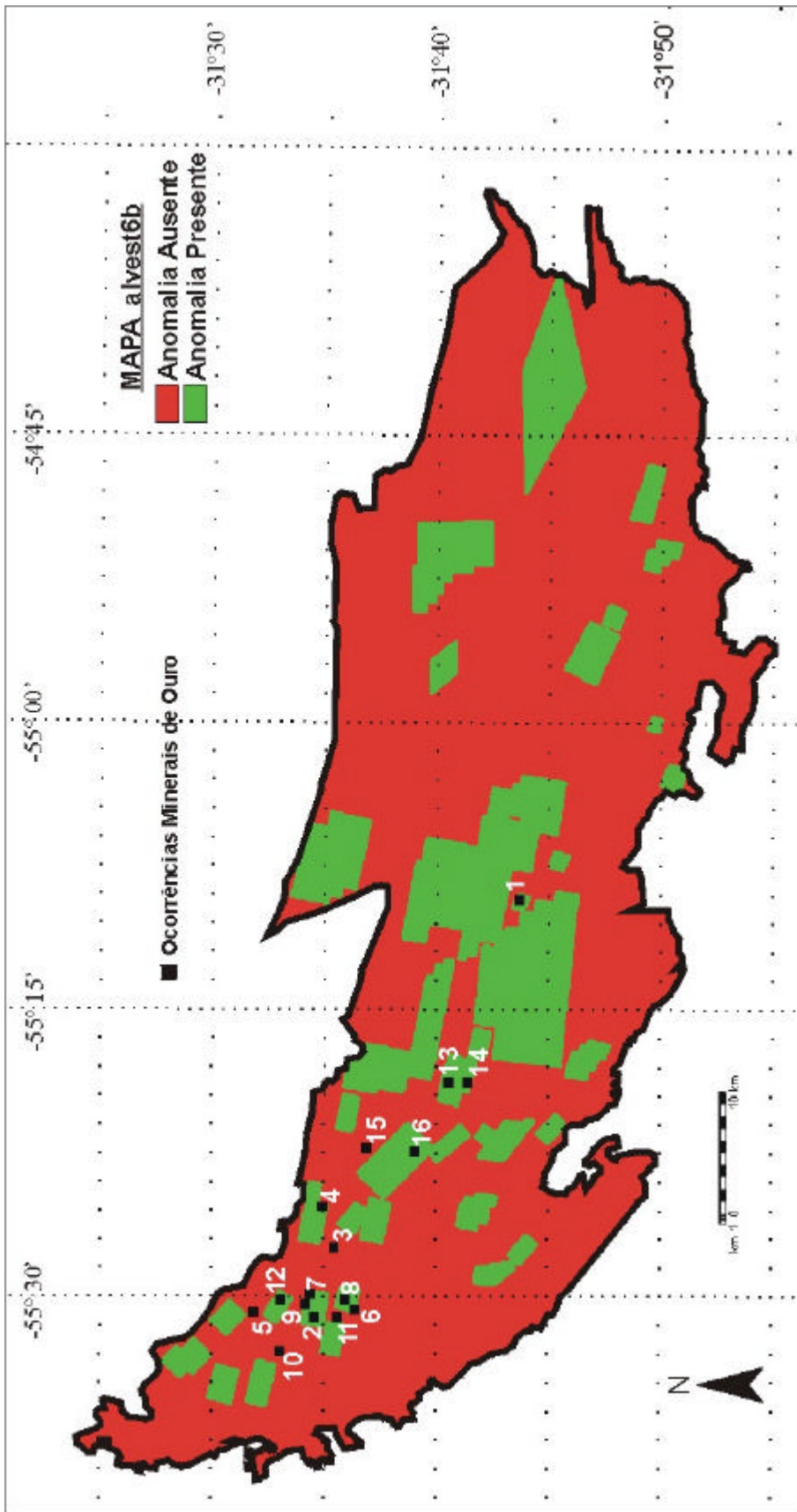


Figura 5.2 – Mapa alvest6b. Análise de proximidade feita sobre alvos estruturais, reclassificada para o padrão binário. Ocorrências mineraias numeradas de acordo com mapa de ocorrências mineraias (Fig. 4.5).

Tabela 5.6 – Pesos de Evidência não cumulativos calculados para a imagem de satélite **acp3ar**. A classe selecionada como limiar encontra-se em negrito. Símbolos, idem tabela 5.2.

Classe	Intervalos (ND)	Area (km ²)	Ocorrências	w^+	$S(w^+)$	w^-	$S(w^-)$	c	S(c)	student
1	0 – 120	155.79	0	Zero ocorrências						
2	121 – 142	162.05	1	0.0070	1.0031	-0.0005	0.2590	0.0074	1.0360	0.0072
3	143 – 180	1037.12	5	-0.2413	0.4483	0.1324	0.3026	-0.3737	0.5408	-0.6909
4	181 – 212	920.97	2	-1.0414	0.7079	0.3037	0.2684	-1.3451	0.7570	-1.7768
5	213 – 230	140.60	3	1.0657	0.5825	-1.1409	0.2781	1.2066	0.6455	1.8693
6	231 – 254	125.72	4	1.6732	0.5081	-0.2396	0.2894	1.9129	0.5848	3.2712
7	254 +	38.54	1	1.4633	1.0132	-0.0500	0.2590	1.5132	1.0458	1.4470

Tabela 5.7 – Pesos de Evidência não cumulativos calculados para a imagem de satélite **rgb2ar**. A classe selecionada como limiar encontra-se em negrito. Símbolos, idem tabela 5.2.

Classe	Intervalos (ND)	Area (km ²)	Ocorrências	w^+	$S(w^+)$	w^-	$S(w^-)$	c	S(c)	student
1	0 – 92	50.73	0	Zero ocorrências						
2	93 – 127	99.92	0	Zero ocorrências						
3	128 – 177	819.89	4	-0.2293	0.5012	0.0898	0.2896	-0.3191	0.5789	-0.5513
4	178 – 220	1260.64	10	0.2598	0.3175	-0.3231	0.4092	0.5829	0.5179	1.1256
5	221 – 230	142.24	2	0.8385	0.7121	-0.0780	0.2680	0.9164	0.7609	1.2044
6	231 – 254	198.93	0	Zero ocorrências						
7	254 +	38.45	0	Zero ocorrências						

Tabela 5.8 – Pesos de Evidência não cumulativos calculados para a imagem de satélite **rgb3ar**. A classe selecionada como limiar encontra-se em negrito. Símbolos, idem tabela 5.2.

Classe	Intervalos (ND)	Area (km ²)	Ocorrências	w^+	$S(w^+)$	w^-	$S(w^-)$	c	S(c)	student
1	0 – 97	930.79	1	-1.7463	1.0005	0.3791	0.2594	-2.1254	1.0336	-2.0563
2	98 – 135	866.79	2	-0.9807	0.7079	0.2719	0.2683	-1.2525	0.7571	-1.6544
3	136 – 182	562.29	7	0.7151	0.3803	-0.3346	0.3341	1.0497	0.5062	2.0735
4	183 – 254	218.86	6	1.5198	0.4140	-0.3844	0.3169	1.9042	0.5213	3.6526
5	254 +	32.06	0	Zero Ocorrências						

Tabela 5.9 – Pesos de Evidência não cumulativos calculados para a imagem de satélite **rgb4ar**. A classe selecionada como limiar encontra-se em negrito. Símbolos, idem tabela 5.2.

Classe	Intervalos (ND)	Area (km ²)	Ocorrências	w^+	$S(w^+)$	w^-	$S(w^-)$	c	S(c)	student
1	0 – 115	136.43	0	Zero ocorrências						
2	116 – 140	156.93	1	0.0393	1.0032	-0.0026	0.2590	0.0418	1.0361	0.0404
3	141 – 175	874.23	2	-0.9892	0.7079	0.2762	0.2683	-1.2654	0.7571	-1.6714
4	176 – 215	1149.13	5	-0.3443	0.4482	0.2068	0.3027	-0.5511	0.5408	-1.0190
5	216 – 230	136.45	3	1.2936	0.5838	-0.1548	0.2781	1.4484	0.6466	2.2398
6	231 – 254	119.06	4	1.7295	0.5086	-0.2423	0.2894	1.9718	0.5852	3.3697
7	254 +	38.54	1	1.4633	1.0132	-0.0500	0.2590	1.5132	1.0458	1.4470

Tabela 5.10 – Pesos de Evidência não cumulativos (referentes a classe 2 dos mapas binários) recalculados para as imagens de satélite do Fator LANDSAT. Símbolos, idem tabela 5.2.

Classe 2	Inter valos (ND)	Area (km ²)	Ocor rênci as	w^+	$S(w^+)$	w^-	$S(w^-)$	c	S(c)	student
Acp2arb	188 +	299.60	11	1.4927	0.3584	-0.5739	0.3542	2.0667	0.5038	4.1018
Acp3arb	231 +	164.26	5	1.6276	0.4542	-0.3114	0.3022	1.9389	0.5455	3.5542
Rgb2arb	221 +	275.83	2	0.1693	0.7097	-0.2020	0.2681	0.1913	0.7586	0.2522
Rgb3arb	183 +	250.92	6	1.3795	0.4132	-0.3709	0.3169	1.7504	0.5207	3.3613
Rgb4arb	231 +	157.60	5	1.6703	0.4545	-0.3141	0.3022	1.9844	0.5458	3.6359

Os mapas do Fator Geoquímico também tiveram seus pesos de evidência calculados não cumulativamente. O processamento digital reclassificou as classes 2 (evidência favorável e atribuição de peso W^+) e 1 (evidência desfavorável e atribuição de peso W^-). Além disso, também foi computada a classe 0, que se refere à ausência de dados; dessa maneira, as áreas referentes à classe 0 puderam ser integradas com peso 0 (zero). Deve-se notar, no entanto, que, apesar de a classe 4 do mapa das bacias de captação com coleta de concentrados de minerais pesados (**bacpan**) mostrar o maior contraste, foi escolhida como classe de corte a classe 6, em virtude do teor referente à classe 4 (60 ppb) ser considerado muito baixo para ser selecionado como limiar.

As tabelas 5.11 a 5.13 mostram os resultados dos cálculos dos pesos e dos contrastes. Da mesma maneira que para as imagens do Fator LANDSAT, os pesos e os contrastes foram recalculados para a classe 2 dos mapas binários resultantes, nos casos onde a classe selecionada como limiar não representou a classe referente aos teores mais altos da evidência. A tabela 5.14 mostra os pesos e os contrastes recalculados. Foram reclassificadas como classe 2 (evidência favorável, atribuição de peso W^+), as áreas representadas pelas seguintes classes multicritério:

?? **bacsedn** – classes 5 e 6;

?? **bacpann** – classe 6;

?? **babgcp2n** – classes 5 e 6.

Os mapas reclassificados para o padrão binário referentes ao fator geoquímico podem ser visualizados nas figuras 5.9 a 5.11.

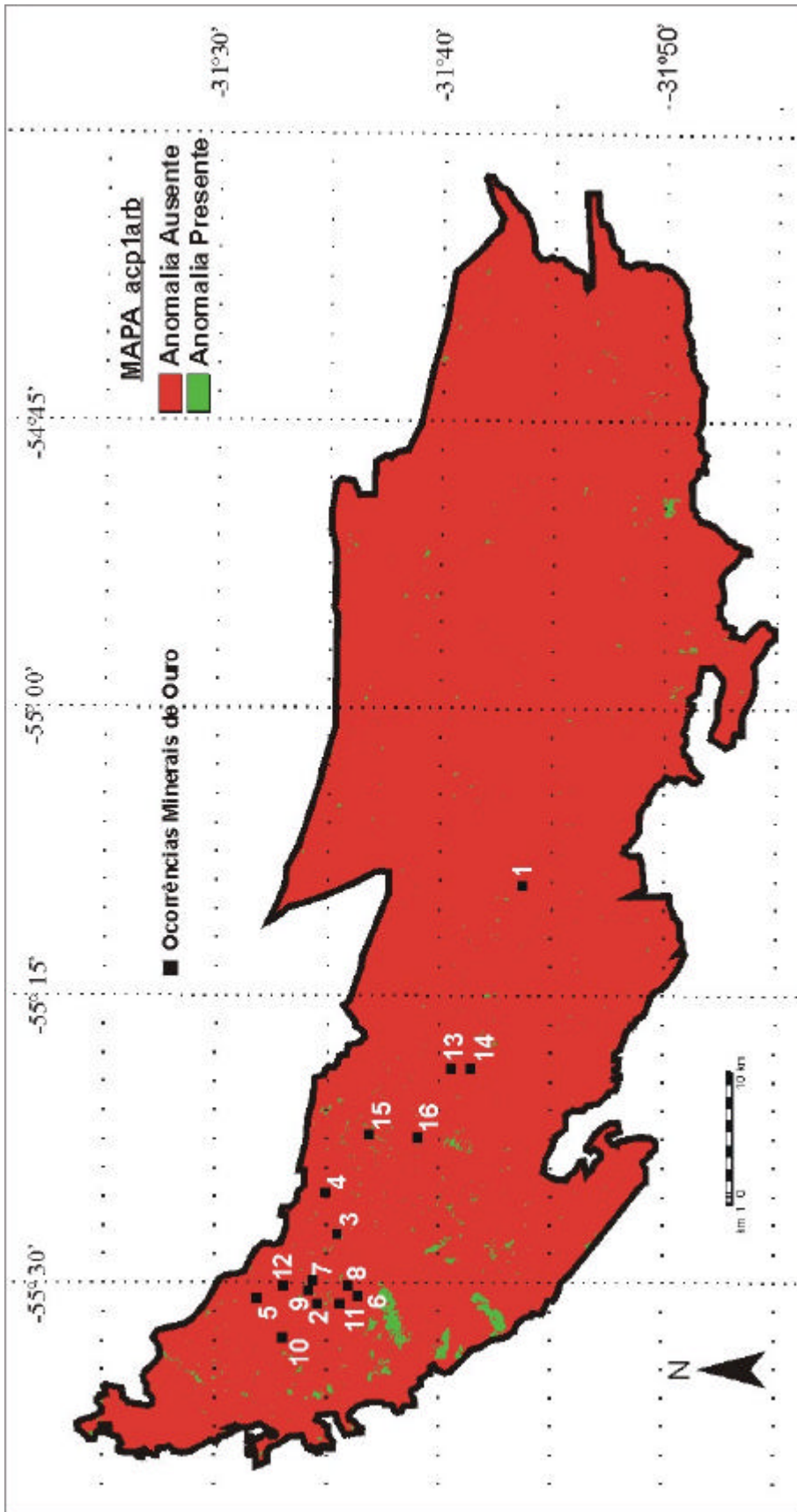


Figura 5.3 – Mapa acp1arb. Resultado da reclassificação do mapa (imagem de satélite) acp1ar para o padrão binário. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

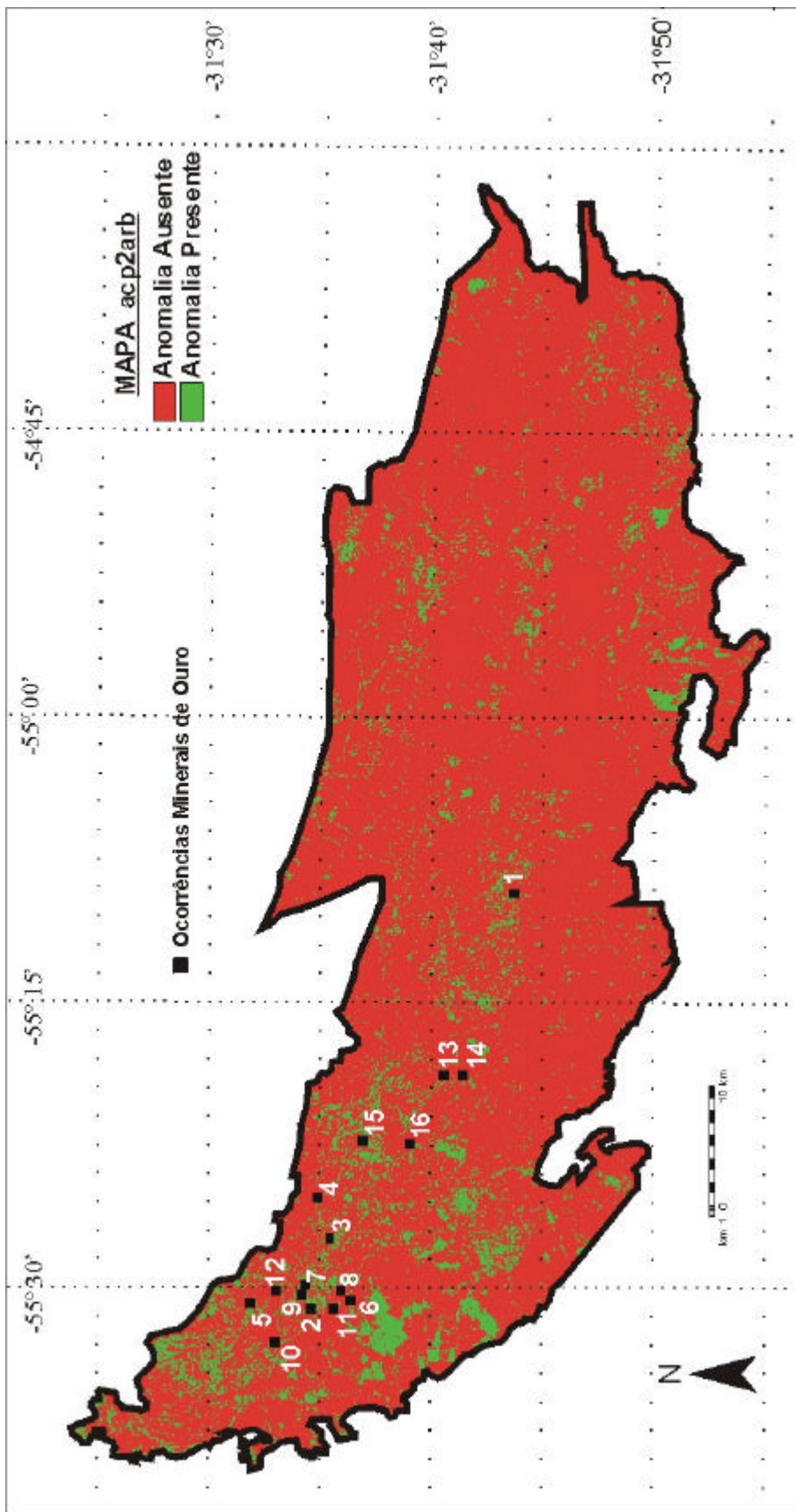


Figura 5.4 – Mapa acp2arb. Resultado da reclassificação do mapa (imagem de satélite) acp2ar para o padrão binário. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

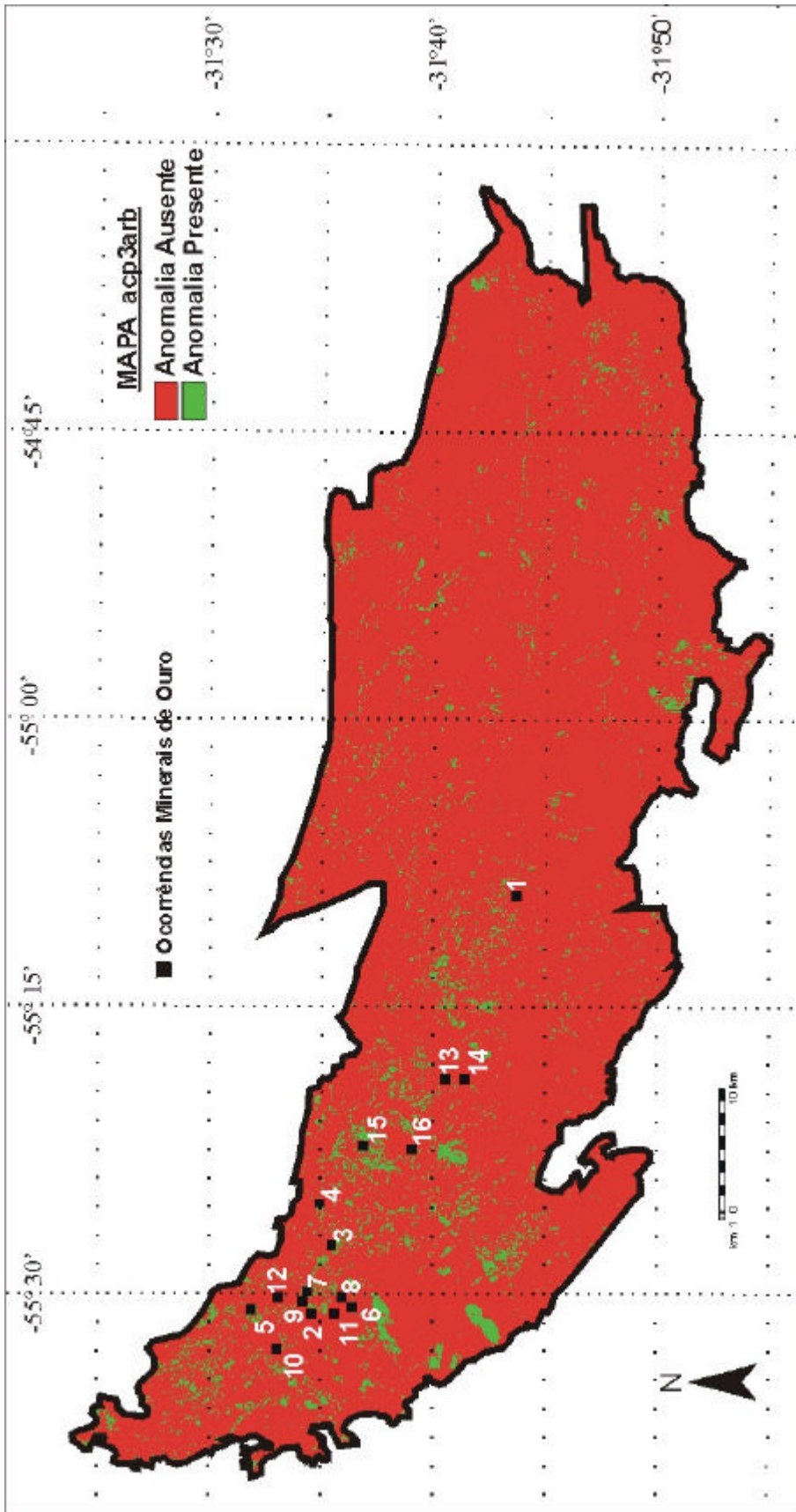


Figura 5.5 – Mapa acp3arb. Resultado da reclassificação do mapa (imagem de satélite) acp3ar para o padrão binário. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

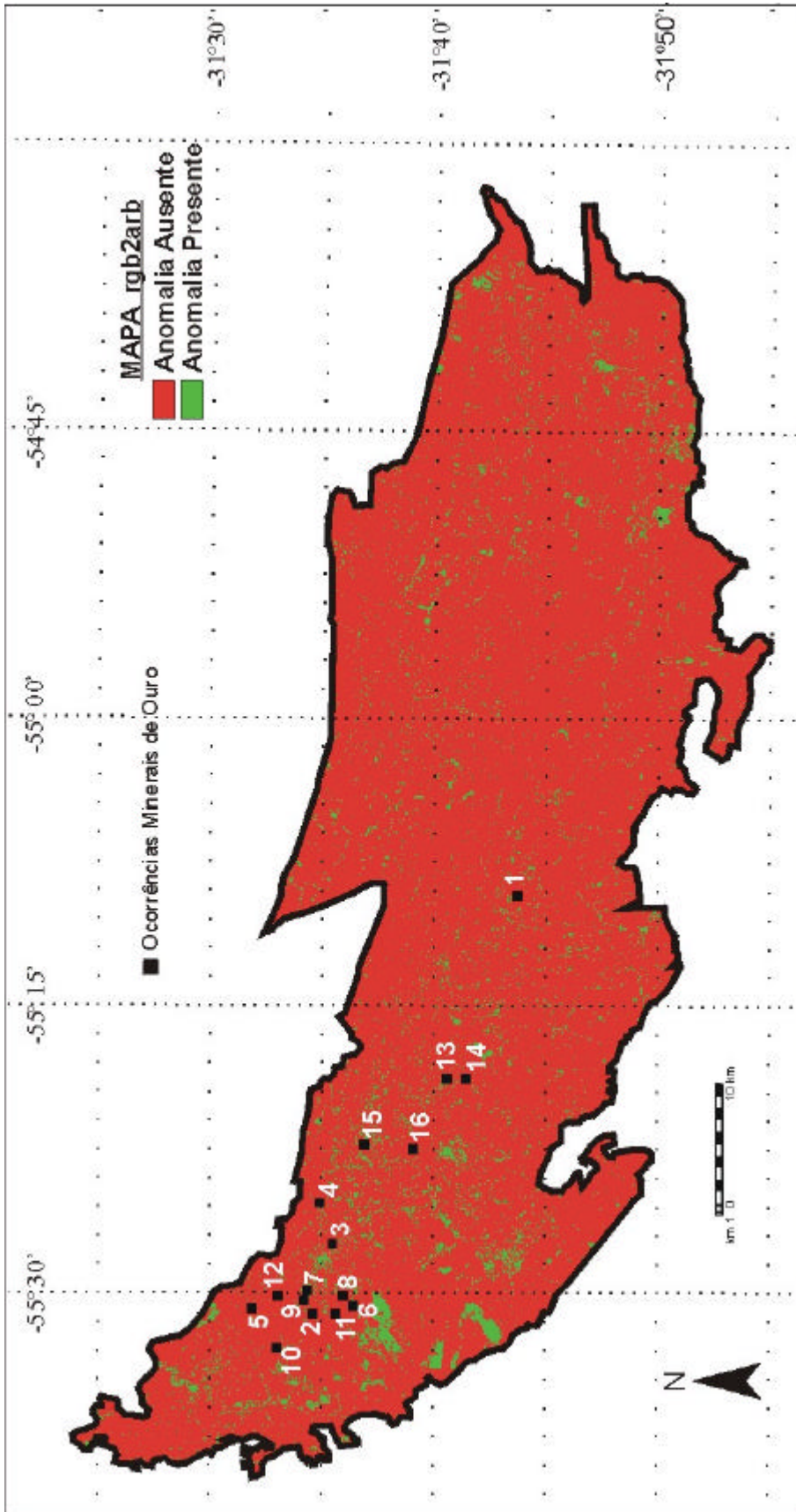


Figura 5.6 – Mapa `rgb2arb`. Resultado da reclassificação do mapa (imagem de satélite) `rgb2ar` para o padrão binário. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

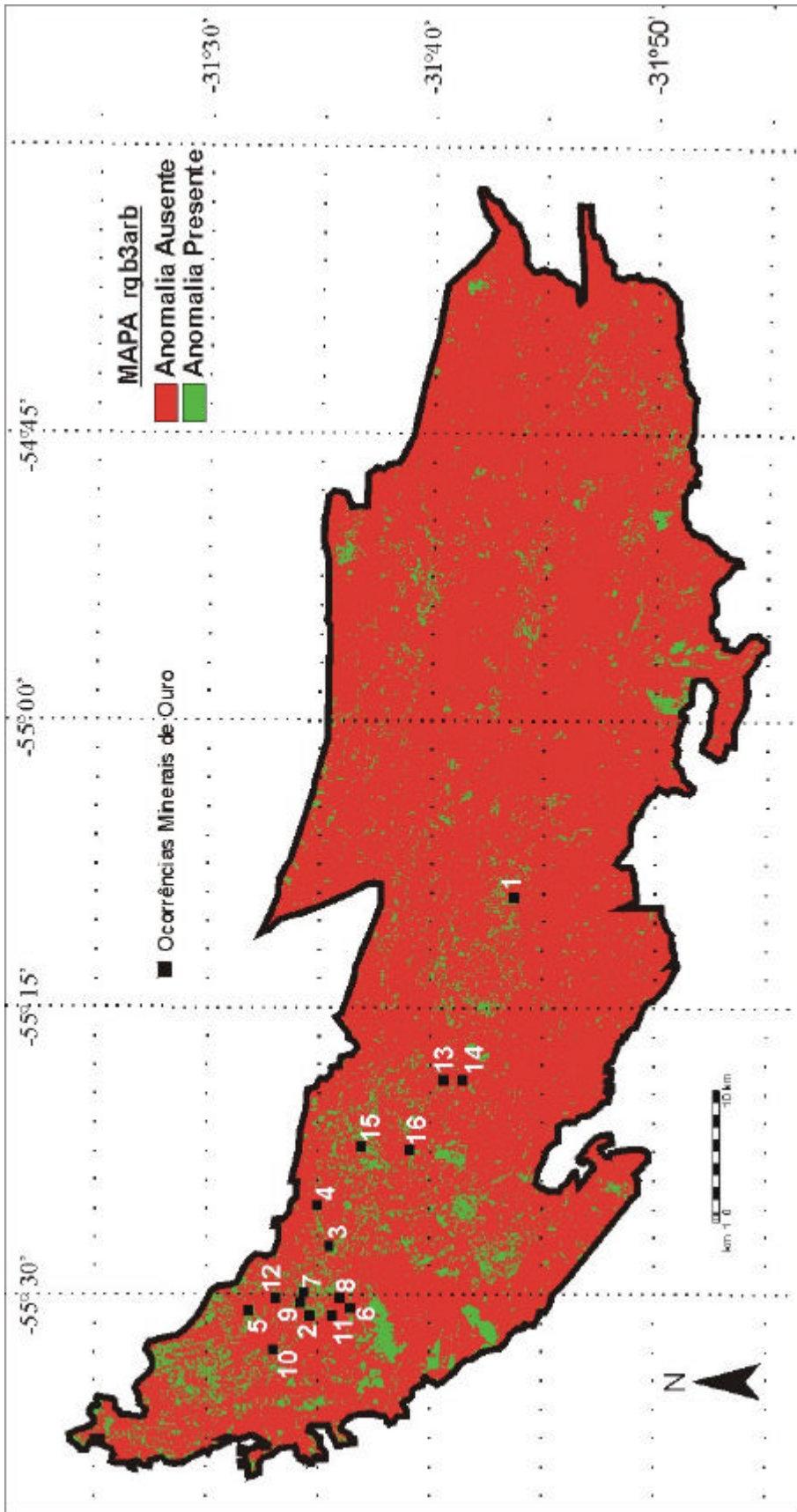


Figura 5.7 – Mapa rgb3arb. Resultado da reclassificação do mapa (imagem de satélite) rgb3ar para o padrão binário. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

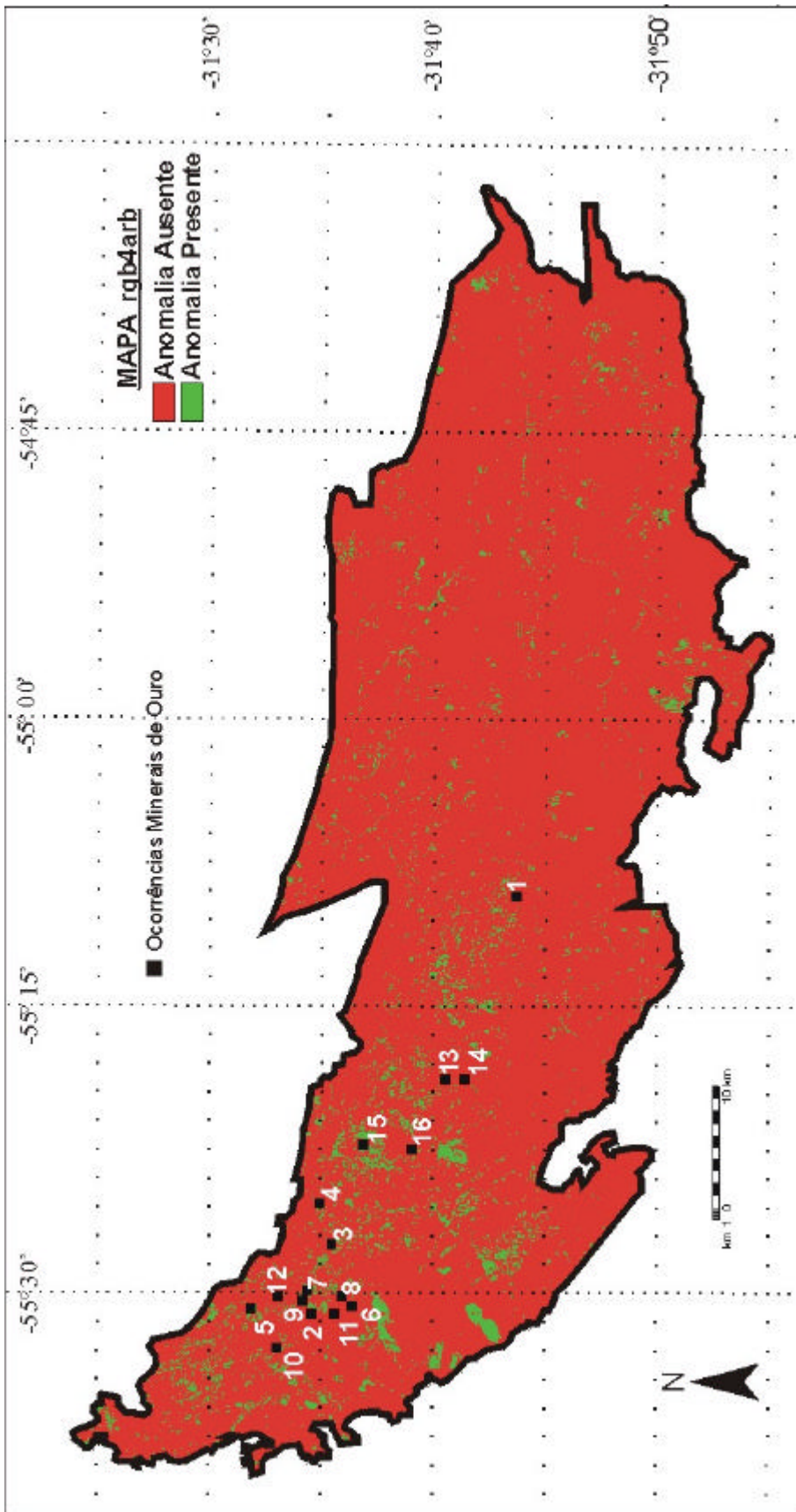


Figura 5.8 – Mapa rgb4arb. Resultado da reclassificação do mapa (imagem de satélite) rgb4ar para o padrão binário. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

Tabela 5.12 - Pesos de Evidência não cumulativos calculados para o mapa **bacpann**. Classe selecionada como limiar encontra-se em negrito. Símbolos, idem tabela 5.2.

Classe	Intervalos (ppb)	Área (km ²)	Ocorrências	w ⁺	S(w ⁺)	w ⁻	S(w ⁻)	C	S(c)	student
1	0.00 – 0.70	290.84	0	Zero ocorrências						
2	0.70 – 4.00	25.73	0	Zero ocorrências						
3	4.00 – 60.00	230.09	2	0.3521	0.7102	-0.0415	0.2681	0.3936	0.7591	0.5185
4	60.00 – 1200.00	275.97	10	1.8079	0.3221	-0.8727	0.4088	2.6806	0.5204	5.5106
5	1200.00 – 3500.00	10.97	0	Zero ocorrências						
6	> 3500.00	22.06	1	2.0413	1.0235	-0.0564	0.2590	2.0977	1.0557	1.9870
7	Sem dados	1755.71	3	Sem dados						

Tabela 5.13 - Pesos de Evidência não cumulativos calculados para o mapa **babgcp2n**. A classe selecionada como limiar encontra-se em negrito. Símbolos, idem tabela 5.2.

Classe	Intervalos	Área (km ²)	Ocorrências	w ⁺	S(w ⁺)	w ⁻	S(w ⁻)	c	S(c)	student
1	-1.40 – -0.50	224.12	2	0.3786	0.7103	-0.0440	0.2680	0.4226	0.7592	0.5567
2	-0.50 – -0.30	381.04	3	0.2523	0.5796	-0.0502	0.2782	0.3025	0.6429	0.4704
3	-0.30 – 0.10	276.12	1	-0.5285	1.0018	0.0475	0.2590	-0.5761	1.0348	-0.5567
4	0.10 – 0.70	173.00	1	-0.0588	1.0029	0.0040	0.2590	-0.0629	1.0358	-0.0607
5	0.70 – 2.00	79.19	6	2.5874	0.4247	-0.4414	0.3169	3.0288	0.5298	5.7164
6	> 2.00	27.18	2	2.5558	0.7347	-0.1238	0.2680	2.6795	0.7820	3.4265
7	Sem dados	1450.13	1	Sem dados						

Tabela 5.14 - Pesos de Evidência não cumulativos (referentes à classe 2 dos mapas binários) recalculados para os mapas do Fator Geoquímica. Símbolos, idem tabela 5.2.

Classe 2	Intervalos (ppb)	Área (km ²)	Ocorrências	w ⁺	S(w ⁺)	w ⁻	S(w ⁻)	c	S(c)	student
Bacsednb	700 +	19.90	1	2.1495	1.0261	-0.0572	0.2589	2.2067	1.0583	2.0852
bbgcp2nb	0.70 +	106.37	8	2.5794	0.3676	-0.6545	0.3541	3.2339	0.5105	6.3353

Para o mapa gerado no Fator Altimetria, a classe de maior contraste (classe 7) foi selecionada como limiar e representa altitudes intermediárias a altas (entre 216m e 235m). Esse resultado forneceu um maior peso à hipótese da íntima relação das ocorrências minerais com as estruturas penetrativas marcadas pelos lineamentos **tipo 1** (Amaro & Strieder, 1994; Strieder & Amaro, 1997), que representam as zonas de cisalhamento do Sistema de Cisalhamento Rivera (Quadros *et al.*, 1995; Quadros, 1995). Essas estruturas se caracterizam

por um caráter frágil-dúctil e marcam lineamentos posicionados em altitudes intermediárias, desenvolvidos entre estruturas geomorfológicas positivas e negativas paralelas.

Para a reclassificação desse mapa multiclasse **icrfn** para o formato binário, foram consideradas as classes 2 (evidência favorável e atribuição de peso W^+) e 1 (evidência desfavorável e atribuição de peso W^-). Apenas a classe 7 foi reclassificada como classe 2; as demais classes foram reclassificadas como classe 1. Foi, ainda, computada uma classe 0, referente à ausência de dados. A tabela 5.18 mostra o resultado dos cálculos dos pesos e do contraste realizados para o mapa **icrfn**. A figura 5.14 mostra o mapa binário **icrfnb** resultante da reclassificação a partir do mapa multiclasse **icrfn**.

Assim, foram produzidos 13 (treze) mapas evidência binários, denominados: **l1bufnb**, **alvest6b**, **acp1arb**, **acp2arb**, **acp3arb**, **rgb3arb**, **rgb4arb**, **bacednb**, **bacpannb**, **bbgcp2nb**, **kdnb**, **fatfnb**, **icrfnb**. Esses mapas binários serão utilizados na próxima etapa da metodologia Pesos de Evidência, caracterizada pelo teste de Independência Condicional efetuado par a par.

5.1.2 Testes de Independência Condicional

Os mapas evidência binários selecionados na etapa anterior foram testados par a par para a verificação de problemas de dependência condicional seguindo os parâmetros do método, conforme discutido no Capítulo 2.

Tabela 5.15 - Pesos de Evidência não cumulativos calculados para o mapa **kdn**. A classe selecionada como limiar encontra-se em negrito. Símbolos, idem tabela 5.2.

Classe	Intervalos	Area (km ²)	Ocorrências	w^+	$S(w^+)$	w^-	$S(w^-)$	c	S(c)	student
1	1.0171 – 1.5852	419.02	3	0.1566	0.5794	-0.0329	0.2782	0.1894	0.6427	0.2947
2	1.5852 – 1.7366	210.40	5	1.3732	0.4526	-0.2922	0.3022	1.6654	0.5442	3.0600
3	1.7366 – 2.1153	550.70	1	-1.2207	1.0009	0.1735	0.2591	-1.3942	1.0339	-1.3485
4	2.1153 – 2.9106	544.83	3	-0.1077	0.5789	0.0266	0.2782	0.1343	0.0015	-0.2090
5	2.9106 – 3.2893	51.55	3	2.3047	0.5949	-0.1888	0.2781	2.4934	0.6567	3.7970
6	> 3.2893	42.99	1	1.3512	1.0118	-0.0482	0.2590	1.3995	1.0444	1.3399
7	Sem dados	791.31	0	Sem dados						

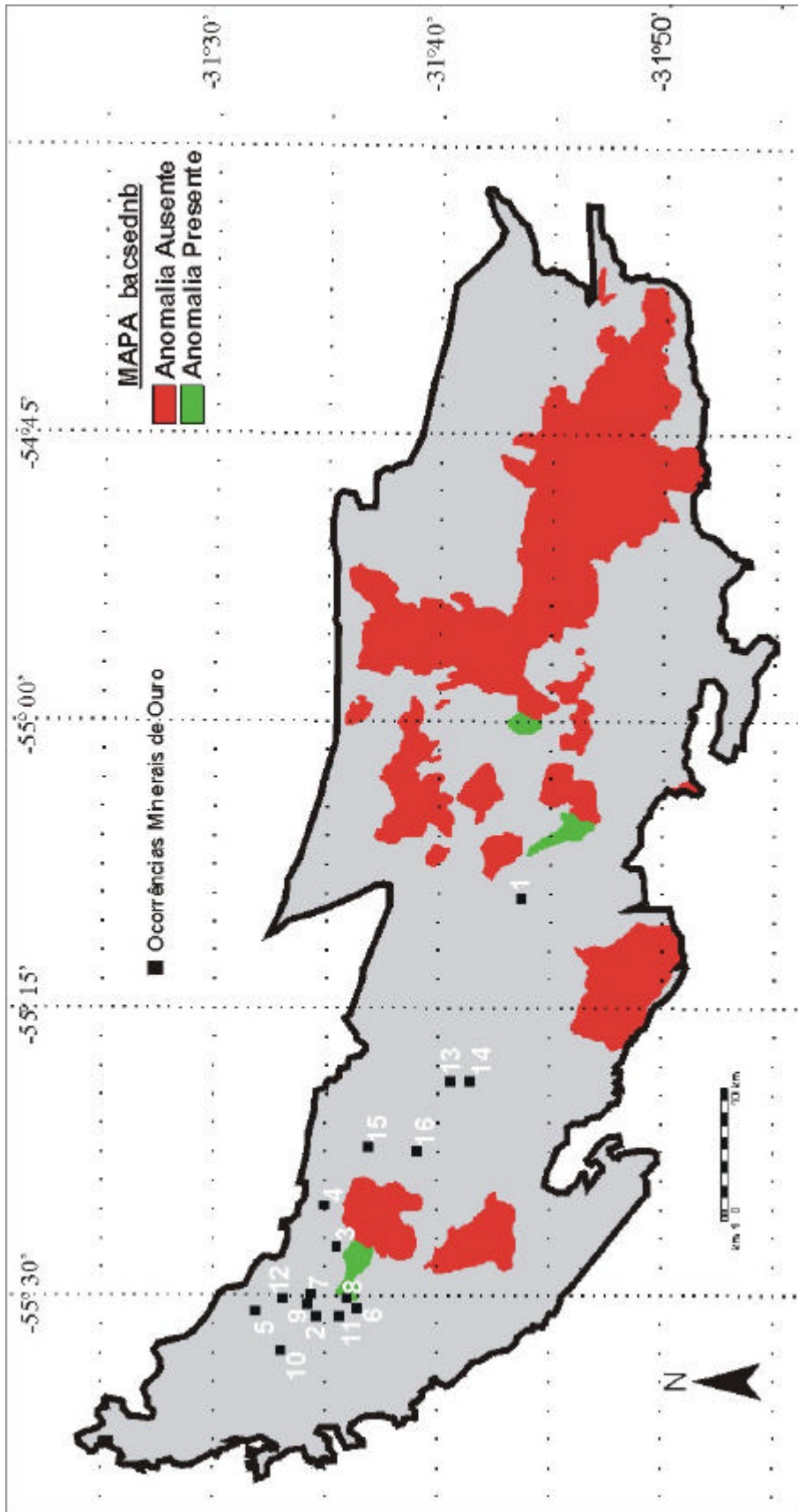


Figura 5.9 – Mapa **bacednb**. Resultado da reclassificação do mapa **bacedbn** para o padrão binário. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

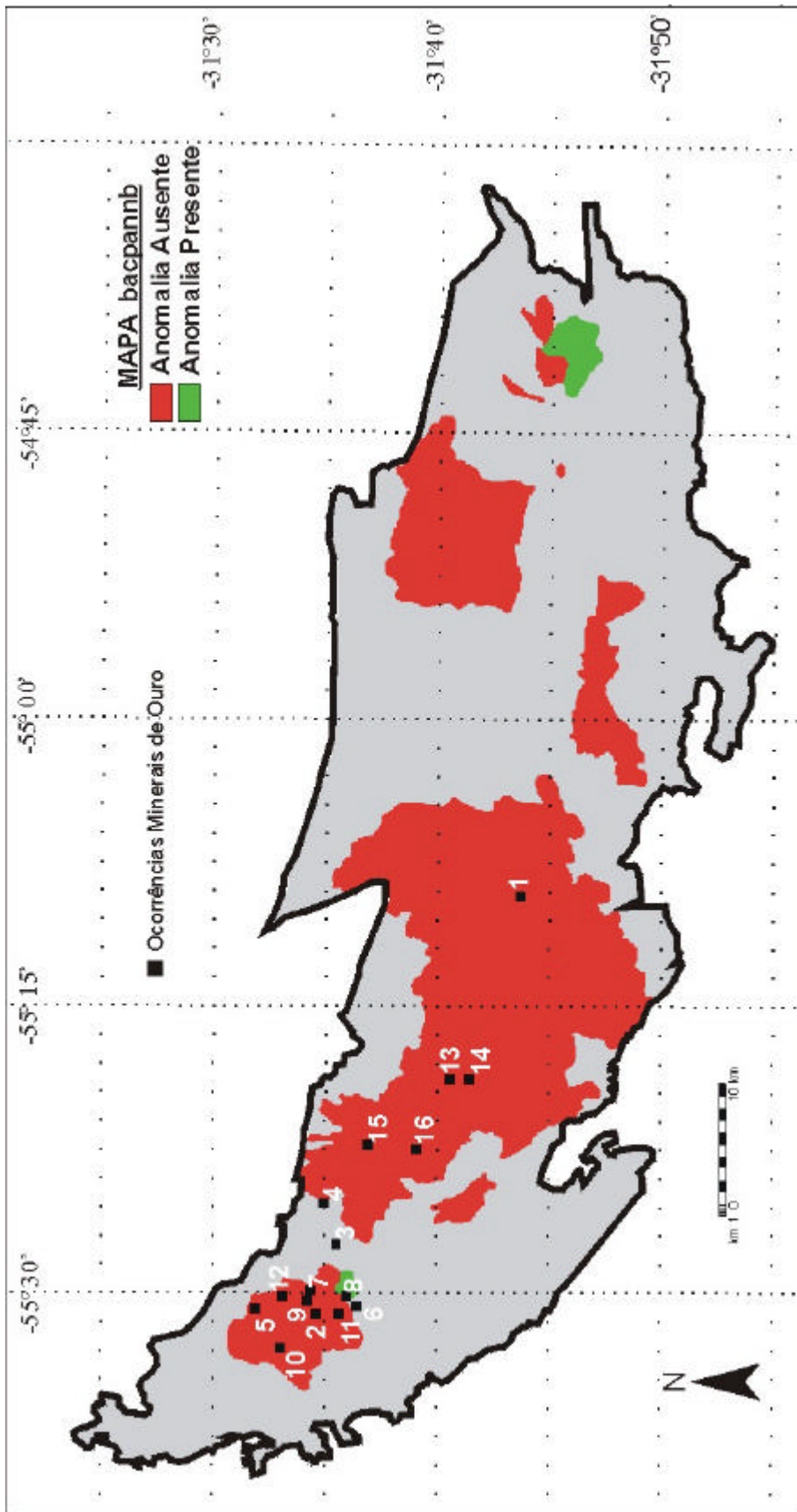


Figura 5.10 – Mapa bacpannb. Resultado da reclassificação do mapa bacpannb para o padrão binário. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

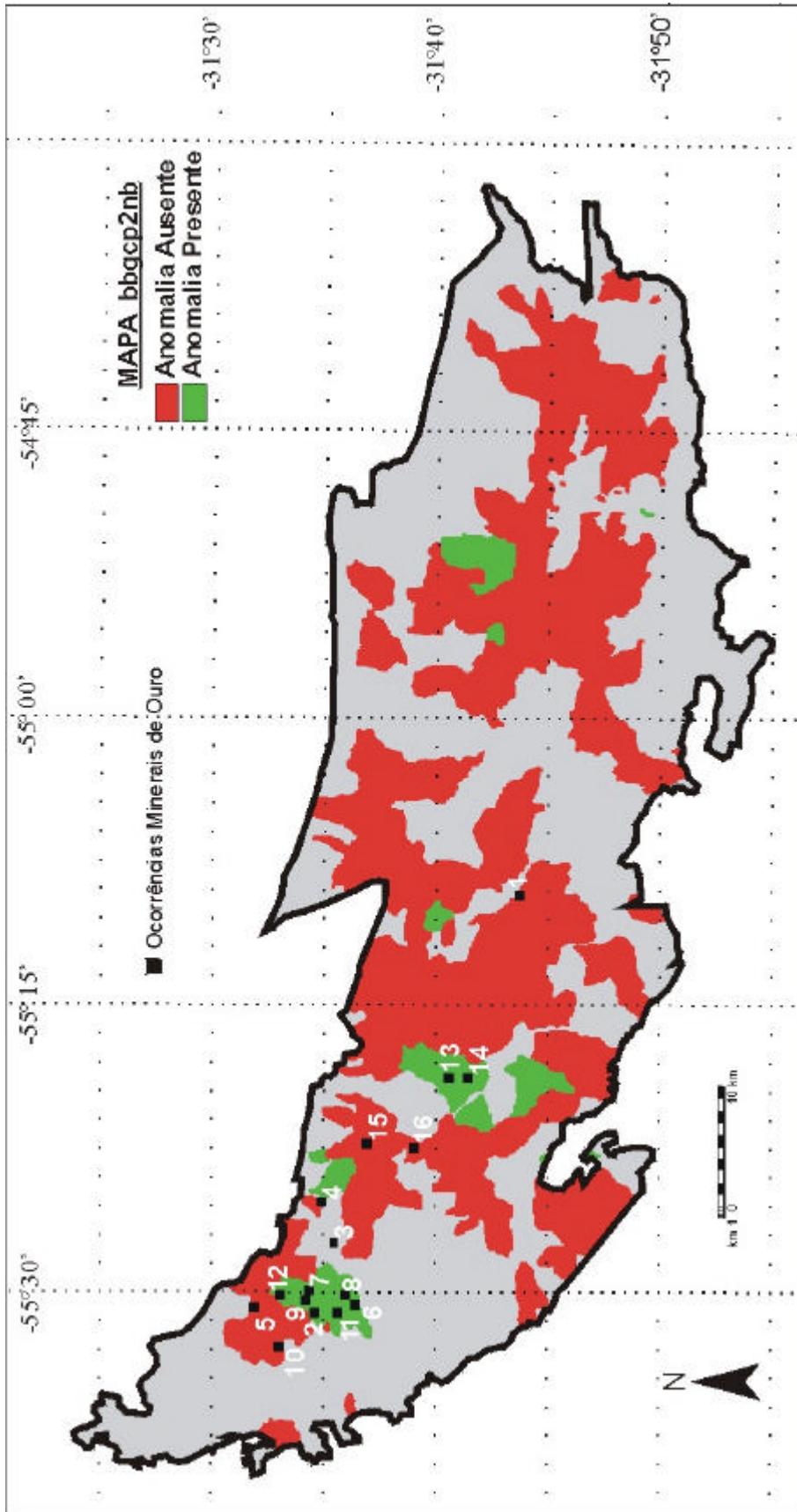


Figura 5.11 – Mapa **bbgcp2nb**. Resultado da reclassificação do mapa **bbgcp2n** para o padrão binário. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

Tabela 5.16 - Pesos de Evidência não cumulativos calculados para o mapa **fatfn**. Classe selecionada como limiar encontra-se em negrito. Símbolos, idem tabela 5.2.

Classe	Intervalos	Area (km ²)	Ocorrências	w ⁺	S(w ⁺)	w ⁻	S(w ⁻)	c	S(c)	student
1	1.1971 – 25.6647	320.57	1	-0.6783	1.0016	0.0669	0.2590	-0.7452	1.0345	-0.7203
2	25.6647 – 32.4612	289.27	2	0.1214	0.7096	-0.0162	0.2681	0.1376	0.7585	0.1814
3	32.4616 – 41.9764	372.01	0	Zero ocorrências						
4	41.9764 – 59.6474	481.74	3	0.0161	0.5792	-0.0037	0.2782	0.0198	0.6425	0.0308
5	59.6474 – 70.5220	164.49	4	1.3967	0.5062	-0.2238	0.2894	1.6206	0.5831	2.7794
6	> 70.5220	188.34	6	1.6746	0.4149	-0.3971	0.3169	2.0717	0.5221	3.9682
7	Sem dados	794.37	0	Sem dados						

Tabela 5.17 - Pesos de Evidência não cumulativos recalculados referentes a classe 2 do mapa binário **kdnb**. Símbolos, idem tabela 5.2.

Classe 2	Intervalos (ppb)	Area (km ²)	Ocorrências	w ⁺	S(w ⁺)	w ⁻	S(w ⁻)	c	S(c)	student
kdnb	2.9106 +	99.54	4	1.9154	0.5104	-0.2502	0.2894	2.1656	0.5867	3.6915

Para a execução dos testes de independência condicional, foi usado o programa Excel (Microsoft Corp., 1997), que permite a produção de planilhas de cálculos. Os testes foram feitos com base nos resultados de uma operação executada no programa SPANS-GIS[#], chamada *unique conditions*. Essa operação gera um mapa e uma tabela de atributos associada tipo *unique conditions*, os quais fornecem todas as combinações possíveis entre as classes de todas as evidências usadas na operação. A tabela *unique conditions* fornece, então, as classes do mapa *unique conditions* organizadas em ordem descendente de área e ascendente do número de classes, além da combinação das classes dos mapas originais a que cada uma corresponde.

O cálculo das planilhas foi desenvolvido na forma de tabelas de contingência de independência condicional, de maneira a gerar valores respeitando o limite de $\chi^2_{.98,1} = 5.4$. Os testes foram feitos sem correção de Yates e com correção de Yates (Walker & Lev, 1953); nesse último caso, os valores limites diminuem para $\chi^2_{.98,1} = 3.24$.

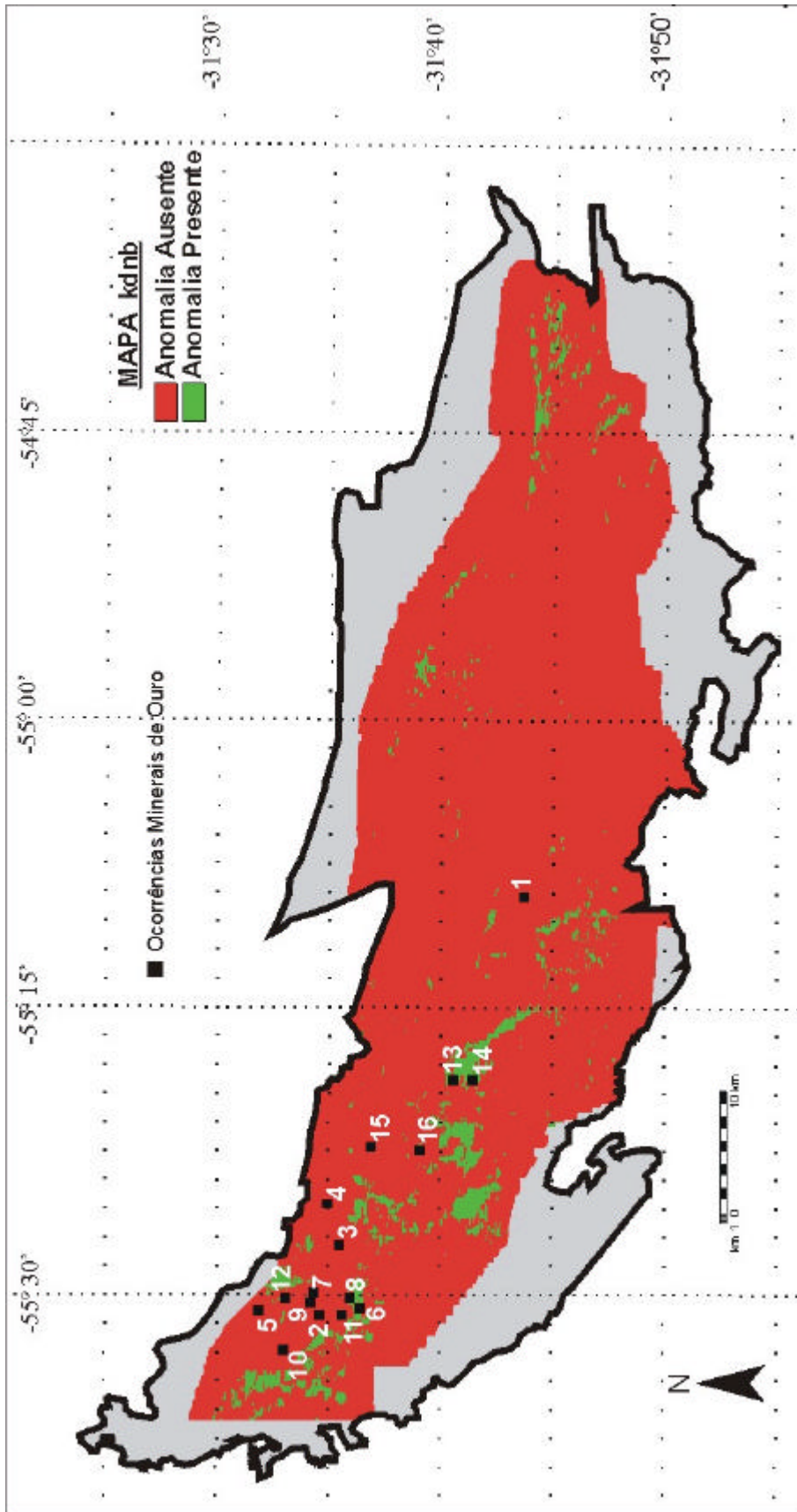


Figura 5.12 – Mapa **kdnb**. Resultado da reclassificação do mapa **kdn** para o padrão binário. Ocorrências mineraiis numeradas de acordo com mapa de ocorrências mineraiis (Fig. 4.5).

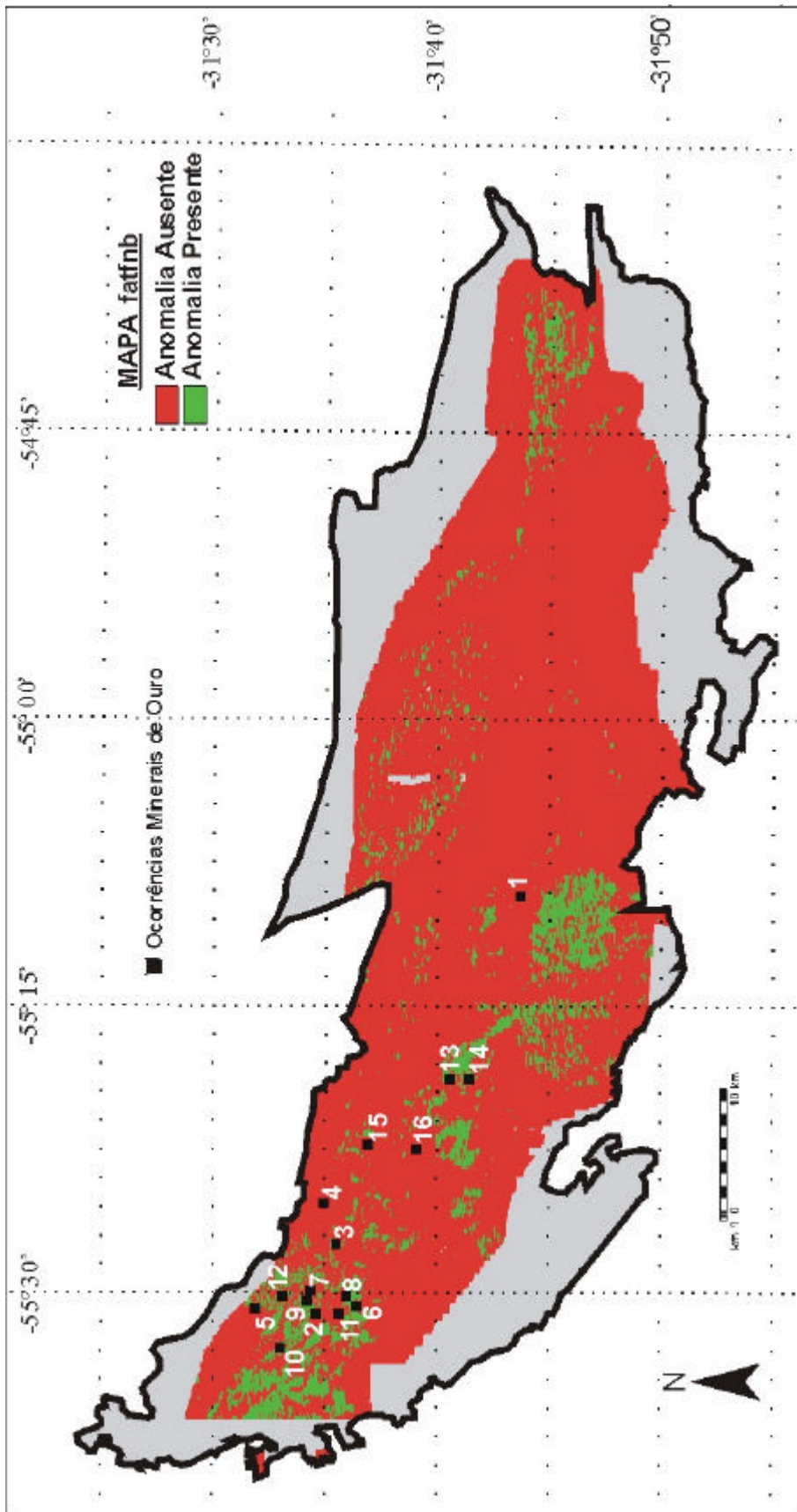


Figura 5.13 – Mapa fatfñb. Resultado da reclassificação do mapa fatfñ para o padrão binário. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

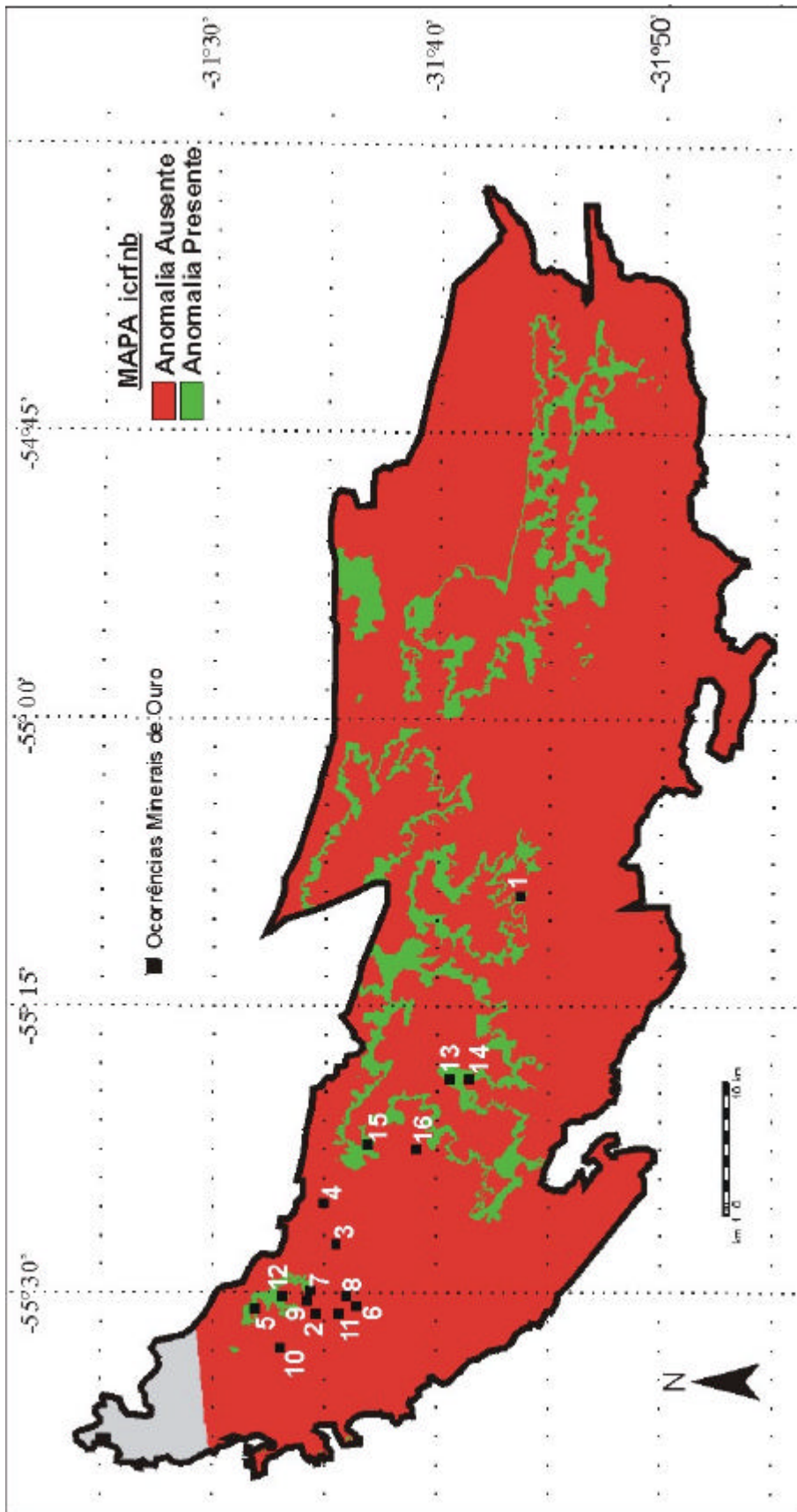


Figura 5.14 – Mapa **icrfnb**. Resultado da reclassificação do mapa **icrfnb** para o padrão binário. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

A partir da observação dos resultados do teste de Independência Condicional (**IC**) para todas as 13 evidências apresentadas nas tabelas 5.19 e 5.20, constatou-se a existência de vários problemas de dependência condicional. Esse resultado já era esperado, devido principalmente ao alto nível de associação existente entre as evidências produzidas em um mesmo Fator. A partir disso, resolveu-se combinar as evidências de cada fator, agora na forma binária, de maneira a gerar apenas uma evidência binária para representar cada fator usado no modelamento. A exceção foi o Fator LANDSAT, em que foram gerados dois mapas, representantes das duas metodologias de processamento, na tentativa de aumentar a quantidade de informação passível de integração.

Tabela 5.18 - Pesos de Evidência não cumulativos calculados para o mapa **icrfn**. A classe selecionada como limiar encontra-se em negrito. Símbolos, idem tabela 5.2.

Classe	Intervalos (m)	Área (km ²)	Ocorrências	w ⁺	S(w ⁺)	w ⁻	S(w ⁻)	c	S(c)	student
1	102.256 – 121.228	217.03	0				Zero ocorrências			
2	121.288 – 140.319	262.70	1	-0.4785	1.0019	0.0418	0.2590	-0.5203	1.0349	-0.5028
3	140.319 – 159.351	195.61	0				Zero ocorrências			
4	159.351 – 178.383	502.66	3	-0.0266	0.5791	0.0063	0.2782	-0.0329	0.6424	-0.0512
5	178.383 – 197.414	458.71	4	0.3553	0.5022	-0.0950	0.2895	0.4503	0.5797	0.7769
6	197.414 – 216.446	345.84	2	-0.0584	0.7092	0.0086	0.2681	-0.0670	0.7581	-0.0883
7	216.446 – 235.478	261.01	5	1.1529	0.4516	-0.2708	0.3022	1.4237	0.5434	2.6202
8	235.478 – 254.510	145.85	1	0.1130	1.0034	-0.0071	0.2590	0.1201	1.0363	0.1159
9	254.510 – 273.541	114.42	0				Zero ocorrências			
10	> 273.541	44.16	0				Zero ocorrências			
11	Sem dados	62.79	1				Sem dados			

Assim, as evidências **acp1arb**, **acp2arb** e **acp3arb** do Fator LANDSAT foram combinadas com a utilização da função de modelamento do SPANS-GIS[#], denominada Sobreposição Multicritério. Essa função permite a combinação das evidências de forma ponderada, por meio de uma matriz de indexação construída a partir da seleção dos mapas a serem combinados e editada, no formato ASCII, de acordo com a atribuição dos pesos desejados. Os pesos são dados para cada evidência e também para cada classe das evidências.

Nesse modelamento, foram atribuídos pesos iguais para as três evidências combinadas. O mapa resultante, denominado **acpbr**, pode ser visualizado na figura 5.15.

Tabela 5.19 – Teste de Independência Condicional para as evidências selecionadas. Valores acima do limite de $\chi^2_{.98,1} = 5.4$, indicativo da presença de problemas de dependência condicional, encontram-se em negrito.

	acp1a rb	acp2a rb	acp3a rb	alvest 6b	bacpa nnb	bacse dnb	bbgcp 2nb	fatfnb	icrfnb	kdnb	l1bufn b	rgb3a rb	rgb4a rb
acp1arb		1.07	2.35	0.48	0.67	14.06	1.06	2.35	2.35	0.25	0.15	1.78	2.35
acp2arb			2.62	0.29	1.71	14.06	0.68	0.29	0.29	0.41	2.29	4.27	2.62
acp3arb				0.26	1.16	14.06	0.63	0.26	8.04	0.01	0.37	1.57	16.00
alvest6b					1.16	14.06	1.94	3.31	0.26	1.68	0.37	0.02	0.26
bacpannb						14.06	1.71	3.56	1.40	7.90	0.80	1.40	1.16
bacsednb							14.06	14.06	14.06	14.06	14.06	14.06	14.06
bbgcp2nb								2.35	0.63	3.56	0.07	0.21	0.63
fatfnb									2.80	8.12	1.04	0.02	0.26
icrfnb										0.01	0.37	1.57	8.04
kdnb											0.53	0.03	0.01
l1bufnb												1.37	0.37
rgb3arb													1.57
rgb4arb													

Tabela 5.20 – Teste de Independência Condicional com correção de Yates para as evidências selecionadas. Valores acima do limite de $\chi^2_{.98,1} = 3.24$, indicativo da presença de problemas de dependência condicional, encontram-se em negrito.

	acp1a rb	acp2a rb	acp3a rb	alvest 6b	bacpa nnb	bacse dnb	bbgcp 2nb	fatfnb	icrfnb	kdnb	l1bufn b	rgb3a rb	rgb4a rb
acp1arb		0.00	0.17	0.17	3.48	3.06	0.07	0.17	0.17	0.68	1.37	0.07	0.17
acp2arb			1.16	0.00	0.28	3.06	0.13	0.00	0.00	0.00	0.57	2.40	1.16
acp3arb				0.01	0.42	3.06	0.10	0.01	5.08	0.37	0.04	0.48	11.68
alvest6b					0.42	3.06	0.65	1.53	0.01	0.37	0.04	0.17	0.01
bacpannb						3.06	0.28	0.79	0.30	1.79	1.37	0.30	0.42
bacsednb							3.06	3.06	3.06	3.06	3.06	3.06	3.06
bbgcp2nb								0.96	0.10	1.51	0.42	0.10	0.10
fatfnb									1.19	4.66	0.04	0.17	0.01
icrfnb										0.37	0.04	0.48	5.08
kdnb											0.06	0.25	0.37
l1bufnb												0.15	0.04
rgb3arb													0.48
rgb4arb													

As evidências **rgb3arb** e **rgb4arb** do mesmo Fator LANDSAT foram combinadas com a utilização de função de modelamento do SPANS-GIS[#] (sobreposição por matriz). Esse modelamento permite a combinação das evidências (no máximo duas por matriz) de forma

ponderada, por meio de uma matriz de indexação construída a partir da seleção dos dois mapas a serem combinados e editada, no formato ASCII, de acordo com a atribuição dos pesos desejados. A atribuição dos pesos é feita para cada intersecção linha-coluna representante das evidências selecionadas. Nessa operação, a atribuição dos pesos foi elaborada de maneira a determinar a preponderância das classes da evidência **rgb4arb**, com exceção da classe 0. Essa maior importância dada a evidência **rgb4arb** deveu-se ao seu maior valor de contraste em relação a outra evidência. A matriz usada nessa operação pode ser visualizada na tabela 5.21, enquanto o mapa evidência **rgbb** pode ser visualizado na figura 5.16.

As evidências do Fator Geoquímico também foram combinadas com modelamento de sobreposição por matriz da seguinte maneira:

- 1) primeiramente, foram combinadas as evidências **bacpannb** e **bacednb** com um modelamento booleano tipo **OU** (União Lógica). A tabela 5.22 apresenta a matriz de sobreposição usada, enquanto a figura 5.17 mostra o mapa evidência **geoqa** resultante;
- 2) após, o mapa evidência **geoqa** resultante da operação anterior foi combinado com a evidência **bbgcp2nb** em um modelamento booleano tipo **OU**, gerando o mapa evidência **geoqb**. A tabela 5.23 apresenta a matriz de sobreposição usada, enquanto a figura 5.18 mostra o mapa evidência **geoqb** resultante;

Essa combinação foi executada com o operador booleano **OU** (considerado otimista), porque a presença de qualquer uma das evidências desse fator é considerada significativa para a localização de áreas potenciais.

Tabela 5.21– Matriz de sobreposição usada para gerar o mapa **rgbb**.

rgb4arb					
:	-----				
:			/ 1 /	2	
:	-----				
:		0	1	2	
:	-----				
rgb3arb					
:	- 0:	0	1	2	
:	1 - 1:	1	1	2	
:	2 - 2:	2	1	2	

Tabela 5.22 – Matriz de sobreposição usada para gerar o mapa **geoqa**.

		bacsednb		

		/ 1 / 2		

		0	1	2

bacpannb				
:	- 0:	0	1	2
:	:1 - 1:	1	1	2
:	:2 - 2:	2	2	2

Tabela 5.23 – Matriz de sobreposição usada para gerar o mapa **geoqb**.

		geoqa		

		/ 1 / 2		

		0	1	2

bbgcp2nb				
:	- 0:	0	1	2
:	:1 - 1:	1	1	2
:	:2 - 2:	2	2	2

A combinação das evidências do Fator Geofísico foi executada por meio do modelamento tipo sobreposição por matriz com operação booleana tipo **E** (intersecção lógica). Nesta operação, as evidências **kdnb** e **fatnb** foram combinadas para gerar o mapa evidência resultante denominado **geofb1**. Esse operador, mais pessimista, foi utilizado porque se considerou necessária a ocorrência das duas evidências juntas para a indicação de alvos potenciais. Isso se deveu principalmente à relativa menor confiança apresentada pelas razões **Kd** e **FatF** no sentido de detectar áreas hidrotermais em toda a **ICR**. Esse fato é decorrente da constatação da existência de duas condições geológico-estruturais diferentes na **ICR**, como já citado anteriormente.

A tabela 5.24 mostra a matriz usada na combinação das evidências do Fator Geofísico e a figura 5.19 apresenta o mapa evidência **geofb1** resultante.

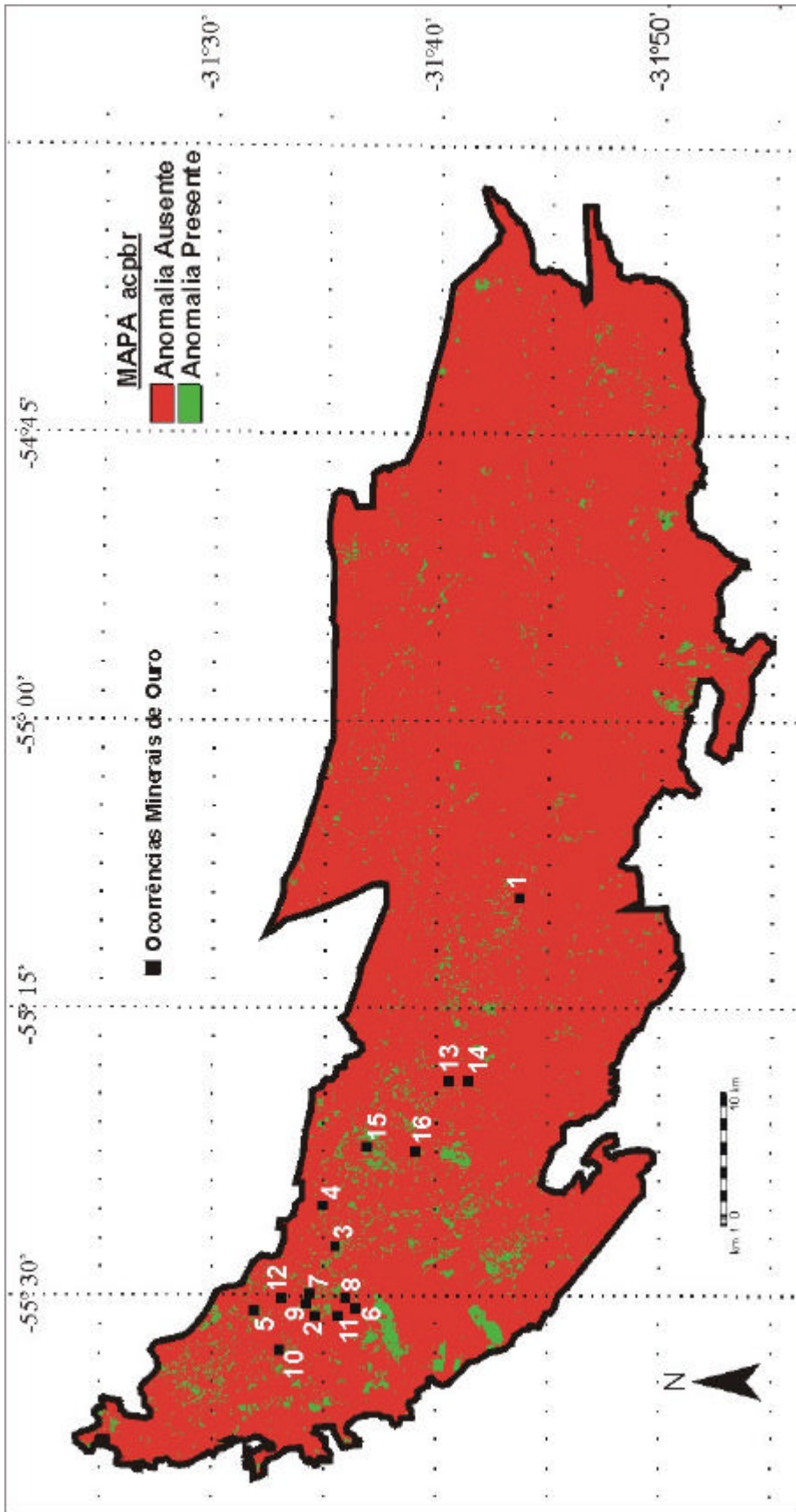


Figura 5.15 – Mapa acpbr. Resultado da combinação dos mapas acplarb, acp2arb, acp3arb. ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

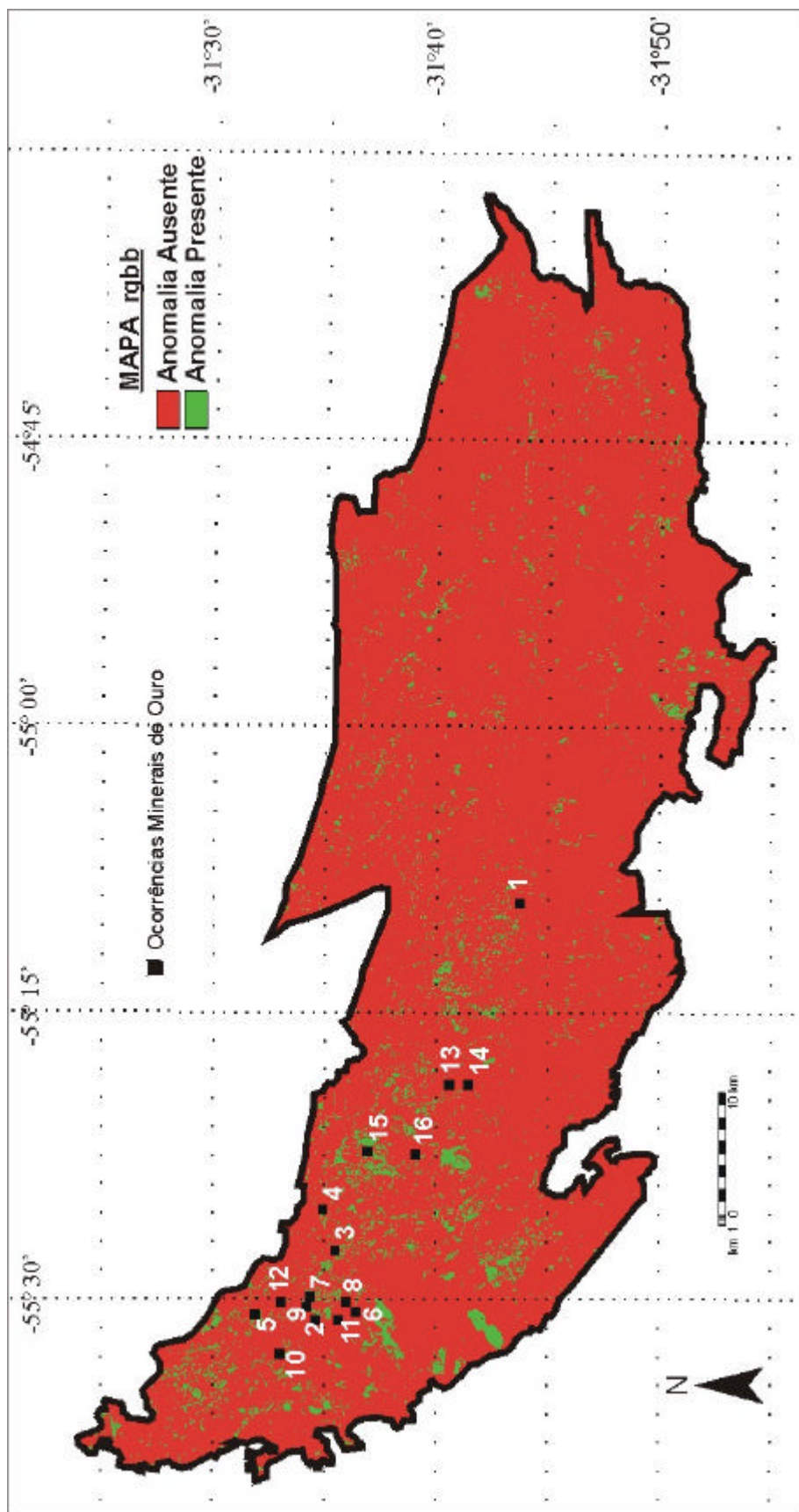


Figura 5.16 – Mapa **rgb3arb**. Resultado da combinação dos mapas **rgb3arb**, **rgb4arb**. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

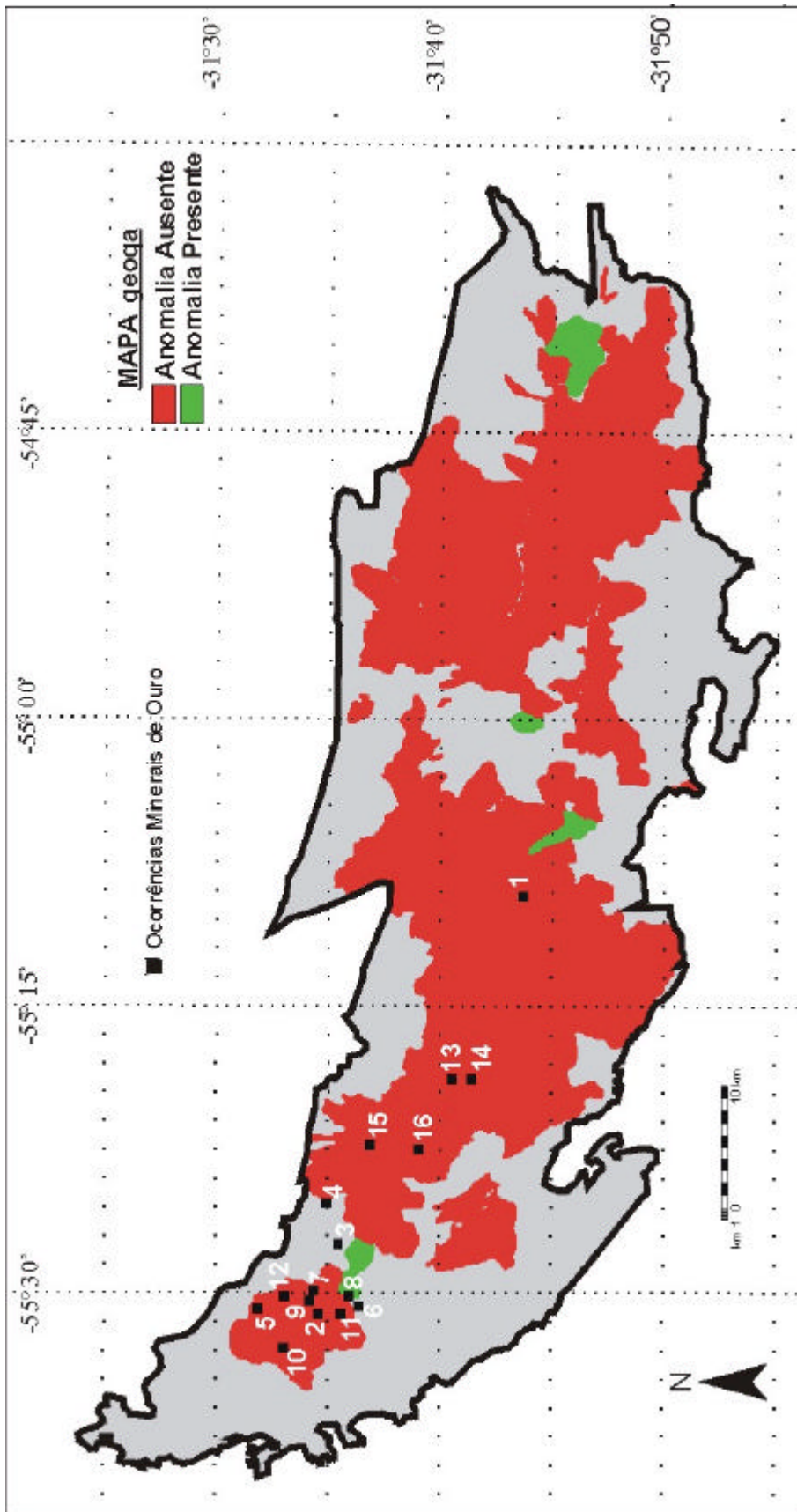


Figura 5.17 – Mapa geoga. Resultado da combinação dos mapas **bacpannb** e **bacsednb**. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

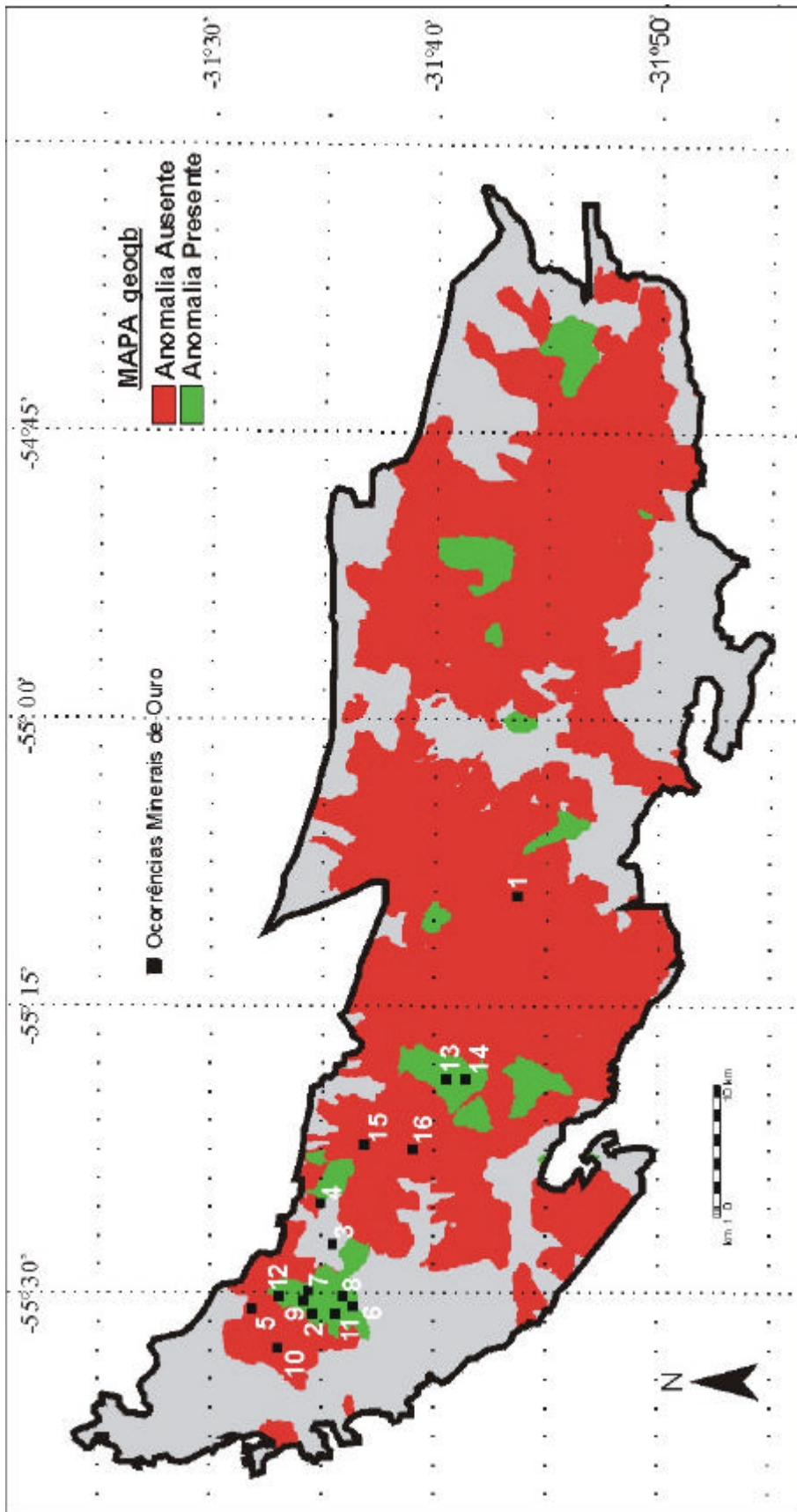


Figura 5.18 – Mapa **geoqb**. Resultado da combinação dos mapas **geoqa** e **bbgcp2nb**. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

Tabela 5.24 – Matriz de sobreposição usada para gerar o mapa **geofb1**.

		kdnb			

		/ 1 / 2			

		0	1	2	

fatfnb	:	0:	0	0	0
	:1	1:	0	1	1
	:2	2:	0	1	2

As evidências do Fator Estrutural foram combinadas da mesma maneira que as evidências do Fator Geofísico. A operação booleana tipo **E** foi usada, principalmente com a intenção de diminuir a área de abrangência dessas duas evidências relativamente extensas; a coincidência de padrões favoráveis em grandes áreas tenderia a resultar em um valor muito alto no cálculo do teste de **IC** geral, o que levaria o teste a indicar problemas de independência condicional. A tabela 5.25 mostra a matriz usada na combinação das evidências **l1bufnb** e **alvest6b** e a figura 5.20 apresenta o mapa evidência resultante **estrnb**.

Tabela 5.25 – Matriz de sobreposição usada para gerar o mapa **estrnb**.

		l1bufnb			

		/ 1 / 2			

		0	1	2	

alvest6b	:	0:	0	0	0
	:1	1:	0	1	1
	:2	2:	0	1	2

O Fator Altimetria, pelo fato de possuir somente o mapa **icrfnb**, manteve-se inalterado.

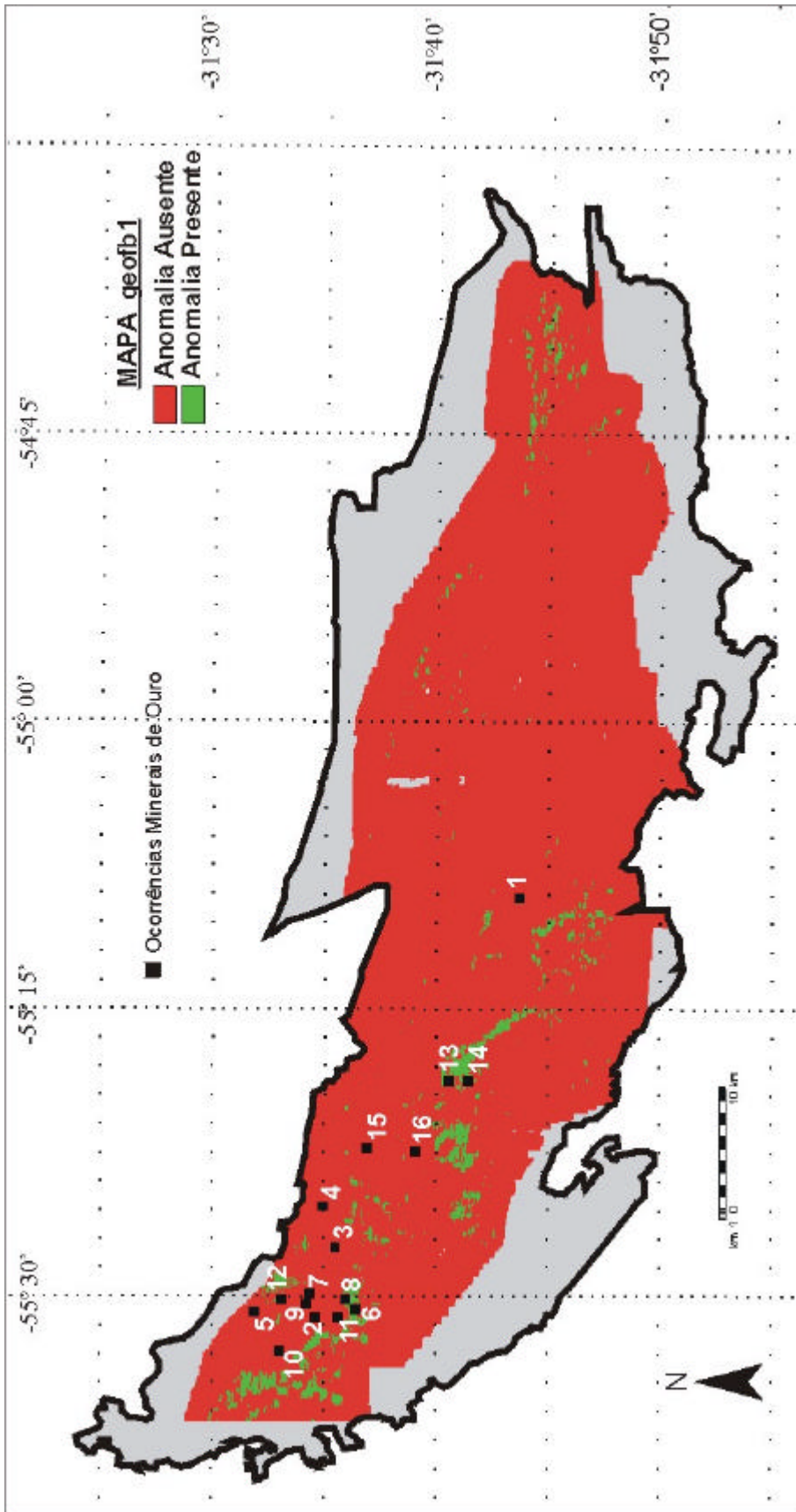


Figura 5.19 – Mapa geofb1. Resultado da combinação dos mapas kdnb e fatfnb. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

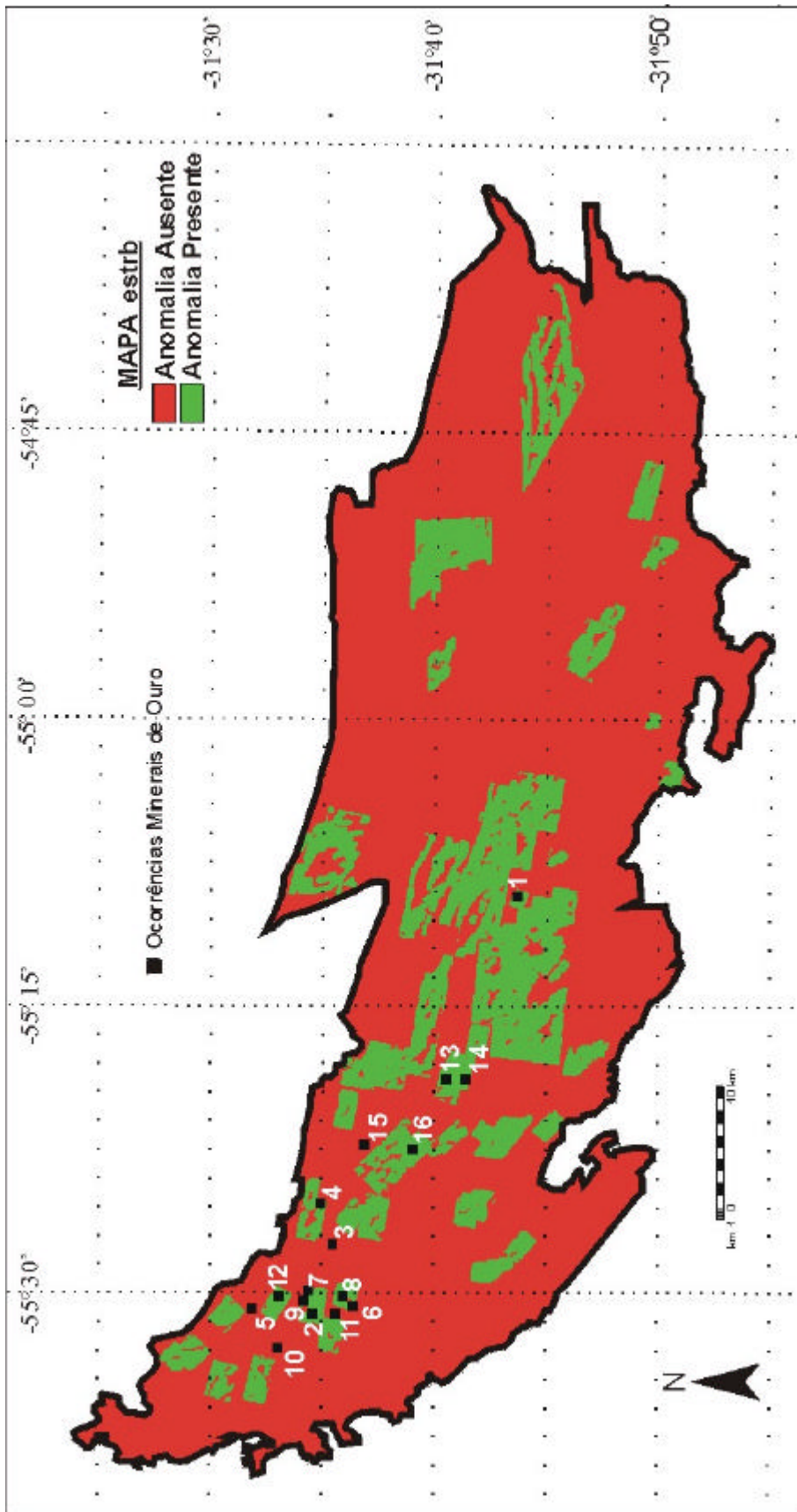


Figura 5.20 – Mapa estrb. Resultado da combinação dos mapas **11bufnb** e **alvest6b**. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

Após geradas as novas evidências, foi necessária a execução de uma nova bateria de testes de independência condicional. Para isso, foi executada uma nova operação tipo *unique conditions* com os mapas evidência **acpbr**, **rgbb**, **geoqb**, **geofb1**, **estrb** e **icrfnb**, que representam, respectivamente, os Fatores LANDSAT (os dois primeiros mapas), Geoquímico, Geofísico, Estrutural e Altimetria. A tabela 5.26 mostra os pesos e os contrastes calculados para essas evidências binárias. Esses pesos foram calculados a partir da classe 2 (classe favorável) das evidências. Notar que a evidência **icrfnb** permaneceu com os mesmos pesos e contraste já calculados anteriormente e apresentados na tabela 5.18 referente à classe escolhida como limiar.

O resultado do cálculo das planilhas, desenvolvido a partir das tabelas de contingência de independência condicional, pode ser visualizado nas tabelas 5.27 e 5.28. A partir da observação dessas tabelas, nota-se que, mesmo com a combinação das evidências por fator, no sentido de diminuir os problemas de dependência condicional, eles ainda permaneceram; é correto que tais problemas de dependência condicional foram em menor extensão e estão presentes exclusivamente no mapa evidência **rgbb**. Com isso, optou-se pela eliminação dessa evidência e pela execução de novos testes de IC, agora apenas com as evidências **acpbr**, **geoqb**, **geofb1**, **estrb** e **icrfnb**.

Tabela 5.26 – Pesos calculados para as evidências binárias selecionadas para a integração pelo método Pesos de Evidência.

Evidências	w^+	$S(w^+)$	w^-	$S(w^-)$	c	$S(c)$	student
acpbr	1.6278	0.5078	-0.2373	0.2894	1.8651	0.5845	3.1912
rgbb	1.6703	0.4545	-0.3141	0.3022	1.9844	0.5458	3.6359
geoqb	2.2730	0.3640	-0.6403	0.3541	2.9132	0.5078	5.7367
geofb1	2.0573	0.5911	-0.1834	0.2781	2.2406	0.6532	3.4300
estrb	1.3042	0.3198	-0.7950	0.4088	2.0991	0.5190	4.0443
icrfnb	1.1529	0.4516	-0.2708	0.3022	1.4237	0.5434	2.6202

Tabela 5.27 – Teste de Independência Condicional para as evidências selecionadas. Valores acima do limite de $\chi^2_{.98,1} = 5.4$, indicativo da presença de problemas de dependência condicional, encontram-se em negrito.

	acpbr	estrb	geofb	geoqb	icrfnb	rgbb
acpbr		0.36	0.14	0.09	4.75	11.73
estrb			2.22	0.63	0.02	0.02
geofb				3.56	0.01	0.01
geoqb					0.63	1.85
icrfnb						8.04
rgbb						

Tabela 5.28 – Teste de Independência Condicional com correção de Yates para as evidências selecionadas. Valores acima do limite de $\chi^2_{.98,1} = 3.24$, indicativo da presença de problemas de dependência condicional, encontram-se em negrito.

	acpbr	estrb	geofb	geoqb	icrfnb	rgbb
acpbr		0.00	0.14	0.18	2.42	7.85
estrb			0.68	0.10	0.17	0.17
geofb				1.51	0.37	0.37
geoqb					0.10	0.65
icrfnb						5.08
rgbb						

Os resultados desses novos testes de IC, que seguiram a mesma metodologia anterior, podem ser visualizados nas tabelas 5.29 e 5.30. Essas tabelas mostram que os valores de $\chi^2_{.98,1}$ para os testes de IC das cinco evidências selecionadas finalmente posicionaram-se abaixo dos limites especificados de 5.4 (sem correção de Yates) e de 3.24 (com correção de Yates), indicando não haver mais problemas de violação de IC.

Tabela 5.29 – Teste de Independência Condicional para as evidências selecionadas. Valores acima do limite de $\chi^2_{.98,1} = 5.4$ são indicativos da presença de problemas de dependência condicional.

	acpbr	estrb	geofb1	geoqb	icrfnb
Acpbr		0.36	0.14	0.09	4.75
Estrb			2.22	0.63	0.02
geofb1				3.56	0.01
Geoqb					0.63
Icfnb					

Tabela 5.30 – Teste de Independência Condicional com correção de Yates para as evidências selecionadas. Valores acima do limite de $\chi^2_{.98,1} = 3.24$ são indicativos da presença de problemas de dependência condicional.

	acpbr	estrb	geofb1	geoqb	icrfnb
acpbr		0.00	0.14	0.18	2.42
estrb			0.68	0.10	0.17
geofb1				1.51	0.37
geoqb					0.10
icrfnb					

Por fim, seguindo sugestão de Bonham-Carter (1994a), foi executado o denominado Teste Geral. Esse teste, já detalhado no capítulo 2, baseia-se em uma das premissas da metodologia Pesos de Evidência, que assume a probabilidade prévia (*a priori*) como a média da densidade de depósitos conhecidos e obtém, como resultado, o número de depósitos

previstos para a região. Segundo Bonham-Carter (1994a), esse número de depósitos previstos não pode ser muito superior ao número de depósitos observados, ou conhecidos, sob pena de haver a possibilidade de alguma violação de IC.

O resultado desse Teste Geral para as evidências selecionadas para a integração resultou no número aproximado de 30 (trinta) depósitos previstos, quase o dobro do número de depósitos observados (16 depósitos). Esse fato indicaria a possibilidade de ainda haver algum problema de violação de IC. Contudo, esse resultado já era esperado, devido à provável existência de informações similares derivadas das evidências envolvidas, que resultam do alto potencial de favorabilidade mineral apresentado por elas. Na verdade, a dependência e a similaridade das informações são uma constatação normal e usual quando se trata da existência de boas e consistentes evidências para exploração mineral. Assim, a não constatação de violações de IC nos testes par a par permite considerar que, apesar do resultado do Teste Geral, a presença de alguma violação de IC não foi importante a ponto de gerar modificações significativas nos resultados.

Wright & Bonham-Carter (1996), em seu trabalho de mapeamento de favorabilidade para depósitos de sulfeto maciço em vulcânicas (VMS) na área Chisel Lake-Anderson Lake (Canadá), também relataram problema similar com o Teste Geral de IC; o teste geral resultou em um número de depósitos previstos maior do que o dobro do número de depósitos observados. No caso relatado, Wright & Bonham-Carter (1996) optaram por desconsiderar esse resultado. Considerações adicionais a esse respeito podem ser encontradas no capítulo 6 dessa tese.

A partir do exposto, foram então selecionadas as evidências **acpbr**, **geoqb**, **geofb1**, **estrb** e **icrfnb** para integração pelo método. A figura 5.21 mostra o fluxograma geral da integração das evidências pelo método dos Pesos de Evidência, de maneira a permitir uma visualização geral da metodologia utilizada.

5.1.3 Integração dos Mapas Evidência e geração do Mapa de Favorabilidade Mineral

O mapa de favorabilidade final foi produzido a partir das cinco evidências selecionadas (**acpbr**, **geoqb**, **geofb1**, **estrb** e **icrfnb**). Para isso, foi gerado um novo mapa *unique conditions* (UC) e respectiva tabela de atributos no SPANS-GIS[#], utilizando-se as

evidências selecionadas como mapas de entrada. Essa operação resultou em um mapa **UC** e uma tabela com 75 classes, que representam todas as combinações possíveis entre as classes dos cinco mapas iniciais.

A tabela **UC** com 75 classes resultantes foi exportada para o programa Excel na forma de uma planilha de dados. A partir dessa planilha, foram então calculadas as probabilidades *a posteriori* para cada classe **UC**; essas probabilidades foram calculadas a partir dos pesos W^+ e W^- previamente definidos para os cinco mapas evidência selecionados (ver Tabela 5.26, exceto os valores relativos ao mapa **rgbb** descartado). Os mapas resultantes tiveram o peso W^+ atribuído para a classe 2 (classe potencialmente favorável) e o peso W^- atribuído para a classe 1 (classe potencialmente desfavorável). Os mapas **geoqb**, **geofb1** e **icrfnb**, que possuem uma terceira classe representativa das áreas com ausência de dados, tiveram atribuídos o peso 0 (zero) para essa classe. Dessa maneira, foi possível estimar as incertezas decorrentes de áreas onde não há disponibilidade de dados. O cálculo das probabilidades *a posteriori* foi realizado no *software* Excel a partir da seguinte seqüência de equações:

$$\lnopst = \lnopri + W1 + W2 + W3 + W4 + W5 \quad (5.2)$$

onde **lnopst** é o logaritmo natural do **Odds a posteriori** (ver equação 2.23 no capítulo2), **lnopri** é o logaritmo natural dos **Odds a priori** e **W1** a **W5** são os pesos das evidências de cada mapa utilizado.

$$\text{oddspst} = \exp(\lnopst), \quad (5.3)$$

onde **oddspst** é o **Odds a posteriori** de cada classe UC. E

$$\text{probspst} = \text{oddspst} / (1 + \text{oddspst}), \quad (5.4)$$

onde **probpst** é a probabilidade *a posteriori* de cada classe UC.

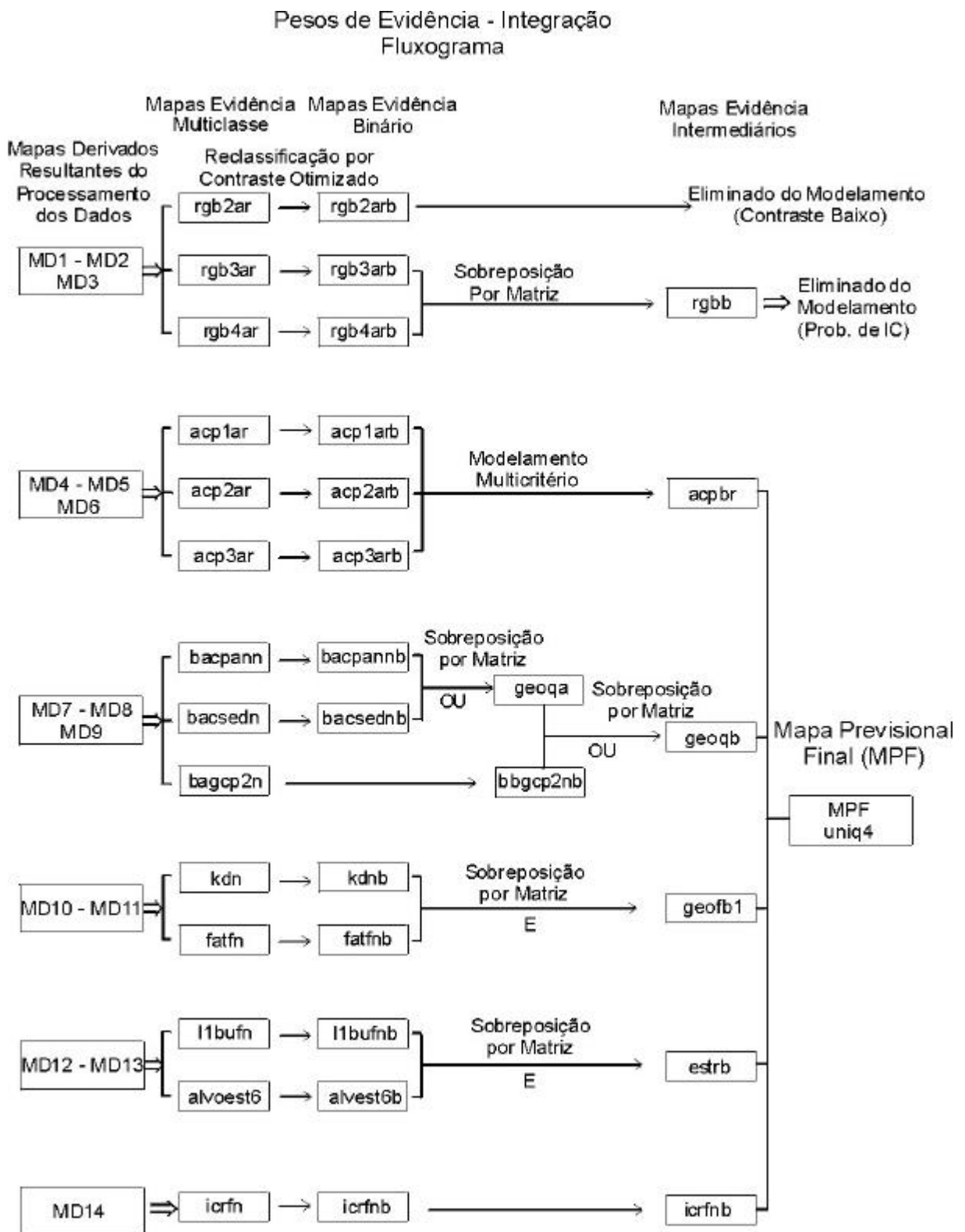


Figura 5.21 – Fluxograma da integração de dados desenvolvido segundo o Método Pesos de Evidência.

Após o cálculo da probabilidade *a posteriori* para cada uma das 75 classes UC, foi feita uma reclassificação dessas probabilidades em *decis*. Isso possibilitou a geração de uma tabela UC com apenas 10 (dez) classes. Esse esquema de classificação em *decis* foi então usado para a reclassificação do mapa UC diretamente no SPANS-GIS#. Esse procedimento permitiu, por fim, a geração do Mapa de Favorabilidade Final (**uniq4b**, Fig. 5.22), classificado com 10 classes de probabilidade *a posteriori* como resultado do modelamento por Pesos de Evidência. A tabela 5.31 mostra a análise de área feita para o mapa **uniq4b**. A análise dos resultados dessa metodologia é desenvolvida no item 5.4.

Tabela 5.31 – Análise de área do mapa **uniq4b** feita no SPANS-GIS.

SINGLE MAP ANALYSIS				
Map	:	uniq4b - uniq4b		
Window	:	** - Temporary Window		
Class	Legend	Area(%)	Cumm Area	Area(sq km)
1	< 0.0613	73.32	73.32	1914.29
2	0.0613 - 0.1259	12.83	86.15	334.98
3	0.1259 - 0.2015	6.71	92.86	175.10
4	0.2015 - 0.3427	2.46	95.32	64.25
5	0.3427 - 0.4920	0.78	96.10	20.31
6	0.4920 - 0.6098	1.28	97.38	33.49
7	0.6098 - 0.7672	1.79	99.17	46.71
8	0.7672 - 0.8764	0.20	99.37	5.24
9	0.8764 - 0.9487	0.36	99.73	9.30
10	> 0.9487	0.27	100.00	7.12
Total of 10 classes		100.00		2610.79

5.2 Método de Integração Lógica Difusa

O método da Lógica Difusa, cujos princípios teóricos foram discutidos no capítulo 2, procura combinar as evidências (PIs originais e/ou derivados) como membros do conjunto, ou hipótese “*área potencialmente favorável para conter ocorrências de ouro*”. Os valores de função-membro desse conjunto foram expressos de acordo com uma escala variável entre 0, para os padrões não pertencentes ao conjunto, e 1, para os padrões pertencentes inteiramente ao conjunto. Valores posicionados entre 0 e 1 refletem o grau de certeza de um determinado padrão pertencer ao conjunto e foram tratados em uma base relativa de acordo com os parâmetros metodológicos sugeridos por An *et al.* (1991) e Bonham-Carter (1994a).

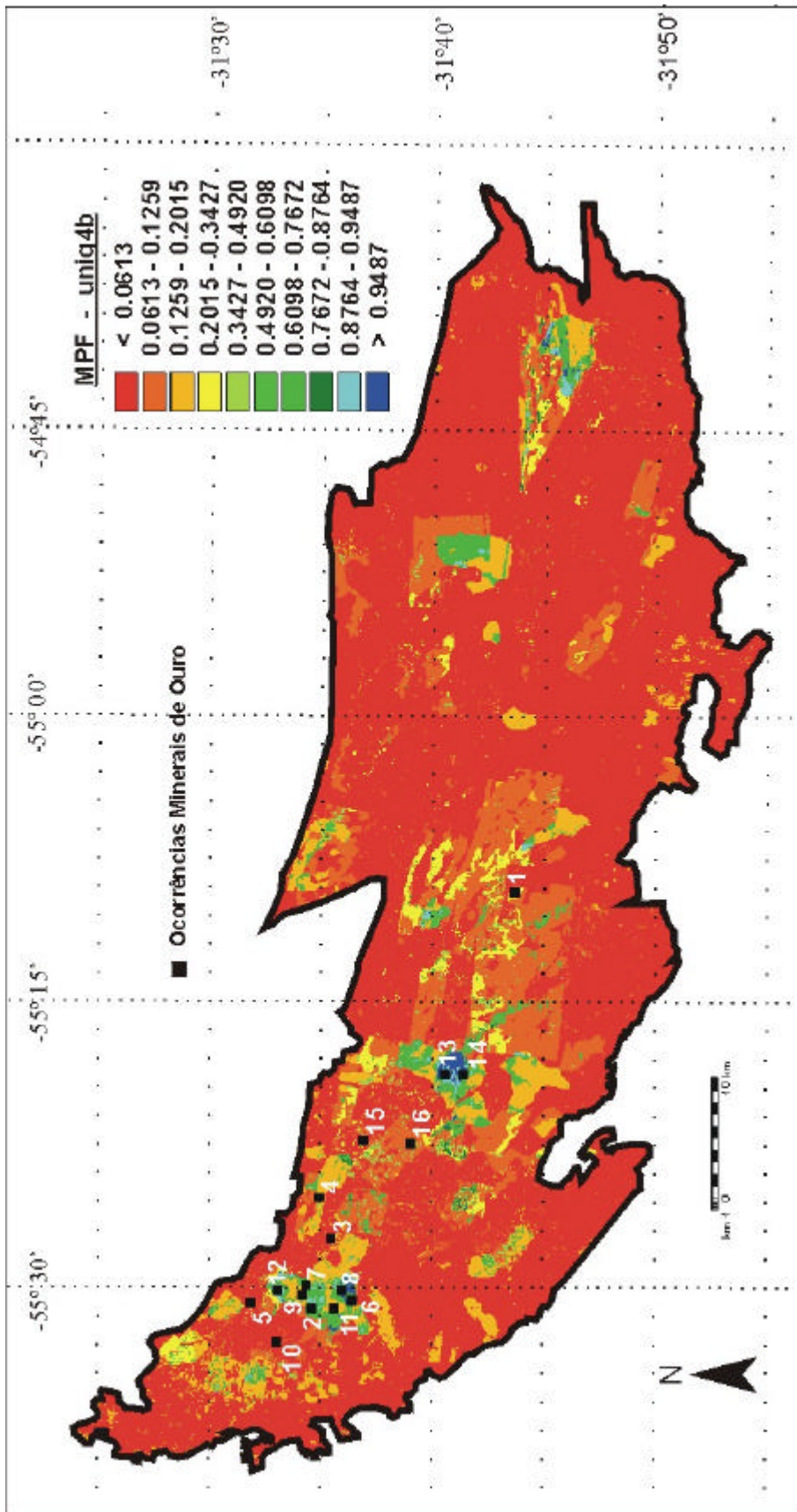


Figura 5.22 - Mapa previewal resultante da integração pela metodologia Pesos de Evidência. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

5.2.1 Seleção das evidências e atribuição de valores de função-membro Lógica Difusa

De acordo com o modelo de exploração definido para a área, foram escolhidos os seguintes mapas (**PIs**) derivados dos fatores de integração estabelecidos no modelo de exploração, agora denominados mapas evidência: **l1bufn**, **alvoest6**, **acp1ar**, **acp2ar**, **acp3ar**, **rgb2ar**, **rgb3ar**, **rgb4ar**, **bacsedn**, **bacpamn**, **bbgcp2n**, **kdn**, **fatfn**, **icrfn**.

Os valores de função-membro Lógica Difusa foram expressos na forma de tabelas de atributos, que correspondem aos mapas multiclasse evidência; assim, as tabelas relacionam as classes dos mapas a valores de função-membro do conjunto. A escolha dos valores de função-membro foi feita de maneira subjetiva, por meio de avaliações multicritério baseadas na experiência e no conhecimento das evidências e da região estudada, sempre de acordo com o modelo de depósitos (conceitual e de exploração) estabelecido para a região. Integrantes da equipe de exploração da empresa Crystallex contribuíram no processo de atribuição dos valores, por meio de discussões a respeito da importância das evidências como guias prospectivos e suas possíveis relações com ocorrências minerais. Deve-se notar, então, que os valores de função-membro definidos para cada classe dos mapas evidência foram atribuídos de maneira a refletir a importância das evidências e das classes dessas evidências em relação à hipótese “*área potencialmente favorável para conter ocorrências de ouro*”.

As evidências **acp1ar**, **acp2ar**, **acp3ar**, **rgb2ar**, **rgb3ar**, **rgb4ar** (Capítulo 4) tiveram altos valores de função-membro atribuídos às classes correspondentes à valores de Número Digital (**ND**) evidentemente mais altos. Além de critérios baseados no conhecimento da área e das evidências, o processo de tomada de decisão também levou em consideração a associação das evidências com a localização de ocorrências minerais. Essa última consideração foi parcialmente responsável pela atribuição de valores máximos um pouco mais baixos (valor de função-membro 0.6) para a evidência **rgb2ar** em relação aos demais mapas derivados de imagem de satélite, visto que essa evidência foi inclusive descartada do modelamento por Pesos de Evidência em função de seu baixo valor de contraste. Também é importante notar que as evidências **rgb2ar** e **acp1ar** não mostraram resposta de alta confiança com relação à proposição “*área potencialmente favorável para conter ocorrências de ouro*”, devido à pequena resposta espectral da feição hidrotermal **argila**, característica dessas evidências. Por essa razão, foi atribuído o valor 0.7 apenas para a classe mais alta da evidência **acp1ar**. As demais evidências derivadas de imagem de satélite, por mostrarem resposta relativamente melhor em relação à proposição inicial, tiveram o valor máximo (0.7) atribuído as duas classes mais altas.

As evidências **bacpann**, **bacsedn** e **babgcp2n** foram valorizadas a partir das classes separadas segundo avaliação estatística e de acordo com a experiência do autor e da equipe de exploração da Crystallex em trabalhos de prospecção. As duas últimas classes da evidência **bacpann**, que representam teores de ouro em concentrados de batéia acima de 1200 ppb, foram atribuídos valores de função-membro mais altos (0.7 e 0.8); para a classe que representa de teores acima de 60 ppb, considerado como teor regionalmente anômalo para ouro (Xuejing & Xueqiu, 1991), foi atribuído valor 0.4. As evidências **bacsedn** e **babgcp2n** também tiveram a atribuição de valores de função-membro mais altas para as duas últimas classes (0.8 e 0.9), que apresentam teores de ouro de sedimento ativo de drenagem acima de 700 ppb e teores de **BLEG** acima de 0.7, respectivamente.

As evidências **l1bufn** e **alvoest6** tiveram o valor de função-membro mais alto atribuído às classes cumulativas que representam distâncias aproximadas de até 200m e 100m, respectivamente, das zonas de cisalhamento. O valor 0.9, mais alto de todas as evidências usadas na integração, foi utilizado no sentido de conferir um maior peso à evidência **l1bufn**, a qual apresenta íntima associação com as ocorrências minerais conhecidas. O valor 0.7 foi atribuído para a classe que representa as porções internas dos alvos estruturais da evidência **alvoest6**, com o objetivo de auferir um menor peso a essas porções, já que são admitidas como de menor associação com as ocorrências minerais conhecidas em comparação às porções de borda dessas áreas de alívio de tensão.

As evidências **kdn** e **fatfn** mostraram boa confiabilidade em relação à proposição “*área potencialmente favorável para conter ocorrências de ouro*”, principalmente na porção oeste da **ICR**, onde mostraram grande associação com as áreas hidrotermalmente afetadas. Porém, essa associação não mostrou a mesma consistência para a porção leste da **ICR**, fato que levou a atribuição de um valor de função-membro um pouco menor para essas evidências.

A evidência **icrfn** teve sua classe representante de altitudes intermediárias (entre 216 e 237 m) com a atribuição de maior valor entre suas classes, em virtude da íntima relação das ocorrências minerais com as estruturas penetrativas definidas pelos lineamentos **tipo 1** de Amaro & Strieder (1994) e Strieder & Amaro (1997). Além disso, essa classe mostra a maior associação espacial com as ocorrências minerais conhecidas.

As tabelas 5.32 a 5.45 mostram os valores de função-membro Lógica Difusa atribuídos às classes dos 14 mapas evidência usados na integração. Essas tabelas foram executadas em arquivo ASCII e foram, após editadas de acordo com o formato de tabela

requerido pelo SPANS-GIS[#], transformadas para o formato binário e conectadas aos mapas evidência respectivos, de maneira a funcionarem como tabelas de atributos.

Tabela 5.32 – Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a método Lógica Difusa para o mapa evidência **acplar**. As classes do mapa encontram-se no primeiro campo de registros, abaixo da linha DATA. Os valores de função-membro Lógica Difusa encontram-se posicionados no segundo campo de registros. A legenda das classes preenche a terceira coluna de registros.

```

ID acplar
TITLE acplar classes fuzzy
MAPID acplar
TABTYPE 4
FTYPE free
KEYFIELD 1
NRECORD 5
1 2 4.000000 0 acplar classes acplar
2 0 6.100000 0 fuzzy pesos fuzzy
3 32 -10.000000 0 legenda legenda acplar
DATA
1 0.1 0-105
2 0.1 106-147
3 0.5 148-187
4 0.6 188-254
5 0.7 > 254

```

Tabela 5.33– Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência **acp2ar**. As classes do mapa encontram-se no primeiro campo de registros, abaixo da linha DATA. Os valores de função-membro Lógica Difusa encontram-se posicionados no segundo campo de registros. A legenda das classes preenche a terceira coluna de registros.

```

ID acp2ar
TITLE acp2ar classes fuzzy
MAPID acp2ar
TABTYPE 4
FTYPE free
KEYFIELD 1
NRECORD 5
1 2 4.000000 0 acp2ar classes acp2ar
2 0 6.100000 0 fuzzy pesos fuzzy
3 32 -10.000000 0 legenda legenda acp2ar
DATA
1 0.1 0-105
2 0.1 106-142
3 0.3 143-187
4 0.7 188-254
5 0.7 > 254

```

Tabela 5.34 – Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência **acp3ar**. As classes do mapa encontram-se no primeiro campo de registros, abaixo da linha DATA. Os valores de função-membro Lógica Difusa encontram-se posicionados no segundo campo de registros. A legenda das classes preenche a terceira coluna de registros.

```

ID acp3ar
TITLE acp3ar classes fuzzy
MAPID acp3ar
TABTYPE 4
FTYPE free
KEYFIELD 1
NRECORD 7
1 2 4.000000 0 acp3ar classes acp3ar
2 0 6.100000 0 fuzzy pesos fuzzy
3 32 -10.000000 0 legenda legenda acp3ar
DATA
1 0.1 0-120
2 0.1 121-142
3 0.2 143-180
4 0.3 181-212
5 0.5 213-230
6 0.7 231-254
7 0.7 > 254

```

Tabela 5.35 – Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência **rgb2ar**. As classes do mapa encontram-se no primeiro campo de registros, abaixo da linha DATA. Os valores de função-membro Lógica Difusa encontram-se posicionados no segundo campo de registros. A legenda das classes preenche a terceira coluna de registros.

```

ID rgb2ar
TITLE rgb2ar classes fuzzy
MAPID rgb2ar
TABTYPE 4
FTYPE free
KEYFIELD 1
NRECORD 7
1 2 4.000000 0 rgb2ar classes rgb2ar
2 0 6.100000 0 fuzzy pesos fuzzy
3 32 -10.000000 0 legenda legenda rgb2ar
DATA
1 0.1 0-92
2 0.1 93-127
3 0.2 128-177
4 0.3 178-220
5 0.6 221-230
6 0.6 231-254
7 0.6 > 254

```

Tabela 5.36 – Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência **rgb3ar**. As classes do mapa encontram-se no primeiro campo de registros, abaixo da linha DATA. Os valores de função-membro Lógica Difusa encontram-se posicionados no segundo campo de registros. A legenda das classes preenche a terceira coluna de registros.

```

ID rgb3ar
TITLE rgb3ar classes fuzzy
MAPID rgb3ar
TABTYPE 4
FTYPE free
KEYFIELD 1
NRECORD 5
1 2 4.000000 0 rgb3ar classes rgb3ar
2 0 6.100000 0 fuzzy pesos fuzzy
3 32 -10.000000 0 legenda legenda rgb3ar
DATA
1 0.1 0-97
2 0.1 98-135
3 0.5 136-182
4 0.7 183-254
5 0.7 > 254

```

Tabela 5.37 – Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência **rgb4ar**. As classes do mapa encontram-se no primeiro campo de registros, abaixo da linha DATA. Os valores de função-membro Lógica Difusa encontram-se posicionados no segundo campo de registros. A legenda das classes preenche a terceira coluna de registros.

```

ID rgb4ar
TITLE rgb4ar classes fuzzy
MAPID rgb4ar
TABTYPE 4
FTYPE free
KEYFIELD 1
NRECORD 7
1 2 4.000000 0 rgb4ar classes rgb4ar
2 0 6.100000 0 fuzzy pesos fuzzy
3 32 -10.000000 0 legenda legenda rgb4ar
DATA
1 0.1 0-115
2 0.1 116-140
3 0.2 141-175
4 0.3 176-215
5 0.6 216-230
6 0.7 231-254
7 0.7 > 254

```

Tabela 5.38 – Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência **bacpann**. As classes do mapa encontram-se no primeiro campo de registros, abaixo da linha DATA. Os valores de função-membro Lógica Difusa encontram-se posicionados no segundo campo de registros. A legenda das classes preenche a terceira coluna de registros.

```

ID bacpann
TITLE bacpann classes fuzzy
MAPID bacpann
TABTYPE 4
FTYPE free
KEYFIELD 1
NRECORD 7
1 2 4.000000 0 bacpann classes bacpann
2 0 6.100000 0 fuzzy pesos fuzzy
3 40 -20.000000 0 legenda legenda bacpann
DATA
1 0.0 0.00-0.70
2 0.0 0.70-4.00
3 0.1 4.00-60.00
4 0.4 60.00-1200.00
5 0.7 1200.00-3500.00
6 0.8 > 3500.00
7 0.1 sem dados

```

Tabela 5.39 – Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência **bacsedn**. As classes do mapa encontram-se no primeiro campo de registros, abaixo da linha DATA. Os valores de função-membro Lógica Difusa encontram-se posicionados no segundo campo de registros. A legenda das classes preenche a terceira coluna de registros.

```

ID bacsedn
TITLE bacsedn classes fuzzy
MAPID bacsedn
TABTYPE 4
FTYPE free
KEYFIELD 1
NRECORD 7
1 2 4.000000 0 bacsedn classes bacsedn
2 0 6.100000 0 fuzzy pesos fuzzy
3 40 -20.000000 0 legenda legenda bacsedn
DATA
1 0.0 0.00-0.025
2 0.2 0.025-200.00
3 0.5 200.00-300.00
4 0.6 300.00-700.00
5 0.8 700.00-750.00
6 0.9 > 750.00
7 0.2 sem dados

```

Tabela 5.40 – Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência **babgcp2n**. As classes do mapa encontram-se no primeiro campo de registros, abaixo da linha DATA. Os valores de função-membro Lógica Difusa encontram-se posicionados no segundo campo de registros. A legenda das classes preenche a terceira coluna de registros.

```

ID babgcp2n
TITLE babgcp2n classes fuzzy
MAPID babgcp2n
TABTYPE 4
FTYPE free
KEYFIELD 1
NRECORD 7
1 2 4.000000 0 babgcp2n classes babgcp2n
2 0 6.100000 0 fuzzy pesos fuzzy
3 40 -20.000000 0 legenda legenda
babgcp2n
DATA
1 0.1 -1.40 - -0.50
2 0.1 -0.50 - -0.30
3 0.2 -0.30 - 0.10
4 0.4 0.10 - 0.70
5 0.8 0.70 - 2.00
6 0.9 > 2.00
7 0.1 sem dados

```

Tabela 5.41 – Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência **kdn**. As classes do mapa encontram-se no primeiro campo de registros, abaixo da linha DATA. Os valores de função-membro Lógica Difusa encontram-se posicionados no segundo campo de registros. A legenda das classes preenche a terceira coluna de registros.

```

ID kdn
TITLE kdn classes fuzzy
MAPID kdn
TABTYPE 4
FTYPE free
KEYFIELD 1
NRECORD 7
1 2 4.000000 0 kdn classes kdn
2 0 6.100000 0 fuzzy pesos fuzzy
3 40 -20.000000 0 legenda legenda kdn
DATA
1 0.1 1.0171-1.5852
2 0.2 1.5852-1.7366
3 0.2 1.7366-2.1153
4 0.3 2.1153-2.9106
5 0.6 2.9106-3.2893
6 0.7 > 3.2893
7 0.1 sem dados

```

Tabela 5.42 – Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência **fatfn**. As classes do mapa encontram-se no primeiro campo de registros, abaixo da linha DATA. Os valores de função-membro Lógica Difusa encontram-se posicionados no segundo campo de registros. A legenda das classes preenche a terceira coluna de registros.

```

ID fatfn
TITLE fatfn classes fuzzy
MAPID fatfn
TABTYPE 4
FTYPE free
KEYFIELD 1
NRECORD 7
1 2 4.000000 0 fatfn classes fatfn
2 0 6.100000 0 fuzzy pesos fuzzy
3 40 -20.000000 0 legenda legenda fatfn
DATA
1 0.1 1.1971-25.6647
2 0.2 25.6647-32.4612
3 0.2 32.4612-41.9764
4 0.3 41.9764-59.6474
5 0.4 59.6474-70.5220
6 0.7 > 70.5220
7 0.1 sem dados

```

Tabela 5.43 – Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência **llbufn**. As classes do mapa encontram-se no primeiro campo de registros, abaixo da linha DATA. Os valores de função-membro Lógica Difusa encontram-se posicionados no segundo campo de registros. A legenda das classes preenche a terceira coluna de registros.

```

ID llbufn
TITLE llbufn classes fuzzy
MAPID llbufn
TABTYPE 4
FTYPE free
KEYFIELD 1
NRECORD 11
1 2 4.000000 0 llbufn classes llbufn
2 0 6.100000 0 fuzzy pesos fuzzy
3 30 -10.000000 0 legenda legenda llbufn
DATA
1 0.9 50m
2 0.9 100m
3 0.9 150m
4 0.8 200m
5 0.7 250m
6 0.6 300m
7 0.5 350m
8 0.4 400m
9 0.3 450m
10 0.2 500m
11 0.1 > 500m

```


Tabela 5.44 – Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência **alvoest6**. As classes do mapa encontram-se no primeiro campo de registros, abaixo da linha DATA. Os valores de função-membro Lógica Difusa encontram-se posicionados no segundo campo de registros. A legenda das classes preenche a terceira coluna de registros.

```

ID alvoest6
TITLE alvoest6 classes fuzzy
MAPID alvoest6
TABTYPE 4
FTYPE free
KEYFIELD 1
NRECORD 11
1 2 4.000000 0 alvoest6 classes alvoest6
2 0 6.100000 0 fuzzy pesos fuzzy
3 30 -10.000000 0 legenda legenda alvoest6
DATA
1 0.7 alvo
2 0.8 100m
3 0.6 200m
4 0.4 300m
5 0.3 400m
6 0.2 500m
7 0.1 600m
8 0.1 700m
9 0.1 800m
10 0.1 900m
11 0.1 > 900m

```

Tabela 5.45 – Tabela de atributos para o estudo de potencial mineral com a metodologia Lógica Difusa para o mapa evidência **icrfn**. As classes do mapa encontram-se no primeiro campo de registros, abaixo da linha DATA. Os valores de função-membro Lógica Difusa encontram-se posicionados no segundo campo de registros. A legenda das classes preenche a terceira coluna de registros.

```

ID icrfn
TITLE icrfn classes fuzzy
MAPID icrfn
TABTYPE 4
FTYPE free
KEYFIELD 1
NRECORD 11
1 2 4.000000 0 icrfn classes icrfn
2 0 6.100000 0 fuzzy pesos fuzzy
3 40 -20.000000 0 legenda legenda icrfn
DATA
1 0.1 102.256-121.288m
2 0.1 121.288-140.319m
3 0.1 140.319-159.351m
4 0.2 159.351-178.383m
5 0.3 178.383-197.414m
6 0.5 197.414-216.446m
7 0.7 216.446-235.478m
8 0.5 235.478-254.510m
9 0.3 254.510-273.541m
10 0.3 > 273.541m
11 0.1 sem dados

```

5.2.2. Integração dos mapas evidência e geração dos Mapas de Favorabilidade Mineral

A combinação das evidências por meio de operadores Lógica Difusa (Zimmerman, 1985; An *et al.*, 1991; Bonham-Carter, 1994a) foi processada de acordo com uma rede de inferências (Figura 5.23) desenvolvida para a área em questão e com base nas evidências disponíveis. Essa rede também foi definida de acordo com a importância das evidências em relação à hipótese “*área potencialmente favorável para conter ocorrências de ouro tipo San Gregorio*”.

A integração das evidências a partir da rede de inferências foi realizada em um único processamento, caracterizado por duas grandes operações. A primeira operação utilizou combinações dentro dos fatores definidos no Modelo de Exploração, de maneira a gerar mapas intermediários; esse procedimento enfatizou a esperada associação espacial que ocorre entre os padrões de um mesmo fator e facilitou o processo interpretativo. A rede de inferências procurou, então, simular o processamento lógico pensado pelo pesquisador; as regras de combinação constituíram a **engenharia de inferências**, enquanto os valores de função-membro Lógica Difusa formaram a base do conhecimento para a operação. Por fim, na segunda operação, os mapas intermediários resultantes foram combinados em um único procedimento. É importante salientar que esse procedimento também permite a utilização da metodologia em SIGs de menor capacidade, que não possuem ferramentas para integrar muitos padrões de uma só vez.

A rede de inferências foi propositadamente construída com pequena complexidade, de maneira a testar a metodologia desenvolvida sob uma forma simplificada, prática, de rápida execução e boa relação custo-benefício.

5.2.2.1 Fator LANDSAT

As seis evidências derivadas de imagem de satélite (**rgb2ar**, **rgb3ar**, **rgb4ar**, **acp1ar**, **acp2ar** e **acp3ar**) são denominadas, nesse modelamento, como **EM1** a **EM6** e foram combinadas de maneira a gerar dois mapas intermediários; um correspondente à combinação das evidências **EM1**, **EM2** e **EM3**, derivadas do processamento segundo a metodologia desenvolvida por Glikson (1997), e o outro correspondente à combinação das evidências **EM4**, **EM5** e **EM6**, derivadas do processamento sugerido por Crosta & McM-Moore (1989) e revisado por Loughlin (1991). Esses processamentos já foram detalhados no capítulo 4.

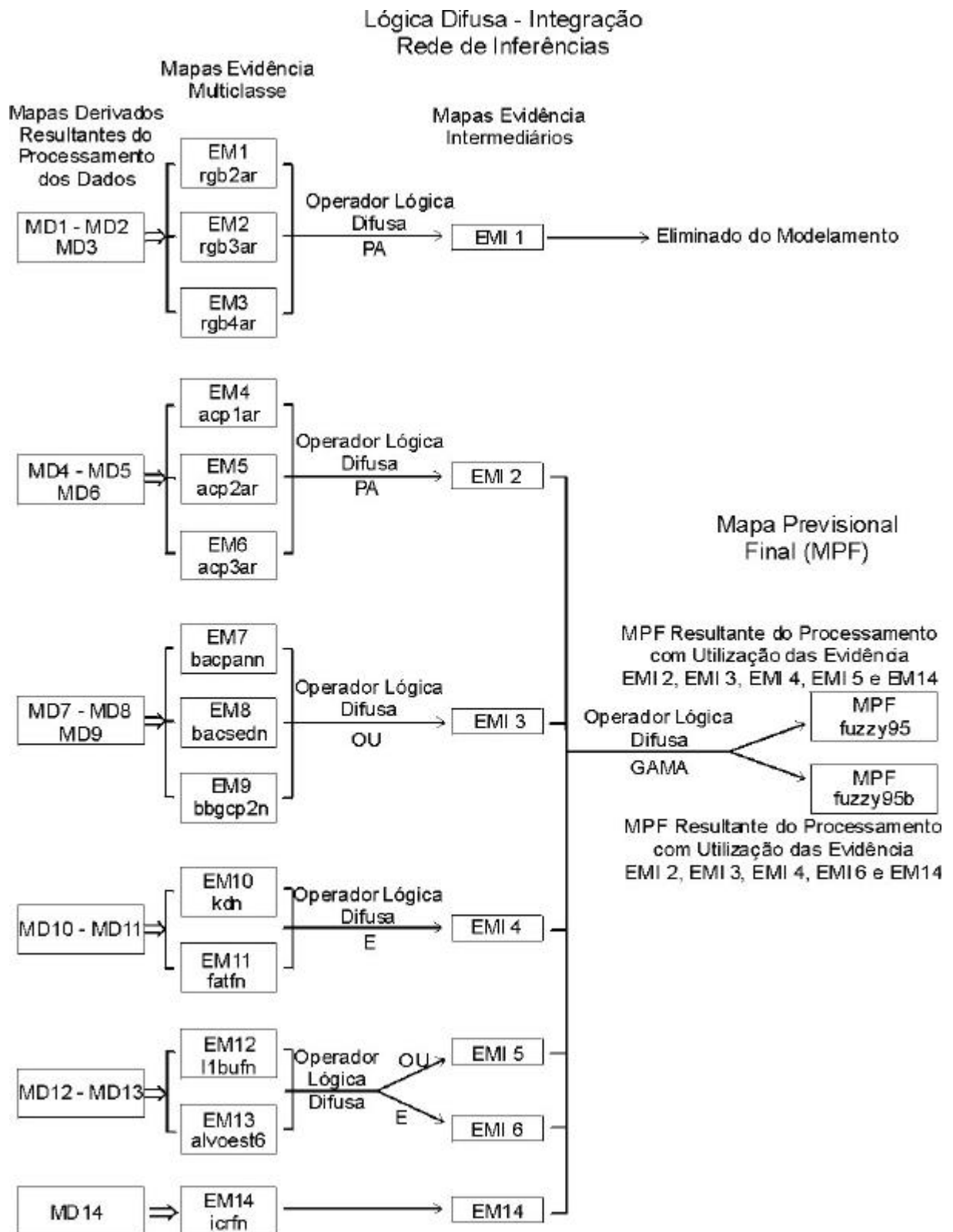


Figura 5.23 – Rede de inferências desenvolvida para a integração de dados de acordo com o Método Lógica Difusa. Notar a eliminação da evidência EMI 1. Nota explicativa é encontrada no item 5.2.2.6.

Os dois grupos de evidências foram combinados com o operador Produto Algébrico Lógica Difusa, de maneira a auferir uma ponderação mais pessimista e conservadora; essa opção considerou as evidências como de confiabilidade menor, visto que muitos pixels de alto número digital (**ND**) também representam áreas de solo exposto e não necessariamente refletem apenas áreas potencialmente favoráveis. Dessa maneira, os mapas evidência intermediários gerados, denominados **EMI1** e **EMI2**, apresentaram valores mais baixos para suas classes em relação aos valores das classes dos mapas de entrada.

5.2.2.2 Fator Geoquímico

As evidências desse fator (**bacpann**, **bacsedn** e **babgcp2n**) foram redenominadas **EM7**, **EM8** e **EM9** e foram combinadas com o operador Lógica Difusa **OU**; esse operador mantém os valores de função-membro mais altos das evidências, independente da ocorrência dos outros valores. O uso desse operador conduz a uma ponderação mais otimista das evidências, em virtude do alto grau de importância dos valores e fatores definidos com relação à proposição “*área potencialmente favorável para conter ocorrências de ouro tipo San Gregorio*”. A utilização de um operador mais conservador poderia resultar em um padrão com a classe “área favorável” inexistente, em função da ocorrência de áreas com dados inexistentes. O mapa intermediário gerado nesse processamento recebeu a denominação de **EMI3**.

5.2.2.3 Fator Geofísico

O fator geofísico foi constituído pelas evidências **kdn** e **fatfn**, redenominadas como **EM10** e **EM11**. O fator geofísico foi focalizado na seleção de áreas afetadas por processos hidrotermais, principalmente aqueles processos formados por soluções hidrotermais com alta concentração de K que participaram do processo de mineralização na Mina San Gregorio, definida como modelo de depósito no presente trabalho de mapeamento de potencial mineral.

As evidências resultantes desse fator mostraram, como já referido anteriormente, excelente resposta na porção oeste da **ICR**; porém, na porção leste, os resultados não mostram a mesma confiabilidade, em face da existência de condições geológico-estruturais um pouco diferentes nessa porção da área de trabalho. Para uma melhor definição de valores e fatores de

integração, é necessária a finalização dos trabalhos de mapeamento geológico ora em andamento por parte da equipe de exploração da Cristallex.

Assim, as evidências desse fator foram combinadas de uma maneira conservadora por meio do operador Lógica Difusa E; dessa maneira, altos valores de função-membro são conferidos apenas para aquelas áreas onde as duas evidências ocorrem simultaneamente com classes de alta favorabilidade mineral. O mapa evidência intermediário produzido nesse processamento foi denominado **EMI4**.

5.2.2.4 Fator Estrutural

Os dois mapas evidência desse fator (**11bufn** e **alvoest6**) estão redenominados **EM12** e **EM13** e foram combinados com os operadores Lógica Difusa E e OU; isso resultou em dois mapas evidência intermediários, denominados **EMI5** e **EMI6**, respectivamente.

O operador **OU** foi utilizado de maneira a conferir altos valores de função-membro no mapa resultante, desde que apenas um dos padrões estruturais de entrada tivesse alta favorabilidade. Esse procedimento foi usado devido ao alto grau de associação existente entre os padrões estruturais e as ocorrências minerais conhecidas. As estruturas que constituem o Sistema de Cisalhamento Rivera, de fato, parecem ter tido uma importante contribuição na geração das ocorrências minerais na **ICR** (Quadros *et al.*, 1995; Quadros, 1995; Quadros *et al.*, 1997a,b).

O operador **E** foi usado com o objetivo de estabelecer uma análise comparativa mais ampla com o método Pesos de Evidência; o operador **E** também foi utilizado para diminuir o peso dado às áreas mais internas dos alvos estruturais, visto que a relação mais íntima das estruturas com as ocorrências minerais parece ocorrer nas porções de borda das estruturas de transtensão salientadas pelo mapa evidência **alvoest6**. Com a utilização desse operador mais pessimista, apenas as áreas com ocorrência simultânea de classes favoráveis nos dois mapas evidência de entrada tiveram a aplicação de valor de função-membro potencialmente favorável.

5.2.2.5 Fator Altimetria

O mapa evidência **icrfn** teve sua denominação mantida como **EM14** e foi usado diretamente na segunda e última operação do modelamento, sem passar por nenhuma operação de pré-processamento.

5.2.2.6 Geração dos Mapas de Favorabilidade Mineral

Após a primeira operação do modelamento por Lógica Difusa, os mapas intermediários gerados (**EMI1= Fator LANDSAT; EMI2= Fator LANDSAT; EMI3= Fator Geoquímico; EMI4= Fator Geofísico; EMI5= Fator Estrutural; EMI6= Fator Estrutural; e EM14= Fator Altimetria**) foram combinados com o operador Lógica Difusa Gama, de modo a produzir os mapas de favorabilidade mineral final. Deve-se notar que as evidências intermediárias **EMI5** e **EMI6** foram usadas separadamente na integração, uma de cada vez; ou seja, em um primeiro processamento, foram usados os mapas **EMI1** a **EMI5** e **EM14** e, em um novo processamento, foram usados os mapas **EMI1** a **EMI4** e o mapa **EMI6**, além do **EM14**. Assim, resultaram dois mapas de favorabilidade mineral final desse processo integração.

Nessa integração, o operador Gama foi definido como $\gamma = 0.95$, de modo a gerar os valores de função-membro dos mapas de favorabilidade mineral resultantes, maiores que os valores dos mapas de entrada. Esse procedimento permitiu a produção de mapas mais otimistas, com valores de função-membro que melhor refletiram o pensamento baseado no conhecimento.

Para a execução da integração propriamente dita, foi elaborado um programa de modelamento de mapas desenvolvido em EASI + (Tabela 5.46), linguagem de programação do SPANS-GIS[#]. Esse programa encontra-se descrito a seguir e permitiu, por meio de uma única operação de modelamento, a produção de cada mapa de favorabilidade mineral. Notar que, para a geração do segundo mapa de favorabilidade mineral, a evidência **EMI5** foi substituída pela evidência **EMI6**.

Tabela 5.46 – Programa para integração dos mapas evidência intermediários por meio do método Lógica Difusa.

```

GAMMA = 0.95
EM1 = table ("rgb2ar"), class ("rgb2ar"), "Fuzzy"
EM2 = table ("rgb3ar"), class ("rgb3ar"), "Fuzzy"
EM3 = table ("rgb4ar"), class ("rgb4ar"), "Fuzzy"
EM4 = table ("acp1ar"), class ("acp1ar"), "Fuzzy"
EM5 = table ("acp2ar"), class ("acp2ar"), "Fuzzy"
EM6 = table ("acp3ar"), class ("acp3ar"), "Fuzzy"
EM7 = table ("bacpann"), class ("bacpann"), "Fuzzy"
EM8 = table ("bacsedn"), class ("bacsedn"), "Fuzzy"
EM9 = table ("babgcp2n"), class ("babgcp2n"), "Fuzzy"
EM10 = table ("kdn"), class ("kdn"), "Fuzzy"
EM11 = table ("fatfn"), class ("fatfn"), "Fuzzy"
EM12 = table ("l1bufn"), class ("l1bufn"), "Fuzzy"
EM13 = table ("alvoest6"), class ("alvoest6"), "Fuzzy"
EM14 = table ("icrfn"), class ("icrfn"), "Fuzzy"
EMI1 = EM1 * EM2 * EM3
EMI2 = EM4 * EM5 * EM6
EMI3 = max (EM7, EM8, EM9)
EMI4 = min (EM10, EM11)
EMI5 = min (EM12, EM13)
EMI6 = max (EM12, EM13)
PRODA = EMI1 * EMI2 * EMI3 * EMI4 * EMI5 * EMI6
SOMA = 1 - ((1 - EMI1) * (1 - EMI2) * (1 - EMI3) * (1 - EMI4) * (1 - EMI5) * (1 - EMI6))
GAM = SOMA ^ GAMMA * PRODA ^ (1 - GAMMA)
call result (GAM)

```

Os mapas resultantes desse modelamento não produziram um resultado muito adequado, pois salientam, com altos valores de função-membro lógica difusa, algumas áreas conhecidas como de baixo potencial mineral. Após rápida análise, verificou-se que essas áreas foram ressaltadas devido à presença de solo exposto salientado pelos mapas evidência LANDSAT. Assim, optou-se pela eliminação dos mapas evidência **EM1**, **EM2** e **EM3**; esses mesmos mapas intermediários já haviam sido eliminadas no modelamento pelo método Pesos de Evidência. Dessa maneira, foi diminuído o peso do fator LANDSAT no modelamento por meio do método Lógica Difusa.

O novo processamento utilizou o mesmo programa, apenas sem a geração do mapa evidência intermediário **EMI1**. Os mapas resultantes apresentaram, então, um padrão de

distribuição de zonas favoráveis mais confiável em relação às projeções baseadas no conhecimento. As figuras 5.24 e 5.25 mostram os mapas de favorabilidade mineral **fuzzy95** e **fuzzy95b** resultantes desse modelamento, já classificados em decis. As tabelas 5.47 e 5.48 apresentam a análise de área desses mapas, respectivamente. Uma análise comparativa e detalhada é apresentada no próximo item.

Tabela 5.47 – Análise de área do mapa **fuzzy95** feita no SPANS-GIS#.

SINGLE MAP ANALYSIS				
Map	:	fuzzy95 - fuzzy95		
Window	:	** - Temporary Window		
Class	Legend	Area(%)	Cumm Area	Area(sq km)
1	0.00000 - 0.32849	12.41	12.41	324.12
2	0.32849 - 0.42910	10.10	22.52	263.79
3	0.42910 - 0.48940	10.33	32.85	269.77
4	0.48940 - 0.52210	9.76	42.61	254.76
5	0.52210 - 0.54653	10.56	53.17	275.78
6	0.54653 - 0.57098	9.42	62.60	246.02
7	0.57098 - 0.59659	9.87	72.47	257.67
8	0.59659 - 0.62822	9.21	81.68	240.45
9	0.62822 - 0.67890	9.36	91.04	244.45
10	0.67890 +	8.96	100.00	233.97
Total of 10 classes		100.00		2610.79

Tabela 5.48 – Análise de área do mapa **fuzzy95b** feita no SPANS-GIS#.

SINGLE MAP ANALYSIS				
Map	:	fuzzy95b - fuzzy95b		
Window	:	** - Temporary Window		
Class	Legend	Area(%)	Cumm Area	Area(sq km)
1	0.00000 - 0.23491	10.59	10.59	276.50
2	0.23491 - 0.25695	11.46	22.05	299.08
3	0.25695 - 0.29213	11.51	33.56	300.60
4	0.29213 - 0.33611	9.35	42.91	244.24
5	0.33611 - 0.38665	9.89	52.80	258.20
6	0.38665 - 0.43481	9.70	62.50	253.13
7	0.43481 - 0.48662	9.44	71.94	246.37
8	0.48662 - 0.53614	9.55	81.48	249.21
9	0.53614 - 0.59830	9.43	90.92	246.32
10	0.59830 +	9.08	100.00	237.14
Total of 10 classes		100.00		2610.79

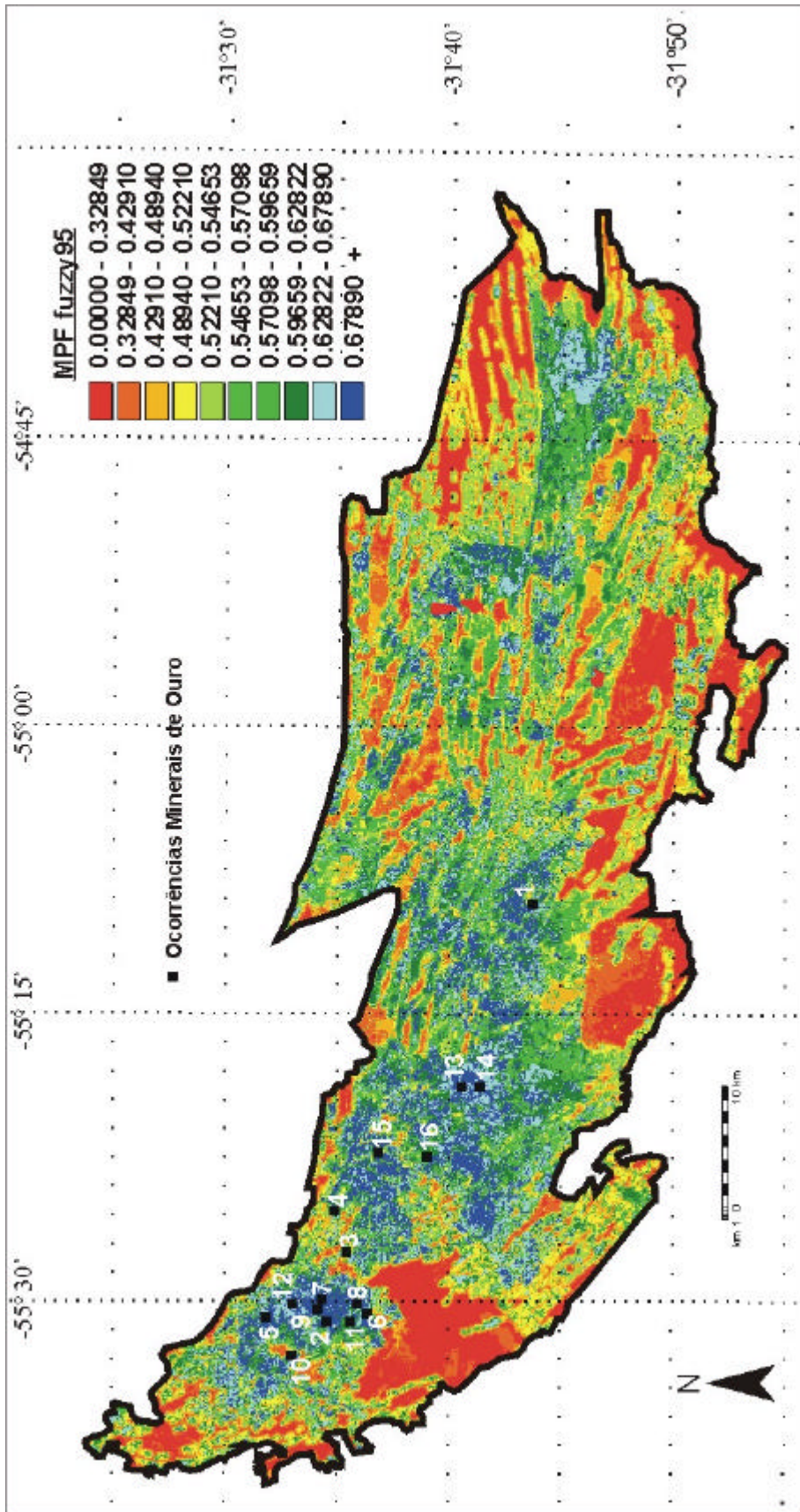


Figura 5.24 – Mapa fuzzy95. Mapa previsionar resultante da integração de dados de acordo com a metodologia Lógica Difusa. Evidências combinadas: EMI 2, EMI 3, EMI 4, EMI 5 e EMI 14. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

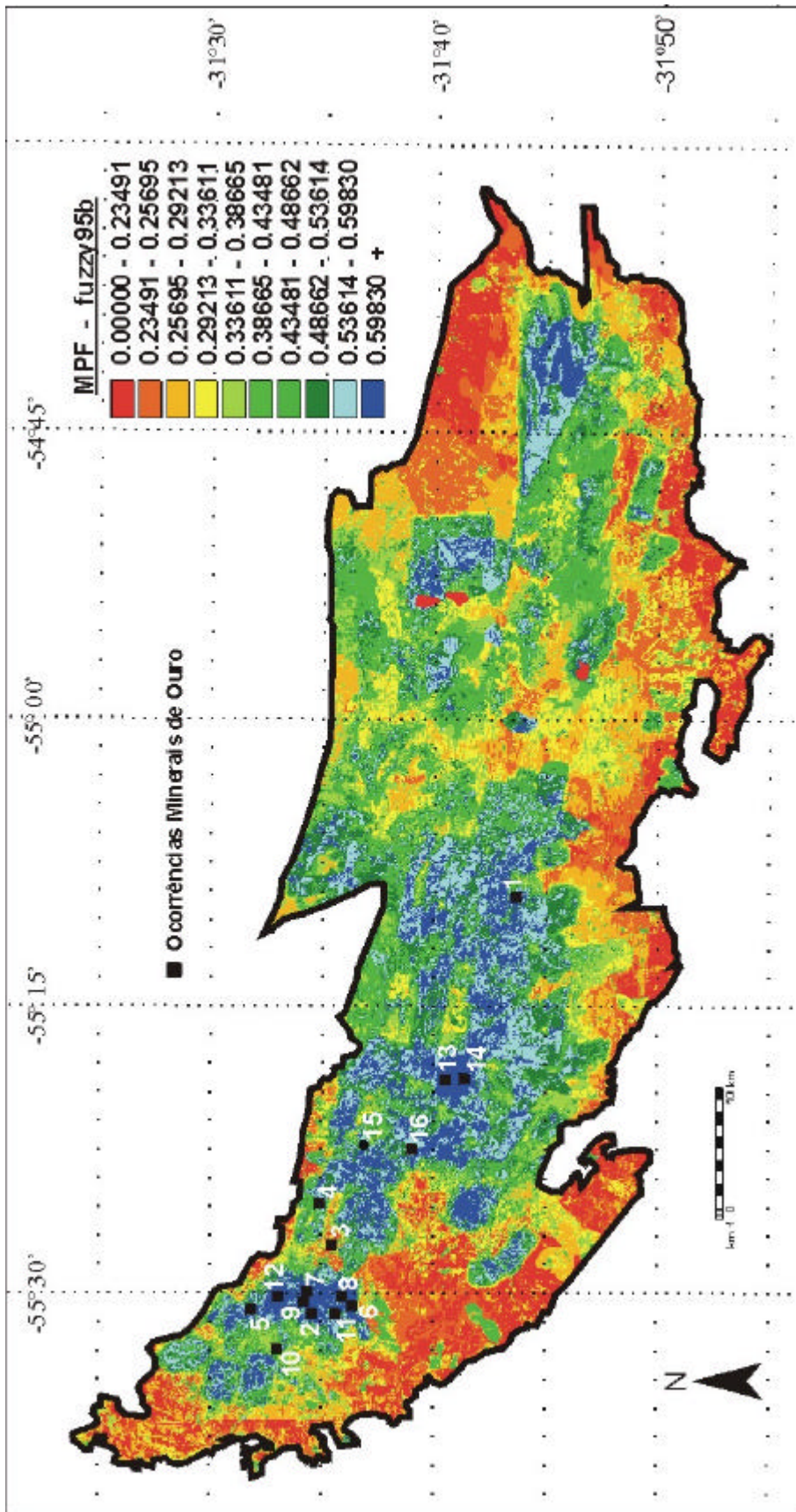


Figura 5.25– Mapa fuzzy95b. Mapa previewal resultante da integração de dados de acordo com a metodologia Lógica Difusa. Evidências combinadas: EMI 2, EMI 3, EMI 4, EMI 6 e EM 14. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

5.3. Análise comparativa dos resultados

A análise dos resultados obtidos com os diferentes mapas de favorabilidade mineral, também denominados de Mapas Previsionais Finais (MPF = **uniq4b**, **fuzzy95** e **fuzzy95b**), foi conduzida por meio de dois tipos de estudo: 1) um estudo qualitativo, baseado na análise visual comparativa dos mapas de favorabilidade mineral realizada com operações de matriz de sobreposição, e 2) um estudo quantitativo, baseado no cálculo de coeficientes de correlação dos mapas de favorabilidade.

A análise qualitativa foi realizada com base em três mapas de comparação (comparação por classe), a saber:

?? **compf** (Fig. 5.26) – gerado a partir de matriz de sobreposição (Tab. 5.49) elaborada com os mapas **fuzzy95** e **fuzzy95b**;

?? **compfp** (Fig. 5.27) – gerado pela operação de matriz de sobreposição (Tab. 5.50) elaborada com os mapas **fuzzy95** e **uniq4b**;

?? **compfbp** (Fig. 5.28) – gerado por operação de matriz de sobreposição (Tab. 5.51) elaborada a partir dos mapas **fuzzy95b** e **uniq4b**.

Tabela 5.49 – Matriz de sobreposição usada para gerar o mapa **compf**. Legenda das classes com valores iniciais.

fuzzy95b												
:	-----											
:			/	0	/	1	/	5	/	3	/	1
:			/	0	/	9	/	9	/	1	/	1
:			/	0	/	4	/	6	/	2	/	6
:			/	0	/	3	/	5	/	9	/	3
:			/	0	/	2	/	2	/	2	/	3
:			/	.	/	.	/	.	/	.	/	.
:			/	0	/	0	/	0	/	0	/	0
:	-----											
:		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
:	-----											
	fuzzy95											
:	- 0:	6	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12
:	:0.00000	- 1:	5	6	8	8	9	9	10	10	11	11
:	:0.32849	- 2:	5	5	6	8	8	9	9	10	10	11
:	:0.42910	- 3:	4	5	5	6	8	8	9	9	10	10
:	:0.48940	- 4:	4	4	5	5	6	8	8	9	9	10
:	:0.52210	- 5:	3	4	4	5	5	6	8	8	9	9
:	:0.54653	- 6:	3	3	4	4	5	5	7	8	8	9
:	:0.57098	- 7:	2	3	3	4	4	5	5	7	8	8
:	:0.59659	- 8:	2	2	3	3	4	4	5	5	7	8
:	:0.62822	- 9:	1	2	2	3	3	4	4	5	5	7
:	:0.67890	- 10:	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5

Tabela 5.50 – Matriz de sobreposição usada para gerar o mapa **compfp**. Legenda das classes com valores iniciais.

Uniq4b													
:-----													
:			/ 0 /	2 /	9 /	5 /	7 /	0 /	8 /	2 /	4 /	6	
:			/ 0 /	1 /	5 /	1 /	2 /	2 /	9 /	7 /	6 /	8	
:			/ 0 /	6 /	2 /	0 /	4 /	9 /	0 /	6 /	7 /	4	
:			/ 0 /	0 /	1 /	2 /	3 /	4 /	6 /	7 /	8 /	9	
:			/ . /	. /	. /	. /	. /	. /	. /	. /	. /	.	
:			/ 0 /	0 /	0 /	0 /	0 /	0 /	0 /	0 /	0 /	0	
:-----													
:			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
:-----													
fuzzy95													
:	-	0:	6	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12
:	0.00000	- 1:	5	6	8	8	9	9	10	10	11	11	12
:	0.32849	- 2:	5	5	6	8	8	9	9	10	10	11	11
:	0.42910	- 3:	4	5	5	6	8	8	9	9	10	10	11
:	0.48940	- 4:	4	4	5	5	6	8	8	9	9	10	10
:	0.52210	- 5:	3	4	4	5	5	6	8	8	9	9	10
:	0.54653	- 6:	3	3	4	4	5	5	7	8	8	9	9
:	0.57098	- 7:	2	3	3	4	4	5	5	7	8	8	9
:	0.59659	- 8:	2	2	3	3	4	4	5	5	7	8	8
:	0.62822	- 9:	1	2	2	3	3	4	4	5	5	7	8
:	0.67890	- 10:	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	7

Tabela 5.51 – Matriz de sobreposição usada para gerar o mapa **compfbp**. Legenda das classes com valores iniciais.

uniq4b													
:-----													
:			/ 0 /	2 /	9 /	5 /	7 /	0 /	8 /	2 /	4 /	6	
:			/ 0 /	1 /	5 /	1 /	2 /	2 /	9 /	7 /	6 /	8	
:			/ 0 /	6 /	2 /	0 /	4 /	9 /	0 /	6 /	7 /	4	
:			/ 0 /	0 /	1 /	2 /	3 /	4 /	6 /	7 /	8 /	9	
:			/ . /	. /	. /	. /	. /	. /	. /	. /	. /	.	
:			/ 0 /	0 /	0 /	0 /	0 /	0 /	0 /	0 /	0 /	0	
:-----													
:			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
:-----													
fuzzy95b													
:	-	0:	6	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12
:	0.00000	- 1:	5	6	8	8	9	9	10	10	11	11	12
:	0.23491	- 2:	5	5	6	8	8	9	9	10	10	11	11
:	0.25695	- 3:	4	5	5	6	8	8	9	9	10	10	11
:	0.29213	- 4:	4	4	5	5	6	8	8	9	9	10	10
:	0.33611	- 5:	3	4	4	5	5	6	8	8	9	9	10
:	0.38665	- 6:	3	3	4	4	5	5	7	8	8	9	9
:	0.43481	- 7:	2	3	3	4	4	5	5	7	8	8	9
:	0.48662	- 8:	2	2	3	3	4	4	5	5	7	8	8
:	0.53614	- 9:	1	2	2	3	3	4	4	5	5	7	8
:	0.59830	- 10:	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	7

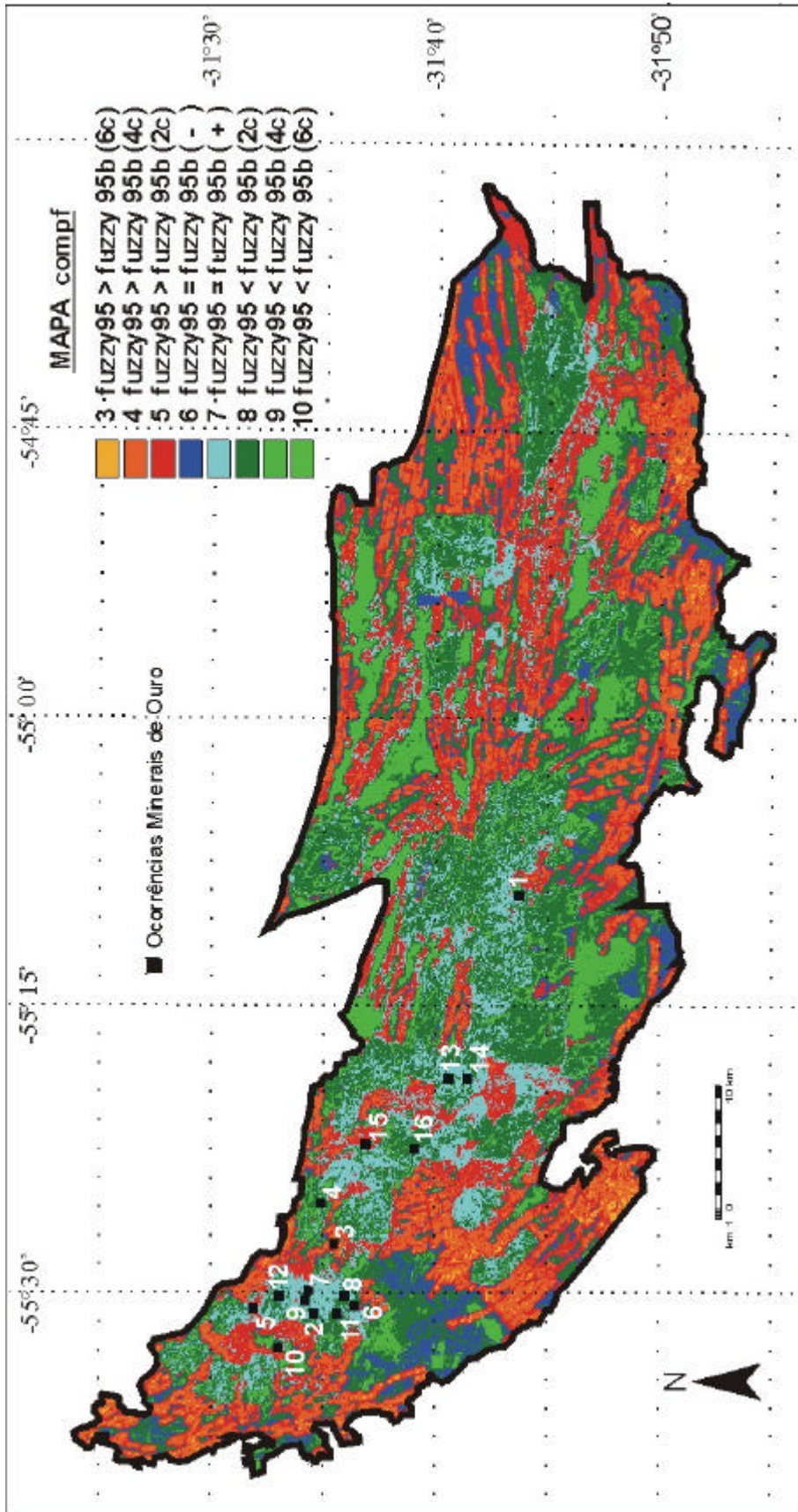


Figura 5.26 – Mapa compf. Resultado da combinação por análise comparativa dos mapas fuzzy95 e fuzzy95b. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

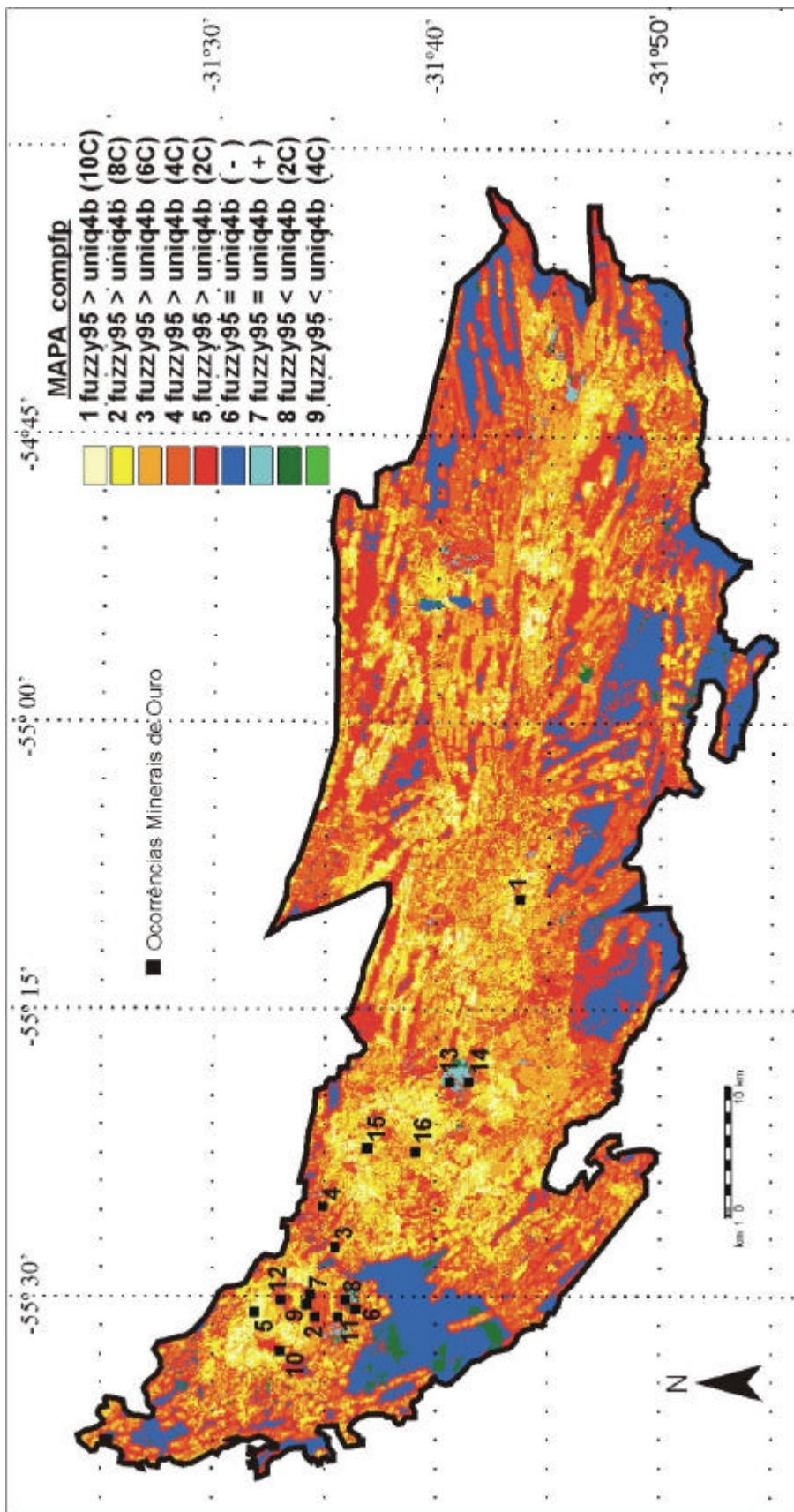


Figura 5.27 – Mapa compfp. Resultado da combinação por análise comparativa dos mapas fuzzy95 e uniq4b. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

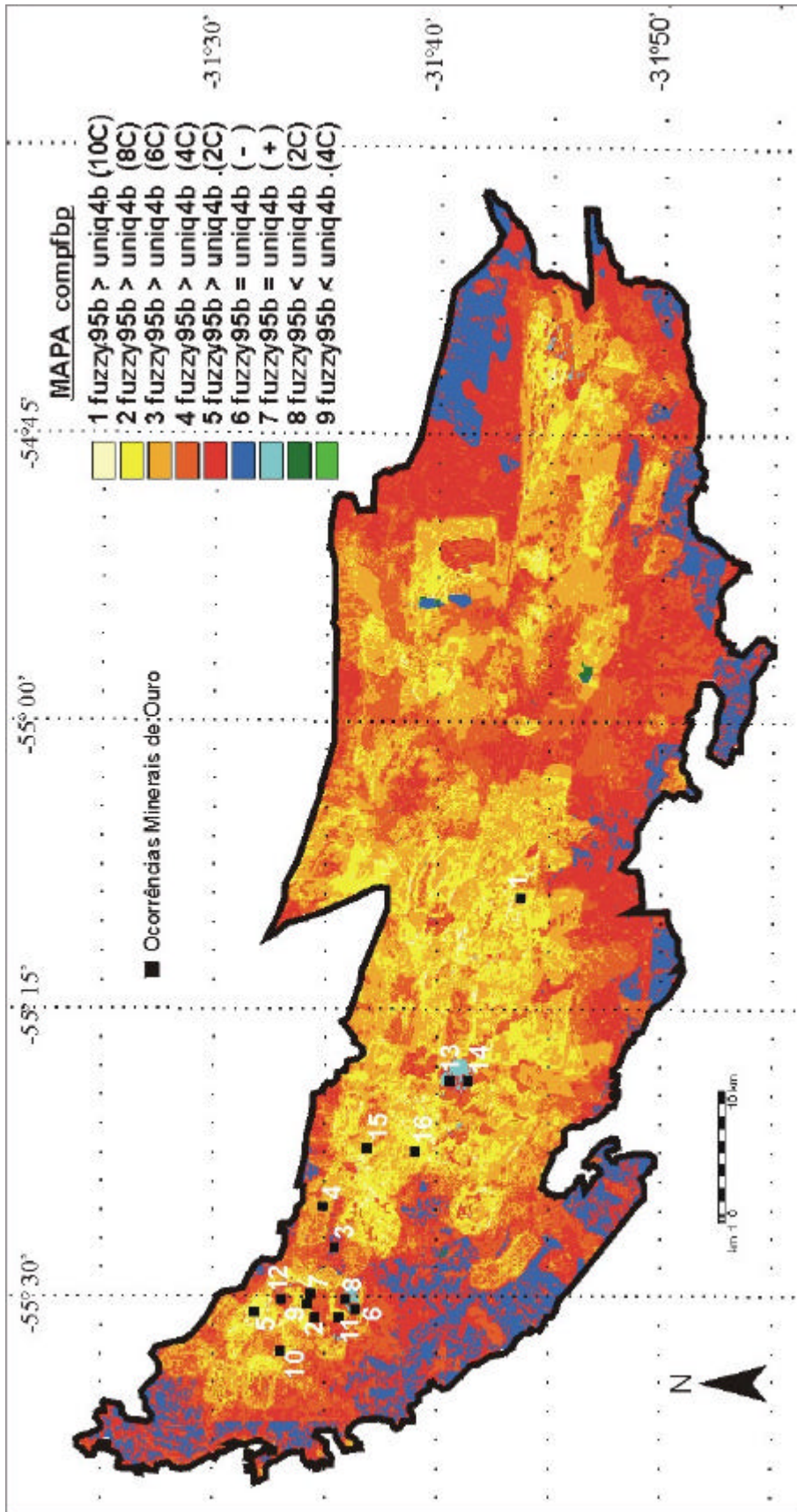


Figura 5.28 – Mapa compfbp. Resultado da combinação por análise comparativa dos mapas fuzzy95b e uniq4b. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

A operação para geração dos mapas de análise comparativa qualitativa foi realizada a partir de matrizes construídas de maneira a mostrar as áreas de mesma classe dos mapas de entrada (similaridades) na diagonal principal. As classes similares (diagonal) foram alocadas como classe 6 (áreas correspondentes às classes de entrada < 6), ou classe 7 (áreas correspondentes às classes de entrada > 5) nos mapas de saída. As áreas cujas classes eram diferentes nos mapas de entrada foram representadas pelas classes de saída 1 a 5, se as classes de entrada colocadas nas linhas eram maiores do que as classes de entrada colocados nas colunas; de modo inverso, as classes de saídas 8 a 12 eram alocadas para o caso em que as classes de entrada colocadas nas linhas eram menores do que as classes de entrada colocados nas colunas. Note-se ainda que, com relação às classes menores que 6, a classe de saída 5 corresponde às áreas com diferença de até duas classes de entrada, a classe de saída 4 corresponde as áreas com diferença de até 4 classes e assim por diante. O mesmo critério, ao inverso, vale para as classes maiores do que 7.

A visualização dos mapas **fuzzy** e do mapa comparativo **compf** mostra a semelhança entre eles. Essa forte correlação positiva já era esperada, pois os dois mapas **fuzzy** foram elaborados com a mesma metodologia. A diferença ficou por conta do tipo de integração feita para os mapas que representam o fator estrutural: 1) no mapa **fuzzy95**, foi usada a integração com o operador Lógica Difusa OU, enquanto 2) no mapa **fuzzy95b**, foi utilizada a integração com o operador Lógica Difusa E.

Os mapas comparativos **compfp** e **compfbp** mostram uma menor quantidade de áreas representadas por classes maiores que 7, o que indica um resultado mais conservador para o mapa **uniq4b** gerado pelo método Pesos de Evidência e, conseqüentemente, um resultado mais otimista dos mapas resultantes do método Lógica Difusa na definição das áreas de favorabilidade mineral. Essa interpretação também é evidente quando se visualiza separadamente os mapas resultantes das duas metodologias. Em todo caso, as classes correspondentes às áreas mais favoráveis do **MPF uniq4b** mostram forte correlação positiva com as áreas mais favoráveis dos **MPF** resultantes da aplicação do método Lógica Difusa.

Para uma melhor visualização dessa correlação e para a obtenção de um resultado intermediário entre as duas metodologias, foram gerados dois mapas previsionais integrados, denominados **mpf** (Fig. 5.29) e **mpfa** (Fig. 5.30). O primeiro (**mpf**) é um mapa que resulta da integração dos mapas **fuzzy95** e **uniq4b** por operação de matriz de sobreposição (Tab. 5.52). O segundo (**mpfa**) é o resultado da integração dos mapas **fuzzy95b** e **uniq4b** a partir da

matriz de sobreposição apresentada na tabela 5.53. As tabelas 5.54 e 5.55 apresentam a análise de área por classe dos mapas **mpf** e **mpfa**, respectivamente.

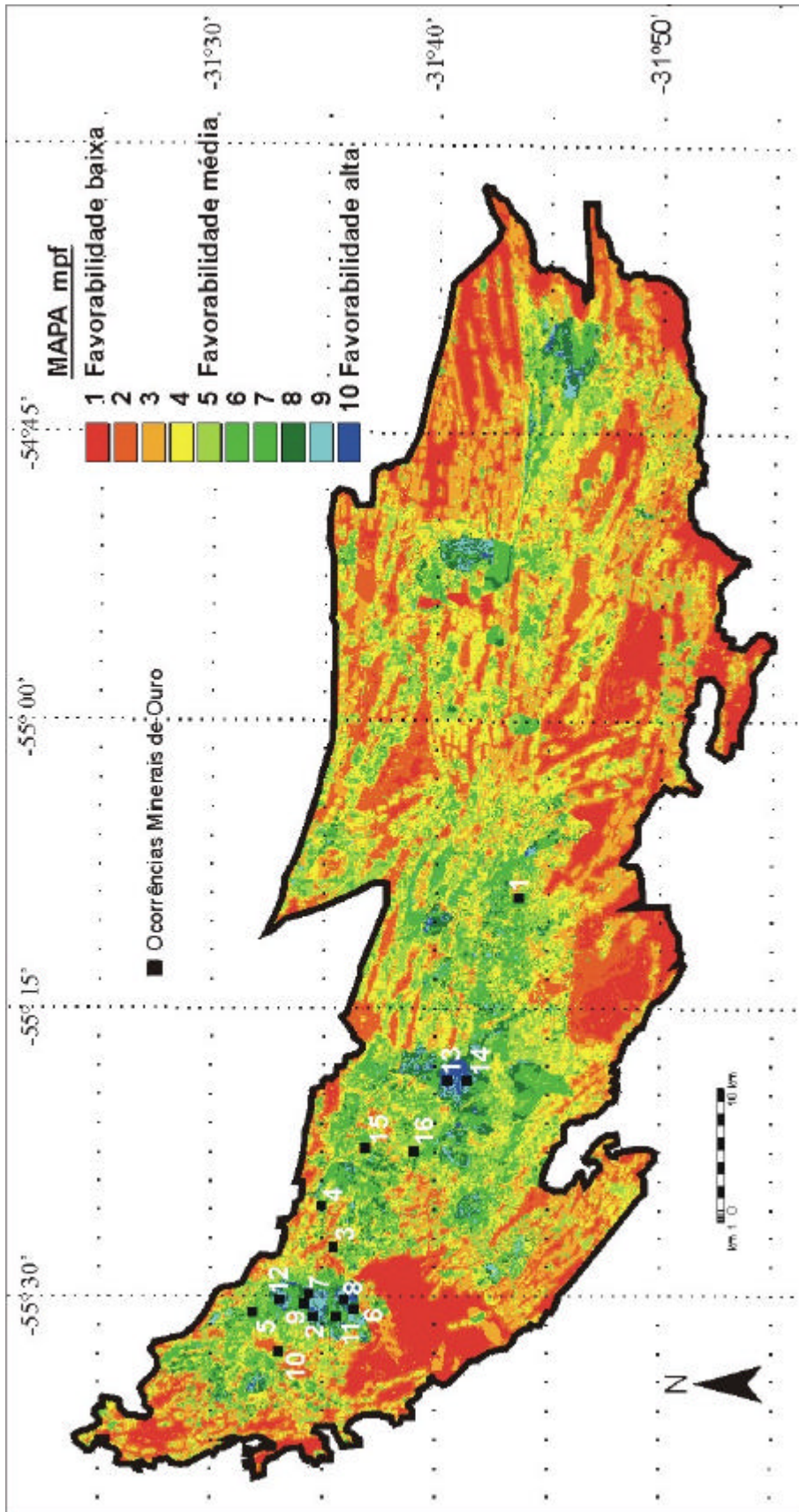


Figura 5.29 – Mapa **mpf**. Resultado da combinação dos mapas **fuzzy95** e **uniq4b**. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

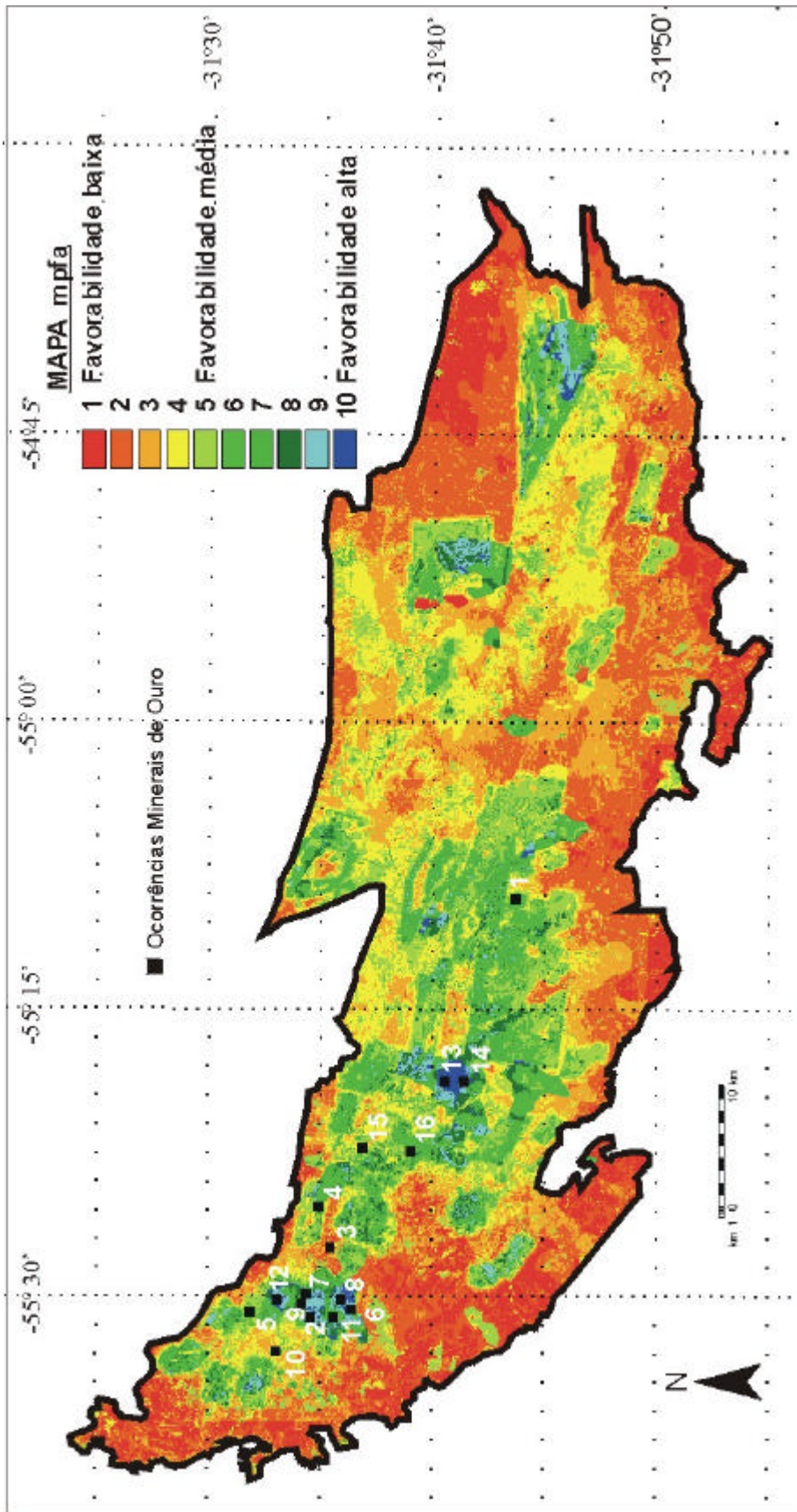


Figura 5.30 – Mapa mpfa. Resultado da combinação dos mapas fuzzy95b e uniq4b. Ocorrências minerais numeradas de acordo com mapa de ocorrências minerais (Fig. 4.5).

Tabela 5.52 – Matriz de sobreposição criada para gerar o mapa **mpf**. Legenda das classes com valores iniciais.

uniq4b															
:	-----														
:				/ 0 / 2 / 9 / 5 / 7 / 0 / 8 / 2 / 4 / 6											
:				/ 0 / 1 / 5 / 1 / 2 / 2 / 9 / 7 / 6 / 8											
:				/ 0 / 6 / 2 / 0 / 4 / 9 / 0 / 6 / 7 / 4											
:				/ 0 / 0 / 1 / 2 / 3 / 4 / 6 / 7 / 8 / 9											
:				/ . / . / . / . / . / . / . / . / . / .											
:				/ 0 / 0 / 0 / 0 / 0 / 0 / 0 / 0 / 0 / 0											
:				-----											
:				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
:				-----											
:	fuzzy95	fuzzy95													
:	-	0:	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5		
:	0.00000	-	1:	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	
:	0.32849	-	2:	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	
:	0.42910	-	3:	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	
:	0.48940	-	4:	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	
:	0.52210	-	5:	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	
:	0.54653	-	6:	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	
:	0.57098	-	7:	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	
:	0.59659	-	8:	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	
:	0.62822	-	9:	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	
:	0.67890	-	10:	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10	

Tabela 5.53 – Matriz de sobreposição criada para gerar o mapa **mpfa**. Legenda das classes com valores iniciais.

uniq4b															
:	-----														
:				/ 0 / 2 / 9 / 5 / 7 / 0 / 8 / 2 / 4 / 6											
:				/ 0 / 1 / 5 / 1 / 2 / 2 / 9 / 7 / 6 / 8											
:				/ 0 / 6 / 2 / 0 / 4 / 9 / 0 / 6 / 7 / 4											
:				/ 0 / 0 / 1 / 2 / 3 / 4 / 6 / 7 / 8 / 9											
:				/ . / . / . / . / . / . / . / . / . / .											
:				/ 0 / 0 / 0 / 0 / 0 / 0 / 0 / 0 / 0 / 0											
:				-----											
:				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
:				-----											
:	fuzzy95b	fuzzy95b													
:	-	0:	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5		
:	0.00000	-	1:	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	
:	0.23491	-	2:	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	
:	0.25695	-	3:	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	
:	0.29213	-	4:	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	
:	0.33611	-	5:	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	
:	0.38665	-	6:	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	
:	0.43481	-	7:	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	
:	0.48662	-	8:	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	
:	0.53614	-	9:	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	
:	0.59830	-	10:	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10	

Tabela 5.54 – Análise de área do mapa **mpf** feita no SPANS-GIS#.

SINGLE MAP ANALYSIS				
Map	:	mpf - mpf		
Window	:	** - Temporary Window		
Class	Legend	Area (%)	Cumm Area	Area (sq km)
1	1 Favorabilidade baixa	12.25	12.25	319.69
2	2	19.12	31.36	499.08
3	3	19.34	50.70	505.00
4	4	17.39	68.10	454.07
5	5 Favorabilidade média	14.93	83.02	389.68
6	6	10.11	93.13	263.92
7	7	2.83	95.96	73.89
8	8	2.47	98.43	64.51
9	9	1.12	99.55	29.24
10	10 Favorabilidade alta	0.45	100.00	11.71
Total of 10 classes		100.00		2610.79

Tabela 5.55 – Análise de área do mapa **mpfa** feita no SPANS-GIS#.

SINGLE MAP ANALYSIS				
Map	:	mpfa - mpfa		
Window	:	** - Temporary Window		
Class	Legend	Area (%)	Cumm Area	Area (sq km)
1	1 Favorabilidade baixa	10.53	10.53	274.85
2	2	22.95	33.48	599.25
3	3	18.65	52.13	487.01
4	4	15.73	67.87	410.73
5	5 Favorabilidade média	13.70	81.57	357.71
6	6	10.48	92.05	273.65
7	7	3.47	95.52	90.50
8	8	2.33	97.84	60.82
9	9	1.53	99.38	40.04
10	10 Favorabilidade alta	0.62	100.00	16.23
Total of 10 classes		100.00		2610.79

As duas metodologias obtiveram sucesso em identificar, como áreas potenciais, as áreas mineralizadas conhecidas, além de outras áreas ainda não trabalhadas. Essa observação pode ser obtida a partir da visualização da tabela 5.56, que relaciona as ocorrências minerais conhecidas na **ICR** com as classes dos mapas previsionais finais. Nessa tabela, observa-se que:

- 1) o mapa previsional **uniq4b** (método Pesos de Evidência) contém 6 ocorrências minerais posicionadas nas áreas relacionadas às classes maiores que 5;
- 2) os mapas previsionais **fuzzy95** e **fuzzy95b** (método Lógica Difusa) mostram 16 e 15 ocorrências, respectivamente, posicionadas nas áreas que correspondem às classes maiores que 5;
- 3) os mapas previsionais integrados **mpf** e **mpfa** mostram 13 ocorrências minerais nas áreas correspondentes às classes maiores que 5.

Nesse sentido, parece importante explicitar que as duas maiores ocorrências conhecidas na **ICR** (Mina San Gregorio e Mina Zapucay) localizam-se em áreas que correspondem às classes 8 a 10 dos mapas previsionais. Considerando que a Mina San Gregorio foi usada como modelo conceitual e de exploração no presente trabalho, observa-se mais uma vez a boa confiabilidade indicada pelas duas metodologias, pois elas identificaram como áreas potenciais as áreas mineralizadas conhecidas. Além dessas duas áreas (entorno da Mina San Gregorio e da Mina Zapucay) conhecidas e identificadas como potenciais, os mapas de favorabilidade mineral identificaram outras áreas potenciais, que podem ser visualizadas, por exemplo, de uma maneira relativamente conservadora observando-se apenas as áreas abrangidas pelas classes 9 e 10.

A análise quantitativa foi elaborada a partir de dois coeficientes de correlação, a saber: 1) Coeficiente de Contingência (C) e 2) coeficiente de correlação de *ranks* de Spearman (r). O primeiro é estimado pela seguinte equação:

$$C = \sqrt{\frac{\chi^2}{\chi^2 + 1}} \quad (5.5)$$

onde χ^2 é o qui quadrado, o qual varia em magnitude dependendo do grau com o qual as áreas esperadas são iguais as áreas observadas (Bonham-Carter, 1994a). Teoricamente, o coeficiente de contingência varia entre 0 (ausência de correlação) e 1 (correlação máxima); porém, em geral, não atinge o valor máximo 1, mesmo quando as variáveis possuem um alto grau de associação (Reynolds, 1997).

Tabela 5.56 – Tabela relacionando as ocorrências minerais conhecidas na **ICR** com as classes dos mapas previsionais finais.

Num	ocorrências	uniq4b	fuzzy95	fuzzy95b	mpf	mpfa
1	Mina Curtume	2	10	10	6	6
2	Mina Nueva Australia	7	10	10	9	9
3	Mina Nueva Esperanza	1	8	4	5	3
4	Mina Peru	5	10	10	8	8
5	Mina Rica	4	10	10	7	7
6	Mina San Antonio	10	10	10	10	10
7	Mina San Benito	3	9	9	6	6
8	Mina San Gregorio	10	8	10	9	10
9	Mina Santa Barbara	7	10	10	9	9
10	Mina Santa Catarina	1	10	7	6	4
11	Mina Santa Tereza	3	10	10	7	7
12	Mina Sobresaliente	4	10	10	7	7
13	Mina Zapucay	10	10	10	10	10
14	Mina ZapucayII	10	10	10	10	10
15	Prospecto Areícu	1	7	9	4	5
16	Prospecto Laureles	2	7	9	5	6

O coeficiente de correlação de *rank*s de Spearman é definido pela seguinte equação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (R_x - \bar{R}_x)(R_y - \bar{R}_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_x - \bar{R}_x)^2 \sum_{i=1}^n (R_y - \bar{R}_y)^2}} \quad (5.6)$$

onde, R_x e R_y são os intervalos de classes ordenadas em seqüência dos mapas x e y, respectivamente, e a barra sobre o R indica a mediana dos intervalos de classes (Bonham-Carter, 1994a; Wright & Bonham-Carter, 1996). Esse coeficiente varia de -1 (indica correlação negativa) a +1 (indica correlação positiva). O valor 0 (zero) indica ausência de correlação, ou independência.

Os resultados dos cálculos de correlação entre os mapas previsionais podem ser visualizados nas tabelas 5.57 e 5.58. Esses dados mostram informações similares aquelas encontradas no estudo qualitativo anteriormente descrito. Os mapas **fuzzy** que resultam do método Lógica Difusa mostram ótima correlação entre si; esses mapas, quando confrontados com o mapa **uniq4b** que resulta do método Pesos de Evidência, apresentam uma correlação

positiva média. Já as medidas de correlação dos mapas previsionais integrados finais **mpf** e **mpfb** mostram ótima correlação positiva.

Tabela 5.57 – Tabela mostrando os resultados dos cálculos de correlação entre os mapas previsionais finais. C – coeficiente de contingência, r – coeficiente de correlação de *Ranks* de Spearman.

	Fuzzy95		Fuzzy95b		Uniq4	
	C	r	C	r	C	r
Fuzzy95	-	-	0.715	0.994	0.508	0.641
Fuzzy95b			-	-	0.660	0.569
Uniq4					-	-

Tabela 5.58 – Tabela mostrando os resultados dos cálculos de correlação entre os mapas previsionais integrados finais. C – coeficiente de contingência, r – coeficiente de correlação de *Ranks* de Spearman.

MPF	MPFA	
	C	R
	0.870	0.989

Capítulo 6

Análise da favorabilidade mineral, conclusões e recomendações

Esse capítulo contém a análise dos resultados alcançados, uma discussão sobre a aplicabilidade dos métodos de integração de dados utilizados, conclusões e recomendações para trabalhos futuros. A análise dos resultados de favorabilidade mineral (item 6.1) foi realizada sobre algumas áreas definidas nos mapas previsionais resultantes dos modelamentos utilizados nesse trabalho. O objetivo dessa análise de áreas selecionadas foi servir de exemplo para a análise das demais áreas identificadas nos mapas previsionais. A partir dessa análise, foram apresentadas algumas sugestões para serem observadas em futuros trabalhos de semi-detalle e detalhe nos alvos definidos. A discussão sobre a aplicabilidade dos métodos de integração utilizados (vantagens e desvantagens) e conclusões obtidas foi efetivada no item 6.2, onde também foram formuladas algumas recomendações gerais a partir dos resultados obtidos nesse trabalho de mapeamento de favorabilidade mineral.

6.1 Análise da Favorabilidade Mineral na ICR

O investimento em exploração mineral é muito seletivo, especialmente por seu elevado risco e demorado retorno. Sob esse aspecto, a utilização de novas técnicas de modelamento de potencial mineral, auxiliadas pela recente tecnologia **SIG**, tem a capacidade de proporcionar grandes vantagens competitivas em relação aos métodos prospectivos clássicos, baseados somente em técnicas de busca convencionais. Dessa forma, a utilização da avaliação de favorabilidade pode otimizar o uso do conhecimento a partir do grande volume de dados e de conceitos comumente manipulados, auxiliando a análise das incertezas e da probabilidade de sucesso do empreendimento exploratório e mineiro.

No estudo em questão, foram selecionadas várias áreas alvo de alta favorabilidade mineral, onde se sugere a execução de trabalhos exploratórios de semi-detalle. Deve-se inicialmente salientar que o método Pesos de Evidência mostrou valores de probabilidade mais elevados em relação aos alvos definidos pelo método Lógica Difusa, mesmo que o primeiro método tenha evidenciado alvos de menor extensão em área em relação ao segundo. Também é importante notar que todas as áreas evidenciadas pelo método Pesos de Evidência foram identificadas como áreas alvo pelo método Lógica Difusa.

Os mapas previsionais finais (Figs. 5.22, 5.24 e 5.25) salientam as duas maiores ocorrências conhecidas na **ICR**: 1) a Mina San Gregorio (modelo conceitual e exploratório utilizado no presente trabalho) e 2) a Mina Zapucay. Ambas as minas localizam-se em áreas que correspondem às classes 8 a 10 dos mapas previsionais, o que aufere confiabilidade para as duas metodologias utilizadas (Tabela 5.56). Nessa tabela, observa-se que o mapa previewal **uniq4b** (método Pesos de Evidência) contém 6 ocorrências minerais posicionadas nas áreas relacionadas às classes maiores que 5; os mapas previsionais **fuzzy95** e **fuzzy95b** (método Lógica Difusa) mostram 16 e 15 ocorrências, respectivamente, posicionadas nas áreas que correspondem às classes maiores que 5; e os mapas previsionais integrados **mpf** e **mpfa** (Figs. 5.29 e 5.30) mostram 13 ocorrências minerais nas áreas correspondentes às classes maiores que 5.

A partir dessas considerações gerais, é importante analisar individualmente algumas áreas definidas como de alto potencial mineral, de maneira a produzir exemplos interpretativos que posteriormente poderão ser estendidos para as demais áreas de alta favorabilidade mineral, de acordo com suas prioridades. Notar que, qualquer interpretação exploratória, deve sempre ser feita com base no modelo de exploração (San Gregorio) definido para a área.

A **primeira área** selecionada para análise em maior detalhe nessa discussão é a área do entorno da Mina San Gregorio. Como pode ser visualizado a partir dos mapas prospectivos, essa área, cuja localização central situa-se ao redor de $55^{\circ} 30' 25''$ W e $31^{\circ} 35' 00''$ S, possui grande extensão em área nos mapas **fuzzy** (método Lógica Difusa), estendendo-se para porções mais a NW da **ICR**. No mapa **uniq4b** (Método Pesos de Evidência), esse alvo cobre uma menor extensão em área, mais centrada sobre a Mina San Gregorio. Porém, a área mostra altos índices de favorabilidade total em todos os mapas previsionais.

A área da Mina San Gregório abrange oito (8) ocorrências minerais conhecidas, levando-se em consideração os mapas *fuzzy*. O alto índice de favorabilidade dessa área deve-se aos altos valores atribuídos por praticamente todos os Fatores de Integração, com exceção parcial do Fator LANDSAT, cujas evidências apresentaram valores mais baixos para determinadas porções desse local, talvez por interferências causadas pela vegetação. Nessa área, dois fatores mostraram evidências altamente relacionadas à potencialidade mineral da região: Fator Estrutural e Fator Geofísico.

O Fator Estrutural, por meio das evidências baseadas na delimitação de fotolineamentos das estruturas do Sistema de Cisalhamento Rivera (**SCR**), apresentou alto grau de importância e influência no controle de depósitos minerais, pois produziu áreas de transtração com capacidade de alojar ocorrências minerais. Na área em questão, a influência dos lineamentos foi definitiva ao produzir a estrutura em *duplexing at bends* dilatacionais formadas por falhas, fraturas e faixas miloníticas do tipo **R** e **P**, que condicionaram e aprisionaram os fluidos mineralizantes para gerar a Mina San Gregorio. Além disso, a delimitação de fotolineamentos permitiu a visualização de uma estrutura elíptica a sul-sudoeste de San Gregorio, a qual pode estar evidenciando uma intrusão cuja participação pode ter sido decisiva na geração das minas San Gregorio, Santa Tereza e San Antonio. Essa estrutura elíptica mostra duas áreas de transtração (zonas de sombra de pressão), posicionadas nas extremidades do eixo ESE-WNW.

A geometria intensamente anastomosada das estruturas do **SCR**, com inflexões de ESE para SSE na porção oeste da **ICR**, gerou um grande número de zonas dilatacionais (*duplexing at bends* e *splays*), propícias para alojar corpos mineralizados. Além disso, deve-se notar a provável ocorrência de algumas intrusões básicas, na forma de estruturas circulares e diques, identificadas no campo e nas imagens de satélite (Figs. 4.8, 4.9). Essas litologias de caráter básico possuem alto poder reativo com fluídos sulfetados similares aos fluídos que participaram da geração da Mina San Gregorio (Quadros, 1995; Quadros *et al.*, 1995; Quadros *et al.*, 1996).

Essas feições estruturais foram significativamente valorizadas na atribuição de pesos pela metodologia dirigida pelo conhecimento (Lógica Difusa). Por outro lado, a metodologia dirigida pelos dados (Pesos de Evidência) também auferiu altos contrastes e pesos para esses padrões, em função da íntima associação dessas feições estruturais com as ocorrências conhecidas e da superposição espacial de padrões binários favoráveis nessa região.

As evidências do Fator Geofísico marcaram a existência de forte hidrotermalismo potássico na região de San Gregorio, onde fluidos enriquecidos em K provenientes da rocha encaixante da mineralização tiveram importante participação na mineralização em San Gregorio. Também deve ser notado que as duas áreas de sombra de pressão relacionadas à estrutura elíptica mostraram altos valores de atividade hidrotermal, representada pelos altos índices dos mapas dos padrões kd e Fator F, e pelos baixos valores da razão Th/K. Conseqüentemente, essas feições foram igualmente valorizadas nos dois processos de integração usados nesse trabalho.

O Fator Geoquímico também forneceu altos valores de favorabilidade para suas evidências na área da Minas San Gregorio, o que é indicado pela boa resposta dos dados geoquímicos.

A respeito dessa porção oeste da **ICR**, é importante comentar a respeito de uma suposta grande estrutura semi-circular a elíptica evidenciada pelos dados de aerogama espectrometria, principalmente nos mapas de kd e Fator F. Essa estrutura mede aproximadamente 20 km de diâmetro e é muito similar à estrutura elíptica que ocorre próximo à Mina San Gregorio. Sua posição central aproximada seria as coordenadas geográficas 55° 24' 33" W e 31° 37' 37" S, próximo ao Prospecto Laureles. A estrutura reveste-se de importância porque parece apresentar duas grandes áreas de sombra de pressão (possíveis áreas de transtração); uma sobre a região de San Gregorio e demais minas adjacentes e a outra sobre a área de Zapucay I e II. Os mapas de Kd e Fator F, atestam a possível ocorrência de percolação intensa de fluidos hidrotermais nas áreas transtrativas e o grid Th/K mostra anomalias inversas, sugerindo a existência de hidrotermalismo nas áreas de dilatância.

A **segunda área** de interesse situa-se em uma posição mais central na **ICR**. Localiza-se, mais precisamente, no entorno das coordenadas: 55° 18' 45" S e 31° 41' 00" W. Essa área alvo possui duas ocorrências conhecidas: 1) a Mina Zapucay e 2) a Mina Zapucay II, a primeira delas com considerável volume de minério cubado. A região da Mina Zapucay também tem importância por estar situada em uma posição intermediária em relação à compartimentação tectônica postulada para a **ICR** (ver Cap. 1): a região oeste representa uma posição crustal mais rasa, de menores temperaturas e pressões e com deformação de caráter mais frágil, enquanto a região leste representa uma posição crustal mais profunda, de temperaturas e pressões mais elevadas e deformação de caráter mais dúctil. Essa caracterização tem uma segunda e importante implicação em termos de processo de mineralização: em níveis crustais mais rasos, os depósitos tendem a apresentar grandes

volumes de minério com teores mais baixos, enquanto os depósitos de níveis crustais mais profundos mostram teores mais altos, mas volumes significativamente menores. De qualquer maneira, o Modelo de Exploração definido para a **ICR** comporta essa variação de características, pois o Modelo San Gregorio situa a mineralização em um ambiente intermediário entre condições tipicamente epitermais e condições tipicamente mesotermiais.

Nessa área alvo, as estruturas tectônicas já ocorrem segundo um caráter mais dúctil. Isso pode ser verificado, por exemplo, na área na Mina Zapucay, onde observa-se a ocorrência de foliação milonítica e também venulações arqueadas em dobra, possivelmente perturbadas por nova zona de cisalhamento. Porém estruturas de caráter mais frágil como falhas e fraturas também encontram-se presentes, indicando um ambiente intermediário entre os dois blocos distintos postulados para a **ICR**.

Na área da Mina Zapucay, praticamente todas as evidências de todos os fatores registram alto potencial mineral. Conseqüentemente, os mapas previsionais finais mostram índices de alta favorabilidade para a região. Isso evidencia o alto potencial mineral em termos da existência de estruturas de distensão favoráveis e de percolação de fluidos hidrotermais; mostra, também, uma ótima resposta geoquímica em termos prospectivos. Esse alto potencial também é manifestado pela resposta radiométrica detectada nas imagens de satélite e, ainda, pelas feições geomorfológicas visualizadas com o **MDT**. A área alvo da Mina Zapucay ocorre adjacente a uma intersecção de estruturas geomorfológicas (ver mapa Fig. 4.50), fato comum de posicionamento de depósitos minerais que ocorrem em áreas interceptadas por sistemas de cisalhamento como por exemplo a área Red Lake, Ontário, Canadá (Colvine, 1988). Nessas áreas, as estruturas encontram-se espacial e geneticamente relacionadas aos depósitos minerais; deve-se notar, no entanto, que essa estrutura não é evidenciada pelos fotolineamentos **tipo 1**. Assim, é necessária uma avaliação cuidadosa de campo para esclarecer a existência dessa estrutura.

A **terceira área** de análise está situada na porção leste da **ICR**, mais precisamente no entorno da posição geográfica $54^{\circ} 41' 40''$ W e $31^{\circ} 45' 40''$ S. Essa área localiza-se próxima à cidade de Vichadero e mostra altos índices de favorabilidade mineral nos mapas previsionais finais. Essa favorabilidade é um reflexo do alto potencial mineral apresentado pela maioria das evidências usadas na integração. A forma geométrica dessa área parece ser o resultado da influência direta das evidências do Fator Estrutural e do **MDT**, o qual reflete geomorfologicamente a conformação das

estruturas na maior parte da **ICR**. Nesse bloco leste da **ICR**, as estruturas apresentam um comportamento mais dúctil, onde as zonas de cisalhamento estão relacionadas com dobras *en échelon* em uma tectônica tipo *Wrench Fault*. Essas estruturas parecem ter exercido grande influência no potencial mineral da área, onde estruturas tipo *leg reefs* e *saddle reefs* (charneira de dobras) associadas a *splays* e *duplexing at bends* (zonas de cisalhamento) tiveram influência definitiva na geração de mineralizações.

A área de Vichadero também mostra forte influência das evidências que representam as bacias de concentrados de minerais pesados (**bacpann** e **bacpanb**), as quais mostram teores de ouro acima de 1200 ppb para a região. Com relação ao Fator Geoquímico, é importante notar que: 1) apesar da evidência representativa das bacias de sedimentos de corrente (**bacsedn**) não apresentar dados para a região, uma bacia adjacente à área alvo, situada a sul, mostra teores de mais de 300 ppb de ouro, e 2) a evidência representada pelas amostras de **BLEG (babgcp2n)** mostra duas bacias com classe 4 (a classe de maior contraste segundo o método Pesos de Evidência foi a classe 5), adjacente e à jusante da área alvo, uma situada a sul e outra situada a leste.

As evidências do Fator Geofísico também apresentaram alto potencial mineral para a área de Vichadero. A esse respeito, convém ressaltar que é necessário uma avaliação de campo mais completa, visto que a área parece ser composta por um granito com pórfiros de feldspato potássico; esses fenocristais de feldspato potássico podem ser responsáveis por parte das anomalias de Kd e Fator F, visto que minerais KF de maior granulometria são relativamente resistentes ao intemperismo e poderiam estar presente em solos derivados do granito (Dickson & Scott, 1997) e estão preservados no granito.

A análise das demais áreas definidas como de alta favorabilidade mineral nesse estudo deve seguir os mesmos critérios enumerados anteriormente para as porções oeste, central e leste da **ICR**. Os pesos relativos das evidências de favorabilidade mineral, em cada uma das áreas discutidas detalhadamente, deve ser considerado no momento da realização dos trabalhos de investigação de semi-detalle e de detalle. Assim, o planejamento da pesquisa deve levar em conta principalmente as evidências que forneceram melhores indicativos.

O Fator Estrutural, no entanto, mostrou ser a evidência mais importante na integração de dados e, assim, sugere-se que a compartimentação tectônica da **ICR** e, evidentemente, o modelo de depósito (San Gregorio) sejam observados com cuidado nos trabalhos de semi-detálhe e de detalhe. Sob o aspecto estrutural, cujos mecanismos e padrões mostram-se em íntima e definitiva relação com a ocorrência de corpos mineralizados, deve-se observar, mais uma vez, que as estruturas da área oeste apresentam um comportamento um pouco diferente em relação às estruturas da porção leste da **ICR**. Consideradas essas condições, pode-se enumerar um conjunto de elementos importantes para serem observados, quando dos trabalhos de detalhe nos diferentes compartimentos da **ICR**.

As estruturas do bloco oeste comportam-se com um caráter mais frágil, em virtude de seu posicionamento crustal mais raso e, em função disso, devem ser prioritariamente analisadas feições como:

- 1) intensidade, abrangência em área e tipologia da alteração hidrotermal associada às estruturas (faixas de cisalhamento, *duplexing at bends*, *splays*, zonas de sombra de pressão, intersecção de zonas de cisalhamento);
- 2) intensidade e padrão geométrico, dinâmico e cinemático de venulações em função de análise de *stress* prévia;
- 3) ocorrência de minerais de alteração nas vênulas de quartzo; e
- 4) intensidade de deformação por meio de feições tipo faixas protomiloníticas e miloníticas, clivagens de fratura, brechas cataclásticas, brechas hidrotermais.

As estruturas do bloco leste, em função do posicionamento crustal mais profundo, devem ser investigadas de acordo com um modelo estrutural de *Wrench Tectonics* e a pesquisa mineral requer a observação de feições como:

- 1) intensidade de alteração hidrotermal associada às estruturas (*leg reefs*, *saddle reefs*, *splays*, zonas de sombra de pressão e intersecções de zonas de cisalhamento). Deve-se observar a possível existência de minerais de alteração estáveis em pressões e temperaturas um pouco mais altas em relação ao bloco oeste, equivalentes à facies xisto verde superior e fácies anfíbolito;

- 2) intensidade e padrão geométrico, dinâmico e cinemático de venulações em função de análise de *stress* prévia;
- 3) ocorrência de minerais de alteração nas venulações;
- 4) intensidade de deformação por meio de feições como foliação milonítica com transposição, foliação milonítica sem transposição, clivagem de fratura.

A resposta do Fator Geofísico nas diferentes áreas alvo identificadas também sugere a adoção de métodos geofísicos terrestres nos levantamentos de semi-detalhe e detalhe. De acordo com os resultados alcançados a partir da análise do levantamento aerogeofísico, a utilização da gamaespectrometria e da magnetometria terrestres podem constituir ferramentas importantes na seleção, delimitação e modelamento de anomalias produzidas por corpos mineralizados. Os métodos de gamaespectrometria e de magnetometria terrestres são de custo reduzido, fácil aquisição e processamento e podem ser integrados com dados de geoquímica de solos para orientar a execução de trincheiras e de sondagens.

6.2 Conclusões e recomendações

Os objetivos básicos dessa Tese de Doutorado foram a aplicação, a experimentação e a implementação de metodologias de integração de dados georreferenciados, formuladas a partir de premissas básicas opostas, na exploração mineral de uma mesma área de pesquisa. É importante, porém, antes de discutir com maior especificidade as duas metodologias testadas nesse trabalho, tecer algumas considerações a respeito do uso de um Sistema de Informações Geográficas (**SIG**) no trabalho de exploração mineral.

Muito esforço tem sido dispendido na criação de bases (ou bancos) de dados digitais espacialmente georreferenciados. Da mesma forma, um grande esforço tem sido dispensado pela comunidade **SIG** no aprendizado e no desenvolvimento de metodologias de processamento e de integração de dados espaciais em ambiente **SIG**; afinal, de acordo com Câmara (1999), “*combinar dados para gerar informação nova é um dos maiores desafios no uso das geotecnologias*”.

Esse trabalho permitiu a observação de algumas das inúmeras vantagens do uso da integração de dados baseada em tecnologia **SIG**, com o objetivo de mapeamento de favorabilidade mineral. As principais contribuições podem ser assim resumidas:

- 1) a partir da coleta e do armazenamento dos dados espacialmente georreferenciados no SIG, segundo um mesmo sistema de projeção cartográfica, antigos problemas com a sobreposição de mapas em diferentes escalas e projeções com o uso de mesas de luz foram eliminados;
- 2) o processamento dos dados brutos, de maneira a permitir a extração de informações derivadas, possibilitou uma utilização mais otimizada e completa dos dados originais. Um grande volume de dados novos, coletados ainda durante o processo de integração, é possível de ser utilizado de maneira prática e rápida;
- 3) análises interrogativas dos mapas e das tabelas de atributos geradas permitiram um melhor entendimento dos dados e de suas interrelações;
- 4) a integração dos dados baseada em um modelo de exploração previamente desenvolvido permitiu um melhor conhecimento das características geológicas dos padrões utilizados na pesquisa mineral da região, das suas interrelações e do grau com que elas influenciam os resultados. Esse fluxo de conhecimento colaborou sobremaneira no processo de tomada de decisão para a definição de pesos para as evidências usadas na integração, o que aumentou o grau de confiança nos resultados do trabalho, principalmente no uso da metodologia balizada pelo conhecimento;

As duas metodologias testadas (Pesos de Evidência e Lógica Difusa) apresentaram uma boa confiabilidade na identificação de áreas potencialmente favoráveis. No entanto, é importante discutir algumas premissas básicas para estabelecer a seleção do melhor método. A primeira premissa refere-se ao sucesso do método em identificar, como áreas potenciais, as áreas que já contêm ocorrências conhecidas. A segunda premissa está relacionada ao tamanho das áreas definidas como potencialmente favoráveis; considerando que um dos objetivos do mapeamento de favorabilidade mineral e da exploração mineral é a redução da área de pesquisa para os futuros trabalhos de semi-detalle e detalle, uma boa redução da área de estudo é um bom indicador da efetividade do método. A terceira premissa diz respeito à relação custo-benefício, ou seja, a relação entre 1) considerações associadas ao tempo de processamento e à complexidade da metodologia, inclusive

em termos operacionais e de dificuldade de implementação, que, obviamente, tem reflexos financeiros para a empresa de exploração, e 2) os benefícios proporcionados pelos resultados obtidos com o uso dessas metodologias. É importante, ainda, salientar que a escolha do melhor método é sempre uma decisão muito subjetiva e depende da confiança que cada especialista tem nos aspectos conceituais inerentes a cada método. Por fim, também parece importante ter em mente que há vantagens e desvantagens provenientes de cada uma das duas metodologias.

O método Pesos de Evidência é balizado pelo modelamento dirigido pelos dados e mostrou-se muito objetivo, visto que evitou a escolha dos pesos baseada apenas no conhecimento do pesquisador. Esse método também possibilitou o modelamento das incertezas inerentes aos pesos a partir de suas variâncias e o modelamento da ausência de dados em porções da área estudada; a ausência de dados em determinados setores das áreas de pesquisa é um caso muito comum na exploração mineral, principalmente quando se trata de evidências geoquímicas, onde a cobertura e a densidade de amostragem raramente abrangem a totalidade da área de maneira satisfatória. Esse método obteve melhor resultado do que o método Lógica Difusa na redução da área de trabalho; as áreas potencialmente favoráveis identificadas por meio do método Pesos de Evidência têm menor extensão em área e o método, portanto, mostra um resultado mais conservador.

O método Pesos de Evidência, no entanto, apresenta grandes dificuldades de implementação e operacionalização. A implementação e a operacionalização do método Pesos de Evidência requerem muito cuidado com relação a detalhes como por exemplo: 1) a ausência de dados em determinadas porções da área em estudo, 2) a presença de dados nas porções onde o processamento de corredores de proximidade não foi calculado, e 3) a ocorrência de padrões favoráveis com grande extensão em área que geram problemas de **IC**. Além disso, a maioria dos **SIGs** atualmente disponíveis no mercado não dispõem de muitas ferramentas para sua aplicação. Sob esse enfoque, o *software* SPANS-GIS possui algumas ferramentas fundamentais para a utilização da metodologia; recentemente, Agterberg & Bonham-Carter (1999) informam a implementação da metodologia no módulo Arcview Extension WofE do *software* ArcInfo/ArcView.

A principal limitação do método Pesos de Evidência, no entanto, parece estar relacionada à sua premissa básica de existência de independência condicional (**IC**) entre as evidências. Os

processos geológicos que formam os depósitos minerais constituem-se necessariamente em correlações entre elementos químicos e minerais (variáveis) formadores dos depósitos. Por conseguinte, as evidências geológicas, geofísicas e geoquímicas (além de outras) usadas na integração de dados para mapeamento mineral devem mostrar variados graus de dependência, de acordo com as correlações manifestadas. Desse modo, deve-se ter em mente que a premissa básica da pesquisa mineral consiste na identificação das correlações entre variáveis e na sua utilização como critério prospectivo; em resumo, vale dizer que as variáveis que não apresentam qualquer tipo de correlação não são utilizadas em prospecção.

Uma segunda limitação do método Pesos de Evidência está relacionada com o teste geral de **IC**. Esse teste verifica o número de depósitos previstos para a área e parte da premissa de que a probabilidade prévia (*a priori*) é a média da densidade de depósitos pontuais conhecidos. O teste geral de Independência geralmente indica um certo grau de dependência entre as evidências utilizadas, mesmo que os testes de independência condicional calculados par a par apresentem valores abaixo dos limites de χ^2 tolerados. Valores muito elevados de χ^2 e/ou dos resultados do teste geral, conduzem à eliminação de certas evidências (**PIs**), ou forçam a utilização de pré-integrações, ou provocam o uso de combinações não muito desejáveis, de maneira a diminuir distribuições em áreas mais extensas que resultam em somatórias de pesos W^+ muito elevadas devido à coincidência de padrões favoráveis. Dessa forma, o teste geral de Independência parece possuir, dependendo da situação, uma contradição em relação ao objetivo maior de encontrar novos depósitos minerais, pois resulta na predição de um alto número de depósitos minerais (bem maior que o nº de depósitos minerais conhecidos) quando as evidências utilizadas indicam boa favorabilidade mineral na forma de altos valores de probabilidade *a posteriori*, e essa condição implica em problemas de independência condicional de acordo com o teste geral.

Em outras palavras, altos valores de probabilidade *a posteriori*, de acordo com os procedimentos analíticos definidos pelo método Pesos de Evidência, acusam problemas de independência condicional no teste geral de **IC**, na medida em que o número de depósitos minerais previsto não pode ser muito superior ao número de ocorrências conhecidas *a priori*. Na prática da pesquisa mineral, essa exigência não pode ser considerada como válida, pois o objetivo é selecionar as áreas que apresentem o maior número de correlações, em termos de **suficiência** e **necessidade**, favoráveis entre as variáveis utilizadas. Sobre esse problema, mapas de probabilidade final resultantes da metodologia devem ser interpretados em um sentido relativo, relegando a um segundo

plano a consideração da magnitude das probabilidades; com isso, a comum ausência de independência condicional, em geral, não se mostra visível nos mapas de probabilidade final, desde que é distribuída entre as variáveis utilizadas e não muda a classificação das áreas de favorabilidade.

Uma última restrição ao método refere-se ao fato de que ele funciona melhor em áreas já parcialmente estudadas e onde muitos depósitos e/ou ocorrências minerais são conhecidas. Por outro lado, há estimadores do potencial mineral em termos de nº de depósitos não conhecidos (*mineral endowment*) de áreas pouco estudadas, de maneira a possibilitar a utilização da metodologia Pesos de Evidência também nessas áreas.

O método Lógica Difusa, por outro lado, depende do estabelecimento de um modelo de exploração correto, confiável e bem definido. Isso implica no completo conhecimento dos processos geológicos envolvidos para a estimativa da importância relativa das evidências. A presença de ocorrências minerais conhecidas apenas contribui de maneira informativa, mas não é condição necessária para sua aplicação.

O método Lógica Difusa permite uma aplicação mais flexível a partir do uso de redes de inferência construídas com o auxílio de uma boa variedade de operadores difusos e possibilita a utilização de evidências multiclasse. A aplicação de valores da função-membro Lógica Difusa é balizada pelo conhecimento do pesquisador em relação à importância das evidências e isso é feito de uma maneira intuitiva, subjetiva; a definição dos valores da função-membro Lógica Difusa também não depende de metodologias numéricas, que usualmente não são muito familiares aos especialistas da área de exploração mineral.

A aplicação do método Lógica Difusa em ambiente **SIG** torna-se, então, mais fácil e rápida que o método Pesos de Evidência, o que auferi à Lógica Difusa uma boa relação custo-benefício. Além disso, a classificação contínua possibilitada pelo modelamento permite a execução de uma análise também contínua e o estabelecimento de uma superfície de decisão com base na variação contínua da grandeza analisada (no caso, potencial mineral). Esses elementos permitem a construção de cenários com diferentes compromissos de tomada de decisão, que são compatíveis com modernas teorias e técnicas de Suporte à Decisão, como a Analytical Hierarchical Process (**AHP**), atualmente já utilizada em alguns sistemas **SIG** (Eastman, 1997).

A dificuldade do método Lógica Difusa fica a cargo do problema de definir os valores de função-membro Lógica Difusa, principalmente se o especialista em integração não tiver um contato mais íntimo com as atividades práticas de pesquisa, ou com a equipe de pesquisa. Essa dificuldade de contato entre as várias equipes é um fato corriqueiro em grandes empresas, onde as equipes de campo, muitas vezes, não têm contato com o pessoal do geoprocessamento.

O método Lógica Difusa mostrou maior eficiência do que o método Pesos de Evidência, no objetivo de definir áreas potenciais em locais de ocorrência de depósitos conhecidos na **ICR** e apresentou um resultado final mais otimista. De qualquer maneira, pode-se dizer que os resultados alcançados, independente da metodologia utilizada, dependem predominantemente da confiabilidade dos modelos conceitual e de exploração implementados para a área em estudo.

É importante, também, salientar o caráter multidisciplinar da tecnologia **SIG**, que força o especialista em geoprocessamento a ter um bom trânsito em praticamente todas as áreas da pesquisa mineral (geologia, geoquímica, geofísica, sensoriamento remoto, etc.), além de conhecimentos de estatística, geoestatística e cartografia. No trabalho de mapeamento de favorabilidade mineral, isso parece ser de extrema relevância, visto que a importância da escolha das evidências a serem utilizadas na integração, resultado de um pré-processamento orientado ao objetivo, é tão, ou até mais importante que os pesos dados aos mapas.

A execução do trabalho de integração de dados possibilitou, também, o desenvolvimento metodológico de procedimentos de conversão e entrada de dados no **SIG SPANS**; problemas constantes e inerentes à implantação e ao desenvolvimento de novas tecnologias de integração de dados e de novos programas de **SIG**.

Os resultados desse estudo devem ser utilizados como um guia para a continuidade dos trabalhos de pesquisa na **ICR**, principalmente em escala de semi-detalle. Porém, é necessário ressaltar que esse trabalho não termina aqui, mas pode e deve ser continuado e implementado com a inclusão de trabalhos de mapeamento geológico-estrutural e de alteração hidrotermal que contribuam com a evolução da cartografia geológica da região, ainda muito preliminar. Os resultados desse mapeamento também permitirão um refinamento dos dados geofísicos, de maneira a implementar o seu reprocessamento em populações separadas de acordo com unidades geológico-estruturais. Os novos mapas aerogeofísicos produzidos poderão, ainda, passar por pré-integrações

com dados provenientes de satélites de última geração com maior resolução espacial e espectral, de maneira a gerar novos produtos de sensoriamento remoto que contenham mais informações, em termos de qualidade e quantidade, passíveis de utilização no mapeamento de favorabilidade mineral.

Estudos de maior detalhe na área leste da **ICR**, são também desejáveis, na tentativa de estabelecimento de um modelo de depósito mais completo e definitivo para toda a **ICR**, ou, se esse for o caso, o estabelecimento de um modelo de depósito específico para essa porção estruturalmente mais dúctil da **ICR**, visto que o Modelo San Gregorio usado nesse trabalho foi elaborado com base em uma maior quantidade de informações da porção oeste da região, de profundidade crustal mais rasa. Porém, parece que, a partir dos resultados e observações descritas nesse estudo, o bloco oeste é mais promissor em termos de mineralizações. Além disso, a proximidade com a usina de beneficiamento de San Gregorio é um fator importante na potencialidade da área, pois melhora a relação custo-benefício de qualquer prospecto que venha a ser encontrado nesse bloco oeste.

Ainda, a posição crustal, mais rasa, desse bloco, indica também uma maior potencialidade mineral para essa região. A respeito dessa área, sugere-se, por fim, um estudo em detalhe na suposta grande estrutura semi-circular salientada pelos mapas aerogeofísicos, pois a confirmação da existência dessa estrutura pode aumentar o conhecimento sobre os mecanismos de geração das principais minas conhecidas na região e confirmar a existência de duas grandes áreas de alta favorabilidade mineral nas porções de sombra de pressão relacionadas a essa estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, J.A.S. & GASPARINI, P. 1970. **Gamma ray spectrometry of rocks**, Elsevier Publ. Co., New York, 295 p.
- AGTERBERG, F. P. 1989. Computer programs for mineral exploration. **Science**, Vol. 245:599-614.
- AGTERBERG, F. P. 1992. Combining indicator patterns in weights of evidence modeling for resource evaluation. **Nonrenewable Resources**, Vol. 1 (1):39-50.
- AGTERBERG, F. P. & BONHAM-CARTER, G. F. 1990. **Deriving weights of evidence from geoscience contour maps for the prediction of discrete events**. IN: Computer Applications in the Mineral Industries. Proc. 22nd Intern. Symposium APCOM, Berlin, Technical Univ., Berlin, Vol. 2:381-396.
- AGTERBERG, F. P. & BONHAM-CARTER, G. F. 1999. **Logistic regression and weights of evidence modeling in mineral exploration**. IN: Computer Applications in the Mineral Industries, Proc. 28th Intern. Symposium APCOM'99, Colorado, USA, p. 583-590.
- AN, P., MOON, W. M., & RENCZ, A. 1991. Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data. **Canadian Journal of Exploration Geophysics**, Vol. 27, p. 1-11.
- AMARO, V. E.; JARDIM de SÁ, E. & VAUCHEZ, A. 1991. **Foto-análise preliminar dos lineamentos brasileiros da porção central da Província**

Borborema. IN: Simpósio de Geologia do Nordeste, 14, Recife (PE), SBG/NE, **Atas...**, p. 306-309.

AMARO, V. E., JARDIM de SÁ, E., VAUCHEZ, A. & DUARTE, M. I. M. 1993. **Integração e análise de imagens multiespectrais na melhoria da interpretação geotectônica da Província da Borborema (NE do Brasil).** IN: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7, Curitiba (PR).

AMARO, V. E. & STRIEDER, A. J. 1994. **Análise de fotolineamentos e de padrões estruturais em imagens de satélite.** IN: 38º Congresso Brasileiro de Geologia, Bal. Camboriú, S. C., Brasil, Bol. Res. Exp., Vol 1: 443-444.

ARCELUS, H. C. 1990. **Estado do conhecimento de indícios de ouro no Uruguai.** IN: Seminário de Metalogenia do Ouro – Curso de Pós-graduação Inst. Geociências, UNB, 14 p.

ARONOFF, S. 1991. **Geographic information systems: a management perspective.** Canadá, WDL Publications, 224 p.

BARKER, A. J. 1990. **Introduction to metamorphic textures and microstructures.** New York, Blackie & Son Ltd., 170p.

BARTON, P. B. 1986. Preface. IN: Cox, D. P. & Singer, D. A **Mineral deposit models**, U.S. Geological Survey Bull. Nº 1693 III-IV, p. 4-9.

BHATTACHARYA, A., KAMAJARU, M. V. V., MEHTA, D. S., SHRIMAL, A. K. & REDDY, G. S. 1993. Mathematical modelling for mineral exploration: a case study from Rajpura-Dariba-Lunera mineralized belt, Rajasthan, Índia. **ITC Journal**, Vol 4:360-366.

BETTER SOLUTIONS CONSULTING LIMITED LIABILITY COMPANY AND RESEARCH SYSTEMS INC. 1997. **ENVI User's Guide.** The Environment for Visualizing Images Version 2.6.

- BETTER SOLUTIONS CONSULTING LIMITED LIABILITY COMPANY AND RESEARCH SYSTEMS INC. 1999. **ENVI User's Guide**. The Environment for Visualizing Images Version 3.0.
- BONHAM-CARTER, G. F.; AGTERBERG, F. P.; WRIGHT, D. F. 1988. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol. 54 (11):1585-1592.
- BONHAM-CARTER, G. F.; AGTERBERG, F. P.; WRIGHT, D. F. 1989. Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential. IN: Agterberg, F. P. AND Bonham-Carter, G. F. (eds.), **Statistical Applications in the Earth Sciences**, Geological Survey of Canada Paper 89-9, p. 171-183.
- BONHAM-CARTER, G. F. 1991. Integration of geoscientific data using GIS. IN: Maguire, J. D.; Goodchild, M. F.; Rhind, D. W. (eds.) **Geographical information systems: principles and applications**. London, Longman, Vol. 1:171-188.
- BONHAM-CARTER, G. F. 1994a. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. Ontário, Canadá, Pergamon, 398p.
- BONHAM-CARTER, G. F. 1994b. When to use the weights of evidence method for map data. IN: **Proceedings of Workshop on Spatial Modelling**, Macaulay Land Research Institute, Aberdeen Scotland, September 1-2, p. .
- BOSSI, J. 1965. Predevoniano en el Uruguay. **Bol. Fac. Agron. n?78**, Montevideo, Uruguay, 108p.
- BOSSI, J. 1966. **Geologia del Uruguay**, Depto. Publ. Univ., Col. Ciencias n? 2, Montevideo, Uruguay, 398p.
- BOSSI, J. 1979. **Recursos minerales del Uruguay**. Edic. Daniel Aljanati, Montevideo, Uruguay, p. 114-117.
- BOSSI, J. 1983. Breve reseña sobre el conocimiento geológico del escudo Predevoniano en Uruguay (Sud América); 2 bl. **Geol. Paleont.** Vol. 1 (3,4): 417-419.

- BOSSI, J. 1987. **Evidências geológicas sobre la possible existência de um núcleo cratônico de más de 2.000 Ma. en el noroeste de Uruguay.** IN: Atas do III? Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, Vol. 2:821-832.
- BOSSI, J. & CAMPAL, N. 1993. **Magmatismo y tectónica transcurrente durante el Paleozoico inferior en Uruguay.** IN: Simposio Interno sobre Paleozoico Inferior de Latinoamérica, Salamanca, Univ. Extremadura, **Actas...**, p.343-356.
- BOULTER, C. A.; FOTIOS, M. G. & PHILLIPS, G. N. 1987. The Golden mile, Kalgoorlie: A giant gold deposit localized in ductile shear zones by structurally induced infiltration of an auriferous metamorphic fluid. **Economic Geology**, Vol 82 (7):1661-1678.
- BRIGGS, I. C. 1974. Machine countouring using minimum curvature, **Geophysics**, Vol. 39 (1):39-48.
- BURROUGH, P. A. 1986. **Principles of geographical information systems for land resources assesment**, Clarendon Press, Oxford, 194p.
- EBDON, D. 1992. Spans – a quadtree-based GIS. **Computer & Geosciences**, Vol. 18:471-475.
- CÂMARA, G.; CASANOVA, M. A.; HEMERLY, A. S.; MAGALHÃES, G. C. & MEDEIROS, C. M. B. 1996. **Anatomia de sistemas de informação geográfica.** 10º Escola de computação, Inst. de Computação, UNICAMP, 193p.
- CÂMARA, G. 1999. Mapas são dados, não desenhos. **InfoGeo**, Jan/Fev, p. 33-34.
- CARLSON, G. R. 1997. A new era dawns for geospatial imagery. **GIS World**, March, p. 36-40.
- CATTELL, R. B. 1966. The scree test for the number of factors. **Multivariate Behavioral Research**, Vol. 1:245-276.
- CLARKE, K. C. 1990. **Analytical and computer cartography.** New Jersey, Prentice Hall, 290p.

- COLVINE, A. C.; FYON, J. A.; HEATHER, K. B.; MARMONTS, S.; SMITH, P. M. & TROOP, D. G. 1988 **Archean lode gold deposits in Ontario**. Ontario Geological Survey, Miscellaneous Paper, 139. Ontário, Canadá, 139p.
- CORDANI, U. G. & SOLIANI Jr., E. 1990. **Idades K-Ar e Rb-Sr das ilhas cristalinas de Rivera e Aceguá (Uruguai e Rio Grande do Sul, Braisil) e seu enquadramento no contexto tectônico regional**. IN: An. Acad. Bras. Cien., Vol 62 (2):145-156.
- CROSTA, A. P. & McM. MOORE, J. 1989. **Enhancement of landsat thematic mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain**. IN: Proceedings of the 7th (ERIM) Thematic Conference: Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary, p. 1173-1187.
- CROSTA, A. P. 1996. **Sensoriamento remoto de alta resolução: novas ferramentas para o monitoramento ambiental, urbano e de recursos naturais**. IN: GIS BRASIL, Curitiba, p. 583-593.
- CROSTA, A. P. & SOUZA, C. R. 1997. Sensoriamento remoto. Anuário **Fator GIS – Opiniões de Especialistas**, p. 10-21.
- CUNHA, F. S. S., da; GOTTARDO, E. & STRIEDER, A. J. 1996. **Characterization of different lineaments types from TM-5 LANDSAT images and their application to control of gold-quartz veins in Porto Nacional (TO) region, Brazil**. IN: Intern. Archives on Photogrametry and Remote Sensing Commission VII, Wien (Austria). Vol. 31 (B7):172-177.
- DAROCZI, I.; GARCIA, E.; GIROLA, G.; LIGÜERA, M.; RITA, G. & VICO, E. 1987. **Uruguai síntese geográfica**. Montevideo, Editorial Monteverde y Cia. S.A., 84p.
- DAVIS, J. C. 1986. **Statistics and data analysis in geology**, 2nd Ed.: NY., John Wiley and Sons, 646p.
- DEUTSCH, C. V. & JOURNAL, A. J. 1996. **GSLIB: Geostatistical software library and user's guide**, 2nd Ed., Oxford, Oxford University Press, 360p.

- DICKSON, B. L. & SCOTT, K. M. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, Vol .17 (2):187-200.
- EASTMAN, J. R. 1997. **Idrisi for windows**, Version 2.0, User's Guide. Clark University, USA.
- EFIMOV, A.V. 1978. **Multiplikativniyj pokazatel dlja vydelenija endogennykh rud aerogamma-spectrometriceskim dannym**. IN: *Metody rudnoj geofiziki*. Leningrad, Naucno-proizvodstvennoje objedinenie Geofizica ed, p. 12-23.
- EXPLORANIUM, I.A.E.A. Report 1991. **Airborne gamma-ray spectrometer surveying**, Technical Report n° 323, 97p.
- FABBRI, A. G. 1984. **Image processing of geological data**. Van Nostrand Reinhold, NY., 244p.
- FANG, J. H. 1997. Fuzzy Logic & Geology. **Geotimes**, October, p. 23-26.
- FELGUEIRAS, C. A. 1999. **Modelagem numérica de terreno**. IN: Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A. M. V.; Paiva, J. A.; D'Alge, J. C. L., Eds. *Geoprocessamento: Teoria e Aplicações*. <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/>.
- FELGUEIRAS, C. A. & CAMARA, G. 1993. **Sistema de Informações Geográficas do INPE**. IN: *Sistemas de Informações Geográficas, Aplicações na Agricultura*. Brasília, DF, p. 41-59.
- FERRANDO, L. & FERNANDEZ, A., 1971. **Esquema tectônico-cronoestratigráfico del Predevoniano en Uruguay**. IN: *Anais do XXV? Congresso Brasileiro de Geologia* Vol. 1:199-210.
- FIGUEIREDO, B. R. 1992. Modelos de depósitos minerais. **Bol. IG-USP, Sér. Cient.**, Vol. 23:75-95.
- FREY, M.; HUNZIKER, J.C.; O'NEIL, J.R. & SCHWANDER, H.W. 1976. Equilibrium-disequilibrium relations in the Monte Rosa granite, Wester Alps:

petrological, Rb-Sr and stable isotope data. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, Vol. 55:147-179.

GALBRAITH, J. H. & SAUNDERS, D. F. 1983. Rock classification by characteristics of aerial gamma-ray measurements, **J. Geochemical Exploration**, Vol 18:47-73.

GEOOSOFT, OASIS MONTAJ 1997. **Data processing and analysis (DPA) system for earth science applications**, User Guide Version 4.1, Canada, 290p.

GLIKSON, A. Y. 1997. Mineral-mapping in the north Pilbara Craton. A directed principal components of band ratios method for correlating Landsat-5 Thematic Mapper spectral data with geology. **AGSO-Australian Geological Survey Organisation Research Newsletter**, Vol. 26:1-4.

GNOJEK, I. & PRICHYSTAL A. 1985. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in Northern Moravia (Czechoslovakia). **Geoexploration**, Vol. 23:491-502.

GOODACRE, A., BONHAM-CARTER, G. F., AGTERBERG, F. P. & WRIGHT, D. F. 1993. A statistical analysis of spatial associations of seismicity with drainage patterns and magnetic anomalies in western Quebec. **Tectonophysics**, Vol. 217:205-305.

GOOVAERTS, P. 1997. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York, Oxford University Press, p. 259-435.

GROVES, D. I. 1993. The crustal continuum model for late-Archaean lode-gold deposits of Yilgarn Block, Western Australia. **Mineral. Depos.**, Vol. 28:366-374.

HARRIS, J. R. & MURRAY, R. 1990. HIS transform for the integration of radar imagery with other remotely sensed data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol. 56:1631-1641.

HARRIS, D. P. & PAN, G. 1991. Consistent geological areas for epithermal gold-silver deposits in the Walker Lake Quadrangle of Nevada and California delineated by quantitative methods. **Econ. Geol.**, Vol. 86 (1):142-165.

- HARTMANN, L. A 1987. **Isócrona Sm-Nd de 2.1 Ga em minerais de duas amostras do complexo granulítico Santa Maria Chico, RS.** IN: 1º CBPq, Vol. 1:105-111.
- HARTMANN, L. A.; SILVA, L. C. da; REMUS, M. V. D.; LEITE, J. A. D. & PHILIPP, R. P. 1998. **Evolução geotectônica do sul do Brasil e Uruguai entre 3,3 Ga e 470 Ma.** IN: II Congresso Uruguayo de Geologia, Punta del Este, **Anais...**, p. 277-284.
- HARTMANN, L. A. & NARDI, L. V. S. 1983. **Contribuição à geologia da região oeste do Escudo Sul-rio-grandense.** IN: 1º Simpósio Sul-brasileiro de Geologia, Porto Alegre. **Atas...** p. 09-18.
- HASLETT, J., WILLS, G. & UNWIN, A. R. 1990. SPIDER – An interactive statistical tool for the analysis of spatial data. **International J. Geographical Information Systems**, Vol. 4 (3):285-296.
- HASLETT, J., BRADLEY, R. CRAIG, P. S. , WILLS., G. & UNWIN, A. R. 1991. Dynamic graphics for exploring spatial data, with application to locating global and local anomalies. **American Statistician**, Vol. 45 (3):234-242.
- HASLETT, J. & BRADLEY, R. 1992. **Dynamic graphics linked points, lines and regions with applications to spatial modelling in computer science and statistics.** IN: Keramidis, E. M., ed., Proc. 23rd Symposium on the Interface. Springer-Verlag, NY, p. 425-429.
- HASLETT, J. 1992. Spatial statistics-challenges. **The Statistician**, Vol. 41 (33):271-284.
- HASLETT, J. & POWER, G. M. 1995. Interactive computer graphics for a more open exploration of stream sediment geochemical data. **Computers & Geosciences**, Vol. 21 (1):77-87.
- HODGSON, C. J. 1990. Uses (and abuses) of ore deposit models in mineral exploration. **Geoscience Canada**, Vol. 17 (2):79-89.

- HOOVER, D. B. & PIERCE, H. A. 1990. Annotated bibliography of gamma-ray methods applied to gold exploration. **U.S. Geological Survey Open-File Report 90-203**, 23p.
- HUTTON, D. H. V. 1988. Granite emplacement mechanisms and tectonic controls: inferences from deformation studies. **Trans. R. Soc. Edinburgh Earth Sci.**, Vol. 79:245-255.
- ISAAKS, E. H. & SRIVASTAVA M. R. 1989. **An introduction to applied geostatistics**. New York, Oxford University Press, 561p.
- JENSEN, J. R. 1996. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. Prentice Hall, 316p.
- KAISER, H. F. 1960. The application of electronic computers to factor analysis. **Educational and Psychological Measurement**, Vol. 20:141-151.
- KALAMEJA, A. J. 1996. **AutoCad para desenhos de engenharia**. São Paulo, Makron Books do Brasil Editora Ltda, , 843p.
- KECKLER, D. 1995. **Surfer for windows**, V. 6, Reference Manual, Golden Software, Inc., Colorado, USA.
- KOPPEN, A. 1977. **Geografia do Brasil**. IBGE – Região Sul, Vol. 5:534p.
- KRUSE, F. A.; LEFKOFF, A. B.; BOARDMAN, J. B.; SHAPIRO, A. T.; BARLOON, P. J. & GOETZ, A. F. H. 1993. The spectral image processing system (SIPS) – interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 44:145-163.
- LENZI, J. A. 1993. **Informes sobre o contexto geológico da Ilha Cristalina de Rivera**. Comunicação Pessoal.
- LICHT, O. A. 1998. **Prospecção geoquímica – princípios, técnicas e métodos**. CPRM, 216 p.
- LINDGREN, W. 1933. **Mineral deposits**. 4th Ed. New York, McGraw-Hill Book Co., 930p.

- LOUGHLIN, W. P. 1991. Principal component analysis for alteration mapping. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Vol. 57 (9):1163-1169.
- MAC MILLAN, J. G. 1931. Regiones mineras de Cunapirú, Corrales, Zapucay y Curtume. **Instituto de Geología y Perforaciones**. Montevideo, Uruguay. Boletín nº 14, 43p.
- McCAMMON, R. B. & KORK, J. O. 1992. One-level-prediction – A numerical method for estimating undiscovered metal endowment, **Nonrenewable Resources**, Vol. 1 (2):139-147.
- MANET 1995. **Handbook**, Univ. Augsburg, Áustria, 23p.
- MASQUELIN, H. C. 1993. **Petrografia e feições estruturais dos granulitos da Ilha Cristalina de Rivera, Uruguay**. IN: V Simpósio Sul-brasileiro de Geologia – Bol. Resumos. Curitiba, p. 41-42.
- MASQUELIN, H. C. 1998. **La amalgamación Pré-brasiliana en el Uruguay: interpretación geotectónica a la luz de nuevos datos geocronológicos**. IN: II Congresso Uruguayo de Geología, Punta del Este, **Anais...**, p. 289-293.
- MICROSOFT CORPORATION 1993. **Fortran Visual Workbench** Versão 1.0, manual online.
- MICROSOFT CORPORATION 1997. **Excel** Versão 97, manual Online.
- MIKUCKI E. J. & RIDLEY J. R. 1993. The hydrothermal fluid of Archaean lode-gold deposits at different metamorphic grades: compositional constraints from ore and wallrock alteration assemblages. **Mineral. Deposita**, Vol. 28:469-481.
- MONTEIRO, R. N. 1990. **Geoquímica e geologia estrutural da mina de ouro de Zapucay - Departamento de Rivera, R. O. Uruguai**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-graduação em Geociências, UFRGS, Porto Alegre, 239p.
- MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B. & LADSON, A. R. 1991. **Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications**. IN: Beven K. J. & Moore, I. D. ed., *Terrain analysis and distributed modelling in hidrology*, 249p.

- MUELLER, A. G. & HARRIS, L. B. 1987. **An application of Wrench Tectonic Models to Mineralized Structures in the Golden Mile District, Kalgoorlie, Western Australia.** IN: Recent Advances in Understanding Precambrian Gold Deposits. Ho, S. e. & Groves, D. I. Eds., 387p.
- NARDI, L. & HARTMANN, L. A. 1979. O Complexo Granulítico Santa Maria Chico do Escudo Sulriograndense. **Acta Geológica Leopoldensia**, Vol 3 (6):44-75.
- NAWMANN, M. P. 1984. **O complexo vulcano-sedimentar ultramáfico e granitóides da região de Ibaré, RS.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Geociências, UFRGS, Porto Alegre, 234p.
- O'LEARY, D. W.; FRIEDMAN, J.D. & POHN, H.A. 1976. Lineaments, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. **Geol. Soc. Am. Bull.**, Vol. 87:1463-1469.
- PAN, G. C. 1993. Canonical favorability model for data integration and mineral potential mapping. **Computers & Geoscience**, Vol. 19 (8):1077-1100.
- PAN, G. C. 1996. Extended weights of evidence modeling for the pyseudo-estimation of metal grades. **Nonrenewable Resources**, Vol. 5 (1):53-76.
- PAN, G. C. & HARRIS, D. P. 1992. Estimating a favorability function for the integration of geodata and selection of mineral exploration targets. **Math. Geol.**, Vol. 24 (2):177-202.
- PATERSON, S. R.; VERNON, R. H. & TOBISH, O. T. 1989. A review of criteria for the identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids. **J. of Struct. Geol.**, Vol. 11:349-363.
- PETTINATI, F. 1983. Modelamento digital e representação gráfica de superfícies. IN: Yamamoto, J. K., Representações Gráficas Espaciais em Geociências Auxiliadas por Computador. **Revista Brasileira de Geociências** Vol 18 (1):3-26.
- PEUCKER, T. K. 1978. Data Structures for digital terrain models: discussion and comparison, *apud* Weibel, R. & Heller, M., Digital Terrain Modelling. IN:

- Maguire, D. J.; Goodchild, M. F. & Rhind, D. W **Geographical Information Systems, Principles and Applications**, 3^a ed., 648p.
- PIRES, A. C. B. 1995. Identificação Geofísica de Áreas de Alteração Hidrotermal, Crixás-Guarinos, Góias. **Revista Brasileira de Geociências**, Vol. 25 (1):61-68.
- PRECIOZZI, F. P. ; SPOTURNO, J. P. ; HEIZEN, W. M. & ROSSI, P. K. 1985. **Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000**. Dirección Nacional de Minería y Geología, 90p.
- QUADROS, T.F.P.; KOPPE, J.C. & STRIEDER, A.J. 1995. **Dynamic shear development and mineralization at the San Gregorio Gold Mine, Uruguay**. IN: H.P. Rossmanith ed., Proceedings of the II Intern. Conf. on the Mechanics of Jointed and Faulted Rocks, Viena (Áustria), Abril 1995, A.A. Balkema Publ., Rotterdam (Netherlands), p. 347-353
- QUADROS, T. F. P. 1995. **Geologia e gênese do depósito aurífero da Mina San Gregorio**, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 196p.
- QUADROS, T. F. P. & KOPPE, J. C. 1995. **Alteração hidrotermal e mineralização do depósito aurífero da Mina San Gregorio, Uruguai**. IN: Anais do V Congresso Brasileiro de Geoquímica e III Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, Vol. 1, Niterói, RJ, 6p.
- QUADROS, T. F. P. & KOPPE, J. C. 1996. Alteração hidrotermal e mineralização do depósito aurífero da Mina San Gregorio, Uruguai. **Geochimica Brasiliensis**, Vol. 10 (2):365-377.
- QUADROS, T. F. P. de; STRIEDER, A. J. & KOPPE, J. C. 1997a. **Análise de Lineamentos Aplicada ao Controle Estrutural de Veios de Au-Quartzo na Ilha Cristalina de Rivera (Uruguai)**. IN: Anais do VI Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, Pirenópolis (Go), Vol 1: 323-326.
- QUADROS, T. F. P.; KOPPE, J. C. & STRIEDER, A. J. 1997b. **Lineament analysis for gold deposit exploration in the Rivera Shear System**. World Gold'97

Conference, Singapore. IN: Proceedings of the World Gold'97 Conference. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, AIMM, Vol 1: 19-22.

REDDY, R. K., AGTERBERG, F. P. & BONHAM-CARTER, G. F. 1991. **Application of GIS-based logistic models to base-metal potential mapping in Snow Lake area, Manitoba.** IN: Proceedings of Canadian Conference on GIS, Ottawa, 607-618p.

REYNOLDS, H. T. 1997. The Analysis of Cross-Classifications. IN: **TYDAC** Research Inc. Explorer Spans.

RICHARDS, J. A. 1993. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**, 2nd Ed. Berlin, Germany, Springer-Verlag, 340p.

ROGERS, J. J. W.; UNRUG, R. & SULTAN, M. 1994. Tectonic Assembly of Goandwana. **J. of Geodynamics**, Vol 1:1-34.

ROSTIROLLA, S. P. 1997. Alguns Aspectos da Avaliação de Favorabilidade em Geologia Exploratória. **Revista Brasileira de Geociências**, Vol. 27 (1):327-338.

ROSTIROLLA, S. P.; SOARES, P. C. & CHANG, H. K. 1998. Bayesian and Multivariate Methods Applied to Favorability Quatification in Recôncavo Basin and Ribeira Belt, Brazil. **Nonrenewable Resources**, Vol.7 (1):7-24.

SAUNDERS, D. F., TERRY, S. A. & THOMPSON, C. K. 1987. Test of National Uranium Resource Evaluation gamma-ray spectral data in petroleum reconnaissance. **Geophysics**, Vol 52:1547-1556.

SAUNDERS, D. F., BURSON, K.R., BRANCH, J. F. & THOMPSON, C. K. 1993. Relation of thorium-normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations. **Geophysics**, Vol 58:1417-1427.

SAUNDERS, D. F., BRANCH, J. F. & THOMPSON, C. K. 1994. Tests of Australian aerial radiometric data for use in petroleum reconnaissance. **Geophysics**, Vol. 59:411-419.

SERRA, J. 1982. **Image analysis and mathematical morphology.** Academic Press, New York, 610p.

- SERRA, P. R. M. 1996. **Disponibilidade Atual de Dados de Sensoriamento Remoto**. IN: GIS Brasil, Curitiba, p. 567-572.
- SHIVES, R. B. K., CHARBONNEAU, B. K. & FORD, K. L. 1997. **The detection of potassic alteration by gamma ray spectrometry recognition of alteration related to mineralization**. IN: Exploration 97, Fourth Decennial Intern. Conference on Mineral Explor., Toronto, Canada, p. 233-245.
- SILVA, A. DE B. 1999. **Sistemas de Informações Georeferenciadas: Uma Introdução**. Apostila do Curso **ADIMB**, Sistemas de Informações Geográficas na Exploração Mineral e no Mapeamento Geológico. Lab. de Ensino Informatizado, Instituto de Geociências, Unicamp, Campinas, 27p.
- SINCLAIR, A. J. 1976. Applications of probability graphs in mineral exploration. **The Assoc. of Explor. Geochem**, Special Vol, (4), 95p.
- SINGER, D. A. &, KOUDA, R. 1988. Integrating spatial and frequency information in the search for Kuroko deposits of the Hokuroko District, Japan. **Econ. Geol.**, Vol. 83 (1):18-29.
- SINGER, D. A., & KOUDA, R. 1996. Application of a feedforward neural network in the search for Kuroko deposits in the Hokuroko District, Japan. **Math. Geology**, Vol. 28 (8):1017-1023.
- SOLIANI Jr. E. 1986. **Os dados geocronológicos do Escudo Sul-rio-grandense e suas implicações de ordem geotectônica**. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Geociências, IG\USP, São Paulo, 287p.
- SPRY, A. 1969. **Metamorphic Textures**. Pergamon Press Ltd., 350 p.
- STAR, J. & ESTES, J. 1990. **Geographic Information Systems**. Englewood Cliffs, NJ., Prentice Hall, 290p.
- STATSOFT, Inc. 1995. **STATISTICA for Windows** (Computer program manual online). Tulsa, OK: StatSoft, Inc.

- STRIEDER, A. J. 1993. **Deformação e metamorfismo na região de Santa Cruz de Goiás – Correlação tectono-estratigráfica e evolução tectônica regional**. Tese de Doutorado (IG-UNB, Brasília – DF), 258p.
- STRIEDER, A. J. & NILSON, A. A. 1993. **Análise preliminar de lineamentos na Província estrutural do Tocantins**. IN: Simpósio Brasileiro de Estudos Tectônicos, 4, Belo Horizonte (MG), SBG/MG, **Anais...**, p. 272-276.
- STRIEDER, A. J. & AMARO, V. E. 1997. Estruturas de lineamentos extraídos de imagens de sensores remotos. **EGATEA – Revista da Escola de Engenharia, UFRGS**, Vol. 25 (4):109-117.
- TEIXEIRA, C. 1995. Qual a melhor definição de SIG. **Fator GIS**, Curitiba, (11):20-24.
- TYDAC 1997. **SPANS user guide**, Version 6.0. Tydac Technologies Inc. Ottawa, Ontario, Canada.
- UMPIERRE, M. & HALPERN, M. 1971. Edades estroncio-rubídio en rocas cristalinas del sur de la República Oriental del Uruguay. **Rev. Assoc. Geol. Argentina**, Buenos Aires, Vol. 26 (2):133-151.
- VALENTE, A. L. S. 1995. **Desenvolvimento de uma metodologia para planejamento urbano, utilizando técnicas de sensoriamento remoto, modelagem numérica de terreno (MNT) e Sistema de Informações Geográficas (SIG)**. Diss. de Mestrado, Curso de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, UFRGS, 182p.
- VALENTE, A. L. S.; KOPPE, J. C.; STRIEDER, A. J. & QUADROS, T. F. P. de 1998. **Considerações sobre procedimentos para a integração de dados por meio de sistema de informações geográficas (SIG) visando a análise do meio físico e estudos geotécnicos**. IN: Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica, 3, Florianópolis, SC.
- VALENTE, A. L. S. 1999. **Integração de dados por meio de geoprocessamento para a elaboração de mapas geotécnicos, análise do meio físico e suas interações com a mancha urbana: o caso de Porto Alegre, RS**. Tese de Doutorado, PPGEMM, Escola de Engenharia, UFRGS, 391p.

- VIANA, N. 1998. **Geologia y Potencial Aurífero de la Extension Occidental del Cinturon de Cizallamiento San Gregorio, Isla Cristalina de Rivera, Uruguay.** IN: III Congreso Uruguayo de Geologia, Punta del Este, **Actas...**, p. 249-252.
- WALKER, H., M. & LEV, J. 1958. **Elementary statistical methods.** Holt, Rinehart & Winston Revised Edition, New York., 302 p.
- WEIBEL, R. & HELLER, M. 1991. Digital terrain modelling. IN: Maguire, D. J.; Goodchild, M. F.; Rhind, D. W. eds. **Geographical Information Systems, Principles and Applications**, 3^a Ed., p. 269-297, 648p.
- WILCOX, R. E.; HARDING, T. P. & SEELY, D. R. 1973. Basic wrench tectonics. **The American Association of Petroleum Geol. Bull.**, Vol 57 (1):74-96.
- WOODCOCK, N. H. & FISCHER, M. 1986. Strike-slip duplexes. **Journal of Struct. Geol.**, Vol 8:725-735.
- WRIGHT, D.F. & BONHAM-CARTER, G. F. 1996. **VHMS favourability mapping with GIS-based integration models, Chisel Lake-Anderson Lake area.** IN: G.F. Bonham-Carter, A . G. Galley, and G.E.M. Hall Ed. EXTECH I: A multidisciplinary approach to massive sulphine research in the Rusty Lake-Snow Lake Greenstone Belts, Manitoba; Geological Survey of Canada, Bulletin 426, p.339-401, .
- XUEJING, X. & XUEQIU, W. 1991. Geochemical exploration for gold: a new approach to an old problem. **Journal of Geochemical Exploration**, Vol. 40:25-48.
- YAMAMOTO, J. K. 1988. Representações gráficas espaciais em geociências auxiliadas por computador, **Revista Brasileira de Geociências**, Vol. 18 (1):3-26.
- ZIMMERMANN, H. J. 1985. **Fuzzy set theory – and its applications.** Kluwer-Nijhoff Publ., Boston-Dordrgcht-Lancaster, 363p.