

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-
PPGEM**

GEOPROCESSAMENTO E INTEGRAÇÃO DE DADOS

GEOLÓGICOS E AEROGEOFÍSICOS

PARA AVALIAÇÃO DE FAVORABILIDADE MINERAL

DE DEPÓSITOS AURÍFEROS EM VEIOS

NA REGIÃO DE PORTO NACIONAL (TO)

EVANDRO GOTTARDO

Tese para a obtenção do título de

Doutor em Engenharia

Porto Alegre

2003

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-
PPGEM**

GEOPROCESSAMENTO E INTEGRAÇÃO DE DADOS

GEOLÓGICOS E AEROGEOFÍSICOS

PARA AVALIAÇÃO DE FAVORABILIDADE MINERAL

DE DEPÓSITOS AURÍFEROS EM VEIOS

NA REGIÃO DE PORTO NACIONAL (TO)

Evandro Gottardo

Geólogo

**Trabalho realizado no Laboratório de Modelagem Geológica e Ambiental
(MODELAGE) da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), como parte
dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia**

Área de Concentração: Tecnologia Mineral e Metalurgia Extrativa

Porto Alegre

2003

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

Orientador: Prof. Dr. Adelir José Strieder

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira

Prof. Dr. Leo Afraneo Hartmann

Dr. Pesquisador Telmo Fernando Perez de Quadros

Prof. Dr. Carlos A. Ferreira

Coordenador do PPGEM

Dedico aos meus pais

Décio Osmar Gottardo (*in memoriam*) e

Maria de Lourdes Pessim Gottardo.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho resulta da ação de diversas pessoas, Instituições e empresas que participaram diferentemente das diversas tarefas que contemplaram a sua completa elaboração, entre as quais cabe destacar:

- aos componentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM) e ao Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em especial ao Laboratório de Modelagem Geológica e Ambiental (MODELAGE), representado pelo seu Coordenador e Orientador deste trabalho professor Doutor Adelir José Strieder, os quais acreditaram na idéia desta Tese e viabilizaram a sua concretização;

- ao professor Doutor do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul Leo Afraneo Hartmann e a professora Doutora do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná Maria José Maluf de Mesquita, pelos inúmeros trabalhos e esforços desenvolvidos para que se abrissem os caminhos que culminaram na possibilidade de desenvolvimento deste trabalho nos depósitos auríferos da região de Porto Nacional (TO);

- a empresa Verena Minerals Corporation, na pessoa dos Geólogos Oscar Gouveia, Jad Salomão, Fernando Latorraca, Fabiano Rossini, entre outros, a qual contribuiu com a disponibilização de uma grande quantidade de dados, bem como com infra-estrutura e apoio logístico para a realização de inúmeros trabalhos de campo e escritório desenvolvidos em Porto Nacional (TO);

- aos colegas Doutorandos Débora Grala Roldão e Pedro Antônio Rohe Reginato, os quais contribuíram grandemente na geração e no processamento dos bancos de dados e no aprendizado das técnicas de processamento aerogeofísico e geoprocessamento utilizadas ao longo do desenvolvimento dos trabalhos;

- ao colega professor da Universidade de Vale do Acaraú/CE Geólogo M.Sc. Fábio Souza e Silva da Cunha pela disponibilização dos dados de lineamentos estruturais obtidos por meio de imagens LANDSAT 5 TM que foram utilizados em diversos processamentos desenvolvidos nesta Tese;

- ao professor Doutor Francisco Ferreira e aos colegas do Laboratório de Processamento Geofísico da Universidade Federal do Paraná pela extensa colaboração nos estudos e treinamentos que envolveram o processamento dos dados aerogeofísicos;
- aos colegas que desenvolveram diversos serviços de apoio no transcorrer dos trabalhos, entre os quais cabe destacar: José Carlos Ribeiro, Jaqueline, Ana Laura Selbach, Karine, Priscila Soletti e Fabiana;
- a outras pessoas diretamente responsáveis pelo apoio necessário nos momentos difíceis que estão presentes em todas as tarefas complexas que se desenvolvem na vida: Engenheira Laura Acosta Baldissera, Técnica em Hotelaria Nara Mayer, Administradores de Empresas Juliano Antônio Dall’Agnoll, Leonardo Dall’Agnoll e Gilmar Valente, Geólogo/Contabilista José Guilherme Germany, Geólogo Roberto Heemann, Geóloga Raquel Barros Binotto, Relações Públicas Odila Guterrez Acosta e Técnico Informática Sílvio da Silva Alves;
- à empresa Geolinks Geólogos Associados Ltda. na pessoa de seu sócio- diretor André Bernardi Bicca de Barcellos, pelo amplo apoio de infra-estrutura e discussões técnicas efetuadas ao longo do desenvolvimento dos trabalhos;
- a empresa NEOCORP DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS LTDA. na pessoa de seus sócios-diretores André Bernardi Bicca de Barcellos e Martin Bromberg, pelo amplo apoio de infra-estrutura, bem como discussões técnicas efetuadas na fase final do desenvolvimento dos trabalhos;
- a todas as outras inúmeras pessoas que participaram indiretamente da preparação de textos, amostras, impressões, correções, entre outros tópicos e que não foram anteriormente citadas, os meus mais sinceros agradecimentos.

“O tempo não é algo que volta para
trás. Portanto, plante seu jardim e
decore sua alma, ao invés de
esperar que alguém lhe traga flores”

(William Shakespeare)

“Tanto melhor, combateremos à sombra.”

*(citação de Leônidas, Rei de Esparta,
respondendo ao ultimato do Rei Persa Xerxes,
que ameaçou cobrir a luz do sol com suas flechas).*

SUMÁRIO

RESUMO	23
ABSTRACT	24
CAPÍTULO 1	1
1- INTRODUÇÃO.....	1
1.1- APRESENTAÇÃO.....	1
1.2- LOCALIZAÇÃO E ACESSOS.....	3
1.3- OBJETIVOS.....	7
1.4- METODOLOGIAS DE TRABALHO.....	8
1.4.1- ESCALAS DE TRABALHO E DOS PRODUTOS UTILIZADOS	14
1.4.2- CARACTERÍSTICAS DOS DADOS UTILIZADOS.....	14
1.4.2.1- DADOS CARTOGRÁFICOS	15
1.4.2.2- DADOS GEOLÓGICOS, ESTRUTURAIIS E METALOGENÉTICOS	17
1.4.2.3- DADOS AEROGEOFÍSICOS.....	24
1.4.3- SUPORTE COMPUTACIONAL.....	24
1.5- ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	27
1.5.1- GEOMORFOLOGIA.....	28
1.5.2- CLIMA	29
1.5.3- VEGETAÇÃO.....	29
1.5.4- SOLOS	32
1.5.5- RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS	35
1.6- <i>DATUM</i> GEOLÓGICO E PROSPECTIVO	37
1.6.1- TRABALHOS ANTERIORES	37
1.6.2- CONTEXTO TECTÔNICO.....	37
1.6.3- CONSTITUIÇÃO LITOLÓGICA.....	37
1.6.3.1- COMPLEXO PORTO NACIONAL (CPN).....	38
1.6.3.2- SUÍTE GRANITO-GNÁISSICA MANDUCA (SGgM).....	38

1.6.3.3- SUÍTE METASSEDIMENTAR NATIVIDADE (SMN)	38
1.6.3.4- SUÍTE METAGRANÍTICA MATANÇA (SMgM).....	38
1.6.3.5- SUÍTE GRANÍTICA IPUEIRAS (SGI)	39
1.6.3.6- FORMAÇÃO MONTE DO CARMO (FMC).....	39
1.6.3.7- COBERTURA FANEROZÓICAS DA BACIA DO PARNAÍBA: FORMAÇÃO PIMENTEIRAS (FP) E FORMAÇÃO SERRA GRANDE (FSG)	39
1.6.3.8- COBERTURAS CENOZÓICAS (CC)	40
1.6.4- ANÁLISE ESTRUTURAL.....	44
1.6.4.1- SUPERFÍCIE DEFORMACIONAL S_n/ S_{n+1}	45
1.6.4.2- SUPERFÍCIE DEFORMACIONAL $S_{m+2}/ S_{n+2}/ S_{c+2}$	46
CAPÍTULO 2	50
2- CARACTERIZAÇÃO DO MODELO DE DEPÓSITO MINERAL.....	50
2.1- BASE TEÓRICA DE FORMULAÇÃO DE MODELOS DE DEPÓSITOS MINERAIS.....	50
2.1.1- MODELOS GENÉTICOS	52
2.1.2- MODELOS DESCRITIVOS.....	54
2.1.2.1- DEPÓSITOS AURÍFEROS VINCULADOS À PÓRFIROS GRANÍTICOS	54
2.1.2.2- PROCESSO GERADOR DOS DEPÓSITOS.....	57
2.2- MODELO DE DEPÓSITO MINERAL APLICADO À REGIÃO DE PORTO NACIONAL (TO).....	59
2.2.1- CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICO-ESTRUTURAIS DOS DEPÓSITOS	60
2.2.2- CARACTERÍSTICAS METALOGENÉTICAS DOS DEPÓSITOS.....	66
2.2.3- MODELO INTEGRADO DE DEPÓSITO MINERAL NAS ZONAS DE CISALHAMENTO DE PORTO NACIONAL, TO	69
2.3- DO MODELO DE DEPÓSITO MINERAL AO MODELO EXPLORATÓRIO.....	73
2.3.1- ELEMENTOS BÁSICOS DE EXPLORAÇÃO PARA DEPÓSITOS DEPÓSITOS AURÍFEROS ASSOCIADOS ESPACIALMENTE À INTRUSÕES GRANÍTICAS E FORTEMENTE CONTROLADOS ESTRUTURALMENTE.....	77
2.3.1.1- DEPÓSITOS ASSOCIADOS A ZONAS DE CISALHAMENTO E A ROCHAS GRANITÓIDES	78

2.3.1.2- ELEMENTOS BÁSICOS DE EXPLORAÇÃO PARA DEPÓSITOS ASSOCIADOS A ESTRUTURAS CONTROLADAS POR PRESSÕES INDUZIDAS PELO MAGMA	84
CAPÍTULO 3	88
3- REVISÕES CONCEITUAIS	88
3.1- APRESENTAÇÃO	88
3.2- PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS	88
3.2.1- AEROMAGNETOMETRIA	89
3.2.1.1- PETROLOGIA E PETROFÍSICA MAGNÉTICAS	89
3.2.1.1.1- PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DAS ROCHAS	91
3.2.1.1.2- MINERAIS MAGNÉTICOS NAS ROCHAS.....	91
3.2.1.1.3- ANISOTROPIA MAGNÉTICA DE MINERAIS E ROCHAS	99
3.2.1.1.3.1- PROPRIEDADES DE ROCHAS E MINÉRIOS ALTAMENTE MAGNÉTICOS	99
3.2.1.1.4- PETROLOGIA MAGNÉTICA	100
3.2.1.1.4.1- ROCHAS ÍGNEAS	100
3.2.1.1.4.2- ROCHAS SEDIMENTARES	101
3.2.1.1.5-EFEITOS DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL.....	101
3.2.1.1.6- EFEITOS DO METAMORFISMO	102
3.2.1.2- OBTENÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS, COM ÊNFASE À MAGNETOMETRIA	103
3.2.1.2.1- GERAÇÃO DO ARQUIVO XYZ.....	104
3.2.1.2.2- MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO UTILIZADOS PARA GERAÇÃO DE MAPAS DE CÉLULAS (<i>GRIDS</i>)	105
3.2.1.2.2.1- <i>GRIDAGEM</i> PELA CURVATURA MÍNIMA.....	105
3.2.1.2.2.2- <i>GRIDAGEM</i> BIDIRECIONAL.....	105
3.2.1.2.2.3- <i>GRIDAGEM</i> POR GEOESTATÍSTICA	105
3.2.1.2.3- PROCESSAMENTO E FILTRAGENS APLICADAS AOS DADOS AEROGEOFÍSICOS COM ÊNFASE À MAGNETOMETRIA.....	107
3.2.1.2.3.1- PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO LINEAR.....	107

3.2.1.2.3.2- FILTROS NÃO-LINEARES	113
3.2.1.3- ASSINATURAS MAGNÉTICAS DE DEPÓSITOS MINERAIS	114
3.2.1.3.1- CARACTERÍSTICAS DAS RESPOSTAS MAGNÉTICAS	115
3.2.1.3.2- INTERPRETAÇÃO DE DADOS AEROMAGNÉTICOS	117
3.2.1.3.2.1- INTERPRETAÇÃO QUALITATIVA DE TIPOS DE ANOMALIAS GEOFÍSICAS	117
3.2.1.3.2.1.1- METODOLOGIA DE ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO APLICADA A ÁREAS DE EXPOSIÇÃO LIMITADA DE ROCHAS	120
3.2.2- AEROGAMAESPECTROMETRIA	128
3.2.2.1- FUNDAMENTOS BÁSICOS DE AEROGAMAESPECTROMETRIA	128
3.2.2.1.1- PROCESSOS DE DENSINTEGRAÇÃO RADIOATIVA	130
3.2.2.2- FATORES GEOQUÍMICOS E INTERPRETAÇÃO DE DADOS AEROGAMAESPETROMÉTRICOS	133
3.2.2.2.1- GEOQUÍMICA DOS RADIOELEMENTOS	133
3.2.2.2.2- A DISTRIBUIÇÃO DOS RADIOELEMENTOS NAS ROCHAS	134
3.2.2.2.3- DISTRIBUIÇÃO DOS RADIOELEMENTOS NOS SOLOS	135
3.2.2.2.3.1 ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA POR ÁGUA E VEGETAÇÃO	137
3.2.2.2.3.2- APLICAÇÃO DE LEVANTAMENTOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS NO MAPEAMENTO GEOLÓGICO E DE REGOLITO	137
3.2.2.2.3.3- EFEITOS DOS PROCESSOS DE MINERALIZAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO DOS RADIOELEMENTOS	143
3.2.2.2.3.4- COMPORTAMENTO DOS RADIOELEMENTOS E TIPOS DE GRANITOS	144
3.2.2.2.3.4.1- PROCESSOS DE CONCENTRAÇÃO PÓS-MAGMÁTICA	146
3.2.2.3- INTEGRAÇÃO DE DADOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS E GEOLÓGICOS	149
3.3- GEOPROCESSAMENTO E INTEGRAÇÃO DE DADOS APLICADOS À DETERMINAÇÃO DA FAVORABILIDADE MINERAL PARA DEPÓSITOS AURÍFEROS	152
3.3.1- CONCEITUAÇÃO BÁSICA	152

3.3.2- MANIPULAÇÃO DE DADOS VETORIAIS NO SPRING	157
3.3.3- COMPONENTES DA ANÁLISE ESPACIAL.....	162
3.3.4- MODELAGEM CARTOGRÁFICA	163
3.3.4.1- FASES DO PROCESSO DE MODELAGEM.....	164
3.3.5- FUNÇÕES DE MODELAGEM CARTOGRÁFICA.....	168
3.3.6- TÉCNICAS DE INFERÊNCIA GEOGRÁFICA.....	171
3.3.6.1- INTRODUÇÃO.....	171
3.3.6.2- MODELOS TEÓRICOS E EMPIRICOS	171
3.3.6.3- MODELOS BASEADOS EM CONHECIMENTO	172
3.3.6.3.1- CONJUNTOS BOOLEANOS VERSUS CONJUNTOS NEBULOSOS	173
3.3.6.3.2- INFERÊNCIA BOOLEANA.....	177
3.3.6.3.2.1- CONCEITOS BÁSICOS	177
3.3.6.3.2.2- APLICAÇÕES	180
3.3.6.3.3- MÉDIA PONDERADA	182
3.3.6.3.4- INFERÊNCIA FUZZY	183
3.3.6.3.4.1- CONCEITOS BÁSICOS.....	183
3.3.6.3.4.2- APLICAÇÕES.....	189
3.3.6.4- MODELOS EMPÍRICOS BASEADOS EM DADOS.	192
3.3.6.4.1- MÉTODOS BAYESIANOS – CONCEITOS BASICOS	192
3.3.6.4.2- MÉTODOS BAYESIANOS- APLICAÇÃO AO GEOPROCESSAMENTO	196
3.3.6.5- GEOPROCESSAMENTO E SUPORTE À DECISÃO.....	199
3.3.6.5.1- INTRODUÇÃO.....	199
3.3.6.5.2- SUPORTE À DECISÃO - CONCEITOS BÁSICOS	200
3.3.6.5.3- A TÉCNICA AHP - PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO	200
3.3.6.5.4- SUPORTE À DECISÃO EM GEOPROCESSAMENTO	202
3.3.6.5.5- PROGRAMAÇÃO EM LEGAL - ÁLGEBRA DE MAPAS.....	203
3.3.6.5.5.1-ESTRUTURA DE UM PROGRAMA EM LEGAL.....	204
3.3.6.5.6- SUPORTE À DECISÃO NO SPRING.....	209

3.3.6.5.7- MAPAS DE FAVORABILIDADE E MODELOS DE INTEGRAÇÃO PARA PESQUISA MINERAL SUPOSTADOS POR SIG.....	210
3.3.6.5.7.1- PREMISSAS BÁSICAS.....	210
3.3.6.5.7.2- APLICAÇÕES DE SIG EM EXPLORAÇÃO MINERAL.....	213
3.3.6.5.7.2.1- DISCUSSÃO	243
CAPÍTULO 4	244
4- PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS	244
4.1- PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS	244
4.1.1- INTERPRETAÇÃO DOS MAPAS E DAS ANOMALIAS AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS	274
4.1.2- INTERPRETAÇÃO INTEGRADA DA DISTRIBUIÇÃO DE ANOMALIAS.....	300
4.1.3- DETALHAMENTO DOS MAPAS DE RESPOSTAS AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS	304
4.1.4- INTERRELAÇÕES COM A GEOMORFOLOGIA	322
4.2- PROCESSAMENTO DOS MAPAS AEROMAGNETOMÉTRICOS	322
4.2.1- PROCEDIMENTOS UTILIZADOS NO PROCESSAMENTO DE DADOS	322
DESCRIÇÃO	326
4.2.2- INTERPRETAÇÃO DOS MAPAS MAGNETOMÉTRICOS	342
CAPÍTULO 5	348
5- INTEGRAÇÃO DE DADOS E DETERMINAÇÃO DE FAVORABILIDADE MINERAL PARA DEPÓSITOS AURÍFEROS NA REGIÃO DE PORTO NACIONAL (TO).....	348
5.1- GERAÇÃO DOS MAPAS BASE.....	348
5.1.1- GERAÇÃO DAS BASES CARTOGRÁFICAS DIGITAIS	348
5.1.2- MAPA DE OCORRÊNCIAS MINERAIS	351
5.1.3- MAPA GEOLÓGICO RECLASSIFICADO	354
5.1.4 - MAPA DE CONTATOS LITOLÓGICOS	359
5.1.5 - MAPA DE DRENAGENS SUPERFICIAIS	363
5.1.6- MAPA DE SOLOS (PEDOLOGIA)	363
5.1.7- MAPA DE COBERTURA DO SOLO	365

5.1.8- MAPA HIPSOMÉTRICO.....	370
5.1.9- MAPA DE DECLIVIDADE DO TERRENO.....	372
5.1.10 - MODELO DIGITAL DE ELEVÇÃO.....	376
5.1.11- MAPAS DE LINEAMENTOS MORFOESTRUTURAIS	378
5.1.11.1- MAPA DE RELEVO SOMBREADO	378
5.1.11.2- MAPA DE LINEAMENTOS EXTRAÍDOS DA IMAGEM LANDSAT 5 TM...	382
5.1.12- MAPA DE LINEAMENTOS MAGNÉTICOS.....	386
5.1.13- MAPA DE LINEAMENTOS ESTRUTURAIS INTEGRADO	389
5.1.14- MAPA ESTRUTURAL REGIONAL RECLASSIFICADO	391
5.2- PONDERAÇÃO DA IMPORTÂNCIA DOS DIVERSOS TIPOS DE LINEAMENTOS MORFOESTRUTURAIS NA DISTRIBUIÇÃO DAS OCORRÊNCIAS AURÍFERAS.....	400
5.3- CORRELAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS COM AS OCORRÊNCIAS AURÍFERAS.....	405
5.3.1- INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS E DE IMT	405
5.3.1.1- ANÁLISE DAS RESPOSTAS AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS E DE IMT DAS OCORRÊNCIAS AURÍFERAS	405
5.3.2- INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROMAGNETOMÉTRICOS.....	410
5.3.2.1- INTERPRETAÇÃO ENTRE A DISTRIBUIÇÃO DAS OCORRÊNCIAS AURÍFERAS E OS LINEAMENTOS MAGNÉTICOS DE CAMPO TOTAL.....	410
5.3.2.2- INTERPRETAÇÃO DO MAPA DE LINEAMENTOS GERADO PELO FILTRO DE SINAL ANALÍTICO SOBREPOSTO AO FILTRO DE PRIMEIRA DERIVADA VERTICAL	413
5.4- MAPA INTEGRADO DE INTERFERÊNCIAS AMBIENTAIS.....	416
5.5- ESTUDO DE FAVORABILIDADE MINERAL PARA DEPÓSITOS AURÍFEROS .	429
5.5.1- PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS.....	429
5.5.2- ANÁLISE DE FAVORABILIDADE.....	432
5.5.2.1- CONTROLE GEOQUÍMICO	433
5.5.2.2- CONTROLE GEOLÓGICO E ESTRATIGRÁFICO.....	454
5.5.2.3- CONTROLE ESTRUTURAL	465

5.6- INTEGRAÇÃO DOS MAPAS DE CONTROLES.....	473
CAPÍTULO 6	488
CAPÍTULO 6- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA CONTINUIDADE DAS PESQUISAS.....	488
CAPITULO 7	496
7- BIBLIOGRAFIA.....	496

LISTA DE TABELAS

Tabela I. Denominações, coordenadas e principais características das ocorrências auríferas identificadas até o atual estágio das pesquisas desenvolvidas.

Tabela II. Parâmetros do levantamento aerogeofísico.

Tabela III. Cronoestratigrafia da área segundo os principais autores sobre o tema que pesquisaram a região.

Tabela IV. Rochas da associação cálcico-alcalina.

Tabela V. Critérios prospectivos para depósitos auríferos em terrenos graníticos.

Tabela VI. Relação tipo de magnetismo e susceptibilidades dos principais minerais magnéticos.

Tabela VII. Relação entre a composição química, a magnetização espontânea e a temperatura Curie, dos principais minerais magnéticos.

Tabela VIII. Tipologia dos granitos e radioelementos associados.

Tabela IX. Comparação entre formatos para mapas temáticos (Fonte: “Ajuda On Line” do aplicativo SPRING).

Tabela X. Aplicações Típicas de Geoprocessamento.

Tabela XI. Atribuição de valores booleanos para as variáveis X e Y.

Tabela XII. Representação da função de conjunção booleana.

Tabela XIII. Representação da função de disjunção booleana.

Tabela XIV. Escala de Valores **AHP** para Comparação Pareada.

Tabela XV. Operadores de comparação para a realização de expressões Booleanas.

Tabela XVI. Operadores lógicos para a realização de expressões Booleanas.

Tabela XVII. Características das áreas anômalas em Contagem Total detectadas pelo levantamento aerogeofísico.

Tabela XVIII. Principais características relacionadas às anomalias de Potássio da região de Porto Nacional (TO).

Tabela XIX. Características das áreas anômalas em Tório detectadas pelo levantamento aerogeofísico.

Tabela XX. Características das áreas anômalas em Urânio detectadas pelo levantamento aerogeofísico.

Tabela XXI. Características das áreas anômalas em Fator F detectadas pelo levantamento aerogeofísico.

Tabela XXII. Características das áreas anômalas em Potássio normalizado pelo Tório, detectadas pelo levantamento aerogeofísico.

Tabela XXIII. Avaliação do grau de coincidência das anomalias aerogamaespectrométricas obtidas em *grids* completos e em *grids* recortados.

Tabela XXIV. Mapas aeromagnetométricos elaborados para a área de interesse.

Tabela XXV. Distribuição em km² de cada unidade geológica na região de interesse.

Tabela XXVI. Área de coincidência entre o *buffer* de 300 metros que representa cada ocorrência aurífera já conhecida na região e o mapa de contatos geológicos.

Tabela XXVII. Fator de ponderação para cada contato litológico observado na área de interesse.

Tabela XXVIII. Distribuição espacial das classes de solo que ocorrem na área de interesse.

Tabela XXIX. Distribuição espacial das classes de cobertura do solo que ocorrem na área de interesse.

Tabela XXX. Distribuição espacial das classes de declividade que ocorrem na área de interesse.

Tabela XXXI. Valores de coincidência, em km² das ocorrências auríferas conhecidas em cada uma das principais estruturas que compõem o SZCPN na região de interesse.

Tabela XXXII. Valores de ponderação em cada uma das principais estruturas que compõem o SZCPN na região de interesse.

Tabela XXXIII. Caracterização geoquímica dos processos de perdas e ganhos de elementos nas zonas de cisalhamento **ZCM** e **ZCCa** do **SZCPN**.

Tabela XXXIV. Área de coincidência entre o *buffer* de 300 metros que representa cada ocorrência aurífera já conhecida na região e os mapas de lineamentos morfoestruturais reclassificados.

Tabela XXXV. Tipologia das respostas das ocorrências auríferas da região de Porto Nacional (TO).

Tabela XXXVI. Área de coincidência entre o *buffer* de 300 metros que representa cada ocorrência aurífera já conhecida na região e o mapa de lineamentos de campo total reclassificado.

Tabela XXXVII. Área de coincidência entre o *buffer* de 300 metros que representa cada ocorrência aurífera já conhecida na região e o mapa de lineamentos de campo total reclassificado.

Tabela XXXVIII. Matriz de critérios ponderados **AHP**.

Tabela XXXIX. Tabulação cruzada entre classes de interferência de fatores ambientais e ocorrências auríferas.

Tabela XXXX. Tabulação cruzada entre classes de interferência de fatores ambientais e anomalias aerogamaespectrométricas.

Tabela XXXXI. Planos de informação utilizados no arquivo SPRING TESE para a análise de favorabilidade mineral.

Tabela XXXXII. Áreas de coincidência entre as diferentes razões de canais do levantamento aerogamaespectrométrico e as ocorrências auríferas.

Tabela XXXXIII. Áreas de coincidência entre os diferentes fatores formulados a partir dos dados do levantamento aerogamaespectrométrico e as ocorrências auríferas.

Tabela XXXXIV. Áreas de coincidência entre as variáveis Fatores e as ocorrências auríferas.

Tabela XXXXV. Áreas de coincidência entre a variável Fator “F” e as ocorrências auríferas.

Tabela XXXXVI. Áreas de coincidência entre as áreas de anomalias aerogamaespectrométricas e as ocorrências auríferas.

Tabela XXXXVII. Ponderação dos diferentes planos de informação utilizados na análise de favorabilidade por controle geoquímico.

Tabela XXXXVIII. Tabulação cruzada entre as classes de favorabilidade da integração dos mapas gamaespectrométricos ternários e do mapa de ocorrências auríferas.

Tabela XXXXIX. Tabulação cruzada entre as classes de favorabilidade da integração dos mapas gamaespectrométricos ternários + Fator F e do mapa de ocorrências auríferas.

Tabela L. Tabulação cruzada entre as classes de favorabilidade da integração dos mapas gamaespectrométricos ternários + Fator F + mapa de IMT e do mapa de ocorrências auríferas.

Tabela LI. Área de coincidência entre o *buffer* de 300 metros que representa cada ocorrência aurífera já conhecida na região e o mapa geológico reclassificado.

Tabela LII. Fator de ponderação para cada unidade litodêmica e litoestratigráfica observada na área de interesse.

Tabela LIII. Áreas de coincidência entre os contatos geológicos e as ocorrências auríferas.

Tabela LIV. Fator de ponderação para cada contato litológico observado na área de interesse.

Tabela LV. Integração dos fatores de ponderação das unidades litodêmicas e dos contatos litológicos.

Tabela LVI. Tabulação cruzada entre as classes de favorabilidade do mapa de controle geológico e do mapa de ocorrências auríferas.

Tabela LVII. Ponderação dos diferentes planos de informação utilizados na análise de favorabilidade por controle estrutural.

Tabela LVIII. Tabulação cruzada entre as classes de favorabilidade do mapa de controle geológico e do mapa de ocorrências auríferas.

Tabela LIX. Tabulação cruzada entre as intercessões de lineamentos LANDSAT e as ocorrências auríferas.

Tabela LX. Medidas de classes de favorabilidade obtidas a partir da integração dos mapas de controle geológico e controle geoquímico.

Tabela LXI. Tabulação cruzada entre as classes de favorabilidade do mapa de integração de controle geológico e controle geoquímico e do mapa de ocorrências auríferas.

Tabela LXII. Medidas de classes de favorabilidade obtidas a partir da integração dos mapas de controle geológico + controle geoquímico e áreas de anomalias aerogamaespectrométricas.

Tabela LXIII. Tabulação cruzada entre as classes de favorabilidade do mapa de integração de controle geológico e controle geoquímico e do mapa de ocorrências auríferas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1a. Exibe o conjunto de cartas topográficas do SGE, em escala 1:100.000, correspondentes à área em estudo e as vias de acesso principais e secundárias e os limites do levantamento aerogeofísico efetuado na área estudada, que serviu de base para os estudos realizados.

Figura 1b. Exibe as vias de acesso principais e secundárias e os limites do levantamento aerogeofísico efetuado na área estudada, que serviu de base espacial aos estudos realizados.

Figura 2. Fluxograma organizacional dos trabalhos.

Figura 3. Exibe a seqüência metodológica estabelecida para o processamento dos conjuntos de dados.

Figura 4. Toponímia detalhada da região.

Figura 5. Posicionamento e denominação das ocorrências auríferas já identificadas na região de Porto Nacional (TO).

Figura 6. Principais tipos de vegetação que podem ser identificados na área de interesse.

Figura 7. Principais tipos de solos que ocorrem na região de interesse.

Figura 8. Principais drenagens superficiais que ocorrem na área de interesse.

Figura 9. Mapa litológico da área de interesse

Figura 10. Exibe distribuição espacial no terreno das estruturas tectônicas do SZCPN definida por Mesquita (1996).

Figura 11. Variações de susceptibilidade magnética das principais rochas que ocorrem na crosta.

Figura 12. Principais fatores ambientais que influenciam nos resultados dos levantamentos aerogamaespectométricos (modificado de Wilford *et al.* 1997).

Figura 13. Esboço esquemático da forma de armazenamento da informação nos padrões *raster* e vetorial.

Figura 14. Caracterização de um ponto p definido por um sistema cartesiano.

Figura 15. Exemplos de arcos.

Figura 16. Forma simplificada de um exemplo de estrutura topológica que é gerada para um mapa temático.

Figura 17. Componentes da análise espacial (fonte: anselin (1999, apud câmara *et al.* 2000).

Figura 18. Visão geral do processo de modelagem.

Figura 19. Exemplo de um geo-campo temático (mapa de solos).

Figuras 20a e 20b. Exemplo de função de pertinência para conjunto (Câmara *et al.* 2000 b).

Figura 21. Diagrama de Venn ilustrando a diferença de fronteira entre um conjunto fuzzy (A) e um conjunto booleano (B) FONTE: Burrough (1998), apud Câmara *et al.* 2000b.

Figura 22. Funções de associação Booleana e *Fuzzy*.

Figura 23. Representação gráfica da função $X = \text{not}(Y)$.

Figura 24. Representação gráfica da função $X = Y \text{ and } Z$ (intercessão).

Figura 25. Representação gráfica da função $X = Y \text{ and } Z$ (união).

Figura 26. Diagrama de Venn mostrando os resultados da aplicação de operadores de lógica *booleana* para dois ou mais conjuntos (Burrough & McDonnell, 1998), apud Câmara *et al.* (2000b).

Figura 27. Gráfico de distribuição da função *Fuzzy* Gama. Câmara *et al.* 2000 b, modificado de Bonham-Carter (1994).

Figura 28. Região de estudo R sobreposta a um mapa binário de anomalia magnética (Câmara *et al.* 2000b).

Figura 29. Diagrama de Venn mostrando a relação de sobreposição espacial entre anomalia magnética e ocorrência de depósitos mineral.

Figura 30. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do canal de contagem total.

Figura 31. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do canal de Potássio (K).

Figura 32. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do canal de Urânio (U).

Figura 33. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do canal de Tório (Th).

Figura 34. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de razão Th/K.

Figura 35. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de razão U/Th.

Figura 36. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de razão U/K.

Figura 37. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de Fator F.

Figura 38. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de anomalia de U normalizado pelo Th.

Figura 39. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de anomalia de K normalizado pelo Th.

Figura 40. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* Ternário Urânio/Tório/Potássio.

Figura 41. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas a partir do *Grid* Ternário razão Urânio/Tório - razão Tório/Potássio - razão Urânio/Potássio.

Figura 42. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas a partir do *Grid* Ternário Fator “F”- Anomalias de Urânio - Anomalias de Potássio.

Figura 43. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas interpretadas a partir do *Grid* de Contagem Total.

Figura 44. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas interpretadas a partir do *Grid* de Potássio.

Figura 45. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas interpretadas a partir do *Grid* de Tório.

Figura 46. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas interpretadas a partir do *Grid* de razão Tório/Potássio.

Figura 47. Mapa de interpretação das respostas obtidas pelo *Grid* de Fator F.

Figura 48. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas interpretadas a partir do *Grid* Ternário Urânio/Tório/Potássio.

Figura 49. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas interpretadas a partir do *Grid* Ternário razão Urânio/Tório - razão Tório/Potássio - razão Urânio/Potássio.

Figura 50. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas interpretadas a partir do *Grid* Ternário Fator “F” - Anomalias de Urânio - Anomalias de Potássio.

Figura 51. Mapa integrado de distribuição das anomalias aerogamaespectrométricas. Ressalta-se que a característica mais marcante na área é o agrupamento de anomalias em 7 sub-conjuntos distintos.

Figura 52. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do canal de contagem total recortado.

Figura 53. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do canal de Potássio (K) recortado.

Figura 54. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do canal de Urânio (U) recortado.

Figura 55. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do canal de Tório (Th) recortado.

Figura 56. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de razão Th/K recortado.

Figura 57. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de razão U/Th recortado.

Figura 58. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de razão U/K recortado.

Figura 59. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de Fator F recortado.

Figura 60. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de anomalia de U normalizado pelo Th recortado.

Figura 61. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de anomalia de K normalizado pelo Th recortado.

Figura 62. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas a partir do *Grid* Ternário razão Urânio/Tório - razão Tório/Potássio - razão Urânio/Potássio recortado.

Figura 63. Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas a partir do *Grid* Ternário Fator “F”- Anomalias de Urânio - Anomalias de Potássio recortado.

Figura 64. Mapa integrado de distribuição das anomalias aerogamaespectrométricas após a retirada dos dados referentes às unidades **FP** e **FMC**.

Figura 65. Fluxograma do processamento dos dados aeromagnetométricos.

Figura 66. Fluxograma dos procedimentos utilizados no micronivelamento.

Figura 67. Mapa Aeromagnetométrico de configuração do campo magnético total.

Figura 68. Mapa Aeromagnetométrico de configuração do campo magnético total micronivelado.

Figura 69. Mapa Aeromagnetométrico de lineamentos definidos pelo eixo de unidades magnéticas definidas a partir do campo magnético total micronivelado.

Figura 70. Mapa Aeromagnetométrico de configuração do campo magnético total interpretado.

Figura 71. Mapa Aeromagnetométrico de configuração do campo magnético total micronivelado com filtro de primeira derivada vertical sobreposto.

Figura 72. Mapa Aeromagnetométrico de configuração do campo magnético total micronivelado com filtro de sinal analítico.

Figura 73. Mapa Aeromagnetométrico de configuração do campo magnético total micronivelado com filtro de redução ao pólo.

Figura 74. Mapa Aeromagnetométrico de configuração do campo magnético total micronivelado com filtro de primeira derivada aplicado sobre o filtro de redução ao pólo.

Figura 75. Mapa Aeromagnetométrico de configuração do campo magnético total micronivelado com filtros de sinal analítico, integral vertical e ganho automático de controle (AGC) sobrepostos.

Figura 76. Mapa Aeromagnetométrico de configuração do campo magnético total micronivelado com filtro de primeira derivada vertical aplicado sobre o filtro de sinal analítico.

Figura 77. Mapa Aeromagnetométrico de lineamentos interpretados sobre o mapa de filtro de primeira derivada vertical sobreposto pelo filtro de sinal analítico definidos a partir do campo magnético total micronivelado.

Figura 78. Mapa aeromagnetométrico de filtro integral vertical aplicado sobre o filtro de sinal analítico para uma profundidade de 5 km, ambos sobre o campo magnético total micronivelado.

Figura 79. Principais elementos de toponímia utilizados para os procedimentos de integração de dados.

Figura 80. Distribuição das ocorrências auríferas caracterizadas até o estágio atual das pesquisas na região de Porto Nacional (TO), (*buffer* 300 m).

Figura 81. Reclassificação do mapa geológico, proposta a partir da integração com dados aerogamaespectrométricos.

Figura 82. Mapa de contatos litológicos utilizado nas operações de integração de dados.

Figura 83. Mosaico de imagens do sensor LANDSAT 5 TM da área de estudo.

Figura 83a. Mosaico de imagens do sensor LANDSAT 5 TM classificadas com a distribuição espacial das classes de ocupação do solo na área de interesse.

Figura 84. Mapa hipsométrico da área de interesse.

Figura 85. Distribuição espacial das classes de declividade na área de interesse.

Figura 86. Modelo Digital de Elevação da região de estudo.

Figura 87. Modelo de relevo sombreado (*shaded relief map*) da região de estudo.

Figura 87 a. Lineamentos extraídos do modelo de relevo sombreado (*shaded relief map*) da região associados às ocorrências auríferas.

Figura 88. Mapa de lineamentos estruturais do tipo 1 extraídos da imagem do sensor LANDSAT 5 TM.

Figura 89. Mapa de lineamentos estruturais do tipo 2 extraídos da imagem do sensor LANDSAT 5 TM.

Figura 90. Mapa de lineamentos magnéticos integrados identificados para a área de estudo.

Figura 91. Mapa de lineamentos estruturais integrado da região de Porto Nacional (TO).

Figura 92. Mapa de somatório de lineamentos

Figura 93. Mapa de distribuição das zonas de cisalhamento do SZCPN reclassificado a partir da integração de dados relativos a lineamentos estruturais.

Figura 94. Mapa de lineamentos estruturais do tipo 1 e do tipo 2 extraídos da imagem LANDSAT com os polígonos de distância de 50 metros no entorno do eixo de cada lineamento.

Figura 95. Resultado da integração aplicada para verificação do grau de interferência ambiental sobre as anomalias aerogamaespectrométricas.

Figura 96. Características do projeto “tese” no *software* SPRING.

Figura 97. Ponderação AHP para os mapas aerogamaespectrométricos ternários.

Figura 98. Mapa de favorabilidade gerado pela integração dos mapas aerogamaespectrométricos ternários.

Figura 99. Ponderação AHP para os mapas aerogamaespectrométricos ternários integrados e o mapa de FF.

Figura 100. Mapa de favorabilidade determinado pela integração dos dados de mapas ternários e o mapa de Fator F.

Figura 101. Características do processamento de integração de dados aerogeofísicos gama e magnetométricos.

Figura 102. Mapa de favorabilidade definido para o critério do controle geoquímico.

Figura 103. Ponderação **AHP** para os mapas geológico e de contatos geológicos.

Figura 104. Mapa de favorabilidade para controle litológico.

Figura 105. Mapa de favorabilidade definido pelo controle estrutural para os depósitos auríferos.

Figura 106. Mapa de favorabilidade definido pelo somatório de controle geológico e controle geoquímico.

Figura 107. Mapa de favorabilidade definido pela integração de controle geológico, controle geoquímico e áreas anômalas em termos aerogamespectrométricos.

Figura 108. Mapa Integrado: somatório de lineamentos da área de interesse + favorabilidade gama ternários.

Figura 109. Mapa Integrado: somatório de lineamentos da área de interesse + favorabilidade gama ternários + FF.

Figura 110. Mapa Integrado: somatório de lineamentos da área de interesse + favorabilidade gama ternários + FF + IMT.

Figura 111. Mapa Integrado: somatório de lineamentos da área de interesse + favorabilidade controle geológico + favorabilidade controle geoquímico

Figura 112. Mapa Integrado: somatório de lineamentos + favorabilidade mineral baseada na integração de dados controle geológico + controle geoquímico + anomalias aerogamespectrométricas.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AHP- analytical hierarchical process (Processo Analítico Hierárquico)

apud- junto de

BIF- formações ferríferas bandadas

CC- Coberturas Cenozóicas

cf.- confronte

CPN- Complexo Porto Nacional

CPRM- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

cps- contagem por segundo

e.g.- *exempli grattia*

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

et. al- e outros

ETR- elementos terras raras

FMC- Formação Monte do Carmo

FP- Formação Pimenteiras

GIS- Geographical Information Systems

IMT- intensidade magnética total

K- Potássio

LEGAL – linguagem estruturada para geoprocessamento algébrico

Ma- milhões de anos

PET- Província Estrutural do Tocantins

PI- Plano de informação

ppm- partes por milhão

SGgM- Suíte Granito-Gnáíssica Manduca

SGI- Suíte Granítica Ipueiras

SIG- Sistema de Informações Geográficas

SMgM- Suíte Metagranítica Matança

SMN- Suíte Metassedimentar Natividade

SZCPN- Sistema de Zonas de Cisalhamento de Porto Nacional

Th- Tório

U- Urânio

ZCCa- Zona de Cisalhamento Córrego Cachimbo

ZCCo- Zona de Cisalhamento Córrego Conceição

ZCM- Zona de Cisalhamento Mutum

RESUMO

A organização do conhecimento geológico em uma campanha exploratória é fundamental para a definição dos alvos de maior potencial a serem pesquisados. O sucesso do programa depende do conhecimento dos processos químicos e físicos que controlam a formação do depósito mineral e da definição de um modelo exploratório consistente e suficientemente testado, onde as evidências ou anomalias são indicativos de uma maior possibilidade da existência de um depósito. Esta avaliação de potencialidade consiste na combinação espacial e na análise das variáveis (evidências) que são ponderadas em função de sua importância.

A partir desse contexto, o principal objetivo deste trabalho foi efetuar uma análise de favorabilidade para a ocorrência de depósitos auríferos em veios de quartzo na região de Porto Nacional (TO), embasada em dados geológico-estruturais, de sensores remotos e aerogeofísicos. Dada a extensa quantidade de dados disponíveis, a integração desses diversos planos de informação foi efetuada em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), de forma a possibilitar a construção de diretrizes consistentes para a pesquisa mineral na região.

Para tanto, foram desenvolvidas as seguintes atividades: mapeamento da área e construção de um banco de dados georreferenciado; análise dos depósitos conhecidos para a elaboração do modelo de ocorrência; montagem do modelo genético e caracterização das variáveis diagnósticas; definição dos ponderadores para cada variável diagnóstica; integração dos mapas ponderados; elaboração dos mapas de favorabilidade e análise dos resultados e da eficiência do sistema de avaliação.

Os resultados desse processamento possibilitaram a identificação de novas áreas e o desenvolvimento de critérios prospectivos robustos para a continuidade de um programa exploratório.

ABSTRACT

The organization of the geologic knowledge in a mineral exploration research is basic for the definition of the targets of potential greater to be searched. The success of the program depends on the knowledge of the chemical and physical processes that control the formation of the mineral deposit and the definition of a consistent exploration model. and sufficiently tested, where the evidences or anomalies are indicative of a bigger possibility of the existence of a deposit. This evaluation of potentiality consists of the spatially combination and analysis of the variables (evidences) that they are weighed in function of its importance.

Considering this context, the main objective of this work was to affect an favorability analysis for the occurrence of auriferous deposits in the region of Porto Nacional (TO), based in geologic- structural data, remote sensing and aerogeophysical sensors. The integration of these diverse plans of information was effected in systems of digital cartography and geographical information systems (GIS), of form to make possible the construction of consistent lines of direction for the mineral research in the region. For in such a way, the following activities had been developed: mapping of the area and construction of a georeferenced data base; analysis of the deposits known for the elaboration of the occurrence model; assembly of the genetic model and characterization of the diagnostic variables; definition of the weights for each diagnostic variables; integration of the weighed maps; elaboration of the maps of favorability and analysis of the results and the efficiency of the evaluation system. As result of this processing, they had been systemize and to hierarchy new potential areas, which must be investigated in bigger detail in future studies, with the objective to quantify the volume of auriferous ore that can be added to the reserve esteem in the region of Porto Nacional (TO).

CAPÍTULO 1

1- INTRODUÇÃO

1.1- APRESENTAÇÃO

A tendência mundial de desenvolvimento tecnológico na exploração mineral está baseada na utilização de técnicas geológicas e computacionais sofisticadas integradas, tanto para a pesquisa, quanto para o modelamento geológico dos depósitos minerais. A integração de *soft and hard informations* (Journel 1996, Coker & Galley 1996) nessas etapas, tem aumentado o nível de conhecimento e de entendimento dos depósitos minerais, especialmente de depósitos auríferos em veios de quartzo. Em termos práticos, isso tem diminuído em consideravelmente os riscos na tomada de decisões vinculadas à exploração dos depósitos minerais.

O objetivo desta Tese é gerar e testar metodologias de integração baseadas em dados geológicos, estruturais e geofísicos da região de Porto Nacional (TO), a fim de possibilitar o desenvolvimento de tecnologias prospectivas e a seleção de alvos para ouro nessa região.

Com esse intuito, buscar-se-á agregar informações sobre a distribuição dos depósitos auríferos da área, bem como elaborar diretrizes de pesquisa que contribuam para a prospecção em distritos auríferos com controles de mineralização complexos, como os que ocorrem nessa região.

A área de estudo é a região de Porto Nacional (TO), onde existem mais de 80 depósitos auríferos identificados até o momento. Esses depósitos são caracterizados por estarem associados a veios de quartzo estruturalmente controlados por zonas de cisalhamento de segunda ordem e por intrusões graníticas (Cunha, 1996; Gottardo, 1996; Mesquita, 1996).

A realização de diversos trabalhos de investigação geológica na área, inclusive de uma Dissertação de Mestrado e uma Tese de Doutorado, diretamente relacionadas com o controle estrutural dos veios auríferos de quartzo (Cunha 1996), Mesquita (1996) outra Dissertação de Mestrado focada na relação estrutural entre os veios de quartzo e as intrusões graníticas (Gottardo 1996), permitiu a reunião de um arcabouço consistente para a formulação de um modelo prospectivo para a área. Os principais resultados obtidos a partir desses trabalhos, indicam que as rochas de composição granítica da região de Porto Nacional (TO) podem ser agrupadas em três conjuntos distintos, tanto em termos estruturais, quanto petrográficos e

geoquímicos. Em termos metalogenéticos, o mapeamento litoestrutural indicou que os depósitos auríferos são associados a veios de quartzo e têm a sua distribuição vinculada principalmente a um controle estrutural exercido por zonas de cisalhamento transcorrentes. Nesse contexto, os veios estão associados às estruturas subsidiárias das zonas de cisalhamento principais, às zonas de clivagem e, subordinadamente, às charneiras de dobras em “*en echelon*”. As estruturas mais favoráveis para alojar veios mineralizados são zonas de dilatância associadas a arranjos de estruturas do tipo Riedel de 2ª ordem, que desenvolveram porções transtensionais.

Os dois pressupostos básicos que nortearam a pesquisa foram:

- (i) o modelo prospectivo da área foi definido nos estudos de Mesquita (1996), Gottardo (1996) e Cunha (1996), como sendo principalmente de natureza estrutural, controlado por zonas de cisalhamento frágeis-dúcteis e frágeis e com interferência de intrusões graníticas e,
- (ii) o modelo genético-evolutivo dos depósitos auríferos também delineado pelos autores supracitados, pode ser definido como sendo associado a fluídos mistos de origem predominantemente metamórfica em alguns casos e predominantemente ígnea em outros.

Por último, e com relação à região de Porto Nacional (TO), observa-se um conjunto de circunstâncias positivas, que podem colaborar para que nessa monografia ocorra a seleção consistente de áreas favoráveis para a ampliação da pesquisa prospectiva na região. Dessa forma pode-se contribuir para a formulação de um modelo de estudo, na exploração de diversos outros distritos e províncias minerais brasileiras, de características semelhantes.

Essa afirmação está embasada nos seguintes fatos.

- 1- Inicialmente, a pesquisa mineral da região buscou definir as características dos controles e variáveis que atuaram sobre a gênese e a distribuição dos depósitos (Gottardo, 1996, Cunha 1996, Mesquita 1996);
- 2- De posse desses dados, a empresa que efetuava pesquisas na região, desenvolveu trabalhos de prospecção geoquímica em solos e sedimentos de corrente, bem como levantamentos aerogeofísicos e aeroaltimétricos de detalhe. Com relação aos dois últimos, objetos de consideração nessa Tese, nota-se que constituem levantamentos de detalhe que existem em poucas regiões do país;

3- Nos últimos 05 anos ocorreu uma verdadeira revolução na informática e na geomática mundiais, que possibilitou uma acentuada ampliação na capacidade de processamento de dados dos equipamentos, na confiabilidade e na capacidade de tratamento de dados dos *softwares* e na redução do custo total do conjunto. Com isso, pode-se, atualmente, implementar sistemas de geoprocessamento e treinamento de pessoal a um custo relativamente baixo em empresas de mineração de médio e pequeno porte. Considerando-se esse contexto, muitos outros trabalhos de integração de dados prospectivos e geoprocessamento devem ocorrer nas províncias minerais ao longo dos próximos anos. Essa monografia espera contribuir com metodologias e diretrizes para essa nova fase.

Apesar de estarem sendo, progressivamente, efetuados mais estudos integrados sobre províncias minerais e distritos mineiros, que utilizam ferramentas de processamento e classificação de imagens, tratamento de bancos de dados e geoprocessamento, essas técnicas são relativamente novas e necessitam ser exaustivamente testadas, para que se avalie a sua real efetividade na definição e na hierarquização de novas áreas favoráveis para a pesquisa prospectiva.

Em termos de depósitos auríferos, dada a extensa e complexa gama de variáveis que controlam a gênese e a distribuição dos depósitos, além da acentuada variabilidade de mineralogia e teores na escala de cada depósito, se observa uma forte necessidade de elaboração de projetos integrados, que verifiquem em termos qualitativos e quantitativos a capacidade dos conjuntos de técnicas e *softwares* disponíveis, realmente detectarem áreas exploração mineral economicamente viável.

1.2- LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

A área de estudos situa-se no centro do estado do Tocantins, região norte do Brasil, e está contida entre os paralelos $-10^{\circ} 30' S$ e $-11^{\circ} 30' S$ e os meridianos $48^{\circ} 00' W$ e $49^{\circ} 00' W$. Mais precisamente, a área forma um polígono irregular delimitado pelos meridianos $48^{\circ} 00'$, $48^{\circ} 45'$ e $49^{\circ} 00'$ e pelos paralelos $-10^{\circ} 30'$, $-11^{\circ} 15'$ e $-11^{\circ} 30'$. A área total abrangida neste trabalho é de 4.640 km^2 . A **Figura 1a** exhibe o conjunto de cartas topográficas do SGE, em escala 1:100.000, correspondentes a área em estudo. e as vias de acesso principais e secundárias e os limites do levantamento aerogeofísico efetuado na área estudada, que serviu de base para os estudos realizados.

As principais localidades da região são as cidades de Porto Nacional, Monte do Carmo e Brejinho de Nazaré e a Vila de Ipueiras. O acesso a Porto Nacional, sede desse Projeto, a

partir de Goiânia, pode ser feito pela rodovia BR-153 (643 km) até a localidade de Fátima. Dessa cidade, segue-se pela rodovia TO-080 por 54 km até Porto Nacional. A **Figura 1b** exhibe as vias de acesso principais e secundárias e os limites do levantamento aerogeofísico efetuado na área estudada, que serviu de base espacial aos estudos realizados.

FIGURA 1A EXIBE O CONJUNTO DE CARTAS TOPOGRÁFICAS DO SGE, EM ESCALA 1:100.000, CORRESPONDENTES A ÁREA EM ESTUDO.

FIGURA 1B EXIBE AS VIAS DE ACESSO PRINCIPAIS E SECUNDÁRIAS E OS LIMITES DO LEVANTAMENTO AEROGEOFÍSICO EFETUADO NA ÁREA ESTUDADA, QUE SERVIU DE BASE ESPACIAL AOS ESTUDOS REALIZADOS.

1.3- OBJETIVOS

Diversos estudos desenvolvidos na região de Porto Nacional (TO) têm procurado sistematizar as unidades litológicas e avaliar as estruturas tectônicas que ocorrem nessas rochas (*i.e.* Costa *et al.* 1984, Hasui *et al.* 1987, Costa 1988 a, b, c), Lafon *et al.* 1994, Gorayeb 1996). Entretanto, a maioria dos trabalhos de pesquisa efetivados na área têm sido direcionada para o reconhecimento estratigráfico da região, apesar de hipóteses e modelos genético-evolutivos já terem sido propostos (*cf.* Hasui *et al.* 1984; Hasui *et al.* 1987, 1990; Costa *et al.* 1984, 1988).

Desse tipo de abordagem, essencialmente estratigráfica, dos métodos de mapeamento geológico, decorrem as principais divergências quanto às interpretações construídas sobre a história evolutiva da área e a natureza dos processos geológicos que engendraram a estruturação atual da região. O resgate e a hierarquização das informações demonstra também o nível incipiente do conhecimento e do entendimento geológico acerca dos depósitos auríferos da região (Hasui *et al.*, 1987, 1990; Santos 1989; Lafon *et al.*, 1994; Meireles & Koutschoubey, 1994), bem como das relações genético-evolutivas existentes entre esses depósitos e as rochas granitóides, que constituem as suas principais encaixantes.

Por outro lado, diversos trabalhos de cunho essencialmente prospectivo têm sido conduzidos por companhias de mineração e por garimpeiros, principalmente a partir da década de 1980, quando se iniciou um novo período de lavra na região, impulsionado pela elevação do preço do ouro no mercado mundial. A exploração foi conduzida inicialmente por garimpeiros e concentrou-se no reprocessamento dos rejeitos das antigas lavras dos Bandeirantes. Com o esgotamento do minério nos rejeitos, os garimpeiros iniciaram a exploração do minério primário localizado em veios de quartzo e utilizaram, como guia prospectivo, as antigas lavras dos Bandeirantes. Esses trabalhos foram os primeiros a mostrar a elevada variabilidade na continuidade espacial das zonas mineralizadas, que indicavam teores desde 8 g/ton até 100g/ton. Desde essa época, ocorreram diversas campanhas prospectivas, desenvolvidas por empresas de mineração, tais como: Companhia Vale do Rio Doce (DOCEGEO), Metais de Goiás (METAGO), Mineração Serras do Sul (Grupo INCO), Rio Tinto Zinc Desenvolvidos Mineraiis Ltda. (RTDM), Paranapanema, Mineração Colorado, CNM/TVX Gold Mineração e Verena Minerals Corporation.

Em função das diversas lacunas existentes no conhecimento geológico e da disponibilidade de diversos bancos de dados prospectivos gerados durante os trabalhos de

pesquisa desenvolvidos na área, tornou-se necessária a realização de um estudo que integrasse todas as informações disponíveis e, a partir de uma análise multicriterial, desenvolvesse um modelo prospectivo mais completo para os depósitos auríferos e permitisse a seleção de novas áreas para pesquisa. Esse constitui o principal objetivo dessa tese, porém não o único. Buscou-se além disso:

1- obter mapas integrados e mapas de favorabilidade para a ocorrência de depósitos auríferos na região e estabelecer um índice de prioridade para a pesquisa prospectiva na região, baseado no cruzamento ponderando de dados estruturais, litológicos e geofísicos, contrapostos à disposição das zonas anômalas conhecidas;

2- Contribuir para um melhor conhecimento e entendimento da geologia da área, considerando-se a acentuada acuracidade dos dados aerogeofísicos disponíveis. Com relação a este tópico, buscou-se:

(i) melhorar o mapa geológico da área, por meio da interpretação das respostas gamaespectrométricas dos canais de K, Th, U e contagem total e respostas magnetométricas. Espera-se delinear com maior precisão os contatos das unidades graníticas, metassedimentares e vulcânicas básicas, as quais exibem contrastes bem marcados nas suas respostas magnéticas e gamaespectrométricas;

(ii) melhorar a definição do arcabouço estrutural da área, por meio da correlação estrutural e interpretação dos alinhamentos aeromagnetométricos identificados na área.

1.4- METODOLOGIAS DE TRABALHO

Este item busca apresentar os pressupostos metodológicos básicos que nortearam essa pesquisa e que conduziram à elaboração dessa Tese. Também exhibe os bancos de dados e o suporte computacional utilizado para o processamento e a integração de informações.

A integração de dados geológicos com dados de prospecção mineral e de sensores remoto para seleção e definição de controles dos alvos prospectivos de maior potencial mineral vem sendo utilizada nas mais diversas classes de depósitos minerais, configurando uma tendência mundial (*cf.* EXTECH I/ Coker & Galley 1996). Isso tem propiciado a descoberta de novas ocorrências e tem possibilitado a implementação de diversas minas.

Essas metodologias englobam, como arcabouço fundamental, a utilização integrada de técnicas de mapeamento litoestrutural, sensoriamento remoto, geoestatística e informática,

entre outras. A integração ocorre normalmente em base geoprocessada, com a finalidade de efetuar a seleção de alvos para detalhamento.

A seleção de áreas-alvo para detalhamento é precária quando realizada considerando-se apenas um parâmetro (p.ex: geológico/estrutural) de grande escala. Assim, é adequado utilizar a integração de várias informações geocientíficas, de forma a hierarquizar a seleção de alvos. A integração de dados de prospecção mineral existente sobre a área, com os dados geofísicos e com o levantamento de estruturas frágeis, buscando a definição dos controles estruturais para depósitos minerais do tipo veio, constitui um elemento importante para aumentar a confiabilidade da seleção realizada. Os conjuntos de dados utilizados (planos de informação – P.I.) foram os seguintes:

- bases cartográficas, incluindo drenagens e toponímia digitalizada e georreferenciada, mapa geológico, mapa de lineamentos estruturais;
- aeromagnetometria (campo total);
- aerogamaespectrometria, subdividida nos seguintes conjuntos: contagem de Potássio, contagem de Urânio, contagem de tório e contagem total;
- elevação do terreno por altimetria aérea;
- imagens do sensor LANDSAT 5 TM, para interpretação e extração de lineamentos (Cunha 1996);
- aeromagnetometria campo total;
- imagens do sensor LANDSAT 5 TM, para interpretação dos usos dos solos (EMBRAPA b 1998);

A integração desses níveis de informação permitiu a seleção de áreas anômalas para ouro e a elaboração de mapas de favorabilidade para a localização de novos alvos na região. Além disso, possibilitou delinear com menor incerteza as diretrizes e as técnicas a serem empregadas na continuidade das pesquisas.

A inserção de dados geológico-estruturais a esse conjunto de informações foi indispensável, porque permitiu a definição mais precisa da seqüência de eventos geológicos, metamórficos, deformacionais e mineralizantes na área.

A fase inicial dos trabalhos começou com o planejamento operacional da pesquisa, que englobou a caracterização do *datum* geológico prospectivo, por meio de levantamento da bibliografia existente sobre a área e afim, em áreas correlacionáveis. Além disso, foram coligidos dados acerca de modelos prospectivos delineados em terrenos e contextos similares.

Foram analisadas e sistematizadas, primeiramente, as bases cartográficas digitais da área de estudo, incluindo cartas do Serviço Geográfico do Exército na escala original 1:50.000, disponibilizadas pela empresa *Verena Minerals Corporation*, detentora dos direitos de pesquisa da área de estudo.

Em termos estruturais, buscou-se detalhar o mapa de lineamentos área de interesse, já elaborado por Cunha (1996).

A partir do arcabouço de dados geológicos disponíveis foi efetuada a caracterização do modelo genético descritivo para os depósitos auríferos da região.

A obtenção desses conjuntos de informações, possibilitou que fossem sistematizados e criados os diversos planos de informação que possibilitaram o desenvolvimento dos trabalhos de inferência espacial e análise de favorabilidade para os depósitos auríferos da região. O geoprocessamento e a integração de dados foram efetuados em dois estágios principais:

Primeiramente, foi efetuado um processamento, que inclui a preparação de bancos de dados vetoriais e *raster*, por meio do fechamento de linhas e de polígonos nos produtos vetoriais e do georreferenciamento de ambos os mapas vetoriais e os produtos *raster* geofísicos. A partir do georreferenciamento, ocorreu a compatibilização das escalas de todos os produtos.

Posteriormente a esse estágio, foi efetuado o geoprocessamento dos conjuntos de dados que incluiu a elaboração de bancos de dados e tabelas relacionais e a formulação de uma rede de inferência, para posterior inserção no sistema de geoprocessamento.

O último passo da seqüência foi a elaboração das cartas de favorabilidade baseadas no cruzamento ponderado dos dados.

A seqüência descrita acima constitui o embasamento da ordenação dessa Tese, sendo os seus diversos capítulos elaborados com a finalidade de fornecer, primeiramente o arcabouço teórico e os *datum* geológico e prospectivo (Capítulos 1, 2 e 3). Posteriormente, no Capítulo 4, foi demonstrado processamento dos dados aerogeofísicos, que permitiu a entrada

desses dados nos sistemas de geoprocessamento. Finalmente, ocorreu a integração dos dados e a análise de favorabilidade (Capítulo 5) e a geração de conclusões e recomendações advindas da pesquisa (Capítulo 6).

A organização do texto seguiu a ordenação discretizada no fluxograma da **Figura 2**. Já a **Figura 3** exhibe a seqüência metodológica estabelecida para o processamento dos conjuntos de dados.

FIGURA 2. FLUXOGRAMA COM A ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.

**FIGURA 3. EXIBE A SEQÜÊNCIA METODOLÓGICA ESTABELECIDADA PARA O
PROCESSAMENTO DOS CONJUNTOS DE DADOS.**

1.4.1- ESCALAS DE TRABALHO E DOS PRODUTOS UTILIZADOS

Em termos de trabalhos de campo, foi efetuado o mapeamento litoestrutural progressivo, em escala 1:100.000, da área de interesse e, posteriormente, a análise estrutural e estratigráfica a partir do conjunto de dados obtidos. A técnica empregada para agrupar os dados e as informações geológico-estruturais foi a da confrontação dos elementos de escala regional extraídos das imagens dos satélites, com os dados de meso-escala obtidos durante o mapeamento geológico (Gottardo 1996).

As cartas do IBGE utilizadas como bases cartográficas com os dados de toponímia e curvas de nível são na escala 1:50.000. Já as imagens de satélite LANDSAT 5 TM utilizadas para a interpretação do uso e cobertura dos solos são em escala 1:50.000. As imagens de satélite LANDSAT 5 TM utilizadas para a extração dos lineamentos estruturais por Cunha (1996) são em escala 1:100.000. Os dados aerogeofísicos e de altimetria aérea foram processados a partir da escala 1:100.000 como parâmetro de trabalho.

Todos esses conjuntos puderam ser integrados devido ao georreferenciamento de todos os dados, o que possibilita a geração de uma única escala de trabalho, no caso específico, foi adotada a escala 1:100.000. Após a integração dos dados, os produtos finais foram gerados na escala 1:100.000 e impressos na escala 1: 340.000 a fim de possibilitar a impressão no formato de papel A4, padrão desta Tese.

1.4.2- CARACTERÍSTICAS DOS DADOS UTILIZADOS

Após a organização e a hierarquização dos bancos de dados, a abordagem dos dados considerou as seguintes premissas:

- a quantidade considerável de dados geológicos, geofísicos e de sensoriamento remoto disponíveis;
- o nível de conhecimento geológico dos dados é bastante razoável, dada a grande quantidade de estudos anteriores;
- a grande possibilidade de geração de diversos produtos a partir da integração dos dados, devido à disponibilidade computacional para processamento dos dados, além da

disponibilidade de *software* e aplicativos para o processamento e visualização das informações e para a elaboração dos produtos finais.

A organização dos dados seguiu a seguinte ordem:

1.4.2.1- DADOS CARTOGRÁFICOS

A definição e a construção das bases cartográficas foi o primeiro passo desenvolvido para a estruturação do banco de dados. A área de estudo abrangida nessa monografia corresponde aos limites da área do levantamento aerogeofísico, no interior do qual se desenvolveram os outros levantamentos prospectivos, bem como os trabalhos de mapeamento geológico-estrutural. Essa área está compreendida por um mosaico de 7 cartas planialtimétricas do Serviço Geográfico do Exército, na escala 1:50.000. Os elementos básicos dessas cartas foram digitalizados sob encomenda da Verena Minerals Corporation junto a uma empresa especializada da cidade de Brasília. O processo de digitalização englobou todos os elementos básicos das cartas topográficas, quais sejam:

- curvas de nível, com equidistância de 20 metros;
- cidades, estradas e fazendas;
- hidrografia completa;
- cobertura vegetal
- unidades geológicas;
- unidades de solos;
- mapas aerogeofísicos reclassificados.

A digitalização foi procedida utilizando uma base georeferenciada por meio da projeção em coordenadas UTM, Fuso UTM 22, com elipsóide SAD 69 como modelo da Terra. A partir desse arcabouço, todos os outros dados obtidos foram sendo progressivamente adicionados às bases cartográficas, seguindo esses mesmos parâmetros, a fim de manter a coerência e a precisão cartográfica nas bases utilizadas.

O mosaico resultante, bem como a toponímia detalhada da região pode ser visualizado na **Figura 4**.

FIGURA 4. TOPONÍMIA DETALHADA DA REGIÃO.

1.4.2.2- DADOS GEOLÓGICOS, ESTRUTURAIS E METALOGENÉTICOS

A obtenção dos dados geológico-estruturais foi desenvolvida a partir do cadastramento de todas as ocorrências minerais para ouro, incluindo garimpos e pequenas minas, o que totaliza 81 locais, conforme pode ser visualizado na **Figura 5** e observado na **Tabela I**:

Tabela I. Denominações, coordenadas e principais características das ocorrências auríferas identificadas até o atual estágio das pesquisas na região de Porto Nacional (TO).

DENOMINAÇÃO OCORRÊNCIA	CORRESPONDÊNCIA COM O MAPA DA FIGURA 5	UTM X	UTM Y	TIPOLOGIA DEPÓSITO	CONTROLES DA MINERALIZAÇÃO	UNIDADE LITODÊMICA
ALEIXO I	40	794811.52	8795974.75	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
ALEIXO II	41	795852.36	8795954	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
ALEXANDRIA	66	787560.51	8779976.19	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SIG (GCI)
BANANAL	3	819473	8823826	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SIG (GMC)
BITONHO	9	810383.91	8815793.2	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
BRECHA	39	792003.12	8800127.72	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SMN
BRECHA CÓRREGO RAPOSO	57	801436	8776403	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
CARACOL (PASTOR)	54	793369.8	8784231.6	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SIG (GCI)
CATUABA	55	791922.88	8782741.8	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SIG (GCI)
CIDADE DO CARMO	13	816432.58	8809250.59	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SIG (GMC)
DEDÉCO	2	812221.56	8827230	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
DESCOBERTO	36	802465.61	8799360.3	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM

Tabela I. Denominações, coordenadas e principais características das ocorrências auríferas identificadas até o atual estágio das pesquisas na região de Porto Nacional (TO) (continuação).

DENOMINAÇÃO OCORRÊNCIA	CORRESPONDÊNCIA COM O MAPA DA FIGURA 5	UTM X	UTM Y	TIPOLOGIA DEPÓSITO	CONTROLES DA MINERALIZAÇÃO	UNIDADE LITODÊMICA
DETECTOR DE METAIS	32	795506.67	8806694.83	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
DIDIMO	20	799444.11	8812535.3	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
DIVISA	5	816374.84	8821462.65	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGgM
DIVISA 1	6	816639.7	8820739.48	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGgM
DONA DOMINGAS	71	778686.58	8775521.11	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	CPN
DOURADO I	52	818764.68	8804880.5	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GMC)
DOURADO II	53	818690	8804172	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GMC)
DOURADO III	74	818543	8803682	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GMC)
DOURADO IV	76	819156	8803780	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GMC)
ENZA	46	818052.14	8803833.31	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GMC)
ETIVALDO	8	812035.26	8820317.19	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SMN
FAZENDA SEU WILSON	75	813910.9	8801551.2	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SMN
FILHO DO SEU NÉ	68	783311.68	8776515.72	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
FOFOCA	62	785096.27	8784391.17	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
FRONTEL	14	805439	8805646	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
GERBASA	51	819131	8801076	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGI (GMC)

Tabela I. Denominações, coordenadas e principais características das ocorrências auríferas identificadas até o atual estágio das pesquisas na região de Porto Nacional (TO) (continuação).

DENOMINAÇÃO OCORRÊNCIA	CORRESPONDÊNCIA COM O MAPA DA FIGURA 5	UTM X	UTM Y	TIPOLOGIA DEPÓSITO	CONTROLES DA MINERALIZAÇÃO	UNIDADE LITODÊMICA
JOÃO COMPRIDO	67	788093.32	8779476.38	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GCI)
JUIZ	19	798606	8809948	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGgM
LESTE	18	797753.9	8814660.19	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SMN
MAGALHÃES I	42	820751	8805646	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GMC)
MAGALHÃES II	43	820407.86	805346.57	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GMC)
MANDUCA NORTE	37	791720.5	8803539.49	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
MANDUCA SUL	38	791725.27	8802947.76	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
MANOEL BANDEIRA	79	798606.23	8810164.69	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGI (GMC)
MANOELITO	49	815445.2	8802385.85	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GMC)
MATÃO	56	791573.22	8781992.9	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GCI)
MOLEQUE	1	821221	8829478	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
MONTE DO CARMO 1	11	820088.86	8811411.31	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GMC)
MONTE DO CARMO 2	80	819769.85	8810772.92	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GMC)
MONTE DO CARMO 3	81	819720.77	8810183.63	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GMC)

Tabela I. Denominações, coordenadas e principais características das ocorrências auríferas identificadas até o atual estágio das pesquisas na região de Porto Nacional (TO) (continuação).

DENOMINAÇÃO OCORRÊNCIA	CORRES- PONDÊN- CIA COM O MAPA DA FIGURA 5	UTM X	UTM Y	TIPOLOGIA DEPÓSITO	CONTROLES DA MINERALIZAÇÃO	UNIDADE LITODÊMICA
NONATO	22	793593	8818519.67	Veios de quartzo	Dobra associada a zona de cisalhamento	CPN
OLÍMPIO	23	793318	8816370	Veios de quartzo	Dobra associada a zona de cisalhamento	CPN
OSMAR	58	797923.88	8773983.79	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGI (GCI)
OTÁRIO	29	793448.92	8815888.86	Veios de quartzo	Dobra associada a zona de cisalhamento	CPN
PAIOL	28	793145.54	8813937.44	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	CPN
PALHADA	64	783315	8784191	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
PARANAENSE	44	820064.32	8804688	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GMC)
PARANAENSE II	77	819623	8804246	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GMC)
PIRITOSO	30	794272.35	8814631.28	Veios de quartzo	Dobra associada a zona de cisalhamento	CPN
PRIMAVERA	35	789398.3	8808977.44	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	CPN
RAIZ	45	816291.16	8802410.4	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GMC)
REPRESA	27	816656.31	8822207.5	Veios de quartzo	Dobra associada a zona de cisalhamento	SGgM
ROBERTO I	78	785778.93	8784408.1	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM

Tabela I. Denominações, coordenadas e principais características das ocorrências auríferas identificadas até o atual estágio das pesquisas na região de Porto Nacional (TO) (continuação).

DENOMINAÇÃO OCORRÊNCIA	CORRESPONDÊNCIA COM O MAPA DA FIGURA 5	UTM X	UTM Y	TIPOLOGIA DEPÓSITO	CONTROLES DA MINERALIZAÇÃO	UNIDADE LITODÊMICA
ROBERTO II	61	786561.5	8785457.43	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
RONALDO I	15	804811	8815164	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
RONALDO II	16	803635	8813958	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
RONALDO III	17	802973	8813017	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
ROQUE	60	785695.69	8786257.26	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
SANTA ROSA	10	816250.26	8812723.93	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SIG (GMC)
SÃO BENTO	70	787874.78	8773481.8	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SIG (GCI)
TATÁ	7	820473	8819376	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SIG (GMC)
TECO	33	795331.55	8805478.62	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
TERESINO	63	785762.28	8784941.23	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
TIOFÃO	34	796482.46	8805805.25	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
TORRE	24	793492.25	8814314	Veios de quartzo	Dobra associada a zona de cisalhamento	CPN
TRAJANO	25	791094.18	8814631.28	Veios de quartzo	Dobra associada a zona de cisalhamento	CPN

Tabela I. Denominações, coordenadas e principais características das ocorrências auríferas identificadas até o atual estágio das pesquisas na região de Porto Nacional (TO) (continuação).

DENOMINAÇÃO OCORRÊNCIA	CORRESPONDÊNCIA COM O MAPA DA FIGURA 5	UTM X	UTM Y	TIPOLOGIA DEPÓSITO	CONTROLES DA MINERALIZAÇÃO	UNIDADE LITODÊMICA
TRÊS CÓRREGOS	69	784452.47	8776414.61	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
TRÊS VEIOS	48	815033.87	8803234.96	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GMC)
VE 23	21	794727.78	8809254	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SMN
VEINHO	4	786361.69	8785574.33	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
VEINHO II	59	786761	8785724	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
VEIO 2	31	794084.55	8813648.34	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	CPN
VELHA	26	792220.98	8814371.9	Veios de quartzo	Dobra associada a zona de cisalhamento	CPN
VERENA	47	816512.1	8802852.36	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GMC)
VILANI	12	815377	8810551.93	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem + intrusão granítica	SGI (GMC)
VIRA SAIA	65	786245	8783041	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGgM
VIZINHO DO ZUZA (SD)	73	786245	8783042	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	CPN
ZÉ FREIRE	50	817565.25	8802887.88	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	SGI (GMC)
ZUZA	72	778643.77	8774728.5	Veios de quartzo	Estrutural ZC 2ª ordem	CPN

**FIGURA 5. POSICIONAMENTO E DENOMINAÇÃO DAS OCORRÊNCIAS
AURÍFERAS JÁ IDENTIFICADAS NA REGIÃO DE PORTO NACIONAL (TO).**

1.4.2.3- DADOS AEROGEOFÍSICOS

O levantamento aerogeofísico foi efetuado no período de 1 de setembro a 2 de novembro de 1996 e abrangeu uma área de 4.640 km², onde foram executados 21.520 km de perfis aéreos. O pré-processamento dos dados foi executado no Centro de Processamento de Dados da empresa GEOMAG Ltda., executora do aerolevanteamento. Os parâmetros do aerolevanteamento foram os seguintes:

Tabela II. Parâmetros do levantamento aerogeofísico.

Item	Característica
direção das linhas de vôo	E-W
espaçamento entre as linhas de vôo	220 e 300 m
direção das linhas de controle	N-S
espaçamento entre as linhas de controle	2.000 m
intervalo entre as medições geofísicas sucessivas	55 m
altura média do vôo sobre o terreno	100 m
velocidade da operação	200 km/h
volume dos detetores gamaespectrométricos	2.048 polegadas cúbicas (<i>downward</i>) 256 polegadas cúbicas (<i>upward</i>)

1.4.3- SUPORTE COMPUTACIONAL

A elaboração de um projeto de integração de diversos tipos de dados, que podem conter até milhares de registros de informação, implica necessariamente na utilização de diversos aplicativos computacionais, que, interrelacionados, permitem a extração de um grande arcabouço informativo para a posterior interpretação. Para a elaboração dessa Tese, foram utilizados suportes diferenciados para cada tipo de dado analisado, quais sejam:

Softwares de geração e processamento de mapas base

Para o processamento das bases cartográficas foram utilizados dois *softwares*, quais sejam:

- BENTLEY MICROSTATION VERSÃO 5.0: para digitalização das bases cartográficas e dos mapas de vetores, tais como: mapa geológico e o mapa hidrográfico;
- AUTODESK AUTOCADMAP 2.000: para preparação das bases cartográficas para geoprocessamento, incluindo fechamento de polígonos, ajuste de linhas, arcos e pontos e exportação dos dados em um formato compatível com os outros softwares.

Softwares para processamento dos dados aerogeofísicos

Para o processamento dos dados geofísicos foi utilizado o aplicativo GEOSOFT-OASIS MONTAJ 4.1c, para a importação dos mapas de células (*grids*) e a realização de filtragens e operações nesses mapas de células.

Software de geração e processamento de mapas integrados e análise multi-critério

- INPE/ **SPRING** 3.6.03 (Câmara *et al.* 1996): foi o *software* integrador, utilizado para o gerenciamento dos bancos de dados, a análise multicriterial e a modelagem para integração dos PI's.

Este pacote de aplicativos foi escolhido para o desenvolvimento dos trabalhos em função de sua livre distribuição, inclusive via Internet, o que se coaduna com um dos princípios desta Tese, qual seja: desenvolver metodologias de fácil implementação e baixo custo que possibilitem alavancar diversos estudos e projetos de geoprocessamento na área de mineração no Brasil.

Em termos técnicos, conforme a “Ajuda On Line” do aplicativo, o produto **SPRING** (Sistema para Processamento de Informações Georeferenciadas) é um banco de dados geográfico de 2º geração, desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) para ambientes UNIX e Windows com as seguintes características:

- Opera como um banco de dados geográfico sem fronteiras e suportar grande volume de dados (sem limitações de escala, projeção e fuso), mantendo a identidade dos objetos geográficos ao longo de todo banco;

- Administra tanto dados vetoriais como dados matriciais (“*raster*”), e realizar a integração de dados de Sensoriamento Remoto num **SIG**;
- Prove um ambiente de trabalho amigável e poderoso, por meio da combinação de menus e janelas com uma linguagem espacial facilmente programável pelo usuário (LEGAL - Linguagem Espaço-Geográfica baseada em Álgebra);
- Consegue escalabilidade completa, isto é, ser capaz de operar com toda sua funcionalidade em ambientes que variem desde micro-computadores a estações de trabalho RISC de alto desempenho.

Para alcançar estes objetivos, o **SPRING** é baseado num modelo de dados orientado a objetos, do qual são derivadas sua interface de menus e a linguagem espacial LEGAL. Algoritmos inovadores, como os utilizados para indexação espacial, segmentação de imagens e geração de grades triangulares, garantem o desempenho adequado para as mais variadas aplicações.

Outra característica, considerada extremamente importante, é que a base de dados é única, isto é, a estrutura de dados é a mesma quando o usuário trabalha em um micro computador (IBM-PC) e em uma máquina RISC (Estações de Trabalho UNIX), não havendo necessidade alguma de conversão de dados. O mesmo ocorre com a interface, a qual é exatamente a mesma, de maneira que não existe diferença no modo de operar o produto **SPRING**.

Os objetivos do sistema **SPRING** são (Câmara *et al.*, 1993):

- Integrar as tecnologias de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica.
- Utilizar modelo de dados orientado-a-objetos, que melhor reflete a metodologia de trabalho de estudos ambientais e cadastrais.
- Fornecer ao usuário um ambiente interativo para visualizar, manipular e editar imagens e dados geográficos.

Para alcançar estes objetivos, o **SPRING** está baseado em um modelo de dados orientado-a-objetos, que combina as idéias de “campos” e “objetos geográficos”. Deste modo, foram derivadas tanto a interface dirigida por menus, quanto a linguagem LEGAL. Algoritmos inovadores como segmentação de imagens e classificação por regiões

(Bins *et al.*, 1995 apud Câmara 1996) e modelagem por triangulação com restrições (Namikawa, 1995) complementam os métodos tradicionais de processamento de imagens e análise geográfica.

Softwares de apoio e edição gráfica

Para os trabalhos de elaboração final de textos, tabelas, figuras e gráficos, foram utilizados os seguintes aplicativos:

- MICROSOFT WORD 2000: foi utilizado para elaboração dos textos associados ao trabalho.
- MICROSOFT EXCEL 2000: foi utilizado para gerenciar e tabular as planilhas de dados pontuais disponíveis.
- COREL DRAW 8.0: foi utilizado para a editoração eletrônica final dos mapas e para a preparação e impressão dos produtos gráficos.
- STERONET for Windows: foi utilizado para a geração dos estereogramas necessários às análises geométricas de lineamentos.
- DXFxyz.exe: foi utilizado para a conversão de dados vetoriais no formato .dxf para o formato ASCII alfanumérico, em especial dados de lineamentos estruturais.

1.5- ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

Os aspectos fisiográficos da região investigada, tais como geomorfologia, clima e vegetação devem ser amplamente considerados na análise e na interpretação de produtos aerogeofísicos e de sensoriamento remoto. Essa afirmação baseia-se principalmente na influência que esses fatores exercem na delimitação das unidades geológicas, decorrente dos padrões de respostas registrados na área mapeada, essencialmente nos levantamentos aerogamaespectrométricos. Nesse caso, os fatores ambientais, tais como cobertura vegetal, potencial de erosão e pedologia influenciam de forma determinante na tipologia das respostas gamaespectrométricas obtidas. Assim, buscando fornecer um arcabouço consistente para as interpretações prospectivas a serem desenvolvidas, segue, um resumo desses aspectos na região de estudo.

1.5.1- GEOMORFOLOGIA

A região de Porto Nacional é caracterizada por duas grandes unidades geomorfológicas definidas por Mamede *et al.* (1981; p.212-214,218-219) como: Planalto Residual do Tocantins e Depressão do Tocantins.

O Planalto Residual do Tocantins é subdividido em três compartimentos principais: **(i)** Serras do Lajeado e do Carmo, **(ii)** Serra Malhada Alta e **(iii)** Serra de Santo Antônio, com cotas médias em torno de 500 a 600m. Essa unidade é caracterizada por escarpas abruptas (frentes de cuesta) e por superfícies estruturais tabulares, desenvolvidas principalmente sobre as rochas sedimentares da Bacia do Parnaíba.

As Serras do Lajeado e do Carmo localizam-se no extremo leste da área. A Serra do Lajeado, de direção N-S, é uma frente de *cuestas* voltada para oeste e é acompanhada de algumas formas residuais tabulares. Mais a sul, a Serra do Carmo mostra-se bem mais dissecada, com vales encaixados e profundos. A Serra Malhada Alta está localizada a oeste do Rio Tocantins; é uma forma residual tabular aproximadamente circular e seu interior está bastante erodido; a presença de pedimentos nas porções erodidas demarca o contato inferior com a superfície peneplanizada, denominada Depressão do Tocantins.

As Serras Santo Antônio, Manoel do Carmo João Damião e do Saco foram consideradas por Mamede *et al.* (1981) como feições idênticas às demais serras descritas para essa unidade. Entretanto, ao contrário das demais, elas se desenvolveram sobre outros tipos de rochas, sendo apenas capeadas pelas litologias da Bacia do Parnaíba. As serras Santo Antônio e Manoel do Carmo são constituídas por litotipos metassedimentares e apresentam uma orientação aproximada Nordeste-Sudoeste. Por sua vez, as Serras João Damião e do Saco são compostas por rochas graníticas e vulcânicas, respectivamente, e tem orientação aproximada Norte-Sul.

A Depressão do Tocantins constitui uma extensa área deprimida ao longo do Rio Tocantins. Essa unidade geomorfológica possui cotas variando entre 200 e 300m e, conforme já caracterizado por Bermeguy *et al.* (1994), é composta por: (i) colinas de pequeno, médio e grande porte; (ii) pequenos morros isolados preservados sobre litologias mais resistentes a erosão e (iii) planícies aluviais dos rios Tocantins e Manoel Alves da Natividade. No encontro desses dois rios, verificam-se áreas periodicamente inundáveis, não relacionadas à atual rede de drenagem. Essa região é marcada pela falta de exposição de rocha e pelo desenvolvimento de solos bastante espessos (da ordem de vários metros). Os litotipos relacionados a essa

unidade geomorfológica são os gnáisses do Complexo Porto Nacional e da Suíte Granito Gnáissica Manduca. Uma ampla porção da Depressão do Tocantins, disposta a leste e sudeste da cidade de Porto Nacional, pode ser caracterizada como uma Chapada Laterítica, uma vez que encontra-se recoberta por lateritas ferríferas que se estendem lateralmente por uma área de cerca de dezenas de quilômetros quadrados. Em média, as lateritas possuem cerca de 1m de profundidade.

1.5.2- CLIMA

Conforme dados apresentados por Mileski *et al.* (1981, p.421-423), a região de Porto Nacional possui duas estações climáticas anuais bem marcadas: seca e chuvosa. Durante os meses de outubro até dezembro há um progressivo aumento das chuvas. Em janeiro, ocorre uma ligeira queda na pluviosidade, mas ela torna a aumentar em fevereiro e atinge seu máximo em março. Em abril, ocorre nova queda na pluviosidade, até tornar-se praticamente ausente nos cinco meses secos (maio a setembro).

A precipitação média anual é de cerca de 1600 mm, sendo que 74% das chuvas ocorrem de novembro a março. As temperaturas médias no mês mais frio ficam entre 24°C e 26°C e, no mês mais quente, em torno de 33°C.

A umidade relativa também delimita bem as duas estações, pois varia entre 75% e 85% de outubro a maio (com as máximas ocorrendo nos meses de dezembro a março) e entre 53% e 70% de junho a setembro (com mínima em agosto).

1.5.3- VEGETAÇÃO

A vegetação da área estudada é do tipo savana, ou cerrado, como é conhecida no Centro-Oeste do Brasil. Embrapa (1998c) distinguiu, na região de Porto Nacional, dois sub-tipos de savana (cerrado):

- **Savana Arbórea Aberta (Campo Cerrado):** essa sub-unidade cobre áreas do Planalto Residual do Tocantins, em especial as serras do Lajeado, do Carmo e Maria Antônia. Ela se constitui de gramíneas e de pequenas árvores de aspecto tortuoso e casca espessa, que possuem cerca de 5m de altura. As principais espécies são: pau-terra (*Qualea* sp.), lixeira (*Curatella Americana*), barbatimão (*Stryphnodendron barbadetimam*), jacarandá (*Machaerium* sp.), murici (*Byrsonima coriacea*), pau-de-tucano (*Vochysia* sp.), e pau-santo (*Kielmeyeria* sp.).

- **Savana arbórea sem Floresta de Galeria:** esse sub-tipo se limita apenas a Serra Malhada Alta, na margem oeste do Rio Tocantins. Ela se compõe de uma ampla área de gramíneas com pequenas árvores tortuosas bastante esparsas (espaçamento variando entre 5 e 20m entre uma árvore e outra). Os tipos arbóreos que mais se ressaltam são: lixeira (*Cicatella Americana*), murici (*Byrsonima coriacea*), e pau-de-tucano (*Vochysia sp.*).

A classificação destes sub-tipos é razoavelmente bem representada em produtos de sensoriamento remoto, entretanto, ressalta-se que a ocorrência de queimadas periódicas vem ocasionando uma descaracterização cada vez maior dos limites entre as sub-unidades supracitadas.

A **Figura 6** exhibe os principais tipos de vegetação que podem ser identificados na área de interesse.

FIGURA 6. PRINCIPAIS TIPOS DE VEGETAÇÃO QUE PODEM SER IDENTIFICADOS NA ÁREA DE INTERESSE.

1.5.4- SOLOS

Na área de interesse, segundo <http://www.semarh.df.gov.br/site/cap03/06.htm>, ocorrem os seguintes tipos de solos:

a) Latossolo Vermelho-Escuro (LE)

A EMBRAPA (1978) define os solos dessa classe como não-hidromórficos, com horizonte A moderado e horizonte B latossólico, de textura argilosa ou média, rico em sesquióxidos. São muito porosos, bastante permeáveis e de acentuada a fortemente drenados. Também são álicos e fortemente ácidos. São solos espessos, com fraca distinção entre os horizontes, pouco férteis e com evolução antiga.

A vegetação associada é geralmente de cerrado e cerradão. O relevo, na maioria dos casos, varia de plano a suave ondulado, estende-se em grande continuidade. Estes solos ocorrem nos compartimentos Planaltos e divisores em Planos Intermediários.

O horizonte A é subdividido em A_1 e A_3 , com espessura entre 20 e 50 cm, apresentando cor predominantemente bruno-avermelhada escura, com estrutura granular de fraca a moderadamente desenvolvida, de friável a muito friável quando úmido.

O horizonte B latossólico possui as seguintes características: espessura quase sempre maior que 250 cm; pouca ou nenhuma diferenciação entre os seus subhorizontes; os saprólitos estão ausentes ou devem constituir menos de 5% do volume do horizonte; relação Ki ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) quase sempre inferior a 2,0; e gradiente textural (B/A) baixo.

O Latossolo Vermelho-Escuro apresenta cores no horizonte B com matiz 2,5 YR ou mais vermelho e normalmente valor 4 ou menor.

b) Solos Aluviais (Hi)

São relacionados como Neossolos flúvicos pela nova classificação brasileira de solos (EMBRAPA, 1999).

Os solos aluviais se desenvolvem sobre sedimentos aluviais associados às planícies das principais drenagens da região. Geralmente apresentam granulometria arenosa e horizonte A bem desenvolvido.

Ocorre nesse tipo de solo uma vegetação de matas de galeria e ciliares. O relevo varia, de plano a suave ondulado.

c) Latossolos Vermelho-Amarelo (LV)

A distinção entre os latossolos Vermelho-Escuro e Amarelo está apenas relacionada à cor do horizonte B. Neste, as cores são de vermelha à amarela, matiz 2,5 YR ou mais amarelada. Alguns perfis também podem apresentar caráter concrecionário e plíntico.

A vegetação associada é geralmente de cerrado *sensu stricto*, campo limpo e campo sujo. Ocorrem, preferencialmente no compartimento, rebordos que apresentam vertentes com declividades entre 5 e 20%, retilíneas a convexas.

d) Litossolos (Li)

São enquadrados na classe dos Neossolos litólicos pela nova classificação brasileira de solos (EMBRAPA, 1999). São solos relacionados a afloramentos rochosos e comumente ocorrem em associação com cambissolos litólicos. Apresentam perfil muito delgado, com espessuras não superiores a 50 – 70 cm, com sequência de perfil A - C ou B - C e atividade biológica restrita apenas aos primeiros centímetros da seção. A vegetação típica dessa classe é o cerrado rupestre com manchas de campos sujos.

O mapa da **Figura 7** exhibe os principais tipos de solos que ocorrem na região de interesse.

**FIGURA 7. PRINCIPAIS TIPOS DE SOLOS QUE
OCORREM NA REGIÃO DE INTERESSE.**

1.5.5- RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS

A área de interesse situa-se na Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins (Sub-bacia 22, ELETROBRÁS- SIPOT 1998). No trecho desse curso fluvial contido na área, os principais afluentes observados são posicionados na margem direita, entre os quais cabe destacar de sul para norte: o Rio São Valério, o Rio Manuel Alves, o Rio Formiga, o Rio Areias e o Rio Água Suja.

A **Figura 8** exhibe as principais drenagens superficiais que ocorrem na área de interesse.

**FIGURA 8. PRINCIPAIS DRENAGENS
SUPERFICIAIS QUE OCORREM NA ÁREA DE INTERESSE.**

1.6- DATUM GEOLÓGICO E PROSPECTIVO

1.6.1- TRABALHOS ANTERIORES

Os primeiros trabalhos geológicos efetuados em nível regional datam do século passado (*cf.* Hasui *et al.* 1984) e vem sendo desenvolvidos até hoje (*i.e.* Oliveira & Leonardos 1943, Barbosa *et al.* 1966, Costa 1976, Hasui *et al.* 1984, Costa 1985, Hasui 1990). Trabalhos de nível local também vêm sendo desenvolvidos (Bezerra 1981, Costa 1982, apud Hasui 1987, Costa 1984, Hasui 1987).

Entretanto, a maioria dos trabalhos de pesquisa elaborados na área têm sido direcionada para o reconhecimento estratigráfico da região, apesar de hipóteses e modelos genético-evolutivos já terem sido propostos (*cf.* Hasui *et al.*, 1984; Hasui *et al.*, 1987, 1990; Costa *et al.*, 1984, 1988).

1.6.2- CONTEXTO TECTÔNICO

A região de Porto Nacional (TO) está inserida na porção setentrional da Província Estrutural do Tocantins (**PET**), também denominada de Sub-província Paraguai-Araguaia (Strieder 1993), ou Cinturão Araguaia (Hasui *et al.*, 1980). Strieder e Suita (1998) descrevem a evolução geodinâmica da **PET** em termos de um evento de colisão frontal entre duas placas litosféricas continentais, após o consumo de uma placa oceânica que ocorria interposta. Assim, o modelo de Strieder & Suita (subm.) estabelece uma evolução ensimática que culmina com uma colisão entre duas placas litosféricas continentais na **PET**, associada a processos de indentação tectônica com movimentações longitudinais e transversais ao *trend* do cinturão orogênico. Todo este contexto tectônico teria se desenvolvido durante o Ciclo Geodinâmico Brasileiro, no Neoproterozóico.

1.6.3- CONSTITUIÇÃO LITOLÓGICA

O conjunto litológico reconhecido durante o mapeamento litoestrutural da região de Porto Nacional (TO) é constituído pelas seguintes unidades litodêmicas: Complexo Porto Nacional (**CPN**), Suíte Granito-Gnáissica Manduca (**SGgM**), Suíte Metagranítica Matança (**SMgM**), Suíte Metassedimentar Natividade (**SMN**), Suíte Granítica Ipueiras (**SGI**), Formação Monte do Carmo (**FMC**) e pelas seguintes unidades litoestratigráficas: rochas

sedimentares da Bacia do Parnaíba, associadas a Formação Pimenteiras (**FP**) e as Coberturas Cenozóicas (**CC**) que constituem a unidade mais recente que ocorre na área.

As principais características litológicas dessas unidades são:

1.6.3.1- COMPLEXO PORTO NACIONAL (CPN)

O **CPN** é composto por duas fácies petrográficas principais: uma máfica e outra quartzo-feldspática. A fácies máfica é constituída por ortognáisses máficos de composição diorítica a gabróica, com textura porfiróide. A fácies quartzo-feldspática é composta por ortognáisses granodioríticos a tonalíticos.

1.6.3.2- SUÍTE GRANITO-GNÁISSICA MANDUCA (SGgM)

As rochas do **SGgM** encontram-se invariavelmente deformadas e metamorfasadas, formando um bandamento gnáissico fino. Isso dificulta a identificação da composição dos protólitos; porém, nas porções menos deformadas essas rochas podem ser caracterizadas como biotita granodioritos a monzogranitos de granulação fina a média, compostos por plagioclásio, feldspato alcalino, quartzo e biotita. Nas zonas de alta deformação, há extensa formação de moscovita secundária.

1.6.3.3- SUÍTE METASSEDIMENTAR NATIVIDADE (SMN)

Os tipos litológicos que constituem a **SMN** são principalmente metaconglomerados, metarenitos, quartzitos, quartzitos conglomeráticos, quartzitos micáceos, xistos aluminosos, tremolita xistos e filitos, bem como veios de quartzo de espessura milimétrica a centimétrica. Essa seqüência foi intrudida por diques de rochas metabásicas.

1.6.3.4- SUÍTE METAGRANÍTICA MATANÇA (SMgM)

Os litotipos que compõem a **SMgM** são metagranitóides (sieno a monzogranitos) com uma foliação composta que exhibe feições formadas em estado magmático e feições formadas por fluxo tectônico de alta temperatura. Nas porções pouco deformadas, a textura da rocha é inequigranular grossa, definida por megacristais e megaporfiroclastos de tamanho centimétrico, imersos em uma matriz de granulação média composta por quartzo, plagioclásio e biotita. Ocorrem associados diques básicos de composição diorítica, que intrudiram o metagranito e que exibem feições de mistura mecânica de magmas.

1.6.3.5- SUÍTE GRANÍTICA IPUEIRAS (SGI)

A **SGI** é composta por rochas que abrangem, em composição, desde biotita, anfibólio monzogranitos até sienogranitos. Esses litotipos possuem duas fácies petrográficas principais, onde predominam os termos com textura heterogranular grossa e ocorrem subordinados termos equigranulares médios. Mais raramente, ocorrem feldspato-alcálico granitos equigranulares médios. Todas estas rochas são cortadas por diques de aplitos com textura equigranular fina a média e por diques básicos (diabásios) e, em menor proporção, por gabros. Associadas aos granitóides da **SGI** ocorrem rochas vulcânicas ácidas, predominantemente riolitos. Além das rochas vulcânicas ácidas e das rochas básicas, as rochas da **SGI** alojam inúmeros veios de quartzo auríferos. Os granitos da **SGI** são essencialmente isótropos e, apenas localizadamente, exibem porções com foliação de fluxo ígneo e deformação tectônica de natureza dúctil (mais restrita) e frágil-dúctil (predominante).

1.6.3.6- FORMAÇÃO MONTE DO CARMO (FMC)

A **FMC** é composta por conglomerados polimíticos e arenitos arcóseos, com intercalações de rochas vulcânicas de composição intermediária. Os conglomerados possuem um arcabouço constituído por seixos de quartzo, quartzitos, granitos e rochas básicas, imersos em uma matriz areno-argilosa (Costa *et al.* 1984).

1.6.3.7- COBERTURA FANEROZÓICAS DA BACIA DO PARNAÍBA: FORMAÇÃO PIMENTEIRAS (FP) E FORMAÇÃO SERRA GRANDE (FSG)

A Formação Serra Grande e a Formação Pimenteiras foram definidas por Costa *et al.* (1984) e relacionadas ao Siluro-Devoniano por Santos & Loguércio 1984 e por Gorayeb (1996). Na área de interesse predominam largamente as rochas da **FP**, as quais, em termos litológicos, são compostas por arenitos de coloração avermelhada a alaranjada, de granulometria média a grossa e bem selecionados, que ocorrem recobrendo os topos das principais elevações topográficas da região. Esses morros inclusive se destacam fortemente na paisagem e podem ser visualizados a partir de grandes distâncias no seu entorno. A coloração avermelhada sugere um tom pimenta, que originou a denominação da unidade litoestratigráfica.

A deposição dessas rochas nesse período esteve relacionada à estabilização da área nos tempos pós-Brasiliano (Costa *et al.* 1984). Apenas no Mesozóico essas rochas foram afetadas por processos de falhamento e intrusão de diques básicos, ambos

associados a abertura do Continente Gondwana (Hasui *et al.* 1990). O contato por discordância angular entre essas seqüências sedimentares e todas as outras unidades da área permite posicioná-las acima da **FMC**.

1.6.3.8- COBERTURAS CENOZÓICAS (CC)

Segundo Hasui *et al.* (1987), as rochas mais recentes da área são as coberturas detrítico-lateríticas, os aluviões, os colúvios e os depósitos de tálus, relacionados ao Fanerozóico. As crostas detrítico-lateríticas conformam extensos platôs e foram formadas no Terciário Superior e correlacionadas à Superfície Velhas (King 1954). Os aluviões, por outro lado, formam extensas áreas peneplanizadas junto às principais drenagens da região, em especial o curso fluvial do Rio Tocantins; esses peneplanos são topograficamente mais baixos do que os peneplanos das crostas lateríticas e são, portanto, mais jovens.

A distribuição espacial das unidades litodêmicas e litoestratigráficas, pode ser visualizada no mapa litológico da **Figura 9**. Já a cronoestratigrafia da área pode ser verificada na **Tabela III**.

Tabela III. Cronoestratigrafia da área segundo os principais

autores sobre o tema que pesquisaram a região.

EON	ERA	Costa et al. (1984)	Hasui et al. (1987)	Gorayeb (1996)
F A N E R O Z Ó I C O	CENOZÓICO	Depósitos Aluvionares Depósitos colúvio-aluvionares	Aluvião Tálus Colúvios Cobertura detrítico-laterítica	Coberturas Cenozóicas
	MESOZÓICO		Diques de diabásio	
	PALEOZÓICO	Formações Serra Grande e Pimenteiras	Formação Serra Grande Formação Pimenteiras	Formações da Bacia do Parnaíba
P R O T E R O Z Ó I C O	NEO		Diques ácidos e intermediários	Grupo Natividade
	MESO	Formação Monte do Carmo Grupo Natividade Suíte Lajeado	Grupo Natividade Suíte Intrusiva Lajeado	Formação Monte do Carmo Suíte Lajeado
	PALEO	Formação Morro do Aquiles Suíte Matança	Suíte Matança Formação Morro do Aquiles	Suíte Matança Anortosito Carreira Comprida Formação Morro do Aquiles
A R Q U E A N O		Complexo Porto Nacional	Complexo Porto Nacional	Complexo Porto Nacional

Os estudos desenvolvidos por Gottardo (1996) também contribuíram para a definição do arcabouço estratigráfico da região de Porto Nacional e indicaram diversas modificações no posicionamento cronoestratigráfico das unidades geológicas. Entre as principais modificações sugeridas por esse autor estavam:

- a)** O posicionamento das rochas da FMC como mais recentes do que as rochas da SGI; no Proterozóico Superior;
- b)** A colocação das rochas da SGI como intrusiva no CPN, SGgM e SMgM;
- c)** O posicionamento das rochas da SMgM como mais antigas do que as rochas da SGI;
- d)** A colocação das rochas da SMN como mais antigas do que a SMgM e mais recente do que as rochas da SGgM.

Essas conclusões foram obtidas com base em estudos geoquímicos e na correlação entre as diversas petrotramas deformacionais contidas nessas unidades litodêmicas.

FIGURA 9- MAPA LITOLÓGICO DA ÁREA DE INTERESSE

1.6.4- ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural das petrotramas deformacionais da região mostrou ser o principal elemento capaz de fornecer dados consistentes para desenvolver uma ordenação relativa da ocorrência dos diversos eventos geológicos que exibem registros na área. Considerando-se esse contexto, o arcabouço estrutural da região de Porto Nacional (TO) é marcado por regimes deformacionais de natureza diferenciada, em termos geométricos e cinemáticos, e das petrotramas geradas nos litotipos.

A metodologia aplicada para a obtenção das informações estruturais em mega-escala utilizou como instrumento a conformação das principais superfícies deformacionais, demarcada pelas linhas estruturais definidas por meio da análise dos lineamentos (Cunha 1996). A correlação estrutural entre as diversas feições observadas em escala de afloramento se baseou nos critérios sugeridos por Williams (1985), o qual propõe que o mapeamento estrutural de uma área qualquer se inicia pelo reconhecimento das foliações presentes, para posteriormente ser efetuada a sua hierarquização segundo as relações temporais de truncamento. Tobisch & Paterson (1988) citam que, devido à heterogeneidade e à natureza freqüentemente diacrônica da deformação, a correlação entre elementos estruturais (*e.g.* foliações) com base apenas na sua morfologia (ou seja: a geometria e o estilo das estruturas) pode conduzir a interpretações errôneas acerca da história estrutural de uma área.

Assim, considerando-se os conceitos supracitados, foi estabelecida uma cronologia relativa das superfícies deformacionais identificadas na região de Porto Nacional (TO). A nomenclatura utilizada corresponde àquela indicada por Marshak & Mitra (1988), onde os eventos deformacionais são designados por D_n , e as superfícies deformacionais são denominadas conforme a sua tipologia: S_n - corresponde a foliações do tipo bandamento gnáissico, xistosidade e clivagem, S_m - corresponde à foliação milonítica e S_c corresponde à foliação composta (fluxo ígneo + deformação no estado sólido). As dobras associadas à cada superfície deformacional são designadas como F_n mais um número indicativo da superfície deformacional correspondente. A morfologia dessas estruturas foi descrita segundo as formas apresentadas por Marshak & Mitra (1988, p. 240) e por Passchier *et al.* (1990, p. 27).

As seguintes superfícies deformacionais foram identificadas na região de Porto Nacional (TO):

1.6.4.1- SUPERFÍCIE DEFORMACIONAL S_n/S_{n+1}

A superfície deformacional S_n está registrada na forma de um bandamento gnáissico. Nos ortognáisses máficos porfiróides do **CPN**, esse bandamento é regular, retilíneo a pouco ondulado, de espessura milimétrica a sub-centimétrica, e é marcado por uma alternância de bandas máficas de composição granodiorítica e de bandas félsicas de composição granítica. Em termos quantitativos, as bandas máficas constituem mais de 70% do volume total da rocha. As bandas félsicas do **CPN** e da **SGgM** exibem as variações mais pronunciadas no bandamento; nesse caso, o bandamento é marcado pela concentração diferencial de porfiroclastos de feldspato e de quartzo, o que conduz à alternância de bandas proto a ortomiloníticas com bandas ultramiloníticas em diferentes escalas (milimétrica a decimétrica).

A superfície S_n nas rochas da **SMN** está preservada em *lithons* e em microdobras assimétricas F_{n+1} . O bandamento gnáissico que define a S_n foi afetado por dobras intrafoliais (F_{n+1}) e por *boudins*. Nas rochas do **CPN** e da **SGgM** as dobras F_{n+1} são dobras intrafoliais apertadas, por vezes isoclinais, de pequena escala, com limbos e plano axial geralmente paralelizados com o bandamento; essas estruturas transpõem desde parcialmente até completamente o bandamento e são identificadas principalmente nas bandas félsicas. Os *boudins* possuem eixo maior decimétrico (até 20cm) e eixo menor centimétrico a decimétrico e formam ondulações que tornam o bandamento anastomosado. Nas zonas de constrição dos *boudins*, ocorrem segregações de quartzo + feldspato + biotita. A foliação plano axial das dobras F_{n+1} materializa a S_{n+1} nas rochas do **CPN** e da **SGgM**. Nessas litologias, essa foliação é do tipo anastomosada e é marcada por uma distribuição heterogênea da intensidade de transposição sobre a S_n . Nas porções menos deformadas, a foliação S_{n+1} é mais irregular e anastomosada e podem ser individualizadas muitas lentes (*lithons*) do bandamento transposto, de comprimento decimétrico e espessura sub-decimétrica, menos alongadas, com razões de comprimento/espessura que alcançam até 1:5. Nas porções onde ocorreu a concentração da deformação, por outro lado, o bandamento é fortemente transposto, de forma que a foliação S_{n+1} torna-se mais regular e retilínea; mas, devido à heterogeneidade da deformação, ainda podem ser observadas lentes de comprimento maior que o decímetro e espessura centimétrica, com razões de comprimento/espessura alcançando até 1:10 vezes.

A superfície S_{n+1} está registrada nas rochas da **SMN** na forma de uma xistosidade anastomosada marcada por arcos poligonais de mica, que preserva *lithons* e pode ser

identificada mais claramente nos quartzitos e quartzitos micáceos. Essa estruturação da S_{n+1} decorre da superposição de outra(s) superfície(s) deformacional(is) mais antiga(s). As características composicionais e reológicas das rochas metassedimentares fizeram com que a obliteração das feições estruturais que marcam a superfície anterior S_n fosse desenvolvida de maneira heterogênea, embora de forma mais intensa do que nas litologias do **CPN** e da **SGgM**. A geometria dos elementos da trama mesoscópica das superfícies S_n e S_{n+1} no **CPN**, na **SGgM** e na **SMN** mostra que ambas encontram-se paralelas, com uma orientação geral N-S a N-E, com mergulho menor do que 50° para Leste-Sudeste e para Oeste-Noroeste.

A análise do campo tensional e do padrão cinemático que controlou a evolução das superfícies S_n e S_{n+1} não foi executada na área de estudo, visto que seria necessária a separação de domínios estruturais representativos, onde pudesse ser retirado o efeito das superfícies deformacionais que ocorrem superpostas ao bandamento gnáissico e às foliações. Isso somente poderia ser alcançado com a utilização de metodologias de restauração tectônica, de forma a possibilitar uma caracterização mais precisa desses elementos cinemáticos, o que está além do escopo desta Tese.

1.6.4.2- SUPERFÍCIE DEFORMACIONAL $S_{m+2}/ S_{n+2}/ S_{c+2}$

Os elementos estruturais de primeira ordem observados na região de Porto Nacional (TO) são zonas de cisalhamento com geometria transcorrente a oblíqua, que desenvolvem uma superfície deformacional que trunca as superfícies descritas anteriormente. Essa superfície, de alto ângulo, foi denominada de $S_{m+2}/ S_{n+2}/ S_{c+2}$, conforme as características morfológicas diferenciadas que apresenta em cada unidade litodêmica. O mapeamento estrutural integrado com a interpretação do mapa de lineamentos da área permitiu a delimitação de quatro zonas de cisalhamento transcorrentes a oblíquas, de direção preferencial $N10^\circ E$ a $N30^\circ E$, espessura de até centenas de metros e natureza dúctil a frágil-dúctil. Essas zonas de cisalhamento têm sido correlacionadas por diversos autores como pertencentes ao **LTB** (Costa *et al.* 1988) e mais recentemente têm sido agrupadas em um conjunto denominado de Sistema de Zonas de Cisalhamento de Porto Nacional (Gottardo & Strieder 1997). A identificação e a análise de padrões de lineamentos (Cunha, 1996) serviu como guia geral para a caracterização em escalas mega e mesoscópica das estruturas transcorrentes da região de Porto Nacional (TO). A **Figura 10** exhibe a distribuição espacial no terreno dessas estruturas tectônicas (*cf.* Mesquita 1996).

**FIGURA 10. EXIBE A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL NO TERRENO DAS
ESTRUTURAS TECTÔNICAS DO SZCPN.**

Em termos morfológicos, as estruturas associadas à essa superfície deformacional são:

- uma foliação milonítica/filonítica S_{m+2} registrada nas rochas da **SGgM**, marcada pela orientação dimensional de feldspatos alcalinos e plagioclásio com caudas de recristalização dinâmica assimétricas nos milonitos e pela orientação dimensional de biotita e clorita nos filonitos. Essa foliação também foi identificada em metaconglomerados basais da **SMN**;
- uma foliação composta S_{c+2} registrada nas rochas da **SMgM**, a qual exhibe feições de transição desde o estágio magmático até o estado sólido;
- uma foliação plano axial S_{n+2} , do tipo clivagem espaçada, associada com dobras de amplitude decamétrica a quilométrica, registrada nas rochas da **SMN**;
- uma foliação cataclástica nas rochas da **SGI**, marcada pela orientação dimensional de clorita e fenoclastos de quartzo fitado;
- zonas de cisalhamento frágeis-dúcteis discretas de espessura centimétrica e decimétricas marcadas pela orientação dimensional de clorita;
- zonas de filonitos cataclásticos com espessura de até 50 metros em zonas de concentração de deformação e coalescência de zonas de cisalhamento discretas, nas rochas da **SGI**;
- zonas de clivagem frágeis, que formam planos regulares a sub-regulares, de espaçamento decimétrico até métrico.

O mergulho predominante desse conjunto de estruturas é entre 60° até sub-vertical, o que caracteriza as zonas de deformação onde estão contidas, como zonas transcorrentes. O caimento da lineação de estiramento entre 30° e 45° , indica um componente oblíquo associado à movimentação das zonas transcorrentes. Vinculados a essas estruturas, ocorrem diversos indicadores cinemáticos desde mega, até meso e micro escala. Estatisticamente, predominam indicadores levógiros nas zonas de cisalhamento de primeira ordem, o que sugere um sentido de deslocamento das massas de rocha do bloco oeste de Nordeste para Sudoeste. O metamorfismo sintectônico associado à deformação transcorrente alcançou desde o fácies anfíbolito médio, até o fácies dos xistos verdes inferior (Mesquita 1996).

Além das zonas de cisalhamento de primeira ordem, o mapeamento litoestrutural orientado a partir do mapa de lineamentos da área, permitiu a identificação de zonas de cisalhamento de segunda e de terceira ordem associadas à movimentação das estruturas principais. Cunha (1996), efetuou a análise cinemática dessas estruturas, principalmente considerando elementos lineares associados a clivagens, falhas e veios de quartzo auríferos. A partir dessa análise, foi possível identificar o campo tensional de cada domínio estrutural anteriormente definido, o que permitiu concluir-se que o arranjo de tensões que controlou a geometria e a cinemática das zonas de cisalhamento transcorrentes foi de natureza local, devido principalmente a modificação da posição espacial dos eixos do elipsóide de tensão nos diversos segmentos das zonas de cisalhamento. Além disso, a análise estrutural caracterizou as estruturas de segunda ordem como estruturas do tipo Riedel.

As características da foliação composta observada nos litotipos da **SMgM**, permitem sugerir que as rochas dessa unidade são sin-cinemáticas ao evento de deformação transcorrente que controlou a formação e a evolução das zonas de cisalhamento transcorrentes a oblíquas que seccionam a região de Porto Nacional (TO).

CAPÍTULO 2

2- CARACTERIZAÇÃO DO MODELO DE DEPÓSITO MINERAL

2.1- BASE TEÓRICA DE FORMULAÇÃO DE MODELOS DE DEPÓSITOS MINERAIS

Entre outros autores, Rostirolla (1997) cita que a utilização de modelos para exprimir a concepção sobre a forma de ocorrência, ou sobre a gênese de um depósito mineral, ou de um conjunto deles, tem sido corrente em geologia econômica. Em geral, a formulação múltipla e ambígua desses modelos é decorrente da utilização de dois diferentes planos de informação mesclados: 1) o plano observacional e 2) o plano hipotético. Cada vez mais, observa-se a tendência de organizar os elementos utilizados em exploração nos modelos de depósitos minerais (e.g. Adams 1986, Mosier & Bliss 1992, apud Rostirolla 1997), definidos como conjuntos de informações exploratórias construídos empiricamente a partir de depósitos conhecidos, com o objetivo de sistematizar as informações pertinentes para a prospecção.

De acordo com Henley & Berger (1993) apud Rostirolla (1997) , os modelos de depósitos minerais são construídos a partir de características essencialmente geológicas e estão embutidos nos modelos exploratórios, que se caracterizam como redes cognitivas derivadas de uma ampla variedade de informações geocientíficas, econômicas e sócio-políticas com o objetivo de indicar guias para exploração e também dar suporte para decisões das empresas. As exigências de uma avaliação mais criteriosa do risco em programas de exploração mineral tomaram parte das estratégias das empresas, especialmente em decorrência da crise de capital e da competitividade. Em função disto, a decisão vem deixando progressivamente de ser pessoal, para ser uma decisão elaborada com base na análise numérica de dados e em critérios previamente definidos.

A região onde fatores geológicos interagem para produzir uma concentração mineral é considerada um sistema natural com as seguintes características: 1) organização (subsistemas de bombeamento, canalização); 2) estrutura (elementos, dimensão, correlação, causalidade); 3) funcionalidade e 4) macroambiente.

Em termos de modelos conceituais aplicados a depósitos auríferos em rochas graníticas, os ambientes tectônicos onde ocorre o maior volume de associações de rochas granitóides são diversos e englobam desde arcos magmáticos continentais, cinturões colisionais do tipo himalaiano, *rifts* continentais, até dorsais meso-oceânicas (plagiogranitos). Se a atuação de processos tectônicos de placas for considerada como viável desde o Precambriano, possivelmente Mesoproterozóico, ou mesmo mais antigos, os arcos magmáticos engendrados durante os processos de convergência entre mosaicos de placas tectônicas continentais constituem os *tratos* geológicos onde ocorre a maior distribuição de rochas de composição granitóide (Wilson, 1989; Clarke, 1992; apud Atherton, 1993). Os arcos magmáticos são formados durante a operação de processos de escala geodinâmica de construção e de consumo de crosta oceânica (Ciclo de Wilson), que envolve limites construtivos de placas oceânicas (Dorsais Meso-oceânicas) e limites destrutivos de placas no bordo de margens oceânicas (arco de ilhas), ou continentais (margens continentais ativas, ou do tipo Andinas). A operação de um ciclo tectônico dessa natureza leva ao consumo da placa oceânica existente entre as placas continentais, com a conseqüente amalgamação dos blocos tectônicos que ocorrem interpostos (arcos de ilha, bacias, *mélanges* ofiolíticas, etc...), culminando, nos seus estágios finais, com a colisão entre as placas continentais. Tal modelo se encontra suficientemente testado para o Fanerozóico (Coward & Ries, 1986; Sengor, 1990); porém, ainda há dúvidas acerca da validade desses pressupostos para avaliar a evolução tectônica de terrenos Pré-Cambrianos (Kroner, 1992; Hill, 1993).

Se for considerado um ciclo de Wilson completo, ou seja, envolvendo abertura e fechamento de um oceano e colisão continental, o magmatismo que ocorre associado aos diversos estágios de sua evolução tectônica, pode ser sistematizado da seguinte forma (Harris *et al.*, 1986; Bonin, 1990):

- Magmatismo Pré- Colisional:

É o estágio onde ocorre o consumo mais acentuado da placa oceânica e conseqüentemente a geração de uma grande quantidade de magmas cálcico-alcálicos, que constituem a superestrutura dos arcos de ilha ou dos arcos magmáticos continentais.

- Magmatismo Sin- Colisional:

Ocorre quando cessa o consumo da placa oceânica, levando ao choque entre as placas continentais convergentes. A composição dos magmas alcança desde cálcico-alcálica (baixo a alto K) até shoshonítico, devido ao gradual aprofundamento da fonte mantélica, com

contribuições crustais subordinadas. Se o protólito for rocha da crosta, há uma maior tendência aos magmas gerados terem composição peraluminosa.

- Magmatismo Tardi a Pós- Colisional:

Ocorre quando a maior intensidade de esforços compressionais já foi repartida, normalmente em zonas de cisalhamento tangenciais e transcorrentes, e o cinturão passa a uma fase de relaxamento termal e soerguimento, conhecida como colapso orogenético (Dewey 1988). Os magmas gerados evoluem até rochas tipicamente alcalinas supersaturadas em sílica, os quais podem ser originados por contribuições de diversas fontes, tais como: 1) a astenosfera ainda modificada pelo processo de subducção, com quantidades variadas de material crustal assimilado, ou 2) a fusão da base da crosta, com magmas mantélicos subordinados.

Essa separação é de natureza geral e desconsidera diversas complexidades envolvidas em processos dessa natureza e magnitude; porém, para os objetivos desse trabalho, essa sistematização satisfaz à condição de apresentar os principais ambientes tectônicos onde as rochas graníticas estudadas podem ter sido formadas. Em todos esses estágios tectono-evolutivos em que são geradas rochas graníticas, pode ocorrer a formação de depósitos auríferos, conforme existirem condições especiais e favoráveis para a concentração do ouro.

2.1.1- MODELOS GENÉTICOS

A associação freqüente entre rochas graníticas e depósitos de elementos metálicos, principalmente Cu-Au-Mo-W, apresenta ainda uma séria controvérsia estabelecida: qual seria a relação entre a evolução do magmatismo e a geração dos depósitos, principalmente no que diz respeito às fontes dos fluidos e da carga metálica. Sobre esse tema, são propostos dois modelos principais (Perring *et al.* 1989):

- **Modelo metamórfico:** implica em desvolatilização induzida por metamorfismo/deformação e a remobilização do ouro das rochas encaixantes, onde anteriormente encontra-se em equilíbrio, associada à ascensão de fluidos mantélicos (Grooves & Philips, 1987; Kerrich *et al.*, 1987). Segundo esse modelo, quando ocorrem rochas graníticas espacialmente associadas aos depósitos, essas teriam somente fornecido energia termal ao sistema e não teriam contribuído como fonte do ouro, ou dos fluidos mineralizantes.

- **Modelo magmático:** implica na separação de uma fase volátil da fase magmática líquida nos estágios finais da evolução da cristalização do magma granítico. Nesse caso, o magma

seria a fonte do ouro e a fase volátil seria a portadora da carga metálica (Burrows *et al.*, 1989; Cameron & Hattori, 1987; Paterson *et al.*, 1989; Schreiber *et al.*, 1990).

Miller *et al.* (1994) sugerem um modelo que conjuga o desenvolvimento de veios auríferos em zonas de cisalhamento frágeis-dúcteis, com fluxo de calor, magmatismo e movimentação das placas tectônicas. O sincronismo entre a formação dos veios de quartzo auríferos e esses outros processos termotectônicos dificultam a definição de qual dos agentes envolvidos foi o principal controlador do processo de mineralização. Porém, todos esses agentes seriam associados à formação e à evolução de um ciclo orogênico.

Miller *et al.* (1994) citam que a migração de fluidos ao longo de zonas de cisalhamento foi o principal controlador da geração dos depósitos auríferos na região de Juneau (Alaska), um sítio geológico que exhibe consideráveis depósitos auríferos associados a zonas de cisalhamento, mas que também apresenta diversas intrusões espacialmente associadas.

Segundo esses autores, o magmatismo associado pode ter modificado os padrões de fluxo de fluidos e o regime térmico que estava controlando a circulação e a deposição da carga metálica. Além desses fatores, a modificação do padrão de convergência entre as placas, de normal para oblíquo, pode ter causado modificações nos campos tensionais regional e local, o que teria possibilitado a abertura de novos espaços dilatacionais e o alojamento de novos veios mineralizados.

Todos esses modelos tratam particularmente da escala do depósito. Porém, devido a natureza tectônica fortemente dinâmica dos cinturões que contém a maioria dos depósitos, um controle tectônico de maior escala tem sido relacionado por diversos autores como o principal gerador dos depósitos auríferos, porque seria o fator indutor dos eventos metamórficos, deformacionais, magmáticos e, portanto, de mineralização que ocorrem em uma porção qualquer da litosfera (*e.g.* Perring *et al.*, 1989; Barley *et al.*, 1989; Perring *et al.*, 1991; Cameron, 1993; Wang *et al.*, 1993). Considerando-se a mobilidade e a natureza cumulativa dos cinturões orogênicos, deve-se esperar que os modelos dessa natureza, que interrelacionam desde variáveis de megaescala, até variáveis que atuam na escala do depósito, tenham uma maior capacidade de predição de alvos prospectivos. Assim, a associação espacial entre as rochas graníticas e os depósitos auríferos pode ser devida a processos distintos, mas interrelacionados em uma escala maior (*e.g.* Wang *et al.*, 1993), ou mesmo relacionados geneticamente (*e.g.* Schreiber *et al.*, 1990). Além disso, a tendência é que, se o sistema é o

resultado de uma conjunção simultânea de diversas fontes de voláteis e de elementos metálicos, os depósitos sejam formados a partir de fontes mistas.

Outro fator a ser considerado nesses modelos é que, aparentemente, não existe um tipo litológico preferencial associado a depósitos auríferos, pelo menos em termos quantitativos (*cf.* Gilbert & Park, 1986; Govett, 1983).

Em vista desse contexto, a pesquisa mineral de áreas onde possam estar contidos depósitos auríferos deve necessariamente considerar as múltiplas variáveis envolvidas como premissa básica de uma campanha exploratória, ou prospectiva.

2.1.2- MODELOS DESCRITIVOS

Apesar da forte controvérsia estabelecida entre os modelos propostos para os depósitos auríferos em terrenos graníticos, os registros geológicos indicam inúmeras regiões onde ocorre a estreita associação espacial entre depósitos auríferos e rochas graníticas. Duas classes principais de depósitos podem ser distinguidas:

2.1.2.1- DEPÓSITOS AURÍFEROS VINCULADOS À PÓRFIROS GRANÍTICOS

A principal característica dos depósitos associados a pórfiros graníticos é o controle litológico sobre o depósito, ou seja, as ocorrências auríferas são associadas temporais, espaciais e geneticamente às rochas granitóides que são as suas encaixantes. Os depósitos auríferos dessa classe encontram-se preferencialmente associados a intrusões de pequeno porte, com textura pórpora e vinculados à série magmática cálcico-alcálica, que são denominadas pórfiros.

Os principais depósitos pórfiros explorados economicamente são os depósitos de cobre e de molibdênio. O ouro ocorre secundariamente, como um subproduto. Porém, a sua ocorrência é importante e, por diversas vezes, define a viabilidade da exploração do depósito.

As rochas da série magmática cálcico-alcálica ocorrem associadas principalmente a arcos magmáticos continentais, onde ocorrem complexos processos petrológicos, que envolvem crosta continental e crosta oceânica. Nesses ambientes, as rochas graníticas constituem um dos principais litotipos, tanto em volume, quanto em distribuição areal.

Em função da evolução progressiva (temporal e espacial) dos arcos magmáticos continentais, a zona onde ocorre o arco tende a tornar-se cada vez mais espessa, o que faz com que as rochas formadas sejam cada vez mais diferenciadas e tenham uma participação cada

vez maior de rochas crustais envolvidas na sua gênese. O “amadurecimento” progressivo do arco magmático conduz à formação de rochas de composição distinta em determinadas porções do arco, o que, se considerada a região em grande escala, forma uma zonalidade litológica. Essa zonalidade forma 3 conjuntos litológicos principais:

- rochas com afinidade toleítica (em pequeno volume);
- rochas com afinidade cálcico-alcalina normal (a maior parte do volume);
- rochas com afinidade cálcico-alcalina alto K e shoshoníticas.

O zoneamento litológico apresenta como características básicas:

- as rochas tornam-se cada vez mais potássicas conforme se avança em direção à retaguarda do arco magmático;
- a taxa de subducção diminui progressivamente;
- em termos geoquímicos, a razão Na/K e as razões K/Rb e Th/U diminuem em direção à retaguarda. Os teores de Ba e de Ce tendem a aumentar em direção à retaguarda.

A zonalidade nos arcos magmáticos não é somente espacial, mas também temporal, porque os tipos de rochas formados tendem a se modificar conforme o estágio evolutivo do arco magmático. Em termos litológicos, as rochas da associação cálcico-alcalina abrangem principalmente as associações citadas na **Tabela IV**:

Tabela IV. Rochas da associação cálcico-alcalina.

ROCHAS VULCÂNICAS	ROCHAS PLUTÔNICAS
riolitos	granitos
dacitos	monzonitos
andesitos	granodioritos
basaltos	dioritos
	gabros

As rochas da série cálcico-alkalina contém alguns dos principais depósitos de Cu, Cu-Mo e Cu-Au. As rochas da série cálcico-alkalina podem ser subdivididas em duas séries principais:

A- Rochas da série cálcico-alkalina normal: formam desde quartzo dioritos, até rochas graníticas (são mais enriquecidas em SiO_2). Tendem a conter os depósitos de Cu, o Mo é normalmente um sub-produto.

B- Rochas da série cálcico-alkalina alto K - os termos precoces são menos diferenciados (gabros e dioritos), a série como um todo é mais empobrecida em SiO_2 . As rochas dessa série contém preferencialmente depósitos de Mo.

A maioria dos depósitos ocorre associada a rochas epizonais, sub-vulcânicas. As rochas da raiz dos arcos magmáticos, ou seja, aquelas formadas em mesozona e catazona são consideradas pouco férteis para conter depósitos.

Os depósitos mais típicos dessa associação magmática são os depósitos do tipo pórfiro, ou seja, depósitos de elementos metálicos, principalmente Cu e Mo, vinculados a rochas de textura pórfira. O ouro é um subproduto importante, que algumas vezes viabiliza o depósito economicamente. São associados geneticamente a rochas intrusivas epizonais até sub-vulcânicas, principalmente de composição quartzo-monzonítica. Em geral, não ocorrem vinculados a rochas mais básicas do que dioritos. A ocorrência de rochas graníticas próximas também não é necessária. As intrusões mais férteis normalmente são as tardi a pós-cinemáticas, onde o alojamento da intrusão não é forçado, de modo que o magma coloca-se em sítios extensionais, sem causar grandes perturbações estruturais nas rochas encaixantes.

Essa condição é importante para aumentar a efetividade dos processos de mineralização, porque aumenta a capacidade dos fluidos migrarem do sistema magmático.

Caso contrário, se ocorrer um campo tensional compressivo associado, os voláteis tendem a permanecer dissolvidos no magma por mais tempo, o que diminui a chance de separação de uma grande quantidade desses voláteis no final da cristalização. A ocorrência de *stocks* de rochas pórfiras (principalmente de quartzo-monzonitos) é a situação mais favorável para a formação dos depósitos. Devido à elevada taxa de erosão do ambiente tectônico onde ocorrem associados os depósitos do tipo pórfiro, a probabilidade desses depósitos serem preservados por mais do que 200 Ma é pequena, a não ser que tenham ocorrido condições especiais no contexto em que está localizado o depósito.

2.1.2.2- PROCESSO GERADOR DOS DEPÓSITOS

Os magmas da série cálcico-alcálica são hidratados devido aos tipos de rochas fontes envolvidas na sua gênese: 1) os anfibólitos da placa oceânica são desidratados durante o processo de aquecimento e afundamento na litosfera (biotita+clorita \Rightarrow hornblenda + OH); 2) os sedimentos associados ao fundo oceânico aprisionam água do mar nos seus poros. Além disso, também ocorre uma forte contribuição de águas meteóricas contidas em rochas crustais que são as encaixantes das intrusões.

Os elementos metálicos derivam principalmente da placa oceânica e do manto fundidos. Para que ocorra a formação de um depósito expressivo, é necessário sobrar uma fração considerável de fluidos no final da cristalização do magma. Além disso, logo após o alargamento da intrusão, é necessário que os fluidos sejam liberados rapidamente do magma, o que ocasiona a geração de texturas pórfiras. Conforme a porosidade e a permeabilidade das rochas encaixantes, os fluidos liberados da intrusão, irão formar produtos diferenciados. Assim, dois tipos de situações podem ocorrer:

a) Quando as rochas encaixantes são pouco porosas, os fluidos liberados tenderão a se concentrar nas porções de cúpula da intrusão até que a pressão de fluidos ultrapasse a pressão confinante; e o limite de resistência das rochas de cúpula; nesse momento, irá ocorrer um processo de brechagem hidráulica e as rochas formadas são denominadas de brechas de intrusão. O fato de ocorrer um abaixamento brusco da pressão induz à precipitação da carga metálica que estava dissolvida na carga de fluidos. Isso faz com que as brechas sejam fortemente mineralizadas e constituam um dos principais guias prospectivos dos depósitos.

b) Quando as rochas encaixantes são porosas e permeáveis há uma facilidade dos voláteis percorrem as rochas e provocarem lixiviação e alteração das encaixantes. Como o principal fluido é a água, a alteração é denominada de hidrotermal. A interação entre os fluidos hidrotermais e as rochas encaixantes modifica a composição do fluido e da rocha, sendo que ambos buscam alcançar o equilíbrio diante das novas condições do meio. Basicamente, o processo é controlado por:

- a quantidade de fluido colocada no sistema;
- a composição do fluido e das encaixantes;
- a mobilidade geoquímica dos elementos.

Em termos gerais, pode-se definir uma zonalidade hidrotermal em torno dos depósitos, onde são observadas rochas com características composicionais diferenciadas. O minério também apresenta uma zonalidade conforme as zonas de alteração hidrotermal, conforme a sua afinidade geoquímica e conforme a mobilidade no fluido (dependente da composição e condições de P/T do fluido). Normalmente, desde as porções mais próximas da intrusão, são observadas as seguintes zonas de alteração hidrotermal:

ZONA POTÁSSICA: caracteriza-se pelo enriquecimento em K, demonstrado por uma extensa feldspatização da rocha (FK e biotita). Minério de Mo.

ZONA FÍLITICA: forte sericitização e formação de quartzo e pirita. Minério de Cu, Mo.

ZONA ARGÍLICA: formação de caulinita e esmectitas. Conforme o grau de pureza das argilas, elas podem constituir um bem mineral de elevado valor econômico, porque as argilas hidrotermais normalmente são mais puras do que as argilas formadas no ambiente supergênico.

ZONA PROPÍLICA: formação de clorita, epidoto e calcita. Minério de Fe, Au, Ag, Pb e Zn

Da zona potássica para a zona propílica, observa-se uma redução da temperatura e um aumento da lixiviação. De um modo geral, os depósitos associados a rochas bem diferenciadas apresentam uma zona potássica bem desenvolvida, com uma zona fílica transicional e uma zona propílica pouco desenvolvida, ou mesmo ausente. Os depósitos vinculados a rochas menos diferenciadas, no entanto, apresentam a zona potássica menos desenvolvida e as zonas propílica e fílica melhor desenvolvidas.

Os depósitos vinculados com pórfiros estão normalmente associados com *skarns* e depósitos epitermais do tipo ácido-sulfato. O ouro ocorre principalmente nas intrusões menos diferenciadas desses complexos intrusivos, principalmente dioritos e sienodioritos (Hodgson, 1989). Ainda, o ouro tende a variar inversamente com a quantidade de Mo nas rochas, o que evidencia a afinidade geoquímica fortemente distinta desses elementos. Os fluidos associados a esses sistemas são fortemente salinos e têm composição química e isotópica e temperatura que indicam uma origem a partir de exsolução de fluidos magmáticos de intrusões. O volume de rochas vulcânicas que ocorrem associadas é altamente variável. Assim, em algumas províncias auríferas, a quantidade de rochas vulcânicas é reduzida, enquanto que em outras essas rochas predominam grandemente.

A tipologia dos depósitos indica que os magmas félsicos são a fonte do minério. A distribuição do ouro é controlada pelas zonas de alteração hidrotermal, por zonas de fraturas, ou por zonas de mistura de fluidos de composição distinta (*e.g.* água conata e água meteórica, principalmente).

2.2- MODELO DE DEPÓSITO MINERAL APLICADO À REGIÃO DE PORTO NACIONAL (TO)

Considerando-se os tipos e controles dos depósitos auríferos na região de Porto Nacional (TO), observa-se que um único modelo de depósito mineral não pode ser utilizado para a elaboração de um modelo prospectivo, devido, principalmente, à elevada complexidade dos fenômenos envolvidos nos processos formadores das rochas encaixantes e das mineralizações associadas. Esses processos envolvem aspectos tectônicos, estruturais, litológicos e intempéricos, que apresentam particularidades de região para região. Entretanto, as características comuns às ocorrências minerais possibilitaram que fossem construídos critérios diagnósticos para a pesquisa de ouro na área. Estas evidências são:

- estruturas tectônicas: ocorrência de padrões estruturais associados às zonas de cisalhamento transcorrentes que formam o **SZCPN**, que condicionam o alojamento de veios mineralizados;
- litologias favoráveis: ocorrência de controles litológicos representados por rochas granitóides cálcico-alcálicas alto K e granitos alcalinos;
- aerogamaespectrometria: ocorrência de zonas anômalas, indicativas de áreas mais potenciais para a associação com minério aurífero.
- aeromagnetometria: estruturas magnéticas que permitiram delinear com maior precisão o arcabouço estrutural da área, em especial áreas de intercessão de estruturas.

Desse modo, o modelo prospectivo para a definição de áreas potenciais baseia-se principalmente em três pontos: feições estruturais, dados aerogeofísicos e litologia favorável. Assim, foi necessária a formulação de um modelo adaptado à região, que incorporasse os controles supracitados, bem como critérios dos modelos conceituais descritivos e genéticos já reconhecidos e suficientemente testados em outros distritos minerais.

2.2.1- CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICO-ESTRUTURAIS DOS DEPÓSITOS

Os depósitos auríferos em veios da região de Porto Nacional (TO) foram objeto de pesquisa sistemática apenas por empresas de mineração (*cf.* Salomão Neto 1989), que buscaram avaliar principalmente a sua distribuição, o seu volume e o teor de minério aurífero.

A gênese dos fluidos que originaram os veios foi investigada por Lafon *et al.* (1994) e por Meireles & Kotschoubey (1994). Na região da Mina do Pontal, Santos (1989) desenvolveu um estudo do arcabouço litoestrutural local e da petrogênese das rochas encaixantes do veio aurífero. Santos (1989) também caracterizou os processos hidrotermais associados à gênese do minério. Na região de Porto Nacional (TO), as principais características dos veios auríferos são:

- os veios são compostos predominantemente por quartzo, que varia desde hialino até leitoso. Apenas subordinadamente ocorrem veios de carbonatos e de epidoto;
- como mineralogia acessória dos veios de quartzo, ocorrem carbonatos, epidoto e sulfetos (pirita e galena, principalmente; calcopirita, em menor quantidade). Os sulfetos tendem a se distribuir principalmente nos bordos dos veios, junto às encaixantes;
- os veios ocorrem em diversas unidades geológicas: **CPN**, **SMN**, **SGgM** e **SGI**; mas, ocorrem principalmente nas rochas da **SGgM** e **SGI**;
- os veios possuem dimensões variadas, com comprimentos de dezenas a centenas de metros e com espessuras desde centimétricas até dezenas de metros.

Em termos de distribuição, os veios estão associados a estruturas do tipo zonas de cisalhamento, zonas de fratura e de clivagens e zonas de charneira de dobras. Isso define o controle estrutural como o principal fator condicionante da distribuição dos veios auríferos da região. As estruturas controladoras da ocorrência dos veios podem ser subdivididas em três conjuntos, vinculados a processos formadores diferenciados:

1- veios associados às estruturas vinculadas à evolução do **SZCPN**: a geometria e a localização da maioria dos veios decorre da geração de estruturas dilatacionais; o controle cinemático da abertura dessas estruturas foi caracterizado a partir da determinação dos eixos de paleotensão locais em 11 áreas-chave (Cunha 1996). Os veios relacionados ao evento de deformação transcorrente estão alojados principalmente nas rochas da **SGgM** e **SGI** e, secundariamente, nas rochas do **CPN** e **SMN**. Em termos geométricos, é possível

individualizar diversos sistemas de veios, considerando-se a classificação proposta por Hodgson (1989). Assim, os principais grupos de veios são:

- a) veios de cisalhamento centrais (*central shear veins*): ocorrem nas porções internas das zonas de cisalhamento principais, ou em estruturas subsidiárias e são concordantes com a foliação milonítica e/ou filonítica;
- b) veios oblíquos de cisalhamento: preenchem estruturas subsidiárias do tipo Riedel e são discordantes da foliação milonítica/ filonítica;

Considerando-se a morfologia, os veios relacionados aos dois primeiros grupos exibem formas sinuosas a onduladas, com foliação interna muitas vezes bem marcada e, algumas vezes, com feições mesoscópicas de abertura e preenchimento (*crack seal*); também podem ser identificadas, além de veios, zonas com intensa ocorrência de vênulas de quartzo de espessura centimétrica e comprimento variado desde o decímetro até com dezenas de metros. Os veios do terceiro grupo não exibem feições mesoscópicas de deformação associada e possuem formas espacialmente regulares. Na **SMgM**, ocorrem veios de espessura centimétrica, que mostram contatos difusos com a fácies metamonzogranítica que é a encaixante;

2- Veios que ocorrem nas porções internas das intrusões da **SGI**, e que não exibem um controle estrutural vinculado às zonas de cisalhamento. Esses veios estão alojados em zonas de clivagem e brechas, por vezes com zonas de alteração hidrotermal de carbonato + epidoto de formas fortemente irregulares. Na região de Monte do Carmo, ocorrem veios (Garimpo Verena) e enxames de veios e vênulas que definem *stockworks* (Garimpo Doutor Antônio). Esses veios têm desde um aspecto brechóide, até um aspecto hialino. A outra forma de ocorrência é constituída por veios tabulares de quartzo hialino distribuídos em zonas de clivagens de disposição radial a elíptica nas porções internas da intrusão Ribeirão Jacaré, da **SGI**. Nesses locais, os veios têm duas formas principais: (i) largura métrica, forma tabular e aspecto hialino e (ii) espessura decimétrica, com formas sinuosas e muitas vezes como zonas de venulação.

3- Veios tipo *saddle reef* em charneira de dobras *en echelon*, como os do garimpo da Torre.

Mesquita (1996), descreveu as características metamórfico-deformacionais das quatro principais zonas de cisalhamento que seccionam a área e a tipologia dos veios de quartzo associados a cada uma delas. Essas feições podem ser visualizadas na **Figura 10**.

Segundo Mesquita (1996), essas estruturas podem ser melhor definidas e caracterizadas como:

- ZONA DE CISALHAMENTO CÓRREGO CACHIMBO (ZCCa)

Rocha encaixante

A suite Granito-Gnáissica Manduca na **ZCCa** é composta principalmente por metasenogranitos a mica branca. Essas rochas apresentam granulação fina a média e uma grande variação textural, devido a heterogeneidade da deformação que afetou as rochas.

A constituição mineralógica principal é quartzo, definida por feldspato potássico, plagioclásio, mica branca e clorita e a mineralogia acessória é constituída por zircão, rutilo, monazita, apatita, hematita e ilmenita. Uma segunda assembléia mineralógica caracteriza-se por mica branca II (o “II” refere-se a uma segunda geração do mineral), clorita, quartzo, albita e microclínio.

Produtos de cisalhamento

Milonitos e Filonitos

As rochas geradas pela deformação e alteração metamórfico-hidrotermal dos metagranitóides da **ZCCa** são milonitos precoces, quartzo milonitos e filonitos.

Os milonitos precoces se caracterizam pela formação indiscriminada de mica branca, que pode formar até porfiroblastos. Na matriz, constituída de mica branca, ocorrem monazita e zircão. Os milonitos e filonitos exibem uma variada assembléia mineral composta de quartzo, mica branca, clorita, carbonato, estaurolita, granada, turmalina, relictos de albita, grafite e sulfetos. Os quartzo-milonitos são compostos de bandas anastomosadas de quartzo, envoltas por uma matriz de clorita e mica branca.

Nas regiões mineralizadas, próximas dos veios quartzo, a matriz é substituída por material grafitoso.

Os filonitos são compostos pela alternância de bandas de mica branca, clorita, clorita-mica branca intercaladas, granada e quartzo. A turmalina ocorre alongada segundo a foliação milonítica, em todas as bandas. A estaurolita ocorre orientada ou não em relação à foliação milonítica e apresenta inclusões de granada.

Dois tipos de filonitos foram separados pela ocorrência ou não da mica branca paragonita na matriz. Ambos os tipos apresentam estaurolita, granada e turmalina e podem ser sistematizados em: **(i)** filonitos com paragonita na matriz, que ocorre em equilíbrio com albita, clorita, quartzo e carbonato; **(ii)** filonitos sem paragonita, nos quais a mica branca é fengítica e ocorre em bandas alternadas com bandas de clorita, bandas de quartzo e bandas de uma mistura clorita-mica branca.

Níveis ou microvênulas de carbonato concentram grãos de sulfetos, pirita e calcopirita. Microvênulas de pirita pura ocorrem nos limites entre as diferentes bandas ou em microfraturas.

Veios de quartzo mineralizados

Os veios de quartzo mineralizados a ouro são interpretados como sin-cinemáticos a formação dos milonitos e filonitos. Esses veios apresentam uma coloração caracteristicamente cinza e cinza escuro, devido a ocorrência de grafite juntamente com o quartzo. O quartzo, nos veios, exhibe feições que indicam múltiplos estágios de precipitação e recristalização deste mineral.

A natureza das microestruturas varia com a posição no interior do veio. Nas porções centrais, o quartzo apresenta grãos equigranulares. A deformação deve ter sido dominada por processos de recuperação e recristalização dinâmica, como indicado por microestruturas intracristalinas como extinção ondulante, lamelas de deformação e sub-grãos.

Nas margens dos veios, o quartzo exhibe apresenta uma maior variedade e microestruturas, tais como: **(i)** quartzo recristalizado; **(ii)** grãos de quartzo relictos quase sem deformação, com um mosaico de novos-grãos nos limites; **(iii)** formação indiscriminada de matriz criptocristalina de quartzo. Essas microestruturas evidenciam a predominância de processos de dissolução e recristalização dinâmica. Gradientes extremos de *stress* são encontrados nas margens dos veios, próprios da ocorrência de fragmentos de rocha encaixante e anisotropias como contato veio-rocha. Vênulas de quartzo, sem grafite, afetam os veios de quartzo. Os veios exibem texturas do tipo *crack-seal*, com evidências de várias gerações de abertura e fechamento.

ZONA DE CISALHAMENTO MUTUM (ZCM)

Rocha encaixante

A Suite Granito-Gnáissica Manduca é constituída preferencialmente por gnáisses granodioríticos na **ZCM**, contudo, metasiénogranitos também são encontrados. Os metagranodioritos granulação fina a média e são extremamente foliados e dobrados. As texturas deformacionais são muito heterogêneas, com porções preservando feições ígneas e porções apresentando um bandamento gnáissico regular.

Produtos de cisalhamento

As rochas geradas pela deformação e alteração metamórfico-hidrotermal dos metagranodioritos da Zona de Cisalhamento Mutum (**ZCM**) são milonitos precoces, milonitos e filonitos. Os últimos são afetados por enxames de vênulas de carbonato e por veios de quartzo mineralizados.

Milonito precoce

Os milonitos precoces apresentam características textuais e mineralógicas semelhantes aos gnáisses, contudo, se observa a formação mais consistente de mica branca, carbonato e clorita e a diminuição progressiva de epidoto, titanita e hematita, que não ocorrem nos termos miloníticos e filoníticos.

Milonitos e filonitos

Os milonitos e filonitos exibem um bandamento metamórfico-hidrotermal, com a alternância de bandas de quartzo, bandas de biotita, bandas de mica branca e ilenita, bandas de clorita e bandas de carbonato, ou podem ser constituídas por um tipo único de banda. Os minerais que compõem os filonitos e milonitos são biotita, clorita, mica branca, carbonato, quartzo e albita. A mineralogia acessória é composta de ilmenita, rutilo, apatita, e monazita.

Com base na predominância de uma ou mais fases minerais, essas rochas de cisalhamento podem ser agrupadas em: (a) quartzo milonitos, (b) clorita-carbonato filonitos, (c) mica-branca ilmenita filonitos e (d) biotita-mica branca filonitos e assim caracterizadas: quartzo milonitos, onde predominam bandas de quartzo e quartzo-carbonato. Os quartzo milonitos apresentam um bandamento marcado pela alternância de bandas de quartzo e bandas de filossilicatos.

Litoclastos de grãos relictos de feldspato potássico e plágioclásio são comuns e ocorrem envoltos por uma matriz de granulação muito fina, composta de moscovita, biotita, clorita, carbonato-quartzo e albita; clorita-carbonato filonitos, onde há predominância de bandas de clorita pura, bandas de clorita-biotita, bandas de mica-branca e ilmenita, bandas de carbonato e quartzo e microvênulas de carbonato. Essas bandas formam uma estrutura anastomosada complexa. Litoclastos de quartzo e feldspato são encontrados, invariavelmente, nessas rochas. Nos clorita-carbonato filonitos, ocorre uma grande variedade de arranjos entre essas diferentes bandas. Algumas rochas apresentam toda a gama de bandas enquanto outras apresentam uma ou duas delas combinadas. As bandas de carbonato e quartzo estão *boudinadas*, ou com texturas do tipo *pinch-and-swell*, envoltas pelas outras bandas supracitadas. Também é comum a ocorrência de hidróxidos de Fe e Si, intercalados com carbonato, nessas bandas de quartzo e carbonato.

Mica branca-ilmenita filonitos: são predominantemente constituídos de mica branca e ilmenita, que ocorrem alongadas segundo a foliação milonítica. Os filonitos podem apresentar microvênulas de carbonato, concordantes com a foliação milonítica. A matriz é composta predominantemente de moscovita e/ou biotita e ilmenita. Esses filonitos apresentam como acessórios agulhas alongadas de pirolusita, apatita, monazita e rutilo.

Biotita-mica branca filonito: essas rochas não apresentam bandamento e a foliação milonítica é marcada por biotita e mica branca. Duas orientações de mica são observadas, formando pequenos romboédros. Pode ocorrer carbonato com formatos irregulares, que preenche espaços entre os limites dos grãos de micas. Esses filonitos apresentam uma grande variedade de acessórios exóticos na matriz como: (i) apatita e monazita, ricas em elementos terras raras; (ii) zircão associado a ilmenita e hematita; (iii) carbonato rico em ETR e F e (iv) fluorita rica em ETR.

Quando a matriz dos filonitos e milonitos é predominantemente constituída de moscovita e biotita, a rocha apresenta uma pronunciada foliação milonítica (Sm+2) anastomosada, marcada pelo alongamento dos filossilicatos. A Sm+2 pode apresentar-se localmente dobrada. São dobras isoclinais assimétricas com formação de uma nova geração de micas ao longo do plano axial. Quando na matriz predomina carbonato, a Sm+2, é fracamente pronunciada.

Vênulas

Os filonitos e milonitos são afetados por inúmeros enxames de vênulas. Estas vênulas podem ser discordantes ou concordantes aos filonitos e estão extremamente deformadas, dobradas e boudinadas, com tendência ao paralelismo com a foliação Sm+2, devido à deformação cisalhante progressiva que afetou a área.

Veios de quartzo mineralizados

Os veios de quartzo mineralizados apresentam feições microestruturais similares aos veios descritos para a Zona de Cisalhamento Cachimbo e são igualmente interpretados como sin-cinemáticos à formação dos milonitos e filonitos. O quartzo, nos veios, exhibe feições que indicam múltiplos estágios de precipitação e recristalização deste mineral. A natureza das microestruturas varia com a posição no interior do veio.

Nas porções centrais dos veios, o quartzo apresenta grãos equigranulares e microestruturas intracristalinas como extinção ondulante, lamelas de deformação e sub-grãos.

Nas margens, o quartzo apresenta uma maior variedade de microestruturas como: (i) quartzo recristalizado, (ii) quartzo quase sem deformação com um mosaico de novos-grãos nos limites, (iii) e formação indiscriminada de matriz criptocristalina de quartzo. Essa diversidade de microestruturas nas margens dos veios é própria de anisotropias como contato veio-rocha ou ocorrência de fragmentos da rocha encaixante.

2.2.2- CARACTERÍSTICAS METALOGENÉTICAS DOS DEPÓSITOS

Os principais veios na região de interesse são controlados pelo evento de deformação transcorrente, a qual pode ser relacionada à extensa percolação de fluidos nas zonas de cisalhamento. Essas estruturas foram, possivelmente as principais descontinuidades crustais da região na época em que ocorreu a sua formação, de forma semelhante ao que já foi demonstrado em diversas outras províncias auríferas com características estruturais semelhantes (*e.g.* Eisenlohr *et al.* 1989). Isso pode ser deduzido a partir da estreita relação espacial entre os veios e as zonas de cisalhamento, bem como a partir da caracterização das zonas e dos processos de alteração hidrotermal que ocorreram associados (Mesquita, 1996).

As fontes dos fluidos envolvidos na formação de veios auríferos de quartzo são normalmente de diversas origens, como referido anteriormente. No caso da região de Porto Nacional (TO), esses fluidos podem estar geneticamente vinculados a duas fontes principais:

(i) aos processos de desidratação metamórfica associada às zonas de cisalhamento transcorrentes e (ii) à intrusão de rochas graníticas durante a evolução da transcorrência.

O processo de desidratação metamórfica pode ser mais bem explicado em termos da lixiviação, ou da mobilização de elementos incompatíveis acrescidos de fluidos das encaixantes, quando ocorreu a nucleação das zonas de cisalhamento, nos estágios de deformação e de metamorfismo mais intensos. Os fluidos vinculados às intrusões graníticas, por outro lado, podem estar relacionados à exsolução dos voláteis com o decorrer da diferenciação magmática; nesse caso, é mais provável que as rochas graníticas tenham contribuído com calor e fluidos do que com o ouro propriamente, já que magmas de composição granítica, em geral, são empobrecidos em ouro (*cf.* Guilbert 1986). Além dessas hipóteses, pode-se considerar a possibilidade dos fluidos serem de origem meteórica ou metamórfica e terem sido remobilizados pela proximidade das intrusões às zonas de falha/cisalhamento, já que constituem estruturas capazes de permear fluidos de qualquer natureza.

Nesse ponto, é necessário discutir com maior detalhe a relação genética entre as rochas graníticas da **SGgM** e da **SGL** e a formação dos veios da região de Porto Nacional (TO). Como as rochas da **SGgM** foram provavelmente formadas em um evento tectônico anterior à deformação transcorrente, o magmatismo gerador dessas rochas não deve ter contribuído com fluidos de origem primária para a formação dos veios auríferos. Somente se for demonstrado pelo decorrer das pesquisas, que as rochas dessa unidade são pré ou sin-cinemáticas ao evento tectônico que controlou a evolução da deformação transcorrente, a intensa alteração hidrotermal que se superpõe sobre essas rochas pode ter tido uma contribuição de fluidos advindos do magmatismo que as formou. As rochas da **SGL**, no entanto, devem ter contribuído para a geração dos veios auríferos vinculados às zonas de cisalhamento porque: (i) exibem feições de alteração hidrotermal que parecem ter um vínculo genético com a evolução do magmatismo, principalmente na forma de zonas de alteração hidrotermal e de minerais hidrotermais como clorita, epidoto, carbonato e turmalina e (ii) têm o seu alojamento e cristalização final controlado pelo mesmo arcabouço estrutural, geométrico e cinemático que os veios de quartzo auríferos. Assim, é plausível supor que os veios e as rochas da **SGL** tenham um vínculo genético, principalmente com os veios associados a zonas de cisalhamento que seccionam esses granitóides (garimpo: Dourado, Raiz e Verena, entre outros associados à intrusão Granito do Carmo, e Garimpo Catuaba associado à intrusão Granito Córrego Itabóca). Além dos veios onde as rochas da **SGL** podem ter contribuído com uma parte

considerável dos fluidos mineralizantes, também ocorrem veios onde a evolução do magmatismo que gerou essas rochas deve ter sido o fator principal para a formação dos veios; esse é o caso dos veios observados na intrusão Granito Ribeirão Jacaré, os quais se localizam na porção interna da intrusão e não estão relacionados às estruturas vinculadas às zonas de cisalhamento. O padrão radial de lineamentos tipo 2 observado na imagem de satélite, parece sugerir que as estruturas que alojam esses veios tipo 2 foram formadas por um processo de domeamento das encaixantes e da intrusão, com extensão concomitante, que induziu a geração das fraturas radiais e a formação de zonas dilatacionais favoráveis para o alojamento de veios. Essa hipótese será melhor embasada a partir de estudos de detalhe que foram desenvolvidos.

Na região de Monte do Carmo (TO), Lafon *et al.* (1994) realizaram um estudo geocronológico dos depósitos auríferos e das suas encaixantes graníticas por meio do método Pb/Pb. Segundo esses autores, o evento de mineralização teria ocorrido a 550 Ma, enquanto que as rochas graníticas encaixantes teriam se formado a cerca de 1.990 Ma. Portanto, se essa hipótese estiver correta, os depósitos seriam posteriores e desvinculados de qualquer relação genética com o magmatismo granítico. A origem dos fluidos seria, assim, unicamente vinculada ao metamorfismo associado às zonas de cisalhamento transcorrentes.

Entretanto, a análise estrutural do **SZCPN** (Cunha 1996) e o mapeamento litoestrutural das unidades de rochas graníticas indicam que o posicionamento das rochas da **SMgM** e **SIG** e o alojamento dos veios auríferos foram controlados por estruturas associadas à transcorrência e ao processo de intrusão. Logo, as intrusões da **SIG** e os veios mineralizados foram originados pelo mesmo evento deformacional e não poderiam apresentar um intervalo de idade tão expressivo quanto o indicado por Lafon *et al.* (1994). Além disso, Mesquita (1996) cita que todos os veios mineralizados da região de Porto Nacional (TO) teriam sido formados durante um mesmo evento de mineralização, devido à composição muito semelhante do fluido formador dos veios. Segundo Mesquita (1996), seria muito improvável que os veios tivessem sido formados em ciclos diferentes, porque isso acarretaria uma modificação marcante na composição do fluido e nas paragêneses de minerais metálicos e não-metálicos associadas/formadoras dos veios.

Há, portanto, um fator de discrepância nas datações geocronológicas, que não foi ainda suficientemente analisado e que provavelmente está vinculado à ocorrência de Pb herdado nas

rochas analisadas. A presença de Pb herdado poderia ocasionar um aumento na idade das rochas graníticas (*cf.* Causens & Ludden, 1991).

Em todos os casos supracitados, a precipitação do ouro a partir das soluções deve ter sido controlada por quatro fatores principais (Guilbert 1986):

- mudanças bruscas na temperatura e/ou na pressão;
- mudanças bruscas no Eh/pH das soluções;
- gradientes químicos induzidos pela interação com rochas muito contrastantes em termos composicionais;
- mistura de soluções.

2.2.3- MODELO INTEGRADO DE DEPÓSITO MINERAL NAS ZONAS DE CISALHAMENTO DE PORTO NACIONAL, TO

As considerações anteriores demonstram o nível elevado de complexidade na distribuição dos depósitos auríferos da região. Porém, a abordagem integrada do problema possibilitou a construção de alguns critérios prospectivos para esses depósitos:

- os depósitos auríferos estão, em sua maioria, controlados pelas estruturas que formaram o **SZCPN**. Assim, esse é o principal critério prospectivo para ouro na região;
- quando essas zonas de cisalhamento se localizam no contato entre unidades geológicas, como no caso da zona de cisalhamento Córrego Mutum (**ZCCM**) no contato entre as intrusões **Granito Córrego Itabóca** e a **SGgM** e Zona de Cisalhamento Córrego Conceição (**ZCCo**) no contato entre a intrusão **Granito do Carmo** e as rochas da **SMN**, deve ter ocorrido uma canalização maior de fluidos, o que facilitou a geração e o alojamento dos veios auríferos nessas posições. Portanto, os contatos das intrusões, quando balizados pelas zonas de cisalhamento, são locais mais favoráveis para a ocorrência de veios;
- os depósitos auríferos de veios localizam-se em zonas dilatacionais de um conjunto variado de estruturas vinculadas às zonas de cisalhamento. A localização dessas zonas dilatacionais foi controlada pelo campo tensional local e não por um único campo tensional regional (Cunha 1996). As principais estruturas dilatacionais estão em falhas e

zonas de cisalhamento de 2ª ordem, espacial e geneticamente vinculada às zonas de cisalhamento de 1ª ordem (Cunha 1996);

- as porções internas das intrusões da **SGI** necessitam ser melhor investigadas, porque, mesmo que não ocorram estruturas associadas ao evento de deformação transcorrente, podem ter sido originadas estruturas controladas por tensões magmáticas que também formaram zonas de dilatância e que podem ter alojado veios de quartzo. O detalhamento necessário refere-se ao mapeamento do padrão geométrico das estruturas sin-alojamento, já que o seu arranjo possivelmente foi modificado pelo campo tensional que formou as zonas de cisalhamento. A potencialidade metalogenética para ouro associada a essas rochas e o evento de deformação cisalhante que afeta área já havia sido aventada por Bezerra *et al.* (1981). Segundo aqueles autores, além dos depósitos auríferos, as rochas da **SGI** podem alojar depósitos de cassiterita, wolframita, fluorita e topázio em porções *greisenizadas* e de columbita-tantalita, berilo, fluorita e polucita nas fases pegmatíticas. A ocorrência de depósitos desses tipos é plausível, uma vez que os elementos químicos que constituem esses minérios são mais enriquecidos em magmas graníticos alcalinos (*cf.* Govett 1983). A distribuição dessas possíveis ocorrências também deve estar preferencialmente condicionada pelos sistemas de estruturas que afetam as rochas da **SGI**, já que esses depósitos estão vinculados à separação de fases voláteis tardias da evolução do magma e que esses depósitos normalmente estão alojados nas porções de topo ou borda superior das intrusões, preferencialmente ao longo de estruturas tectônicas. Mas, considerando-se que as intrusões relacionadas à **SGI** exibem feições de intrusões epizonais, como é indicado pela ocorrência de diques de aplitos e de rochas subvulcânicas preservadas associadas às intrusões, a possibilidade da ocorrência de depósitos de volume considerável em pegmatitos e *greisens* deve ser muito baixa, já que a maioria da carga volátil deve ter sido dispersa ao longo das fraturas de cúpula que ocorrem associadas. Como as cúpulas das intrusões já foram erodidas, a possibilidade de ocorrência de depósitos dessa natureza é pouco plausível.

Em termos metalogenéticos, o mapeamento litoestrutural indicou que os depósitos auríferos da região de Porto Nacional (TO) são associados a veios de quartzo e têm a sua distribuição vinculada principalmente a um controle estrutural exercido pelas estruturas associada à superfície deformacional $S_{m+2/n+2}$ que formou as zonas de cisalhamento transcorrentes. Nesse contexto, os veios estão associados as estruturas subsidiárias das zonas de cisalhamento principais, as zonas de clivagem e, subordinadamente, a charneiras de dobras

en echelon. As estruturas mais favoráveis para alojar veios mineralizados são zonas de dilatância, associadas a arranjos de estruturas do tipo Riedel de 2ª ordem, que desenvolveram porções transtensionais.

Já, em relação ao arcabouço litológico da área, as rochas da **SGgM** e da **SGL**, são as principais encaixantes dos veios auríferos, e parecem ter exercido influências diferentes no contexto do processo mineralizador. Assim, os veios localizados nas rochas da **SGgM** parecem ter um controle muito forte das zonas de cisalhamento transcorrentes, tanto em termos do controle na percolação dos fluidos, quanto em termos da distribuição dos veios. As rochas da **SGgM** não devem ter contribuído com fluido magmático para a formação dos veios.

Os veios associados às rochas da **SGL**, de outra forma, podem ser subdivididos em dois conjuntos: **(i)** veios predominantemente formados e controlados pela evolução das zonas de cisalhamento transcorrentes e **(ii)** veios associados à evolução do processo de alojamento e diferenciação magmática das rochas graníticas. Os veios associados à evolução do processo de alojamento estão associados a estruturas radiais, as quais foram formadas em função da pressão do magma, durante a intrusão das rochas da **SGL**.

Portanto, considerando-se o cenário acima exposto, qualquer projeto de pesquisa, exploração e exploração dos veios mineralizados deve considerar como diretrizes principais de pesquisa dos depósitos auríferos: **(i)** o controle tectônico maior exercido pelas zonas de cisalhamento, principalmente em estruturas transtensionais localizadas proximamente a rochas reativas e **(ii)** a intrusão dos granitos tardi a pós-cinemáticos da **SGL** que formou veios em áreas independentes das zonas de cisalhamento e que também modificou a posição espacial original do campo tensional e dos veios formados nos estágios anteriores ao alojamento das intrusões.

Considerando o contexto supramencionado, observa-se a predominância dos seguintes controles das mineralizações auríferas na região de Porto Nacional (TO):

1 – Controle Estrutural: esse controle diferencia-se em dois tipos principais;

- zonas de cisalhamento transcorrentes de primeira ordem que seccionam a região, porém, em cada uma dessas estruturas subsidiárias (lineamentos tipo 1 intercruzados com lineamentos tipo 2).

- Zonas de dilatância associadas a dobras “*en echelon*” formados entre as zonas de cisalhamento de 1ª ordem, (porção Noroeste da área – garimpo da Torre);
- Fraturas periféricas sub-radiais associadas a intrusões graníticas da **SGI/GRJ**.

2 – Controle Litológico: em diversas províncias tectonominerais observa-se a associação de rochas graníticas com depósitos auríferos. Porém, nem sempre é possível demonstrar a correlação genética entre essas rochas e os depósitos, como é o caso da região de Porto Nacional, como já discutido.

Considerando-se esses dois critérios no modelo prospectivo direcionado a embasar a pesquisa via geoprocessamento, as operações entre produtos e intercruzamentos considerarão, sempre como índices mais elevados, aqueles associados aos controles estruturais e, em menor escala, aqueles associados às litologias.

Pelo contexto litológico e estrutural acima exposto e o objeto principal desta Tese, ou seja, desenvolver modelos de favorabilidade para depósitos auríferos na região de Porto Nacional (TO), observa-se que não é possível efetuar o ranqueamento, ou seja, uma hierarquização dos garimpos da região, em termos de preferência para pesquisa, devido aos seguintes itens:

- Todos os principais depósitos são associados a veios de quartzo, portanto, não há características litológicas ou composicionais que permitam a separação de diferentes grupos de depósitos;
- Os depósitos exibem uma forte similaridade em termos de dimensões, ou seja, a maioria dos depósitos exibe uma espessura de até a dezena de metros, por menos de uma centena de metros de comprimento;
- Não existe uma única unidade litológica que aloja os depósitos, o que reflete a inexistência de um controle litológico principal sobre os depósitos reconhecidos até o momento;
- A maioria das áreas anômalas não possui dados quantitativos que permitiriam o dimensionamento preciso dos depósitos. Assim, não é possível efetuar uma distinção em termos de teores e volumes, mesmo que, em termos gerais, os teores possam ser enquadrados entre 1 e 2g/ton;

2.3- DO MODELO DE DEPÓSITO MINERAL AO MODELO EXPLORATÓRIO

Em função das complexidades genéticas e da dificuldade de se estabelecer um modelo prospectivo único para os depósitos auríferos associados a intrusões graníticas, qualquer campanha prospectiva nesse tipo de terreno deve considerar múltiplos critérios, que alcançam desde a mega-escala (estruturas regionais), até a meso e micro-escala em termos de mapeamento geológico, agregando a esses dados, elementos de geoquímica, mineralogia de detalhe, geocronologia e modelamento. Os principais critérios utilizados para a prospecção de depósitos auríferos em terrenos graníticos são apresentados na **Tabela V**, abaixo.

Tabela V. Critérios prospectivos para depósitos auríferos em terrenos graníticos.

Tipologia das intrusões graníticas	Plútons, <i>stocks</i> e <i>plugs</i>
Tipologia das rochas encaixantes (mineralogia, composição química, estruturas deformacionais)	Desde rochas vulcânicas até rochas sedimentares; mas, muitas vezes, ocorrem outras rochas graníticas, tais como granodioritos, tonalitos, thondjemitos
Profundidade crustal de formação do terreno	Normalmente rasa, entre 5 e 7 km
Nível de erosão	Áreas fortemente erodidas são menos favoráveis
Época da mineralização em relação aos eventos metamórficos da área	Geralmente, pós-pico do metamorfismo
Regime deformacional	Frágil-dúctil a frágil
Estilo do depósito	Veios de quartzo, zonas de venulação, <i>stockworks</i>
Ocorrência de estrutura de abrangência regional	Zonas de cisalhamento transcorrentes, charneiras de dobras de grande amplitude, intercessão de falhas e de zonas de falhas
Paragênese do minério	Pirita, pirrotita, calcopirita, esfalerita, galena, teluretos e ouro nativo

Tabela V. Critérios prospectivos para depósitos auríferos
em terrenos graníticos (continuação).

Tipologia das intrusões graníticas	Plútons, <i>stocks</i> e <i>plugs</i>
Paragênese da ganga	Quartzo, carbonato, moscovita, clorita, rutilo
Alteração das encaixantes	Albita, carbonato, moscovita, clorita, rutilo e pirita
Associação de metais	Au, Ag, Te, Bi, W e Pb
Pressão parcial de CO ₂	< 2 Kbar
Temperatura dos fluídos	250 a 300°C em média; raramente, 400°C
Salinidade do fluído	Moderada a baixa

Os contatos litológicos entre as rochas graníticas e as suas encaixantes devem ser priorizados no momento inicial da pesquisa, após a individualização das principais intrusões e o estabelecimento de uma ordem de prioridade de abordagem, considerando-se o conjunto de critérios supramencionados. Quando ocorrerem, simultaneamente, falhas, ou zonas de cisalhamento nos contatos litológicos, essas áreas devem ser priorizadas, porque podem ter servido de zonas de percolação de fluidos, tanto de origem magmática, quanto de origem metamórfica, ou mantélica, que podem ter transportado, ou remobilizado o ouro. A ocorrência de estruturas dilatacionais, após a definição do campo tensional e da geometria das estruturas de primeira ordem, é essencial para a determinação dos locais preferenciais onde podem ser encontrados os depósitos mais profícuos.

Mesmo com a utilização de múltiplos critérios, normalmente, diversas dúvidas permanecem acerca da gênese dos depósitos e dos principais controles prospectivos a serem buscados em um determinado terreno. Para tentar diminuir o grau de incerteza e diminuir o

número de hipóteses, estudos geocronológicos podem ser cuidadosamente aplicados. A seleção das amostras a serem utilizadas para datação radiométrica inicia com a caracterização das feições mesoscópicas da trama da rocha formada durante o evento deformacional que se deseja datar. A partir dessa sistematização, deve ser efetuado o reconhecimento das feições microscópicas desenvolvidas em nível dos grãos minerais durante o evento deformacional. Os parâmetros a serem observados são os seguintes:

(i) os minerais são parte de uma paragênese e de uma trama gerada em um mesmo evento deformacional. Também deve ser determinada a relação temporal entre o mineral e a formação da trama (crescimento pré, sin, tardi ou pós-cinemático) e a existência de mais de uma geração do mesmo mineral. No caso de rochas polideformadas, a trama deve ser decomposta em conjuntos que contenham as estruturas formadas em cada evento;

(ii) a natureza da deformação, ou seja, se o fluxo tectônico foi homogêneo, ou heterogêneo, bem como as condições de temperatura do fluxo. Esse é um ponto básico no momento da escolha do método a ser utilizado para a datação;

(iii) quais os mecanismos de deformação mineral que operaram durante o processo deformacional;

(iv) se, durante o desenvolvimento de um evento deformacional, ocorrem processos de recristalização e neocristalização que induzem o transporte de matéria nas rochas e que causam um reequilíbrio isotópico no sistema, as características desses processos devem ser estabelecidas para que haja uma interpretação correta dos dados geocronológicos.

A utilização conjunta desses critérios define qual a paragênese mineral que pode ser utilizada para a datação de um determinado evento deformacional. Após a separação criteriosa da paragênese mineral a ser datada, podem ser aplicados diversos métodos para a obtenção de dados quantitativos acerca da época da formação do depósito. No caso da idade específica da deformação/metamorfismo, pode ser aplicado o método Ar/Ar em micas, que fornece a idade bastante precisa da formação dos minerais, considerando-se que a sua cristalização foi concomitante à deformação/metamorfismo.

O estabelecimento da idade relativa das rochas graníticas em relação à deformação/metamorfismo também pode ser utilizado como balizador para determinar a idade aproximada do depósito. Assim, com a aplicação dos métodos U-Pb em rocha total e Pb-Pb em minerais separados, que foram amostrados segundo os critérios supramencionados e

fazem parte da mesma paragênese, pode-se restringir o conjunto de hipóteses e a época de formação aplicada a um depósito, ou a um conjunto de depósitos. Após os estudos nas rochas encaixantes, podem ser aplicados métodos geocronológicos diretamente às paragêneses associadas ao minério, como por exemplo, em galenas em paragêneses de minério. Isso permite a datação direta da deformação e, algumas vezes, também possibilita a separação de ciclos de formação de depósitos dentro de uma província (Miller *et al.*, 1994).

A pesquisa mineral de depósitos auríferos em terrenos graníticos deve observar um conjunto de diretrizes que são basicamente multidisciplinares. Isso é essencial, devido à elevada complexidade da distribuição, geometria e história genético-evolutiva dos depósitos. Estudos de nível regional devem buscar delimitar as principais estruturas tectônicas que ocorrem na área, visto que essas estruturas podem condicionar a distribuição das intrusões graníticas da área. Além disso, devem ser avaliados todos os indicadores cinemáticos disponíveis, de forma a possibilitar a determinação do campo tensional regional, que atuou na geração de espaço crustal para o alojamento das intrusões.

Após a delimitação das principais áreas alvo, deve ser desenvolvido um mapeamento litoestrutural de detalhe, com vistas a separar as diversas fácies litológicas, ou petrográficas das intrusões. Esse mapeamento deve ser desenvolvido concomitantemente a estudos petrográficos e geoquímicos de detalhe, que objetivam delinear a história evolutiva desde o líquido magmático, até a consolidação final das rochas. Estudos metalogenéticos de inclusões fluidas, isótopos e petrografia em minerais de minério devem ser efetuados para elucidar as características do minério, bem como tentar aproximar o melhor possível as condições em que ocorreu a gênese e quem foram os agentes responsáveis pela mineralização. Devem ser observados principalmente aspectos ligados à composição e a salinidade do fluido, que podem ser indicativos de uma origem magmática, metamórfica, conata, ou mista para o fluido mineralizante. Isso é especialmente importante para a definição dos metalotectos da área, que serão as rochas granitóides se o indutor do processo de mineralização foi o magmatismo, ou se estas rochas são apenas as encaixantes e os depósitos são remobilizações induzidas por um processo metamórfico. Isso é crucial para a prospecção a ser efetuada na área, porque irá definir se os alvos a serem mais detalhados são as estruturas tectônicas que ocorrem na área (i.e. dobras, falhas e zonas de cisalhamento), ou se o controle da distribuição dos depósitos é essencialmente litológico (vinculado a um determinado tipo de rocha granítica).

Os depósitos auríferos associados a terrenos graníticos ocorrem geralmente na forma de veios de quartzo. Esses veios podem ter a sua distribuição controlada tanto por estruturas regionais (principalmente zonas de cisalhamento transcorrentes e dobras), quanto por estruturas que têm a geometria controlada diretamente pela pressão exercida pelo magma quando do processo de intrusão. A diferenciação entre esses tipos de estruturas passa necessariamente pela definição do campo tensional que formou as estruturas e pela delimitação dos principais corpos intrusivos.

Um ponto a ser considerado com muita atenção é a estratigrafia dos eventos geológicos que ocorreram na área e que podem ter vinculação com a mineralização, ou seja: magmatismo, deformação e metamorfismo. Somente após todos esses processos estarem temporalmente delimitados será possível construir um modelo prospectivo consistente para a área. Para tanto, devem ser utilizados múltiplos métodos radiométricos, que possibilitem a obtenção de dados quantitativos sobre a idade dos diversos modelos geológicos.

O somatório de todas essas metodologias e dos dados que podem ser obtidos pela sua utilização permitirá construir um modelo prospectivo robusto para a área de interesse, bem como localizar mais rapidamente e com maior grau de confiança as áreas alvo e os principais depósitos.

2.3.1- ELEMENTOS BÁSICOS DE EXPLORAÇÃO PARA DEPÓSITOS DEPÓSITOS AURÍFEROS ASSOCIADOS ESPECIALMENTE À INTRUSÕES GRANÍTIAS E FORTEMENTE CONTROLADOS ESTRUTURALMENTE

As estruturas tectônicas que podem ocorrer associadas às intrusões graníticas são elementos que exercem um forte controle sobre a conformação geométrica final dos depósitos. Isso ocorre porque essas estruturas constituem-se em descontinuidades que canalizam as fases fluidas ascendentes e que estabelecem gradientes de pressão e de temperatura que induzem à precipitação das fases constituídas por voláteis + elementos metálicos e que, portanto, resultam no preenchimento das estruturas. As estruturas tectônicas associadas a rochas graníticas podem ser sistematizadas em dois tipos principais:

2.3.1.1- DEPÓSITOS ASSOCIADOS A ZONAS DE CISALHAMENTO E A ROCHAS GRANITÓIDES

As zonas de cisalhamento são as estruturas que acomodam a maior parte da deformação compressional associada à evolução dos cinturões orogênicos. Em geral, essas estruturas ocorrem como sistemas complexos, com forma sigmoidal anastomosada. A tipologia e a geometria dessas zonas de deformação são condicionadas por uma série de fatores, que incluem:

- O estado termal da litosfera, a conformação dos bordos das placas tectônicas envolvidas no evento colisional e a taxa de convergência entre as placas;
- A ocorrência de anisotropias preexistentes na crosta, que podem ser contatos entre blocos crustais, contatos e discordâncias litológicas, variações faciológicas entre litologias, estruturas deformacionais mais antigas, entre outras;
- A ocorrência de fluidos tanto nas rochas afetadas pela deformação, quanto de fluidos originados a partir de desidratação metamórfica de rochas originalmente anídras.

A estreita associação espacial entre diversas intrusões graníticas e zonas de cisalhamento, especialmente as de natureza transcorrente, conduziu diversos autores a associarem o processo de geração e de ascensão dos magmas, bem como o seu alojamento e cristalização, a essas estruturas tectônicas. A realização de estudos geofísicos e de modelamento matemático e analógico têm corroborado essa hipótese e demonstrado que as zonas de cisalhamento são as controladoras da ocorrência de diversas associações de rochas granitóides (Vigneresse, 1995).

Em termos econômicos, as zonas de cisalhamento são importantes portadoras de depósitos minerais, em especial de depósitos auríferos, porque canalizam grandes quantidades de fluidos e todos os elementos que se encontram incompatíveis diante do aumento da temperatura e da pressão na região que está sendo deformada/metamorfisada. A origem dos fluidos, em adição aos fluidos magmáticos, pode ser tanto a partir da desidratação metamórfica dos minerais das rochas, quanto águas conatas e meteóricas contidas nos poros e nas discontinuidades das rochas.

Os depósitos minerais associados às zonas de falha e às zonas de cisalhamento normalmente estão contidos em estruturas dilatacionais, onde ocorre a geração de espaço aberto para a canalização de fluidos portadores da carga mineralizada. A formação de estruturas deformacionais nas zonas de cisalhamento é controlada pela geometria da zona e pela inter-relação dos fatores de grande escala. Normalmente, a formação das estruturas associadas às zonas deformadas ocorre no estágio de *strain hardning*, ou seja, quando, após ocorrer um estágio de fluxo de alta temperatura, com fluxo plástico (*strain softening*), ocorre um abaixamento da temperatura e podem ser formadas estruturas mais frágeis, compatíveis para o alojamento da carga metálica.

O comportamento mecânico dos pacotes de rocha deformada depende da magnitude das tensões aplicadas, da taxa de aplicação da tensão, da composição dos litotipos afetados, da ocorrência de heterogeneidades e anisotropias, da pressão de fluidos, entre outras. A deformação nas zonas de cisalhamento processa-se em *pulsos*; ou seja, as rochas acomodam a deformação até o seu limite de resistência, quando ocorre o rompimento e a formação das estruturas. Nesse estágio, ocorre a percolação dos fluidos, porque as estruturas formadas constituem descontinuidades e zonas de mais alta permeabilidade e porque pode haver formação de sítios dilatacionais de baixa pressão. Após a selagem das estruturas pelos produtos precipitados a partir dos fluidos percolantes, pode ocorrer uma nova concentração da deformação, que causa o rompimento das estruturas preexistentes e a geração de novas estruturas. Para se elucidar quais pulsos de deformação foram mineralizantes, deve-se recorrer a estudos de paragêneses minerais, de inclusões fluidas e de isótopos estáveis, de modo a verificar a evolução composicional do fluido; aos estudos estruturais, para distinguir os diferentes campos tensionais e as estruturas a eles associados; e à geocronologia, para balizar temporalmente, de forma mais precisa, os eventos deformacionais e mineralizantes associados.

Essas estruturas são formadas principalmente em regiões da crosta submetida à deformação tectônica de natureza compressional, onde são formadas zonas de cisalhamento dúcteis e frágeis-dúcteis que controlam a intrusão de rochas granitóides em diversos estágios evolutivos dos cinturões orogênicos. A importância das tensões induzidas pela intrusão do magma nesses sistemas é subordinada às tensões crustais de maior magnitude, mas, apesar disso, pode ocorrer uma interação entre os dois conjuntos de tensões e uma modificação na tipologia das estruturas formadas.

A ocorrência de depósitos auríferos em zonas de cisalhamento onde também ocorrem rochas graníticas espacialmente associadas é mais controversa do que os depósitos associados a pórfiros, principalmente porque dificilmente se obtém um conjunto suficiente de evidências que defina qual a relação genética e temporal entre os depósitos auríferos e as zonas de cisalhamento que alojam as mineralizações. Isso é particularmente complicado quando as encaixantes dos depósitos são rochas graníticas, porque volta a tona toda a discussão relacionada à escolha do modelo genético metamórfico, ou magmático para os depósitos, mesmo se considerando, como foi discutido anteriormente, que a gênese do depósito, muitas vezes, é vinculada a um misto de processos ígneos e metamórficos.

A metodologia atualmente utilizada para efetuar uma avaliação mais precisa da cogeneticidade, ou não, dos depósitos auríferos com relação às zonas de cisalhamento e às intrusões graníticas situa-se no estudo integrado de variáveis geoquímicas (composição e evolução petrológica dos líquidos magmáticos), isotópicas, de inclusões fluidas e múltiplas datações geocronológicas obtidas criteriosamente.

O estudo da relação espacial entre depósitos auríferos e rochas de composição granitóide, em ambientes associados com zonas de cisalhamento, tem demonstrado que, nesses locais, a distribuição do minério está associada a estruturas contidas internamente às faixas de cisalhamento. Isso caracteriza o controle estrutural como o fator principal do depósito e denota que o controle litológico é apenas secundário, ou mesmo inexistente.

Tchalenko (1970) caracteriza as fraturas formadas com o desenvolvimento do processo de cisalhamento simples não coaxial em rochas com comportamento visco-elástico, ou puramente elástico. Essas fraturas são denominadas Riedel e apresentam um sentido de movimentação sintético, com ângulo baixo, considerando-se a direção do cisalhamento principal ($\cong 15^\circ$). Além dessas, são geradas fraturas antitéticas e com ângulo maior relativamente ao cisalhamento, denominadas Anti-Riedel ($\cong 75^\circ$). A bissetriz do ângulo agudo formado por esse par de fraturas corresponde à direção de máxima compressão do sistema (σ_1).

De acordo com Robert *et al.* (1994), existem três fatores principais que influenciam a geometria de depósitos auríferos em terrenos deformados, muitos dos quais formados predominantemente por rochas de composição granitóide. O primeiro fator é os *regimes de tensão* atuantes no momento em que os depósitos foram formados ou deformados. O segundo

fator é a ocorrência de *anisotropias*, que influenciam a localização, a geometria e a cinemática das zonas de cisalhamento e dos veios. Essas anisotropias incluem contrastes de competência, foliações, lineações, bandamento, estratificações e estruturas tectônicas preexistentes. Por fim, o terceiro fator é a *história estrutural* dos depósitos, que mostra o quanto um depósito sofreu a ação de deformações. Esses fatores demonstram que, ao se analisar a estrutura de um depósito aurífero, deve-se compreender as estruturas locais em meio a um contexto de deformação regional e, portanto, é imperativo adquirir dados estruturais em todas as escalas em qualquer programa exploratório.

Robert *et al.* (1994) também afirmam que os depósitos de veios auríferos sintectônicos são comumente associados a zonas de cisalhamento que se desenvolveram nos estágios tardios da história estrutural local. Esses depósitos normalmente se apresentam relativamente indeformados e a sua geometria são controladas (i) pelo regime de *stress/strain* que prevalecia no momento de sua formação e (ii) por anisotropias locais. Em outros casos, zonas de cisalhamento auríferas podem se desenvolver durante um incremento anterior de deformação e podem ser dobradas ou reativadas durante incrementos subseqüentes. Em tais casos, a configuração atual dos depósitos irá refletir os efeitos combinados dos fatores que controlaram o desenvolvimento da zona de cisalhamento e aqueles da deformação subseqüente. Assim, é muito importante determinar se um depósito é indeformado, ou se foi afetado por deformação posterior antes de se elaborar interpretações estruturais detalhadas.

Robert *et al.* (1994) demonstram que, em muitos distritos auríferos do Escudo Canadense, as zonas de cisalhamento podem ser agrupadas como de primeira, segunda, ou terceira ordens de acordo com suas dimensões. As zonas de cisalhamento de primeira ordem são caracterizadas como falhas longitudinais de escala crustal que marcam os limites entre os principais domínios litológicos. Essas zonas de alta deformação têm uma magnitude de mais de 100 km de extensão, mostram espessuras de mais de 1 km e mergulham segundo ângulos altos a moderados em profundidades que excedem 10 km. As zonas de cisalhamento de segunda ordem estendem-se por algumas dezenas de quilômetros, têm espessuras de várias dezenas de metros e são sub-paralelas ao *trend* estrutural regional. As zonas de cisalhamento de terceira ordem são mais abundantes, possuem comprimento de poucos quilômetros e mostram espessuras de poucos metros. As zonas de cisalhamento de primeira ordem e a maioria das de segunda ordem são sub-paralelas em orientação e mergulho ao *trend* estrutural regional e à foliação penetrativa. Em contraste, as zonas de cisalhamento de terceira ordem tendem a ser oblíquas ao *trend* estrutural. Na escala de distrito, ou de depósito, as três ordens de zonas de

cisalhamento tendem a se interceptar, fundir (coalescer) e ramificar, ao menos localmente, em arranjos tridimensionais. A maioria dos depósitos aurífera está associada às zonas de cisalhamento de terceira ordem.

Hodgson (1989) comenta que os depósitos minerais do tipo veio ocorrem mais comumente ao longo de zonas de cisalhamento frágeis e frágeis-dúcteis e menos comumente como veios de extensão nas paredes dessas zonas, ou nas porções menos deformadas que se encontram delimitadas por essas zonas; também ocorrem em zonas dilatacionais controladas pelo acamadamento, nas charneiras ou nos limbos de dobras. Segundo esse autor, apesar da anisotropia mecânica e da não homogeneidade da maioria das rochas, ao menos localmente, a rotação do eixo principal de tensão para aproximadamente 45° do limite de uma zona de fraqueza mecanicamente homogênea e aproximadamente 90° da foliação em uma zona de fraqueza mecanicamente anisotrópica resulta na estrutura interna da maioria das zonas de cisalhamento, incluindo a estrutura de quaisquer veios nela contidos.

As zonas de cisalhamento e os sistemas de zonas de cisalhamento são caracterizados, em todas as escalas, por uma geometria anastomosada tridimensional, na qual um conjunto de zonas de alta deformação circunda áreas de baixa deformação que possuem geometria romboédrica. Os limites desses romboédros podem ser formados por um sistema complexo de conjuntos de zonas de cisalhamento interceptadas, ou seja, fraturas R, R', P, P' e C de zonas de cisalhamento frágeis, ou conjuntos de zonas de cisalhamento conjugadas.

Hodgson (1989) afirma que a maioria dos veios que ocorrem no interior de zonas de cisalhamento são orientados com geometria sub-paralela ao comprimento da zona de cisalhamento, mais comumente em zonas de veios *en-échelon* oblíquos em relação aos limites da zona de cisalhamento no mesmo sentido que as fraturas P. As formas estruturais mais comuns dos veios mineralizados são como brechas com preenchimentos homogêneos, ou crustiformes, como veios bandados crustiformes, ou como uma forma laminada, que varia de textura *ribbon* a zonas de vênulas foliadas. As zonas de vênulas foliadas gradam para filões de minério disseminado com decréscimo no tamanho e aumento na homogeneidade da distribuição dos agregados minerais. Alguns veios laminados apresentam localmente estilólitos, devido à dissolução por pressão e recristalização. Os veios de extensão podem ocorrer como arranjos de veios “em degraus” localizados em camadas competentes, diques, ou veios anteriores. Eles também podem ocorrer como veios maiores nos domínios não cisalhados entre as zonas de cisalhamento, ou podem formar franjas em veios de

cisalhamento. Os veios de extensão podem mostrar texturas crustiformes, ou brechadas, assim como acamadamento devido à abertura por meio de mecanismos de *crack-seal*. Muitos veios, ou *ore shoots* em veios são localizados na intercessão de conjuntos de zonas de cisalhamento. Zonas geometricamente similares podem ocorrer nas charneiras de dobras e são denominadas *saddle reefs*.

Hodgson (1989) enfatiza, ainda, que os veios mineralizados variam em suas características geométricas e mineralógicas durante a evolução da área mineralizada, e também de um local a outro dentro da área, conforme mudam as condições reológicas. Um padrão comum é arranjos de veios de extensão *en-échelon*, precoces, estéreis, embora alinhados ao longo de uma zona de fraturas frágeis; eles são posteriormente incorporados como veios altamente deformados em uma zona de cisalhamento dúctil superposta. Mais tarde na história do cisalhamento dúctil, a zona dilata e veios de cisalhamento mineralizados alojam-se. A última fase de mineralização é comumente caracterizada por vênulas localizadas nos veios de cisalhamento previamente formados. Dentro de um único veio, diferentes formas de ocorrência de minério podem se desenvolver quando o veio cruza tipos de rochas mecanicamente diferentes; nesses casos, é possível caracterizar um veio tipo brecha nas rochas mais competente, um veio laminado nas rochas de comportamento mecânico intermediário e uma zona de minério disseminado nas rochas menos competentes. A mesma progressão de formas pode ser relacionada com mudanças nas propriedades mecânicas de um único tipo de rocha com mudança na pressão e na temperatura no momento de alojamento do veio; o minério disseminado seria formado nos ambientes mais profundos e mais quentes e as brechas, ou veios bandados nos ambientes mais superficiais.

Hodgson (1989) propõem que os processos de dilatância que resultam no desenvolvimento de veios mineralizados são causados por forças tectônicas e são uma parte integral da distorção total das áreas mineralizadas. As evidências apresentadas indicam que o alojamento de veios não é apenas o resultado de zonas de fraqueza preexistentes sendo dilatadas por excesso de pressão de fluidos, embora a pressão de fluidos em ambientes formadores de veios auríferos deva ser alta e ser próxima, ou exceder, por curtos períodos de tempo, à pressão litostática. Os mecanismos tectônicos mais importantes para a geração de dilatância apresentados por Hodgson (1989) são:

a) abertura de fraturas de extensão;

- b) rotação, durante o progresso da deformação, de fraturas formadas a menos de 45° do eixo de máximo encurtamento;
- c) cisalhamento simples ao longo de superfícies não-planares;
- d) rotação externa variável de acamadamentos mecanicamente efetivos;
- e) dilatação no lado convexo de camadas encurvadas;
- f) dilatação como uma componente de encurtamento total não-homogêneo em arranjos de zonas de cisalhamento com diferentes sentidos de movimento (conjugados).

O último mecanismo é considerado por Hodgson (1989) como o mais importante na geração de depósitos de ouro relacionados a zonas de cisalhamento. Por sua vez, Sibson (1990) caracteriza dois tipos principais de irregularidades: a) *jogs* de falhas ligando segmentos de falha *en échelon* e b) *bends* de falhas isoladas. Cada uma dessas irregularidades pode ser classificada como dilatacional, ou anti-dilatacional, dependendo do movimento relativo entre os blocos (ver Sibson, 1990, p.117).

Os fenômenos de dilatância aumentam a porosidade geral das massas de rocha e desenvolvem armadilhas (*traps*) para as soluções mineralizantes, em diferentes ordens de magnitude, dentro de falhas e zonas de cisalhamento. Essas aberturas são os principais alvos para a localização de depósitos minerais nesse tipo de ambiente geológico.

2.3.1.2- ELEMENTOS BÁSICOS DE EXPLORAÇÃO PARA DEPÓSITOS ASSOCIADOS A ESTRUTURAS CONTROLADAS POR PRESSÕES INDUZIDAS PELO MAGMA

Nos depósitos auríferos onde as rochas encaixantes são rochas granitóides e a ocorrência de estruturas deformacionais é restrita, ou mesmo ausente, além do controle litológico, observa-se que a distribuição espacial dos depósitos ocorre segundo estruturas tectônicas de natureza completamente diversa daquela discutida anteriormente. Essas estruturas ocorrem associadas a corpos graníticos intrudidos em ambiente extensional, onde a magnitude das tensões magmáticas produzidas pela pressão do magma intrusivo sobrepuja a magnitude das tensões tectônicas. Além desse fator, a tipologia e a distribuição das estruturas depende também da interação entre a pressão litostática e a orientação do campo tensional regional (Suppe 1985), que tende a modificar a geometria e a tipologia das estruturas.

As pressões magmática e litostática determinam a capacidade de domeamento das encaixantes pelo magma, induzindo e controlando a forma de propagação de fraturas nas rochas encaixantes. Os processos de domeamento e de fraturamento ocorrem quando a pressão confinante gerada pela coluna de rochas sobrepostas é inferior à pressão exercida pelos líquidos magmáticos, acrescidos da carga de voláteis. O campo de tensões regionais interfere na forma da distribuição das estruturas, na medida em que os padrões das estruturas induzidas pelo magma são infletidos segundo as direções dos esforços regionais.

Em uma situação ideal, considerando-se um domeamento ocasionado pela colocação de um corpo granítico de seção circular em profundidades rasas (em geral entre 1 e 5 km) em um ambiente anorogênico, formam-se, em profundidade, fraturas radiais, fraturas cônicas e fraturas anelares (*cf.* Suppe 1985). Koide & Bhattacharji (1975) sugerem um modelo preditivo para os padrões de fraturas desenvolvidos em torno de um centro vulcânico onde ocorre subsidência de blocos, considerando variações na forma dos plútons e da pressão magma+voláteis. Esses autores concluem que há uma distribuição zonal das fraturas, de modo que os sistemas de fraturas cônicas ocorrem próximas da câmara magmática, enquanto as fraturas radiais ocorrem ao longo da periferia. Zonas brechóides ocorrem associadas principalmente acima do eixo principal do corpo e em uma zona intermediária entre as fraturas cônicas e as radiais.

Withjack & Scheiner (1982), utilizando modelos analógicos, fazem predições dos padrões de fraturas e dos tipos de deslocamento de rochas associados à colocação de domos. Esses autores avaliam modificações nos padrões das estruturas, em função de variações na forma do domo e da interferência do campo de tensões regionais. Tais modelos podem ser considerados como um refinamento do modelo de Suppe (1985), por fornecerem uma melhor caracterização da distribuição das estruturas e por facilitarem o entendimento dos padrões de fraturas associados a domos graníticos. Segundo Withjack & Scheiner (1982), três tensões principais, resultantes da pressão do magma, da pressão de carga e das deformações regionais, definem o estado de tensão na superfície de um domo. Uma tensão principal é normal à superfície e é sempre nula; as duas outras tensões são horizontais e agem como planos perpendiculares à superfície do domo. Considerando-se a distribuição das tensões, três zonas principais podem ser reconhecidas:

(i) uma zona A, onde ambas às tensões horizontais são trativas;

(ii) uma zona B, onde uma das tensões horizontais é compressiva e a outra trativa; e

(iii) uma zona C, onde ambas às tensões horizontais são compressivas.

O tipo de movimento produzido pelas fraturas durante o processo de domeamento está diretamente relacionado às posições das tensões principais. Assim, fraturas de empurrão (falhas inversas) formam-se quando as tensões maior (σ_1) e intermediária (σ_2) forem horizontais. As fraturas transcorrentes formam-se quando as tensões maior (σ_1) e menor (σ_3) são horizontais. As fraturas normais formam-se quando a tensão maior (σ_1) for vertical e as tensões menor (σ_3) e intermediária (σ_2) forem horizontais. Em relação à distribuição das tensões aplicadas, considerando-se variadas quantidades de domeamento, podem ser inferidos os seguintes padrões de fraturas nos modelos analógicos:

a) para um **domo circular**, a zona A ocorre próximo do topo, a zona B nos flancos e a zona C ao longo da periferia. A direção de maior tensão compressiva horizontal é radial em todas as zonas. No caso de ocorrer extensão regional simultaneamente, as zonas A e B são maiores e a zona C é menor; a posição da maior tensão compressiva horizontal é aproximadamente perpendicular à tensão trativa aplicada. Em uma situação onde o domo circular sofre compressão regional simultânea, a zona A é menor e as zonas B e C são maiores; a posição da maior tensão compressiva horizontal é aproximadamente paralela à direção da compressão aplicada.

b) para um **domo elíptico**, a distribuição das tensões superficiais é semelhante a dos domos circulares, mas a direção de maior tensão compressiva horizontal não é radial. Contrariamente, ela tende a ser paralela ao eixo maior do domo próximo ao cume e radial apenas próximo da periferia. Quando ocorre uma extensão regional simultânea ao domeamento, a zona A é maior, a zona B mantém-se igual e a zona C é menor. No caso de uma compressão regional, o tamanho da zona A diminui e as zonas B e C aumentam. A posição da maior tensão compressiva horizontal é aproximadamente paralela à direção da compressão aplicada.

A partir desses modelos, sob as diversas situações apresentadas, Withjack & Scheiner (1982) chegaram às seguintes conclusões:

a) Domos Circulares:

- sem a interferência de tensões regionais, os domos circulares geram padrões de falhas radiais, em geral, com deslocamento normal. O modelo teórico prediz a formação de falhas de

empurrão e transcorrentes próximo das periferias; porém, esses padrões não foram gerados nos modelos analógicos;

- com extensão regional durante o domeamento, predominam falhas normais na zona de topo, com direção perpendicular à maior extensão. As falhas nos flancos têm deslocamentos normais, com a direção conformando um ângulo oblíquo com a direção de maior extensão regional. Falhas transcorrentes podem ocorrer próximo das periferias, formando um ângulo de aproximadamente 60° com o maior esforço trativo;

- com compressão regional associada ao domeamento, a maior parte das falhas normais, tanto na borda, quanto nos flancos têm a direção paralela à direção de maior compressão regional.

Falhas transcorrentes podem formar-se nos flancos, com um ângulo de cerca de 30° com a direção de compressão regional. Falhas de empurrão formam-se principalmente com um *trend* perpendicular à direção de maior compressão nas zonas de periferia do domo.

Domos Elípticos:

- sem a interferência de tensões regionais, formam-se falhas normais no topo do domo; essas fraturas dispõem-se paralelamente ao eixo maior de extensão. Embora os modelos analíticos sugiram a formação de fraturas transcorrentes e de empurrão próximas da periferia, essas não se confirmaram nos modelos analógicos;

- com extensão regional associada, formam-se fraturas normais no topo e na periferia dos domos, as quais são perpendiculares à direção de maior extensão;

- com compressão regional associada, formam-se falhas normais no topo e nas periferias do domo, mas elas estão dispostas paralelamente à direção de maior compressão regional. Fraturas transcorrentes com ângulo de 30° em relação à direção de compressão regional, podem formar-se nos flancos. Fraturas de empurrão com direção aproximadamente perpendicular à direção de maior compressão regional, podem formar-se nas periferias.

CAPÍTULO 3

3- REVISÕES CONCEITUAIS

3.1- APRESENTAÇÃO

O processamento dos dados iniciou pela elaboração de uma revisão conceitual que buscou embasar, de forma consistente, a escolha da metodologia de análise dos bancos de dados, além de fornecer subsídios para a interpretação dos produtos finais. Dada a extensa gama de produtos a serem integrados, como é necessário tanto para a realização de trabalhos prospectivos, quanto para a construção de um arquétipo de geoprocessamento e integração de dados, tornou-se inevitável a elaboração de um estudo bibliográfico extenso e minucioso, para que os resultados finais ocorrem construídos em bases realísticas. Dessa forma, todos os principais itens a serem integrados foram avaliados, o que resultou na revisão conceitual que segue.

3.2- PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS

O objetivo principal desse texto é discutir as premissas, procedimentos e resultados envolvidos em levantamentos geofísicos aéreos, em especial, os levantamentos magnetométricos. Para tanto, utilizou-se a mesma seqüência metodológica proposta por diversos autores no encontro temático de artigos denominado “Serviços magnéticos e radiométricos” (Gunn *et al.* 1997). A ordenação desses estudos buscou primeiramente avaliar os aspectos teóricos relacionados aos aerolevantamentos; posteriormente, foram consideradas diversas metodologias de processamento e de interpretação de dados e, como síntese conclusiva, foram abordados diversos estudos de caso onde se aplicaram os conceitos e as metodologias desenvolvidas.

A interpretação de dados obtidos em aerolevantamentos necessita da observação prévia de uma série de procedimentos analíticos. Normalmente, após a coleta de dados, é efetuada uma fase de pré-processamento com o objetivo de realizar diversas correções e calibrações para eliminar problemas intrínsecos do levantamento aéreo e, também, inerentes

às características do tipo de dado que está sendo investigado (i.e., interações com a matéria, variações temporais, interferências com outros campos potenciais locais, etc.).

Posteriormente, os bancos de dados obtidos podem ser tratados, por meio da utilização de técnicas de processamento digital. O processamento digital objetiva fornecer ferramentas para facilitar a identificação e a extração da informação contidas nos conjuntos de dados, para posterior interpretação. Nesse sentido, sistemas de computação são utilizados para atividades interativas de análise e de manipulação dos dados. O resultado desse processo é a produção de diversos tipos de produtos gráficos, que já contém informações específicas, extraídas e realçadas a partir das imagens brutas.

A utilização de um método geofísico para a resolução de um problema geocientífico deve considerar alguns critérios básicos:

- a escolha correta da instrumentação;
- a densidade de leituras para caracterizar corretamente a feição que está sendo analisada;
- a relação n° de leitura x custos x tempo também é um quesito básico para a viabilização do serviço geofísico.

Uma característica de muitos dados geológicos e anomalias culturais observadas é a ocorrência de uma lineação consistente. Isso pode refletir uma grande gama de feições geológicas, de natureza estrutural, composicional, entre outras.

A definição mais correta da malha de amostragem é um adensamento das linhas que seccionam a feição linear e uma diminuição das linhas que ocorrem paralelas à essas feições.

3.2.1- AEROMAGNETOMETRIA

3.2.1.1- PETROLOGIA E PETROFÍSICA MAGNÉTICAS

Clark (1997) discute detalhadamente as características petrológicas das rochas e as suas particularidades e propriedades importantes para os levantamentos prospectivos. O texto abaixo procura sintetizar o conhecimento expresso por este autor, com modificações associadas a correlações possíveis de serem efetuadas sobre a área de estudo.

As anomalias magnéticas são geradas a partir de fontes localizadas em diversas profundidades da crosta terrestre, até a superfície de Curie. Portanto, mapeamentos que utilizam métodos magnéticos fornecem informações geológicas tridimensionais. Ao contrário

de outros métodos, tais como radiometria e sensoriamento remoto, que possuem um alcance apenas superficial, ou têm um limite de penetração bastante raso, a magnetometria apresenta a possibilidade de alcançar grandes profundidades. Essa propriedade dos aerolevantamentos magnéticos ainda é pouco explorada, devido à ausência de ferramentas adequadas para a manipulação de grandes conjuntos de dados tridimensionais. Atualmente, com o aumento considerável do potencial de processamento computacional de grandes conjuntos de dados, a integração de dados magnetométricos desse tipo com outros dados geocientíficos, possibilita um aumento significativo no potencial interpretativo do conjunto como um todo.

Uma limitação crucial das interpretações 3D de levantamentos magnéticos é a distribuição de diversas fontes de campo potencial. Essa ambigüidade na geometria das fontes apenas pode ser verificada por meio de modelos. O controle mais importante para fornecer consistência ao modelo magnético é a qualidade e o número de informações magnéticas. O entendimento dos fatores que determinam a intensidade de magnetização e as direções das unidades geológicas contidas na área mapeada por magnetometria é essencial para diminuir as ambigüidades geológicas e geofísicas e produzir uma interpretação realística da geologia em sub-superfície.

A capacidade de adquirir, processar e visualizar conjuntos de dados magnéticos em grande quantidade e com grande qualidade tem extrapolado em muito a capacidade atual de extrair todas as informações geológicas neles contidas.

A interpretação dos dados magnetométricos tem sido sub-utilizada devido, principalmente, à ausência de informações sobre as propriedades magnéticas dos materiais geológicos contidos na área de interesse, associado ao baixo nível de entendimento disponível acerca dos processos geológicos que influenciam as assinaturas magnéticas das rochas.

Com a ausência de medidas das propriedades magnéticas, regras simplistas têm sido aplicadas para tentar aproximar o valor real dessas propriedades. Além disso, correlações empíricas entre a geologia mapeada e as propriedades magnéticas das rochas não devem ser extrapoladas para outras áreas, principalmente se ocorrem poucas exposições de rocha e se existem acentuadas diferenças nos tipos de ambientes deposicionais, nos padrões estruturais e no grau metamórfico das unidades litotectônicas.

O objetivo da petrologia magnética é integrar a petrologia convencional aos processos interpretativos normalmente utilizados em levantamentos magnetométricos, principalmente no que concerne aos processos que criam, alteram e induzem à destruição dos minerais

magnéticos nas rochas. O relacionamento integrado entre a caracterização da mineralogia magnética, da petrologia e da geoquímica das rochas pode permitir uma interpretação mais consistente dos fatores geológicos que controlam as assinaturas magnéticas e, por consequência, a interpretação geológica que se deseja obter dos dados magnetométricos.

3.2.1.1.1- PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DAS ROCHAS

A matéria magnetizada contém uma distribuição de “momentos magnéticos”. A magnetização “**J**” é definida como o momento de dipólo magnético por unidade de volume de material. A magnetização induzida “**J_i**” é a componente de magnetização produzida em resposta a um campo aplicado. A magnetização induzida varia de acordo com mudanças no campo aplicado e acaba quando o campo é removido. A magnetização remanente “**J_r**” é a magnetização que permanece quando o campo aplicado é removido e, assim, é pouco afetada por campos fracos.

A magnetização total é o vetor soma das magnetizações induzida e remanente e pode ser definida pela seguinte equação:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_i + \mathbf{J}_r$$

Para campos magnéticos suficientemente fracos, a magnetização induzida é aproximadamente proporcional ao campo aplicado; a constante de proporcionalidade é conhecida como susceptibilidade (K). Assim, se o campo aplicado for denominado F, a magnetização total é definida por:

$$\mathbf{J}_i = \mathbf{KF}; \mathbf{J} = \mathbf{KF} + \mathbf{J}_r \quad \text{eq.1}$$

Para a maioria das rochas, a magnetização é essencialmente paralela ao campo aplicado, independentemente da direção do campo.

3.2.1.1.2- MINERAIS MAGNÉTICOS NAS ROCHAS

O diamagnetismo é a resposta dos elétrons que orbitam os átomos à aplicação de um campo magnético. Os movimentos dos elétrons se ajustam de forma contrária ao campo aplicado, o que caracteriza uma susceptibilidade magnética negativa. Minerais diamagnéticos,

como calcita e quartzo, têm susceptibilidades muito fracas e negativas, entre -10^{-6} G / O_E e -10^{-5} SI), e são considerados não magnéticos para propósitos geofísicos.

Os minerais que contêm ferro, manganês, ou outros metais de transição e que contêm íons de ETR são paramagnéticos. Os minerais paramagnéticos, tais como olivinas, piroxênios e ilmenita pura, têm uma fraca susceptibilidade positiva (máxima de $\sim 10^{-3}$ G/Oe $\cong 10^{-2}$ SI), em geral menor do que $\sim 10^{-4}$ G/Oe $\cong 10^{-3}$ SI), e não são portadores de remanência. Esses minerais são normalmente pouco importantes para a interpretação magnética, dado que a maioria das rochas contém uma pequena porcentagem de minerais com essa propriedade.

Os minerais que possuem uma magnetização espontânea podem ser sistematizados como ferromagnéticos *sensu stricto* (*e.g.* ferro) ou ferrimagnéticos (*e.g.* magnetita). O ferromagnetismo ocorre quando interações e trocas tendem a alinhar os *spins* dos elétrons.

Para efeito de simplificação, todos os minerais fortemente magnéticos são definidos como ferromagnéticos. Esses minerais perdem a sua característica magnética em uma determinada temperatura, denominada Temperatura Curie (T_c), a qual é função apenas da composição da fase mineral. Abaixo da T_c , o mineral mantém a elevada susceptibilidade e pode exibir uma magnetização remanente. Acima da T_c , o mineral torna-se paramagnético, com baixa susceptibilidade e nenhuma magnetização remanente.

A suscetibilidade dos minerais antiferromagnéticos é baixa, similar aos minerais paramagnéticos e não adquirem remanência.

As tabelas abaixo indicam os valores médios de susceptibilidade magnética dos principais minerais formadores das rochas. Já o diagrama da **Figura 11** exibe as variações de susceptibilidade magnética das principais rochas que ocorrem na crosta terrestre.

Tabela VI. Relação tipo de magnetismo e susceptibilidades
dos principais minerais magnéticos.

MINERAL	TIPO DE MAGNETISMO	SUSCEPTIBILIDADE (G/Oe)	SUSCEPTIBILIDADE (SI)
Quartzo	Diamagnética	-1.2×10^{-6}	-1.5×10^{-6}
Ortoclásio	Diamagnética	-1.1×10^{-6}	-1.4×10^{-6}
Forsterita	Diamagnética	-1.0×10^{-6}	-1.3×10^{-6}
Calcita	Diamagnética	-1.0×10^{-6}	-1.3×10^{-6}
Gipsita	Diamagnética	-2.3×10^{-6}	-2.9×10^{-6}
Anidrita	Diamagnética	-4.7×10^{-6}	-5.9×10^{-6}
Halita	Diamagnética	-0.8×10^{-6}	-1.0×10^{-6}
Galena	Diamagnética	-2.6×10^{-6}	-3.3×10^{-6}
Esfalerita	Diamagnética	-1.4×10^{-6}	-1.3×10^{-6}
Apatita	Diamagnética	-0.85×10^{-6}	-1.1×10^{-6}
Faialita	paramagnética	390×10^{-6}	490×10^{-6}
Ferrosilita	paramagnética	260×10^{-6}	330×10^{-6}
Hedenbergita	paramagnética	220×10^{-6}	270×10^{-6}
Olivina	paramagnética	$10...430 \times 10^{-6}$	$12...540 \times 10^{-6}$
Ortopiroxênio	paramagnética	$10...260 \times 10^{-6}$	$12...330 \times 10^{-6}$
Clinopiroxênio	paramagnética	$50...220 \times 10^{-6}$	$60...280 \times 10^{-6}$
Actinolita	paramagnética	40×10^{-6}	50×10^{-6}

Tabela VI. Relação tipo de magnetismo e susceptibilidades dos principais minerais magnéticos (continuação).

MINERAL	TIPO DE MAGNETISMO	SUSCEPTIBILIDADE (G/Oe)	SUSCEPTIBILIDADE (SI)
Flogopita	paramagnética	15...25 x 10 ⁻⁶	20...30 x 10 ⁻⁶
Moscovita	paramagnética	3...60 x 10 ⁻⁶	4...75 x 10 ⁻⁶
Cordierita	paramagnética	15...90 x 10 ⁻⁶	20...110 x 10 ⁻⁶
Epidoto	paramagnética	80 x 10 ⁻⁶	100 x 10 ⁻⁶
Esfeno	paramagnética	20 x 10 ⁻⁶	30 x 10 ⁻⁶
Psilomelano	paramagnética	270 x 10 ⁻⁶	340 x 10 ⁻⁶
Ilmenita	paramagnética	150 x 10 ⁻⁶	190 x 10 ⁻⁶
Hausmanite	paramagnética	60 x 10 ⁻⁶	75 x 10 ⁻⁶
Cromita	paramagnética	225...580 x 10 ⁻⁶	280...730 x 10 ⁻⁶
Espinélio	paramagnética	2 x 10 ⁻⁶	3 x 10 ⁻⁶
Siderita	paramagnética	210...81 x 10 ⁻⁶⁰	260...1020 x 10 ⁻⁶
Magnesita	paramagnética	5 x 10 ⁻⁶	6 x 10 ⁻⁶
Dolomita	paramagnética	1 x 10 ⁻⁶	1.2 x 10 ⁻⁶
Rodocrosita	paramagnética	380 x 10 ⁻⁶	480 x 10 ⁻⁶
Pirita	paramagnética	3.4 x 10 ⁻⁶	4.3 x 10 ⁻⁶
Marcasita	paramagnética	5...20 x 10 ⁻⁶	6...25 x 10 ⁻⁶
Esfalerita	paramagnética	0...160 x 10 ⁻⁶	0...200 x 10 ⁻⁶
Calcopirita	paramagnética	25...35 x 10 ⁻⁶	30...40 x 10 ⁻⁶
Bornita	paramagnética	15...70 x 10 ⁻⁶	55...90 x 10 ⁻⁶
Arsenopirita	paramagnética	3...50 x 10 ⁻⁶	4...60 x 10 ⁻⁶

Tabela VI. Relação tipo de magnetismo e susceptibilidades dos principais minerais magnéticos (continuação).

MINERAL	TIPO DE MAGNETISMO	SUSCEPTIBILIDADE (G/Oe)	SUSCEPTIBILIDADE (SI)
Hornblenda	paramagnética	60...110 x 10 ⁻⁶	75...130 x 10 ⁻⁶
Anfibólio sódico	paramagnética	270 x 10 ⁻⁶	340 x 10 ⁻⁶
Piropo	paramagnética	40 x 10 ⁻⁶	50 x 10 ⁻⁶
Almandina	paramagnética	210...530 x 10 ⁻⁶	260...660 x 10 ⁻⁶
Espessartita	paramagnética	540 x 10 ⁻⁶	680 x 10 ⁻⁶
Andradita	paramagnética	180...350 x 10 ⁻⁶	230...440 x 10 ⁻⁶
Biotita	paramagnética	70...260 x 10 ⁻⁶	90...330 x 10 ⁻⁶

Tabela VII. Relação entre a composição química, a magnetização espontânea e a temperatura Curie, dos principais minerais magnéticos.

Mineral	Fórmula Química	Magnetização espontânea (G)	Temperatura "Curie"
Ferro	Fe	1770	770
Awaurita	Ni ₃ Fe	950	620
Magnetita	Fe ₃ O ₄	480	578
Ulvoespínélio	Fe ₂ TiO ₄	0	-153
Titanomagnetita	Fe _{3-x} Ti _x O ₄	~480~600 (x<0.8):0(x>=0.8)	~578-580x
Magaetita	yFe ₂ O ₃	440	-150x ²

Tabela VII. Relação entre a composição química, a magnetização espontânea e a temperatura Curie, dos principais minerais magnéticos (continuação).

Mineral	Fórmula Química	Magnetização espontânea (G)	Temperatura "Curie"
Kenomagnetita	$Fe_{3-y}O_4$ ($0 < y < 1.3$)	~460	$\gg 300$ (750?)
Titanomagaetita	$Fe_{(3-x)r} Ti_{xr}O_4$ ($0.89 < R < 1$)	10...70 (não monotónico)	~600...630 (amplitude comum)
Magnesioferrita	$MgFe_2O_4$	≤ 220 (varia em função da distância entre os cátions)	≤ 420 (varia em função da distância entre os cátions)
Cromita	$FeCr_2O_4$	0	-185
Ferricromita/Cr-magnetita	$Fe_{3-x}Cr_xO_4$ $0 \leq x \leq 1.2$ e. g. Fe_2CrO_4	250	-185...578 200
Hericitina	$FeAl_2O_4$	0	-265
uvoespinélio magnésiano	Mg_2TiO_4	0	Diamagnético
Picrocromita	$MgCr_2O_4$	0	-258
Espinélio	$MgAl_2O_4$	0	Diamagnético
Jacobsita	$MnFe_2O_4$	397	300
Jacobsita/Mn-magnetita	$Fe_{3-x}Mn_xO_4$	$0 \leq x \leq 2.5$	
Trevorita	$NiFe_2O_4$	330	595
Cousconita	FeV_2O_4	0	-164
Hematita	alfa $FeTiO_3$	2	680
Ilmenita	$FeTiO_3$	0	-205

Tabela VII. Relação entre a composição química, a magnetização espontânea e a temperatura Curie, dos principais minerais magnéticos (continuação).

Mineral	Fórmula Química	Magnetização espontânea (G)	Temperatura "Curie"
Titanoematita	$\text{Fe}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$	$0 \leq x \leq 0.5$: antiferro $0.5 \leq x \leq 0.8$: ferro $0.8 \leq x \leq 1$	~680-885
Pirrotita monoclinica	Fe_7S_8	90	320
Pirrotita exagonal	$\text{Fe}_9\text{S}_{10} \dots \text{Fe}_{11}\text{S}_{12}$	0	270-240
Smythita	Fe_9S_{11}	~50	>.....300(~400?)
Greigita	Fe_3S_4	~30	~350

**FIGURA 11 - VARIAÇÕES DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA DAS
PRINCIPAIS ROCHAS QUE OCORREM NA CROSTA**

3.2.1.1.3- ANISOTROPIA MAGNÉTICA DE MINERAIS E ROCHAS

Esse fenômeno não pode ser descrito como uma quantidade escalar, porque toma a forma de um tensor de segunda ordem. Para qualquer cristal e, aproximadamente da mesma forma, para qualquer rocha homogênea, mas anisotrópica, 3 eixos ortogonais podem ser definidos, ao longo dos quais a susceptibilidade tem um valor máximo, um intermediário e um valor mínimo. Esses três eixos definem o elipsóide de susceptibilidade (Nye, 1957), o qual descreve o comportamento da susceptibilidade e caracteriza a petrografia magnética da rocha.

A foliação magnética é o plano que contém os eixos de susceptibilidade maior e intermediário e normalmente reflete as estruturas planares da rocha. A lineação magnética coincide com o eixo maior de susceptibilidade e reflete as estruturas lineares da rocha.

Embora quase todas as rochas exibam alguma susceptibilidade magnética anisotrópica, a qual pode ser interpretada em termos de petrografia, um baixo grau de anisotropia geralmente é suficiente para influenciar a forma das anomalias magnéticas. As exceções são as formações ferríferas bandadas (BIF) e alguns tipos de rochas e de minérios que contém pirrotita com uma forte orientação preferencial. Em rochas que contém uma forte anisotropia magnética, a susceptibilidade varia significativamente com a direção do campo magnético e, geralmente, a magnetização não é paralela ao campo aplicado, porque ela tende a ser defletida para longe de um eixo de baixa susceptibilidade, em direção a um eixo de alta susceptibilidade.

3.2.1.1.3.1- PROPRIEDADES DE ROCHAS E MINÉRIOS ALTAMENTE MAGNÉTICOS

Rochas com elevadas porcentagens de magnetita e de pirrotita apresentam fortes dificuldades para a interpretação dos resultados magnetométricos. Isso decorre principalmente dos seguintes fatores:

- desmagnetização;
- anisotropia de susceptibilidade;
- razão de Koenigsberger;
- direção do paleomagnetismo durante a aquisição de magnetização remanente;

- época da magnetização remanente em relação à deformação;
- perturbação do campo geomagnético por anomalias intensas.

O modelamento de anomalias magnéticas ignora, muitas vezes, os efeitos de anisotropia e de remanência e utiliza a premissa de que a magnetização é paralela ao campo geomagnético.

3.2.1.1.4- PETROLOGIA MAGNÉTICA

A petrologia magnética integra o magnetismo das rochas e a petrologia convencional para caracterizar a composição, a abundância, as microestruturas e as paragêneses dos minerais magnéticos e busca, a partir desse arcabouço, definir os processos que criam, alteram e causam a destruição dos minerais magnéticos das rochas.

A petrologia magnética reflete basicamente a divisão do ferro nas rochas entre minerais fortemente magnéticos, tais como óxidos e sulfetos, e minerais fracamente, ou não magnéticos, tais como silicatos, carbonatos, etc. Essa repartição depende da composição química, do estado de oxidação do ferro e das condições petrogenéticas que atuaram durante a evolução da rocha.

Considerando-se esse contexto, pode-se elaborar as seguintes assertivas acerca das propriedades magnéticas das rochas:

3.2.1.1.4.1- ROCHAS ÍGNEAS

As rochas granitóides apresentam uma susceptibilidade magnética bimodal, que caracteriza a existência de 2 categorias distintas de rochas: **1-** granitóides da série da magnetita e **2-** granitóides da série da ilmenita (Ishihara, 1977). As rochas da série da magnetita são relativamente oxidadas e correspondem aproximadamente aos granitóides do tipo I de Chapell & White (1974). Já as rochas da série da ilmenita são mais reduzidas. Classificações petrográficas detalhadas, que incluem os minerais varietais, fornecem uma base mais preditiva para o entendimento das propriedades magnéticas das rochas ígneas.

Considerando-se um *ranking* de diminuição de susceptibilidade, pode-se citar que o Cu e o Au estão associados às rochas da série da magnetita, em suítes granitóides intermediárias do tipo I. O molibdênio tende a ocorrer associado a rochas do tipo I, série da magnetita, mais fracionadas. O Sn tende a ocorrer associado a rochas granitóides paramagnéticas reduzidas, de suítes do tipo I fracionadas ou do tipo S.

Para rochas cogenéticas, há uma correlação geral positiva entre susceptibilidade e basicidade. Assim, nas rochas plutônicas e vulcânicas, quanto maior a basicidade maior a susceptibilidade magnética.

3.2.1.1.4.2- ROCHAS SEDIMENTARES

As rochas carbonáticas puras e os sedimentos clásticos têm uma susceptibilidade muito baixa. Alguns arenitos imaturos são magnéticos, porque contém quantidades significativas de magnetita detrital. As formações ferríferas bandadas são fortemente magnéticas e também exibem uma elevada susceptibilidade.

Na maioria das vezes, os aerolevantamentos magnéticos sobre bacias sedimentares têm buscado a determinação da profundidade do embasamento. Porém, os estudos mais recentes têm buscado, além desse parâmetro, obter outros elementos, tais como a separação de litologias e a distinção de outras estruturas.

3.2.1.1.5-EFEITOS DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL

Studemeinster (1983) apud Clark (1997) citou que o estado de redução do ferro nas rochas é um indicador bastante útil para a detecção de zonas de alteração hidrotermal. Um grande volume de fluidos, ou uma alta concentração de reagentes exóticos, tais como o hidrogênio (H⁺), ou o oxigênio (O₂), são necessários para modificar o Fe³⁺ para Fe²⁺. Quando ocorrem reações entre grandes volumes de fluido hidrotermal e água, a modificação no estado de redução das rochas produz uma grande alteração nas propriedades magnéticas, o que ocasiona a criação, ou a destruição de minerais ferromagnéticos.

As evidências disponíveis sugerem que os principais tipos de alteração associados com sistemas epitermais (sulfato e adulária-sericita) tendem a desmagnetizar as rochas vulcânicas, devido à substituição da magnetita por fases paramagnéticas. De forma similar, a alteração fílica e a intensa alteração propílica associadas a sistemas do tipo pórfiro tendem a destruir a magnetita na intrusão e nas rochas encaixantes. Por outro lado, a zona de alteração potássica que ocorre associada a intrusões félsicas oxidadas, freqüentemente, é rica em magnetita.

O processo de serpentinização de rochas ultramáficas ricas em olivina tende a produzir uma quantidade abundante de magnetita. Em condições de baixo grau metamórfico, a serpentinização inicial da olivina produz lizardita férrica + brucita. Com a continuidade do processo, o conteúdo máximo possível da lizardita é ultrapassado e ocorre a produção de magnetita, juntamente com a lizardita, o crisotilo e a brucita. Em condições de grau

metamórfico mais elevado, são produzidas a antigorita e a magnetita. Para os serpentinitos, geralmente, observa-se uma relação inversa entre a densidade, que diminui com a serpentinização progressiva e a susceptibilidade.

A alteração carbonática de rochas ultramáficas serpentinizadas, inicialmente, redistribui a magnetita, sem destruí-la, e tem pouca influência na susceptibilidade da rocha. Já a alteração talco-carbonato consome a magnetita, com o Fe sendo recolocado na magnesita como um componente siderítico. Como consequência dessa reação, ocorre a desmagnetização da rocha.

3.2.1.1.6- EFEITOS DO METAMORFISMO

O metamorfismo produz efeitos diversos nas propriedades magnéticas dos minerais e das rochas.

Os basaltos e os diabásios têm uma susceptibilidade moderada na fácies dos xistos verdes; já na fácies anfibolito inferior a médio, tende a ocorrer a desmagnetização dessas rochas. Nos gabros, os grãos magnéticos mais finos, contidos no interior dos silicatos, podem ser protegidos por esses silicatos dos processos metamórficos, o que faz com que as rochas gabróicas sejam menos afetadas pelo metamorfismo de baixo e médio grau que os seus equivalentes extrusivos, ou hipoabissais. As intrusões félsicas parecem ser mais resistentes à destruição metamórfica da magnetita na fácies dos xistos verdes e anfibolito, do que as rochas máficas e as rochas vulcânicas félsicas.

Quando a magnetita é uma fase cumulática importante, parece ser muito mais difícil de ocorrer a sua ruptura estrutural pelos processos metamórficos, do que se ela ocorre como um mineral menor e do tipo intercumulático. Assim, ferrogabros e ferrodioritos, os quais contêm uma elevada quantidade de magnetita primária, permanecem fortemente magnéticos mesmo em condições de médio e alto grau metamórfico. Isso deve refletir o fato de que os minerais metamórficos secundários tornam-se rapidamente saturados em Fe^{3+} , enquanto a magnetita restante permanece estável com o transcorrer do evento metamórfico.

O metamorfismo do fácies anfibolito produz propriedades magnéticas heterogêneas, com susceptibilidade bimodal. Nesse grau metamórfico, as rochas magnéticas máficas são mais comuns do que as rochas magnéticas félsicas. Anfibolitos com clorita e/ou biotita tendem a ser fracamente magnéticos, enquanto que anfibolitos com elevado teor de hornblenda podem apresentar uma susceptibilidade muito mais elevada. O metamorfismo no

fácies granulito de protólitos máficos comumente produz magnetita secundária e um elevado aumento na susceptibilidade.

Essas modificações nas propriedades das rochas refletem a redistribuição do íon férrico nas rochas durante o metamorfismo. O íon férrico originalmente presente na magnetita passa para a hematita, epidoto e a clorita durante o metamorfismo do fácies xisto verde, para a biotita e o anfibólio no fácies anfibolito, para a magnetita metamórfica no fácies granulito e, finalmente, para silicatos paramagnéticos, tais como granada e clinopiroxênio, no fácies eclogito.

3.2.1.2- OBTENÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS, COM ÊNFASE À MAGNETOMETRIA

As diretrizes de pesquisa utilizadas em um levantamento geofísico podem ser:

- planejamento do levantamento;
- execução do levantamento e obtenção dos dados;
- redução dos dados;
- processamento dos dados;
- interpretação qualitativa;
- interpretação quantitativa;
- integração com outros dados geocientíficos;
- separação de anomalias e programação de detalhamentos;

A representação espacial de dados bidimensionais, entre os quais os dados magnetométricos, é normalmente efetuada a partir de pontos igualmente espaçados na forma de uma grade. Este processo, denominado *gridagem*, calcula, a partir das diversas leituras, os valores prováveis de cada nó da rede. Assim, a geração de um *grid* é baseada na interpolação dos valores medidos. A interpolação de informações em uma grade regular é essencial para a maioria das análises. Para dados de campos potenciais, incluindo os campos magnéticos, não existe nenhuma técnica matemática que seja definitiva para a elaboração de uma grade.

Contudo, existem 4 critérios que podem ser utilizados na avaliação de um algoritmo de *gridagem* (Hansen, 1993):

- 1- o *grid* deve concordar o máximo possível com os dados dos pontos amostrais;
- 2- o *grid* deve gerar a menor quantidade possível de “artefatos” e outros elementos espúrios;
- 3- os resultados obtidos são frutos de um processo matemático independente de decisões arbitrárias, ou tendenciosas do operador (como no caso de interpolações efetuadas manualmente);
- 4- a elaboração do *grid* deve considerar a eficiência computacional, principalmente em termos da relação tempo de processamento x precisão dos resultados obtidos.

Após o registro dos dados magnéticos e gamaespectrométricos obtidos a partir de um levantamento aéreo, várias correções são aplicadas para produzir mapas de células (*grid-maps*) da intensidade magnética total, de contagem total e de contagens de K, de U e de Th.

Esses valores são visualizados como mapas de contorno e imagens e podem, a partir da aplicação de metodologias de processamento, permitir o realce de determinados conjuntos de informação de interesse.

3.2.1.2.1- GERAÇÃO DO ARQUIVO XYZ

Trata-se da etapa anterior à geração dos *grids*. Compreende a leitura das fitas finais de um projeto de aerogeofísica e a disposição dos dados segundo um formato específico. Neste arquivo, o X corresponde à coordenada UTM leste, o Y corresponde à coordenada UTM norte e o Z representa o valor do atributo de interesse.

Para a geração do arquivo XYZ, é definido um retângulo a partir das coordenadas UTM que delimitam a área de interesse. O programa de geração do arquivo XYZ lê a fita do projeto aerogeofísico e seleciona as linhas do vôo que estejam contidas no retângulo, bem como os canais solicitados para constarem do arquivo.

O arquivo XYZ é composto de um cabeçalho (*header*) para cada linha de vôo, indicativo de início da linha, seguido por registros contendo, cada um, as coordenadas UTM e o (s) valor (es) do (s) canal (is) relacionados aos temas pré-definidos. Cada registro corresponde a um ponto de medida contido nas linhas, ou nos trechos de linhas de vôo. Após o último registro de uma linha de vôo no arquivo XYZ, aparece o *header* da linha seguinte com os respectivos pontos e, assim sucessivamente, até o arquivo XYZ conter todos os pontos do levantamento aerogeofísico existentes dentro do retângulo definido.

3.2.1.2.2- MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO UTILIZADOS PARA GERAÇÃO DE MAPAS DE CÉLULAS (*GRIDS*)

O campo magnético terrestre é controlado por leis físicas que permitem deduzir a distribuição das fontes, as formas do seu espectro de potência e a sua covariância (Remacre & Uzumaki, 1996). Porém, a escolha de uma função de covariância que não seja a mais adequada aos dados pode conduzir a uma interpolação não adequada.

A transposição dos valores medidos para uma malha regular quadrada (*grid*) é normalmente efetuada mediante um algoritmo que usa uma determinada função para definir o valor de cada nó, com base nos pontos mais próximos das linhas de vôo contidas no arquivo **XYZ**. Atualmente, os métodos de interpolação mais aplicados à *gridagem* de dados aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria) são:

3.2.1.2.2.1- GRIDAGEM PELA CURVATURA MÍNIMA

O método da *gridagem* pela curvatura mínima ajusta uma superfície de curvatura mínima similar à descrita por Briggs (1974). A princípio, estima os valores dos nós da grade baseada no inverso da distância média do valor medido de um determinado raio de busca. Não havendo dados neste raio, é adotada a média de todos os pontos. Um processo iterativo é então empregado para ajustar os dados mais próximos aos nós da grade inicial. Uma vez que um ajuste aceitável é alcançado, o tamanho da célula é dividido por dois e o mesmo processo se repete utilizando essa nova grade como superfície inicial. O processo continua até que a superfície de curvatura mínima esteja com o tamanho da célula final. As iterações serão finalizadas quando alcançarem o número máximo de cem, ou quando uma certa percentagem dos pontos observada esteja dentro do limite de tolerância da superfície (99%).

3.2.1.2.2.2- GRIDAGEM BIDIRECIONAL

O método da *gridagem* bidirecional é utilizado para a interpolação de dados onde a densidade de informação ao longo de uma direção é muito maior (cerca de 10 vezes) do que na direção perpendicular (característica dos levantamentos aerogeofísicos). Inicialmente, a interpolação é feita ao longo das linhas de vôo e, posteriormente, na direção perpendicular.

3.2.1.2.2.3- GRIDAGEM POR GEOESTATÍSTICA

Os Sistemas de Informação Geográfica (**SIG's**), devido a sua crescente utilização, vem incorporando novos princípios e procedimentos de análise espacial. Esse esforço deve-se

ao consenso, hoje existente, de que o futuro sucesso da tecnologia dos **SIG's** depende de sua capacidade de gerar cenários confiáveis, por meio de um conjunto de procedimentos e ferramentas para a modelagem espacial, que possam representar adequadamente, em meio digital, as propriedades, os processos e suas imprecisões.

Alguns processos espaciais, principalmente aqueles observados em aplicações ambientais em mineração, apresentam indexação no espaço e trazem como característica comum a continuidade, observando que seus valores variam de forma gradual numa determinada vizinhança. As representações destas propriedades nos **SIG's**, em geral, são oriundas de modelos limitados e, como consequência, o produto final é uma simplificação porque não trabalha a variabilidade espacial das propriedades e fenômenos em estudo.

A associação de procedimentos de estatísticas espaciais (geoestatística) aos **SIG's** é importante porque permite representações com hipóteses mais próximas do contínuo dos fenômenos e também porque quantifica as imprecisões associadas aos produtos trabalhados.

A geoestatística envolve análise e inferência de fenômenos espaciais e/ou temporais, tais como a distribuição de teores de ouro nas rochas e sedimentos, a concentração de poluentes, a variação do teor de zinco no solo, o preço do petróleo no tempo, etc. A geoestatística teve sua origem na área de mineração (Krige, 1951). Atualmente, geoestatística é justamente um nome associado com uma classe de técnicas usada para analisar e inferir valores de uma variável distribuída no espaço e ou no tempo. Tais valores são implicitamente assumidos ser correlacionados com outros, e o estudo de tal correlação é denominada de análise estrutural ou modelagem do variograma. Depois da análise estrutural, inferências em localizações não amostradas são realizadas usando "*Krigagem*" ou podem ser *Simuladas* usando simulações condicionais. Resumidamente, os passos em um estudo empregando técnicas geoestatísticas incluem: (a) análise exploratória dos dados, (b) análise estrutural (cálculo e modelagem do variograma) e (c) realização de inferências (Krigagem ou Simulação). Este trabalho, limita-se à realizar inferências utilizando as técnicas de Krigagem Simples e Ordinária.

O sucesso e as suposições das técnicas geoestatísticas estão fundamentadas na *Teoria das Variáveis Regionalizadas*, desenvolvida por Matheron (1963, 1971). A variável regionalizada é uma variável distribuída no espaço (ou tempo). A teoria diz que alguma medida pode ser vista como uma realização de uma função aleatória (ou processo aleatório,

ou campo aleatório, ou processo estocástico). Esta teoria consolida o alicerce da geoestatística.

3.2.1.2.3- PROCESSAMENTO E FILTRAGENS APLICADAS AOS DADOS AEROGEOFÍSICOS COM ÊNFASE À MAGNETOMETRIA

Após a elaboração dos *grids*, por um dos três métodos supramencionados, vários mapas podem ser gerados. Esses, são visualizados como mapas de contorno e imagens e podem, a partir da aplicação de metodologias de processamento, permitir o realce de determinados conjuntos de informação de interesse. Dessa forma, podem ser separadas feições de interesse e anomalias prospectivas. Os métodos de processamento podem ser subdivididos naqueles que convertem parâmetros fisicamente mensuráveis de um campo em outros campos com parâmetros físicos diferenciados e, naqueles que modificam os conjuntos de dados por meio da remoção selecionada de frequências (comprimentos de onda) não desejados para o processamento. Estes últimos, são definidos como processos de filtragem e foram extensamente descritos e sistematizados por Milligan & Gunn (1997) como:

3.2.1.2.3.1- PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO LINEAR

Um processo de filtragem linear modifica, de uma forma pré-determinada, a amplitude e/ou as relações de fase das ondas que constituem um perfil, ou um mapa de células. Isso pode ser efetuado, por meio da análise do conjunto de dados por uma Transformação de Fourier no domínio da frequência, de modo a se obter a amplitude e a mudança de fases desejada, e, então, transformar novamente o conjunto de dados para o domínio do espaço.

Alternativamente, a mesma transformação pode ser efetuada por uma correlação do conjunto de dados no domínio do espaço com um conjunto de coeficientes de filtros, onde a resposta da frequência (i.e. Transformada de Fourier) é a mesma que a amplitude e a fase desejadas. Esses processos são técnicas matemáticas bem conhecidas e desenvolvidas.

É importante no contexto do processamento de dados aeromagnetométricos, entender as transformações que podem ser obtidas pelos processos de filtragem linear e o significado e a utilidade dessas transformações. A representação espectral generalizada dos campos magnéticos (Gunn 1975 apud Milligan & Gunn 1997) fornece uma avaliação das muitas transformações possíveis com os campos magnéticos.

No domínio da frequência, a intensidade magnética é definida pela simples multiplicação de fatores relacionados à profundidade das fontes, forma das fontes, direção de

magnetização e latitude magnética. Esses fatores podem ser alterados por processos de filtragem linear, os quais resultam na transformação do espectro de um campo por um fator que converte o espectro do campo medido em uma distância h acima do plano de observação do campo original. Uma transformação de Fourier retorna o campo ao domínio do espaço, mas em um nível mais elevado. Isso é equivalente a “convolver” o campo no domínio do espaço por um operador (filtro).

Gunn (1975), apud Milligan & Gunn (1997), descreve as transformações possíveis pela alteração desses fatores. Os principais processos de transformação linear são:

a) CONTINUAÇÃO PARA CIMA

Esse processo pode ser útil para suprimir os efeitos de anomalias rasas, quando o detalhamento de anomalias profundas é necessário. O efeito do filtro é simplesmente de aumentar o coeficiente angular do espectro, atenuando as frequências mais altas.

b) CONTINUAÇÃO PARA BAIXO

A continuação para baixo delinea o efeito das anomalias de fontes rasas, favorecendo as altas frequências. Isso ocorre porque o algoritmo às vezes traz mais próximas do plano de observação. Esse tipo de processamento efetua uma simulação, como se o plano de vôo fosse efetuado próximo ao solo. Na prática, ruídos de alta frequência também são favorecidos, conjuntamente com as anomalias geológicas. É normalmente difícil continuar um campo para baixo a distâncias muito grandes; o limite prático depende do intervalo de amostragem e da qualidade do conjunto de dados. Normalmente, esse filtro realça tremendamente o ruído, de forma que, a distâncias muito grandes para baixo, o ruído passa a mascarar completamente os dados originais.

c) REDUÇÃO AO PÓLO, OU A QUALQUER OUTRA LATITUDE MAGNÉTICA

A redução ao pólo é o processo que converte o campo magnético de uma latitude magnética onde o campo terrestre é inclinado, para um campo magnético no pólo, onde ele é vertical. Quando o campo terrestre é inclinado, as anomalias magnéticas devido à indução têm formas que são assimetricamente relacionadas às suas fontes. Quando o campo magnético induzido é vertical, as anomalias magnéticas estão exatamente sobre as suas fontes e a sua simetria está diretamente relacionada com a disposição espacial do corpo induzido.

O mesmo processo pode ser usado para converter o campo magnético entre quaisquer duas latitudes magnéticas. A redução ao pólo simplifica grandemente a interpretação dos dados magnéticos, porque, em latitudes magnéticas menores de 50°, as relações entre a forma da anomalia e a geometria das fontes é freqüentemente não é óbvia (*i. e.* Vacquier *et al.* 1951, apud Milligan & Gunn 1997).

Como discutido por MacLeod *et al.* (1993), apud Milligan & Gunn (1997), problemas podem ocorrer durante o processo de redução ao pólo de dados obtidos, em latitudes menores que 15°. Isso ocorre porque o processo de transformação de Fourier torna-se instável, devido a necessidade de divisão do espectro por um termo muito pequeno. Alguns pesquisadores, em vista dessas considerações, têm limitado as suas transformações a valores maiores do que 15°. Outros pesquisadores, têm dispensado esses procedimentos em troca de uma redução ao Equador. Isso também produz anomalias que são relacionadas simetricamente às suas fontes; contudo, tais anomalias têm elongações e picos secundários que não ocorrem em anomalias polares e elas são, conseqüentemente, mais difíceis de interpretar.

A premissa básica do processo de redução do pólo é que todos os corpos são magnetizados por indução. MacLeod *et al.* (1993) demonstraram que o obscurecimento de anomalias pode ocorrer em mapas transformados quando uma significativa quantidade de magnetização remanescente ocorrer.

d) COMPUTAÇÃO DE DERIVADAS VERTICAIS

Várias derivadas verticais do campo magnético podem ser obtidas pela multiplicação da amplitude do espectro do campo por um fator de forma definido pela seguinte fórmula:

$$\frac{1}{n} \left[(u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} \right]^n \quad \text{eq. 2}$$

A primeira derivada vertical (ou gradiente vertical) é equivalente à medida do campo magnético simultaneamente em 2 pontos, situados verticalmente acima um do outro, subtraindo os dados e dividindo o resultado pela separação espacial vertical dos pontos medidos. A segunda derivada vertical é o gradiente vertical da primeira derivada vertical e assim por diante.

Várias derivadas verticais do campo magnético podem ser computadas por meio da multiplicação da amplitude do espectro do campo por um fator de forma.

A fórmula para a frequência de resposta para essas operações mostra que o processo favorece as altas frequências. Essa propriedade é a base para a aplicação do processo de derivação vertical, o qual elimina efeitos de grandes comprimentos de onda do campo magnético regional e também resolve os efeitos das anomalias adjacentes.

A primeira derivada vertical tem se tornado básica para a interpretação de dados magnetométricos. A segunda derivada vertical tem mais poder de resolução do que a derivada de 1ª ordem, mas a sua aplicação requer dados de alta qualidade e o seu favorecimento às frequências mais elevadas resulta em um maior surgimento de ruídos derivados de ordens mais elevadas, por esses motivos, nunca são utilizadas para a geração de produtos interpretativos.

A aplicação do filtro de primeira derivada é apropriada para realçar as componentes de fontes mais rasas, para eliminar as feições das fontes mais profundas e para manter as feições das fontes intermediárias. A aplicação do filtro de segunda derivada realça ainda mais os componentes das fontes mais rasas, atenuando, ou eliminando os efeitos dos outros componentes.

e) DERIVADAS HORIZONTAIS

Esse filtro calcula as derivadas horizontais de “n” ordens nas direções X e Y [$(j_u)^n$ e $(j_v)^n$]. Deve-se visualizar esse processo como uma transformação de fase e como uma filtragem que favorece as altas frequências. A transformação de fase geralmente resulta na produção de picos anômalos localizados aproximadamente sobre as bordas de corpos consideravelmente largos. O favorecimento das altas frequências, por outro lado, melhora a resolução desses picos, para aumentar a definição da forma das bordas. Alguns intérpretes têm utilizado essa quantidade para delimitar corpos magnéticos. Contudo, é difícil visualizar quais as vantagens das derivadas horizontais sobre as derivadas verticais, as quais fornecem picos sobre o topo das fontes e indicam os contornos das fontes, por meio de acentuados gradientes e inflexões.

f) SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA APARENTE

Esse processamento gera um *grid* de susceptibilidade magnética aparente a partir de um *grid* de dados magnéticos de campo total.

O filtro assume que as fontes magnéticas são compostas por um grande número de prismas homogêneos (em termos de susceptibilidade magnética) e verticais, de extensão infinita em profundidade, com seção equivalente à da célula do *grid*. As susceptibilidades magnéticas dos prismas são calculadas a partir do pressuposto de que a diferença do campo observado em cada nó do *grid* e do valor geomagnético local é igual à soma das anomalias magnéticas de todos os prismas naquele ponto. Esse filtro é utilizado para delinear a distribuição dos minerais ferromagnéticos (principalmente magnetita) no subsolo; também é útil na separação entre unidades litológicas com diferenças marcantes na susceptibilidade magnética.

g) SINAL ANALÍTICO

O sinal analítico é uma função que relaciona os campos magnéticos pelas suas derivadas, conforme pode ser visualizado na equação abaixo:

$$\text{Sinal analítico} = A(x,y) = \left[(\delta T / \delta x)^2 + (\delta T / \delta y)^2 + (\delta T / \delta z)^2 \right]^{1/2} \quad \text{eq. 3}$$

É uma ferramenta muito interessante no contexto da interpretação, porque é completamente independente da direção de magnetização e da direção do campo magnético terrestre. Isso significa que todos os corpos com a mesma geometria têm o mesmo sinal analítico.

h) SEPARAÇÃO DE FEIÇÕES UTILIZANDO FILTRAGENS LINEARES

Além dos processos de transformação descritos acima, os quais produzem representações paramétricas relacionadas a propriedades mensuráveis, uma larga amplitude de processos matemáticos de filtragem linear possibilita a remoção de feições artificiais e/ou geológicas com certas características específicas dentro do conjunto de dados. Os produtos desses processos matemáticos de remoção de feições favorecem a visualização das feições estruturais de interesse. Contudo, todos esses arranjos distorcem os dados originais e essa distinção deve ser considerada antes da interpretação final dos resultados.

O fato de que as anomalias de fontes rasas possuem frequências mais elevadas do que as anomalias associadas a fontes mais profundas, permitem separar com relativa nitidez as fontes rasas das fontes profundas. Similarmente, a aquisição de ruído pode ser suprimida, porque o ruído, tipicamente, contém uma frequência muito mais elevada do que as anomalias de fontes geológicas. É importante apreciar que o conteúdo de frequência das anomalias

magnéticas cobre um espectro muito largo e, assim, as frequências podem se sobrepor, confundindo a separação das fontes profundas das fontes rasas. Nesses casos, a filtragem linear nem sempre pode remover completamente os efeitos de ruído nas anomalias de um conjunto de dados e, algumas vezes, pode remover uma proporção significativa do sinal relativo às anomalias.

Os principais processos de filtragem matemática que tem sido aplicado a dados aeromagnetométricos para separar anomalias com diferentes características de frequência são:

h.1) FILTROS PASSA ALTA, PASSA BAIXA E PASSA BANDA

Uma amplitude de frequências pode ser removida dos dados pela simples eliminação da amplitude de frequência do espectro de dados. Por exemplo: se um conjunto de dados magnéticos contém uma série de anomalias de alta frequência com fontes rasas e essas anomalias de alta frequência estão obscurecendo uma série de anomalias de fontes profundas, de especial interesse, então, em princípio, é possível remover as anomalias de alta frequência por um filtro passa-baixo, o qual elimina os comprimentos de onda anômalos, menores do que o valor especificado. A efetividade dessa técnica depende da diferença no valor da frequência das anomalias mais profundas com relação às anomalias mais rasas. Resultados significativos podem ser obtidos, em casos onde o valor da frequência do sinal e do ruído são bastante diferentes; contudo, várias distorções podem ocorrer.

h.2) FILTROS DE AJUSTAMENTO “MATCHED FILTERS”

Spector e Parker (1979), apud Milligan & Gunn (1997), descreveram um processo denominado de filtragem de ajustamento “match”. Inicialmente, faz-se um estudo do espectro do campo a ser filtrado por um filtro linear para detectar anomalias magnéticas a diferentes profundidades. Esse filtro favorece a distinção de anomalias com a mesma profundidade aproximada, as quais são registradas como segmentos de linhas retas em uma representação logarítmica radial média do espectro de energia do campo magnético. A experiência dos autores é que esse processo pode produzir bons resultados e que os problemas associados com esse filtro são poucos.

h.3) FILTRO DE MÉDIAS

Esse método, muito semelhante ao das médias móveis, baseia-se na avaliação das médias de valores adjacentes do campo magnético e pode ajudar a suavizar e diminuir o nível de ruído nos dados. A frequência exata de cada processo de filtragem da média varia de

acordo com o número de pontos usados para calcular a média e as relações geométricas entre os pontos. O filtro de médias somente deve ser utilizado se a frequência do ruído é muito alta comparada às frequências magnéticas das anomalias geológicas.

h.4) FILTROS DIRECIONAIS

São filtros que retiram frequências em uma direção relativamente àquelas de outras direções (Fuller, 1967 apud Milligan & Gunn (1997)). Portanto, esses filtros são usados para destacar anomalias em uma direção, em detrimento das outras. Os filtros direcionais devem ser utilizados com extrema cautela, porque podem introduzir feições aparentes que não existem na realidade.

3.2.1.2.3.2- FILTROS NÃO-LINEARES

As imagens de saída dos filtros lineares são preditivas, no sentido de que as relações entre a fase e a amplitude do sinal antes e depois do processo de filtragem são definidos pela resposta de frequência do filtro. O resultado dos filtros não-lineares não pode ser definido dessa maneira; tais filtros não necessariamente obedecem os princípios da superposição e da homogeneidade. Os filtros não-lineares são:

a) FILTROS NÃO-LINEARES DE NAUDY

Naudy (1967), **apud** Milligan & Gunn (1997), elaborou um filtro não-linear para remover “tudo ou nada” de uma anomalia. O filtro trabalha sobre os perfis dos dados e, sucessivamente, aplica uma série de testes para determinar se a anomalia existe e, nesse caso, quanto ela pode ser considerada como um único pico, ou um pico associado a flancos baixos. Dependendo da forma da anomalia, a rotina ajusta o “background” regional, que é registrado como um campo não-anômalo e, portanto, possibilita a separação das anomalias. Os resultados são dependentes do intervalo amostral utilizado. Na prática, o método não trabalha realisticamente, com anomalias geradas a partir de fontes geológicas; mas, ele pode ser útil para a remoção de ruídos de dados em forma de “espinho”, (pontos espúrios).

b) GANHO DE CONTROLE AUTOMÁTICO (AGC)

Esse filtro converte ondas com amplitude variada em ondas de amplitude semi-constante. O resultado é a remoção de tipos de amplitudes dos conjuntos de dados, o que produz uma representação que dá uma mesma ênfase para sinais com ambas, baixas e altas

amplitudes. Perfis de **AGC** são muito úteis para mapeamento estrutural, porque eles tendem a mostrar alinhamentos coerentes que não aparecem na amplitude verdadeira dos dados.

A aplicação bem sucedida de **AGC** requer que o conjunto de dados tenha um nível base com uma média zero.

c) FILTROS DE MEDIANA

Esse filtro substitui o valor central de um operador de Kernel pela mediana dos valores vizinhos localizados dentro do Kernel. O filtro de mediana é muito útil para a remoção de picos de ruídos dos dados sem suavizar as formas dos detalhes; ele também pode alcançar sucesso na remoção de ruídos estatísticos de alta frequência em dados aerogamaespectrométricos, particularmente no canal do U, o qual normalmente apresenta a taxa de contagem mais baixa dos 3 canais.

3.2.1.3- ASSINATURAS MAGNÉTICAS DE DEPÓSITOS MINERAIS

Gunn & Dentith (1997) descrevem as assinaturas magnéticas dos depósitos minerais. Esse texto encontra-se transcrito abaixo:

Concentrações significativas de minerais magnéticos ocorrem em muitos depósitos minerais, associados a unidades de rochas magnéticas. Contudo, poucos estudos têm sido direcionados para a avaliação precisa da assinatura magnética de um dado depósito. Esse item busca discutir os critérios que podem ser utilizados para a identificação de depósitos minerais por meio de suas características magnéticas intrínsecas, com ênfase especial nos diferentes tipos de depósitos auríferos.

Os modelos de depósitos minerais das mais diferentes classes têm demonstrado similaridades significativas em termos de assembléias minerais, geometria, rochas encaixantes e trato tectônico e estrutural. A sistematização dessas similaridades têm conduzido à elaboração do conceito de “tipos de depósito mineral”, o qual reúne depósitos que apresentam as mesmas características e origem.

O conhecimento das propriedades magnéticas dos minerais é fundamental para o entendimento das respostas magnéticas dos depósitos minerais. Considerando-se a tipologia da magnetização, observa-se que existem dois tipos principais: 1) a *magnetização induzida*, que é proporcional à susceptibilidade do material magnetizado e que apresenta a mesma direção do campo magnético terrestre, e 2) a *magnetização remanente*, ou permanente, que

pode apresentar qualquer direção. A magnetização induzida é muito mais comum do que a magnetização remanente e pode ser muitas ordens de magnitude maior. Desde que todos os outros fatores sejam constantes, a resposta magnética de um corpo de rochas é diretamente proporcional à magnitude da sua magnetização.

A magnetização de um corpo qualquer pode estar diretamente relacionada ao volume de minerais magnéticos no corpo e essa relação varia de acordo com o mineral magnético que ocorre. Os únicos minerais magnéticos que causam efeitos observáveis no contexto dos depósitos minerais são:

- **magnetita:** constitui o mineral mais magnético.
- **pirrotita:** é magnética quando na forma monoclinica e, frequentemente, tem uma magnetização remanente uma ordem de magnitude maior que a magnetização induzida. A susceptibilidade da pirrotita é aproximadamente 1/10 da susceptibilidade da magnetita.
- **hematita:** pode exibir uma fraca resposta magnética devido à magnetização induzida e, algumas vezes, tem uma forte remanência.
- **ilmenita:** pode apresentar uma fraca resposta magnética.
- **pirita:** não é magnética, mas, quando metamorfisada para pirrotita, pode exibir alguma resposta. A pirrotita, quando metamorfisada, também pode ser transformada em magnetita.

3.2.1.3.1- CARACTERÍSTICAS DAS RESPOSTAS MAGNÉTICAS

A forma e a amplitude da resposta magnética de um depósito mineral depende de muitas variáveis, além da concentração de minerais magnéticos. Outros fatores essenciais são: a geometria e a profundidade do depósito, sua orientação relativa ao norte magnético e a inclinação do corpo magnético no local da medida. O resultado da interação desse complexo conjunto de variáveis é que não há uma forma fixa de anomalia que possa ser utilizada como padrão para auxiliar na detecção de um depósito mineral.

A interpretação dos resultados de um levantamento aeromagnetométrico deve considerar processos de deformação, erosão, intemperismo, metamorfismo e remobilização que tenham ocorrido durante a história do depósito. Outras particularidades, tais como o fator de desmagnetização, anisotropias em nível de grão e os efeitos da proximidade de corpos extremamente magnéticos, influencia diretamente a forma da anomalia e também devem ser criteriosamente avaliados.

Considerando-se os depósitos auríferos, o baixo teor da mineralização pode tornar a detecção de depósitos por meio de métodos geofísicos, virtualmente impossível. Por esse motivo, a principal utilização dos dados magnéticos na pesquisa para ouro é como uma ferramenta para mapeamento litoestrutural, em conjunção com outras ferramentas de exploração, particularmente geoquímicas. Os objetivos gerais dos levantamentos aeromagnetométricos para ouro são:

- mapear unidades estratigráficas particulares e litologias que possam estar mineralizadas;
- identificar estruturas que possam conter depósitos;
- detectar a ocorrência, ou não, de minerais magnéticos que possam estar geneticamente associados aos depósitos auríferos e à alteração hidrotermal.

Esses tópicos, os quais não são mutuamente exclusivos, têm sido utilizados para a pesquisa de depósitos auríferos de idade desde Arqueana até Recente. Como o uso de aerolevantamentos ocorre em uma larga amplitude de ambientes geológicos, foram desenvolvidas diversas técnicas de abordagem dessas classes de depósitos.

O melhor exemplo é o uso desses levantamentos em terrenos granito-gnáissicos arqueanos, particularmente em áreas com poucas exposições de rochas. Como exemplo, podem ser citados o Cráton de Yilgarn, no Oeste da Austrália e o Cinturão Abitibi, no Canadá. Nesses ambientes, os depósitos auríferos estão espacialmente associados com estruturas tectônicas de grande escala. Essa particularidade aumenta consideravelmente o valor dos dados magnéticos, porque, além de ressaltarem a estruturação tectônica, principalmente por meio de alinhamentos magnéticos que registram possíveis falhas, ou fraturas, são freqüentemente encontradas rochas com elevado teor de ferro nesses locais.

As anomalias magnéticas associadas com as mineralizações auríferas podem ser devidas tanto à magnetita, quanto à pirrotita. As anomalias podem ser negativas, ou positivas, dependendo de quando o processo de mineralização depositou, ou destruiu esses minerais. Irvine & Smith (1990) sistematizaram vários exemplos de destruição hidrotermal de magnetita associada a depósitos hidrotermais. Esses autores correlacionam os processos de mineralização com zonas de campo magnético suavizado, que ocorrem ao redor de depósitos auríferos.

Considerando-se esses tópicos, observa-se que os levantamentos aeromagnetométricos são importantes na exploração de depósitos auríferos, particularmente em áreas de pobre

exposição de rochas. Contudo, as respostas devidas a depósitos minerais mais significativos são diversas e não discriminam perfeitamente as anomalias relacionadas aos depósitos daquelas relacionadas a outras causas. Portanto, um conhecimento detalhado da geologia do local é um pré-requisito importante para o sucesso do levantamento.

3.2.1.3.2- INTERPRETAÇÃO DE DADOS AEROMAGNÉTICOS

3.2.1.3.2.1- INTERPRETAÇÃO QUALITATIVA DE TIPOS DE ANOMALIAS GEOFÍSICAS

Segundo CPRM (1994), a interpretação qualitativa de mapas geofísicos é uma atividade auxiliar de mapeamento geológico e de prospecção mineral, que consiste em associar rochas e/ou estruturas a:

- a) faixas, ou níveis de magnetização, ou de radiação;
- b) anomalias magnéticas; isto é, distorções do campo geomagnético.

Os mapas de contorno magnetométrico, por sua vez, mostram o efeito de corpos tridimensionais, aflorantes ou não, cujas raízes podem estar a quase 19 km de profundidade (onde a magnetita atinge seu ponto Curie, para um grau geotérmico médio de 33 m/°C). A intensidade das anomalias é proporcional ao contraste de susceptibilidade magnética entre o corpo anômalo e a encaixante; assim, quanto maior o contraste, mais intensa a anomalia.

Quando não há contraste, isto é, quando o corpo de interesse e a encaixante exibem a mesma susceptibilidade, é extremamente difícil a sua diferenciação. Esse é o caso, por exemplo, de alguns kimberlitos da África do Sul, que, encaixados em basaltos e diabásios, tornam-se magneticamente inexpressivos. Por isso, a interpretação qualitativa de mapas magnetométricos é calcada mais na forma do que na intensidade. A partir da forma das anomalias magnéticas, pode-se deduzir a forma e a profundidade do corpo rochoso causador.

Esses dados, associados a outras informações geológicas, permitem inferir a natureza da rocha.

Os principais tipos de anomalias de forma observadas nos mapas magnetométricos são as seguintes (CPRM 1994):

Anomalias topográficas falsas

Essas anomalias são verificadas principalmente na radiometria. Sobre uma mesma litologia, as feições positivas do relevo mostram-se como anomalias mais intensas, enquanto que, nas áreas de relevo baixo, há a tendência de se manifestarem anomalias mais fracas. Por isso, é fortemente recomendável a elaboração de um modelo digital de terreno para subsidiar a interpretação.

Anomalias devidas a desnivelamento de perfil (“herring bone”)

Essas anomalias ocorrem em mapas magnetométricos e radiométricos e são produzidas por perfis cuja variação magnética diurna e/ou altitude que não foram devidamente ajustadas. Elas são observadas nos mapas preliminares; após o processamento mais avançado, os alinhamentos falsos tendem a desaparecer. Por esse motivo, um dos primeiros passos no processo interpretativo de mapas magnetométricos deve ser a elaboração do mapa de linhas de vôo que exiba a direção das linhas de vôo do levantamento. Esse arcabouço pode facilitar a identificação de alinhamentos magnéticos, ou radiométricos coincidentes com aquela direção.

Anomalias causadas por intrusões profundas

São anomalias magnéticas muito intensas (de ordem de 1.000 nT), cujos dois pólos estão nitidamente delineados por curvas suaves que cobrem áreas de mais de 100 km de diâmetro. Elas geralmente são devidas a intrusões no embasamento, ou a elevações do mesmo. Exemplos de anomalias devidas a intrusões profundas são as anomalias do cráton do São Francisco (MG), (CPRM 1994) que correspondem a um corpo circunscrito a cerca de 10 km de profundidade; anomalia da fossa do Bananal (GO), ocasionada por uma intrusão a cerca de 7 km de profundidade; e a anomalia de Botuporã (BA), induzida por uma intrusão alojada a cerca de 16 km de profundidade. Deve-se observar que não há qualquer indício radiométrico da ocorrência desses corpos intrusivos.

Anomalias devidas a maciços

São anomalias magnéticas, com 2 km a 20 km de diâmetro frequentemente relacionadas a intrusões de granitos, dioritos, sienitos e gabros. Os granito-gnaisses e granitos podem ter expressões ainda maiores. Essas associações litotectônicas, principalmente aquelas compostas por granitóides tardios, são caracterizadas por níveis de radiação visivelmente maiores que os dados dos outros maciços, devido à presença maior de K, Th e U.

Anomalias dipolares

Também são chamadas, de forma não adequada, de anomalias polares, pois têm contornos circulares, ou ovalados e são constituídas por um par máximo-mínimo. No hemisfério sul magnético, desde que os corpos não tenham magnetização remanente, os mínimos são mais intensos que os máximos; em alguns casos, os máximos até podem ser imperceptíveis. As anomalias dipolares, apesar de exibirem normalmente um pequeno diâmetro (até poucos quilômetros) destacam-se nitidamente da encaixante, quando relacionadas a intrusões básicas, ou ultrabásicas. As anomalias dipolares são produzidas, geralmente, por chaminés de rochas básicas e ultrabásicas e, dependendo das associações existentes, por chaminés básico-alcálicas.

As rochas alcálicas são detectadas principalmente por meio da utilização de mapas radiométricos: carbonatitos são identificados pela elevada porcentagem de Th, ou seja, pela baixa razão U/Th e alta razão Th/K. A depender de suas associações com rochas básicas e ultrabásicas, podem ou não ser diferenciáveis em termos magnéticos.

Anomalias planares

São anomalias intensas, com elevada alternância de polaridade, distribuídas amplamente em superfície, sem qualquer orientação preferencial. Podem ser derrames de lavas, ou formações ferríferas bandadas.

Anomalias lineares

São feições magnéticas lineares caracterizadas por:

- paralelismo de isodinâmicas;
- alinhamento de anomalias circulares, como contas de rosário;
- quebras na direção de anomalias
- mudança na intensidade de anomalias, o que indica movimentação de blocos tectônicos.

Entre esses blocos desnivelados, mesmo que pertencentes à uma mesma associação litológica, ocorre um gradiente, caracterizado pelo adensamento das isodinâmicas;

- alternância de faixas positivas e negativas.

Isodinâmicas paralelas e muito próximas, que separam zonas fortemente ruidosas de zonas pouco ruidosas, caracterizam a estrutura tectônica (zona de falha, fraturas, zonas de cisalhamento, etc.). Nesses casos, a zona ruidosa corresponde normalmente ao bloco soerguido da estrutura. A ocorrência de anomalias circulares alinhadas, ou de faixas alongadas são indicativos da ocorrência de diques. As alternâncias de faixas positivas e negativas indicam feições lineares de grande tamanho, com dezenas de quilômetros de largura por até centenas de comprimento, que podem indicar lineamentos tectônicos de escala até transcontinental.

3.2.1.3.2.1.1- METODOLOGIA DE ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO APLICADA A ÁREAS DE EXPOSIÇÃO LIMITADA DE ROCHAS

Gunn *et al.* (1997) descrevem os procedimentos metodológicos para a interpretação de dados aeromagnetométricos coletados em áreas de exposição limitada de rochas. Os conceitos expressados nesse trabalho são muito importantes para o contexto dessa Tese, dado que a região de estudo possui características muito similares àquelas descritas por esses autores. Dessa forma, a seguir é efetuada uma síntese dos conteúdos descritos por esses autores, associando, quando possível à área de interesse.

Os mapas aeromagnéticos têm sido produzidos e interpretados desde a década de 40. Porém, no transcorrer desse período, ocorreram expressivos progressos na capacidade de processamento e de geração de produtos finais precisos, de alta resolução e qualidade. Apesar disso, as metodologias de interpretação empregadas não desenvolveram o mesmo ritmo de aprimoramento. O único trabalho desenvolvido com o intuito de formular uma metodologia interpretativa, deve-se a Isles *et al.* (1989), *apud* Gunn *et al.* (1997). Segundo esses autores, o processo interpretativo deve constar da identificação de contornos, tendências e gradientes de unidades magnéticas com o objetivo de definir o arcabouço geomagnético da área. Esse arcabouço geomagnético é posteriormente confrontado com os limites litoestruturais da região de interesse. Esse último passo, tem a finalidade de melhorar os contornos dos contatos geológicos e das estruturas que ocorrem na área. O nível de confiança dessa superposição depende da quantidade de dados disponíveis e do conhecimento do intérprete acerca da área em questão.

Essa técnica obtém resultados significativos em áreas como cinturões orogênicos Proterozóicos e escudos Arqueanos, os quais apresentam, frequentemente, seqüências litológicas fortemente mergulhantes e unidades litotectônicas com contatos bem definidos. A

interpretação, nessas áreas, também é facilitada porque as unidades litológicas observadas têm respostas magnéticas razoavelmente bem conhecidas.

Algumas modificações nesse processo interpretativo são necessárias em áreas de maior complexidade geológica, tais como áreas fortemente afetadas por deformação e metamorfismo, ou que exibam uma pequena quantidade de exposições de rochas. Nessas áreas, ocorre normalmente a superposição de unidades magnéticas, a profundidade das unidades magnéticas é altamente variável e ocorrem fortes variações internas de magnetização nas unidades litológicas.

O objetivo do processo interpretativo de dados magnetométricos é definir:

- a) limites de unidades magnéticas;
- b) estruturas que deslocam, ou que afetam a morfologia de unidades magnéticas;
- c) profundidade e atitude de unidades magnéticas;
- d) superposição de unidades magnéticas;
- e) unidades litológicas;
- f) modificações químicas;
- g) um embasamento consistente para a elaboração de uma síntese estrutural que relacione a distribuição de litologias e as estruturas:

A- Limites de unidades magnéticas

O conhecimento das formas de respostas anômalas devido a diferentes geometrias das fontes é fundamental para a estimação dos limites das fontes magnéticas. Como uma regra geral, os limites estão estritamente próximos dos pontos de inflexão das anomalias para fontes com bordas verticais. Uma exceção à essa parametrização ocorre em fontes rasas, onde a largura é menor que a profundidade; nessas situações, o levantamento magnético não pode solucionar a espessura da fonte, apenas a posição do eixo da fonte.

Existem 3 tipos de limites de fontes:

- Quando uma grande anomalia magnética ocorre isolada, ela pode ser registrada como a resposta de uma fonte magnetizada uniformemente e o seu limite é traçado onde se estima situar a sua margem.

- Para anomalias rasas, onde a espessura da fonte é menor do que a profundidade, a fonte pode ser representada por uma linha.

- Em muitas situações, concentrações de anomalias organizadas, semi - organizadas e aleatórias podem ocorrer. Essas anomalias podem ser divididas em:

- uma assembléia de unidades magnéticas e não-magnéticas;
- rochas magnéticas falhadas;
- rochas magnéticas dobradas;
- intemperismo distribuído irregularmente em unidades magnéticas;
- lavas vulcânicas, em que diferentes porções do derrame têm propriedades magnéticas diferenciadas, próprias da sua composição magnética, ou da sua taxa de resfriamento;
- combinações das alternativas acima.

Os limites desses agrupamentos de anomalias são desenhados de forma que se abranja todas as anomalias em características e distribuição espacial. Os limites, então, definem uma unidade magnética, a qual, na maioria das situações, corresponderá a uma unidade geológica, com uma litologia, ou assembléia de litologias particulares. Alguns intérpretes denominam essas assembléias de domínios. Comumente, é possível traçar os eixos de cada anomalia magnética contida em uma unidade. Alguns desses eixos indicam falhas ou padrões de dobramento.

As anomalias internas às unidades magnéticas são denominadas de tendências (*trends*) das unidades magnéticas. Alguns intérpretes definem as anomalias internas apenas se elas constituem unidades litológicas magneticamente individualizáveis. Esse procedimento parece ser mais realístico se o intérprete dispuser de dados que comprovem a ocorrência de corpos magnéticos discretos associados às anomalias.

Quando da interpretação da estrutura interna de um domínio magnético, é importante definir qual o espaçamento das linhas de vô em relação à complexidade geológica da área e se esse espaçamento permitiu que o processo de *gridagem* produzisse uma representação adequada da distribuição das anomalias. Se as linhas de vô são muito espaçadas e oblíquas à estruturação geológica da área, os contornos e as imagens resultantes não irão possibilitar o

mapeamento preciso de detalhes magnéticos e ocasionarão, ainda, a formação de anomalias espúrias (artefatos) .

B- Estruturas que deslocam, ou que afetam a morfologia de unidades magnéticas

Estruturas lineares que correspondem a falhas e a fraturas podem ser distintas pelos seguintes critérios (Paterson & Reeves, 1985; Reeves, 1985; Reeves *et al.*, 1990) :

- altos magnéticos lineares, que podem ser descontínuos na natureza, pois os minerais magnéticos são irregularmente precipitados no plano de falha;
- deslocamento (“*offset*”), ou quebra de unidades magnéticas aparentemente semelhantes;
- *trends* magnéticos visualizados pela declividade de anomalias magnéticas, lineares, aproximadamente circulares, ou convolutas, como se completamente dobradas;
- modificações abruptas na profundidade de fontes magnéticas;
- baixos magnéticos pouco salientes causados pelo intemperismo ao longo do plano de falha.

O intemperismo induz à oxidação dos minerais magnéticos para minerais não magnéticos, de modo que sistemas de juntas podem exibir a mesma expressão magnética.

C- Profundidade e atitude de unidades magnéticas

A profundidade e o mergulho podem ser estimados qualitativamente se os intérpretes possuem experiência no tipo de resposta esperado das unidades magnéticas na área. É possível relacionar o gradiente de perfis magnéticos obtidos em mapas de contorno à profundidade das fontes magnéticas (Gunn *et al.* 1997). A interpretação visual normalmente atinge uma acurácia de cerca de 30%. A profundidade também pode ser calculada por meio de modelamento computacional.

É importante efetuar a distinção entre as fontes magnéticas de profundidade infinita, daquelas de profundidade limitada como derrames de lava e/ou *sills*. Fontes magnéticas horizontais são geralmente circundadas por baixos magnéticos. Novamente, o grau de familiaridade do intérprete com anomalias desse tipo favorece a sua identificação.

D- Unidades litológicas

A identificação de unidades litológicas pode ser baseada na combinação de:

- correlações com a geologia de afloramentos, ou de sondagens;
- correlações com dados radiométricos, já que diferentes concentrações de radioelementos podem indicar diferentes tipos litológicos (Dickson & Scott, 1997);
- correlações com dados gravimétricos, os quais indicam variações de densidade;
- amplitudes de anomalia podem indicar possíveis litologias. Por exemplo, amplitudes de vários milhares de nanoteslas podem indicar rochas muito ricas em magnetita.

O conhecimento básico das diferentes respostas prováveis de serem observadas em diferentes unidades litológicas deve ser disponibilizada para que uma sistematização litológica eficiente seja efetuada. Esse conhecimento pode vir da experiência do intérprete na área, ou do entendimento da petrologia magnética das unidades litotectônicas (Clark, 1997).

Os contornos das unidades magnéticas podem sugerir o tipo de litologia constituinte. Por exemplo, anomalias ovóides, ou sub-arredondadas com seção de diversos quilômetros, que seccionam a estruturação geral da área, podem significar a ocorrência de uma intrusão.

Altos magnéticos circundando feições desse tipo podem indicar a ocorrência de auréolas magnéticas.

A textura característica das unidades magnéticas também pode indicar evidências da sua origem. Por exemplo, derrames de lava geralmente exibem uma característica forma de anomalia semi-aleatória, própria da heterogeneidade das propriedades magnéticas do derrame.

E- Modificações químicas

Modificações na intensidade magnética, que originam discordâncias no interior de uma unidade magnética, podem indicar propriedades magnéticas devidas ao metamorfismo, à alteração, ou ao intemperismo.

F- Síntese estrutural relacionada à geologia e às estruturas inferidas

Após a análise e a avaliação de todos esses itens, as interpretações devem ser condensadas em um produto conclusivo e utilizável. Obviamente, em áreas com uma exposição limitada de rochas, deve-se ter o cuidado de não extrapolar elementos que não possam ser comprovados nos trabalhos de verificação de campo.

O processo de interpretação é sempre iterativo e, assim, nenhuma imagem dos dados mostrará todas as informações. Diferentes imagens e diferentes dados poderão conter em conjunto uma amostra mais precisa e realística do registro geológico mais completo.

A metodologia de geração dos produtos necessários para a identificação de todas as feições supramencionadas pode ser a seguinte:

1- Mapas de contorno de intensidade magnética total

Os mapas de contorno têm sido considerados produtos de menor importância do que os produtos *raster*. Porém, esses mapas exibem uma melhor representação dos gradientes magnéticos do que as imagens *raster* e, assim, são mais úteis para a identificação de contornos de fontes magnéticas, profundidades e mergulhos. Imagens com pseudo-iluminação podem causar confusão na identificação da posição e da forma das anomalias, dependendo da *palleta* de cores utilizada para criação da imagem. Além disso, também é mais fácil extrair valores de amplitude de mapas de contorno do que de uma imagem.

Existem algumas formas de se combinar as vantagens dos contornos e das imagens. Uma delas é utilizar contornos coloridos nas mesmas classes de cores que se utilizaria em uma imagem. Esse procedimento pode facilitar a interpretação da amplitude dos elementos que se está analisando. A superposição de contornos monocromáticos sobre a imagem também pode ser bastante útil.

O outro uso básico dos mapas de contorno é verificar a qualidade do processo de *gridagem* aplicado aos dados. Isso pode ser obtido pela superposição das linhas de vôo ao mapa de contorno, de forma a visualizar a existência de artefatos criados pelo processo de *gridagem*.

2- Perfis de intensidade magnética total

Em geral, os dados de uma linha de perfil contém mais informações do que os dados interpolados em um *grid*, devido principalmente ao intervalo amostral do *grid* ser maior do que ao longo da linha de vôo. Por exemplo, um valor comumente obtido é de 7m de intervalos ao longo da linha e de 100 m depois da interpolação. Isso significa que os dados *gridados* são uma representação suavizada dos dados do perfil. Algumas vezes, pode ocorrer o aliasamento (*aliasing*) durante o processo de *gridagem*, que ocasiona distorções na forma das anomalias observadas. Também é possível que picos anômalos em mapas de contorno e imagens, sejam, na realidade, anomalias constituídas por múltiplos. Outra vantagem dos perfis é que a

modificação da escala de plotagem permite que as anomalias com várias amplitudes sejam observadas.

3- Imagens coloridas de intensidade magnética total

Essa imagem é elaborada com o intuito de efetuar um controle de qualidade inicial sobre os dados, já que possibilita a verificação da estruturação geral da área, bem como do nível de ocorrência de artefatos. Por outro lado, constitui-se em produtos intermediários, não utilizados para a interpretação, porque, devido à inclinação do campo magnético terrestre, ocorre um significativo deslocamento e uma forte assimetria das anomalias.

4- Imagens de intensidade magnética total reduzida ao pólo

A interpretação básica deve ser desenvolvida sobre várias imagens reduzidas ao pólo. Quando a magnetização das rochas de uma área é por indução e não ocorre uma significativa magnetização remanente em outra direção que não a do campo magnético terrestre, o processo de redução ao pólo posiciona as anomalias exatamente sobre as suas fontes. Esses mapas e imagens são muito mais fáceis de interpretar do que os conjuntos de dados originais, em áreas de significativa inclinação magnética.

A maioria das regiões mostra apenas magnetização induzida. Quando ocorre remanência, após a redução ao pólo observa-se a formação de um efeito do tipo cauda de cometa (“*comet tail*”, Mcleod *et al.*, 1993).

As representações reduzidas ao pólo produzidas para interpretação podem ser:

a) Contornos reduzidos ao pólo: esse mapa exhibe os gradientes magnéticos, que são essenciais para determinar os limites das fontes magnéticas e para estimar qualitativamente a forma geométrica e a profundidade da fonte magnética.

b) Imagens de amplitude, reduzida ao pólo, colorida e sem pseudo-iluminação: é uma imagem colorida (*raster*) do mapa de linhas de contorno e fornece informações complementares.

c) Imagem reduzida ao pólo, colorida e com pseudo-iluminação: essa imagem utiliza um esquema de cores do tipo arco-íris (azul indica baixo e magenta indica alto) e pode ser útil para subdividir unidades de diferente intensidade e características magnéticas. Essa imagem pode ser mais útil quando superposta sobre o mapa de linhas de contorno reduzido ao pólo. A

pseudo-iluminação favorece a identificação de feições magnéticas pouco distintas no mapa sem nenhuma iluminação.

d) Imagem reduzida ao pólo, em tons de cinza e com pseudo-iluminação: muitos intérpretes preferem imagens em tons de cinza, porque elas permitem a percepção de algumas feições que são mais distinguíveis em tons de cinza. Isso ocorre principalmente em áreas com fortes baixos magnéticos, onde essas imagens permitem a melhor identificação de detalhes pouco perceptíveis. O ponto menos favorável às imagens em tons de cinza é que elas não permitem a análise adequada da amplitude dos dados.

e) Mapas e imagens de gradiente vertical (1ª derivada) do campo magnético, reduzido ao pólo: representa gradientes verticais dos campos magnéticos, nos quais os efeitos regionais e a interferência entre anomalias adjacentes têm sido suprimidos. A computação de um gradiente vertical é análoga à utilização de um filtro passa-alto. Os seguintes mapas e imagens desse tipo podem ser produzidos:

e.1) Mapas de linhas de contorno do gradiente do campo reduzido ao pólo: como ocorre com os contornos de intensidade magnética total, esse mapa é indispensável para a definição das verdadeiras anomalias máximas e das margens das fontes, definidas pelos contornos do gradiente.

e.2) Imagem colorida do gradiente vertical da intensidade total do campo magnético, reduzido ao pólo e com pseudo-iluminação: essa imagem fornece uma boa resolução dos detalhes mais finos da imagem, combinada com a possibilidade de análise de amplitude magnética.

e.4) Imagens em tom de cinza do gradiente vertical da intensidade magnética total reduzida ao pólo: essa imagem fornece uma melhor resolução de detalhes bastante finos na imagem; mas, por outro lado, exhibe os mesmos problemas que a imagem colorida

e.5) Ganho de controle automático do gradiente vertical do campo magnético reduzido ao pólo: o processo de ganho automático cria uma imagem onde todas as anomalias são niveladas para terem aproximadamente a mesma amplitude. Desse modo, as feições mais fracas são, em princípio, evidenciadas igualmente em relação às feições mais salientes.

Embora as informações sobre amplitudes sejam perdidas durante esse processo, os resultados são extremamente úteis para interpretação estruturais.

3.2.2- AEROGAMAESPECTROMETRIA

3.2.2.1- FUNDAMENTOS BÁSICOS DE AEROGAMAESPECTROMETRIA

Minty (1997) descreve os fundamentos básicos da aerogamaespectrometria, nos conteúdos sintetizados abaixo:

A radioatividade é propriedade dos núcleos atômicos e independe das composições químicas das substâncias nas quais os elementos radioativos ocorrem. Geralmente, esses elementos ocorrem sob a forma de compostos químicos complexos.

As propriedades radioativas das rochas podem indicar a ocorrência de concentrações interessantes de elementos radioativos e podem, assim, permitir a caracterização de formações geológicas, por meio do conteúdo desses elementos.

Em prospecção mineral, de um modo geral, a radioatividade é detectada ou medida por meio das radiações gama (γ). As radiações alfa (α) ou beta (β) naturais, são obstruídas por espessuras de rocha ou solo de menos do que 1 centímetro. Por isso, as radiações alfa e beta prestam-se pouco para serem utilizadas em prospecção.

As radiações gama podem se medidas podem atravessar cerca de 1 metro de rocha. Assim, medidas de radioatividade gama sobre o terreno, fornecem informações até cerca de 0,50 m ou pouco mais, abaixo da superfície.

Todas as rochas contêm, naturalmente, elementos muito radioativos como os da família do Urânio e do Tório, com teores variados e característicos (geralmente sob a forma de elementos traços). O isótopo radioativo do Potássio, o Potássio de peso atômico 40 (K^{40}), ocorre sempre junto ao Potássio natural (isótopo inerte K^{39}) na proporção de 0,012%. Sendo o Potássio um elemento abundante na composição das rochas, como constituinte de minerais essenciais, praticamente todas as rochas contêm K^{40} radioativo.

Assim, em qualquer lugar da crosta terrestre existem radiações gama providas das rochas “in natura”, ou de outros materiais (como por exemplo agregados de concreto).

Em qualquer ambiente, radiações destas origens, somam-se à outras radiações: de raios cósmicos (providas originalmente do espaço exterior), de radiações provocadas por reações nucleares (explosões atômicas ou em reatores); de radiações devidas às substâncias dos

painéis dos aparelhos de medida, etc. Portanto, em todos os locais existirá uma intensidade de radiação, cujo valor oscila em torno de uma média característica. Esse valor é o que se denomina de “*background*” de radioatividade, ou radiação de fundo, característico para cada lugar. O *background* depende também das condições como foram praticadas as medidas.

As litologias ou as formações próximas, condicionam em grande parte o “*background*”, podendo-se, por meio de mudanças sensíveis de “*background*”, localizar contatos e assim delimitar formações, litoestiotigráficos ou unidades lototectônicas.

Por outro lado, a pesquisa de indícios de concentrações interessantes de elementos radioativos, consiste em localizar áreas onde a intensidade seja consideravelmente maior do que o “*background*”. Esses locais apresentam anomalias radioativas, as quais, para serem sensíveis, devem ser duas à três vezes superior à intensidade do “*background*”.

Nem todos os elementos radioativos emitem raios gama, mas, mesmo assim, poderão ser detectados, por meio de outro elemento que ocorre na sua família radioativa, desde que este emita raios gama. O Urânio é detectado indiretamente por meio das radiações emitidas pelo elemento rádio, principalmente, e pelo Radônio (Rn^{222}), um elemento gasoso da família do Urânio, também radioativo e com vida média de 3,85 dias.

Os elementos radioativos que interessam à prospecção são:

- Os elementos da família do Urânio;
- Os elementos da família do Tório;
- O isótopo radioativo do Potássio, o K^{40} .

Existem muitos outros nuclídeos, porém, sem interesse, por não constituírem elementos naturais, ou por possuírem meia vida muito pequena, ou por que ocorrem em quantidades insignificantes.

Os métodos radiométricos auxiliam a prospecção indiretamente, como uma forma de caracterizar formações, de indicar zonas fraturadas, ou a ocorrência de atividades hidrotermais.

Essencialmente, os equipamentos de medidas utilizados em prospecção, são os contadores Geiger-Müller, os cintilômetros e os espectrômetros de radiação gama.

Os espectrômetros permitem processar os impulsos elétricos produzidos pela radiação num cintilômetro adequado, de modo a analisá-los, discriminando níveis de energia. Desse modo, discriminam as contribuições relativas devidas à radiações do Urânio, do Tório e do K^{40} , na radiação detectada e medida.

Se forem consideradas as propriedades físicas utilizadas e os respectivos equipamentos de medida e detecção, os métodos radiométricos são métodos geofísicos. Por outro lado as técnicas de interpretação, respectivos raciocínios e as informações possíveis de serem obtidas para a prospecção, são predominantemente geoquímicos.

3.2.2.1.1- PROCESSOS DE DENSINTEGRAÇÃO RADIOATIVA

Constante de desintegração

É a probabilidade de um átomo de um elemento radioativo se desintegrar num determinado instante; como átomos de um mesmo elemento são idênticos, a probabilidade de desintegração é a mesma, sendo uma constante característica de cada elemento radioativo, e não uma função do tempo nem de condições de pressão, temperatura ou da forma de composição química (ou isolada) em que se encontre o átomo isto significa que independe das condições físicas ou químicas ambientais, e também da idade do átomo.

Num instante determinado, havendo “N” átomos do elemento presente, a atividade ou o número de desintegrações que acontecerão num intervalo de tempo dt será:

$$A = N\lambda \quad \text{eq. 4}$$

A taxa de desintegração (ou de diminuição) do elemento mãe no intervalo de tempo dt será:

$$dN = - N\lambda; \text{ ou } dN = - N\lambda dt \quad \text{eq. 5}$$

Meia vida

É o tempo necessário para que o número de átomos ativos (mãe) de um mesmo elemento se reduza a metade, por efeito da desintegração desse número também é uma constante característica para cada elemento radioativo.

Supondo-se que após um período de tempo $t_{1/2}$, permaneça a metade dos átomos ativos, considerando-se a quantidade que existia num tempo inicial; chamando-se $N_{1/2}$ e N_0 os números de átomos ativos no fim e no início desse período, tem-se por definição:

$$\underline{N_{1/2}} = 1/2; \text{ ou } N_{1/2} = N_0/2 \quad \text{eq. 6}$$

N_0

De acordo com o estabelecido na equação (2) tem-se:

$$N_{1/2} = N_0/2 = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}; 1/2 = e^{-\lambda t_{1/2}}; \text{ ou } -\lambda t_{1/2} = \ln(1/2) \quad \text{eq. 7}$$

$$-\lambda t_{1/2} = 2,303 \log_{10} 0,5 = -0,693 \text{ ou } T_{1/2} = 0,693 \times 1/\lambda \quad \text{eq. 8}$$

Assim, a meia-vida de um elemento radioativo é uma constante, sendo o inverso de sua constante de desintegração multiplicado pelo fator 0,693.

A meia vida de núclídeos pode ser tão pequena como de 10^{-6} segundos e tão grande como 10^5 milhões de anos.

A vida média do U^{238} é 4.560 milhões de anos; do Th^{232} é 14.000 anos; do K^{40} é 1.400 anos.

Equilíbrio Radioativo

O equilíbrio radioativo ocorre quando numa família de elementos radioativos se desintegrando, a taxa de desintegração de cada elemento filho, for igual a taxa de sua geração pelo seu respectivo elemento pai.

Desde que todos os elementos permaneçam no sistema, numa família (ou série) se desintegrando, após um tempo suficientemente longo, será atingido o estado de equilíbrio, entre cada par de elementos geradores e gerados da série.

Sendo muito larga a meia-vida do primeiro elemento da série, sua diminuição no tempo será praticamente insensível e os números de átomos de cada elemento, permanecerão praticamente constantes.

Se N_1 e λ_1 forem denominados o número de átomos e a constante de desintegração de um determinado elemento mãe, respectivamente, sua taxa de desintegração será:

$$dN_1/dt = -\lambda_1 N_1 \quad \text{eq. 9}$$

Ao mesmo tempo o respectivo elemento filho que lhe segue na série, se desintegrará à uma taxa $-\lambda_2 N_2$, na qual λ_2 e N_2 são: sua respectiva constante de desintegração, e seu número de átomos ativos.

A taxa de acumulação de átomos gerados (filhos) será a diferença entre a sua geração e a sua desintegração no intervalo de tempo dt . Tem-se então:

$$dN_2/dt = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad \text{eq. 10}$$

Pela mesma razão, a taxa de acumulação de um terceiro elemento na série (um elemento neto), será:

$$DN_3/dt = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \quad \text{eq. 11}$$

O mesmo poderá ser estabelecido sucessivamente para os elementos que seguem na série.

No equilíbrio, a taxa de acumulação de cada elemento da série, será zero por definição.

Então:

$$0 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad \text{eq. 12}$$

$$0 = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \quad \text{eq. 13}$$

$$0 = \lambda_3 N_3 - \lambda_4 N_4 \quad \text{eq. 14}$$

$$\text{de onde: } \lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots \quad \text{eq. 15}$$

Se t_1, t_2, t_3, \dots forem as denominações das vidas médias dos elementos da série, ter-se-á de acordo com a equação (3):

$$t_1 = 0,693 / \lambda_1; t_2 = 0,693 / \lambda_2; t_3 = 0,693 / \lambda_3; \dots \quad \text{eq. 16}$$

$$\lambda_1 = 0,693 / t_1; \lambda_2 = 0,693 / t_2; \lambda_3 = 0,693 / t_3; \dots \quad \text{eq. 17}$$

$$\text{Substituindo-se na igualdade acima chega-se à: } N_1/t_1 = N_2/t_2 = N_3/t_3 \dots \quad \text{eq. 18}$$

Essas condições permanecem inalteradas no tempo (na escala humana). Portanto, numa série em equilíbrio, na qual sejam conhecidas as respectivas vidas médias dos elementos da série, torna-se possível o cálculo do teor de todos os elementos da série, mediante a análise do teor de um dos elementos presentes. Entretanto, é necessário que todos os elementos da série permaneçam no sistema. Isto é, que não haja remoção por efeito de erosão, ou evasão no caso de elementos gasosos (como o radônio Rn^{222} da série do Urânio).

Uma segunda possibilidade é a estimação do teor de um elemento da série, medindo-se a radioatividade total produzida pelo conjunto da série em equilíbrio na rocha. Isso pode ser

obtido pela comparação com a radioatividade de um padrão, que por sua composição conhecida, simule as condições existentes na rocha (ou formação), sendo o parâmetro comparado, radioatividade total, para a qual contribuem todos os elementos radioativos presentes.

Nos casos de erosão removendo elementos do sistema, ou de evasão de Rn^{222} , haverá intensidade de radiação menor, o que ocasionará uma avaliação com erro para menos no teor em Urânio da unidade geológica de interesse.

A absorção da radioatividade pelos elementos inertes da rocha, ou por água contida (umidade da rocha), resulta em intensidade de radioatividade menor. Portanto, será ocasionado um erro para mais ou para menos, se o padrão de comparação diferir em composição de substâncias absorventes, ou em umidade. Já a contribuição da radioatividade de elementos estranhos à série do Urânio que a rocha contenha (como elementos da série do Tório ou K^{40}), ocasionará um erro para mais na estimativa.

3.2.2.2- FATORES GEOQUÍMICOS E INTERPRETAÇÃO DE DADOS AEROGAMAESPETROMÉTRICOS

3.2.2.2.1- GEOQUÍMICA DOS RADIOELEMENTOS

Diversos fatores geoquímicos afetam a interpretação de dados aerogamaespetrométricos obtidos na área de interesse. Assim, torna-se necessário avaliar as características geoquímicas dos elementos envolvidos e caracterizar os diversos fatores ambientais que influenciam nos padrões observados nos levantamentos. Para tanto, utilizou-se como bibliografia básica os trabalhos de Dickson & Scott (1997) e Wilford *et al.* (1997), os quais são sintetizados abaixo:

O Potássio (K) é um dos componentes principais da crosta terrestre (2,35%); ele é um elemento alcalino alojado nos feldspatos (ortoclásio e microclíneo = 13% K) e micas (biotita e muscovita = 8% K). O K está ausente nos minerais máficos; conseqüentemente, o seu conteúdo é relativamente baixo nas rochas máficas e muito baixo nas ultramáficas. O comportamento dos minerais com K frente aos processos intempéricos determina o conteúdo desse radioelemento que permanecerá nas rochas alteradas e nos solos. Durante o intemperismo, os minerais de K serão destruídos na seguinte ordem: biotita – feldspato potássico – muscovita. O K liberado durante o intemperismo será colocado em minerais como a illita, ou adsorvido em menores quantidades em outras argilas.

O K é detectado em levantamentos aerogamaespectrométricos pela medida do raio gama de 1,45 MeV emitido pelo seu decaimento. O isótopo ^{40}K constitui 0,02% do K natural e é, portanto, uma medida direta do conteúdo de K no solo.

O Urânio (U) é um constituinte menor da crosta terrestre ($\cong 3$ ppm) e o seu comportamento geoquímico é dominado por 2 estados de valência (U^{4+} e U^{6+}). A forma mais reduzida, U^{4+} , está geralmente contida em minerais insolúveis. Ao contrário, a forma oxidada, U^{6+} , está associada a complexos com ânions (CO_3^{2-} , SO_4^{2-} e PO_4^{2-}), para formar muitas espécies solúveis. A mobilidade do U^{6+} é modificada pela adsorção por óxidos de ferro hidratado, minerais argilosos e colóides e pela redução dos complexos portadores do U^{6+} , quando as águas encontram ambientes redutores (i.e., zonas de material carbonático ou pirita).

O Urânio pode ocorrer nas rochas como óxidos e silicatos (uraninita, uranotorita), monazita, xenotimo e zircão. Dos principais minerais portadores de U, apenas o zircão e a monazita são estáveis no intemperismo.

O Tório (Th) é um componente menor da crosta terrestre ($\cong 12$ ppm) e ocorre apenas no estado de valência Th^{+4} . A solubilidade dos complexos de Th é geralmente baixa, exceto em soluções ácidas.

O Th pode ocorrer na alanita, monazita, xenotimo e zircão, em níveis menores do que 1.000 ppm. Os principais minerais com Th (monozita e zircão) são estáveis durante o intemperismo.

3.2.2.2.2- A DISTRIBUIÇÃO DOS RADIOELEMENTOS NAS ROCHAS

O conteúdo médio dos radioelementos nas rochas ígneas exibe uma tendência de aumento com a elevação do conteúdo de Si. Assim, desconsiderando a diferença de 4 ordens de magnitude na concentração entre o K e o U-Th, esses elementos exibem uma correlação positiva com o aumento do conteúdo de Si das rochas. Geralmente, o Th mostra um aumento muito maior do que o U e, assim, a razão Th/U pode ser utilizada para investigar o grau de diferenciação em uma suíte de rochas ígneas. Já as rochas formadas nos últimos estágios de alojamento das intrusões, como pegmatitos e aplitos, não exibem essa correlação positiva. Essas rochas, devido às pequenas áreas que ocupam, não são frequentemente identificadas nos levantamentos aéreos.

No interior de uma suíte de rochas ígneas, pode ocorrer uma larga amplitude de valores de concentração de elementos radioisótopos. Essas amplitudes foram derivadas de valores médios para as diversas unidades e, assim, não são valores representativos. Dessa forma, nenhuma classificação de tipos de rocha por radioelementos é possível. Contudo, em pequenas regiões, diferentes tipos de rochas podem ser identificados com base na concentração de radioelementos.

As rochas sedimentares têm geralmente um conteúdo de radioelementos que reflete a rocha fonte. Assim, sedimentos imaturos derivados de rochas graníticas podem ter um conteúdo bastante elevado de radioelementos, enquanto que sedimentos maduros (compostos principalmente por quartzo) devem exibir valores mais baixos.

3.2.2.2.3- DISTRIBUIÇÃO DOS RADIOELEMENTOS NOS SOLOS

Nos solos, existe a possibilidade para o desequilíbrio radiométrico entre o U “pai” e o ^{226}Ra , ocasionado a disparidade geoquímica entre os dois radioelementos. Além do desequilíbrio do U - ^{226}Ra , a perda de radônio pode contribuir significativamente para a diminuição da resposta U medida durante o levantamento aéreo. A quantidade de Rn perdido dos solos depende do tamanho de partículas do solo e do conteúdo de umidade dos solos.

Os granitos exibem uma grande variação no seu comportamento frente ao intemperismo, o que depende da sua mineralogia, do regime de intemperismo, do clima, etc.

Os solos derivados de rochas granitóides perdem geralmente cerca de 20% de seu conteúdo de radioelementos durante os processos de pedogênese. A perda de K é geralmente controlada pela alteração do feldspato alcalino. Assim, o conteúdo de K pode aumentar durante os estágios iniciais do intemperismo, como um resultado da remoção dos minerais mais facilmente alteráveis. Em condições de intemperismo laterítico, os granitóides podem ser caolinizados, o que resulta na perda substancial de K, mas também resulta na retenção de 60 a 80% do U e do Th.

A quantidade de U que pode ser mobilizada de uma rocha granitóide é determinada pela sua mineralogia. Em muitos granitóides, há minerais acessórios (zircão, esfeno e monazita), os quais podem conter até 85% do U total. A mobilização do U parece ocorrer nos estágios iniciais do intemperismo. Esse padrão pode ser completamente diferente quando comparado ao do K e Th, os quais apresentam um comportamento geoquímico mais uniforme.

Nas rochas intrusivas intermediárias não ocorrem maiores modificações no conteúdo dos radioelementos até a implantação dos processos de pedogênese; mas, ocorre normalmente uma mudança abrupta de concentração na interface entre saprolitos e solos.

Os diabásios tendem a ocorrer como diques e exibem pouca, ou nenhuma, modificação no conteúdo de radioelementos na rocha alterada em relação à rocha original.

Um perfil completo deve mostrar uma forte modificação no conteúdo de radioelementos na interface rocha/saprolito, da mesma forma como acontece nas rochas intermediárias.

As rochas vulcânicas félsicas produzem geralmente solos que exibem uma depleção no conteúdo dos três radioelementos. As rochas vulcânicas intermediárias, por sua vez, têm solos com baixo K e conteúdos similares de U e Th em relação às rochas que os originaram.

Nas rochas vulcânicas máficas, o conteúdo de radioelementos nos solos exhibe marcantes modificações. Esses solos tendem a exibir perdas mais elevadas de K e aumentos no U e no Th. O grande aumento no Th e no U com o intemperismo das rochas máficas tem um efeito considerável sobre os levantamentos aerogamaespectrométricos. Os derrames basálticos, em áreas com poucos solos desenvolvidos, mostram uma clara distinção em relação ao padrão de radioelementos das rochas félsicas. Porém, em áreas de elevado desenvolvimento de solos, o empobrecimento de K e o aumento na concentração de U e Th, podem resultar em assinaturas de solo semelhantes a de um granito alterado.

Nos folhelhos, a pedogênese resulta em uma grande perda de K e numa retenção de cerca de 70% do conteúdo de U e Th, comparados com a rocha original. Particularmente, o intemperismo laterítico pode resultar na perda quase completa de K, sem afetar os outros 2 radioelementos. Por outro lado, a silicificação pode preservar folhelhos que ocorrem próximos à superfície, o que resulta em áreas com conteúdo elevado de K e Th, associadas a altos topográficos. A retenção de U e Th e a perda de K pode resultar em assinaturas distintas para as unidades argílicas de uma área.

Nos arenitos, os valores médios são 1,3% K, 2,1 ppm de U e 11 ppm de Th, similares aqueles das rochas originais. Os solos sobre arenitos pobres em radioelementos, bem como sobre outras rochas pobres em radioelementos, podem exibir efeitos de contaminação por material transportado.

3.2.2.2.3.1 ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA POR ÁGUA E VEGETAÇÃO

A água, tanto como umidade no solo, quanto dentro do tecido das plantas, atenua os raios gama. Os efeitos da umidade dos solos na emissão dos raios gama são bastante complexos. A intensidade dos raios pode aumentar, ou diminuir, dependendo das condições de umidade dos solos. Para eliminar a variação nas emissões devido a modificações no nível de umidade dos solos, amostragens de solos e medidas aéreas são mais representativas quando realizadas em épocas de tempo seco.

A vegetação pode causar a atenuação dos raios gama, principalmente se a cobertura vegetal for muito densa. Os raios gama são atenuados quando a vegetação é densa e contém elevados índices de material lenhoso e de água contida na copa das árvores. Em ambientes tropicais, índices de cobertura vegetal obtidos a partir do processamento de imagens LANDSAT TM têm sido usados para corrigir dados de levantamentos aerogamaespectrométricos para efeitos de atenuação por água e vegetação.

O tecido das plantas contém pouco, ou nenhum Th e U e, assim, influenciam muito pouco na resposta dos raios gama. Por outro lado, o K contido na massa vegetal pode contribuir com até 15% da resposta dos raios gama. Assim, o fator vegetação deve ser especialmente considerado na interpretação dos dados de K.

3.2.2.2.3.2- APLICAÇÃO DE LEVANTAMENTOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS NO MAPEAMENTO GEOLÓGICO E DE REGOLITO

A aerogamaespectrometria tem sido usada principalmente como uma ferramenta para exploração mineral na localização de depósitos de U e também em mapeamento litológico.

Embora também tenha sido usada para o mapeamento de regolito, a principal aplicação tem sido para mapeamento geológico.

A fonte de raios gama que emanam da superfície do solo pode ser descrita como primária, ou secundária. Fontes primárias estão relacionadas à geoquímica e à mineralogia das rochas; fontes secundárias estão relacionadas à redistribuição dos elementos pelos processos intempéricos e pedogenéticos. A fonte secundária é mais complexa, devido ao elevado número de fatores intervenientes no processo. Durante a atuação dos processos intempéricos, os radioelementos são liberados dos minerais constituintes das rochas e incorporados na

estrutura de argilominerais, óxidos de ferro e matéria orgânica, ou tomam-se constituintes das águas subterrâneas.

O Potássio (K), em termos geoquímicos, é móvel e solúvel sob condições intempéricas. Durante o intemperismo, esses elemento é liberado dos minerais primários, colocado em solução e absorvidos por argilas, tais como ilitas, montmorilonitas e, em menor proporção, caolinita.

O Urânio (U) e o Tório (Th) são muito menos móveis que o K. O U é liberado dos minerais, colocado em solução e lixiviado se as condições do meio são oxidantes; ele precipita se as condições tornam-se redutoras. As concentrações superficiais de U podem ser associadas com minerais resistatos (zircão e monazita), argilas, ou ^{226}Ra exsolvido das águas subterrâneas. O Th também é associado com minerais resistatos e tende a se concentrar em perfis regolíticos residuais. Ambos, U e Th, liberados durante o intemperismo, são facilmente absorvidos por minerais argilosos, ou precipitam muitas vezes associados a óxidos de Fe nos solos (Dickson & Scott, 1990, *apud* Wilford *et al.* 1997).

Embora fontes secundárias de raios gama sejam relacionadas a diferentes materiais e processos, algumas conclusões gerais podem ser conduzidas:

- O Th e o U são normalmente associados às frações silte /argila, que ocorrem nos solos, tendem a se conectar com relação ao K em perfis altamente intemperizados.
- O K é elevado em regolitos pouco alterados (dependendo da composição das rochas originais) e baixo em regolitos altamente intemperizados.
- A mobilidade relativa dos principais constituintes minerais liberados durante a atuação dos processos intempéricos e a sua resposta em termos de raios gama é demonstrada na seqüência abaixo:

$\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{K} > \text{Fe}^{2+} > \text{Si} > \text{Fe}^{3+} > \text{Al}$
--

Decréscimo de mobilidade →

Essa seqüência é generalista e a sua ordenação pode ser modificada conforme mudam as condições ambientais. Quando os minerais primários são intemperizados, cátions como o K^+ , o Na^+ e o Ca^{+2} são incorporados à estrutura de minerais argilosos (i.e., esmectita e illita), ou perdidos em solução. O aumento da intensidade dos processos intempéricos conduz ao desenvolvimento de argilas caoliníticas e ao acúmulo de óxidos de silício, ferro e alumínio.

A ausência de radioelementos no quartzo pode ser utilizada para identificar solos altamente silicosos.

O canal do K e as razões K/eTh e K/eU podem ser utilizadas para verificar o grau de intemperismo, ou lixiviação das fontes primárias. Isso é possível porque o teor de K está associado com minerais facilmente intemperizados, enquanto que o Th e o U estão tipicamente associados com argilas residuais, óxidos e minerais residuais. Amostras de solo obtidas em formas de relevo estáveis (áreas onde os processos pedogenéticos predominam) mostram uma correlação positiva entre o K e o pH. Isso constitui uma maneira dos levantamentos aerogamaespectrométricos indicarem indiretamente o nível de nutrientes dos solos e o pH.

A resposta dos raios gama ao material regolítico varia de acordo com diferenças nas litologias, intemperismo e história geomórfica. A resposta dos radioelementos sobre formas de terreno com elevadas taxas de erosão é fortemente correlacionada à geoquímica e à mineralogia das rochas do substrato. Em regiões com formas do relevo mais estabilizadas, onde os materiais regolíticos estão se acumulando, o intemperismo pode resultar em uma resposta dos radioelementos que exhibe uma disparidade das assinaturas das rochas do substrato. Se as respostas dos raios gama do substrato rochoso e dos regolitos são conhecidas, então, áreas de acumulação de regolitos associadas com processos geomórficos com taxas baixas de erosão, podem ser distinguidas de áreas de substrato associadas com processos geomórficos mais ativos. Essas relações podem ser usadas para acessar o balanço de denudação do terreno, ou as taxas relativas de formação de regolito e de erosão.

A atividade deposicional de sedimentos aluviais e a proveniência dos sedimentos também podem ser distinguidas. Ambientes deposicionais ativos têm assinaturas dos raios gama similar às suas rochas fonte, indicando uma rápida erosão, transporte e deposição, com poucas modificações causadas pelo intemperismo. A resposta dos raios gama em ambientes deposicionais menos ativos, por outro lado, difere freqüentemente da resposta das suas rochas fonte, o que indica a retirada dos radionuclídeos por processos pedogenéticos. Essa

informação tem um potencial para ser usada na otimização da interpretação de dados de geoquímica de sedimento de corrente em prospecção mineral.

Dados de aerogamaespectrometria fornecem informações geoquímicas complementares para mapeamento de morfologias de terreno, principalmente como auxiliares para a interpretação de fotografias aéreas. Essa metodologia utiliza as formas o terreno como um auxiliar para mapear tipos de solos e de regolitos, particularmente em áreas de poucas expressões geomorfológicas. Contudo, uma forte limitação dos serviços aerogamaespectrométricos para esses fins situa-se na sua pobre resolução espacial; por isso, é altamente recomendável integrar as imagens geradas por esse método, com outras imagens de sensores remotos (LANDSAT TM), bem como modelos digitais de elevação (MDE).

Outros processos, além dos intemperismo *in-situ*, podem afetar o conteúdo dos radioelementos nos solos. Esses processos incluem a eluviação das argilas e o transporte coluvial e eólico, bem como o movimento dos solos. Todos esses processos afetam a concentração dos radioelementos na camada superior de 30 cm de solos, medida durante o aerolevanteamento. O U e o Th estão estritamente associados com as frações mais finas dos solos. Conseqüentemente, a eluviação das argilas e dos óxidos de ferro nas camadas superiores do solo, causará a redistribuição do U e do Th no interior do perfil.

A aerogamaespectrometria pode ser utilizada para determinar variações nos tipos de solos em áreas onde há escassez de afloramentos. Como o aerolevanteamento fornece uma cobertura completa da superfície, pode ser utilizado para separar unidades diferentes do solo.

Para propósitos exploratórios, as informações sobre os solos podem ser utilizadas para avaliar a geoquímica dos solos e, posteriormente, compreender melhor a dispersão de elementos e de minerais indicadores.

As movimentações locais de camadas de solos podem distorcer a localização dos limites geológicos, especialmente onde a topografia é mais acentuada. Esse problema torna-se mais evidente onde o solo originado a partir de rochas ricas em radioelementos é transportado para áreas formadas por rochas empobrecidas nesses radioelementos.

A formação e os tipos de regolitos ainda podem ser afetados por outros processos para determinar a concentração dos radioelementos. Assim, para tipos especiais de solos, as seguintes particularidades podem ser observadas:

a) Calcretes: têm geralmente um baixo conteúdo de radioelementos, com uma média de 0,3%K, 1,2 ppm de U e 3,2 ppm de Th. Áreas cobertas por calcretes, mesmo de espessura fina, podem mascarar a assinatura das rochas sotopostas. Além disso, áreas com nódulos de calcrete associados podem apresentar um rebaixamento no conteúdo dos elementos radiométricos. Calcretes situados sobre rochas que possuem um baixo conteúdo de radioelementos devem exibir, também, um baixo conteúdo de radioelementos. Ao contrário, calcretes formados sobre rochas com um elevado conteúdo de radioelementos, exibem um valor consideravelmente maior de Th.

b) Ferricretes: exibem tipicamente valores médios de 0,4%K, 2,7ppm de U e 24ppm de Th. Considerando-se as rochas sotopostas, concentram Th e, em menor extensão, U; o K, geralmente, é fortemente depletado.

c) Pisólitos ferríferos: também exibem um enriquecimento em Th. Como os ferricretes, os pisólitos geralmente exibem um baixo conteúdo de K em relação às rochas adjacentes e podem concentrar Th e, menos freqüentemente, U.

A **Figura 12** exibe os principais fatores ambientais que influenciam nos resultados dos levantamentos aerogamaespectométricos (modificado de Wifford *et al.* 1997).

**FIGURA 12- PRINCIPAIS FATORES AMBIENTAIS QUE INFLUENCIAM NOS
RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS AEROGAMAESPECTOMÉTRICOS**

3.2.2.2.3.3- EFEITOS DOS PROCESSOS DE MINERALIZAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO DOS RADIOELEMENTOS

As revisões sobre a tipologia das assinaturas geofísicas sobre depósitos auríferos são muito variáveis. O K é tido como o principal elemento “farejador”. Mesmo quando o ouro está contido em veios de quartzo, a alteração hidrotermal das rochas encaixantes pode formar halos detectáveis positivamente anômalos. Esse tipo de anomalia pode estar relacionado com a potassificação da rocha, por meio da formação de zonas hidrotermais, ricas em sericita.

Posteriormente ao K, a principal característica indicadora citada foi o empobrecimento em Th das rochas alteradas. Esse efeito é chamado antagonismo entre o K e o Th (Ostrovshiy 1975) *apud* Vasconcellos *et al.* (1994) e refere-se ao concomitante decréscimo do Th e aumento do K com a alteração hidrotermal. Outros depósitos exibem um aumento em ambos elementos (K e Th), o que sugere que o Th é mobilizado em sistemas de alteração, mas que outras variáveis controlam a forma como isso afeta a concentração final de Th. Claramente, não existe nenhuma assinatura definitiva e particular sobre os depósitos auríferos, mas os estudos mostram que as variações no conteúdo dos três elementos podem ocorrer e podem ser detectadas em levantamentos aerogamaespectrométricos.

Os processos de alteração hidrotermal podem ocasionar modificações no conteúdo de radioelementos das rochas encaixantes. Dos três radioelementos, o K é o mais fortemente afetado por esses processos; o Th é menos freqüentemente afetado e o U é menos ainda. O K eleva o seu conteúdo como resultado da alteração hidrotermal potássica; mas com a atuação dos processos intempéricos, ocorre, geralmente, uma diminuição da intensidade da assinatura da alteração.

O efeito do intemperismo depende da mineralogia que aloja o K, porque o feldspato alcalino e a biotita são muito menos resistente do que a moscovita. Consequentemente, sob uma condição de intensa alteração, um halo de K formado devido ao feldspato potássico pode ser destruído, mas um halo relacionado à moscovita pode resistir sob condições moderadas de intemperismo. Se um intenso processo de silicificação acompanha a mineralização epitermal, pode ocorrer um decréscimo em K; mas, ao contrário, uma baixa silicificação, pode preservar a alteração potássica do intemperismo.

O Th pode ser mobilizado durante os processos de alteração intempérica. Nesse sentido, por exemplo, pode ser depletado em áreas de alteração K, ou de intensa silicificação, mas vai ser concentrado em materiais como as lateritas.

Os dados obtidos em diversos aerolevantamentos têm demonstrado que as áreas de alteração devem possuir pelo menos um quilômetro de largura, para serem detectadas pelos aerolevantamentos. Além disso, outro fator complicador para a obtenção de assinaturas de mineralização de levantamentos aéreos é o efeito da mudança de litologias. O fator com maior grau de complicação está relacionado aos solos transportados, os quais obscurecem a assinatura dos depósitos.

3.2.2.2.3.4- COMPORTAMENTO DOS RADIOELEMENTOS E TIPOS DE GRANITOS

Devido à complexidade da distribuição dos radioelementos nas rochas graníticas, utilizou-se como arcabouço teórico acerca desse tema o trabalho de Maurice & Charbonneau (1987), *apud* Vasconcellos *et al.* (1994), conforme segue abaixo.

Com o interesse crescente sobre a metalogenia das rochas graníticas um número crescente de esquemas de classificação têm sido formulados (Chappel & White, 1974; Ishihara, 1977; Loiselle & Wones, 1979; Pitcher, 1982, *apud* Vasconcellos *et al.* 1994). Do ponto de vista geofísico, uma classificação de granitos baseada no seu conteúdo de magnetita, como proposto por Ishihara (1977) *apud* Vasconcellos *et al.* (1994) é particularmente conveniente. Porém, ela se torna consideravelmente mais precisa se os parâmetros radiométricos puderem ser adicionados.

Os granitos não-magnéticos (série ilmenita) de Ishihara (1977, 1981) incluem os leucogranitos a duas micas, peraluminosos, ou tipo S de Chappel & White (1974). Em termos radiométricos, esses granitos tendem a ser algo mais uraníferos do que toríferos e têm razões U/Th mais elevadas do que os outros tipos de granito. O U e o Th ocorrem em fases minerais diferentes, usualmente uraninita e monazita, respectivamente; desse modo, as variações de U e de Th não mostram correlação. Uma observação comum nesse tipo de granito é que o U aumenta com a diferenciação, junto com a sílica, enquanto o Th decresce, junto com o CeO e o TiO. Esses granitos alojam, freqüentemente, veios de Urânio, ou depósitos de U-Sn-W tipo *greisen*, que se formam como um resultado da atividade hidrotermal e de autometassomatismo durante os estágios magmáticos finais. Essas zonas são caracteristicamente enriquecidas em U e depletadas em Th, o que resulta em um brusco aumento da razão U/Th.

Os padrões de distribuição dos radioelementos em relação aos leucogranitos peraluminosos a duas micas têm sido documentados em várias regiões, incluindo Austrália (Collins *et al.*, 1982; Yeates *et al.*, 1982; Webster, 1984, *apud* Vasconcellos *et al.* (1994)), Escócia (Plant *et al.*, 1983, *apud* Vasconcellos *et al.* 1994) e França (Damley, 1982, *apud* Vasconcellos *et al.* 1994). No Canadá, o South Mountain Batholith da Nova Escócia (Chatterlee & Muecke, 1982; Ford & O'Reilly, 1985, *apud* Vasconcellos *et al.* 1994), onde ocorre tanto mineralização do tipo U em veios, como *greisens* a Sn-W e o Fort Smith Belt (Charbonneau, 1982, *apud* Vasconcellos *et al.* 1994), são exemplos típicos.

Os biotita (hornblenda) granitos, ou granitos do tipo I subalcalino de Chappel & White (1974) são quase sempre caracterizados por anomalias magnéticas. A distribuição de Urânio tem correlação positiva com o Tório e as razões U/Th são normalmente mais baixas do que nos granitos a duas micas. A mineralogia dos radioelementos é mais variada nesses granitos do que nos tipos peraluminosos a duas micas, pois o U e o Th ocorrem principalmente na apatita, zircão, thorita, esfeno e allanita. Tanto o U, como Th tornam-se enriquecidos nas fases magmáticas mais evoluídas, o que resulta numa radiotividade total elevada, mas somente com leves variações nas razões U/Th.

Esses granitos do tipo I podem hospedar podem conter tanto um único quanto uma combinação de depósitos U, Th, W (Sn), Mo, Cu e Au. O batólito Lacome de Quebec (Ayres & Cerny, 1982, *apud* Vasconcellos *et al.* 1994) é um exemplo típico, assim como o distrito de Sn-W de Bumt Hill em New Brunswick (Canadá).

De particular interesse, atualmente, é a associação do Au com essas rochas intrusivas. Em Sandybeach Lake, nos Territórios do Noroeste do Alaska, por exemplo, *boulders* calcissiliciclásticos contendo Au visível, scheelita e uma variedade de sulfetos e teluretos, foram encontrados próximos a uma zona altamente evoluída de um granito-quartzo monzonito com magnetita, radioativo (Charbonneau & Swettenham, 1986, *apud* Vasconcellos *et al.* 1994). Essas rochas contêm, como acessórios, fluorita, turmalina, monazita, xenotimo, molibdenita, pirita e uraninita. Em uma das amostras, o Au nativo foi encontrado no interior de grãos de uraninita, o que sugere uma forte associação genética.

No caso dos granitos alcalino-peralcalinos, ou granitos do tipo A de Loiselle & Wones (1979), os mesmos padrões de raios gama dos granitos a biotita podem ser encontrados; porém, há usualmente com enriquecimento absoluto em U e Th. Contudo, a natureza dos depósitos associadas difere. Além do U e do Th, esses granitos estão quase sempre associados

com ocorrências de Zr, Be, Nb, Ta e ETR. Um exemplo típico é o recente descobrimento do depósito de Strange Lake, no limite Quebec-Labrador. Esse *pluton* peralcalino forma um corpo circular com 7 km de diâmetro e aloja um dos maiores depósitos de Zr-Y do mundo (Zajac *et al.*, 1984). A zona mineralizada, que também é rica em ETR pesados, Nb, Be, F, Ta, Sn, U e Th, tem uma superfície de 1,5 km². Contudo, a assinatura característica dos radioelementos (como alto U, alto Th e baixa razão U/Th) pode ser seguida por uma distância de cerca de 40 km ao longo do *trend* da dispersão glacial originada no *pluton* (Geological Survey of Canada, 1986, *apud* Vasconcellos *et al.* 1994). Outro exemplo interessante de granito peralcalino mineralizado é o complexo de Blachford Lake nos Territórios do Noroeste (Alaska); o minério associado contém elevadas concentrações de Nb, Li, Be, Zr, ETR, Y e U e foi descoberto devido a sua resposta radiométrica.

As situações acima descritas relacionam-se aos dois principais tipos de granitos que podem ser reconhecidos por diferenças em suas assinaturas radiométricas: o peraluminoso e o subalcalino/peralcalino. Como indicado por Pagel (1982) *apud* Vasconcellos *et al.* (1994), em relação aos granitos que ocorrem na França os diferentes *trends* em enriquecimento de U e de Th são controlados pela mineralogia dos acessórios que contém os radioelementos e pela sua seqüência de cristalização durante a diferenciação magmática. Deve ser notado que granitos intermediários entre esses dois estilos fundamentais podem ser encontrados (Pagel, 1982) *apud* Vasconcellos *et al.* (1994).

3.2.2.2.3.4.1- PROCESSOS DE CONCENTRAÇÃO PÓS-MAGMÁTICA

Os processos de enriquecimento em granófiros dos radioelementos acima descritos, relacionam-se à diferenciação magmática, ou ao estágio hidrotermal final, ou às atividade metassomáticas que aconteceram durante, ou logo após a introdução do *pluton*. Esses processos ocorrem em altas temperaturas e, conseqüentemente, são capazes de mobilizar elementos como o Th, Zr, Sn, W e ETR, que não seriam móveis em temperaturas mais baixas. O Urânio, contudo, quando ocorre na forma instável, pode ser mobilizado e concentrado em temperaturas muito mais baixas, o que resulta em mineralização rica em U e pobre em Th. Damley (1982) *apud* Vasconcellos *et al.* (1994) destaca que esses processos são provavelmente mais eficientes nas proximidades de extensos granitos anormalmente radiativos do que afastado deles, devido à capacidade de geração de calor desses granitos, pois esse calor pode movimentar sistemas hidrotermais e formar uma auréola de influência até 100 vezes maior do que as intrusões menos radiativas.

O padrão de radioatividade produzido pelo enriquecimento de U pós-magmático é caracterizado por elevações localizadas em U e na razão U/Th e pela concentração aproximadamente constante de Th na intrusão. O padrão térmico, contudo, pode ser complicado pela superposição, na distribuição dos radioelementos, de processos magmáticos anteriores e não é relacionado a qualquer tipo específico de granito.

Concentrações pós-magmáticas de U têm sido documentadas no depósito de U de Lijjuthatten no norte da Suécia (Troeng *et al.*, 1982) *apud* Vasconcellos *et al.* (1994). Essa mineralização consiste de pitchblenda, coffinita e de minerais secundários de U, e foi provavelmente introduzida no final da orogenia Caledoniana. No norte da Ilha de Baffin (Canadá), ocorre uma situação similar (Maurice, 1982) *apud* Vasconcellos *et al.* (1994). Veios ricos em U e pobres em W são encontrados dentro de um biotita-granito altamente radioativo, que contém zircão, esfeno, apatita, magnetita, allanita e thorita como acessórios. A allanita, principal mineral primário de U no granito, está fortemente alterada e foi lixiviada da maioria de seu U original. Os veios contêm pitchblenda e allanita e são levemente enriquecidos em Cu e Mo.

Assim, tem sido observado que, numa alta proporção de casos, os depósitos em granófiros, onde conhecidos, estão associados com rochas granitóides que exibem uma elevada radioatividade total quando comparadas às vastas áreas de rochas graníticas não mineralizadas. Nem todos os granitos anormalmente radiativos são mineralizados, mas as variações nas concentrações de radioelementos e nas suas razões podem ser usadas para identificar aqueles potencialmente mineralizados. Existe uma expectativa de que, no futuro, a gamaespectrometria encontre uma maior aplicação na exploração mineral para uma ampla gama de tipos de depósitos minerais e tome uma posição mais proeminente no mapeamento geológico, em particular nos terrenos graníticos. A **Tabela VIII** exhibe a tipologia dos granitos e os radioelementos que ocorrem associados.

Tabela VIII. Tipologia dos granitos e radioelementos associados.

CLASSIFICAÇÃO	CARACTERÍSTICAS GERAIS	RADIOELEMENTOS
Granitos do Tipo S	não-magnéticos série a ilmenita- peraluminosos, leucogranitos a duas micas.	maior U, menor Th. altas razões U/Th. U - Uraninita > fases minerais diferentes; Th - Monazita > sem correlação. U cresce com relação a sílica. Th decresce, igualmente ao CeO e ao TiO ₂ . Comum: Depósitos tipos <i>greisen</i> a U, Sn, W. Veios ricos em U (resultantes de atividade hidrotermal e alto metasomatismo dos estágios magmáticos tardios). Altas razões U/Th.
Granitos do Tipo I	magnéticos série a magnetita -biotita (homblenda) granitos, sub- alcalino.	existe uma correlação entre o U e o Th. Razões UITh são baixas. U e Th em apatita, zircão, thorita, esfeno e alanita. Há enriquecimento do U e do Th. Contagem total elevada, porém baixas razões U/Th. Comum: mineralizações de U, Th, W, (Sn), Mo, Cu, Au. Associações com Au: calcossilicatadas com Au, scheelita e variedade de sulfetos e teluretos, próximo de zona de granito quartzo monzonito magnético e radioativo. Acessórios: fluorita, turmalina, monezita, xenotimo, molibdenita, pirita e uraninita, Au nativo.
Granitos do Tipo A Granitos alcalinos- peralcalinos:		padrão semelhante ao <i>tipo I</i> , porém com enriquecimento absoluto de U e Th major. U e Th major. Alto U e Th. Baixa razão U/Th. Difere do <i>tipo I</i> na mineralização associada de: U, Th, Zr, Be, Nb, Ta, Terras Raras. Também F, Sn, Li, Y.

3.2.2.3- INTEGRAÇÃO DE DADOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS E GEOLÓGICOS

A interpretação dos dados gamaespectrométricos tem por objetivo delimitar áreas com diferentes níveis de radioatividade do Tório, Urânio, Potássio e do canal de contagem total, para elaborar *mapas de unidades radiométricas*. Esses mapas indicam, de uma forma qualitativa, a distribuição dos radioelementos nos materiais de superfície.

Ao contrário do mapa de unidades magnéticas, o mapa de unidades radiométricas reflete somente os materiais que estão na superfície do terreno, ou a poucos centímetros de profundidade. Assim, não há correlação necessária da radioatividade com a geologia e deve-se levar em conta que a química do solo nem sempre é similar àquela da rocha em sub-superfície. Contudo, a concentração de Tório, Urânio e Potássio nos solos e nas lateritas *in situ* possui alguma relação com a química da rocha em sub-superfície; porém, essa correlação tem uma natureza mais qualitativa do que quantitativa.

Os radioelementos Urânio, Tório e Potássio mostram fortes afinidades com rochas graníticas.

Por isso, os granitos possuem maior radiatividade do que as rochas ígneas máficas. Considerando-se uma série de reação magmática, os três elementos são seletivamente concentrados nos membros finais ricos em sílica. Essas observações são válidas para rochas plutônicas e vulcânicas. Desse modo, rochas graníticas produzem solos mais radioativos do que basaltos.

Em termos gerais, pode-se afirmar que a radioatividade é útil para distinguir-se áreas mais máficas e mais félsicas nos terrenos ígneos e metamórficos. Somente em áreas com afloramentos, que geralmente são poucos em número, o mapa de unidades radiométricas fornece indícios diretos da natureza química do embasamento. As unidades radiométricas não representam os verdadeiros limites das unidades litológicas devido à inevitável dispersão dos radioelementos no solo. Conforme variam alguns fatores, tais como umidade, porosidade e drenagem, o deslocamento dos limites das unidades radiométricas, a partir dos limites da rocha fonte, pode ser superior a dois, ou três quilômetros.

O canal de contagem total, por incluir no seu espectro as radiações correspondentes ao Urânio, ao Tório e ao Potássio, apresenta valores maiores de intensidade radioativa e, conseqüentemente, uma maior precisão estatística. Por isso, deve ser preferencialmente

utilizado na separação das unidades radiométricas, pois fornece uma correlação melhor com as unidades litológicas do que os canais individuais desse radioelemento. Por outro lado, os canais de U, Th e K são indicadores mais confiáveis para a identificação do tipo de rocha do que o canal de contagem total e as razões U/Th, U/K e Th/K. Por exemplo, considerando a razão Th/U e sendo o Urânio muito mais solúvel que o Tório, a razão tende a aumentar com a idade da rocha e com a sua exposição ao intemperismo. O Potássio também é lixiviado, embora a relação com a idade da rocha não seja muito clara. A razão entre os radioelementos, portanto, tende a ser mais variável nas rochas mais antigas.

As coberturas de solos têm geralmente um forte efeito supressivo na intensidade da radiação dos raios gama. Portanto, ainda que a concentração relativa dos radioelementos nos solos permaneça praticamente a mesma que nas rochas fontes, ocorrerá uma diminuição da radioatividade, devido à cobertura do solo. Como resultado disso, as rochas podem apresentar uma radioatividade menor e dar a impressão de serem mais máficas do que na realidade o são.

Assim, as rochas intrusivas inalteradas, em geral, não têm uma natureza radioativa especial; todas têm aproximadamente razões Th/U, Th/k e U/K similares. A intensidade da radioatividade, entretanto, aumenta com a quantidade de sílica na rocha.

A cristalização tardia e os fluidos pós-alojamento, que geralmente formam veios pegmatíticos, concentram freqüentemente quantidades anormais de Urânio e de Tório, que são associados a minerais acessórios como alanita, monazita e zircão. Pegmatitos e zonas de alteração pegmatítica, portanto, são normalmente caracterizadas por alta radioatividade e por razões entre os radioelementos diferentes das rochas ígneas normais.

A maioria dos radioelementos é destruída durante o ciclo sedimentar, devido à diferente solubilidade desses elementos. O Urânio é facilmente oxidado para formar o íon solúvel, enquanto o Tório é carregado em suspensão melhor do que em solução, de modo que é facilmente fixado em argilas e em resistatos secundários. Por isso, a razão Th/U varia muito nos sedimentos, o que depende, em larga escala, das condições de deposição (ambiente oxidante, ou redutor).

A assinatura radioativa, ou seja, a sua definição característica tem, portanto, mais significado quando aplicada para rochas sedimentares do que para rochas ígneas.

Os dados sobre teores de Urânio, Tório e Potássio nas rochas metamórficas ainda são poucos para se fazer qualquer inferência sobre o comportamento desses radioelementos

durante o metamorfismo. O Urânio e o Potássio são considerados altamente envolvidos nas atividades metassomáticas, enquanto o Tório não. Porém, os dados existentes não permitem tecer quaisquer hipóteses conclusivas. As evidências indicam que o metamorfismo de baixo grau não altera muito a concentração dos três radioelementos. Assim, espera-se que a concentração nas rochas metamórficas seja similar àquela das rochas originais, sejam sedimentares, ou ígneas. Sob condições de metamorfismo de alto grau, considera-se geralmente que as rochas metamórficas apresentam uma concentração menor de Urânio e de Tório devido ao movimento das fases ricas em sílica; algumas evidências dessa hipótese foram observadas no fácies granulito (Heier & Andens, 1965; Lambert & Heier, 1968). Entretanto, provas definitivas de mudanças na radioatividade devido ao metamorfismo ainda não foram publicadas.

Sob o prisma da exploração mineral e da metalogenia, os mapas de razões dos radioelementos têm maior significado do que os mapas de concentração absoluta (canais do U, Th e K). Embora os mapas do radioelementos individuais sejam mais efetivos na distinção de tipos de rochas e dos *trends* estruturais, eles não são mais indicados para encontrar concentrações localizadas dos materiais. Os depósitos representam concentrações anômalas de um determinado elemento na crosta terrestre e o processo que levou a isso envolve a concentração preferencial. Casos típicos, são os depósitos econômicos de Urânio, que é concentrado preferencialmente em relação ao Tório.

3.3- GEOPROCESSAMENTO E INTEGRAÇÃO DE DADOS APLICADOS À DETERMINAÇÃO DA FAVORABILIDADE MINERAL PARA DEPÓSITOS AURÍFEROS

3.3.1- CONCEITUAÇÃO BÁSICA

O termo *Geoprocessamento* denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica. Essa tecnologia influencia de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional, entre outras.

As ferramentas computacionais para Geoprocessamento, chamadas de *Sistemas de Informação Geográfica (SIG)*, ou Geographic Information Systems (GIS), como também são conhecidos, permitem realizar análises complexas, ao integrarem dados de diversas fontes e ao criarem em bancos de dados georreferenciados. Além disso, também tornam possível automatizar a produção de documentos cartográficos.

Câmara *et al.* (1996), citam que devido à sua ampla gama de aplicações, há diferentes formas de se caracterizar **SIG's** (Burrough. 1986, Aronoff. 1989, Cowen 1990, Maguire *et al.* 1993, Smith *et al.* 1987). Cada tipo de definição prioriza um aspecto distinto. O enfoque de *banco de dados* define **SIG** como um SGBD não convencional, geográfico, que garante o gerenciamento de dados geográficos. A abordagem *toolbox* considera **SIG** como sendo um conjunto de ferramentas e algoritmos para manipulação de dados geográficos, tal como a produção de mapas. O enfoque orientado a processos utiliza o fato de que **SIG's** são coleções de subsistemas integrados, onde dados espaciais passam por uma seqüência de processos de conversão, coleta, armazenamento e manipulação. Finalmente, diferentes definições priorizam a aplicação, caracterizando o sistema segundo o tipo de dado manuseado, ou a utilização, tais como sistemas espaciais para apoio à tomada de decisões ou sistemas para análise de dados geográficos.

As definições de **SIG's** repetem, cada uma à sua maneira, a multiplicidade de usos e visões possíveis desta tecnologia e apontam para uma perspectiva interdisciplinar de sua utilização.

A partir destes conceitos, é possível indicar duas importantes características de **SIG's**. Primeiro, tais sistemas possibilitam a integração, numa única base de dados, de informações geográficas provenientes de fontes diversas tais como dados cartográficos, dados de censo e

cadastro urbano e rural, imagens de satélite e modelos numéricos de terreno. Segundo, **SIG's** oferecem mecanismos para recuperar, manipular e visualizar estes dados, por meio de algoritmos de manipulação e análise.

A modelagem cartográfica é uma forma de utilização dos **SIG**, que envolve o uso de modelos, ou de representações que são expressos na forma de combinação de mapas. Esses modelos estão estruturados no encadeamento de regras de transformação espacial de dados geográficos mapeados. Por isso, a modelagem cartográfica utiliza, de maneira ampla, as funções de processamento espacial disponíveis em sistemas de informação geográfica.

Para Tomlim (1990), um modelo cartográfico adaptado a um **SIG** pode ser entendido como um conjunto de mapas temáticos que caracteriza um determinado setor da superfície terrestre.

Esse conjunto de mapas está organizado em camadas (*layers*) de informações associadas à área de estudo. Cada layer tem a função de individualizar um atributo locacional da superfície, ou da sub-superfície analisada, como por exemplo: geologia, formações vegetais, solos, declividades, altimetria, ocorrências minerais, lineamentos estruturais, entre outros. Esses *layers* são denominados de informações explícitas (Tomlim,1990). Por outro lado, um modelo cartográfico pode conter informações implícitas, que são obtidas por meio de análises lógicas de coincidência espacial, de vizinhança, de distância, de regressão, entre outras disponíveis em **SIG**.

Diferentes termos têm sido empregados como sinônimos de layers, entre eles: tema, *overlay*, *camada*, etc. Um local no espaço constitui o somatório vertical de layers que, em realidade, constituem em um todo indivisível; por razões de praticidade analítica, esse todo é segmentado em diversos planos de informação (PI). Cada layer, quando integrado aos demais, formará a base de dados espaciais sobre a qual atuam as funções de processamento espacial de um **SIG**.

Se um local pode ser modelado por meio de um empilhamento de layers, cada ponto (ou *pixel*) desse modelo cartográfico é uma unidade elementar do espaço que representa a mesma posição geográfica em todos os mapas temáticos. É como se fossem sobrepostos, um a um, os mapas da área estudada e, em um *pixel*, fosse colocado um alfinete na posição vertical que possibilitasse a retirada de uma pilha de informações referentes àquele *pixel*. Dessa forma, se estaria realizando uma leitura vertical n-dimensional (cada mapa sendo uma

dimensão) de um ponto do espaço. Esse ponto está definido geometricamente por um endereço matricial, baseado no número da linha e no número da coluna correspondente.

- Estrutura de um SIG

Um **SIG** é composto por **um módulo de entrada dados**, os quais podem ser oriundos de mapas em papel, fotografias aéreas, imagens de satélites e dados digitais de outros **SIG**'s ou outras fontes institucionais, por **um módulo gerenciador de dados**, que fornece facilidades para armazenar e atualizar os dados, **um módulo de análise de dados**, que permite interpretar e analisar, quantitativamente e qualitativamente, a informação que foi coletada visando extrair conhecimento dos dados coletados, e **um módulo de saída de dados**, que possibilita apresentar os dados de diversas formas, tais como mapas, tabelas, gráficos, imagens e fotografias.

Modelos de Dados Espaciais

Pode-se considerar os **SIG**'s baseados em dois modelos principais: o modelo vetorial e o modelo *raster*. O modelo vetorial, derivado da cartografia, representa o mundo real como um conjunto de linhas e pontos interconectados, os quais representam a localização e/ou os limites das entidades espaciais (pontos, linhas, aéreas, superfície e rede). O modelo *raster*, por sua vez, derivado da tecnologia dos computadores, aplica uma estrutura de grade com células de dimensões variáveis sobre o terreno, representando, então, uma entidade espacial pela sua presença ou ausência dentro de uma célula específica da grade. A **Figura 13** ilustra estas duas visões do mundo real.

Raster X Vetor

O *raster* é um bom modelo para representar variáveis contínuas e processamento de imagens. Vetorial é melhor utilizado para representar pontos, linhas, polígonos e símbolos.

Os modelos *raster* e vetor podem ser diferenciados na maneira de representar o espaço e pelo tipo de objeto espacial que utilizam. Enquanto o *raster* emprega a área ou enumeração volumétrica, o vetor usa limites ou superfícies para representar áreas ou volumes.

Outro conceito importante é resolução espacial de *raster*, que constitui o tamanho que um *pixel* representa no mundo real. Quanto maior a resolução, maior espaço para armazenamento, por isso, modelos *raster* são representados por estruturas de dados que conservam o espaço de armazenamento por métodos de compressão. O *raster* é utilizado para

resolver questões de vizinhança, aplicar filtros, operações entre mapas e modelagem espacial contínua.

Para cada um dos modelos específicos, existem diversos métodos de estruturar os dados para que possam ser manipulados eficientemente pelo computador. Estes métodos são denominados Estruturas de Dados Espaciais. A escolha da estrutura de dados ótima para cada um dos modelos, *raster* ou vetorial, depende da natureza dos dados e de como eles serão usados. Alguns SIG's utilizam ambas as estruturas, com diversas estruturas de dados alternativas para o mesmo dado. Essas diferentes estruturas são usadas em diferentes tarefas dentro do SIG, dependendo de qual seja a mais eficiente e adequada.

Estruturas Raster

Na sua forma mais simples, a estrutura de dados *raster* consiste numa grade regular de células quadradas ou retangulares. A localização de cada célula ou *pixel* é definida pelos números de sua linha e coluna. O valor atribuído à célula indica o valor do atributo que ela representa. Utilizando-se a forma de célula quadrada, pode-se utilizar a representação matricial, cujas operações são bastantes conhecidas em termos de algoritmos na maioria das linguagens de computação. Assim, os primeiros SIGs eram todos baseados na estrutura *raster*. Como o tamanho do arquivo está relacionado à área de cobertura, ele aumenta com o quadrado da resolução (lado da célula). Por este motivo, os arquivos *raster*, tendem a ser muito grandes.

Estruturas vetoriais

A estrutura vetorial pode ser subdividida em: "modelo espaguete" e "modelo topológico".

No modelo topológico os limites dos polígonos são definidos com tabelas de atributos. O polígono da direita e da esquerda do arco é capaz de fazer "*overlay*" e operações de modelagem. No modelo espaguete o limite entre dois polígonos é digitalizado duas vezes e, portanto, se ocorrer erro de digitalização, existirá um erro na linha entre os dois polígonos adjacentes.

Segundo a "*Ajuda On Line*" do aplicativo **SPRING**, a escolha entre a representação matricial e a vetorial para um mapa depende do objetivo em vista. Para a produção de cartas e em operações onde se requer maior precisão, a representação vetorial é mais adequada. As operações de álgebra de mapas são mais facilmente realizadas no formato matricial. No

entanto, para um mesmo grau de precisão, o espaço de armazenamento requerido por uma representação matricial é substancialmente maior. Isto é ilustrado na figura abaixo.

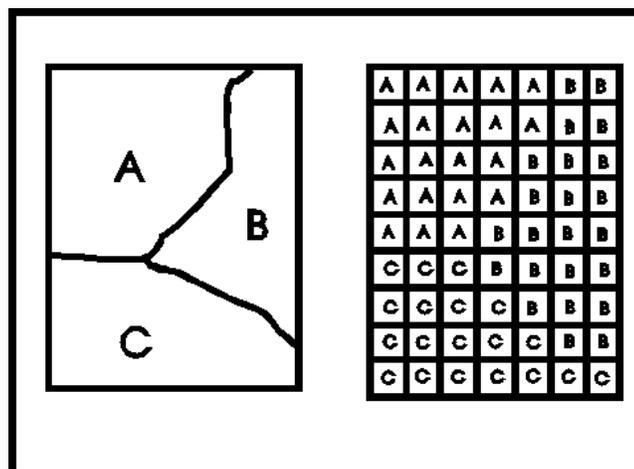


Figura 13. Esboço esquemático da forma de armazenamento da informação nos padrões *raster* e vetorial.

A **Tabela IX** exibe uma comparação entre vantagens e desvantagens de armazenamento matricial e vetorial para mapas temáticos, considerando vários aspectos: relacionamentos espaciais, análise, armazenamento.

Tabela IX. Comparação entre formatos para mapas temáticos

(Fonte: “Ajuda On Line” do aplicativo SPRING).

Aspecto	Formato Vetorial	Formato Varredura
Relações espaciais entre objetos	Relacionamentos topológicos entre objetos disponíveis	Relacionamentos espaciais devem ser inferidos
Ligação com banco de dados	Facilita associar atributos a elementos gráficos	Associa atributos apenas a classes do mapa
Análise, Simulação e Modelagem	Representação indireta de fenômenos contínuos Álgebra de mapas é limitada	Representa melhor fenômenos com variação contínua no espaço Simulação e modelagem mais fáceis
Escalas de trabalho	Adequado tanto a grandes quanto a pequenas escalas	Mais adequado para pequenas escalas (1:25.000 e menores)
Algoritmos	Problemas com erros geométricos	Processamento mais rápido e eficiente.
Armazenamento	Por coordenadas (mais eficiente)	Por matrizes

3.3.2- MANIPULAÇÃO DE DADOS VETORIAIS NO SPRING

Este tópico apresenta algumas definições sobre a estrutura vetorial e os procedimentos para elaboração e edição de mapas temáticos, cadastrais, redes e MNT no **SPRING** (cf. “Ajuda On Line do **SPRING**”).

A edição de dados vetoriais no **SPRING** é executada sobre mapas temáticos, cadastrais, redes e de modelos numérico de terreno (MNT).

Os objetos geográficos possuem propriedades intrínsecas que precisam ser conhecidas para representá-los, tais como, localização (posição de um objeto por meio de suas coordenadas geográficas), dimensionamento (permite descrever os objetos por meio das entidades pontos, linhas ou áreas), continuidade, tamanho, vizinhança, forma e escala.

Os mapas no **SPRING** podem ter suas representações nos formato **vetorial** e/ou **raster**, dependendo da categoria do dado em questão. Entretanto, nessa página trataremos apenas da edição de dados vetoriais.

Um mapa temático, cadastral, de rede ou numérico utiliza-se dos elementos como **pontos, linhas e áreas** (ou polígonos), para definir as classes temáticas, objetos geográficos e amostras (isolinhas e pontos cotados) numéricas. A seguir são discriminados esses elementos:

Elementos de estrutura vetorial

A edição de dados vetoriais no **SPRING** é executada sobre mapas **temáticos, cadastrais, redes e de MNT** (modelo numérico de terreno). A representação vetorial destes mapas é a maneira mais precisa de representar um objeto geográfico.

Em termos de implementação computacional, o armazenamento e recuperação deste formato é mais complexo que no caso da representação matricial. No **SPRING** foi implementada a estrutura de "v-r-trees" para facilitar o acesso aos dados.

Ponto

Um **ponto** é definido como toda entidade geográfica que pode ser localizada por um par de coordenadas (**x, y**).

Utilizam-se pontos para representar a localização de um **fenômeno geográfico** em um lugar, ou para representar uma feição do mapa que é muito pequena para ser mostrada como uma área ou linha. Exemplos: localização de uma cidade, uma pista de pouso, o pico de uma montanha ou um ponto cotado (quando este, além das coordenadas XY, tem um atributo Z, que pode ser a cota altimétrica ou outro parâmetro qualquer). A **Figura 14** abaixo exhibe um ponto P definido por um sistema cartesiano.

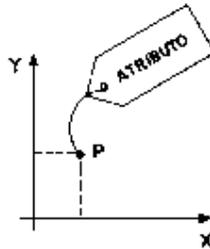


Figura 14. Caracterização de um ponto P definido por um sistema cartesiano

Linha

A **linha** é uma entidade definida por no mínimo **dois pares de coordenadas (x, y)**, ou seja, dois pontos.

Utilizam-se linhas para representar feições do mapa que são muito estreitas para serem mostradas como área ou que, teoricamente, não têm espessura. Exemplos: um rio, uma rodovia, linha de costa de um continente, uma linha de contorno ou um limite administrativo.

Quando uma linha passa a ter um atributo Z qualquer, além das coordenadas XY dos pontos que a constitui, é chamada de *isolinha*. Ao longo de uma *isolinha* todos os pontos têm o mesmo valor de Z. Uma *isolinha* é definida apenas em P.I.'s da categoria numérica.

Áreas

Áreas são definidas como uma **série de coordenadas (x, y)**, formando segmentos de linhas que fecham uma área.

Freqüentemente, em sistemas de informação geográfica, representam-se elementos de área por polígonos. Exemplos: extensão geográfica de uma cidade, um lago, uma área desmatada.

Representações Vetoriais no SPRING

No **SPRING** estes três elementos acima são traduzidos em feições geográficas que são representadas por: **Nós, Pontos, Arcos, Isolinhas, Ilhas, Linhas poligonais e Polígonos.**

Arco

Um **arco** é um conjunto de pontos interligados por segmentos de reta que começa e termina em um **nó**.

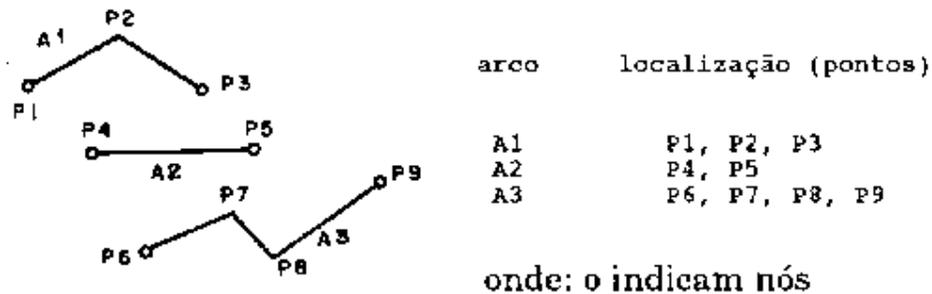


Figura 15. Exemplos de arcos.

Arcos são usados para modelar as fronteiras dos **polígonos**. Desta forma, são utilizados para delimitar objetos que definem áreas.

Um **nó** é um tipo especial de ponto que tem por objetivo definir o **ponto de intercessão de dois ou mais arcos**.

Pontos

Pontos são entidades utilizadas para representar feições que são muito pequenas (Pontos 2D) para serem representadas por polígonos ou para representar uma amostra numérica (ponto 3D). Um ponto 2D normalmente está associado a um símbolo em mapas temáticos, cadastrais e redes, que está definido no banco, além de seus atributos não espaciais. Por exemplo: uma igreja ou um poste de luz que não podem ser representados na atual escala de trabalho.

Ilha

Ilhas são um tipo especial de polígonos delimitados por um **único arco**, apenas um nó define o ponto inicial e final do polígono, uma vez que não há polígonos adjacentes.

Linha Poligonal

Linha poligonal ou **polígono aberto** é formado por um conjunto de pontos interligados por segmentos de reta que **começam e terminam em um nó**. A diferença entre uma poligonal e um arco está no fato de uma linha poligonal nunca definir uma área (polígono). É utilizada para modelar feições lineares como por exemplo linhas que representam fraturas geológicas, rios, estradas, e outros elementos geográficos que possam ser observados como feições lineares na escala de trabalho adotada.

A **linha poligonal** é utilizada quando o ponto de intercessão das linhas não deve ser modelado, e então não há necessidade de introduzir um nó.

Isolinha

Uma **Isolinha** pode ser entendida como uma linha poligonal onde um **único valor de Z é atribuído**.

Topologia

Pontos, linhas e polígonos são representações vetoriais utilizadas normalmente para descrever objetos geográficos em mapas. O relacionamento espacial entre estas entidades, como por exemplo proximidade e vizinhança, é obtido por meio da análise e observação dos mapas, pelo intérprete.

Entretanto, uma vez que os objetos do mapa tenham sido digitalizados e sejam representados por pontos, linhas e polígonos no computador, esta relação espacial deverá ser definida explicitamente para que se possa proceder às operações de análise espacial dos dados.

Em mapas digitais, os relacionamentos espaciais são descritos por meio da **topologia** definida como a parte da matemática que estuda as propriedades geométricas que não variam mediante uma deformação. Formas e coordenadas dos objetos são menos importantes que os elementos do modelo topológico como conectividade, contiguidade, continência etc.

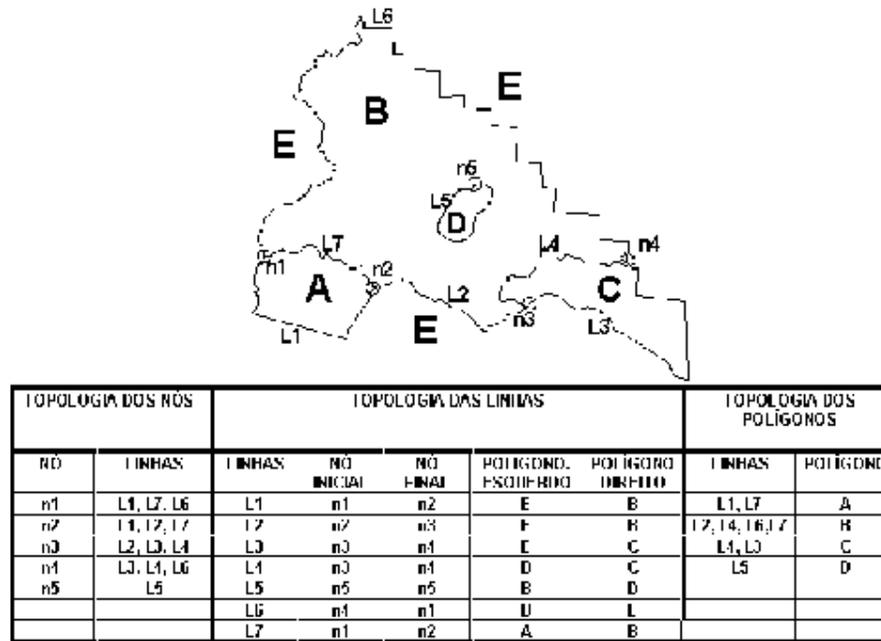


Figura 16. Forma simplificada de um exemplo de estrutura topológica

que é gerada para um mapa temático.

Desta forma, definir a topologia significa explicitar os relacionamentos espaciais entre os objetos por meio de um processo matemático.

No **SPRING**, definir topologia para um dado de modelo temático ou cadastral, resulta na criação dos **polígonos**, ou seja, o sistema armazenará as informações das linhas, nós e identificadores que compõem cada polígono, assim como as linhas que são compartilhadas por diferentes polígonos (as vizinhanças e circunscrição entre eles, inclusive).

No **SPRING** a **topologia**, no que se refere aos nós e vizinhança de arcos, pode ser definida automaticamente durante a digitalização. Ao digitalizar uma linha, um nó será inserido automaticamente, ao interceptar outra linha ou ao terminar a própria. Porém, a criação dos polígonos deve ser realizada para que toda a topologia possa ser definida para o Plano de Informação.

Uma vez definida a topologia, cada polígono poderá então ser associado à uma **classe temática**, ou a um objeto do mapa cadastral, ou ainda, a um segmento de rede, desde que definidos no Banco de Dados.

3.3.3- COMPONENTES DA ANÁLISE ESPACIAL

O processo de análise de dados espaciais inclui métodos de visualização, métodos exploratórios para investigar algum padrão nos dados e métodos que auxiliem a escolha de um modelo estatístico e a estimação dos parâmetros desse modelo (Carvalho, 1997 *apud* Câmara 2000). As ferramentas de Análise Espacial podem ser divididas em *seleção, manipulação, análise exploratória e confirmação (modelagem)* (Anselin, 1999 *apud* Câmara 2000).

Por *seleção*, entende-se o processo de navegação em um banco de dados geográfico, realizando consultas e apresentando mapas cloropléticos simples. O processo de *manipulação* envolve todas as funções que criam dados espaciais. Aqui está o poder da Álgebra de Mapas em Geoprocessamento, com uma capacidade extremamente ampla de produzir novos mapas.

As técnicas de *análise exploratória* permitem descrever e visualizar distribuições espaciais, descobrir padrões de associação espacial (aglomerados espaciais), sugerir a existência de instabilidades espaciais (não-estacionaridade) e identificar observações atípicas (*outliers*). As técnicas de análise exploratória aplicadas a dados espaciais são essenciais ao desenvolvimento das etapas da modelagem estatística espacial, em geral muito sensível ao tipo de distribuição, à presença de valores extremos e à ausência de estacionariedade (Carvalho, 1997 *apud* Câmara 2000).

As técnicas de *análise confirmatória* envolvem o conjunto de modelos de estimação e procedimentos de validação, necessários para implementar análises multi-variadas com componentes espaciais.

Um conceito chave na Análise Espacial é a dependência espacial, e sua formulação matemática, a autocorrelação espacial. Estas noções partem do que Tobler chama de "a primeira lei da geografia": "*todas as coisas são parecidas, mas coisas mais próximas se parecem mais que coisas mais distantes*".

O fenômeno de autocorrelação espacial pode ser entendido como uma situação em que observações próximas no espaço possuem valores similares (correlação de atributos). O desafio da Análise Espacial é medir objetivamente este relacionamento.

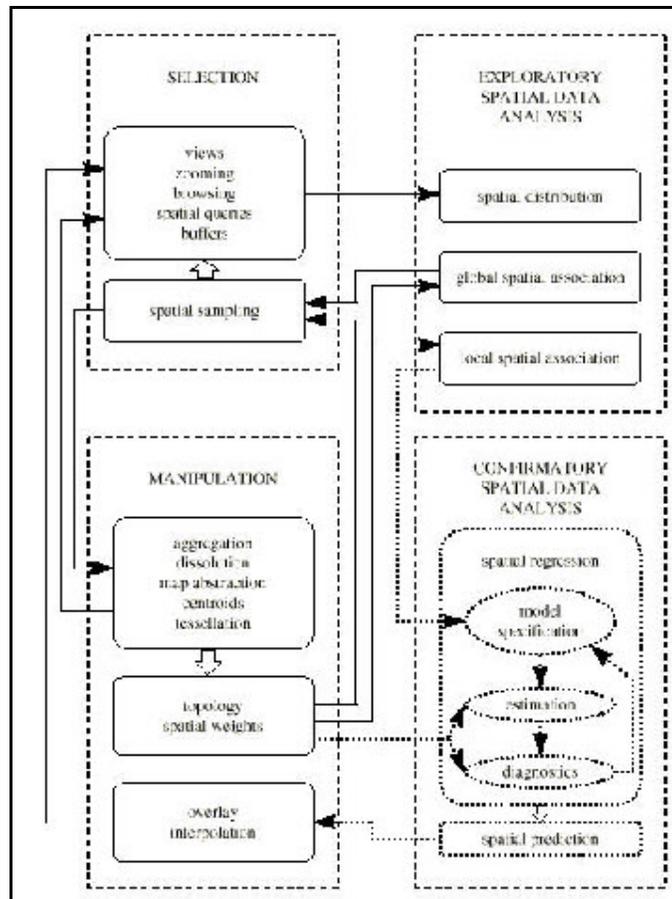


Figura 17. Componentes da Análise Espacial

(FONTE: Anselin (1999, apud Câmara *et al.* 2000).

3.3.4- MODELAGEM CARTOGRÁFICA

O processo de Modelagem é uma característica inerente ao design de sistemas gráficos e de imagens, e quatro universos (níveis de abstração) envolvidos podem ser distinguidos (Gomes e Velho, 1995 *apud* Câmara 2000):

- O universo do *mundo real*, que inclui as entidades da realidade que serão modeladas no sistema.
- O universo *matemático (conceitual)*, que inclui uma definição matemática (formal) das entidades que serão incluídas no modelo.

- O universo de **representação**, onde as diversas entidades formais são mapeadas para as representações gráficas utilizadas no modelo.
- O universo de **implementação**, aonde as estruturas de dados e algoritmos para as operações nos dados geográficos são escolhidos, baseados em considerações como desempenho, capacidade do equipamento e tamanho da massa de dados. É neste nível que acontece a codificação.

A visão geral do processo de modelagem está ilustrada na **Figura 18**.

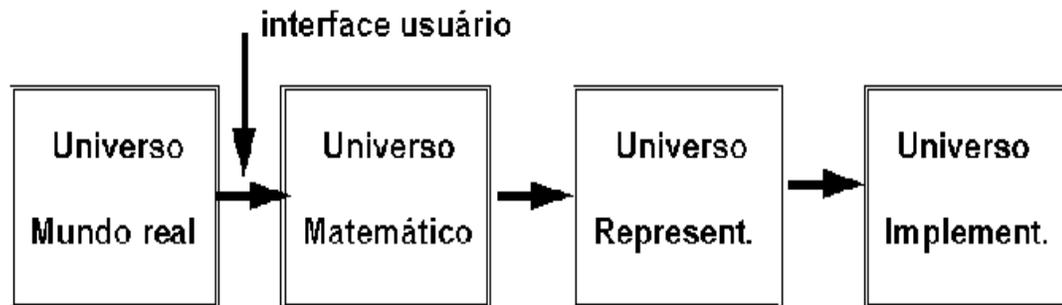


Figura 18. Visão geral do processo de modelagem.

3.3.4.1- FASES DO PROCESSO DE MODELAGEM

Nota-se que a visão de modelagem apresentada, não se limita a sistemas de Geoprocessamento. Sua aplicação ao problema de Geoprocessamento é particularmente apropriada pois permite equacionar os problemas da área, como pode ser constatado:

- no universo do *mundo real*, encontramos os tipos de dados a serem representados (mapas de solos, cadastro urbano e rural, dados geofísicos e topográficos).
- no *universo conceitual*, pode-se distinguir entre as grandes classes formais de dados geográficos (campos e objetos) e separar estas classes nos tipos de dados geográficos utilizados comumente (mapas temáticos e cadastrais, MDE, imagens de satélite).
- no *universo de representação*, as entidades formais são associadas a representações geométricas, que podem variar conforme a escala e a projeção cartográfica escolhida. Aqui se distingue entre as representações matricial (“*raster*”) e vetorial, que podem ainda ser especializadas.
- o *universo de implementação* é onde as estruturas de dados são escolhidas e o sistema é codificado.

Com base nesta visão, as dicotomias tradicionais de Geoprocessamento (campos-objetos e matricial-vetorial) podem ser resolvidas, mostrando-se que elas encontram-se em *níveis distintos de abstração*. Esta análise também indica que a interface de usuário de um **SIG** deveria refletir, tanto quanto possível, o universo conceitual e esconder detalhes dos universos de representação e implementação. No nível conceitual, o usuário lida com conceitos mais próximos de sua realidade, e minimiza a complexidade envolvida nos diferentes tipos de representação gráfica.

O Universo do Mundo Real

O modelo do **SPRING** não está limitado a uma particular área de aplicação de Geoprocessamento e que possa incorporar aplicações tão diversas como Estudos Ambientais, Agricultura, Geologia e Redes. Para tanto, as diversas áreas de aplicação de Geoprocessamento, em função dos tipos de dados utilizados foram mapeadas, como ilustrado na **Tabela X** a seguir.

Tabela X. Aplicações Típicas de Geoprocessamento.

Aplicações	Escalas típicas	Tipos de dados	Represent. Gráficas	Operações
Floresta	1:10.000 a 1:500.000	Cadastro rural (talhões)	Matricial, vetorial	Classif. imagens, consulta espacial
Agricult.	1:25.000 a 1:250.000	Dados temáticos, S. Remoto, MNT	Matricial, vetorial, grades, TIN	Análise espacial, declividade
Geologia	1:100.000 a 1:2,500,000	MNT, dados temáticos, imagens	Matricial, grades	Transf. IHS, visualiz. 3D
Redes	1:1.000 a 1:10.000	Redes lineares (topologia)	Vetorial	Consulta espacial, cálculos dedicados
Estudos Urbanos	1:1.000 a 1:25.000	Redes, cadastro urbano	Vetorial	Consulta espacial

Classes do Universo Conceitual

Inicialmente, será importante estabelecer a base geométrica na qual as classes do modelo são definidas. A partir de uma região contínua da superfície terrestre, podemos definir nosso conceito de *região geográfica* (ou reticulado geográfico).

“Definimos com uma região geográfica R como uma superfície qualquer pertencente ao espaço geográfico, que pode ser representada num plano ou reticulado, dependente de uma projeção cartográfica apropriada.”

A *região geográfica R* serve de suporte geométrico para localizações geográficas, pois toda uma localização geográfica será representada por um ponto de **R**. O uso de um conjunto discreto de pontos facilita uma definição formal das classes de dados geográficas e das operações associadas. A definição de região geográfica proposta não restringe a escolha da representação geométrica (matricial ou vetorial) associada aos objetos geográficos.

As classes básicas do modelo, definidas a seguir, são:

Geo-Campos

“Um geo-campo representa a distribuição espacial de uma variável que possui valores em todos os pontos pertencentes a uma região geográfica.”

Os geo-campos podem ser especializados em:

- **TEMÁTICO:** Dada uma região geográfica R, um *geo-campo temático* associa a cada ponto do espaço um *tema* de um mapa (p.ex. um mapa de pedologia é caracterizado pelo conjunto {latosolo roxo, litosolo, cambisolo, ...}). A **Figura 19** abaixo mostra um exemplo de um geo-campo temático (mapa de solos);

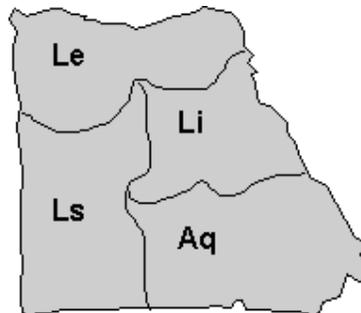


Figura 19. Exemplo de um geo-campo temático (mapa de solos).

- **NUMÉRICO:** Dada uma região geográfica, um *geo-campo numérico* associa, a cada ponto do espaço, um valor real (p. ex. um mapa de campo magnético);

Plano de Informação

Como os conceitos de geo-campos e mapas de geo-objetos estão ambos ligados a localização numa região geográfica do espaço, é muito útil definir a noção de **plano de informação**.

Um plano de informação é o suporte para a representação geográfica de diferentes tipos de dados geográficos. Trata-se da generalização dos conceitos de mapas de geo-objetos e de geo-campos. Uma instância da classe PLANO DE INFORMAÇÃO representa, para uma dada região geográfica, o lugar geométrico de um conjunto de dados geográficos (um geo-campo ou um mapa de geo-objetos).

A modelagem cartográfica em um **SIG** é operacionalizada segundo a definição de uma seqüência lógica de funções de análise espacial. Essas funções podem ser aplicadas separadamente em cada mapa, ou envolver dois ou mais mapas, e são implementadas a partir de um planejamento de estratégias. As estratégias baseiam-se na associação entre comandos do **SIG**, que exigirão do pesquisador um conhecimento intermediário do sistema utilizado e alguns fundamentos sobre análise espacial de dados geográficos.

As operações espaciais utilizam os *layers* com dados brutos que deverão estar geocodificados segundo uma projeção cartográfica escolhida em função da escala de trabalho. De maneira geral, as seqüências operacionais do modelo cartográfico geram layers intermediários, que poderão ser eliminados ou recombinaados para se obter os resultados desejados.

A modelagem cartográfica é também uma maneira de se utilizar o **SIG** para uma análise geográfica, por meio de processos lógicos e aritméticos. Nesse aspecto, o usuário deverá ser capaz de expressar seu pensamento em um ambiente **SIG**, utilizando uma linguagem muito similar à empregada diariamente. Além disso, o usuário, quando estiver desenvolvendo seu modelo, não deve sentar-se diante do monitor e manipular a base de dados por meio de tentativa e erro, utilizando indiscriminadamente os comandos do **SIG**. Deverá, sim, estudar a questão de pesquisa e propor um plano de ações baseado em fluxo de atividades no qual os passos estejam claramente definidos. Deverá, então, transformar esses passos em comandos do **SIG**.

Todo projeto de modelagem cartográfica deve fundamentar-se em um modelo de decisão, pois resulta em uma escolha de locais baseada em fatores mapeáveis que coincidem espacialmente. A teoria da decisão tem sido empregada por planejadores para resolver problemas sobre escolhas de alternativas associadas a um, ou a vários objetivos. Em um contexto de **SIG**, a teoria da decisão tem sido aplicada principalmente como análise multicriterial no nível espacial, com o objetivo de avaliar susceptibilidades.

Em razão da relativa divergência terminológica existente nesse campo de pesquisa, foram adotados os conceitos utilizados por Eastman (1995), adaptados à estrutura de **SIG**. Nesse contexto, os principais conceitos que necessitam ser entendidos são: decisão, critérios, fatores, restrições e regra de decisão.

Segundo Eastman (1995), **decisão** é a escolha entre alternativas e **critério** é a base quantitativa utilizada para a tomada de decisão. Para esse Eastman (1995), os critérios podem ser divididos em dois tipos: 1) fatores; 2) restrições; fator é um critério que pode influir positiva, ou negativamente na escolha de uma determinada alternativa e deve ser medido e representado de forma contínua. Já uma restrição pode ser representada como um mapa contendo categorias restritoras das alternativas, que excluem áreas e limitam espacialmente a distribuição das possibilidades de escolha.

Os mapas de limitações, segundo Eastman (1995), estruturam-se, em **SIG**, no formato “booleano”, ou seja, contendo áreas excluídas codificadas com um zero e áreas não excluídas codificadas com 1 (um). A regra de decisão será, então, o procedimento segundo o qual os critérios serão combinados na modelagem cartográfica para gerar um mapa de suscetibilidade.

Na avaliação multicriterial, as regras de decisão baseiam-se nos operadores *booleanos* AND (e, intercessão) e OR (ou, união), que são associados por meio de uma combinação linear ponderada. Nesse tipo de combinação, os fatores são associados por meio da aplicação de um peso a cada um deles, seguido de um somatório até se atingir o mapa de suscetibilidade.

3.3.5- FUNÇÕES DE MODELAGEM CARTOGRÁFICA

As funções de modelagem cartográfica são aquelas que buscam integrar os diversos mapas de distribuição espacial dos fatores diagnósticos, de forma a estimar o potencial mineral de uma região, ou outro elemento qualquer de interesse. O processo de combinação deve necessariamente envolver a ponderação das evidências, para alcançar uma quantificação

critérioria da favorabilidade para a ocorrência de depósitos minerais. Tomlin (1995) classifica essas funções em três grupos:

- aquelas que calculam novos valores para um *pixel* de um mapa como função de valores explícitos associados aquele mesmo *pixel* são denominadas de funções locais;
- as que calculam novos valores para um *pixel* como função de sua vizinhança, denominadas funções de vizinhança; e
- aquelas que calculam novos valores para um *pixel* como função de valores explícitos associados a zonas, ou a regiões que incluem esse *pixel*, denominadas funções zonais.

- Funções locais

As funções locais estão divididas em dois tipos: 1) aquelas que geram novos valores como função de valores existentes no mesmo mapa (funções locais simples); 2) aquelas que atuam em razão de valores existentes em dois, ou mais mapas (funções locais múltiplas). O funcionamento de uma função local simples pode ser exemplificado a partir de um mapa de formações florestais que contém quatro categorias qualitativas: campo cerrado, cerrado, campo limpo e campo rupestre. Nesse caso, cada polígono que define uma categoria está codificado com um número inteiro entre 1 e 4. Para produzir um mapa contendo apenas a categoria campos, o mapa original deve ser reclassificado, de forma que as demais categorias sejam igualadas a zero; ou seja, altera-se os valores de um mapa a partir de dados do mesmo mapa. No caso das funções múltiplas, haverão dois, ou mais *layers* envolvidos. Suponha que na base de dados estejam os mapas de altitudes e de formações geológica e necessita-se definir qual a relação entre todas as categorias de formações geológicas e todas as categorias hipsométricas; para isso, deve ser efetuada uma operação de coincidência espacial entre as categorias qualitativas de dois mapas. O resultado pode ser visualizado da forma gráfica (histogramas), imagem (mapa de sobreposição), ou tabular (tabulação cruzada entre as categorias do mapa: altitudes nas colunas e formações geológicas nas linhas, expressas em percentuais).

- Funções vizinhas

Essas funções estão divididas em dois tipos: 1) aquelas que geram novos valores para um *pixel* a partir de valores existentes em *pixels* situados na vizinhança imediata de um *pixel*-alvo (funções de vizinhança imediata) e 2) as que geram novos valores a partir de valores

existentes em *pixels* situados na vizinhança extensiva, ou distante (funções de vizinhança extensiva).

Entre os exemplos de vizinhança imediata, estão os mapas de declividades e os de exposição de vertentes. Nesse caso, o cálculo dos novos valores do mapa a ser gerado é feito a partir dos valores de atitude dos *pixels* mais próximos ao *pixel* – alvo. Para a aplicação deste tipo de função, é necessário gerar um modelo digital de elevação (MDE), cujos valores de altitude dos *pixels* são utilizados como fonte de dados para se produzir o mapa de declividades.

As funções do tipo vizinhança extensiva são aplicadas principalmente para a produção de mapas de corredores, ou faixas concêntricas, que tomam como alvo um atributo espacial, como estradas, rios, habitações, etc. Quando o atributo é linear, o mapa resultante é do tipo corredor e quando é do tipo pontual, o resultado é dado em faixas concêntricas. Em ambos os casos, os valores dos mapas gerados estarão em faixas correspondentes ao número de *pixels* afastados do alvo.

- Funções zonais

As funções zonais podem ser diferenciadas em duas modalidades: 1) aquelas que incluem operações que caracterizam regiões inteiras (funções zonais inteiras) e 2) as que caracterizam regiões parciais (funções zonais parciais). As funções zonais inteiras são utilizadas quando se quer analisar dois ou mais mapas, e um deles está no formato de áreas, com valores associados a uma cubagem. Nesse caso, zonas inteiras serão mapeadas por meio da atribuição de dados, contidos na planilha, ao mapa poligonal que define blocos de lavra, por exemplo.

Uma das inúmeras formas de se utilizar as funções zonais parciais é quando se tem um mapa de categorias qualitativas no formato poligonal (por exemplo, um mapa de unidades administrativas, ou um mapa pedológico) e um mapa no formato de superfície estatística contínua, ou modelo digital de elevação. Suponha que se queira responder à indagação: qual a distribuição dos valores de altitude nas áreas correspondentes à categoria granitos? O resultado será uma síntese estatística referente à população de *pixels* circunscrita à intercessão entre a unidade campos e a superfície de altitudes não categorizada. Essa análise dar-se-á somente em um setor do MDE delimitado pelo polígono que define a categoria qualitativa granitos.

As possibilidades de se utilizar as funções de processamento espacial existentes em **SIG** são inúmeras. A sua manipulação correta dependerá da formulação igualmente correta das questões pelo pesquisador e da clareza dos objetivos a serem alcançados.

3.3.6- TÉCNICAS DE INFERÊNCIA GEOGRÁFICA

3.3.6.1- INTRODUÇÃO

Na maioria dos projetos desenvolvidos em **SIG** a principal proposta é a combinação de dados espaciais, com o objetivo de descrever e analisar interações, para fazer previsões por meio de modelos e fornecer apoio às decisões tomadas por especialistas. A combinação desses dados multi-fonte permitirá uma redução na ambigüidade das interpretações que normalmente são obtidas por meio da análise individual dos dados (Pendock e Nedeljkovic, 1996).

A seguir, será apresentada uma visão geral das diferentes técnicas de análise geográfica, no contexto de produção de novos mapas a partir de dados já existentes. Ao longo do texto, serão apresentados vários métodos de inferência espacial para a integração dos dados (evidências). Os métodos geram como resultado planos de informação (geo-campos) em diferentes formatos. O método *Booleano* gera dados em formato Temático sendo a potencialidade expressa espacialmente em forma de polígonos que representam classes (favorável e não favorável). Os outros métodos, Média Ponderada, *Fuzzy* e *Bayesiano* geram dados em formato Numérico sendo a potencialidade expressa de forma numérica.

3.3.6.2- MODELOS TEÓRICOS E EMPIRICOS

Do ponto de vista conceitual, os modelos de processos ambientais no contexto de **SIG**, podem ser descrito como a combinação de um conjunto de dados de entrada por meio de uma função, que produz um novo dado de saída.

$$\text{Saída} = f(\text{dados de entrada})$$

A função, f , pode tomar muitas formas diferentes, mas os relacionamentos expressados por esta função são baseados no entendimento teórico de princípios físicos e químicos, ou são empíricos, baseados em dados observados, ou ainda na combinação destes dois tipos.

Na categoria de modelos teóricos, equações de movimento derivadas de princípios mecânicos, são utilizadas em modelos de circulação atmosférica, modelos de fluxo oceânicos

e modelos de fluxo de águas subterrâneas. Em um modelo de circulação de águas de um lago, por exemplo, utiliza-se como entrada de dados o mapa de profundidade do lago, o mapa de declividade do fundo do lago, os valores do fluxo de entrada e de saída, etc. e tem-se como resultado, os campos de velocidades.

Modelos baseados em relacionamentos estatísticos ou relacionamentos heurísticos, são exemplos de modelos empíricos. Nestes modelos, os relacionamentos espaciais entre as variáveis de estudo, são estimados por critérios estatísticos, a partir de amostras obtidas em uma região experimental, ou a partir de um conjunto de classes, onde os limiares destas classes são definidos por especialistas. Modelos utilizados para a predição de potencial mineral são exemplo de modelos empíricos. Os modelos empíricos podem ser divididos em dois tipos: modelos baseados em conhecimento que são implementados a partir do conhecimento de especialistas e modelos baseados em dados, que são implementados a partir de um conjunto de dados observados.

3.3.6.3- MODELOS BASEADOS EM CONHECIMENTO

No caso de modelos baseados em conhecimento, dispõe-se de um conjunto de informações de entrada e uma metodologia que deve permitir a descoberta de localizações ou zonas que satisfaçam de um conjunto de critérios. Se o critério é definido segundo regras determinísticas, o modelo consiste em aplicar operadores de lógica booleana em um conjunto de dados (mapas) de entrada. O dado de saída é um mapa binário, onde cada ponto no mapa, satisfaz ou não as condições do modelo (Bonham-Carter, 1994 *apud* Câmara 2000). Harris (1989) descreve esse modelo como técnica de co-ocorrência aditiva na qual os mapas binários são simplesmente sobrepostos, e as áreas de maior potencialidade à ocorrência mineral são aquelas que apresentam o maior número de interseção de evidências favoráveis definidas pelo modelo.

De um modo alternativo, cada localização pode ser avaliada de acordo com critérios ponderados, que resultam em um patamar (grau) e em uma escala de potencialidade (Bonham-Carter, 1994); essa técnica também é definida como co-ocorrência ponderada (Harris, 1989). Este método tem como vantagem a habilidade de avaliar graus de potencialidade, em vez de apenas avaliar ocorrência ou não da potencialidade.

A potencialidade é calculada pela ponderação e pela combinação de evidências de fontes múltiplas. A avaliação do peso a ser atribuído a um mapa depende da análise da importância da evidência em relação a uma ocorrência conhecida ou do

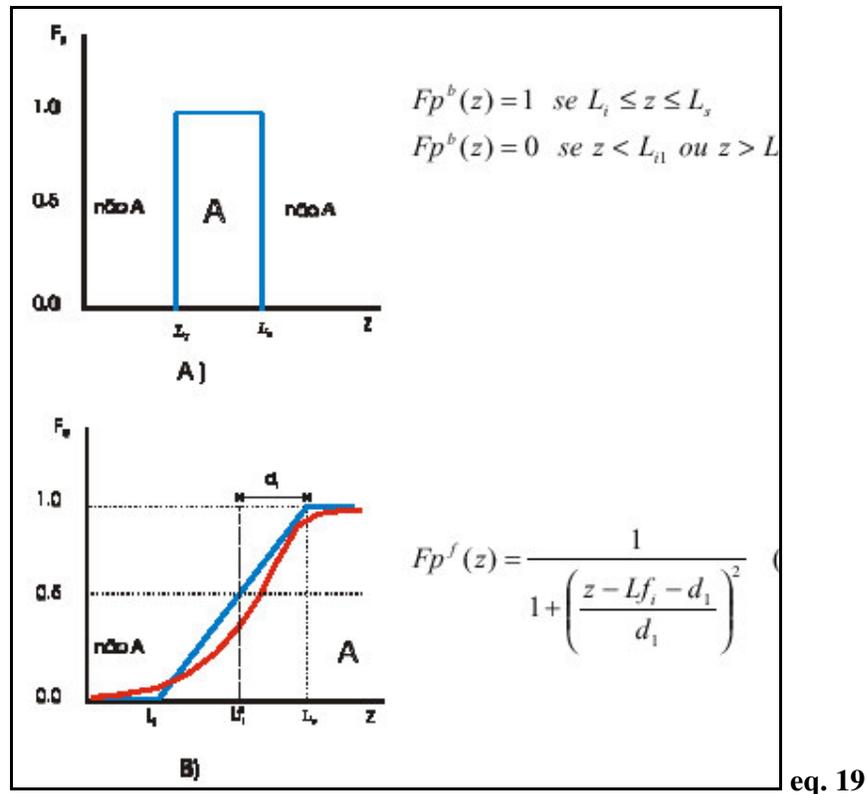
juízo subjetivo de especialistas.

3.3.6.3.1- CONJUNTOS BOOLEANOS VERSUS CONJUNTOS NEBULOSOS

A introdução dos conjuntos *Fuzzy* para manipulação de conceitos inexatos foi primeiramente introduzida por Zadeh em 1965. O conjunto *Fuzzy* é uma metodologia de caracterização de classes, que por varias razões não tem ou não pode definir limites rígidos (bordas) entre as classes. Essas classes definidas de maneira inexata são chamadas de conjunto *Fuzzy*. A utilização de um conjunto *Fuzzy* é indicada sempre que for preciso trabalhar com ambigüidade, abstração e ambivalência em modelos matemáticos ou conceituais de fenômenos empíricos (Burrough & McDonnell, 1998).

Para caracterizar formalmente um conjunto, pode-se recorrer ao conceito de *função de pertinência* (F_p). Onde função de pertinência, é uma função que dado o valor de um atributo z , determina se o elemento avaliado pertence ou não a um determinado conjunto em análise.

A **Figura 20** mostra exemplos de funções de pertinência que podem ser usadas para classificação de qualquer tipo de entidade. No eixo x , esta a variação do atributo (z) dos elementos, usado como parâmetro para classificação. No eixo y , esta a faixa de valores possíveis para a função de pertinência (F_p). Na **Figura 20a**, se o valor do atributo z estiver entre limiar inferior (L_i) e o limiar superior (L_s), a função retorna 1, caso contrario retorna zero, conforme mostra a equação **eq. 19**. Para a **Figura 20b**, a função retorna um valor entre 0 e 1, se o valor do atributo z estiver entre limiar inferior (L_i) e o limiar superior (L_s). Na **Figura 20b**, a região entre (L_i) e (L_s). é denominada de *zona de transição*.



Figuras 20a e 20b. Exemplo de função de pertinência para conjunto (Câmara *et al.* 2000 b).

Um conjunto *booleano*, possui uma função de pertinência similar ao da **Figura 20a**, ou seja, seus limiares são definidos de forma nítida. Por exemplo, se um especialista em qualidade de água determinar que os limiares entre água *não poluída*, *moderadamente poluída* e *poluída* são: $L_{bi} = 200$ unidades e $L_{bs} = 500$ unidades, então a função de pertinência (z) F_p^b , a equação **eq. 19** define a classe de água *moderadamente poluída*.

Um conjunto que tem uma função de pertinência como a da **Figura 20b**, é denominado de *conjunto fuzzy*. Um conjunto deste tipo, tem como característica a indefinição de fronteiras ou limiares entre as classes. Por exemplo, o conjunto de classes de solo, de cobertura vegetal ou a altura de pessoas, são exemplos de conjuntos que podem ser denominados de *conjuntos fuzzy*. A **Figura 21** ilustra a diferença de fronteiras entre conjuntos booleano e conjuntos fuzzy.

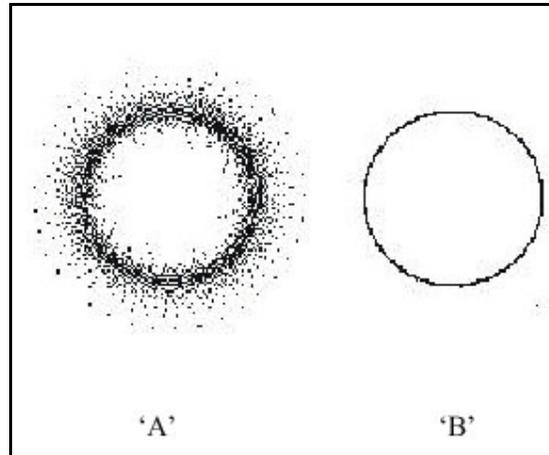


Figura 21. Diagrama de Venn ilustrando a diferença de fronteira entre um conjunto fuzzy (A) e um conjunto booleano (B) FONTE: Burrough (1998),

apud Câmara et al. 2000b.

Em termos matemáticos, um conjunto fuzzy pode ser definido como: Dado o universo de amostras ou objetos 'Z', um conjunto fuzzy 'A' neste universo 'Z' é um conjunto de pares ordenados:

$$A = (z, FP_A^F(O_z)) \text{ para todo } O_z \in Z. \quad \text{eq. 20}$$

Onde $FP_A^F(O_z)$ é a função de pertinência fuzzy do conjunto 'A'. O valor da função $FP_A^F(O_z)$ pode ser entendido como o grau de compatibilidade do objeto O_z com o conjunto 'A', sendo que o objeto O_z pertence ao universo 'Z' ($O_z \in Z$). A função $FP_A^F(O_z)$

Segundo Burrough e McDonnell (1998), há diferentes tipos de funções de associação fuzzy, sendo as mais comuns as funções linear e senoidal. A função linear é dada por um par de linhas inclinadas que se encontram no ponto central de A, com MF=1; e nas bordas MF assume valor 0,5. A inclinação das linhas define a largura da região de transição fuzzy.

A função senoidal (**Figura 22**) é definida por:

$$MF_A^F(z) = \frac{1}{(1 + a(z-c)^2)} \text{ para } 0 \leq z \leq P \quad \text{eq. 21}$$

Onde o parâmetro a determina a forma da função e c , o valor de z no ponto central de A.

Em alguns casos é apropriado estender o ponto central de A para um intervalo de valores, substituindo o parâmetro a por uma região de transição de largura d_1 e d_2 , para definir a forma da função de associação *fuzzy*, transição e, as bordas b_1 e b_2 recebem MF=0,4, onde o parâmetro a determina a forma da função e c , o valor de z no ponto central de A.

Em alguns casos é apropriado estender o ponto central de A para um intervalo de valores, substituindo o parâmetro a por uma região de transição de largura d_1 e d_2 , para definir a forma da função de associação *fuzzy*.

Neste caso, a MF F A(z) é definida como (eq. 21):

$$\begin{aligned} \text{MF}^F_A(z) &= \frac{1}{1 + \left(\frac{z - b_1 - d_1}{d_1} \right)^2} \text{ se } z < b_1 + d_1 \\ \text{MF}^F_A(z) &= 1 \text{ se } b_1 + d_1 \leq z \leq b_2 - d_2 \\ \text{MF}^F_A(z) &= \frac{1}{1 + \left(\frac{z - b_2 + d_2}{d_2} \right)^2} \text{ se } z > b_2 - d_2 \end{aligned}$$

Os valores de d_1 e d_2 correspondem à metade da largura da região de transição e, as bordas b_1 e b_2 recebem MF=0,4.

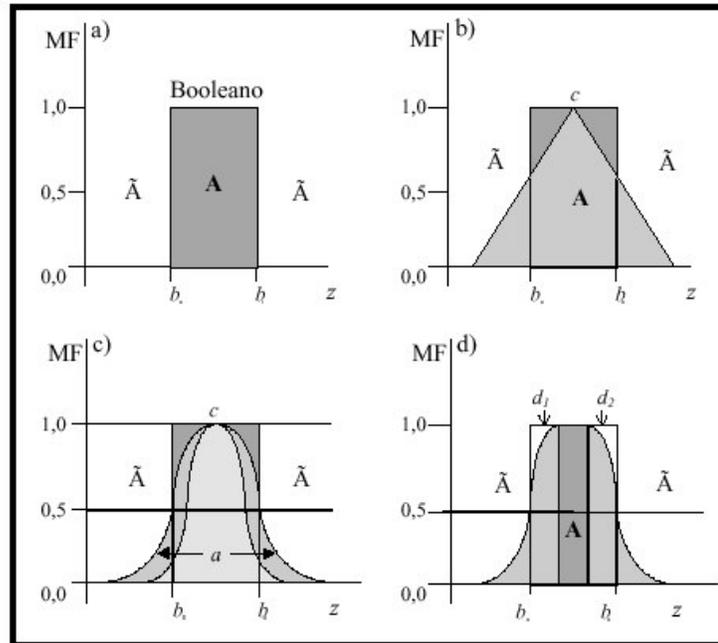


Figura 22. Funções de associação Booleana e *Fuzzy*.

FONTE: Burrough e McDonnell (1998), *apud* Câmara *et al.* 2000b.

A escolha dos valores $d1$ e $d2$ que determinam a largura da região de transição pode ser baseada na precisão de medida do atributo do fenômeno, ou do objeto em questão, ou ainda no conhecimento intuitivo subjetivo.

3.3.6.3.2- INFERÊNCIA BOOLEANA

3.3.6.3.2.1- CONCEITOS BÁSICOS

A lógica booleana foi desenvolvida por George Boole, um matemático inglês que provou que todo cálculo matemático é derivado de um esquema lógico elementar, constituído por apenas dois componentes, **verdadeiro** (V) e **falso** (F), ao que ele chamou de álgebra binária. Em 1924, o físico Jeremy Bernstein mostrou que a álgebra de Boole constituía num grupo com propriedades particulares de equivalência e proporcionalidade. Esta álgebra foi de importância fundamental para a computação, pois sem ela, não seria possível a implementação dos circuitos combinatórios que serão analisados a seguir.

Variável

Na lógica booleana, uma variável pode assumir apenas um de dois valores: verdadeiro ou falso; ou, colocando em termos numéricos: 0 ou 1. Logo, uma variável X pode ser $X = V$ ou $X = F$; no caso numérico: $X = 0$ ou $X = 1$.

Funções Básicas

As funções básicas da lógica booleana podem ser constituídas a partir de frases que, formando um raciocínio lógico. Por exemplo: *hoje vou ao parque se não chover e se eu estiver bem disposto*. O termo *ir ao parque* é a imagem da nossa função, composta pela função **e**, aplicado entre os termos *chover* e *bem disposto*, sendo que ao primeiro é aplicada outra função: **não**. A função **e** implica na ocorrência dos dois termos para ser verdadeira a ida ao parque, ou seja, não pode chover e tem que haver disposição. Sem um deles, a atividade não será cumprida. Então, a função **e** indica uma **conjunção**, ou seja, os dois termos devem ser verdadeiros para que tudo seja verdadeiro. Mas poderia ser diferente, a frase poderia ser: *hoje vou ao parque se não chover ou se eu estiver bem disposto*. A utilização da função **ou** tudo muda. Basta que um dos itens ocorra para que a atividade seja realizada, ou seja, se não chover, vai-se ao parque, mesmo que sem disposição; e, mesmo com chuva, mas tendo disposição, também a ida ao parque será efetivada. Portanto, a função **ou** indica uma **disjunção**, ou melhor, basta que um dos termos seja verdadeiro para que tudo o seja também.

Em resumo, há três funções básicas: uma de negação, que serve para inverter o sentido, se for verdadeiro, transforma em falso, e vice-versa; uma de conjunção, que torna verdadeiro o resultado apenas se os dois termos forem verdadeiros; e uma de disjunção, cujo resultado é verdadeiro se um dos termos o for verdadeiro. A função de **negação** é representada algebricamente com uma barra sobre a letra, como na atribuição: A variável X recebe a negação de Y. Pode-se também representar com a palavra em inglês **not**: $X = \text{not}(Y)$. Como podem ser atribuídos apenas dois valores, pode-se construir a **Tabela XI**:

Tabela XI. Atribuição de valores booleanos para as variáveis X e Y.

Y	X = not(Y)
0	1
1	0

A função de conjunção (**e**) pode ser representada por um ponto, como na multiplicação: $X = Y.Z$; ou simplesmente como o **and** em inglês: $X = Y \text{ and } Z$. A **Tabela XII** exibe a função **e**:

Tabela XII. Representação da função de conjunção booleana.

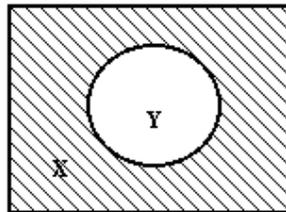
Y	Z	X = Y and Z
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

A função de disjunção (**ou**) possui como representação um sinal de soma: $X = Y + Z$; ou **or** como no inglês: $X = Y \text{ or } Z$. A **Tabela XIII** está a seguir:

Tabela XIII. Representação da função de disjunção booleana.

Y	Z	X = Y or Z
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

As tabelas apresentadas são chamadas de **tabelas-verdade**, por sua relação binária de verdadeiro-falso. Além das tabelas-verdade, pode-se representar graficamente as relações das funções booleanas. Dados dois conjuntos interseccionados, pode-se indicar a função booleana por meio da parte hachurada da figura. A função $X = \text{not}(Y)$ pode ser descrita com a **Figura 23**:

**Figura 23.** Representação gráfica da função $X = \text{not}(Y)$.

A função $X = Y \text{ and } Z$ pode ter a representação como a da interseção de conjuntos, como pode ser visualizado na **Figura 24**, a seguir:

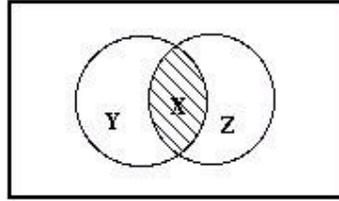


Figura 24. Representação gráfica da função $X = Y \text{ and } Z$ (intercessão).

A função $X = Y \text{ or } Z$ teria uma apresentação gráfica como a de união de conjuntos, como pode ser visualizado na **Figura 25**, a seguir:

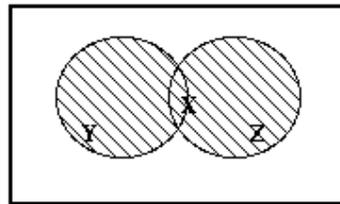


Figura 25. Representação gráfica da função $X = Y \text{ and } Z$ (união).

A lógica booleana é a mais conhecida e simples. A probabilidade para a ocorrência de um elemento é controlada por regras rígidas, que condicionam a geração de resultados discretos, não-contínuos.

3.3.6.3.2.2- APLICAÇÕES

O Modelo *Booleano* envolve combinação lógica de mapas binários por meio de operadores condicionais. Cada mapa utilizado como uma condição pode ser entendido como um plano de informação (evidência). Os vários planos de informação são combinados para dar suporte a uma hipótese ou preposição. Cada localização é então testada, para determinar se as evidências nesse ponto satisfazem ou não as regras definidas pela hipótese .

O resultado é expresso de forma binária, “0” (hipótese não satisfeita) e “1” (hipótese satisfeita), não sendo possível a condição talvez. Embora esse método seja prático, normalmente não é o mais adequado, pois o ideal é que as evidências, que apresentam

importância relativa diferente, recebam pesos de diferentes valores e não sejam tratadas igualmente como acontece.

A álgebra *booleana* utiliza os ponderadores lógicos “E”, “OU”, “Exclusivo OU (XOR)” e “NÃO” para determinar se uma hipótese satisfaz ou não uma particular condição.

Para um melhor entendimento, imagine cada atributo como um conjunto. O operador “E” retorna a interseção entre dois ou mais conjuntos, ou seja as entidades que pertencem tanto ao conjunto A e B. O operador “OU” retorna a união dos conjuntos, que são entidades que pertencem tanto ao conjunto A como ao B. O “XOR” recupera as entidades que pertencem a um conjunto e ao outro, mas não aos dois conjuntamente. E o “NÃO” é o operador da diferença identificando as entidades que pertencem a um conjunto A mas não ao B.

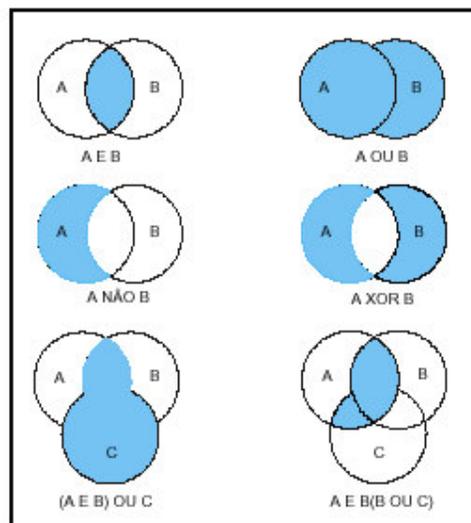


Figura 26. Diagrama de Venn mostrando os resultados da aplicação de operadores de lógica *booleana* para dois ou mais conjuntos (Burrough & McDonnell, 1998), *apud* Câmara *et al.* (2000b).

A maior vantagem da abordagem *Booleana* é sua simplicidade. A combinação lógica de mapas em **SIG** é diretamente análoga a sobreposição de “overlayers” de mapas em uma mesa de luz, método tradicionalmente utilizado por geólogos. Em casos onde limiares de corte foram estabelecidos por lei ou por códigos, combinações Booleanas são abordagens práticas e de fácil aplicação. Na prática, entretanto, normalmente não é indicado a atribuição de

importâncias iguais para cada critério a ser combinado. Evidências precisam ser ponderadas dependendo da sua importância relativa (Bonham-Carter, 1994).

3.3.6.3.3- MÉDIA PONDERADA

Dentre os métodos de análise multi-critério Eastman *et al.* (1995) citam a Média Ponderada como a técnica mais utilizada em projetos que envolvam análise espacial. Neste método, cada mapa de entrada será utilizado como uma evidência que receberá um peso diferente dependendo da importância para com a hipótese sobre consideração. Nesse caso, cada plano de informação receberá pesos diferentes, bem como as respectivas classes dos planos de informação. O resultado será um mapa com áreas que expressam um grau de importância relativa por meio dos valores numéricos de saída.

O primeiro passo para a aplicação do método é a ponderação das classes de cada plano de informação segundo pesos definidos empiricamente. Os planos de informação ponderados são então somados por meio de uma soma ponderada onde cada plano de informação recebeu pesos segundo sua importância relativa. A função matemática é expressa por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n w_{ij} * y_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \quad \text{eq. 22}$$

Onde w_{ij} é o peso da classe "i" do plano de informação "j", e y_j o peso do plano de informação "j".

O método de Média Ponderada permite uma maior flexibilidade na combinação de mapas do que o método *Booleano*. O mapa ponderado pode ser ajustado para refletir o julgamento de um especialista, segundo os pesos de importância definidos para cada critério.

A maior desvantagem deste método, entretanto, recai provavelmente no caráter linear de adição das evidências (Bonham-Carter, 1994).

3.3.6.3.4- INFERÊNCIA FUZZY

3.3.6.3.4.1- CONCEITOS BÁSICOS

O texto abaixo transcrito foi compilado de <http://www.din.uem.br/~ia/preview/fuzzy/index.htm>, página eletrônica desenvolvida por por Daniella Patricia Manchini e Gisele Lobo Pappa, como segue:

O conceito de conjunto Fuzzy foi introduzido, em 1965, por Lotfi A. Zadeh (Universidade da Califórnia, Berkeley). A ele é atribuído o reconhecimento como grande colaborador do Controle Moderno. Em meados da década de 60, Zadeh observou que os recursos tecnológicos disponíveis eram incapazes de automatizar as atividades relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química, que compreendessem situações ambíguas, não passíveis de processamento por meio da lógica computacional fundamentada na lógica booleana.

Procurando solucionar esses problemas Zadeh publicou em 1965 um artigo resumindo os conceitos dos conjuntos Fuzzy, revolucionando o assunto com a criação de sistemas Fuzzy. Em 1974, o Prof. Mamdani, do Queen Mary College, Universidade de Londres, após inúmeras tentativas frustradas em controlar uma máquina a vapor com tipos distintos de controladores, incluindo o PID, somente conseguiu fazê-lo por meio da aplicação do raciocínio Fuzzy.

Esse sucesso serviu de alavanca para muitas outras aplicações, como em 1980, no controle Fuzzy de operação de um forno de cimento. Vieram em seguida, várias outras aplicações, destacando-se, por exemplo, os controladores Fuzzy de plantas nucleares, refinarias, processos biológicos e químicos, trocador de calor, máquina diesel, tratamento de água e sistema de operação automática de trens. Estimulados pelo desenvolvimento e pelas enormes possibilidades práticas de aplicações que se apresentaram, os estudos sobre sistemas Fuzzy e controle de processos avançam rapidamente, culminando com a criação em 1984, da Sociedade Internacional de Sistemas Fuzzy, constituída, principalmente, por pesquisadores dos países mais avançados tecnologicamente. A propósito disto, e apenas a título de ilustração, mais de 30% dos artigos até hoje publicados são de origem japonesa. O desenvolvimento de técnicas de Inteligência Artificial nos últimos anos, ocupa cada vez mais posição de destaque em pesquisas na área de controle de processos industriais e, aos poucos, começam a ser implantadas em plantas industriais com enorme sucesso. Dentre as técnicas

mais comumente utilizadas, além do controle Fuzzy, pode-se destacar as redes neurais aplicadas a sistemas de controle, que estão atualmente em tamanha evidência que os japoneses as consideram como duas das mais promissoras técnicas para o século XXI.

- O que é Lógica Difusa ?

Os conjuntos Fuzzy constituem uma "ponte" no caminho de aproximar o raciocínio humano ao da lógica executada pela máquina.

Aristóteles, filósofo grego (384 - 322 a.C.), foi o fundador da ciência da lógica, e estabeleceu um conjunto de regras rígidas para que conclusões pudessem ser aceitas logicamente válidas. O emprego da lógica de Aristóteles levava a uma linha de raciocínio lógico baseado em premissas e conclusões. Como por exemplo: "Todo ser vivo é mortal" (premissa 1), a seguir é constatado "Sarah é um ser vivo" (premissa 2), como conclusão temos que "Sarah é mortal". Desde então, a lógica Ocidental, assim chamada, tem sido binária, isto é, uma declaração é falsa ou verdadeira, não podendo ser ao mesmo tempo parcialmente verdadeira e parcialmente falsa. Esta suposição e a lei da não contradição, que coloca que "U e não U" cobrem todas as possibilidades e formam a base do pensamento lógico Ocidental. A Lógica Difusa (Fuzzy Logic) viola estas suposições. O conceito de dualidade, estabelecendo que algo pode e deve coexistir com o seu oposto, faz a lógica difusa parecer natural, até mesmo inevitável. A lógica de Aristóteles trata com valores "verdade" das afirmações, classificando-as como verdadeiras ou falsas. Não obstante, muitas das experiências humanas não podem ser classificadas simplesmente como verdadeiras ou falsas, sim ou não, branco ou preto. Por exemplo, aquele homem é alto ou baixo? A taxa de risco para aquele empreendimento é grande ou pequena? Um sim ou um não como resposta a estas questões é, na maioria das vezes, incompleta. Na verdade, entre a certeza de ser e a certeza de não ser, existem infinitos graus de incerteza. Esta imperfeição intrínseca à informação representada numa linguagem natural, tem sido tratada matematicamente no passado com o uso da teoria das probabilidades. Contudo, a Lógica Difusa, com base na teoria dos Conjuntos Fuzzy, tem se mostrado mais adequada para tratar imperfeições da informação do que a teoria das probabilidades. Fuzzy, em inglês, significa incerto, duvidoso. De forma mais objetiva e preliminar, podemos definir Lógica Difusa como sendo uma ferramenta capaz de capturar informações vagas, em geral descritas em uma linguagem natural e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação pelos computadores de hoje em dia. Considere a seguinte afirmativa: Se o tempo de um investimento é longo e o sistema financeiro tem sido não muito estável, então a taxa de risco

do investimento é muito alta. Os termos "longo", "não muito estável" e "muito alta" trazem consigo informações vagas. A extração (representação) destas informações vagas se dá por meio do uso de conjuntos fuzzy. Devido a esta propriedade e a capacidade de realizar inferências, a Lógica Difusa tem encontrado grandes aplicações nas seguintes áreas:

- ✓ Sistemas Especialistas;
- ✓ Computação com Palavras;
- ✓ Raciocínio Aproximado;
- ✓ Linguagem Natural;
- ✓ Controle de Processos;
- ✓ Robótica;
- ✓ Modelamento de Sistemas Parcialmente Abertos;
- ✓ Reconhecimento de Padrões;
- ✓ Processos de Tomada de Decisão (decision making).

A Lógica Difusa ou Lógica Nebulosa, também pode ser definida, como a lógica que suporta os modos de raciocínio que são aproximados, ao invés de exatos, como estamos naturalmente acostumados a trabalhar. Ela está baseada na teoria dos conjuntos fuzzy e difere dos sistemas lógicos tradicionais em suas características e detalhes. Nesta lógica, o raciocínio exato corresponde a um caso limite do raciocínio aproximado, sendo interpretado como um processo de composição difusa. A lógica em questão foi desenvolvida por Lofti A. Zadeh da Universidade da Califórnia em Berkeley na década de 60 e combina lógica multivalorada, teoria probabilística, Inteligência Artificial e redes neurais para que possa representar o pensamento humano, ou seja, ligar a linguística e a inteligência humana, pois muitos conceitos são melhores definidos por palavras do que pela matemática. O valor verdade de uma proposição pode ser um subconjunto nebuloso de qualquer conjunto parcialmente ordenado, ao contrário dos sistemas lógicos binários (booleanos), onde o valor verdade só pode assumir 2 valores : verdadeiro (1) ou falso (0).

Características:

A lógica Fuzzy é baseada em palavras e não em números, ou seja, os valores *verdades* são expressos lingüisticamente. Por exemplo: *quente, muito frio, verdade, longe, perto, rápido, vagaroso, médio, etc.* Possui vários modificadores de predicado como por exemplo: *muito, mais ou menos, pouco, bastante, médio, etc.* Possui, também, um amplo conjunto de quantificadores, como por exemplo: *poucos, vários, em torno de, usualmente.*

Além disso, faz uso das probabilidades lingüísticas, como por exemplo: *provável, improvável*, que são interpretados como números fuzzy e manipulados pela sua aritmética.

Manuseia todos os valores entre 0 e 1, tomando estes como um limite apenas.

- Conjuntos Fuzzy

Assim como há uma forte ligação entre a lógica Booleana e o conceito de conjunto, existe também uma forte ligação entre a Lógica Fuzzy, na qual o controle fuzzy está baseado, com a teoria dos conjuntos fuzzy. A teoria dos conjuntos Fuzzy é uma generalização da teoria clássica. A extensão sugerida por Zadeh (1965) está na possibilidade de um determinado elemento poder pertencer a um conjunto com um valor chamado grau de pertinência. Assim, um elemento não simplesmente pertence ou não pertence a um conjunto, como na teoria clássica, mas poderá pertencer a um conjunto com grau de pertinência que varia no intervalo $[0,1]$, onde o valor 0 indica uma completa exclusão, o valor 1 representa completa pertinência e os valores deste intervalo representam graus intermediários de pertinência do objeto com relação ao conjunto. A função que define os graus de pertinência dos elementos é chamada função de pertinência e é uma generalização da função característica da teoria clássica, uma vez que associa para todo elemento do universo de discurso um valor do intervalo $[0,1]$ ao invés do conjunto de apenas dois elementos $\{0,1\}$. Este conceito parece ser bastante natural e facilmente percebido na lista de conjuntos abaixo:

- conjunto dos números naturais (c)
- conjunto dos caracteres ASCII (c)
- conjuntos dos números naturais muito maiores do que dez (f)
- conjunto dos homens altos (f)

Existe, claramente, uma diferença fundamental entre os conjuntos marcados com "c" e os conjuntos marcados com "f". Por exemplo, apresentado um caracter podemos afirmar sem nenhuma discussão ou dúvida se esse caracter pertence ou não pertence ao conjunto dos caracteres ASCII. Esta questão não é tão simples quando se considera, por exemplo, um conjunto de homens altos. Uma pessoa que tenha 1;74 metros de altura, seria considerada como pertencente a esse conjunto? E a de 1;75 ? Observa-se claramente, que não existe uma fronteira bem definida que separe os elementos do conjunto dos homens altos dos elementos do conjunto dos homens não altos.

Definição: Um conjunto fuzzy A definido no universo de discurso U é caracterizado por uma função de pertinência μ_A , a qual mapeia os elementos de U para o intervalo $[0, 1]$.

$\mu_A:U \Rightarrow [0, 1]$ **eq. 22**

Desta forma, a função de pertinência associa com cada elemento x pertencente a U um número real $\mu_A(x)$ no intervalo $[0, 1]$, que representa o grau de possibilidade de que o elemento x venha a pertencer ao conjunto A , isto é, o quanto é possível para o elemento x pertencer ao conjunto A .

Um conceito relacionado com conjuntos fuzzy é o de variável lingüística. Entende-se por variável um identificador que pode assumir um dentre vários valores. Deste modo, uma variável lingüística pode assumir um valor lingüístico dentre vários outros em um conjunto de termos lingüísticos.

Formalmente, uma variável lingüística é caracterizada pela quintupla $\{X, T(X), U, G, M\}$, onde X é o nome do conjunto de termos, U o universo de discurso, G uma gramática para gerar os termos $T(X)$, e M o significado dos termos lingüísticos, representado por meio de conjuntos fuzzy.

Variáveis lingüísticas podem também conter modificadores (também lingüísticos) que alteram seu valor. Exemplos de modificadores válidos são: *muito, pouco, não muito, mais ou menos*. Existem também conectivos que podem ser aplicados à estas variáveis, "e" e "ou". Assim, um valor válido para a variável lingüística *altura* seria *não muito alto* e *não muito baixo*. Os modificadores lingüísticos podem ser definidos matematicamente, como no exemplo dos conjuntos, *baixo* e *muito baixo*, onde o modificador *muito* é caracterizado por elevar cada ponto da função de pertinência à segunda potência. Os conectivos *and* (*e*) e *or* (*ou*) são equivalentes à operações de *união* e *intercessão* de conjuntos e podem dar origem a

conjuntos complexamente definidos, porém representados lingüisticamente de maneira simples. Com possibilidade de pertinência parcial dos elementos, a teoria de Zadeh (1965) possui um espaço de aplicabilidade muito maior do que a teoria clássica na solução de vários tipos de problemas reais. De fato, existem diversas classes de objetos no mundo físico e real que não possuem um critério bem definido de pertinência. Por exemplo, o conjunto das pessoas jovens, pessoas velhas, carros caros, doenças perigosas, entre muitos outros conjuntos que não possuem uma fronteira bem definida para podermos delimitar com certeza os elementos pertencentes daqueles que não pertencem ao conjunto. Em tais casos, fica muito difícil utilizar a teoria clássica onde se aplica o "tudo ou nada". Para ilustrar melhor, pode-se considerar o exemplo particular da classe das pessoas velhas. Como pode-se determinar com precisão quais as pessoas que pertencem à primeira classe e as que pertencem à segunda?

Com a definição dos conjuntos fuzzy, este e muitos outros problemas de mesma natureza poderão ser solucionados.

Vantagens

- Requer poucas regras, valores e decisões;
- Mais variáveis observáveis podem ser valorizadas;
- Uso de variáveis lingüísticas nos deixa mais perto do pensamento humano;
- Simplifica a solução de problemas;
- Proporciona um rápido protótipo dos sistemas;
- Simplifica a aquisição da base do conhecimento.

Um conjunto Fuzzy é definido matematicamente como segue: se Z denota um espaço de objetos, então o conjunto Fuzzy A em Z é o conjunto expresso pelo par ordenado: $A = (z, MFA(z))$ para todo $z \in Z$, onde a função $MFA(z)$ é conhecida como uma "gradação" mapeável do membro z em A . Normalmente $MFA(z)$ é um número que varia de "0" a "1", com o "1" representando o membro que se encaixa completamente ao conjunto e o "0" como o membro que não pertence ao conjunto (Burrough & McDonnell, 1998).

A graduação que mapeia os membros de um conjunto A reflete o tipo de ordenação que não é baseada em probabilidade mas sim numa aceitação de possibilidade. O valor da função $MFA(z)$ de um objeto z em A pode ser interpretado como um grau de compatibilidade de um

predicado associado ao conjunto A e ao objeto z. Ou seja, $MFA(z)$ avalia o quanto z pode ser pertencente ao conjunto A (Burrough & McDonnell, 1998).

A função Fuzzy deve assegurar que o valor do membro no centro do conjunto é "1", e que este decai de uma maneira lógica por meio da fronteira Fuzzy para as regiões fora do conjunto onde o valor deve ser "0". O ponto onde o valor do membro é igual a 0,5 é denominado de "ponto de cruzamento". A função deve ser definida de tal modo que esta condição seja respeitada. As funções mais comuns utilizadas para determinar valores de membros Fuzzy são funções lineares e quadráticas (Burrough & McDonnell, 1998).

3.3.6.3.4.2- APLICAÇÕES

Assim como em conjuntos Booleanos, dados em conjuntos fuzzy podem ser manipulados utilizando métodos lógicos para selecionar e combinar dados provenientes de vários conjuntos. Para que isto seja possível, linguagens de consulta a sistemas gerenciadores de bancos de dados, precisam ser modificadas para tratar operações da lógica continua. As operações básicas sobre subconjuntos fuzzy são similares e são uma generalização das operações básicas da lógica binária. Estas operações podem ser utilizadas de forma a se obter um dado resultante (mapa) da sobreposição de vários dados fuzzy (planos de Informação).

Os principais operadores fuzzy são: AND, OR, Soma Algébrica, Produto Algébrico, Operador Gama e Soma Convexa, os quais, serão detalhados a seguir.

a) Fuzzy AND (interseção)

Esta operação equívale ao AND Booleano. A interseção significa uma seqüência de "E" e é obtida por meio do operador MIN.

$$\mu = \text{MIN} (\mu_a, \mu_b, \mu_c, \dots), \quad \text{eq. 23}$$

onde μ_a , μ_b e μ_c são valores de pertinência dos mapas A, B e C, para uma dada localização.

b) Fuzzy OR (União)

O operador Fuzzy OR é como o OR Booleano, onde o valor de pertinência de saída é controlado pelos valores máximos dos mapas de entrada de cada localização e é dado por :

$$\mu = \text{MAX} (\mu_a, \mu_b, \mu_c, \dots) \quad \text{eq. 24}$$

c) Produto Algébrico Fuzzy

A função de pertinência combinada, neste caso, é dada por:

$$\mu = \prod \mu_i \quad \text{eq. 25}$$

onde μ_i é o valor de pertinência fuzzy para o i -ésimo mapa e $I = 1, 2, \dots, n$, mapas que deverão ser combinados. Os valores de pertinência tendem a ser pequenos quando se utiliza este operador, devido ao efeito de se multiplicar diversos números menores do que 1.

d) Soma Algébrica Fuzzy

Este operador é complementar ao produto Algébrico Fuzzy, e é representado por:

$$\mu = 1 - \prod(1-\mu_i) \quad \text{eq. 26}$$

O resultado desta operação é sempre um valor maior ou igual ao maior valor de pertinência fuzzy de entrada. O efeito desta operação é, portanto, de aumentar o valor de pertinência. Observa-se que, enquanto o produto algébrico Fuzzy é um produto algébrico, a soma algébrica Fuzzy, não é uma simples soma algébrica.

e) Operador *gama*

Este operador é definido por dois termos, um produto algébrico *Fuzzy* e uma soma algébrica *Fuzzy*. Este operador é expresso pela função:

$$\mu = (\text{soma algébrica Fuzzy})^\gamma \times (\text{produto algébrico Fuzzy})^{1-\gamma} \quad \text{eq. 27}$$

O produto algébrico *Fuzzy* é expresso pela função,

$$= \prod_{i=1}^n \mu_i, \quad \text{eq. 28}$$

onde μ_i i representa o valor do membro *Fuzzy* para um plano de informação “ i ”.

O operador executa a multiplicação dos membros dos diferentes planos de informação ($i= 1,2,3,\dots$), sendo que o valor de saída de um dado ponto é sempre menor ou igual ao valor do menor membro *Fuzzy*. Isto ocorre devido a multiplicação de valores iguais ou menores que 1. A soma algébrica *Fuzzy* é definida pela função:

$$= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)$$

eq. 29

, onde o termo μ_i representa o valor dos membros *Fuzzy* para um plano de informação “i”. O operador executa a multiplicação do termo $(1 - \mu_i)$. Na soma algébrica o resultado é sempre maior ou igual ao valor de entrada do maior membro *Fuzzy* (μ_i).

No operador gama pode-se variar a importância de cada termo (soma algébrica e produto algébrico *Fuzzy*). A importância de cada termo no operador gama é definida atribuindo-se valores entre (0,1) para o expoente “ γ ”. Esta distribuição de importância é melhor entendida por meio da **Figura 27**. No gráfico da **Figura 27** pode-se observar que quando o gama for igual a $\gamma=0$ o resultado dependerá apenas do termo “produto algébrico *Fuzzy*”, e quando $\gamma=1$ o resultado dependerá apenas do termo “soma algébrica *Fuzzy*”. Os valores

de gama entre $0 < \gamma < 0,35$ apresentaram um caráter “diminutivo”, ou seja sempre menor ou igual que o menor membro *Fuzzy* de entrada (μ_i). Na outra extremidade do gráfico valores gama entre $0,8 < \gamma < 1,0$ os μ_i não apresentaram nem um caráter “aumentativo” nem diminutivo”, os valores dos μ_i de saída, cairão sempre entre o menor e o maior valor dos μ_i de entrada (Bonham-Carter, 1994).

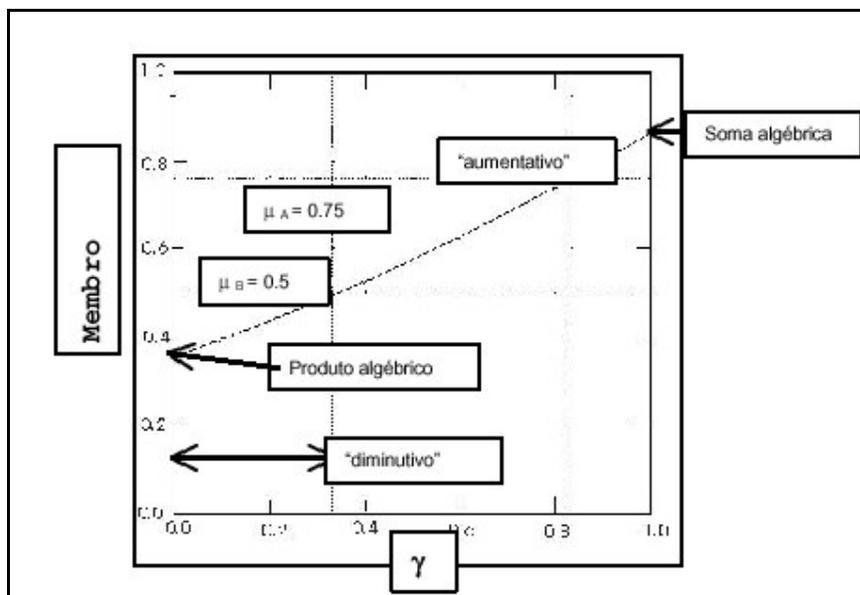


Figura 27. Gráfico de distribuição da função *Fuzzy* Gama. Câmara *et al.* 2000 b, modificado de Bonham-Carter (1994).

Maiores detalhes acerca de conceitos e aplicações de Lógica Fuzzy podem ser obtidos em Albertos (1992).

3.3.6.4- MODELOS EMPÍRICOS BASEADOS EM DADOS.

Até este ponto, foram discutidos os modelos baseados em conhecimento, onde a importância (peso) e limiares dos atributos eram definidos baseado na experiência de especialistas. Quando os dados disponíveis são suficientes para que se possa estimar a contribuição de determinados atributos no processo de modelagem, recorre-se a métodos estatísticos que são aplicados sobre estes dados, advém daí o nome de modelos empíricos baseado em dados. Apresenta-se, a seguir, a abordagem bayseana, conhecida como evidências de pesos.

3.3.6.4.1- MÉTODOS BAYESIANOS – CONCEITOS BASICOS

Na abordagem bayesiana, os principais conceitos envolvidos são a probabilidade a priori e a probabilidade a posteriori. Para explicar o conceito de probabilidade a priori e posteriori, utilizar-se-á a suposição que um indivíduo deseja estimar a probabilidade de que ocorra chuva no dia seguinte, e que para isto, ele tenha em mãos um histórico sobre chuvas na região nos últimos 20 anos, e que ele conclua, a partir do histórico, que em média chove 80 dias por ano na região. Com esta informação, seria uma estimativa razoável dizer que a *probabilidade a priori* de que vai chover no dia seguinte é 80/365. Pode-se refinar esta estimativa com outros dados históricos, como por exemplo a época do ano. Com isto tem-se a probabilidade de chuva no dia seguinte, dado que se está em uma determinada época do ano, ou seja, a probabilidade seria modificada por um fator que varia com o mês do ano. Esta nova probabilidade é denominada *probabilidade a posteriori* ou probabilidade condicional de chuva dado a época do ano. Este fator multiplicativo pode também ser determinado a partir de dados históricos.

Se isto for colocado na forma de uma expressão tem-se que:

$$P\{chuva|época\ do\ ano\} = P\{chuva\} * Fator_{época\ do\ ano}$$

eq. 30

onde:

$$\begin{array}{ll}
 P\{chuva\} & \text{probabilidade a priori} \\
 P\{chuva|\acute{e}poca\ do\ ano\} & \text{probabilidade a posteriori}
 \end{array}
 \quad \text{eq. 31}$$

Outros fatores que também afetam a possibilidade de chuva no dia seguinte, são: choveu ontem, choveu hoje. Estes fatores são evidências, que contribuem para refinar a estimativa de chuva no dia seguinte. Eles podem ser combinados conforme a expressão abaixo:

$$P\{chuva|evidencia\} = P\{chuva\} * Fator_{\acute{e}poca\ do\ ano} * Fator_{dia\ anterior} * Fator_{dia\ corrente} \quad \text{eq. 32}$$

Algumas evidências podem aumentar da probabilidade a posteriori, em relação a probabilidade a priori, neste caso o fator é maior do que 1, em outros casos este fator reduzir a probabilidade, e neste caso ser menor do que 1.

Considere-se o problema de se encontrar depósitos de um determinado mineral em uma região que possui uma área de 10.000 km², e que já tenham sido identificados nesta região 200 depósitos. Para efeito de análise, cada depósito ocupa uma unidade de área ou célula de 1 km². Se a região de estudo for particionada em unidades geográficas com área de 1 km², nosso universo de estudo terá 10.000 unidades. Usando a notação N{ } para representar a contagem de unidades, teremos: N{R} = 10.000 unidades de área e N{D} = 200 depósitos conhecidos com área de 1 km². A densidade média de depósitos conhecidos na região é N{D}/N{T}, ou 200/10000=0.02, assumindo que cada unidade de área só contém um depósito. O valor 0.02 pode ser interpretado como a probabilidade de ao se apontar aleatoriamente uma célula na região, ela ser uma célula que contém depósito mineral. Não existindo outras informações disponíveis sobre a área, esta razão N{D}/N{T} pode ser usada como a probabilidade a priori P{D} de se encontrar um depósito na região analisada. Supondo que, surja alguém de posse de um mapa de anomalia magnética para a mesma região, e que 180 dos 200 depósitos conhecidos ocorram dentro da área de anomalia. A **Figura 28** ilustra esta situação.

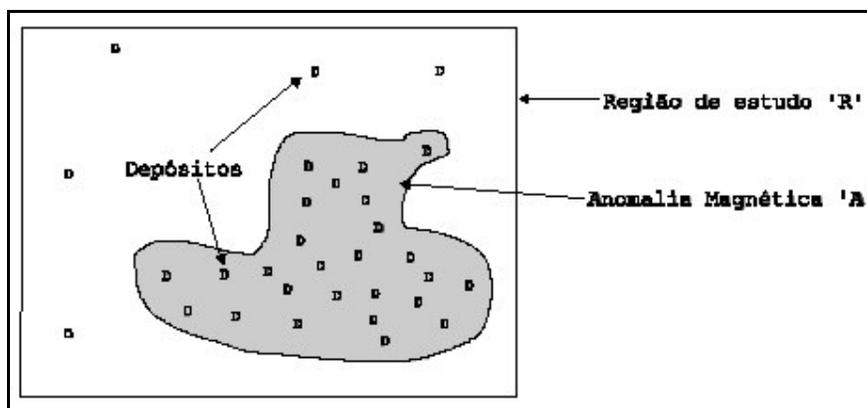


Figura 28. Região de estudo R sobreposta a um mapa binário de anomalia magnética (Câmara *et al.* 2000b).

A partir da constatação de que 180 dos 200 depósitos estão dentro da área de anomalia, pode-se afirmar que a probabilidade de depósito em uma célula que esteja dentro da área de anomalia é maior do que 0.02, e que esta probabilidade poderá ser menor do que 0.02 para uma célula fora da área de anomalia. A condição favorável para se encontrar um depósito dado a ocorrência de evidências pode ser expressada por uma probabilidade condicional:

$$P\{D/A\} = \frac{P\{D \cap A\}}{P\{A\}} \quad \text{eq. 33}$$

A partir do diagrama de Venn apresentado na **Figura 29** pode-se verificar que a probabilidade condicional é a proporção da área de anomalia 'A' ocupada por depósitos conhecidos. No nosso exemplo, existe 180 depósitos dentro da área de anomalia, e a área de anomalia ocupa 3600 km², assim sendo, a probabilidade condicional de depósitos dada a ocorrência de anomalia magnética é 180/3600=0.05, que é duas vezes e meia maior do que a probabilidade a priori. Usando-se esta evidência, a exploração de novos depósitos do mesmo tipo, será muito mais eficiente e com uma área de pesquisa reduzida de 10.000 km² para 3.600 km².

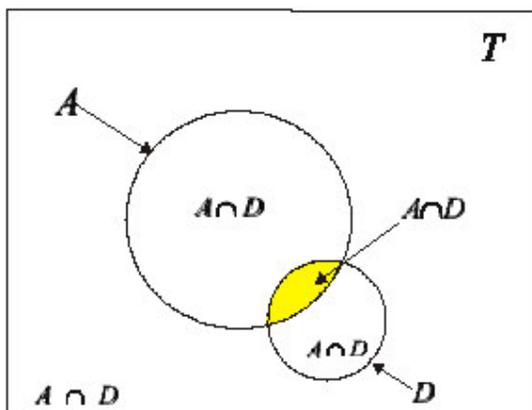


Figura 29. Diagrama de Venn mostrando a relação de sobreposição espacial entre anomalia magnética e ocorrência de depósitos mineral.

Conforme apresentado na equação 33, pode-se obter uma expressão relacionando a probabilidade a posteriori de depósitos em termos da probabilidade a priori mais um fator multiplicativo. Para isto, deve-se notar que a probabilidade condicional de uma célula estar na região de anomalia magnética 'A', dado que esta célula contém um depósito é:

$$P\{A|D\} = \frac{P\{A \cap D\}}{P\{D\}} \quad \text{eq. 34}$$

No exemplo ilustrado nas **Figuras 28 e 29**, $P\{A|D\} = 180/200=0.9$. Da teoria da probabilidade sabe-se que $P\{A|D\}$ é a mesma de $P\{D|A\}$, combinando as equações 33 e 34 obtém-se a equação 35:

$$P\{D|A\} = P\{D\} \frac{P\{A|D\}}{P\{A\}} \quad \text{eq. 35}$$

A equação 35 indica que: A probabilidade a posteriori de um depósito, dado que a célula esta na área de anomalia é igual a probabilidade a priori de depósito $P\{D\}$ multiplicado pelo fator $P\{A|D\}/P\{A\}$. O numerador deste fator é 0.9, conforme calculado no parágrafo anterior e o denominador é $3600/10000=0.36$, ou seja, o fator é $0.9/0.36=2.5$. Pode-se concluir que dado a ocorrência de anomalia magnética, a probabilidade de existir um depósito é 2.5 vezes maior do que a probabilidade a priori. Substituindo estes valores na equação 35, obtém-se: $P\{D|A\} = 0.2*2.5=0.05$, que é igual a probabilidade calculada anteriormente pela equação

33. No fator multiplicativo $P\{A|D\}/P\{A\}$, a informação sobre o numerador $P\{A|D\}$ pode ser obtida a partir de uma análise sobre os depósitos, onde se busca determinar a proporção deles que estão relacionados com um determinado indicador de evidência. O denominador, pode ser determinado a partir do conhecimento da ocorrência esperada do indicador de evidência na região analisada.

Uma expressão similar a anterior, pode ser obtida para a probabilidade a posteriori da ocorrência de um depósito, dada a ausência da anomalia.

$$P\{D|\bar{A}\} = P\{D\} \frac{P\{\bar{A}|D\}}{P\{\bar{A}\}} \quad \text{eq. 36}$$

Onde: $P\{\bar{A}\} = (10000-3600)/10000=0.64$, $P\{\bar{A}|D\}=20/200=0.1$, que resulta em um fator de multiplicação $P\{\bar{A}|D\}/P\{\bar{A}\}=0.1/0.64=0.15625$. Pode-se, assim, concluir que a probabilidade a posteriori da ocorrência de depósitos em posições onde não há anomalia magnética é 0.15625 vezes menor do que a probabilidade a priori. No exemplo em tela, $P\{D|\bar{A}\}=0.2*0.15625=0.003125$. Então, baseado em uma única fonte de evidência, pode-se reduzir a área de pesquisa de 10.000 km² para 3600 km², porque a chance de se encontrar depósito onde não há anomalia é significativamente menor(50 vezes) do que onde há anomalia.

3.3.6.4.2- MÉTODOS BAYESIANOS- APLICAÇÃO AO GEOPROCESSAMENTO

Um dos usos mais importantes da inferência bayesiana em Geoprocessamento se dá no caso de geração de mapas de prospecção mineral. Em termos prospectivos pode-se pensar na definição da probabilidade de um depósito ocorrer, condiciona pela ocorrência de uma certa evidência (exemplo: litologia favorável).

A probabilidade à *priori* seria a probabilidade do dado bruto, ou seja a probabilidade da ocorrência mineral para com a área total. A probabilidade à *posteriori* seria um refinamento do conhecimento (probabilidade à *priori*), onde por meio de uma ou mais evidências, que possuem uma relação direta com a ocorrência de um depósito mineral, calcula-se o aumento das chances de sucesso no encontro de um novo depósito. Ou seja, dado que se esta pesquisando sobre uma evidência favorável, determina-se quanto esta condição aumenta as chances da descoberta de um novo depósito mineral.

A probabilidade a *priori* para a ocorrência de um dado pode ser estimada por modelos simples de distribuição espacial aleatória ou por análises estatísticas multivariadas (Agterberg, 1989). Os dados para o cálculo da probabilidade à *posteriori* podem ser obtidos por meio da tabulação cruzada, entre o plano de informação com os depósitos e os planos de informação com as evidências. Para isso é necessário que os planos de informação das evidências sejam antes transformados em mapas binários, subdivididos em classes favorável e não favorável.

Com os mapas binários gerados, faz-se a tabulação cruzada das evidências com os depósitos (verdades de campo) obtendo-se assim uma matriz onde cada célula "mij" corresponde à interseção das classes das evidências com as ocorrências minerais. Esses valores são utilizados nas formulações para a obtenção das probabilidades à *posteriori*.

Bonham-Carter (1994) propõe ainda outro tipo de formulação, expressa pelo cálculo da chance à *priori* $O(d)$ e da chance à *posteriori* $O(d|e)$. Esta formulação permite a integração de diferentes evidências como fatores explicativos para a ocorrência mineral.

A chance à priori é expressa por:

$$O(d) = \frac{p(d)}{(1 - p(d))}, \quad \text{eq. 37}$$

Onde $p(d)$ é probabilidade a priori.

A chance a *posteriori* é obtida a partir do desenvolvimento da probabilidade à *posteriori*. O desenvolvimento está apresentado abaixo:

$$p(d|e) = \frac{p(d) * p(e|d)}{p(e)} \quad \text{eq. 38}$$

$$\frac{p(d|e) = p(d) * p(e|d)}{p(\sim d|e)p(\sim d|e) * p(e)}$$

$$\frac{O(d|e) \quad O(d) \quad 1}{P(d|e) = p(d) * p(e|d) * p(e)} \\ \frac{P(d|e) = p(d) * p(e|d) * p(e)}{p(\sim d|e)p(\sim d|e) * P(e|\sim d) * p(e)}$$

$$O(d|e) = \frac{O(d) * p(e|d)}{p(e|\sim d)} \quad (14.16) \quad \text{eq. 39}$$

A razão $p(e|d) / p(e|\sim d)$ é chamada de *razão de suficiência* (LS).

De modo semelhante obtêm-se a chance da ocorrência do minério, dado a ausência da evidência.

$$O(d|\sim e) = \frac{O(d) * p(\sim e|d)}{p(\sim e|\sim d)} \quad \text{eq. 40}$$

A razão $p(\sim e|d) / p(\sim e|\sim d)$ é chamada *razão de necessidade* (LN). As razões de suficiência (LS) ou de necessidade (LN) são computadas dependendo da ocorrência ou não da evidência para um dado ponto. As razões de suficiência e de necessidade são obtidas por meio da tabulação cruzada dos planos de informação das evidências com o plano de informação das ocorrências minerais. A condição de suficiência de uma evidência (e) é satisfeita quando a probabilidade de existência do depósito (d) é maximizada ($P(e|d) = \text{máximo}$). A condição de necessidade da evidência é satisfeita quando a probabilidade de não ocorrência do depósito é maximizada com a não existência da evidência ($P(\sim d|\sim e) = \text{máximo}$) (Rostirolla, 1997).

A extração do logaritmo das equações (1) e (2) acima permite a obtenção de:

$$\log[o(d|e)] = \log[o(d)] + \quad +$$

$$\log[o(d|\sim e)] = \log[o(d)] + \quad - \quad \text{eq. 41}$$

Bonham-Carter (1994) demonstra ainda que para um número maior de evidências, estas seriam integradas por meio da formulação que computaria a chance à priori, somada à somatória dos logaritmos das razões de suficiência e/ ou necessidade. Sendo necessário

porém que as evidências consideradas apresentem uma independência condicional (Agtenberg, 1989), *apud* Bonham-Carter (1994).

$$\log[o(d|e)] = \log[o(d)] + \sum_{i=1}^n \log \left(\frac{p_i^+}{p_i^-} \right)$$

$$\log[o(d|\sim e)] = \log[o(d)] + \sum_{i=1}^n \log \left(\frac{p_i^-}{p_i^+} \right) \quad \text{eq. 42}$$

Esta soma das razões de suficiência e razão de necessidade pode ser efetuada a partir de uma operação matemática condicional, controlada pela presença ou ausência da classe favorável do plano de informação para todos os pontos de interesse.

$$o_n = \log[o(d)] + \sum_{i=1}^n ((i = \text{favorável})? \log \left(\frac{p_i^+}{p_i^-} \right) : \log \left(\frac{p_i^-}{p_i^+} \right))$$

eq. 43

A partir do plano de informação da chance *a posteriori* gerado, é aplicada uma expressão matemática para a geração do plano de informação com os valores de probabilidade *à posteriori*.

3.3.6.5- GEOPROCESSAMENTO E SUPORTE À DECISÃO

Este tópico descreve os principais conceitos relacionados a GEOPROCESSAMENTO E SUPORTE À DECISÃO, conforme discriminado no “Ajuda On Line” do *software* **SPRING**, o qual apresenta um resumo consistente dos conteúdos relacionados ao estado da arte nesse tema.

3.3.6.5.1- INTRODUÇÃO

Este tópico descreve os principais conceitos relacionados a GEOPROCESSAMENTO E SUPORTE À DECISÃO, conforme discriminado no “Ajuda On Line” do **SPRING**.

Inicialmente, a grande questão a ser formulada é qual o grande desafio da produção de novas informações em um **SIG**? A capacidade de comparar e avaliar as diferentes possibilidades de geração de novos mapas. Como o **SIG** oferece uma grande quantidade de funções de Álgebra de Mapas, nem sempre é fácil escolher qual a forma de combinação de dados mais adequada para nossos propósitos.

Neste contexto, é muito útil dispor de ferramentas de suporte à decisão, que auxiliam na organização e no estabelecimento de um modelo racional de combinação de dados. Uma das técnicas mais úteis é o processo analítico hierárquico – *Analytical Hierarchy Process* (AHP), desenvolvida por Saaty (1992), considerada como sendo a mais promissora no contexto do processo de tomada de decisão.

3.3.6.5.2- SUPORTE À DECISÃO - CONCEITOS BÁSICOS

Decidir é escolher entre alternativas. Com base nesta visão, pode-se encarar o processo de manipulação de dados num sistema de informação geográfica como uma forma de produzir diferentes hipóteses sobre o tema de estudo.

O conceito fundamental dos vários modelos de tomada de decisão é o de *racionalidade*. De acordo com este princípio, indivíduos e organizações seguem um comportamento de escolha entre alternativas, baseado em critérios objetivos de julgamento, cujo fundamento será satisfazer um nível pré-estabelecido de aspirações.

O modelo racional de tomada de decisão preconiza quatro passos que devem ser seguidos para uma escolha apropriada:

- **Definição do problema:** formular o problema como uma necessidade de chegar a um novo estado;
- **Busca de alternativas:** estabelecer as diferentes alternativas (aqui consideradas como as diferentes soluções possíveis do problema) e determinar um critério de avaliação;
- **Avaliação de alternativas:** cada alternativa de resposta é avaliada;
- **Seleção de alternativas:** as possíveis soluções são ordenadas, selecionando-se a mais desejável ou agrupando-se as melhores para uma avaliação posterior.

3.3.6.5.3- A TÉCNICA AHP - PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO

Quando existem diferentes fatores que contribuem para a tomada de uma decisão, como fazer para determinar a contribuição relativa de cada um? Para abordar este problema, Thomas Saaty propôs, em 1978, uma técnica de escolha baseada na lógica da comparação pareada. Neste procedimento, os diferentes fatores que influenciam a tomada de decisão são comparados dois-a-dois, e um critério de importância relativa é atribuído ao relacionamento

entre estes fatores, conforme uma escala pré-definida, conforme pode ser visualizado na **Tabela XIV**.

O primeiro passo para a aplicação dessa técnica é a elaboração de uma relação de importância relativa entre as evidências. Essa relação é utilizada como dado de entrada em uma matriz de comparação pareada, onde são calculados os autovalores e autovetores da matriz. Os pesos de cada membro *Fuzzy*, equivalem então aos autovetores da matriz de comparação pareada.

A **AHP** é uma teoria com base matemática que permite organizar e avaliar a importância relativa entre critérios e medir a consistência dos julgamentos; requer a estruturação de um modelo hierárquico, o qual geralmente é composto por meta, critérios, sub-critérios e alternativas; e um processo de comparação pareada, por importância relativa, preferências ou probabilidade, entre dois critérios, com relação ao critério no nível superior. Com base na comparação, a **AHP** pondera todos os sub-critérios e critérios e calcula um valor de razão de consistência entre [0, 1], com 0 indicando a completa consistência do processo.

Tabela XIV. Escala de Valores **AHP** para Comparação Pareada.

Intensidade de importância	Definição e Explicação
1 Importância igual	- os dois fatores contribuem igualmente para o objetivo
3 Importância moderada	- um fator é ligeiramente mais importante que o outro
5 Importância essencial	- um fator é claramente mais importante que o outro

Tabela XIV. Escala de Valores **AHP** para Comparação Pareada (continuação).

Intensidade de importância	Definição e Explicação
7 Importância demonstrada	- Um fator é fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática
9 Importância extrema	- A evidência entre os fatores é da maior ordem possível.
2,4,6,8 Valores intermediários entre julgamentos	- possibilidade de compromissos adicionais

A partir do estabelecimento de critérios de comparação para cada combinação de fatores, é possível determinar um conjunto ótimo de pesos que podem ser utilizados para a combinação dos diferentes mapas.

3.3.6.5.4- SUPORTE À DECISÃO EM GEOPROCESSAMENTO

Considere-se uma das situações mais comuns em **SIG**: classificar o espaço em áreas mais ou menos adequadas para uma finalidade. Este problema ocorre em grande número de aplicações, como zoneamento, prospecção mineral, e seleção de áreas para um novo empreendimento comercial.

Tome-se, por exemplo, um estudo de preservação ambiental em áreas de encosta, para estabelecer uma política de ocupação, associada a mapas de risco de desmoronamento e impacto ambiental. Para tanto, poderiam ser utilizados como arcabouço um mapa topográfico, a carta geotécnica, e um mapa de uso e ocupação do solo (obtido a partir de foto-interpretação ou classificação digital de imagens de satélite). O procedimento tradicional de análise baseia-se no princípio de “interseção de conjuntos espaciais de mesma ordem de grandeza” (Yves Lacoste) e está baseado em condicionantes (“risco máximo ocorre em áreas cuja declividade é maior que 10%, não são áreas de preservação ambiental, e o tipo de terreno é inadequado”).

A transposição desta metodologia analógica para o ambiente de **SIG** requer o uso de operações booleanas (OU, E, NÃO) para expressar as diferentes condições. Esta técnica utiliza o suporte computacional como mera ferramenta automatizada de desenho, desconsidera todo o potencial de processamento numérico do **SIG** e gera descontinuidades inexistentes no dado original. Por exemplo, áreas com declividade igual a 9,9% serão classificadas diferentemente de regiões com inclinação de 10,1%, não importando as demais condições. Este exemplo pode-se ser considerado como um entre tantos que demonstram que mapas são dados e não desenhos. Tratar mapas como dados significa dar forma numérica para o espaço, ao associar, a cada localização, um valor que representa a grandeza em estudo;

requer ainda, na maior parte dos casos, o uso do formato matricial (“*raster*”), mais adequado a uma representação contínua do espaço.

No caso do exemplo em tela, a análise espacial em **SIG** será muito melhor realizada com uso da técnica de classificação contínua: os dados são transformados para o espaço de referência [0..1] e processados por combinação numérica, por meio de média ponderada ou inferência “fuzzy”. Ao invés de um mapa temático com limites rígidos gerados pelas operações booleanas, obteremos uma superfície de decisão, sob forma de uma grade numérica. O que representa este resultado? Uma visão contínua da variação da nova grandeza (seja ela adequação a plantio, indicador de depósitos minerais ou susceptibilidade ambiental).

No exemplo citado, o resultado será uma grade numérica que indica, para cada localização, o risco de desmoronamento, numa gradação de 0% a 100%. Qual a grande vantagem desta situação? Ela permite a construção de cenários (por exemplo, risco de 10%, 20% ou 40%), que indicam os diferentes compromissos de tomada de decisão (maior ênfase em proteção ambiental ou em minimizar o custo econômico). Obtém-se, assim, uma flexibilidade e um entendimento muito maiores sobre os problemas espaciais.

3.3.6.5.5- PROGRAMAÇÃO EM LEGAL - ÁLGEBRA DE MAPAS

Este tópico descreve a linguagem de programação **LEGAL - Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico**, conforme discriminado no “Ajuda On Line” do **SPRING** e apresenta os procedimentos necessários para a definição de operações sobre dados representados em um **projeto** de um **banco de dados SPRING**, sob a forma de expressões “algébricas” dos tipos: **Temático, Numérico, Imagem, Cadastrais, Objetos e Reais**, definidas pelo usuário por meio da linguagem **LEGAL**.

A linguagem **LEGAL** é fortemente baseada no modelo de dados **SPRING**. Os operadores atuam sobre representações de dados dos modelos **Numérico** (grades regulares), **Imagem, Temático, Cadastral e Objeto**. Os modelos Objeto e Cadastral são complementares, e essencialmente permitem a espacialização de atributos de tabelas de bancos de dados sob a forma de mapas cadastrais. A coerência entre modelo de dados e operadores é considerada na interpretação de sentenças da linguagem, garantindo um maior controle semântico na definição de modelos espaciais. Mensagens de erro de sintaxe e execução ajudam o usuário na construção de programas.

Um **programa em LEGAL** consiste de uma seqüência de **operações** descritas por **sentenças** organizadas segundo **regras gramaticais**, envolvendo **operadores, funções e dados** espaciais, categorizados segundo o modelo de dados **SPRING**, e representados em **planos de informação e mapas cadastrais** de um mesmo banco de dados / projeto **SPRING**. Planos das categorias **Numérico** e **Imagem** correspondem a representações em **formato matricial**. A maioria dos operadores sobre planos do modelo **Temático** também faz uso de representações matriciais. Mapas do modelo **Cadastral**, que representam espacialmente dados do modelo **Objeto**, fazem uso de representações no **formato vetorial**.

3.3.6.5.1-ESTRUTURA DE UM PROGRAMA EM LEGAL

Um programa em LEGAL é constituído de uma lista de sentenças que descreve um procedimento, isto é, um conjunto de ações sobre dados espaciais, que faça sentido no contexto de alguma disciplina de Sistemas de Informação Geográfica. Tais sentenças em LEGAL são estruturadas em quatro grupos:

- **Declarações** de variáveis;
- **Instanciações**: de variáveis;
- **Operações** da álgebra de mapas;
- **Comandos** de controle.

As **declarações** definem variáveis que serão associadas aos dados fornecidos ou produzidos num programa. Uma **variável** consiste de um **nome**, que é então associado a um **modelo** e uma **categoria** que irão caracterizar os planos de informação, mapas cadastrais, objetos ou tabelas de transformação que possam ser por ela representados ao longo de um programa.

Nas **instanciações**, variáveis são efetivamente associadas a planos de informação, objetos, mapas cadastrais ou tabelas de transformação. Correspondem à uma operação de **recuperação** de dados já existentes no banco de dados, ou de **criação** de um novo dado representado em algum plano de informação ou mapa cadastral.

Operações correspondem à aplicação de um ou mais operadores ou funções sobre variáveis declaradas e instanciadas previamente; são descritas por **expressões** algébricas, segundo regras gramaticais que permitem a definição recursiva de operações complexas à partir de outras mais simples, com base nas propriedades dos dados e operadores envolvido.

Cada sentença envolvendo que defina uma operação, descreve uma **operação de atribuição**, que consiste de atribuir o resultado da avaliação de uma expressão algébrica a uma variável previamente definida de uma programa.

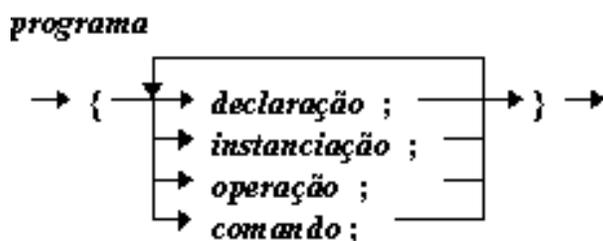
Os **Comandos** de controle permitem o controle do fluxo de processamento de um programa, não são algébricas por si só. Entretanto são fundamentais para a modelagem de situações que envolvam a execução alternativa, condicional ou repetitiva de conjuntos de operações.

Diagramas Sintáticos

Cada sentença em Legal pode envolver **símbolos** (por exemplo, '{', '(', ';', ')'); **operadores** (por exemplo, '+', '*', '&&', '||', '<', '<=', '!='); **palavras reservadas** (Novo, Temático, Nome, ResX, Atribua etc.); **nomes de variáveis** (solos, vegetação, atitudes, ind_verde etc.); **nomes de ítems** de um banco de dados **SPRING** (planos de informação, mapas cadastrais, categorias, geoclasses, atributos etc.)

A descrição de sentenças, sob a forma de diagramas sintáticos procura indicar, por meio das setas, os possíveis caminhos para compor sentenças válidas em LEGAL. Nesses diagramas as palavras em **negrito com inicial Maiúsculo**, indicam palavras reservadas de uso mandatório, da linguagem; as palavras **em minúsculos** indicam nomes de variáveis; as palavras **entre aspas** indicam nomes de ítems do banco de dados, finalmente, as palavras em **itálico** indicam itens sintáticos que serão descritos por um diagrama à parte.

O item *programa* corresponde ao seguinte diagrama sintático:



Todos os operadores envolvidos em expressões dos tipos associados a campos (**Temáticos**, **Imagens** e **Numéricos**), bem como as expressões **Booleanas**, pertencem à classe dos operadores **Locais**. Entre eles estão os **operadores aritméticos** '+', '-', '*', '/' e '^', as **funções matemáticas** (sin, cos, asin, acos, atan, log, log10, exp, sqrt etc.), as **transformações**

por tabelas (Fatie, Pondere e Reclassifique), os operadores **booleanos** (&&, ||, !, >, >=, ==, !=, <=, <) o operador **condicional** ('?'), o de **atribuição condicional** (Atribua) e outros definidos na linguagem. Tais operadores atuam sobre cada um dos elementos de representações matriciais de imagens, mapas temáticos ou grades numéricas.

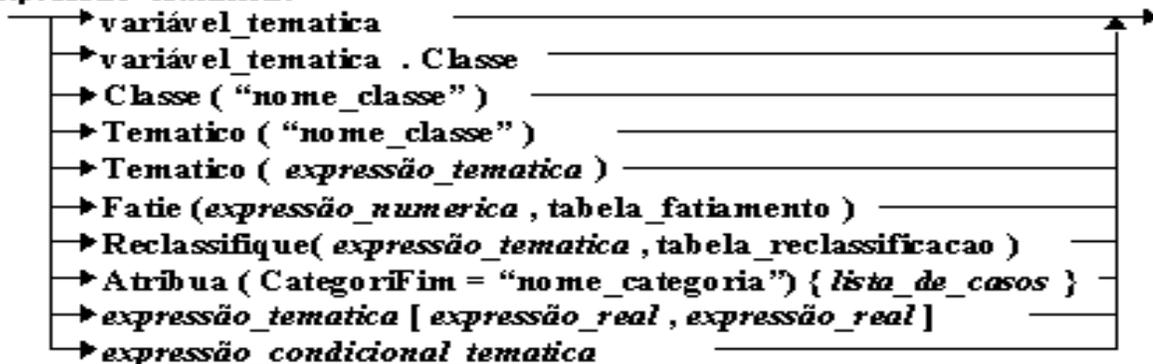
O resultado da avaliação de uma *expressão_condicional_numérica* depende da avaliação da *expressão_booleana* que aparece antes do sinal "?", e. que pode resultar em dois possíveis valores: VERDADEIRO ou FALSO. Se o resultado da expressão booleana for VERDADEIRO, a ação indicada pela *expressão_numerical* que antecede do sinal ":" fornecerá o resultado final, caso contrário a *expressão_numerica2*, que segue-se ao sinal ":", fornecerá o resultado.

Expressões Temáticas

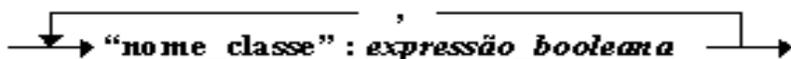
No caso das **expressões de tipo Temático**, os operadores aritméticos perdem o sentido, já que os valores encontrados nos elementos de sua representação indicam geoclasses e não valores reais. Assim as expressões possíveis são aquelas que envolvem valores de geoclasses, tais como as transformações baseadas em tabelas e atribuição condicional.

Sintaxe:

expressão temática:



lista_de_casos:



expressão_condicional_tematica:

expressão_booleana ? expressão_tematica : expressão_tematica

Qualquer palavra pode ser entendida como um **nome de geoclasse** desde que se use o operador **Temático** ou **Classe**, como mostram as regras 3 e 4. Um dado temático é normalmente entendido como qualitativo, os valores pontuais representam classes temáticas (**geoclasses**), identificadas por seus **nomes de geoclasse**, de modo que tais nomes são os próprios "valores" representados. Entretanto, é possível "maquiar" os valores inteiros de uma imagem, vistos como índices de geo-classes, para geo-classes, como indica a regra 5.

Expressões booleanas, como será visto mais adiante, ao serem avaliadas, podem resultar em dois possíveis valores: VERDADEIRO ou FALSO.

O resultado da avaliação do operador **Atribua** depende da avaliação pontual de *expressões booleanas* associadas à classes temáticas. A primeira delas que resultar em um valor VERDADEIRO irá determinar a classe a ser tomada como resultado final.

O resultado da avaliação de uma *expressão condicional temática* depende da avaliação da *expressão booleana* que aparece antes do sinal "?". Se o resultado da *expressão booleana* for VERDADEIRO, a ação indicada pela *expressão temática1* que antecede do sinal ":" fornecerá o resultado final, caso contrário a *expressão temática2*, que segue-se ao sinal ":", fornecerá o resultado.

Expressões Booleanas

Uma expressão booleana descreve o conjunto de posições que satisfazem um mesmo critério de pertinência, dado pela combinação de *expressões* dos tipos anteriores por meio de operadores de comparação, como os da **Tabela XV** abaixo:

Tabela XV. Operadores de comparação para a realização de expressões Booleanas.

<	menor
<=	menor ou igual
>	maior

Tabela XV. Operadores de comparação para a realização de expressões Booleanas.

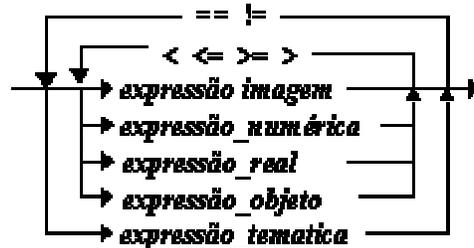
>=	maior ou igual
==	igual
!=	desigual

Tabela XVI. Operadores lógicos para a realização de expressões Booleanas.

&&	E-lógico (intercessão)
	OU-lógico (união)
	OU-exclusivo (união disjunta)
! ou ~	NAO-lógico (complemento)

Sintaxe:

expressão_comparação



expressão_booleana



As expressões de comparação e as booleanas são auxiliares, não sendo possível atribuir seus resultados a variáveis. Entretanto, elas oferecem um modo eficiente de descrever

condições envolvendo atributos espaciais (ou não, no caso das *expressões_objeto*) resultantes da avaliação de expressões sobre campos, objetos e reais, sem a necessidade de gerar resultados binários intermediários. O resultado da avaliação de uma expressão booleana pode assumir um entre os valores: **VERDADEIRO** ou **FALSO**.

No caso de *expressões_comparação* envolvendo *expressões_temáticas* ou *expressões_objeto* envolvendo atributos de tipo texto, apenas os operadores locais de igualdade (==) e desigualdade (!=) fazem sentido, para todas as outras, todos os operadores de comparação (> , >= , <= , <) podem ser utilizados.

3.3.6.5.6- SUPORTE À DECISÃO NO SPRING

No **SPRING**, é possível utilizar a técnica de decisão **AHP** para estabelecer a combinação ótima de alternativas. Para tanto, devem ser desenvolvidos os seguintes passos:

- **Ativação do Banco** e o **Projeto** que tem as definições no modelo de dados;
- **Utilização do menu Análise Espacial - Suporte à Decisão(AHP)...**;
- na janela associada a lista de **Categoria** apresenta somente as do modelo do banco que são **temáticas, numéricas** ou **imagem**. Devem ser selecionada **mínimo 2** e no **máximo 5** categorias;
- em **Exibir** pode-se observar que as categorias (comparação entre os diferentes critérios), duas a duas, serão apresentadas;
- **deve ser selecionado**, para cada par de categoria, o **Peso** desejado;
- valor da **Razão de Consistência** é recalculado a cada alteração de peso. Caso o valor ultrapasse 0.1, será alertado antes de calcular os pesos para o programa a ser criado;
- quando for ativada a função **Calcular Peso**, a janela de **Salvar Como** será apresentada para escolher o diretório onde será gravado o programa em LEGAL.
- Após selecionar quais os fatores que deseja combinar e estabelecer a importância relativa de cada um deles o sistema fornecerá uma indicação da consistência de seu julgamento (indicada no item "razão de consistência"). Segundo os especialistas em **AHP**, é aconselhável que o índice de consistência seja sempre menor que 0,1. Assim, se seu índice de consistência foi maior que 0.1, considere a possibilidade de refazer seu julgamento.

Como resultado, esta função do **SPRING** gera um esqueleto de programa em **LEGAL**, que deverá ser completado pelo usuário com as informações específicas sobre os dados nos quais deseja aplicar o procedimento. A aplicação da técnica **AHP** é sob a forma de uma média ponderada. Assim, os dados deverão ser convertidos para uma escala de [0..1] antes da aplicação do programa.

3.3.6.5.7- MAPAS DE FAVORABILIDADE E MODELOS DE INTEGRAÇÃO PARA PESQUISA MINERAL SUPOSTOS POR SIG

3.3.6.5.7.1- PREMISSAS BÁSICAS

Em termos de exploração mineral, observa-se que o processo de pesquisa necessário para a construção de um modelo cartográfico consistente envolve a coleta, a análise e a integração de dados de diversas fontes. Esse modelamento geralmente utiliza a técnica do *zoom progressivo*; ou seja, é inicialmente efetuado em grandes áreas e, progressivamente, visualiza locais em maior detalhe com o objetivo de definir alvos para prospecção mineral.

Tradicionalmente, a integração de conjuntos de dados prospectivos para investigar a superposição de evidências que indicassem anomalias era efetuada com o auxílio de uma mesa de luz. Esse processo era altamente subjetivo, fortemente laborioso e quase sempre impossível de ser repetido. Recentemente, com a disponibilização dos **SIG**, e a Gestão eletrônica e digital de documentos (GEDD) a eficiência com a qual esse processo tem sido desenvolvido tem aumentado grandemente. O processo de pesquisa mineral efetuado dessa forma, permite uma avaliação menos subjetiva e que pode ser desenvolvida diversas vezes, em busca de melhores resultados.

O objetivo de um estudo de integração de dados em pesquisa mineral busca a interação quantitativa e qualitativa de conjuntos de dados regionais e locais, seguindo os seguintes passos:

- estabelecer um banco de dados digital e geograficamente registrado dos conjuntos de informações disponíveis para a área;
- desenvolver e aplicar métodos quantitativos para estabelecer matematicamente suas interrelações e combiná-las de forma a avaliar o potencial mineral de uma determinada região;

- gerar mapas que demonstrem a favorabilidade para a ocorrência de depósitos, por meio da utilização de uma variedade de premissas e de modelos de integração que possibilitam investigar as fontes de incertezas nesses mapas.

O arcabouço metodológico a ser utilizado para alcançar esses objetivos consiste de:

- estabelecer um modelo conceitual para a área de estudo;
- construir um banco de dados espacial;
- processar os dados por meio de modelagem cartográfica, relacional, simulação condicionada, entre inúmeras ferramentas ainda em implementação e desenvolvimento.
- aplicar modelos de integração e gerar mapas de favorabilidade.

O modelo conceitual, mesmo que não explicitamente estabelecido, guia muitas das decisões a serem tomadas durante os estudos. O banco de dados espacial organizado em um **SIG** é uma coleção de dados individuais, que reúne uma série de estruturas variadas do tipo vetorial, *raster*, ou relacional. O processamento de dados envolve muitas operações para extrair e desenvolver uma análise crítica das camadas de dados (*layers*). O modelamento integrado refere-se a métodos para combinar os dados preditivos contidos em cada camada e, assim, fornecer a base para a elaboração de mapas de favorabilidade para a ocorrência de depósitos minerais. Cada um dos itens supracitados pode ser mais detalhadamente descrito como:

a- Modelo conceitual: é baseado no modelo de depósito mineral aplicável à área de interesse e ao ambiente geológico onde os depósitos ocorrem. Contudo, devido aos modelos de depósito geralmente enfocarem as características dos depósitos, o modelo conceitual para a elaboração dos mapas de favorabilidade detém-se exclusivamente no modelo prospectivo, o qual é composto por todos os componentes que se aplicam aos conjuntos de dados prospectivos regionais, mais os indicadores de depósitos, como dados geoquímicos, geofísicos e de sensores remotos.

O modelo prospectivo guia a escolha dos conjuntos de dados, as operações desenvolvidas para extrair as informações úteis para a predição mineral e, onde sistemas de avaliação automática são utilizados para efetuar a combinação de camadas, para hierarquizar e ponderar as diferentes camadas.

Os métodos usados para extrair as evidências dos dados dependem principalmente da tipologia dos depósitos. O modelo de exploração é vital se as camadas são ponderadas e combinadas por sistemas dirigidos pelo conhecimento dos operadores. A determinação de pesos para cada camada e os pesos para cada classe de mapeamento em uma *camada*, requer uma grande quantidade de conhecimento técnico por parte do operador, expressa principalmente no modelo prospectivo adotado. A construção de uma rede de inferência, com um misto de regras de combinação, depende do tipo de processo de decisão que está sendo modelado, que também é guiado pelo modelo prospectivo. Mesmo quando métodos estatísticos de combinação de dados são utilizados, tais, como: regressão, pesos de evidência, ou redes neurais, para os quais os pesos são determinados automaticamente, por meio da localização dos depósitos conhecidos para “treinamento” do sistema, o modelo prospectivo é utilizado para a seleção dos depósitos.

b-Construção dos bancos de dados: é a fase que mais consome tempo nos projetos de geoprocessamento. Os conjuntos de dados têm muitas formas e tamanhos, de acordo com uma grande variedade de modelos, estruturas e formato de dados. Informações tais como tipos de litologias e estruturas geológicas, solos, regolitos, zonas de alteração e sub-bacias de captação, necessitam geralmente de um processo de digitalização manual. Dados geoquímicos, incluindo dados de litogeoquímica e de sedimento de corrente, são disponibilizados como dados pontuais e colocados em tabelas em contém coordenadas geográficas, valores geoquímicos e outras informações. Esses dados devem ser divididos em camadas distintas e os dados pontuais devem ser interpolados para gerarem mapas de células (*grid maps*).

c- Processamento dos dados: esse passo envolve o processamento dos bancos de dados originais, com o intuito de extrair evidências críticas que permitam a predição dos depósitos minerais.

d- Cruzamentos de informações e geração dos mapas de favorabilidade: o passo final consiste na combinação dos vários mapas derivados anteriormente para gerar um, ou mais mapas de favorabilidade para a ocorrência de depósitos minerais. O processo de combinação envolve a união e a ponderação das evidências disponíveis.

Muitos mapas de favorabilidade podem ser gerados a partir do mesmo banco de dados; isso depende do método de combinação utilizado, ou das camadas selecionadas, bem como dos pesos atribuídos a essas camadas.

3.3.6.5.7.2- APLICAÇÕES DE SIG EM EXPLORAÇÃO MINERAL

Os métodos de exploração mineral têm evoluído de atividades de campo que envolviam prospectores, para programas de exploração sofisticados que tratam com diversos tipos de dados. Quanto maior o banco de dados, mais difícil é a tarefa de interpretação, principalmente quando se trata de uma análise simultânea de diversos planos de informação. Desde que os bancos de dados utilizados sejam georreferenciados, um sistema de informações geográficas, constitui o conjunto ideal de ferramentas para analisar os mapas e os bancos de dados relacionados.

Antes dos anos 50, a exploração mineral era desenvolvida por prospectores, que se baseavam na geologia superficial. Contudo, no início dos anos 50, levantamentos geoquímicos e geofísicos começaram a ser utilizados com sucesso. Atualmente, litogeoquímica, balanços de massa geoquímica de elementos traço e levantamentos por sensores como RADARSAT, SPOT, AVIRIS e LANDSAT têm sido normalmente utilizados como ferramentas de prospecção. A integração desses diferentes tipos de dados não pode ser sumarizada em poucos mapas. Assim, os **SIG** tornaram-se uma ferramenta indispensável para a análise e a integração dos dados.

Quatro exemplos da aplicação de **SIG**, que exibem as principais metodologias utilizadas atualmente em pesquisa mineral, serão descritos a seguir:

A) Reddy & Bonham Carter (1991) utilizaram uma árvore de decisão para guiar as diretrizes de pesquisa mineral na região de Snow Lake, (Canadá). A área de estudo contém diversos depósitos do tipo VMS (sulfeto-maciço, vulcanogênico), cujas informações prospectivas foram utilizadas para elaborar uma árvore de decisão embasada nos seguintes dados: 1) mapa geológico-estrutural (litologias, falhas e eixos de dobras), 2) levantamentos regionais magnetométricos e gravimétricos, (incluem primeira e segunda derivadas verticais), 3) geoquímica de sedimentos de corrente e 4) a banda 4 de uma imagem de satélite LANDSAT TM5.

Esses dados foram inseridos em um **SIG** para produzir uma série de mapas binários, os quais mostram se uma característica ocorre ou não, em uma determinada área. Depois disso, esses mapas foram utilizados para prever a ocorrência de depósitos de metais básicos.

A área de estudo foi dividida em pequenos polígonos irregulares que alimentaram a análise dos dados para a qual uma variável de resposta binária foi adicionada para indicar a

ocorrência, ou não de um depósito mineral conhecido. Os preditores incluíram dois tipos de “distâncias de contatos”, três variáveis geofísicas regionais e a ocorrência de unidades do mapa geológico. Duas árvores de decisão diferentes foram utilizadas, para demonstrar que os resultados variam de acordo com a árvore utilizada. Um dos modelos contém 47 das 74 ocorrências conhecidas e o outro 39 das 74 ocorrências.

B) Bonham- Carter *et al.* (1995) desenvolveram o estudo de uma área de 30x30 Km onde nenhum dado geofísico e geoquímico estava disponível. Contudo, ao invés de utilizar um modelo dirigido pelos dados, foi usado um modelo baseado no conhecimento para determinar o potencial da área. O modelo é baseado na formação genética de depósitos do tipo VMS.

Três fatores principais foram considerados para a construção do modelo:

- a estratigrafia da seqüência vulcânica;
- as alterações associadas;
- a proximidade de unidades intrusivas;

O **SIG** foi utilizado para capturar as unidades litológicas e as áreas com alteração. Cada unidade litológica foi colocada como uma única classe do mapa geológico, ou um mapa binário com um padrão que pode estar presente, ou ausente. Durante o processamento, as seguintes operações foram desenvolvidas:

- 1- reagrupamento das classes de litologias para generalizar o mapa geológico;
- 2- seleção dos contatos entre as classes do mapa por meio de transformações entre o formato *raster* e o formato vetorial;
- 3- introdução de linhas de dilatação, ou corredores, para produzir mapas de proximidade;
- 4- superposição de mapas e modelagem cartográfica para gerar diversos novos mapas combinados a partir de operações definidas pelo usuário;
- 5- visualização de novos mapas, dividindo a amplitude de valores de saída (probabilidades entre 0 e 1) em intervalos discretos para a visualização.

O modelo de decisão utilizou operações Booleanas e funções de probabilidade Bayseanas para avaliar as hipóteses em termos de um, ou mais pesos de evidência. Conforme as hipóteses avaliadas, foi definida a probabilidade *a posteriori*. O programa de inferência

utilizado foi externo ao **SIG** e trabalhou inter-relacionado a ele. Onde os dados geológicos eram pouco precisos, foram utilizadas equações de “lógica fuzzy”. Segundo a análise, dois dos quatro depósitos minerais da área de estudo localizaram-se numa porção de baixa favorabilidade e dois outros foram associados a uma zona moderadamente favorável.

C) Bonham- Carter *et al.* (1988) investigaram a integração de conjuntos de dados geológicos para a exploração de ouro na Nova Escócia (Canadá). Os dados integrados nesse artigo compreendem: 1) mapa geológico, 2) informações estruturais, 3) dados de sedimento de corrente, 4) dados de geofísica aérea e 5) ocorrências minerais. As principais características dos depósitos auríferos dessa área são:

- 1- associados a veios de quartzo, geralmente confinados à Formação Goldenville;
- 2- os veios são concordantes e ocorrem próximos, ou na crista de colinas;
- 3- o ouro ocorre em veios de quartzo-carbonato, com arsenopirita e/ou pirrotita e quantidades menores de calcopirita, esfalerita, pirita e, localmente, scheelita e estibinita;
- 4- as ocorrências são geralmente associadas a horizontes de folhelhos negros ricos em pirita e em arsenopirita;
- 5- em alguns casos, as ocorrências estão relacionadas a falhas orientadas a NW-SE.

Vários mapas foram criados para propósitos analíticos por meio da adição de zonas de dilatação ao redor das linhas de interesse. Entre eles estão:

- distância do eixo de anticlinais;
- distância de lineamentos de orientação NW;
- distância do contato de intrusões graníticas;
- distância do contato das Formações Halifax e Goldenville.

Os 16 elementos analisados nas amostras de sedimentos de corrente foram combinados em uma única nova variável, derivada de uma análise de regressão de multi-elementos, que representa a assinatura que melhor reflete a distribuição dos depósitos auríferos. A assinatura geoquímica foi combinada com outros fatores por modelagem condicionada. Para cada análise, um mapa binário foi criado. A probabilidade de encontrar ocorrências auríferas foi calculada utilizando-se regras Bayseanas.

Os mapas gerados foram então combinados utilizando pesos para avaliar o quanto a ocorrência, ou a ausência de uma característica é importante, baseada nas ocorrências minerais identificadas na área. O produto final da análise foi um novo mapa que deve refletir as ocorrências conhecidas e fornecer novas áreas- alvos para a continuidade da pesquisa. O mapa final exhibe probabilidades de existência de ocorrência auríferas.

D) Tighe (1995) investigaram a aplicação de Radar Sintético de Abertura (SAR) para a exploração de ouro na porção central da Nova Escócia (Canadá). Nesse exemplo, os dados incluídos na análise reúnem informações obtidas na banda C do ERS-1, uma imagem de satélite LANDSAT 5 TM, dados de espectrometria de raios gama, amostras de geoquímica de solo. Mapas topográficos digitais foram utilizados para determinar a expressão superficial das falhas do embasamento e a sua relação com os depósitos auríferos adjacentes à Falha Chedabecto.

O depósito mineral é classificado como do tipo Carlin. Nesse modelo, o ouro e os outros metais foram lixiviados dos folhelhos hospedeiros e, então, transportados para estruturas que seccionam espessos pacotes de rochas de idade Carbonífera. Um **SIG** foi utilizado para examinar empiricamente as relações espaciais dos seguintes fatores em relação às ocorrências auríferas:

- 1- multi- elementos em solos e sedimentos de corrente;
- 2- radiometria;
- 3- litologias;
- 4- distância dos contatos e distância dos lineamentos.

Os seguintes mapas foram elaborados: *quadrees* para cada mapa temático poligonal, mapa *raster* da banda ERS-1, valores pontuais (ocorrências) e vetores (lineamentos com as zonas de dilatação). Diferentes pesos foram então alocados para os vários fatores, os quais foram utilizados para calcular um escore que representa o potencial mineral para ouro de cada área. Esse procedimento gerou um mapa final onde diversas novas áreas favoráveis, ainda não pesquisadas, foram identificadas.

E) Wright & Bonham-Carter (1996) elaboraram mapas que exibem a variação espacial de potenciais depósitos vulcânicos de sulfetos maciços na região de Snow Lake (Canadá). Esses produtos foram gerados pela combinação de dados digitais de diversas fontes. Um modelo

exploratório, baseado no modelo conceitual de depósitos dessa natureza, foi expandido para englobar o conjunto de dados regionais e forneceu um arcabouço para a extração de evidências preditivas desses dados. As evidências foram divididas em cinco fatores: estratigráfico, calor disponível, alteração, geofísico e geoquímico. As características principais desses fatores são:

- Fator geoquímico

Uma rede de inferências definida como a evidência geoquímica foi combinada para criar o mapa *fuzzy* de fator geoquímico, que expressa a variação espacial na evidência geoquímica global favorável para depósitos de sulfetos maciços vulcanogênicos. Os dados geoquímicos foram analisados por componentes principais (PC)₃, onde a PC-1 (sedimentos lacustres) foi relacionada a depósitos ricos em Cu, a PC-2 relacionada a depósitos ricos em Zn e a PC-3 relacionada a ambos os tipos; isso tornou desnecessária a coincidência dos três componentes para existirem condições favoráveis para a ocorrência de depósitos de sulfeto maciço vulcanogênico. Segundo essa argumentação, os três mapas PC foram combinados por meio de um operador OR *fuzzy*, que resultou em um novo mapa PC combinado, que consiste do valor máximo de associação *fuzzy* de PC-1, PC-2 ou PC-3. Portanto, se qualquer um dos mapas PC for favorável, o resultado também será favorável.

Áreas com concentrações anômalas de Cu, Pb e Zn em amostras de tilito foram consideradas como os melhores alvos geoquímicos. Para representar essa situação, os mapas de tilitos geoquímicos foram combinados por meio de um operador AND *fuzzy*. Um mapa intermediário, foi criado considerando o valor de associação mínimo dos três mapas em cada locação espacial. Nesse mapa, valores elevados da função de associação ocorrem apenas onde todos os três elementos são anômalos. É observado que essa regra de decisão poderia facilmente ser modificada para um operador OR *fuzzy*. O operador AND *fuzzy* é muito mais restritivo e conservativo, enquanto o operador OR *fuzzy* é mais otimista.

Além disso, se a química favorável dos sedimentos lacustres e a química favorável dos tilitos fossem coincidentes, essas áreas poderiam ser consideradas como mais favoráveis do que se apenas uma das duas condições existisse. Essa estratégia foi executada por meio da combinação dos mapas intermediários PC-123 com o operador gamma.

- Fator de alteração

Os seis mapas de evidência que mostram a proximidade para os vários tipos de alteração foram combinados. O operador *fuzzy* SUM foi usado para combinar mapas de evidência de Si e anfibólio e para assegurar que áreas muito próximas aos dois tipos de alteração têm um valor de associação resultante que é maior do que qualquer um dos dois mapas de entrada. O mapa resultante (SIAMP) foi então combinado com os mapas de evidência da pirita e do epidoto-hematita, por meio da utilização do operador gamma ($x=0, xx$) para produzir um mapa intermediário que tem valores de associação altos onde existiam zonas de alteração coincidentes (ALT4). Devido ao fato de que o mapa de metassomatismo Fe-Mg e o mapa de alteração de “Pipe” constituem evidências importantes, independentes das outras, um operador OR *fuzzy* foi utilizado para combiná-los com ALT4 e para reter os altos valores de associação atribuídos a eles.

- Fator geofísico

Os mapas de campo total e de quadratura VLF foram combinados utilizando um operador AND *fuzzy*, *que* resultou no mapa ‘VLF’, de elevada associação apenas onde as anomalias de quadratura e de campo total ocorrem juntas. De forma similar ao campo total, as respostas magnética e de gradiente vertical magnético foram combinadas utilizando um operador AND *fuzzy*; visto que os maiores valores de associação foram relacionados às respostas magnéticas moderadas dos mapas de evidência magnética, o mapa intermediário resultante (MAG) mostra os maiores valores de associação onde as respostas magnéticas intermediárias são coincidentes.

Por fim, os produtos VLF, MAG e de gradiente vertical de gravidade foram combinados por meio do operador gamma. Nesse mapa, zonas com alta condutividade, resposta magnética moderada e uma resposta de gravidade regionalmente alta são as mais favoráveis.

F) Araújo *et al.* (1999) em seu trabalho denominado **“Determinação da Favorabilidade de Mineralizações de Chumbo no Vale do Ribeira com Técnicas de Geoprocessamento”** descreveu a aplicação de técnicas de geoprocessamento na avaliação de favorabilidade de mineralizações de metais não ferrosos.

O modelo de mineralização adotado foi o tipo filoniano hidrotermal encaixado em rochas carbonáticas. Na montagem do banco de dados foram utilizados dados geoquímicos, aerogeofísicos, geológicos e ocorrências minerais relacionadas à mineralizações sulfetadas.

De modo geral, foram considerados quatro fatores principais, os quais são denominados de submodelos:

- Submodelo litológico
- Submodelo estratigráfico
- Submodelo geoquímico
- Submodelo estrutural

No Submodelo litológico, foram consideradas como mais favoráveis à mineralização as litologias carbonáticas. A partir do mapa geológico foram separados cinco fatores litológicos que compõe as classes deste submodelo.

No Submodelo estratigráfico foram consideradas como mais favoráveis, o Subgrupo Lajeado, o Grupo Itaiacoca e a Formação Água Clara.

O Submodelo geoquímico é composto das bacias anômalas de sedimentos de corrente nos elementos chumbo, zinco e cobre.

O Submodelo estrutural é composto por um mapa de eixos de dobras, um mapa de zonas de eixos de máxima frequência de fraturamento e um mapa de falhas e lineamentos magnéticos.

Foi utilizada a sobreposição de mapas temáticos com ponderação de parâmetros prospectivos e integração, utilizando média ponderada ordenada e combinação linear ponderada.

A análise de favorabilidade, com a utilização da média ponderada ordenada (MPO), mostrou-se um processo mais flexível do que a análise por combinação linear ponderada (CLP). Além disso a análise MPO discrimina melhor as classes de favorabilidade segundo sua disposição espacial. Na verdade, pode-se utilizar a análise MPO para simular a análise CLP. Os resultados obtidos mostram bastante coerência entre os parâmetros prospectivos adotados e as ocorrências minerais. A análise CLP caracterizou-se pela compensação nos pesos dos fatores, apresentando um resultado mais conservador do que a análise MPO. A utilização do geoprocessamento na análise de favorabilidade não só permite a utilização de técnicas não aplicáveis com outras ferramentas, como ajuda na organização e manutenção dos grandes bancos de dados espaciais, gerados durante os trabalhos de prospecção mineral.

G) Franca-Rocha *et al.* (1999) em seu trabalho denominado “**Weights of evidence method applied to mineral deposits modelling in the Irecê Basin, Bahia, Brazil**” citou que o método "Weights of Evidence" (WofE) constitui uma forma de quantificar a favorabilidade de ocorrência de um fenômeno a partir do registro prévio de sua ocorrência em uma mesma área. Baseado em uma formulação log-linear do Teorema de Probabilidade de Bayes, possibilita o prognóstico da hipótese de ocorrência do fenômeno a partir da distribuição de pontos ou polígonos a partir da combinação dos padrões em mapas de evidências. Na aplicação aqui desenvolvida, os objetos pontuais representam os depósitos minerais de Pb e Zn que ocorrem na Bacia de Irecê (BA) e os mapas ou layers representam os atributos geológicos (geologia, geoquímica, geofísica) que constituem evidências geo-espaciais para a ocorrência da mineralização na área.

Os procedimentos metodológicos adotados foram a modelagem conceitual, a construção da base de dados, geração dos mapas derivados e dos mapas de evidências e modelagem metalogenética. A aplicação do método WofE a quatro mapas exploratórios da Bacia de Irecê demonstrou bons resultados para modelagem dos depósitos de Pb e Zn nesta área. A presença e proximidade dos intervalos estratigráficos definidos pelas unidades B1 e B da Formação Salitre mostraram especial importância no controle do processo de mineralização, conforme quantificado na modelagem. Um mapa aero-cintilométrico de Th, usado como critério restritivo, delimitou a ocorrência regional do fenômeno mineralizante, enquanto um mapa da distribuição de zinco no solo identificou as anomalias localizadas.

O modelo de depósito mineral assumido foi o "sediment-hosted Pb-Zn deposits", conforme definido por Misi *et al.* (1999) *apud* Franca-Rocha (1999) e os indicadores de depósitos foram compilados dos relatórios de exploração mineral na área (Bonfim *et al.*, 1985 e Monteiro, 1997) *apud* Franca-Rocha (1999).

A modelagem metalogenética compreendeu a fusão dos mapas, gerando um mapa de favorabilidade com base no método escolhido (neste caso o WofE) e sua interpretação metalogenética. A aplicação do WofE se deu em duas fases, uma inicial, durante a etapa de geração das evidências, de modo a otimizar a composição dos mapas binários e uma final, usando os mapas binários produzidos na etapa anterior.

A produção dos mapas de evidência, sob a forma de mapas temáticos binários, se fez a partir da reclassificação dos mapas primários e derivados, de acordo com os critérios definidos na modelagem conceitual e relacionados a seguir:

- Fatores Estratigráficos - A generalização das unidades geológicas teve como principal objetivo destacar o intervalo estratigráfico de maior afinidade espacial com a mineralização e que corresponde às unidades do primeiro ciclo (B1 e B). Considerando o forte controle exercido pelo contato superior do primeiro ciclo sobre as mineralizações foi produzido também um mapa de proximidade da unidade B1. A distância selecionada foi aquela que obteve melhor contraste na modelagem inicial. Este mapa possui um certo grau de redundância com o anterior (unidades selecionadas);
- Fatores Geoquímicos - Os mapas geoquímicos de Zn, Pb e Cu foram transformados em mapas binários após a modelagem inicial, sendo selecionada a classe com melhor contraste em cada mapa, para separar os valores anômalos dos não anômalos. Como os três mapas possuem dependência condicional foi usado apenas o mapa geoquímico de Zn na modelagem final;
- Fatores Geofísicos - As imagens geofísicas foram usadas como critério permissivo, já que os trabalhos de prospecção na área mostraram baixa resposta geofísica da mineralização, o que foi comprovado durante a modelagem inicial. Assim, apenas o mapa de Th foi usado, por ter apresentado um contraste significativo.

Os mapas de evidências geológicas, geoquímicas e geofísicas usados neste trabalho demonstraram boa aplicabilidade na modelagem dos depósitos de Pb-Zn na bacia de Irecê, por meio de Sistema de Informações Geográficas (SIG).

O mapa de proximidade da unidade B1 constituiu, particularmente, um ótimo critério para prognóstico das mineralizações, devendo ser aperfeiçoado para melhorar a qualidade da modelagem. Embora tenha havido alguma violação da independência condicional, pois as zonas de dilatação em B1 e o mapa das unidades B e B1 possuem larga superposição, as analogias verificadas nos padrões dos mapas de favorabilidade por WofE e por regressão logística demonstram que este efeito não foi considerável.

Os depósitos situados nas bordas leste e oeste da bacia foram bem modelados pelo método, mas o grupo de depósitos situados na região central da bacia não foram bem explicados. Isto pode significar ausência de informações relevantes para a modelagem ou a ocorrência de um sub-tipo de depósito nesta área.

H) Marrero (1999) em seu trabalho denominado “**Análise do controle estrutural metalogênico em Cuba Centro-Oriental, com base em dados integrados**” citou que a análise da integração de dados LANDSAT-TM, com os provenientes da informação geológica, geoquímica, geomorfológica e geofísica, resultou em uma grande quantidade de novos dados e interpretações sobre as regularidades de distribuição estruturais das ocorrências de petróleo, bem como das regularidades de distribuição magmático-estruturais das mineralizações de ouro e metais base.

As imagens básicas utilizadas foram as tomadas pelo sensor Thematic Mapper, do LANDSAT-5. As técnicas de processamento aplicadas foram, fundamentalmente, composições coloridas entre bandas, razões e principais componentes, bem como classificações não supervisionadas. Por meio destes tratamentos foram encontradas diferenças de tonalidades na paisagem e realçada a rede de drenagem, indicadores, tanto de lineamentos e formas curvas, como de litologias e alterações nas rochas.

Os dados integrados com as imagens são de natureza geológica, geomorfológica, geoquímica e geofísica, sendo realizada esta integração por duas vias. Uma, está baseada em técnicas de processamento de imagem, tais como a HSI e a superposição de isolinhas, aplicando-se no caso de se dispor de dados originais em formato digital, o qual ficou restrito à informação do campo magnético residual. A outra via, baseou-se na criação de um mapa de indicadores geológicos, geomorfológicos, geofísicos e geoquímicos, e sua superposição sobre as imagens de Sensoriamento Remoto.

Os resultados atingidos pela pesquisa correspondem com os objetivos planejados. A mineralização de arco endógena encontra-se associada ao magmatismo tardio do arco (Campaniano Inferior), desenvolvido em zonas de cruzamento de tectolínamentos sin-arco NE, WNW e N-S. A mineralização aurífera epitermal vincula-se a estruturas vulcânicas, provavelmente caldeiras, enquanto o ouro em veios e o cobre porfirítico relaciona-se com o desenvolvimento do magmatismo hipabissal e sub-vulcânico. Foram inferidas pela pesquisa grandes estruturas vulcânicas e hipabissais, incluindo grandes áreas onde era considerado anteriormente apenas o desenvolvimento da cobertura cenozóica. Assumindo-se cada uma das novas estruturas detectadas como um setor metalogênico de interesse, isso representaria o aumento em um 600% da área total considerada atualmente para a reavaliação aurífera do território.

Por outro lado, na região da Bacia Central foram encontradas estreitas relações espaciais entre as jazidas conhecidas e os tectolneamentos transtensivos de direções NE e N-S, a maior parte deles detectada pela pesquisa.

I) Moreira *et al.* (1999) e Moreira (2001) em seus trabalhos denominados “**Integração e Análise Espacial de Dados em Pesquisa Mineral**” e “**Uso e avaliação de técnicas de integração e análise espacial de dados em pesquisa mineral aplicadas ao planalto de Poços de Caldas**” descreveram a utilização de modelos matemáticos semi-quantitativos para a obtenção de mapas de favorabilidade à ocorrência mineral, num estudo de caso para o maciço alcalino de Poços de Caldas. Os métodos aplicados para a análise multi-critério dos dados foram as técnicas Booleana, Média Ponderada, Fuzzy e Bayesiana.

Técnicas de probabilidade Bayesiana também foram aplicadas para a avaliação dos mapas de potencialidade mineral gerados, de modo a verificar a confiabilidade dos mesmos como produto orientativo à pesquisa mineral. Como resultado, foi desenvolvido uma metodologia de avaliação de diferentes técnicas de integração de dados em SIG's.

Para a avaliação dos mapas gerados por meio dos métodos Booleanos, Média Ponderada, Fuzzy (Mínimo-Máximo, Média, Gama e Ponderado (técnica **AHP**) e Bayesiano, o autor utilizou a metodologia Bayesiana para avaliação de cada classe (fatia) dos planos de informação gerados.

O objetivo foi avaliar a natureza explicativa de cada faixa (muito baixa, baixa, média, alta e muito alta) para com as ocorrências minerais. Ou seja, o quanto será aumentado em número de vezes (grau de confiança) o encontro de um novo depósito mineral a partir do momento que se está pesquisando em regiões definidas no mapa de favorabilidade como de alto potencial para a ocorrência desses minérios. O grau de confiança é expresso pela razão da probabilidade à posteriori pela probabilidade à priori.

Os cálculos foram executados para todas as classes (fatias) dos mapas de favorabilidade gerados. A análise desses resultados permitiu a obtenção de algumas conclusões com relação a qualidade dos mapas de favorabilidade gerados.

O mapa de favorabilidade gerado pelo método Booleano foi o que apresentou o pior resultado dentre os mapas gerados. O grau de confiança obtido por meio da teoria Bayesiana para a faixa definida como favorável foi o menor valor obtido. Esse valor passa uma idéia de aumento de probabilidade de encontro do bem mineral. Ou seja, neste caso o fato de se

procurar minerais nas áreas definidas como favoráveis aumentariam as chances de descoberta em 6,89 em relação a probabilidade à priori que considera a área toda do platô de Poços de Caldas.

O método de Média Ponderada obteve um bom resultado, onde as fatias definidas por Almeida Filho (1995) apresentaram uma divisão coerente da área de estudo. A faixa definida como de "muito alto" potencial apresentou um grau de confiança de 13,19. A faixa de "muito baixo" potencial como o esperado diminui a chance de descoberta em aproximadamente 2,5 vezes (grau de confiança = 0,403). O problema com esse mapa de favorabilidade é que a faixa de "médio" potencial (3,53) apresenta um valor menor do que o da faixa de "baixo" potencial (3,86) quando o esperado era que as faixas apresentassem um aumento crescente dos valores de grau de confiança.

Os mapas obtidos pelos operadores Fuzzy foram os que apresentaram os melhores resultados. O Fuzzy Ponderado foi o que apresentou o melhor resultado dentre todos os métodos de análise multi-critério, o grau de confiança distribui-se de modo crescente com a faixa definida como de "muito alto" o maior valor de grau de confiança, 16,10. Os outros operadores Fuzzy, também apresentaram bons resultados, com variações muito pequenas entre os resultados.

Os resultados apresentados pelo método Bayesiano não foram muito satisfatórios. O problema provavelmente decorre do corte rígido que é efetuado no início da manipulação dos dados. Esse corte em fatias "favoráveis" e "não favoráveis" elimina a distribuição contínua das evidências, o que como já visto no método Booleano, gera erros durante a integração dos dados. Embora o mapa de favorabilidade, fatiado segundo áreas proporcionais, apresentar valores coerentes de grau de confiança, os valores de amplitude das faixas variam muito, apresentando faixas muito estreitas em amplitude

Segundo Moreira (1999) as técnicas de análise e integração de dados espaciais para a pesquisa mineral são uma ferramenta muito poderosa na predição da áreas potenciais a ocorrência de depósitos minerais, todavia o sucesso da prospecção esta diretamente ligado ao grau de conhecimento da geologia da região, que fornecerá os parâmetros e relações necessárias para definição do modelo prospectivo. A escolha do modelo prospectivo é a etapa mais difícil do trabalho onde a definição das evidências relevantes e a importância relativa entre elas será de suma importância para a boa eficiência do modelo proposto. A elaboração do modelo depende exclusivamente do conhecimento do especialista para com a geologia da

área de estudo, para com os "modelos de depósitos" semelhantes ao da área de estudo e para com as técnicas mais adequadas para a integração dos dados.

Segundo Moreira (1999), com relação as técnicas empregadas na análise multi-critério dos dados, as metodologias de inferência por classificação contínua, métodos Fuzzy, mostraram ser as mais indicadas para o estudo de fenômenos naturais, pois essas permitem um escalonamento das evidências segundo um grau relativo de importância entre elas, possibilitando assim a criação de classes intermediárias (condição "talvez") às verdades absolutas, diferentemente dos métodos rígidos (Booleanos). O método Bayesiano apresentou uma abordagem interessante ao problema, todavia os resultados apresentados pelos mapas de probabilidade de ocorrência mineral, não foram satisfatórios. Este baixo resultado pode estar ligado ao fato do "corte" rígido sobre a evidência na etapa inicial do processo, para geração dos mapas de evidência binários (favorável, não favorável). O método de Bayes, por outro lado, demonstrou ser uma forte ferramenta de avaliação quantitativa dos mapas gerados, sendo a avaliação baseada na probabilidade à posteriori, ou seja no poder explicativo dos mapas de favorabilidade para com as ocorrências minerais (verdades de campo).

j) Moura (1997) em seu trabalho denominado **“Potencialidade mineral da porção média do Vale do Ribeira (SP) para mineralizações auríferas, obtida de um sistema de informação geográfica – SIG”** cita que a região do Vale do Ribeira é conhecida como uma das principais áreas produtoras de chumbo do Brasil, estando quase todos os depósitos e ocorrências localizados ao longo de faixas carbonáticas metamorfizadas. A muito tempo é conhecido a existência de ouro no vale e somente a partir do início da década de 70, por meio de trabalhos geoquímicos de cunho regional, foi possível detectar anomalias de Cu, Pb, Zn e daí partir para pesquisas geológicas visando ouro e sulfetos associados. Tendo em vista inúmeros trabalhos de cunho acadêmico e de projetos de pesquisa mineral na área do Vale, optou-se por realizar a integração de dados geoquímicos, geofísicos e geológicos existentes numa porção do Vale que compreende parte das folhas Braço, Ribeirão do Itacolomi, Mina do Espírito Santo e Iporanga. Esse autor utilizou um Sistema de Informação Geográfica (GRASS) para propor uma metodologia na construção de um modelo prospectivo que pudesse auxiliar nas tomadas de decisão quanto determinação de áreas potencialmente favoráveis a conter mineralizações de ouro segundo um modelo pré-concebido. Inicialmente foi feita a captura dos dados analógicos referentes as cartas planialtimétricas por scanner, sendo posteriormente vetorizados pelo método semi-automático. Os mapas vetoriais no formato DXF foram convertidos para o formato vetor do Grass e depois transformados em formato *raster* para

serem manipulados. A partir do mapa hipsométrico no formato *raster* gerou-se o modelo digital de terreno e em seguida partiu-se para a construção das sub-bacias de captação. Cada sub-bacia gerada foi associada às amostras consideradas anômalas nos elementos Cu, Pb, Zn, Ni, Co e As que constituem as três associações geoquímicas relacionadas a mineralizações de ouro em zonas de cisalhamento. Utilizou-se das funções do SIG (combinação booleana, análise de proximidade, análise de vizinhança e análise de região) para realizar uma análise espacial utilizando-se os diversos fatores que constituem os sub-modelos que satisfazem ao modelo pré-concebido. O modelo pré-concebido refere-se ao modelo de decisão que é constituído por vários mapas de fatores (geológico, geoquímico, geofísico e estrutural). O modelo de decisão adotado no presente trabalho é do tipo lito-estrutural, tendo em vista os resultados de pesquisas existentes na área. No mapa de fator geofísico utilizou-se de dados gamaespectrométricos dos canais K, Th e U, cujas imagens foram reclassificadas em quatro categorias. O mapa de fator estrutural contém zonas de buffer ao longo das zonas de cisalhamento e das fraturas NW. O mapa de fator geoquímico é constituído pelas sub-bacias anômalas nos elementos das associações geoquímicas e o mapa de fator geológico reúne as litologias favoráveis da Fm.Perau e os filitos da Fm.Iporanga. Cada mapa de fator foi ponderado segundo a sua importância na determinação dos sub-modelos. No sub-modelo litológico foram criados três cenários de acordo com as bacias anômalas. A combinação destes sub-modelos representa o modelo de potencial mineral da área.

k) Castro (1997) em seu trabalho denominado “Contribuição ao conhecimento geológico-metalogenético associado aos granitóides intrusivos no Grupo Brusque (SC) com base na utilização de informações geológicas, aerogamaespectrométricas e LANDSAT/TM-5”

procurou contribuir para o avanço no conhecimento geológico-metalogenético dos granitóides intrusivos no Grupo Brusque (GIGB), Estado de Santa Catarina. Para isso utilizou-se informações geológicas disponíveis sobre a região, informações petrográficas e geoquímicas, dados aerogeofísicos e de sensoriamento remoto. As informações geológicas indicaram que os GIGB são polarizados entre os domínios sul e norte da área estudada. No domínio Sul os granitóides foram gerados sob influência crustal, ocorrendo biotita a muscovita-granitóides cinza-esbranquiçadas, a partir de magmas mais redutores. Nesse domínio são encontradas ocorrências e concentrações econômicas de Sn, Mo e W. A ocorrência de gnaisses e migmatitos associados aos granitóides destes domínios, assim como a caracterização destes como transacionais entre granitóides tipos I, S, e A, atestam seu caráter evoluído. No domínio Norte ocorrem hornblenda granitóides ricos em K-feldspato róseos, denotando condições mais

oxidantes, com predomínio de ocorrências em Au e W. Uma possível fonte para essas rochas seriam os gnaisses granulíticos básicos do Cráton Luis Alves, situado a norte. Os dados aerogamaespectrométricos, transformados para *grids* e processados na forma de imagens digitais, contribuíram para o detalhamento da geologia da região. Esses dados apresentaram contudo um forte ruído quando do levantamento original, tendo sido necessário realizar o pré-processamento dos mesmos para minimização desse ruído, o que os tornou passíveis de serem interpretadas em relação à geologia. As imagens LANDSAT/TM-5 foram utilizadas para uma interpretação das estruturas, tendo fornecido informações importantes sobre elementos estruturais tais como fraturamentos, falhamentos e veios mineralizados. A correlação direcional destas estruturas com as direções encontradas em mapas de lineamentos atestaram a importância da utilização das imagens de sensoriamento remoto na região de estudo.

1) Braghin (1997) em seu trabalho denominado **“Utilização das lógicas *booleana* e *fuzzy* para análise metalogenética na Folha Pilar do Sul (SP) via Sistema de Informações Geográficas”** descreveu aplicações do uso da lógica *booleana* e *fuzzy* para uma análise metalogenética na Folha Pilar do Sul, SP. Para tanto, tais metodologias são desenvolvidas utilizando-se ferramentas de um Sistema de Informações Geográficas. Uma das maiores diferenças entre as lógicas estudadas é justamente a possibilidade de considerar as incertezas inerentes aos dados geológicos. Isto torna-se importante, haja visto as diversas fontes de incerteza numa base de dados espaciais com informações geológicas. A lógica *booleana* que permite apenas definir o que é verdadeiro ou falso pode gerar algumas dúvidas que podem ser melhor tratadas com o uso de uma abordagem da lógica *fuzzy*. As análises efetuadas mostraram que a definição das incertezas nos resultados é um fator importante neste tipo de análise espacial. Com a lógica *fuzzy* houve um aumento nas áreas de interesse mas principalmente pôde ser definidas as prioridades de uma forma mais segura.

Duarte (1998) em seu estudo denominado **“Análise integrada de dados aplicada à geologia do Supergrupo Rio das Velhas (NE Quadrilátero Ferrífero)”** abordou o tratamento e integração de dados aerogeofísicos (gamaespectrometria e magnetometria, geológicos de imagens do LANDSAT5 - TM. Os mesmos foram analisados individualmente e de forma integrada, utilizando-se técnicas de processamento digital de imagens (PDI) e de sistemas georeferenciados de informações (SIG), com ênfase na geologia do Supergrupo Rio das Velhas (NE do Quadrilátero Ferrífero, MG), procurou-se com isto contribuir para a compreensão do contexto geológico da região e de seu potencial metalogenético para ouro.

A análise dos produtos individuais mostrou que os melhores resultados foram obtidos por meio dos dados aerogeofísicos, onde a gamaespectrometria exibiu uma grande eficácia na correlação com as unidades geológicas mapeadas na área, enquanto a magnetometria mostrou-se eficaz no reconhecimento e correlação com a estruturação geral da área. As imagens do LANDSAT5-TM não apresentaram bons resultados na discriminação litológica, em virtude da presença da grande quantidade de vegetação e ao espesso manto intemperismo existente na área. A extração e o tratamento dos alinhamentos estruturais, permitiu separar áreas com diferentes níveis de fraturamento que podem servir como uma ferramenta na seleção de áreas favoráveis a mineralizações, em especial as auríferas.

A partir da integração dos dados gamaespectrométricos com os traços de fraturas extraídos da imagem do LANDSAT5-TM, procurou-se selecionar áreas favoráveis ou prioritárias a pesquisa mineral para ocorrências de ouro.

Os resultados demonstram a possibilidade da aplicação dos dados gamaespectrométricos integados aos traços de fraturas à seleção de áreas prioritárias a pesquisa mineral, mesmo em regiões de densa cobertura vegetal.

m) Osako (1999) em seu trabalho denominado **“Estudo do potencial mineral do depósito uranífero de Lagoa Real, BA, com base em dados geológicos, aerogeofísicos e de sensoriamento remoto”** desenvolveu a análise integrada de informações geológicas, aerogeofísicas e do LANDSAT-5/TM permitiu a obtenção de uma grande quantidade de dados adicionais à geologia regional e ao controle da mineralização uranífera na região de Lagoa Real. Esta região possui a segunda maior jazida de Urânio do país, na qual a concentração uranífera ocorre associada aos corpos albitíticos do Complexo Granito-Gnáissico Lagoa Real de idade Mesoproterozóica, inserido no Bloco Paramirim do Cráton do São Francisco. Os dados aerogamaespectrométricos mostraram-se eficazes na detecção direta de áreas potencialmente radioativas, permitindo a delimitação espacial de áreas anômalas daquelas não-anômalas. Os dados magnéticos destacaram feições estruturais regionais com direções: 30°, 70°, 170°, 0° e 140°, estas duas últimas direções ocorrem associadas à zona de cisalhamento dúctil. As imagens do LANDSAT-5/TM obtidas no início da época da seca, realçaram a resposta espectral da vegetação do tipo cerrado, que recobre as rochas do Complexo Granito-Gnáissico Lagoa Real. Os solos residuais (óxidos hidróxidos de ferro e argilominerais) não apresentaram correlação com os corpos albitíticos devido a intensa alteração intempérica observada na área de estudo. A análise estatística dos lineamentos

extraídos nas imagens LANDSAT-5/TM, destacou direções estruturais de forma muito dispersa. A comparação entre as feições lineares magnéticas e os lineamentos das imagens do LANDSAT-5/TM permitiu a discriminação das principais direções estruturais.

n) Garcia (1999) em seu estudo denominado **“Integração de dados multiespectrais e aerogeofísicos na identificação de áreas favoráveis a mineralizações auríferas na região de Gentio do Ouro, Chapada Diamantina (BA)”** citou que na região Gentio do Ouro na Chapada Diamantina Ocidental (Bahia), as mineralizações auríferas primárias ocorrem em veios de quartzo intrudidos em rochas básicas, associados a zonas de cisalhamento. A percolação de fluidos mesotermiais formadores destes veios ocasionou zonas de cloritização, carbonatação e sericitização nas encaixantes. Estes *sills* básicos encontram-se encaixados nas coberturas metassedimentares do Grupo Paraguaçu do Supergrupo Espinhaço (Mesoproterozóico). Nesta região também ocorrem mineralizações auríferas secundárias, associadas a coberturas cenozóicas. O processamento e a integração de dados aerogeofísicos e da imagem do satélite LANDSAT-5 TM, objetivou a identificação de corpos intrusivos básicos e zonas de alteração hidrotermal associadas a veios de quartzo, a identificação de estruturas regionais condicionantes da ocorrência dos veios e a delimitação de zonas lateríticas. No processamento da imagem do multiespectral LANDSAT-5 TM, a técnica FPCS foi utilizada com sucesso para a delimitação de corpos básicos, por meio da identificação de ocorrências conjuntas de óxido-hidróxido de ferro e argilo-minerais e da definição de áreas ricas em óxido-hidróxido de ferro associadas a solos e crostas lateríticas. A composição RGB 457 apresentou o melhor resultado na diferenciação das rochas sedimentares. A extração de lineamentos da área foi realizada por meio da técnica de iluminação artificial aplicada à PC1 de todas as bandas da imagem. O processamento dos dados aerogeofísicos não possibilitou o detalhamento da área estudada devido ao grande espaçamento entre as linhas de vôo. Resultados razoáveis foram obtidos por meio da composição colorida RGBKThU para diferenciação litológica e para a ocorrência de zonas de alteração hidrotermal. Na magnetometria o melhor resultado foi conseguido por meio dos filtros de sinal analítico e direcional, na identificação de rochas básicas e de estruturas regionais. A integração dos resultados obtidos por meio do processamento dos dados exploratórios permitiu a identificação de áreas potencialmente favoráveis a mineralizações auríferas na região de Gentio do Ouro. A metodologia selecionada neste trabalho pode ser aplicada em outras áreas da Chapada Diamantina, que apresentem mineralizações auríferas primárias em veios de quartzo associados a corpos básicos.

o) Barreto Neto (2000) em seu trabalho denominado **“Padrões de acurácia em banco de dados geológicos para determinação de áreas anômalas de chumbo, zinco e prata usando sistemas de informações georeferenciadas”** descreveu a bacia de Una Utinga como um ambiente propício para mineralizações de chumbo e zinco como prata associada, compreendida por uma ampla plataforma carbonática formada durante o Neoproterozóico e dotada de várias ocorrências destas mineralizações sempre geológicas na região foram realizadas pela CPRM (companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) que delimitou algumas áreas anômalas a Pb/Zn/Ag a partir de dados de geoquímica de solos e sedimentos de corrente. Os dados de geoquímica de solo e elevação, referentes a área estudada, foram utilizados na presente pesquisa para a realização de um estudo de avaliação de três métodos de interpolação: inverso do quadrado da distância, krigagem e curvatura mínima. Esta avaliação teve como objetivo identificar o método de interpolação que mais preservou os dados originais os erros inferidos nas interpolações. Os dados de geoquímica de sedimentos de corrente, quando sobrepostos ao mapa de bacias de drenagens obtidos a partir dos modelos digitais de terreno, propiciou a identificação de bacias anômalas a Pb, Zn, V e Ag, que foram utilizadas para a realização de uma auditoria nas áreas delimitadas pela CPRM. As áreas anômalas obtidas pelos três métodos de interpolação e as bacias de drenagens anômalas foram confrontadas com as áreas delimitadas pela CPRM por meio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), com finalidade de identificar o grau de concordância com a realidade terrestre, por meio do cálculo do Erro de Omissão e Comissão, áreas coincidentes e do índice de Kappa. Com tal técnica foi possível a realização de uma auditoria nos dados apresentados pela CPRM para verificação do seu grau de acurácia.

p) Perrotta (2000) em seu trabalho denominado **“Projeto modelamento dos depósitos auríferos do Vale do Ribeira Fase II”** selecionou uma área no distrito mineiro do Vale do Rio Ribeira de Iguape para estudo do seu potencial aurífero, por meio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Este tipo de sistema incorpora uma base de dados digitais, espacialmente registrados, organizados na forma de mapas temáticos e tabelas de atributos, que podem ser avaliados estatisticamente, a fim de se estabelecer, no caso de aplicação em pesquisa mineral, as interrelações empíricas entre as evidências e os depósitos conhecidos, com o objetivo de se prever novos depósitos. Mapas previsionais são gerados pela integração, por meio de operações lógicas entre os diversos mapas temáticos de evidências, segundo uma hierarquia de maior ou menor correlação com a mineralização. A base de dados construída consiste de dados de cartografia geológica, geoquímica de sedimentos de corrente e

concentrados de basteira, litogeoquímica de rochas metavulcânicas básicas; aerogeofísica (magnetometria e gamaespectrometria), imagens de satélite e dados metalogenéticos das ocorrências conhecidas. Reconhecidamente aurífera, a região entre os Ribeirões Piririca e Ivaporunduva, foi objeto de estudo comparativo com as áreas adjacentes na tentativa de se determinar características geológicas que a diferenciavam das demais. Encontrou-se nesta região, como já indicavam mapas de detalhe de projetos prospectivos, uma unidade litologicamente distinta das adjacentes, denominada Unidade Piririca. São sedimentos pelágicos de ambiente redutor e sulfetado constituídos de pelitos e pelitos carbonosos de ambiente marinho profundo na base, que gradam no topo para águas mais rasas com pelitos carbonáticos. Associam-se a vulcanismo basanítico de regime tectônico distensivo, distinto das metabásicas das unidades adjacentes, que apresentam composições basálticas de filiação toleítica, e afinidade MORB/ arco insular vulcânico. As características das mineralizações auríferas nesta unidade indicam gênese associada a devolatização metamórfica da pilha metavulcano-sedimentar, causada por um gradiente geotérmico anormalmente alto, que possibilitou a extração de fluidos, com ouro em solução, e cuja percolação, canalização e deposição foi facilitada por estruturas planares, associadas a zonas de cisalhamento de orientação NE, tardias ao metamorfismo regional e penecontemporâneas ao plutonismo granítico que deu origem ao Granitóide Agudos Grandes. O potencial aurífero da região foi estimado por meio de dois métodos de modelagem, o método da indexação de overlays, semelhante a uma adição ponderada dos mapas temáticos, em que pesos são atribuídos subjetivamente, segundo a avaliação do pesquisador, e o método dos pesos de evidência, de caráter objetivo, onde os pesos são calculados estatisticamente por meio de uma estrutura de probabilidades, que estabelece a correlação entre as evidências e as ocorrências conhecidas. Estas análises indicaram como evidências de correlação positiva com a mineralização aurífera, a presença de litotipos da Unidade Piririca, principalmente metaultrabásicas e cálciofilitos; a proximidade do contato com metaultrabásicas/básicas desta unidade; a presença de anomalias geoquímicas de prata, arsênio, chumbo, cobre, cromo e níquel; a proximidade de zonas de cisalhamento dúctil-rúpteis NE transcorrentes e normais, e de fraturas NS; e a presença de assinaturas gamaespectrométricas dentro do intervalo de 0,105 a 0,151 para a razão U/K. As informações coletadas e arquivadas no banco de dados da área de estudo foram combinadas no *SPANS-GIS*, de forma organizada, a fim de se obter o mapa de potencial aurífero da região. Esta modelagem refere-se aos modelos de mineralização primária, e a maioria das ocorrências selecionadas para correlação com as evidências disponíveis correspondem a veios de quartzo mineralizados hospedados em rochas

básicas/ultrabásicas da Unidade Piririca. Menos comuns são ocorrências hospedadas em metassedimentos clásticos, vulcanoclásticos, ou com alguma contribuição química. Já o modelo de depósitos de ouro disseminado em rochas metavulcanoclásticas (em *ribbons* de quartzo), recém descoberto, conta com poucos exemplos. Como este tipo de mineralização apresenta similaridades com o anterior, no que tange ao controle estrutural e geoquímico, todas as ocorrências classificadas como primárias foram tratadas em conjunto.

O potencial aurífero da região de estudo foi estimado segundo dois modelos, indexação de *overlays* e pesos de evidência, o primeiro, com caráter de adição linear ponderada das evidências, solicita uma avaliação subjetiva dos pesos atribuídos a cada uma delas, considerando-se sua importância com relação ao objetivo pretendido. Esta avaliação foi possível por meio do conhecimento dos modelos de depósitos na área, que vem sendo acumulado pela equipe de especialistas em Pesquisa Mineral da CPRM-SP, na região do Vale do Ribeira (Morgental *et al.* 1981, Silva & Câmara 1990, Câmara 1992, Vasconcelos *et al.* 1993, Lopes Jr. *et al.* 1994, 1995, Vasconcelos & Câmara 1995 *apud* Perotta 2000).

O Modelo dos Pesos de Evidência, desenvolvido pelo Dr. G. Bonham-Carter e colaboradores, com diversos exemplos na literatura (Bonham-Carter *et al.* 1988, 1989, Agterberg & Bonham-Carter 1990, Agterberg *et al.* 1990 *apud* Perotta 2000), tem caráter mais objetivo, e é definido por estes autores como "dirigido pelos dados", isto é, não envolve a escolha subjetiva de pesos, que são determinados pela correlação estatística dos depósitos conhecidos com as evidências. Na região estudada, não há um modelo genético muito preciso para as mineralizações auríferas, mas em contrapartida um modelo prospectivo vem sendo utilizado na condução dos trabalhos de pesquisa do ouro na área. Com base na coleção de dados disponível, e trabalhos anteriores na área, uma série de hipóteses foram levantadas. Se por um lado elas serviram como fatores indicativos na integração e modelagem dos dados, por outro, no decorrer desta atividade elas puderam ser reavaliadas, confirmadas ou descartadas:

- A Unidade Piririca representa o principal metalotecto estratigráfico do ouro na região, sendo que as subvulcânicas basaníticas desta seqüência constituíram a principal área-fonte deste metal. Correspondem também a unidade mais francamente mineralizada.

- Apesar de provável gênese do ouro associada a mobilização de soluções mineralizantes produzidas na devolatização metamórfica da pilha metavulcano-sedimentar, é provável que a principal época de concentração aurífera tenha sido contemporânea não ao evento metamórfico regional, mas sim à evolução do Sistema de Cisalhamento Ribeira em conjunto

com o estabelecimento de um alto gradiente geotérmico quando do *emplacement* do Granitóide Agudos Grandes.

- As zonas de cisalhamento dúctil-rúpteis que atuaram nos processos de lixiviação da pilha metassedimentar e canalização dos fluidos mineralizantes tem suas estruturas planares principais e mais contínuas identificadas em mapa geológico, imagens de satélite e em subsuperfície na imagem aeromagnetométrica. Estruturas rúpteis tardias do mesmo sistema, desenvolveram-se em profundidades mais rasas e afetaram rigidamente o Granitóide Agudos Grandes, são identificadas nas imagens de satélite submetidas a filtragens direcionais.

- Assinaturas radiométricas da unidade mineralizada e dos depósitos podem ser definidas por meio da correlação dos mapas aerogamaespectrométricos com o mapa litológico e com a tabela de pontos de ocorrência de ouro.

- Anomalias de arsênio e prata em sedimento de corrente devem representar as melhores correlações com os depósitos, já que o ouro associa-se à arsenopirita nos veios, a prata é um elemento de comportamento similar ao ouro nos processos de solubilização e mobilização. Anomalias de chumbo podem refletir a incorporação de fluidos magmáticos à solução mineralizante.

- Anomalias de cromo e níquel podem ser indicativas da presença de rochas basaníticas ultrabásicas na região.

- Anomalias de ferro podem identificar rochas enriquecidas neste elemento, potenciais hospedeiras de mineralizações auríferas.

No geral os resultados obtidos mostraram uma razoável coincidência entre os dois tipos de modelagem utilizados.

A correlação gráfica entre os dois mapas previsionais, na área de afloramento da Unidade Piririca, pode ser verificada em mapa, elaborado a partir da reclassificação de um mapa do tipo *unique conditions* entre os resultados finais de indexação (reclassificado para 6 níveis, para compatibilização de número de classes) e de probabilidade posterior. A hierarquia das classes do mapa de correlação respeita uma ordem crescente de favorabilidade.

Esta correlação positiva entre os modelos previsionais indica a coerência dos pesos atribuídos aos submodelos indexados, o que constitui uma vantagem na aplicação deste método, de implementação computacional muito mais simples e possível em qualquer **SIG**.

Por outro lado, a modelagem por pesos de evidência, dado seu caráter objetivo, evitando a escolha subjetiva de pesos, fornece mais segurança ao pesquisador. Uma grande vantagem deste método é a possibilidade de se estimar estatisticamente as incertezas decorrentes da ausência de dados, o que é muito interessante principalmente no caso da avaliação das evidências geoquímicas, onde a densidade de amostragem raramente oferece uma cobertura completa e as áreas onde há ausência de dados sempre será modelada como mais potencial que as áreas onde o levantamento não indicou anomalias.

A grande desvantagem deste método decorre da dificuldade de sua implementação. Nenhum dos **SIGs** comercializados atualmente dispõe de rotinas para sua aplicação.

Outra dificuldade decorre do problema da hipótese da independência condicional entre mapas de evidência. As evidências geológicas são, no geral, intimamente associadas. É muito comum que as anomalias geoquímicas relacionem-se às litologias e estas por sua vez disponham-se segundo a estruturação regional, que comumente controla a percolação de fluidos mineralizantes no caso de depósitos epigenéticos. Fechando este círculo de dependência, a gamaespectrometria, por vezes referida como "geoquímica aérea", pode apresentar correlações com todos os padrões anteriores. No caso em estudo verificou-se, por exemplo, na combinação dos mapas *asb*, *fratb*, *g32b*, *g33b*, *nib* e *ukb* que apesar do resultado do teste de independência condicional mostrar valores bem abaixo dos limites tolerados de c^2 , o número de depósitos previstos resultou exagerado, indicando ainda certa dependência entre estes mapas. Por outro lado, quando uma evidência é descartada da análise o que pode ocorrer é uma diminuição pouco significativa do número de depósitos previstos, já que contribui para uma menor restrição da área de influência das outras evidências. Assim a combinação de poucos mapas de evidência gera um mapa de *unique conditions* com poucas classes, cada uma de distribuição areal extensa, e portanto resultando num número elevado de depósitos previstos, já que cada um corresponde a uma unidade de área.

O método da Indexação de *overlays* assim como outros semelhantes na combinação de múltiplos mapas de evidência, como por exemplo modelo da lógica *booleana* que envolve operações de adição linear e intersecção entre mapas (Bonham-Carter *et al.* 1988 *apud* Perotta 2000), e portanto aplicável nos casos em que ocorram também evidências mutuamente exclusivas, e lógica *fuzzy*, que permite combinações ponderadas mais flexíveis entre mapas (Zimmermann 1985 *in*: Bonham-Carter 1994, An *et al.* 1991 *apud* Perotta 2000), estão vinculados a modelos empíricos subjetivos, utilizando o conhecimento dos processos

envolvidos na estimativa da importância relativa das evidências. Nestes métodos a ocorrência de depósitos conhecidos fornece mais um fator de embasamento para a ponderação, mas não é uma condição necessária para sua aplicação.

Ao contrário, o método dos pesos de evidência e outros métodos dirigidos pelos dados, como por exemplo regressão logística (Bonham-Carter & Chung 1983, Chung & Agterberg 1980, Agterberg 1989 *apud* Perotta 2000), só é aplicável em regiões onde um significativo número de ocorrências é conhecido.

Na região do Vale do Ribeira estudada, apesar de um número suficientemente grande ocorrências conhecidas, estas mostram-se muito concentradas na área de afloramento da Unidade Piririca, de forma que esta área resultou como a de mais altos valores de probabilidade posterior. Se por um lado este resultado pode decorrer de um problema de amostragem, por outro, um resultado semelhante na modelagem por indexação de overlays (de caráter menos restritivo), pode evidenciar que condições semelhantes a esta faixa (como ambiente paleogeográfico e estruturas condicionantes da mineralização) não se associaram favoravelmente em outras áreas exceto em porções restritas. Como os modelos gerados baseiam-se fortemente nesta densidade de ocorrências, parte delas, que guardam alguma diferença de tipologia, caem em áreas de menor probabilidade ou menos favoráveis. Mas é interessante notar que, na sua grande maioria, estas ocorrências não "modeladas" são de pequena importância, e em algumas o ouro ocorre apenas como componente menor na assembléia de elementos economicamente exploráveis, dominada por chumbo, prata e menos comumente cobre.

Um teste final para ambas estimativas, já que não foi possível a implementação de trabalhos prospectivos nas áreas modeladas favoravelmente, foi a superposição de um vetor correspondente a pequenas bacias, com teores anômalos de ouro superiores a 15 ppm (em concentrado de bateia - analisado por fusão total), na área do rio Pedro Cubas (dados inéditos de um levantamento de detalhe recente - do tipo *follow up* - em convênio da CPRM com empresa privada), que tiveram parte de suas áreas coincidindo, de fato, com padrões de alta probabilidade posterior ou altos índices de favorabilidade.

Com relação às hipóteses levantadas na condução da modelagem, verificou-se que as rochas metabásicas/ultrabásicas da Unidade Piririca devem realmente constituir a principal área fonte do ouro na região. Os fluidos mineralizantes, de provável origem na devolatização metamórfica da pilha metavulcano-sedimentar foram gerados, devido a um aquecimento

local, e em pequenos volumes, pois apesar da possibilidade de canalização por meio da rede de estruturas associada às zonas de cisalhamento, a percolação parece não ter sido muito extensa. Afetou essencialmente as próprias subvulcânicas, possibilitando sua alteração hidrotermal do tipo carbonatação e concomitante mineralização, e as unidades litológicas imediatamente adjacentes, da própria Unidade Piririca, que composicionalmente ricas em CO₂, constituíram litotipos reativos, favoráveis a deposição aurífera.

A correlação as ocorrências conhecidas com as anomalias geoquímicas confirmou as hipóteses levantadas, exceto no caso do ferro. Este fato deve refletir a distância em que se encontram da área fonte os litotipos enriquecidos neste elemento (por exemplo os metarenitos ferruginosos), que no geral é um importante catalisador nos processos de deposição do ouro.

Verificou-se ainda a correlação mais direta das ocorrências com as estruturas extensivas do Sistema de Cisalhamento Ribeira, desenvolvidas no seu domínio transtrativo.

As unidades estratigraficamente indiferenciadas, a norte no Domínio Votuverava, que guardam semelhanças litológicas com a Unidade Piririca, dispõe-se essencialmente no domínio transpressivo deste sistema, e mostram apenas áreas favoráveis restritas.

Finalmente, os modelos prospectivos propostos, mostraram áreas potenciais, dentro da própria Unidade Piririca, onde ocorrências não são observadas, muitas vezes com índices de favorabilidade mais altos que das áreas dos depósitos conhecidos, estabelecendo-se assim prioridades para explorações futuras. Mas ressalta-se que a consistência dos modelos propostos pode ser significativamente ampliada, por meio de estudos de detalhe nos depósitos conhecidos, em busca de um modelo genético mais preciso, e de trabalhos de mapeamento básico, que possam contribuir com a evolução da cartografia geológica da região do Vale do Ribeira.

q) Almeida Filho (1995) no seu trabalho denominado “**Integração e análise espacial de dados na pesquisa mineral através de modelos empíricos de prospecção: um exemplo no planalto de Poços de Caldas**” cita que técnicas de geoprocessamento e manipulação de dados digitais permitem integrar dados de natureza, formatos e escalas diversos, favorecendo análises e interpretações de suas múltiplas inter-relações. A incorporação dessas novas tecnologias em campanhas de prospecção mineral, permite selecionar com maior rapidez e precisão, sítios potenciais à ocorrência de bens minerais, direcionando trabalhos de campo para áreas alvos prioritárias, o que implica em significativas reduções de tempo e custos dessas campanhas. Este trabalho exemplifica o emprego de tais técnicas, na indicação de áreas

potenciais para a pesquisa de minerais radioativos no planalto de Poços de Caldas. Mineralizações radioativas conhecidas na área ocorrem em três associações distintas: Urânio-molibdênio (U-Mo), Tório-terras raras (Th-TR) e Urânio-zircônio (U-Zr), sendo que esta última associação não desperta interesse econômico.

Para o mapeamento temático de áreas consideradas favoráveis para a pesquisa de minerais radioativos, foi definido um modelo prospectivo empírico. Segundo esse modelo, determinada área seria apontada como potencial, se nela ocorressem litologias consideradas favoráveis, cortadas por feições estruturais (falhas/fraturas) e com valores gama-radiométricos acima de limiares pré-definidos. Os critérios diagnósticos acima foram manipulados aplicando-se técnicas de álgebra booleana e médias ponderadas. Para aplicar o modelo foi criado um banco de dados digitais, onde todos os componentes foram geometricamente co-registrados. Dados no formato vetorial foram convertidos para o formato imagem, com elementos de resolução (*pixel*) equivalentes a 60 x 60 metros no terreno. Isto permitiu análises comparativas (ponto a ponto), entre os diferentes componentes do banco de dados, composto por: imagens LANDSAT; dados planimétricos (cidade, estradas, ferrovia, drenagens etc); litologias potenciais (rocha potássica, corpos intrusivos de foiaítos e rochas vulcânicas); dados estruturais (falhas/fraturas e estruturas circulares, extraídos das imagens LANDSAT); dados gama-radiométricos (radioatividade total) e ocorrências minerais radioativas conhecidas (dados usados como parâmetros de aferição dos resultados). Verificou-se que 77% das mineralizações conhecidas encontram-se associadas com as áreas indicadas como potenciais, as quais correspondem a apenas 12% da superfície total do planalto de Poços de Caldas. Esses resultados conferem boa confiabilidade ao modelo adotado. Uma desvantagem do modelo baseado em operações binárias é o fato das áreas indicadas por esse método terem prioridades idênticas para pesquisa. A aplicação do mesmo modelo prospectivo, baseado no cálculo de médias ponderadas entre os diferentes critérios diagnósticos, permite definir prioridades para pesquisa entre as áreas indicadas como potenciais. Áreas de prioridade baixa e média perfazem 11% e 7% da superfície total do planalto, encerrando mineralizações radioativas do tipo U-Zr, sem interesse econômico. Aquelas de prioridade alta correspondem a 4,5% e encerram 30% das mineralizações tipo U-Mo. Áreas de prioridade muito alta perfazem apenas 1,5% da superfície total do planalto e, a despeito de suas dimensões reduzidas, encerram 60% das mineralizações U-Mo (incluindo o depósito de Campo do Agostinho e a mina Usamu Utsumi) e 100% dos depósitos do tipo Th-TR. A significância dos resultados obtidos em Poços de Caldas, atesta a eficácia dos modelos prospectivos, os quais permitem restringir

drasticamente a região a ser investigadas em campo, com conseqüente redução de tempo e custos em trabalhos de exploração regional. Tais resultados, aliados à simplicidade do método, recomendam o uso rotineiro de tais abordagens em campanhas de prospecção mineral, nos mais diferentes ambientes geológicos brasileiros.

r) Almeida Filho (1996) no seu trabalho denominado “**Integração de dados aeromagnéticos, geológicos e de sensoriamento remoto no estudo do complexo máfico-ultramáfico de Campo Formoso-BA**” cita que o complexo máfico-ultramáfico de Campo Formoso (CCF) encerra as mais importantes mineralizações de cromo conhecidas no Brasil. A despeito disso, os conhecimentos geológicos sobre o complexo são restritos à faixa aflorante e a aspectos locais da geologia das minas. Até o presente, a exploração mineral vem sendo feita a céu aberto, mas no futuro ela deverá forçosamente avançar por sob o pacote de metassedimentos da serra de Jacobina. Nesse estudo, dados aero-magnetométricos são realçados e combinados com dados geológicas prévios e informações derivadas de sensoriamento remoto, utilizando-se técnicas de geoprocessamento e integração, visando o estudo do comportamento espacial do complexo Campo Formoso em superfície e sub-superfície. A faixa anômala pode ser dividida em três segmentos quanto a orientação. Ela inicia-se com direção NE (trecho a), assume direção EW em sua porção intermediária (trecho b) e volta à direção NE original (trecho c). Filtragens tipo continuação para cima (1000 m) indicaram que nos trechos a e b o CCF atinge profundidades maiores que no trecho c. A mina de cromo de Limoeiro está situada no limite entre a parte mais profunda e o mais rasa do complexo. A partir desse local, o CCF teria sido mais exposto à erosão, o que explicaria a ausência de mineralizações importantes no seu trecho leste (trecho c). Técnicas de Deconvolução de Euler mostram que as fontes magnéticas na região orientam-se segundo *trend* regional NE. Análises de imagens de satélite mostram que esse *trend* é controlado por falhamentos de direção geral NE, os quais são truncados por falhamentos NW, provocando deslocamentos de corpos magnéticas. Estudos mais detalhados indicam que cerca de 80% das fontes magnéticas no trecho mais raso do CCF, situam-se entre a superfície e 150 metros de profundidade; 15% entre 150 e 300 metros e apenas 5% são mais profundas que 350 metros. No trecho mais profundo cerca de 50% das fontes situando-se até 150 metros; 35% entre 150 e 250 m e 15% entre 250 e 450 metros. Um lineamento de direção NW, mais evidente à medida que aumenta a profundidade das fontes, indica deslocamentos de corpos magnéticos, com a mina de Cascabulhos situada a sul e as de Campinhos e Camarinha a norte.do lineamento. Com este estudo, foi possível delinear características importantes sobre o comportamento espacial do complexo Campo

Formoso em superfície e sub-superfície, sugerindo sua divisão em três segmentos e definindo valores de profundidades para o mesmo. De acordo com os dados magnéticos, o complexo é mais profundo a partir da coordenada UTM de 350000 km para oeste. Embora dados de modelagem estimem em 400 metros a profundidade máxima do complexo nessa região, 90% das fontes magnéticas não vão além de 300 metros. Na porção nordeste, 80% das fontes são mais rasas que 150 metros, com maior concentração entre 50-100 metros. Blocos setentrionais mais soerguidos (mais erodidos), justificariam a ausência de mineralizações importantes, nesse trecho do complexo Campo Formoso, a leste da mina de Limoeiro.

s) Quadros (2000) em seu trabalho denominado “Integração de Dados em Mapeamento de Favorabilidade Mineral para Ouro na Ilha Cristalina de Rivera (Uruguai)” citou que 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 utilizou 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.

t) Brandão (2000) em seu trabalho denominado **“Inferência Espacial para Determinação de Áreas Favoráveis à Ocorrência de Cu e Zn no Pojuca, Carajás, Pará”** citou que atualmente, são várias as técnicas disponíveis em Sistemas de Informação Geográficas (GIS), utilizadas para fins diversos como ferramentas que dão suporte à tomadas de decisões, a partir de relações entre dados espaciais. Nas Geociências, o uso destas técnicas tem se tornado cada vez mais comum, principalmente no que diz respeito a modelos prospectivos de pesquisa mineral de cunho econômico. Neste contexto, este trabalho se propõe utilizar alguns dos principais métodos de inferência espaciais para a determinação de áreas favoráveis à ocorrência de Cu e Zn na área do Pojuca, Província Mineral de Carajás, Estado do Pará. Os métodos escolhidos foram: *Booleano*, *Técnica de Processo Analítico Hierárquico (AHP)* e *Fuzzy Gama*. Todos os processamentos e análises dos dados foram realizados no *software* Spring 3.4, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A metodologia adotada para o trabalho foi a sugerida por Bonham-Carter (1994) para mapeamento de potencial mineral em SIG e consiste em três etapas: 1) Construção da base de dados espaciais; 2) Processamento dos dados e; 3) Aplicação do modelo de integração. Dentre os métodos escolhidos o **AHP** foi o que apresentou melhor resultado, pois, além de considerar uma certa tolerância para a ocorrência, restringiu melhor as áreas investigadas em função da relação com os lineamentos estruturais. Adicionalmente, os demais métodos apresentaram resultados coerentes, mostrando que as técnicas de integração disponíveis num Sistema de Informação Geográfica (GIS) podem ser ferramentas de grande auxílio nos trabalhos de investigação de áreas de potencial mineral.

u) Fornazzari Neto *et al.* (2001) em seu trabalho intitulado **“Gamaespectrometria da Ocorrência de Ouro do Morro do Carneiro Branco-SC”** citam que uma das aplicações da moderna gamaespectrometria é a identificação de áreas de alteração hidrotermal e a investigação de suas relações genéticas com os processos de mineralização em diversos sítios geológicos. A pesquisa desses autores delimita a assinatura gamaespectrométrica em áreas de ocorrência de ouro, caracterizadas por veios de quartzo enriquecidos em sulfetos e com espessura média de 2 metros. O teor médio da área de interesse é de 6 g/ton (localizadamente acima de 17 g/ton, em uma zona de cisalhamento associada com uma pequena intrusão granitóide). A assinatura gamaespectrométrica no terreno denota altos teores de Urânio e Tório, baixas razões de Th/K e valores anômalos de Fator “F” ($F = K \cdot U / Th$). Esses padrões refletem uma zona de alteração hidrotermal caracterizada por um intenso processo de sericitização dos feldspatos potássicos.

v) Fornazzari Neto *et al.* (2001) em seu trabalho intitulado **“Gamaespectrometria Aplicada à Prospeção de Ouro na Folha Botuverá-SC”** desenvolveram estudos acerca das respostas gamaespectrométricas ao longo de uma linha de vôo que corta uma área de alteração hidrotermal associada a uma intrusão de rochas granitóides de pequenas dimensões, também seccionada por uma zona de cisalhamento. Essa estrutura aloja veios de quartzo enriquecidos em sulfetos. Em um segundo estágio das pesquisas, as variáveis gamaespectrométricas foram analisadas em detalhe ao longo de 37 linhas de vôo distribuídas sobre uma área de 15 x 15 km². O resultado apontou pelo menos três novos alvos prospectivos baseados nos elevados valores de Fator “F” ($F = K \cdot U / Th$) e nas anomalias de eU and K normalizadas pelo Tório e também nos baixos valores da razão Th/K.

x) Gualda *et al.* (2001) em seu trabalho intitulado **“Integração de Dados Aerogamaespectrométricos e Geológicos para a Individualização de Maciços Graníticos na Região da Serra da Graciosa (PR)”** indicaram que os granitos da Serra da Graciosa, no Estado do Paraná/BR são importantes registros do magmatismo pós-colisional que formou a Província da Serra do Mar, nos estágios finais da evolução do Ciclo Brasileiro (60-850 Ma) essas rochas ainda são pouco estudadas, principalmente devido a dificuldade de acesso à área.

Os autores utilizaram dados geológicos e de aerogamaespectrometria para identificar e delimitar as intrusões graníticas. Cinco ocorrências foram identificadas, cada uma com dimensões entre 40 km² e 100 km². Essas intrusões sustentam o relevo das mais elevadas montanhas da área e são caracterizadas por anomalias positivas de K, eU e eTh, quando

comparadas com os gnaisses e anfibolitos do embasamento. Estes resultados indicaram a necessidade de definir-se cinco maciços independentes na área.

y) Portela Filho *et al.* (2001) no seu trabalho denominado **“Comparação entre Granitóides de parte da Serra do Mar no Estado do Paraná através da Aerogamaespectrometria”** fizeram uso de dados gamaespectrométricos para comparar duas unidades geológicas de composição granitóide dos Domínios Paranaguá e Serra do Mar, situados no sudeste do Estado do Paraná. Essas rochas possuem histórias evolutivas transcorridas durante o final do Proterozóico. Os resultados obtidos mostram que a distribuição dos valores de eTh , K e eTh/eU , bem como o parâmetro Fator “F” ($F=K*eTh/eU$) corresponde a indicadores geoquímicos de diferenciação magmática, alcalinidade e uma avaliação da mobilidade dos radionuclídeos no terreno, o que permitiu exibir as diferenças entre as unidades litológicas.

Ferreira *et al.* (2001) em seu trabalho denominado **“Gamaespectrometria do Granito Serra do Carambeí – PR”** apresentaram o mapeamento aerogamaespectrométrico do granito alcalino uranífero da Serra do Carambeí- PR (9,9 ppm U3O8), situado em Carambeí PR. O estudo verificou uma boa correlação entre os dados gamaespectrométricos dos solos obtidos em campo e os dados aerogamaespectrométricos obtidos pelo projeto Serra do Mar Sul. As observações de campo corroboraram que as anomalias de Urânio estão associadas a diques félsicos. Embora os valores de Th variem, foi possível delimitar o granito alcalino da Serra do Carambeí e distingui-lo das rochas álcico-alcálicas encaixantes, vinculadas ao Complexo Granítico Cunhaporanga.

z) Fraser & Agar (1997) desenvolveram um estudo denominado **“GIS integration of airborne multispectral, geophysical and other mineral exploration data at the El Halcon Porphyry Copper Prospect, Copiapo, Chile”** onde diversos conjuntos de dados foram convertidos para o meio digital de forma a possibilitar a integração e a interpretação dos dados geológicos, geofísicos e de sensoriamento remoto conjuntamente. Esse procedimento possibilitou a verificação de áreas que possuíam poucos dados disponíveis, bem como possibilitou a definição de locais para o adensamento das pesquisas com um grau de acurácia mais elevado. O processo de integração de dados possibilitou a clarificação de muitas relações geológico-geofísicas, em especial observou-se que:

- os valores elevados de polarização induzida correspondem a halos de alteração hidrotermal;
- os valores baixos de polarização induzida refletem os limites das zonas hidrotermalizadas, ou estão associados a zonas de silicificação;

- os valores de resistividade são ambíguos, pois refletem porções com acentuada alteração hidrotermal e porções com baixo grau de alteração;

O processo de combinação dos diversos conjuntos de dados permitiu maximizar o potencial interpretativo de cada conjunto distinto, quando ocorreu o cruzamento de informações, bem como possibilitou que se verificasse onde era necessária a aquisição de novos dados para a continuidade das pesquisas.

3.3.6.5.7.2.1- DISCUSSÃO

Os artigos e estudos de caso descritos exibem a complexibilidade da aplicação de modelos de decisão geologicamente realísticos, principalmente devido ao fato de ainda existir um grande desconhecimento dos processos que conduzem à formação dos depósitos minerais.

Por exemplo, os modelos empíricos utilizados por Bonham- Carter (1988) e por Tighe *et al.* (1995) são úteis quando os modelos genéticos não são bem entendidos, ou existem poucos dados disponíveis. A investigação assume que outros depósitos do mesmo tipo existem, mas ainda não foram descobertos. A vantagem do sistema proposto por Tighe *et al.* (1995) é que uma grande área pode ser rapidamente analisada, por meio de uma imagem de satélite, de forma que se pode obter um cenário amplo e facilitar a seleção de áreas onde as características para a ocorrência de depósitos minerais são mais relevantes.

O modelo baseado no conhecimento elaborado por Bonham- Carter *et al.* (1991), ou o modelo de árvore de decisão de Bonham- Carter *et al.* (1995) necessitam de bases de dados consistentes para possibilitar uma boa avaliação. Na prática, muitos mapas geológicos são formulados embasados em poucos dados realmente obtidos em afloramentos. A consequência direta disso é que os contatos geológicos e as estruturas tectônicas da área são pouco conhecidos e, assim, muitos dos critérios que são necessários para a avaliação concisa do potencial mineral não são observados.

CAPÍTULO 4

4- PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS

O processamento dos dados aerogeofísicos buscou formular as bases, *grids* e superposições necessárias à formulação do embasamento mais consistente para as interpretações geológicas, estruturais e prospectivas sobre a área.

Para tanto, foram efetuados os seguintes procedimentos:

4.1- PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS

O *software* básico utilizado para o processamento dos dados foi o OASIS MONTAJ, descrito anteriormente.

Neste *software*, inicialmente, foi gerado um mapa de linhas de vôo, com a finalidade de permitir a visualização da forma como foi conduzido o aerolevanteamento, bem como permitir a interpretação de quaisquer artefatos que porventura viessem a estar associados com o padrão das linhas de vôo. Cabe ressaltar que o padrão das linhas de vôo se desenvolveu no sentido Leste-Oeste. Posteriormente a geração desse mapa, foi utilizada a seguinte metodologia de análise e de processamento dos dados aerogeofísicos:

- a) formulação de uma área de trabalho (*Oasys Montaj Workspace*);
- b) formulação de um banco de dados (*Oasys Montaj Database*);
- c) importação do banco de dados xyz (ASCII- na forma de coordenadas, com a medida de cada grandeza de interesse);
- d) preparação dos layouts para grids (*New map; Draw new map*);
- e) elaboração de mapas base (base map) para cada mapa de células (*grid*);
- f) geração dos mapas de células (*Grid; gridding; minimum curvature; dialog controls*), os quais permitem a visualização bidimensional da distribuição espacial das variáveis. Esse passo constituiu a base para as etapas posteriores de processamento, tais como filtragens,

definição de contornos e processamento de imagem. Para todos os *grids*, foi utilizada a tabela de cores 128 tons do padrão RGB.

O método de interpolação utilizado neste trabalho foi por mínima curvatura. Segundo Roldão (2000) o método de mínima curvatura consiste em interpolar os dados brutos em uma superfície bidimensional, de forma que a curvatura dessa superfície seja ajustada. Esse método é fundamentado no inverso das distâncias para estimar os valores dos nós da malha regular. A estimativa por mínima curvatura inicia com a construção de uma malha que alcança, normalmente, 8 vezes o tamanho da célula final; após, divide-se o tamanho da célula por dois e repete-se o mesmo procedimento com a utilização da malha gerada na superfície anterior. Esse processo é repetido até que a superfície de curvatura mínima seja ajustada à malha pré-determinada. A transposição dos valores medidos para uma malha regular quadrada é comumente efetuada mediante um algoritmo; esse algoritmo (RANGRID) utiliza uma determinada função para definir o valor de cada nó, com base nos pontos mais próximos. Para os *grids* aerogamaespectrométricos o espaçamento utilizado foi de 75 x 75 metros (¼ do espaçamento das linhas de vôo);

g) após a elaboração, ocorreu a inserção dos *grids* (*Mapping; grid image; single grids*);

h) posteriormente, foi efetuada a análise da estatística de cada coluna do banco de dados (*Grid; grid stats; extended*). Quando ocorreram dados radiométricos com valores negativos, esses foram retirados com a utilização de comandos para a extração de limiares específicos dos dados (*Grid; grid expressions, remove base*);

i) quando os *grids* apresentaram ruído devido a ocorrência do fenômeno de *alias*, foi aplicado um filtro passa-baixo. Esse fenômeno é causado por anomalias com comprimento de onda muito baixo, devidas às pequenas variações internas de uma determinada litologia. Para suavizar esse efeito, é utilizado um filtro *antialias*, denominado passa-baixa (*low-pass*) (Roldão 2000). Nessa Tese, o filtro passa-baixa foi aplicado primeiramente no canal do Urânio, por ser o canal que apresenta mais problemas de geração de mapas devido ao seu equilíbrio radiométrico. Posteriormente, os demais canais foram testados quanto ao *alias* e filtrados. Os dados gerados a partir da aplicação desse filtro, assim como os dados gerados em um processo de interpolação para elaboração de *grids*, devem passar por uma análise estatística, de forma a verificar se os dados não foram distorcidos. Nos casos examinados nesse estudo, verificou-se que a estatística dos dados filtrados manteve praticamente os mesmos valores quando comparados com a estatística dos dados originais. A única mudança

significativa após a filtragem foi a diminuição do intervalo amostral, o que é uma expectativa normal de ocorrer, pois a filtragem tende a suavizar os valores filtrados. O histograma dos dados filtrados praticamente reproduziu o histograma dos dados originais, o que indicou que o filtro passa-baixa não alterou as propriedades estatísticas dos dados aerogamaespectrométricos.

j) quando os *grids* apresentaram ruído devido a interferência dos dados relacionados às linhas de vôo, foi utilizado o filtro cosseno direcional (DCOS) para remover feições em uma determinada direção, no caso, a direção das linhas de vôo (*cf.* Roldão 2000), o que permitiu o realce das feições lineares mascaradas pelas primeiras. Nesse trabalho, foi utilizado primeiramente o filtro na potência mais suave (potência 12), na direção leste-oeste (direção da linha de vôo) e aplicado nos *grids* de todos os canais aerorradiométricos (CT, K, Th e U). Os mapas gerados por esse processamento mostraram visualmente (qualitativamente) que o efeito causado pelas linhas de vôo foi eliminado. O controle quantitativo do processo de interpolação (“gridagem”) foi efetuado a partir da análise estatística desses dados gerados. A comparação entre os dados interpolados e dados originais mostrou que: **(i)** a distribuição dos valores estimados comportou-se de forma mais simétrica que os valores originais (observado principalmente no canal de K) e **(ii)** a variância e o coeficiente de variação dos valores estimados diminuiu em relação aos valores originais.

k) em todos os *grids* primários e derivados foi utilizada a premissa de buscar-se a identificação de áreas anômalas, as quais, tendem a ser mais favoráveis à concentração dos elementos incompatíveis, entre os quais o ouro. Para tanto, em cada *grid* foi utilizada a ferramenta de geração de contorno disponível no aplicativo e efetuado um contorno das áreas anômalas que, em termos matemáticos, correspondem às áreas que contém valores iguais a média dos valores do *grid*, mais três desvios padrão (*Mapping; contour; level styles; editar; contour*). Esse patamar matemático da média acrescida de três vezes o desvio padrão do conjunto de dados permite a separação das anomalias verdadeiras, ou seja, aquelas áreas nitidamente contrastantes do entorno e, conseqüentemente fortemente diferenciadas do restante da população de dados. Isso é o padrão normal de procedimento prospectivo em campanhas de geoquímica de solos e de sedimento de corrente quando o alvo é ouro, e, se for considerado que a aerogamaespectrometria pode ser considerada uma forma de prospecção geoquímica muito similar aos solos e sedimentos de corrente, se optou por seguir o mesmo critério para a separação de áreas anômalas;

l) por último, foi efetuada uma análise crítica de cada *grid* obtido, com a finalidade de verificar a consistência dos dados obtidos, com relação ao contexto da região.

Os *grids* gerados podem ser agrupados em quatro tipos distintos:

- **Grids de canais:** são aqueles que registram a distribuição de cada um dos canais primários de leitura dos dados aerogamaespectrométricos (U, Th, K, Contagem Total);

- **Grids de razões:** são aqueles gerados a partir de razões entre os canais primários (U/K, U/Th, Th/K) e que permitem verificar o comportamento pareado de cada elemento;

- **Grids de equações específicas:** são aqueles formados a partir de equações matemáticas que representam relações entre os diversos canais ou razões, de forma a identificar um produto específico de interesse no terreno (i.e.: zonas de alteração hidrotermal enriquecidas em K, etc.) exemplos dessas equações entre *grids* são:

- Fator F de alteração. $F = U/Th \times K$ (*Grid; grid expressions; multiply grids U/Th x K*);
- K normalizado pelo Th para salientar apenas o Potássio vinculado a alteração hidrotermal. $Kd = (K - K_i) / K_i$, onde $K_i = (\text{média de Th}) \times Th$ [*Grid expressions; multiply by factor; (Ki); subtract grids; (k - Ki); ratio grids; (K - Ki) / Ki*];
- U normalizado pelo Th para salientar apenas o Urânio associado a alteração hidrotermal. $Ud = ((U - U_i) / U_i)$, onde $U_i = (\text{média de u} / \text{média de Th}) \times Th$.

- **Grids ternários:** são aqueles compostos por agrupamentos triplos de variáveis em um triângulo isóceles, onde em cada vértice se encontra uma variável (canais primários, razões, ou mesmo equações específicas).

Neste trabalho, foram gerados os *grids* das Figuras 30 a 42., os quais apresentaram os seguintes parâmetros matemáticos e estatísticos:

- GRIDS DE CANAIS PRIMÁRIOS

Grid de Contagem Total (CT):

- Itens válidos: 882.808

- Valor mínimo: 131,58 cps
- Valor máximo: 7.630,54 cps
- Valor médio: 1.295,16 cps
- Desvio padrão: 500,88 cps
- Elementos em X: 1.551
- Elementos em Y: 1.776
- Espaçamento em X: 75m
- Espaçamento em Y: 75m
- Mediana: 1.159,88 cps
- Anomalia marcada em mapa (média + 3 desvio padrão): 2.797,80 cps

O mapa da **Figura 30** exibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do canal de contagem total.

**FIGURA 30. DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DO CANAL DE CONTAGEM TOTAL.**

Grid do Potássio:

- Itens válidos: 883.208
- Valor mínimo: 31,22 cps
- Valor máximo: 475,05 cps
- Valor médio: 182,13 cps
- Desvio padrão: 39,81 cps
- Elementos em X: 1.512
- Elementos em Y: 1.777
- Espaçamento em X: 75 m
- Espaçamento em Y: 75 m
- Mediana: 168,37 cps
- Anomalia (média + 3 desvio padrão): 301,56 cps

O mapa da **Figura 31** exhibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do canal de Potássio (K).

**FIGURA 31. DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DO CANAL DE POTÁSSIO (K).**

Grid do Urânio:

- Itens válidos: 883.208
- Valor mínimo: 16,23 cps
- Valor máximo: 143,10 cps
- Valor médio: 46,48 cps
- Desvio padrão: 9,44 cps
- Elementos em X: 1.512
- Elementos em Y: 1.777
- Espaçamento em X: 75 m
- Espaçamento em Y: 75 m
- Mediana: 44,79 cps
- Anomalia (média + 3 desvio padrão): 74,80 cps

O mapa da **Figura 32** exibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do canal de Urânio (U).

**FIGURA 32. DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMASPECTROMÉTRICAS DO CANAL DE URÂNIO (U).**

Grid do Tório:

- Itens válidos: 883.208
- Valor mínimo: 5,0067 cps
- Valor máximo: 720,21 cps
- Valor médio: 187,70 cps
- Desvio padrão: 27,13 cps
- Elementos em X: 1.512
- Elementos em Y: 1.777
- Espaçamento em X: 75 m
- Espaçamento em Y: 75 m
- Mediana: 180,32 cps
- Anomalia (média + 3 desvio padrão): 269,09 cps

O mapa da **Figura 33** exibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do canal de Tório (Th).

**FIGURA 33. DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMASPECTROMÉTRICAS DO CANAL DE TÓRIO (TH).**

- GRIDS DE RAZÕES A PARTIR DOS CANAIS PRINCIPAIS

Grid de razão Th/K:

- Itens válidos: 883.208
- Valor mínimo: 0,032 cps
- Valor máximo: 19,15 cps
- Valor médio: 1,069 cps
- Desvio padrão: 0,26 cps
- Elementos em X: 1.512
- Elementos em Y: 1.777
- Espaçamento em X: 75 m
- Espaçamento em Y: 75 m
- Mediana: 1,06 cps
- Anomalia (média + 3 desvio padrão): 1,849 cps

O mapa da **Figura 34** exibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do **Grid** de razão Th/K.

**FIGURA 34 EXIBE A DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DO *GRID* DE RAZÃO TH/K.**

Grid de razão U/Th:

Itens válidos: 883.208

- Valor mínimo: 0,06 cps

- Valor máximo: 15,67 cps

- Valor médio: 0,25 cps

- Desvio padrão: 0,04 cps

- Elementos em X: 1.512

- Elementos em Y: 1.777

- Espaçamento em X: 75m

- Espaçamento em Y: 75m

- Mediana: 0,24 cps

- Anomalia verdadeira marcada em azul no mapa (média +3 desvio padrão): 0,37 cps

- Anomalia de segunda ordem marcada em preto no mapa (média +3 desvio padrão): 0,37 cps

O mapa da **Figura 35** exibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do **Grid** de razão U/Th.

**FIGURA 35. DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DO *GRID* DE RAZÃO U/TH.**

Grid de razão U/K:

- Itens válidos: 883.208
- Valor mínimo: 0,06 cps
- Valor máximo: 15,67 cps
- Valor médio: 0,25 cps
- Desvio padrão: 0,04 cps
- Elementos em X: 1.512
- Elementos em Y: 1.777
- Espaçamento em X: 75m
- Espaçamento em Y: 75m
- Mediana: 0,24 cps
- Anomalia verdadeira marcada em azul no mapa(média +3 desvio padrão): 0,37 cps
- Anomalia de segunda ordem marcada em preto no mapa (média +3 desvio padrão): 0,37 cps

O mapa da **Figura 36** exhibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do **Grid** de razão U/K.

**FIGURA 36. DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DO *GRID* DE RAZÃO U/K.**

- **GRIDS DE ALGORITMOS COMPLEXOS**

Grid de Fator F

- Itens válidos: 883.208
- Valor mínimo: 6,31 cps
- Valor máximo: 2.453,3 cps
- Valor médio: 45,19 cps
- Desvio padrão: 13,3 cps
- Elementos em X: 1.512
- Elementos em Y: 1.777
- Espaçamento em X: 75 m
- Espaçamento em Y: 75 m
- Mediana: 42,40 cps
- Anomalia (média + 3 desvio padrão): 85,09 cps
- Fórmula: $F = U/Th \times K$ **eq. 45**

O mapa da **Figura 37** exibe a distribuição de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do **Grid** de Fator F.

**FIGURA 37. DISTRIBUIÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DO *GRID* DE FATOR F.**

Grid de anomalia de U normalizado pelo Th:

- Itens válidos: 883.208
- Valor mínimo: 1,17 cps
- Valor máximo: 63,63 cps
- Valor médio: 1,93 cps
- Desvio padrão: 0,17 cps
- Elementos em X: 1.512
- Elementos em Y: 1.777
- Espaçamento em X: 75 m
- Espaçamento em Y: 75 m
- Mediana: 1,92 cps
- Anomalia (média + 3 desvio padrão): 2,44 cps
- Fórmula base: $U_d = (U - U_i)/U_i$, onde

$$U_i = (\text{média de } U / \text{média de } Th) \times Th \quad \text{eq. 46}$$

O mapa da **Figura 38** exibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do **Grid** de anomalia de U normalizado pelo Th.

**FIGURA 38. DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DO *GRID* DE ANOMALIA DE U
NORMALIZADO PELO TH.**

Grid de anomalia de K normalizado pelo Th:

- Itens válidos: 882.808
- Valor mínimo: 1 cps
- Valor máximo: 33,18 cps
- Valor médio: 1,96 cps
- Desvio padrão: 0,24 cps
- Elementos em X: 1.512
- Elementos em Y: 1.777
- Espaçamento em X: 75
- Espaçamento em Y: 75
- Mediana: 1,93 cps
- Anomalia (média + 3 desvio padrão): 2,68 cps
- Fórmula base:

$K_d = (K - K_i)/K_i$, onde:

$$K_i = (\text{média de } K / \text{média de } Th) \times Th \quad \text{eq. 47}$$

O mapa da **Figura 39** exibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do **Grid** de anomalia de K normalizado pelo Th.

**FIGURA 39. DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DO *GRID* DE ANOMALIA DE K
NORMALIZADO PELO TH.**

- **GRIDS TERNÁRIOS**

Os *grids* ternários são aqueles formados pela composição de três outros *grids* que podem ser tanto aqueles originados pelos canais principais (CT, U, Th e K), pelas razões entre esses canais, ou, mesmo, pelos *grids* formados a partir de algoritmos de cálculo (Fator “F”, anomalias de K, anomalias de U) ou outros de interesse do pesquisador.

Esses *grids* foram elaborados por meio da utilização de uma ferramenta específica disponível no *software* OASIS MONTAJ, que permite a manipulação e a combinação de *grids* pré-existentes.

Os grids ternários elaborados foram:

Grid Ternário dos Canais Urânio/Tório/Potássio: este *grid* busca apresentar uma combinação entre os canais principais de leitura, de forma a indicar áreas de concentração de um dos elementos e, proporcionalmente, diminuição do teor dos outros elementos, ou, indicar áreas de ocorrência de iguais teores.

O mapa da **Figura 40** exibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do **Grid Ternário Urânio/Tório/Potássio**.

**FIGURA 40. DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DO *GRID* TERNÁRIO
URÂNIO/TÓRIO/POTÁSSIO**

Grid Ternário razão Urânio/Tório - razão Tório/Potássio - razão Urânio/Potássio: este *grid* busca apresentar uma combinação entre os grids das razões efetuadas entre os canais principais de leitura, de forma a indicar áreas de concentração de uma das razões e, proporcionalmente, diminuição do teor das outras razões, ou, indicar áreas de ocorrência igual dos teores dessas razões.

O mapa da **Figura 41** exibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas a partir do *Grid* Ternário razão Urânio/Tório - razão Tório/Potássio - razão Urânio/Potássio.

**FIGURA 41. DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS A PARTIR DO *GRID* TERNÁRIO RAZÃO
URÂNIO/TÓRIO - RAZÃO TÓRIO/POTÁSSIO - RAZÃO URÂNIO/POTÁSSIO.**

Grid Ternário Fator “F”- Anomalias de Urânio - Anomalias de Potássio: este *grid* busca apresentar uma combinação entre os canais principais de leitura, de forma a indicar áreas de concentração de um dos fatores indicados por uma das equações e, proporcionalmente, diminuição do teor dos outros fatores, ou, indicar áreas de ocorrência igual dos teores expressos por esses fatores.

O mapa da **Figura 42** exhibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas a partir do *Grid* Ternário Fator “F”- Anomalias de Urânio - Anomalias de Potássio.

**FIGURA 42. DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS A PARTIR DO *GRID* TERNÁRIO FATOR
“F” - ANOMALIAS DE URÂNIO - ANOMALIAS DE POTÁSSIO**

4.1.1- INTERPRETAÇÃO DOS MAPAS E DAS ANOMALIAS AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS

A análise aerogamaespectrométrica foi efetuada a partir da interpretação dos diversos *grids* gerados anteriormente, que buscaram retratar a continuidade espacial das respostas gamaespectrométricas. Essa análise permitiu a elaboração das seguintes conclusões:

- Grid de contagem total:

A interpretação desse mapa permitiu uma boa separação litológica, principalmente com relação aos limites das intrusões da **SGL**. Com relação a esta suíte granítica, se observou uma nítida separação de compartimentos na intrusão **GRJ**, situada mais ao sul da área. Essa separação ocorre aproximadamente na porção mediana da intrusão. A porção Nordeste apresentou valores elevados de cps que indicam teores altos de U, Th e K associados, possivelmente a rochas mais diferenciadas, enquanto que a porção sul da intrusão apresentou valores baixos de cps que devem indicar rochas menos diferenciadas.

As rochas do **CPN** foram associadas a zonas de valores baixos a intermediários de cps a não ser na porção Norte-noroeste da área, próximo ao aglomerado de garimpos da Torre, que se mostrou uma região de valores mais elevados, o que pode ser considerado um indício importante em termos metalogenéticos, bem como pode significar uma variação faciológica no interior dessa unidade litodêmica.

As rochas da **SMN** foram associadas a zonas de valores baixos a intermediários de cps, bem como a maior parte das rochas vinculadas a **SGgM**, que também apresentaram essa característica.

Com relação a **FMC**, se observou uma nítida separação desta com relação a **SMN**, materializada no mapa por um contato acentuadamente retilíneo, marcado por respostas de cps elevada para a **FMC** e respostas baixas a intermediárias para a **SMN**. Isso indica que os metassedimentos que constituem a **FMC** são mais enriquecidos em K, Th e U do que os metassedimentos que compõem a **SMN**. As rochas da **FP** apresentaram respostas elevadas de cps que indica que são compostas por litotipos mais enriquecidos em K, Th e U. Por último, as **CC**, principalmente as aluvionares associadas às drenagens de maior porte e de porte médio apresentaram respostas elevadas em cps, o que permitiu uma boa delimitação dos contatos dos aluviões no terreno.

Em termos gerais todas as ocorrências estão associadas a áreas de respostas elevadas de cps, o que pode constituir-se em um importante argumento para a pesquisa prospectiva e a integração de dados que será desenvolvida nos próximos itens.

A maioria das anomalias foi associada aos arenitos da Formação Pimenteiras, o que indica que esses litotipos são fortemente enriquecidos em K, Th e U. A única anomalia que registrou ocorrências auríferas situou-se sobre os garimpos Paranaense, Enza, Magalhães e Verena, todos situados na borda do granito Monte do Carmo.

Tabela XVII. Características das áreas anômalas em Contagem Total detectadas pelo levantamento aerogeofísico.

Anomalia de contagem total	Unidade Geológica	Estrutura Associada	Intercessão Ocorrências	Forma
A	SGI - GRJ	Não	Não	Amebóide
B	GRJ	Não	Não	Amebóide
C	GC	Sim	Magalhães 1,2,3	Alongada NE
D	FP	Não	Não	Amebóide
E	FP	Não	Não	Amebóide
F	FP	Não	Não	Alongada NW
G	FP	Não	Não	Alongada NW
H	FP	Não	Não	Alongada NW
I	FP	Não	Não	Alongada NW
J	FP	Não	Não	Alongada NW

O mapa da **Figura 43** exibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas interpretadas a partir do *Grid* de Contagem Total.

**FIGURA 43. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS INTERPRETADAS A PARTIR DO
GRID DE CONTAGEM TOTAL.**

- **Grid do Potássio:**

As principais feições observadas no mapa do canal do Potássio são as seguintes:

Ao longo dos principais canais fluviais da área notam-se respostas positivas, que permitem delinear os locais de acúmulo de sedimentos e de depósitos aluviais, com uma elevada porcentagem de K, provavelmente associado a feldspatos, já que a composição principal é de areias quartzo-feldspáticas.

A segunda feição mais marcante observada no mapa é a correlação das áreas mais enriquecidas em Potássio, com as rochas da Suíte Granítica Ipueiras. De Sudoeste para Nordeste, observa-se, na intrusão **GRJ**, que a porção norte-nordeste exhibe valores elevados de cps de Potássio, enquanto que a porção sul-sudoeste exhibe valores baixos de cps de Potássio. Essa distinção pode indicar a ocorrência de duas fácies diferentes, uma mais e outra menos diferenciada, ou mesmo que a intrusão granítica seja, menor em área, e constituída apenas pela porção norte-nordeste.

A maior mobilidade geoquímica do Potássio pode constituir o fator causador do aumento da área com elevada resposta de K a qual pode ter sido formada a partir de dispersão supergênica e movimentações de solos das encostas para as áreas planas circunvizinhas à intrusão. De qualquer forma, essa dispersão é baixa, considerando-se o mapeamento desenvolvido sobre a intrusão.

Quanto à intrusão **GCI**, nota-se que a área exhibe um conteúdo elevado de cps de Potássio, porém a forma do conjunto é quase amebóide e maior do que a superfície mapeada, o que pode indicar a atuação mais proeminente de processos de dispersão supergênica e movimentações de solos nessa área.

Na porção Norte-nordeste da área, a intrusão **GMC** também exhibe uma resposta fortemente positiva de Potássio, porém também com formato consideravelmente maior e mais irregular do que o estimado pelo mapeamento geológico, o que pode indicar a ocorrência de processos de dispersão supergênica associados.

Quanto às rochas da **SGgM**, quando correlacionadas com o mapa geológico e de pontos de campo, observa-se dois tipos de respostas distintas. Na área das ocorrências Fofoca, Roque e Palhada, na porção centro-nordeste da região, e nas áreas das ocorrências Manduca e Teco, mais a norte, observa-se uma resposta elevada em cps de Potássio, coerente com as

análises geoquímicas e petrográficas obtidas nesses locais. Essas análises indicam a ocorrência de rochas metagranitóides gnaissificadas de composição sienogranítica e de afinidade geoquímica cálcico-alcálica alto K. Já em outras porções, circunvizinhas as intrusões da Suíte Granítica Ipueiras, observa-se que as rochas associadas à **SGgM** apresentam baixas respostas em termos de cps de Potássio. Isso pode indicar que são, composicionalmente, menos diferenciadas o que conduz a duas possibilidades: a primeira é que constituam fácies menos diferenciadas da mesma unidade litodêmica e a segunda é que constituam outra unidade litodêmica ainda não definida, caracterizada e delimitada.

As rochas do **CPN** foram associadas a zonas de valores baixos a intermediários de cps a não ser na porção Norte-noroeste da área, próximo ao aglomerado de garimpos da Torre, que mostrou-se uma região de valores mais elevados, o que pode ser considerado um indício importante em termos metalogenéticos, bem como pode significar uma variação faciológica no interior dessa unidade litodêmica. Já as rochas da **SMN** foram associadas a zonas de valores baixos a intermediários de cps. Com relação a **FMC**, observou-se uma nítida separação desta com relação a **SMN**, materializada no mapa por um contato acentuadamente retilíneo, marcado por respostas de cps elevada para a **FMC** e respostas baixas a intermediárias para a **SMN**. Isso indica que os metassedimentos que constituem a **FMC** são mais enriquecidos em K, Th e U do que os metassedimentos que compõem a **SMN**. As rochas da **FP** apresentaram respostas elevadas de cps que indica que são compostas por litotipos mais enriquecidos em K, Th e U. Por último, as **CC**, principalmente as aluvionares associadas às drenagens de maior porte e de porte médio apresentaram respostas elevadas em cps, o que permitiu uma boa delimitação dos contatos dos aluviões no terreno.

Em geral, todas as ocorrências estão associadas a áreas de respostas elevadas de cps, o que pode constituir-se em um importante argumento para a pesquisa prospectiva e a integração de dados que será desenvolvida nos próximos itens.

Em termos da análise de distribuição de anomalias, permitiu a separação de largas anomalias no interior do Granito Córrego Itabóca, da **SGI**. Apenas os garimpos Caracol, Catuaba e Matão foram associados às anomalias de K. Considerando-se a forte alteração hidrotermal potássica associada a esses garimpos, pode-se deduzir que as outras zonas são fortemente favoráveis para a localização de novas ocorrências. Nenhuma anomalia situou-se nesse pacote litológico nos setores situados sobre o Granito Ribeirão Jacaré, algumas anomalias foram associadas aos pacotes sedimentares. Porém, ocorre, sobre essa unidade uma

grande anomalia de K vinculada ao bordo nordeste da intrusão. A maioria das ocorrências situou-se sobre áreas mais enriquecidas em K.

As rochas sedimentares da Formação Pimenteiras ocorrem como baixos para K.

A **Tabela XVIII** demonstra algumas das principais características relacionadas às anomalias de Potássio da região de Porto Nacional (TO):

Tabela XVIII. Principais características relacionadas às anomalias

de Potássio da região de Porto Nacional (TO).

Anomalia Tório	Unidade Geológica	Estrutura Associada	Intercessão Ocorrência	Forma
A	SGI	Não	Caracol, Catuaba, Matão	Amebóide
B	SGI	Não	Não	Amebóide
C	SGI	Não	Não	Amebóide
D	SGI	Não	Não	Amebóide
E	SGI	Não	Não	Amebóide
F	SMN	Não	Não	Amebóide
G	SMN	Não	Não	Amebóide

O mapa da **Figura 44** exhibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas interpretadas a partir do *Grid* de Potássio.

**FIGURA 44. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS INTERPRETADAS A PARTIR
DO *GRID* DE POTÁSSIO.**

- **Grid do Tório:**

O mapa do canal do Tório foi interpretado com o intuito de separar domínios que pudessem representar contatos litológicos no terreno. Isso se deveu a menor mobilidade deste elemento, que deve representar, de forma mais aproximada, a rocha posicionada no substrato.

Com relação ao mapa de respostas do canal do Tório, podem ser elaboradas as seguintes considerações:

Em termos de separação litológica, observa-se no mapa do Tório uma boa correlação dos valores elevados de cps com as rochas da **SIG**, em especial o **GMC** e o **GCI**. Essas duas intrusões exibem uma boa conformação de contatos observados no mapa do Tório, com aqueles visualizados no mapa litológico. O teor elevado de Tório, responsável pela nítida resposta dessas rochas é coerente com as características geoquímicas alcalinas metaluminosas identificadas para essas unidades litodêmicas por Gottardo (1996). Uma particularidade relevante pode ser observada com relação a essa unidade litodêmica, qual seja: ocorrem três segmentos fortemente linearizados e de forma poligonal dentada na porção leste da intrusão **GCI**. Essas feições, definidas por uma zona de alta resposta e outra de baixa resposta, podem indicar segmentos mais retilíneos da **ZCCM**, ou a ocorrência de falhas e fraturas frágeis nessa porção da intrusão.

Considerando-se a intrusão **GRJ**, nota-se uma clara separação de duas porções, que parecem dividir a intrusão em segmentos de igual distribuição areal. A porção norte-nordeste exibe uma forte resposta em Tório, o que pode sugerir rochas enriquecidas nesse elemento e com tendência a serem mais diferenciadas em termos geoquímicos. Já a porção sul-sudoeste exibe uma baixa resposta em Tório, que parece sugerir rochas com baixo teor de Tório. Ressalta-se que o contato entre essas duas porções é brusco, e não exibe gradientes ou transições, além disso, somente existem pontos de controle de campos e análises petrográficas e geoquímicas na porção norte-nordeste. Nessa porção, Gottardo (1996) identificou sienogranitos de afinidade geoquímica alcalina metaluminosa, onde seria coerente ocorrer um teor elevado de Tório. Quanto a porção sul-sudoeste, devem ser efetuados trabalhos de mapeamento e quantificação geoquímica e petrográfica, com a finalidade de avaliar: (i) se constitui uma fácies menos diferenciada da intrusão **GRJ** ou (ii) se constitui outra intrusão, distinta, em termos petrográficos, geoquímicos e petrogenéticos.

As rochas do **CPN** foram associadas a zonas de valores baixos a intermediários de cps a não ser na porção Norte-noroeste da área, próximo ao aglomerado de garimpos da Torre, que mostrou-se uma região de valores mais elevados, o que pode ser considerado um indício importante em termos metalogenéticos, bem como pode significar uma variação faciológica no interior dessa unidade litodêmica.

Os aluviões e as formações superficiais quaternárias (**CC**) são pouco diferenciados no mapa de Tório a não ser em poucos locais situados ao longo de curso do rio Tocantins.

Os contatos geológicos entre as rochas da **SMN** e as rochas da intrusão **GMC** e da **FMC**, na porção Nordeste da área exibem uma conformação sub-linear, que permite, grosso modo, definir uma forma de cunha para a distribuição das rochas da **SMN**, nessa porção da área. Em termos composicionais, isso indica diferenças entre os metassedimentos que compõem essas duas unidades. Por outro lado, o formato em cunha pode indicar uma natureza tectônica para os contatos entre essas unidades litodêmicas, o que concordaria com a definição do arcabouço tectono-estrutural visualizado no mapa de lineamentos da região de Porto Nacional (Cunha, 1996).

As rochas da Formação Pimenteiras, situadas predominantemente na porção Nordeste da área, são correlacionadas com respostas fortemente positivas de Tório, considerando-se a gênese dessas rochas e a sua composição média (arenitos flúvio-lacustres) observa-se que esta resposta é compatível com o enriquecimento já sugerido para essas rochas.

Na porção sul-sudoeste da área, onde devem ocorrer rochas da **SMN**, observa-se duas faixas linearizadas, de segundo a direção nordeste-sudoeste, de respostas fortemente distintas e largura e comprimento aproximadamente iguais na área do levantamento aerogeofísico. Considerando-se os tipos de respostas, observou-se que a faixa de oeste exibe respostas elevadas, enquanto que a faixa de leste exibe respostas baixas. Notou-se, também, que o contato entre as faixas é brusco, sem gradientes transicionais. Em termos interpretativos, essa conformação pode indicar: (i) diferenças composicionais internas e bem marcadas nas rochas da **SMN**, com a faixa de elevada resposta em Tório associada a xistos pelíticos ou quartzitos e a faixa de baixa resposta associada a xistos de composição básica; (ii) a acentuada orientação estrutural nordeste-sudoeste do pacote de rochas que constitui a **SMN**, nessa porção da área ou (iii) a ocorrência de estruturas tectônicas de grande porte, que tenham por deslocamento transcorrente, ou normal, posicionado lado a lado unidades composicionalmente ou geneticamente distintas. Sugere-se uma investigação de campo mais detalhada ao longo e

transversalmente a esse contato gamaespectrométrico, com a finalidade de possibilitar uma melhor avaliação quali-quantitativa dessa feição específica. Em geral, todas as ocorrências estão associadas a áreas de respostas elevadas até intermediárias de cps, o que pode constituir-se em um importante argumento para a pesquisa prospectiva e a integração de dados que será desenvolvida nos próximos itens. As principais características das áreas anômalas em Tório que ocorrem na região de Porto Nacional (TO) podem ser observadas na Tabela XIX.

Tabela XIX. Características das áreas anômalas em Tório

detectadas pelo levantamento aerogeofísico.

Anomalia Tório	Unidade Geológica	Estrutura Associada	Intercessão Ocorrência	Forma
A	FP	Não	Não	Amebóide
B	FP	Não	Não	Amebóide
C	FP	Não	Não	Amebóide
D	FP	Não	Não	Amebóide
E	FP	Não	Não	Amebóide
F	FP	Não	Não	Amebóide
G	FP	Não	Não	Amebóide
H	FP	Não	Não	Amebóide
I	FP	Não	Não	Amebóide
J	FP	Não	Não	Amebóide
K	FP	Não	Não	Amebóide
L	FP	Não	Não	Amebóide
M	FP	Não	Não	Amebóide
N	FP	Não	Não	Amebóide
O	FP	Não	Não	Amebóide
P	FP	Não	Não	Amebóide
Q	FP	Não	Não	Amebóide

O mapa da **Figura 45** exibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas interpretadas a partir do *Grid* de Tório.

**FIGURA 45. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS INTERPRETADAS A PARTIR DO
GRID DE TÓRIO.**

- Grid do Urânio:

O mapa de distribuição do canal do Urânio exhibe, como principal característica, um acentuado padrão de dispersão, que impossibilita a diferenciação de contatos litológicos, fácies ou estruturas gamaespectrométricas.

Esse comportamento pode ser considerado normal, já que o Urânio exhibe diversos fatores complicadores na análise que ocasionam forte dispersão, entre os quais cabe destacar a instabilidade radiométrica de sua série de decaimento e a susceptibilidade das medidas, frente aos fatores ambientais.

Em termos das anomalias de Ud, ou seja, a distribuição de Urânio normalizada pelo Tório, nota-se a ocorrência de apenas uma zona anômala, de pequena magnitude, situada sobre rochas mapeadas como pertencentes à **SGgM**, porém, sem dados de campos locais e próxima de uma zona de contato entre rochas da **SIG (GMC)** e **SMN**, além, de ser uma zona fortemente afetada por zonas de cisalhamento transcorrente (**ZCCM** e **ZCCa**). Assim, essa anomalia pode ser atribuída a processos de metamórficos de circulação de fluídos com elementos incompatíveis, dentre os quais o Urânio. Quanto às zonas anômalas, suas características podem ser visualizadas na **Tabela XX** abaixo:

Tabela XX. Características das áreas anômalas em Urânio

detectadas pelo levantamento aerogeofísico.

Anomalia de U	Unidade Geológica	Estrutura Associada	Intercessão Ocorrência	Forma
A	GRJ	Não	Não	Amebóide
B	GRJ	Não	Não	Amebóide
C	GCI	Não	Sim	Amebóide
D	SGgM	Sim	Não	Amebóide
E	SGgM	Sim	Não	Amebóide
F	GMC	Sim	Enza, Paranaense	Amebóide
G	SGgM	Não	Não	Amebóide
H	SGgM	Não	Não	Amebóide
I	SGgM	Não	Não	Amebóide

O mapa da **Figura 32** exibe a distribuição das anomalias aerogamaespectrométricas do canal de Urânio (U).

- Grid da razão Th/K:

Essa razão é efetuada entre o Th, elemento menos móvel e o K, elemento mais móvel. Assim, quando a razão Th/K resulta em valores baixos, há a indicação de processos mais acentuados de entrada de Potássio no sistema, o que tende a estar associado a processos hidrotermais. Ao contrário, quando os valores da razão são elevados, há uma tendência a teores mais baixos de K no sistema, o que sugere uma menor influência de processos hidrotermais.

Em termos interpretativos, a feição mais marcante nesse mapa é a associação das rochas da **SGL**, com valores baixos, em todas as quatro principais intrusões.

Por outro lado, as unidades sedimentares e metassedimentares exibem valores elevados. No caso da **SMN**, predominam valores elevados, com apenas uma faixa de orientação Nordeste, na porção sul da área, onde se observam valores baixos.

As rochas da **SgGM**, exibem valores homogeneamente elevados, bem como, as rochas da **FMC** e do **CPN**.

As rochas da **FP** exibem valores ainda mais elevados, com uma elevada definição dos contornos, que possibilita até uma delimitação dos contatos litológicos com as outras unidades.

Os valores intermediários a baixos estão associados predominantemente aos aluviões dos principais cursos fluviais que seccionam a área (**CC**) e permitem uma definição bastante regular desses depósitos.

O mapa da **Figura 46** exibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas interpretadas a partir do *Grid* de razão Tório/Potássio.

**FIGURA 46. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS INTERPRETADAS A PARTIR DO *GRID* DE
RAZÃO TÓRIO/POTÁSSIO.**

- Grid da razão U/Th:

Essa razão é efetuada entre um elemento mais móvel no numerador e outro menos móvel no denominador e tende a indicar a ocorrência de processos hidrotermais quando os valores da razão são elevados. Isso decorre da tendência de enriquecimento em U (elemento incompatível em termos geoquímicos, comum em soluções hidrotermais) durante a evolução das soluções hidrotermais. Normalmente, razões elevadas indicam uma alteração potássica mais acentuada.

Devido a baixa definição dos resultados obtidos neste grid devido aos problemas relacionados às leituras do canal de U, discutidas anteriormente no item 3.2.2, essa razão não foi utilizada para a geração de um mapa interpretado, porém, foi utilizada para a elaboração de um mapa ternário de razões a ser discutido posteriormente.

- Grid da razão U/K:

Essa razão é efetuada entre um elemento de menor mobilidade no numerador e um elemento de maior mobilidade no denominador. Assim, quando ocorrem fenômenos hidrotermais, há uma tendência ao aumento de K, os valores da razão tornam-se baixos, já ao contrário, quando os valores da razão tornam-se mais elevados, há uma menor probabilidade de terem ocorrido processos hidrotermais.

Devido a baixa definição dos resultados obtidos neste grid devido aos problemas relacionados às leituras do canal de U, discutidas anteriormente no item 3.2.2, essa razão não foi utilizada para a geração de um mapa interpretado, porém, foi utilizada para a elaboração de um mapa ternário de razões a ser discutido posteriormente.

- Grid de Fator F:

O Fator “F” é a resultante da seguinte formulação matemática: $FF = K \times U/Th$ e foi determinado por Pires (1995), nessa formulação o *Grid* do K multiplicado pela razão U/Th indica zonas de forte alteração hidrotermal. Em termos matemáticos, a multiplicação do *grid* do K por valores elevados da razão U/Th tende a realçar as zonas de concentração de Potássio, comumente associado à zonas de alteração hidrotermal potássica.

Para a geração do mapa interpretado da distribuição de Fator F na área de interesse, foi efetuada uma reclassificação do mapa original da Figura 37, para três classes principais, quais sejam:

- Fator F entre 0 e 20;
- Fator F entre 20 e 30;
- Fator F entre 30 e 47.

As principais características destacadas em cada classe foram (Figura 47):

- a)** A classe predominante em termos de distribuição em área foi a de valores entre 20 a 30 de Fator F, posteriormente ocorrem a classe com valores entre 0 até 20 de Fator F, com a menor distribuição em área ocorre a classe com valores entre 30 e 47 de Fator F;
- b)** Quando considerada a correlação com a geologia, verificou-se que não há um padrão específico associado a determinada unidade, ou seja, em todas as unidades ocorrem porções com valores elevados, intermediários e baixos de fator F;
- c)** Se for considerado que com esse índice busca-se separar áreas com maior probabilidade de ocorrência de alteração hidrotermal, verificou-se que as áreas com valores elevados de Fator F estão relacionadas predominantemente com as rochas da **SGL**, em especial aquelas da intrusão **GCI**, em suas bordas Norte e Sul e em menor proporção na intrusão **GRJ**. Também ocorrem zonas de elevados valores nas intrusões **GMC** e **GA**, porém, com menor expressão no terreno;
- d)** Em termos de correlação com as ocorrências auríferas conhecidas, verifica-se que nenhuma ocorrência está posicionada sobre áreas com valores intermediários de Fator F. Assim, podem ser distintos dois grupos de ocorrências, ou seja: um grupo associado a valores de Fator F elevados está associado principalmente com as rochas a valores baixos de Fator F, associado a valores baixos de Fator F, associado essencialmente às rochas do CPN e, posteriormente à **SGgM** e **SMN** com 68 ocorrências.
- e)** Para a integração de dados, esse deverá ser um dos mapas e uma das variáveis consideradas, pois capturou a distribuição das ocorrências em duas faixas distintas da média regional, o que pode auxiliar na definição de novas áreas prospectivas.
- f)** A partir da premissa de que este índice auxilia na determinação de áreas de alteração hidrotermal, em especial, do tipo potassificação, pode-se concluir que as rochas da **SGL** foram acentuadamente afetadas por processos dessa natureza, em especial as intrusões **GCI** e **GRJ**, o que concorda com os dados obtidos em campo, inclusive, a região ocorrência Garipo Catuaba (nº 45, 55 e 56), as quais foram caracterizadas em campo como fortemente afetadas

por alteração hidrotermal estão associadas à área de valores mais elevados de Fator F, o que o que ressalta essa relação. Esse processo também ficou muito bem marcado na região nos garimpos de Monte do Carmo, pois todas as ocorrências situadas em rochas graníticas exibiram valores elevados de Fator F.

Tabela XXI. Características das áreas anômalas em Fator F

detectadas pelo levantamento aerogeofísico.

Anomalia de Fator "F"	Unidade Geológica	Estrutura Associada	Intercessão Ocorrência	Forma
A	GRJ	Não	Não	Alongada NW
B	GRJ	Não	Não	Amebóide
C	GRJ	Não	Não	Amebóide
D	GRJ	Não	Não	Alongada NE
E	GCI	Não	Não	Alongada NE
F	GCI	Não	Não	Alongada NS
G	GCI	Não	Não	Alongada NS
H	SGgM	Não	Não	Amebóide
I	GCI	Não	Não	Alongada NS
J	GCI	Não	Caracol, Catuaba, Matão	Amebóide
K	GCI	Não	Não	Amebóide
L	GCI	Não	Não	Alongada NE
M	GCI	Não	Não	Alongada NS
N	GCI	Não	Não	Alongada NE
O	GCI	Não	Não	Amebóide
P	SMN	Não		Alongada NE
Q	GMC	Não	Três Veios	Amebóide
R	GMC	Não	Enza	Amebóide
S	GMC	Não	Não	Amebóide
T		Não	Não	Amebóide
U	SMN	Não	Não	Alongada NE
V	SMS	Não	Não	Alongada NE

O Mapa da **Figura 47** exibe a interpretação das respostas obtidas pelo **Grid** de Fator F.

**FIGURA 47. INTERPRETAÇÃO DAS RESPOSTAS OBTIDAS
PELO *GRID* DE FATOR F.**

- Grid de anomalias de Urânio:

Esse *grid* é definido pela seguinte formulação matemática: $U_d: (U-U_i)/U_i$, onde: U = *grid* do Urânio e U_i = *grid* do Urânio normalizado pelo *grid* do Tório. A normalização é definida da seguinte forma: $U_i: (\text{média de } U / \text{média de } Th) \times Th$.

A finalidade de normalização é dividir o *grid* pelo elemento menos móvel, o que indicaria o grau de mobilidade do outro elemento de interesse na região.

A partir desse procedimento, foi obtido um *grid* de distribuição bastante difuso, característico da distribuição original do U, com poucas áreas anômalas e quando estas ocorreram, possuíam pouca distribuição areal. O Mapa da **Figura 38** exhibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de anomalia de U normalizado pelo Th.

- Grid de anomalias de Potássio:

Definido pela seguinte formulação matemática: $K_d: (K-K_i) / K_i$, onde: $K_i: (\text{média de } K / \text{média de } Th) \times Th$ **eq. 48.**

O mapa de distribuição gerado apresentou as seguintes características: as áreas anômalas situaram-se muito próximas das áreas anômalas identificadas anteriormente no mapa do canal de K, o que advém dos valores elevados dos dois elementos, que divididos entre eles resultaram em valores bastante semelhantes aos valores originais dos elementos distintos. Notou-se, marcadamente, que a maioria das áreas anômalas em Potássio está associadas às rochas da **SGL**, em especial à intrusão **GCI**. Nessa intrusão, observou-se que as anomalias estão orientadas ao longo do eixo maior Nordeste-Sudoeste e que se concentram na extremidade Nordeste do corpo granítico. Esse controle da distribuição das áreas anômalas pode indicar: **(i)** um enriquecimento em K dessa intrusão em relação às outras da Suíte, **(ii)** um maior grau de alteração hidrotermal associado à intrusão ou, mesmo, **(iii)** uma zonação do corpo granítico, que exhibe porções mais diferenciadas na própria intrusão. De qualquer forma, o Garimpo Catuaba que apresenta fortes indícios de constituir um *stock* com acentuada alteração hidrotermal potássica está contido nas áreas anômalas, o que evidencia uma boa correlação entre o mapa e os dados de campo.

Tabela XXII. Características das áreas anômalas em Potássio normalizado pelo Tório, detectadas pelo levantamento aerogeofísico.

Anomalia de K(Th)	Unidade Geológica	Estrutura Associada	Intercessão Ocorrência	Forma
A	SMN	Não	Não	Alongada NE
B	SMN	Não	Não	Alongada NE
C	GRJ	Não	Não	Alongada NW
D	GRJ	Não	Não	Amebóide
E	GRJ	Não	Não	Amebóide
F	GRJ	Não	Não	Amebóide
G	GCI	Não	Não	Alongada NE
H	GCI	Não	Não	Alongada NE
I	GCI	Não	Não	Amebóide
J	GCI	Não	Não	Alongada NS
K	SGgM	Não	Filho do seu Né	Alongada NS
L	SGgM	Não	Fofoca	Amebóide
M	GA	Não	Não	Amebóide
N	GA	Não	Não	Amebóide
O	GCI	Não	Não	Amebóide
P	GCI	Não	Não	Alongada NW
Q	GCI	Não	Não	Alongada NW
R	GCI	Não	Não	Alongada NE
S	GCI	Não	Não	Alongada NE
T	GCI	Não	Catuaba, Matão João Comprido Caracol	Alongada NE

O Mapa da **Figura 39** exibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de anomalia de K normalizado pelo Th.

- Grid ternário dos canais de Urânio, Tório e Potássio:

As seguintes observações podem ser efetuadas a partir da análise deste mapa ternário:

- a) em termos de distribuição areal, predominam respostas em cps de médios valores de U e médios valores de Th. Essas respostas advêm de rochas da **SMN**, onde predominam, em especial na sua porção sul e nas rochas da **SGgM** e **CPN** em menor escala;
- b) o segundo tipo de resposta predominante corresponde a valores elevados de U e de Th, que ocorrem principalmente na porção Norte-Nordeste da área e estão associadas com as rochas da **FP**, predominantemente, **FMC**, **CPN** e **SGgM** em ordem de distribuição;
- c) após essas duas classes, ocorrem respostas de elevados teores de K, as quais estão associadas a porções da **SGgM**, da **SMN**, **SGI** e **CC**, em ordem de distribuição areal;
- d) em menor escala de distribuição, ocorrem respostas com elevados teores de K e de Th, as quais estão vinculadas principalmente ao **GMC** e uma pequena porção da **SMN**, na sua porção Norte-Nordeste;
- e) a última classe em termos de ocorrência de respostas em área é a de teores elevados de U, Th e K, que encontra correspondência nas intrusões **GCI** (porção Sudoeste), **GRJ** (porção Nordeste) e **GMC** (porção Sudeste), **GA** (borda leste) da **SGI** e aluviões relacionados às **CC**.

O mapa da **Figura 48** exibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas interpretadas a partir do *Grid* Ternário Urânio/Tório/Potássio.

Em termos metalogenéticos, observa-se que predominam ocorrências vinculadas espacialmente a setores com teores elevados de U, Th e K (ocorrências da região de Monte do Carmo), em menor proporção ocorrem depósitos vinculados a áreas com teores elevados de K (ocorrências da região do Garimpo Catuaba) e áreas com teores elevados de U e Th (ocorrências da região do Garimpo da Torre)

**FIGURA 48. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS INTERPRETADAS A PARTIR DO *GRID*
TERNÁRIO URÂNIO/TÓRIO/POTÁSSIO.**

- Grid Ternário Falsa Cor R (Razão Th/K), G (Razão U/K) e B (Razão U/Th)

A chave de interpretação utilizada para esse mapa foi a seguinte:

- zonas brancas indicam valores elevados dos três elementos U, Th e K;
- zonas vermelhas indicam valores elevados de K (R- red);
- zonas verdes indicam valores elevados de Th (G- green) e;
- zonas azuis (B- blue) indicam valores elevados de U.

Assim, em termos interpretativos observou-se que:

- a) valores medianos de cps de U/K, Th/K e valores baixos de U/Th predominam na área de interesse, principalmente nas unidades **GMC**, **SMN**, **SGgM**, **CPN** e em parte da **FMC**;
- b) valores medianos de cps de U/K, Th/K e U/Th foram associados ao **GMC** e a porções do terreno dominadas por rochas da **FP**;
- c) valores elevados de cps de U/Th foram associados às Coberturas Cenozóicas, a uma porção situada na região Nordeste da área dominada por rochas da **SMN**, às rochas do **CPN** na porção circunvizinha ao Garimpo da Torre e a pequena parte das rochas associadas a **FMC**;
- d) valores elevados de cps U/Th, baixos de U/K e baixos de Th/K foram associados aos aluviões dos tributários do rio Tocantins, ao **GCI** e seus entornos, o que indica dispersão associada a fatores ambientais e a porção norte da intrusão **GRJ**;
- e) valores medianos de cps de U/K, Th/K e valores baixos de U/Th

Em termos da distribuição das ocorrências auríferas, de modo geral verifica-se que estão relacionadas principalmente a áreas de valores elevados de cps U/Th, baixos de U/K e baixos de Th/K e, em segundo lugar, a áreas de valores elevados de cps de U/Th e não ocorrem no tipo dominante de distribuição da região, ou seja, valores medianos de cps de U/K, Th/K e valores baixos de U/Th, e. Isso parece indicar que os depósitos auríferos são associados a áreas de elevados teores de K e U e será considerado como uma evidência consistente na ponderação a ser efetuada para a geração dos mapas de favorabilidade mineral.

O mapa da **Figura 49** exhibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas interpretadas a partir do **Grid** Ternário razão Urânio/Tório - razão Tório/Potássio - razão Urânio/Potássio.

**FIGURA 49. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS INTERPRETADAS A PARTIR DO *GRID*
TERNÁRIO RAZÃO URÂNIO/TÓRIO - RAZÃO TÓRIO/POTÁSSIO - RAZÃO
URÂNIO/POTÁSSIO.**

- Grid Ternário Falsa-cor R (K(Th)), G (U(Th)) e B (Fator “F”)

A feição mais marcante nesse mapa é a boa correlação entre valores baixos de Ud e valores intermediários de Fator F e Kd e a distribuição dos sedimentos aluvionares associados aos principais cursos fluviais da região. Além disso, observa-se que esses valores também estão associados às rochas da **SGI**, em todas as suas quatro principais intrusões, em especial na porção sudoeste da intrusão **GRJ** e porção central da intrusão **GCI**.

Duas faixas de valores baixos de Ud e valores intermediários de Fator F e Kd também podem ser identificadas nas rochas da **SMN**, na porção Sudoeste e na porção Nordeste da área, o que pode indicar uma variação faciológica desse litodema.

Os valores mais elevados de Ud, Kd e Fator F estão associados às porções de borda das intrusões associadas à **SGI**, principalmente na porção Nordeste da intrusão **GRJ**, porções Sudoeste e Nordeste da intrusão **GCI** e porção Sul da intrusão **GMC** e borda Leste da intrusão **GA**.

Os valores baixos de Kd e valores intermediários de Fator F e Ud predominam na área e ocorrem associados as rochas da **SGgM**, **SMN**, **FMC** e **FP**. Entre essas unidades, ocorre pouco contraste, o que não permitiu delinear outras feições.

Em termos metalogenéticos, verificou-se que as ocorrências conhecidas estão associadas predominantemente a valores baixos de Ud e valores intermediários de Fator F e Kd, com apenas algumas ocorrências, em sua maioria situadas no **GMC** vinculadas a valores mais elevados de Ud, Kd e Fator F.

O mapa da **Figura 50** exhibe a distribuição de respostas aerogamaespectrométricas interpretadas a partir do **Grid** Ternário Fator “F”- Anomalias de Urânio - Anomalias de Potássio.

**FIGURA 50. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMASPECTROMÉTRICAS INTERPRETADAS A PARTIR DO *GRID*
TERNÁRIO FATOR “F”- ANOMALIAS DE URÂNIO - ANOMALIAS DE
POTÁSSIO.**

4.1.2- INTERPRETAÇÃO INTEGRADA DA DISTRIBUIÇÃO DE ANOMALIAS

A separação de anomalias marcadas pela média mais três vezes o desvio-padrão teve por objetivo identificar, nos diversos mapas, áreas enriquecidas nos elementos Th, K e U, bem como nas razões U/Th, U/K e nas formulações do Fator “F” e das anomalias de K e de U. Em todos esses casos, valores elevados indicam uma tendência à ocorrência de zonas de alteração hidrotermal.

O reconhecimento de zonas de alteração hidrotermal é um dos objetivos da monografia, principalmente porque áreas afetadas por processos dessa natureza apresentam uma maior probabilidade de conterem zonas potenciais para a ocorrência de depósitos auríferos.

Apenas a razão Th/K teve um tratamento matemático diferenciado, pelo fato de que valores baixos dessa razão é que indicam a ocorrência de processos hidrotermais, ao contrário do que acontece com as outras razões. Dessa forma, foi utilizado o critério da média-menos três desvios-padrão, com a finalidade de separar zonas anômalas para a razão Th/K.

Considerando-se esse contexto, pode-se avaliar a distribuição de áreas aerogamaespectrométricas anômalas na região de Porto Nacional (TO), da seguinte maneira:

A característica mais marcante da distribuição das anomalias na área é o agrupamento de anomalias em 8 sub-conjuntos, os quais podem ser visualizados na **Figura 51** e descritos como:

FIGURA 51. MAPA INTEGRADO DE DISTRIBUIÇÃO DAS ANOMALIAS AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS. RESSALTA-SE QUE A CARACTERÍSTICA MAIS MARCANTE NA ÁREA É O AGRUPAMENTO DE ANOMALIAS EM 7 SUB-CONJUNTOS DISTINTOS.

Sub-conjunto a: situado no sudoeste, com centro aproximado nas coordenadas 750.000 e 8.720.000, está localizado sobre as rochas da **SMN**. Possui uma forma alongada a SW-NE e registra uma superposição de anomalias de K, razão U/Th e Kd;

Sub-conjunto b: situado na porção sudoeste da área, com centro aproximado entre as coordenadas 770.000 e 8.750.000. Constitui um agrupamento de diversas anomalias, com forma amebóide sub-concêntrica. Ocorrem superpostas em ordem de magnitude decrescente, as seguintes anomalias: Fator F, Ud, K, razão U/Th, todas associadas ao **GRJ**, da **SGI**.

Sub- conjunto c: situado na porção sudoeste – central da área, com centro aproximado na coordenada 785.000 e 8.762.000. Exibe um formato alongado segundo a direção NE-SW, com todas as anomalias situadas sobre o **GCI** da **SGI**, mais especificamente na borda SW dessa intrusão. Ocorrem superpostas, em ordem decrescente de importância: K, anomalia de K e fator F.

Sub-conjunto d: ocorre na porção central da área, sobre as rochas da intrusão **GCI**, pertencente a **SGI**. Ocorrem em ordem decrescente de importância, as seguintes anomalias: anomalia de K, canal de K, fator F, razão U / TH.

Sub- conjunto e: situa-se na borda da intrusão **GA**, da **SGI**, é marcado por anomalias de K e de Kd.

Sub- conjunto f: situa-se na porção Nordeste da área, sobre rochas da **SGgM**, sendo constituído por anomalias de K, da razão U / Th e de Ud.

Sub- conjunto g: situa-se na porção Ne da área, no contato entre as rochas da **SGI (GMC)** e da **SMN**. Nesse sub- conjunto ocorrem anomalias de fator F, contagem total, razão U/Th e K.

Sub- conjunto h: situa-se na porção mais NE da área, sobre as rochas sedimentares da Formação Pimenteiras. A esse sub- conjunto estão relacionadas predominantemente anomalias de Th, da razão U/Th e da razão Th/K.

Em termos interpretativos, a formação de agrupamentos, ou sub-conjuntos de anomalias é uma evidência fortemente promissora de que essas zonas de concentração são locais com uma maior favorabilidade à ocorrência de zonas de alteração hidrotermal

enriquecidas em K e ou U, ou podem constituir fácies mais diferenciadas das rochas com as quais estão relacionadas.

A unidade litológica onde ocorre a maioria das zonas anômalas é a **SGL**, constituída por intrusões graníticas metaluminosas de afinidade alcalina (Gottardo, 1996). Por outro lado, nas outras unidades litodêmicas ocorrem poucas zonas anômalas.

Considerando-se a distribuição das ocorrências já identificadas, observa-se uma baixa correlação entre os agrupamentos de anomalias e as ocorrências nos sub-conjuntos a, b, c, d, e, f, g; uma correlação intermediária com o sub-conjunto d (3 ocorrências-Caracol, Catuaba e Matão) e um alto índice de correlação com o sub-conjunto g (16 ocorrências). Além disso, pode-se citar apenas a ocorrência “Filho do Seu Né”, que ocorre associada a uma anomalia de Kd.

O fato dos sub-conjuntos ocorrerem associados às diversas intrusões que compõem a **SGL**, concorda com as características geoquímicas, metalógicas e petrográficas dessas rochas, que constituem litotipos diferenciados, com baixa ocorrência de minerais máficos e com tendência a favorecer a formação de zonas de alteração potências ao final do processo de cristalização. Nessas áreas, que constituem locais termalmente e geoquimicamente favoráveis que se estabelecem para a precipitação de elementos incompatíveis durante o final do processo de cristalização, pode ocorrer também a precipitação de soluções contendo ouro.

Outro ponto possível de interpretação é a tipologia de correlação dos agrupamentos de anomalias com relação ao arcabouço estrutural da região. Quanto esse tópico pode-se avaliar que:

- O sub-conjunto “a” está possivelmente associado à continuidade Sul-Sudoeste da **ZCCM**.
- O sub-conjunto “b” está fortemente associado aos lineamentos tipo 2 de orientação radial que ocorrem na porção NE da intrusão **GRJ**.
- O sub-conjunto “C” ocorre associado espacialmente aos lineamentos tipo 1 que definem a extremidade SW da intrusão **GCI**.
- O sub-conjunto “d” está associado aos lineamentos tipo 1 que ocorrem na extremidade NE da intrusão **GCI**.
- O sub-conjunto “e” situado na borda da intrusão GA, não exhibe lineamentos associados.

- O sub-conjunto “f” situa-se em uma porção fortemente marcada por lineamentos do tipo 1, em uma zona de intercessão das zonas de cisalhamento transcorrentes de 1º ordem denominadas **ZCCM** a oeste e **ZCCa** a leste.

- O sub-conjunto “g” está fortemente correlacionado e condicionado a **ZCCa**. Observa-se inclusive, que a **SGgM**, que possui a maioria das ocorrências, exhibe poucas zonas anômalas, em termos aerogamaespectrométricos, mesmo nas porções fortemente afetadas pelas zonas de cisalhamento transcorrentes do **SZCPN**. Isso pode indicar que as zonas anômalas são predominantemente associadas aos processos ígneos que geraram as rochas da **SGI**.

Os processos de fluxo de fluídos metamórficos associados à formação dos depósitos auríferos nas **ZCCa** e **ZCCM** não eram enriquecidos em K, Th ou U, o que explica a dissociação entre a distribuição das áreas anômalas e a distribuição das ocorrências auríferas na região. Isto também concorda com a caracterização dos fluídos associados ao processo de mineralização aurífera, como descrito por Mesquita (1996). A forte correlação entre as anomalias da razão U/K e do canal do Th indica que as rochas sedimentares da Formação Pimenteiras da borda da Bacia do Parnaíba são enriquecidas em U e em Th e fornecem uma baixa resposta em K. Isso concorda com a descrição e a gênese dessa unidade litoestratigráfica citadas no Capítulo 1, associadas a ambientes redutores, que facilitam a concentração e a precipitação de soluções uranotoríferas.

4.1.3- DETALHAMENTO DOS MAPAS DE RESPOSTAS AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS

Para o detalhamento dos mapas de respostas aerogamaespectrométricas foi considerado que a análise para potencial mineral de dados aerogamaespectrométricos pode ser mais detalhada se forem extraídos dos planos de informação analisados os conjuntos de dados referentes àquelas unidades litodêmicas e litoestratigráficas que, comprovadamente, não possuam interrelação com os fenômenos e processos que geraram os depósitos de interesse. A partir desse pressuposto e, a partir das evidências do registro e do conhecimento geológico da área de interesse, construiu-se uma premissa de que as rochas da **FP** e da **FMC** poderiam ser retiradas dos bancos de dados, de forma a melhorar a acurácia para a pesquisa das ocorrências auríferas.

Para tanto, foram efetuados os seguintes procedimentos:

- separação dos polígonos vetoriais que registram os limites no terreno das unidades que se deseja retirar;
- geração de um arquivo digital no formato .dxf com os polígonos de interesse;
- importação dos polígonos vetoriais para o *software* OASIS MONTAJ;
- utilização de uma ferramenta específica de recorte de bancos de dados a partir de polígonos de interesse, disponível nesse aplicativo;
- geração de um novo *grid* “recortado”;
- montagem de novas imagens para os seguintes produtos:
 - Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do canal de contagem total recortado (**Figura 52**);
 - Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do canal de Potássio (K) recortado (**Figura 53**);
 - Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do canal de Urânio (U) recortado (**Figura 54**);
 - Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do canal de Tório (Th) recortado (**Figura 55**);
 - Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de razão Th/K recortado (**Figura 56**);
 - Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de razão U/Th recortado (**Figura 57**);
 - Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de razão U/K recortado (**Figura 58**);
 - Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de Fator F recortado (**Figura 59**);
 - Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de anomalia de U normalizado pelo Th recortado (**Figura 60**);

- Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas do *Grid* de anomalia de K normalizado pelo Th recortado (**Figura 61**);
- Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas a partir do *Grid* Ternário razão Urânio/Tório - razão Tório/Potássio - razão Urânio/Potássio recortado (**Figura 62**);
- Mapa de distribuição de respostas aerogamaespectrométricas a partir do *Grid* Ternário Fator “F” - Anomalias de Urânio - Anomalias de Potássio recortado (**Figura 63**).

**FIGURA 52. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DO CANAL DE CONTAGEM TOTAL
RECORTADO.**

**FIGURA 53. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DO CANAL DE POTÁSSIO (K)
RECORTADO.**

**FIGURA 54. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DO CANAL DE URÂNIO (U) RECORTADO.**

**FIGURA 55. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DO CANAL DE TÓRIO (TH) RECORTADO.**

**FIGURA 56. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DO *GRID* DE RAZÃO TH/K RECORTADO.**

**FIGURA 57. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DO *GRID* DE RAZÃO U/TH RECORTADO.**

**FIGURA 58. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DO *GRID* DE RAZÃO U/K RECORTADO.**

**FIGURA 59. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMASPECTROMÉTRICAS DO *GRID* DE FATOR F RECORTADO.**

**FIGURA 60. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DO *GRID* DE ANOMALIA DE U
NORMALIZADO PELO TH RECORTADO.**

**FIGURA 61. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DO *GRID* DE ANOMALIA DE K
NORMALIZADO PELO TH RECORTADO.**

**FIGURA 62. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS A PARTIR DO *GRID* TERNÁRIO RAZÃO
URÂNIO/TÓRIO - RAZÃO TÓRIO/POTÁSSIO - RAZÃO URÂNIO/POTÁSSIO
RECORTADO.**

**FIGURA 63. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE RESPOSTAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS A PARTIR DO *GRID* TERNÁRIO FATOR
“F”- ANOMALIAS DE URÂNIO - ANOMALIAS DE POTÁSSIO RECORTADO.**

Após a geração desses mapas com extração das unidades litológicas que não possuem correlação com as ocorrências auríferas da área, foram gerados polígonos limitadores das áreas anômalas marcadas pela média mais três desvio-padrão, de forma a gerar um novo mapa de áreas anômalas. A partir desse procedimento, foi possível avaliar a real influência da retirada das unidades **FP** e **FMC**. Desse procedimento, resultou a **Figura 64**, Mapa integrado de distribuição das anomalias aerogamaespectrométricas após a retirada dos dados referentes às unidades **FP** e **FMC**.

**FIGURA 64. MAPA INTEGRADO DE DISTRIBUIÇÃO DAS ANOMALIAS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS APÓS A RETIRADA DOS DADOS
REFERENTES ÀS UNIDADES FP E FMC.**

Para quantificar esse processo, foi elaborado um arquivo integrado no *software* **SPRING** o qual continha todas os polígonos correspondentes às diferentes classes de anomalias aerogamaespectrométricas geradas a partir dos mapas completos e dos mapas recortados. No **SPRING**, por meio da ferramenta “Tabulação Cruzada” foi possível verificar o grau de coincidência das classes completas e recortadas. Os resultados podem ser verificados na **Tabela XXIII**, abaixo:

Tabela XXIII. Avaliação do grau de coincidência das anomalias

aerogamaespectrométricas obtidas em *grids* completos e em *grids* recortados.

Tipo de anomalia	Área grid total	Área grid recortado	Diferença de áreas	Área coincidência
	Km ²	Km ²	Km ²	Km ²
Contagem Total	38,58	38,31	- 2,73	21,45
Fator F	89,05	91,45	-2,40	67,33
K	136,42	137,14	- 0,72	118,01
Kd	79,02	26,22	52,80	24,33
Th	84,53	60,70	23,83	27,34
Th-K	63	24,20	38,80	15,97
U	44,93	30,52	14,41	16,67
U-K	148,41	33,03	115,38	28,81
U-Th	18	4,59	13,41	3,84
Ud	1,45	3,12	- 1,67	0,63

A análise dos resultados discriminados na tabela acima permitiu verificar que as anomalias de Contagem total, Fator F e K apresentaram aproximadamente as mesmas áreas e

um elevado nível de coincidência entre essas áreas, apesar de terem sido retiradas da geração do *grid* as unidades litológicas não relacionadas aos eventos de mineralização. Porém, o Potássio normalizado, o Urânio normalizado o Th, o U, a razão Th-K, a razão U-K e a razão U-Th apresentaram grandes diferenças, tanto em área, quanto em nível de coincidência entre as áreas totais e as áreas recortadas, o que denota a influência acentuada em termos de composição geoquímica, das unidades que foram retiradas do processo de interpolação que gerou os *grids*.

Em termos gerais, notou-se que as anomalias obtidas a partir dos *grids* recortados são mais restritivas do que aquelas obtidas a partir dos *grids* gerais, de forma que o método mostrou-se eficaz para separar áreas de interesse em termos de favorabilidade mineral para ouro na região.

4.1.4- INTERRELAÇÕES COM A GEOMORFOLOGIA

É importante ressaltar que devido aos diversos fatores ambientais relevantes que podem ter interferido na forma e nas dimensões das anomalias aerogamaespectrométricas e dos sub-conjuntos descritos anteriormente, tornou-se necessária a realização de um estudo específico de integração de dados para determinar com maior acurácia estes pontos e, por consequência, possibilitar a elaboração de interpretações mais consistentes sobre o tema.

Dessa forma, a análise final desse item, com foco principal na interrelação entre a distribuição das anomalias e das ocorrências auríferas, será realizada no capítulo específico que trata do estudo de favorabilidade para ocorrências auríferas na região (vide Capítulo 5).

4.2- PROCESSAMENTO DOS MAPAS AEROMAGNETOMÉTRICOS

4.2.1- PROCEDIMENTOS UTILIZADOS NO PROCESSAMENTO DE DADOS

O mapa aeromagnetométrico inicial (intensidade magnética total) foi gerado por meio do mesmo interpolador empregado na aerogamaespectrometria (mínima curvatura) com um tamanho de célula de *grid* de 75m, que corresponde à 1/4 da distância horizontal entre as linhas de vôo (300m). Após essa interpolação, foi aplicado o mesmo filtro utilizado na aerogamaespectrometria (coseno direcional a leste-oeste na potência 12) sobre o *grid* gerado,

para eliminar artefatos gerados pelo efeito das linhas de vôo que estavam posicionados também segundo essa orientação.

O fluxograma da **Figura 65** exhibe o processamento efetuado sobre os dados aeromagnetométricos.

A avaliação dos dados aeromagnetométricos interpolados e filtrados foi efetuada de forma qualitativa (análise visual) e quantitativa (análise estatística). A análise do mapa de intensidade magnética total mostrou que o efeito das linhas de vôo foi eliminado. Por último, a análise estatística indicou que os valores estimados mantiveram praticamente o mesmo comportamento estatístico dos dados originais.

Os dados de intensidade magnética total (IMT) foram processados pela técnica de micronivelamento, seguindo os passos discriminados no fluxograma da **Figura 66**. O mapa de intensidade magnética total da **Figura 67** reflete a distribuição das unidades magnéticas na região estudada e apresenta todas as fontes contribuintes (rasas e profundas). O processamento adicional dos dados aeromagnetométricos (filtragens) tornou possível focalizar as informações com relação às fontes rasas, ou profundas.

Seguindo o mesmo processamento sugerido por Roldão (2000), os sinais superficiais (fontes rasas) foram realçados pela aplicação de técnicas de análise de Fourier. Assim, a intensidade magnética superficial foi realçada pela ampliação do filtro primeira derivada vertical (DRVZ). Esse filtro salientou os componentes de pequeno comprimento de onda e eliminou as feições mais profundas. O filtro do sinal analítico foi utilizado para corrigir o problema de deslocamento das anomalias magnéticas causado pelo latitude a qual encontra-se a área de trabalho (11° - 12°); ou seja, quanto mais afastado do equador (latitude 0°) mais deslocadas estarão as anomalias magnéticas. O filtro DRZV foi aplicado sobre o filtro do sinal analítico. Assim, o procedimento de filtragem para ressaltar as anomalias rasas seguiu a seqüência: **(i)** aplicação do filtro do sinal analítico sobre o *grid* de intensidade magnética total e **(ii)** aplicação do filtro da primeira derivada vertical sobre o *grid* resultante do sinal analítico.

As anomalias profundas, por sua vez, foram salientadas com o auxílio do filtro integral vertical. Esse filtro atuou de forma oposta ao filtro primeira derivada vertical, o qual elimina as feições rasas. A aplicação do filtro integral vertical, buscou eliminar as feições rasas. A aplicação do filtro integração vertical foi efetuada diretamente sobre o *grid* de intensidade magnética total.

O processamento computacional foi executado no *software* Oasis Montaj 4.0, onde, inicialmente, foi gerado um mapa de linhas de vôo, com a finalidade de permitir a visualização da forma como foi conduzido o aerolevanteamento, bem como permitir a interpretação de quaisquer artefatos que porventura viessem a estar associados com o padrão das linhas de vôo. Posteriormente, foi empregada a seguinte metodologia de análise e de processamento dos dados aerogeofísicos:

- a) formulação de uma área de trabalho (Oasys Montaj Workspace);
- b) formulação de um banco de dados (Oasys Montaj Database);
- c) importação do banco de dados xyz (ASCII- na forma de coordenadas, com a medida de intensidade magnética);
- d) preparação dos *layouts* para *grids* (*New map*; *Draw new map*);
- e) elaboração de mapas base (*base map*) para cada mapa de células (*grid*);
- f) geração dos mapas de células (*Grid*; *gridding*; *minimum curvature*; *dialog controls*), os quais permitem a visualização bidimensional da distribuição espacial das variáveis. Esse passo constituiu-se na base para as etapas posteriores de processamento, tais como filtragens, definição de contornos e processamento de imagem. O método de interpolação utilizado neste trabalho foi por mínima curvatura, igualmente ao desenvolvido para os dados aerogamaespectrométricos. Para os *grids* o espaçamento utilizado foi de 75 x 75 metros (¼ do espaçamento das linhas de vôo) e os valores utilizados no processamento dos dados foram:
 - altura do sensor: 80m
 - inclinação magnética: -11°46′
 - declinação magnética: -19°32′
 - campo magnético total (*magnetic field strength*): 24.672 nT
- g) após a elaboração, ocorreu a inserção dos *grids* (*Mapping*; *grid image*; *single grids*) utilizando-se como tabela de cores 128 tons de RGB;

Para efeito desse estudo, foram elaborados os seguintes mapas aeromagnetométricos:

Tabela XXIV. Grids e mapas aeromagnetométricos elaborados para a área de interesse.

GRID	DESCRIÇÃO	MAPAS GERADOS
Campo_tot.grd	Grid do campo magnético total original (sem tratamento ou filtragem)	Campo_tot.map (cmag_tot.jpg) (Figura 67)
Hp15.grd	Grid gerado a partir da aplicação do filtro <i>high-pass</i> na potência 15 (testados a potência 15 e 20) nos valores do campo magnético total.	Micronivelado
Lp15.grd	Grid gerado a partir da aplicação do filtro <i>low-pass</i> na potência 15 (testados a potência 10 e 15) nos valores do campo magnético total.	Micronivelado
Mag_MN.grd	Grid do campo mag. Total após o processo de micronivelamento	Mag_MN.map (cmag_toMN.jpg) (Figura 68)
	Mapa Aeromagnetométrico de lineamentos definidos pelo eixo de unidades magnéticas definidas a partir do campo magnético total micronivelado.	Figura 69
	Mapa Aeromagnetométrico de configuração do campo magnético total interpretado.	Figura 70
MagintVcorr.grd	Filtro da integral vertical (intg.con) aplicado sobre o grid mag_MN.grd (magintV.grd) e corrigido para eliminar os valores negativos (remove base: -539740)	MagintV.map (magintV.jpg) (Figura 71)

Tabela XXIV. Grids e mapas aeromagnetométricos elaborados para a área de interesse (continuação).

GRID	DESCRIÇÃO	MAPAS GERADOS
SA.grd	Filtro do sinal analítico aplicado sobre o grid mag_MN.grd	SA.map (SA.jpg) (Figura 72)
Redp.grd	Filtro da redução (redp.con) ao pólo aplicado sobre o grid mag_MN.grd	Redp.map (redp.jpg) (Figura 73)
Redp1dv.grd	Filtro da 1ª derivada vertical (drvz.con) aplicado sobre o grid redp.grd	Redp1dv.map (redp.jpg) (Figura 74)
SAintVagcorr.grd	Filtro AGC (controle de ganho automático) aplicado sobre o grid SaintV.grd (SAintVagc.grd) e corrigido para eliminar os valores negativos (remove base: -539740)	SaintVagc.map (SaintVagc.jpg) (Figura 75)
_dzcorr.grd	Grid da 1ª derivada vertical extraído a partir da aplicação do filtro do sinal analítico(_dz.grd) e corrigido para eliminar os valores negativos (remove base: -0.14)	_dz.map (1dvz.jpg) _dzgrey.map (SA1dvz.jpg) (Figura 76)

Tabela XXIV. Grids e mapas aeromagnetométricos elaborados para a
 área de interesse (continuação 2).

GRID	DESCRIÇÃO	MAPAS GERADOS
Aintcoor.grd	Filtro da integral vertical (intg.com) aplicado sobre o grid AS.grd (SAintV.grd) e corrigido para eliminar os valores negativos (remove base: -98)	SaintV.map (SaintV.jpg)
	Mapa Aeromagnetométrico de lineamentos interpretados sobre o mapa de filtro de primeira derivada vertical sobreposto pelo filtro de sinal analítico definidos a partir do campo magnético total micronivelado.	Figura 77
SAcnup5.grd	Filtro da continuação para cima (cnup.con) aplicado sobre o grid SA.grd na distância de 5km	Sacnup5.map (SAcnup5.jpg) (Figura 78)

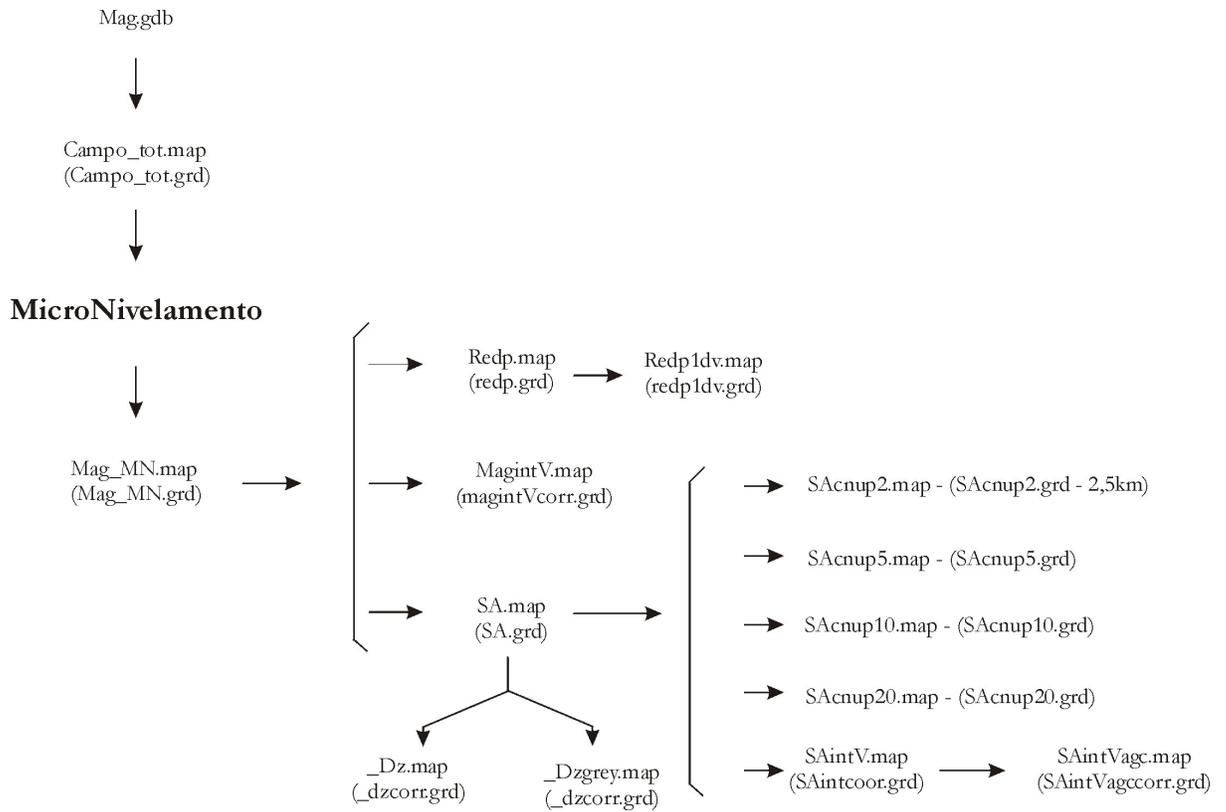


Figura 65. Fluxograma do processamento dos dados aeromagnetométricos.

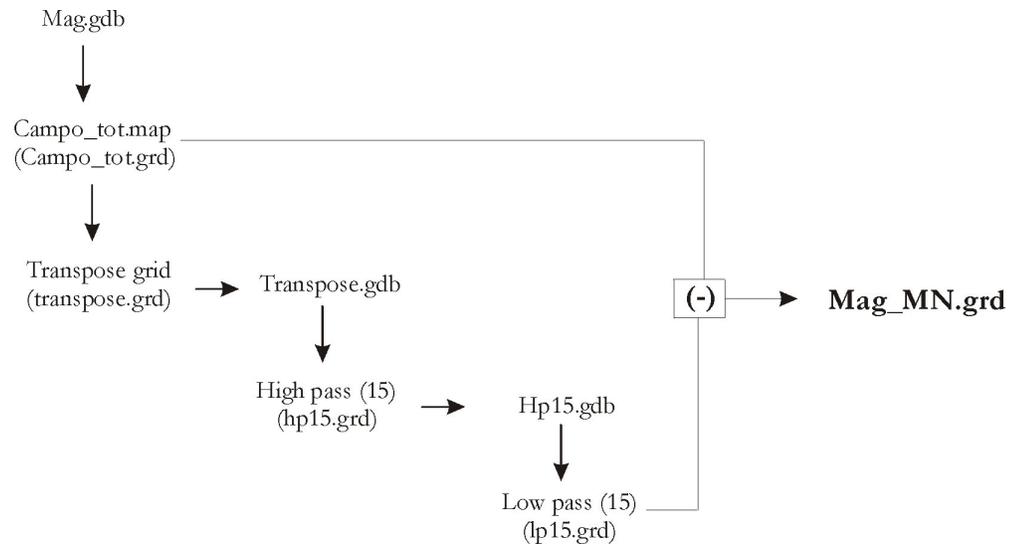


Figura 66. Fluxograma dos procedimentos utilizados no micronivelamento.

**FIGURA 67. MAPA AEROMAGNETOMÉTRICO DE CONFIGURAÇÃO DO
CAMPO MAGNÉTICO TOTAL.**

**FIGURA 68. MAPA AEROMAGNETOMÉTRICO DE CONFIGURAÇÃO DO
CAMPO MAGNÉTICO TOTAL MICRONIVELADO.**

FIGURA 69. MAPA AEROMAGNETOMÉTRICO DE LINEAMENTOS DEFINIDOS PELO EIXO DE UNIDADES MAGNÉTICAS DEFINIDAS A PARTIR DO CAMPO MAGNÉTICO TOTAL MICRONIVELADO.

**FIGURA 70. MAPA AEROMAGNETOMÉTRICO DE CONFIGURAÇÃO DO
CAMPO MAGNÉTICO TOTAL INTERPRETADO.**

**FIGURA 71. MAPA AEROMAGNETOMÉTRICO DE CONFIGURAÇÃO DO
CAMPO MAGNÉTICO TOTAL MICRONIVELADO COM FILTRO DE PRIMEIRA
DERIVADA VERTICAL SOBREPOSTO.**

FIGURA 72. MAPA AEROMAGNETOMÉTRICO DE CONFIGURAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO TOTAL MICRONIVELADO COM FILTRO DE SINAL ANALÍTICO.

**FIGURA 73. MAPA AEROMAGNETOMÉTRICO DE CONFIGURAÇÃO DO
CAMPO MAGNÉTICO TOTAL MICRONIVELADO COM FILTRO DE REDUÇÃO
AO PÓLO.**

FIGURA 74. MAPA AEROMAGNETOMÉTRICO DE CONFIGURAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO TOTAL MICRONIVELADO COM FILTRO DE PRIMEIRA DERIVADA APLICADO SOBRE O FILTRO DE REDUÇÃO AO PÓLO.

FIGURA 75. MAPA AEROMAGNETOMÉTRICO DE CONFIGURAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO TOTAL MICRONIVELADO COM FILTROS DE SINAL ANALÍTICO, INTEGRAL VERTICAL E GANHO AUTOMÁTICO DE CONTROLE (AGC) SOBREPOSTOS.

FIGURA 76. MAPA AEROMAGNETOMÉTRICO DE CONFIGURAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO TOTAL MICRONIVELADO COM FILTRO DE PRIMEIRA DERIVADA VERTICAL APLICADO SOBRE O FILTRO DE SINAL ANALÍTICO.

FIGURA 77. MAPA AEROMAGNETOMÉTRICO DE LINEAMENTOS INTERPRETADOS SOBRE O MAPA DE FILTRO DE PRIMEIRA DERIVADA VERTICAL APLICADO SOBRE O FILTRO DE SINAL ANALÍTICO DEFINIDOS A PARTIR DO CAMPO MAGNÉTICO TOTAL MICRONIVELADO.

FIGURA 78. MAPA AEROMAGNETOMÉTRICO DE FILTRO INTEGRAL VERTICAL APLICADO SOBRE O FILTRO DE SINAL ANALÍTICO PARA UMA PROFUNDIDADE DE 5 KM, AMBOS SOBRE O CAMPO MAGNÉTICO TOTAL MICRONIVELADO.

4.2.2- INTERPRETAÇÃO DOS MAPAS MAGNETOMÉTRICOS

A análise e a interpretação dos mapas magnetométricos buscaram identificar domínios homogêneos que pudessem auxiliar na definição dos blocos tectônicos que compõem a região, bem como associar as respostas associadas aos domínios com os diferentes tipos litológicos e, por último, identificar as estruturas tectônicas que afetam a região e que podem ser materializadas nesses mapas por meio dos lineamentos magnéticos.

A análise do mapa de **intensidade magnética total** permitiu a identificação dos dois domínios magnéticos distintos, denominados DOM1 e DOM2 (**Figura 68**). Para efeito de gerar um mapa classificado com menos intervalos e que possibilitasse uma melhor visualização da área, foi gerado o mapa da **Figura 70**, que constitui uma interpretação a partir do mapa de campo total micronivelado.

Em termos interpretativos, o domínio 1 (DOM1) distribui-se ao longo de uma faixa de orientação geral nordeste- sudoeste, sendo mais largo na porção norte da área e menos expressivo na porção sul. Esse domínio é caracterizado por altos magnéticos, que alcançam entre 24.665 nT até 24.725 nT. As principais unidades geológicas associadas a esse domínio são o **CPN** e a **SGgM**. Apesar dessas características gerais, em termos de associações litológicas, observa-se que as rochas da **SGL**, quando consideradas as intrusões **GMC** e **GRJ** apresentam valores elevados de campo magnético total, o que coloca uma característica peculiar para essa unidade, que apresenta intrusões com diferentes características magnéticas.

Por outro lado, o domínio 2 (DOM2) apresenta valores magnéticos intermediários a baixos que variam entre 24.500 nT e 24.650 nT. O DOM2 se distribui ao longo de uma faixa de orientação geral nordeste- sudoeste, sendo mais largo na porção sul da área e menos expressivo na porção norte. Esse domínio é caracterizado por altos magnéticos, que alcançam entre 24.665 nT até 24.725 nT. As principais unidades geológicas associadas a esse domínio são a **SMN**, as rochas da **FP** e **FMC**. Apesar dessas características gerais, em termos de associações litológicas, observa-se que as rochas da **SGL**, quando considerada a intrusão **GCI** apresenta valores intermediários a baixos de campo magnético total, o que coloca uma característica peculiar para essa unidade, que apresenta intrusões com diferentes características magnéticas. Também a unidade **SGgM** apresenta características peculiares nesse sentido, já que na porção norte da área apresenta valores elevados e na porção centro-sul exibe valores baixos de campo magnético total.

As variações nos padrões magnéticos observados nos granitos da **SGI** podem ser explicadas em termos composicionais já que os granitos mais alcalinos (**GCI**) apresentam valores magnéticos intermediários a baixos, enquanto os granitos menos diferenciados (**GRJ**), mostram valores magnéticos elevados. Quanto ao **GMC**, que pode ser considerado intermediário entre esses dois tipos, observa-se que apresenta valores mais elevados, o que necessita ser estudado em maior detalhe e não se enquadra no escopo dessa tese.

Com relação às rochas da **SGgM**, por outro lado, a diferenciação magnética em tipos com valores magnéticos mais elevados situados a Noroeste da intrusão **GCI** e com valores baixos situados a Nordeste dessa intrusão, pode ser interpretada em termos de fácies composicionais diferenciadas, com porções menos diferenciadas (maior conteúdo de minerais magnéticos) a Noroeste e porções mais diferenciadas (maior conteúdo de minerais magnéticos) a Nordeste.

De um modo bastante geral, as áreas de alta intensidade magnética estão associadas com rochas de unidades litológicas mais antigas, menos diferenciadas composicionalmente, metamorfisadas e deformadas. Já os valores intermediários a baixos de intensidade magnética, podem ser relacionados às unidades metassedimentares e sedimentares de cobertura, embora, em algumas regiões, essas unidades apresentem valores magnéticos elevados.

Em termos gerais, os limites entre os dois domínios são marcados pelas estruturas associadas ao **SZCPN**, o que pode indicar que essas estruturas possuem um registro bem marcado em profundidade.

O mapa aeromagnetométrico de configuração do campo magnético total micronivelado com filtro de primeira derivada vertical sobreposto é apropriado para realçar as componentes de fontes mais rasas. Esse mapa permitiu as seguintes interpretações:

- não ocorre a formação de domínios distintos, sendo o aspecto geral do mapa difuso;
- as fontes mais profundas situam-se associadas às rochas da intrusão **GRJ**, **SGgM** e **CPN**.
- nesse mapa observa-se com destaque faixas de orientação geral Nordeste-Sudoeste, que exibem valores baixos de IMT. Essas faixas indicam, em geral, as bordas das zonas de cisalhamento de primeira ordem do **SZCPN**.

O mapa da **Figura 71** exhibe os resultados do processamento.

O mapa aeromagnetométrico de configuração do campo magnético total micronivelado com filtro de sinal analítico é uma ferramenta de interpretação útil porque:

- independentemente do campo magnético da terra, todos campos magnéticos que têm a mesma geometria apresentarão o mesmo sinal analítico (Milligan e Gunn, 1997);
- de forma simples, fornece diversas informações sobre a geometria dos campos magnéticos (Milligan e Gunn, 1997).

O sinal analítico é uma função que relaciona os campos magnéticos pelas suas derivadas. É uma ferramenta muito interessante no contexto da interpretação, porque é completamente independente da direção de magnetização e da direção do campo magnético terrestre. Isso significa que todos os corpos com a mesma geometria têm o mesmo sinal analítico.

Para a área de interesse, foi possível observar que (**Figura 72**):

- ao longo das principais zonas de cisalhamento ocorreram respostas elevadas de S.A.;
- a litologia que exhibe um padrão mais diferenciado de S.A. é a **SMN**, que invariavelmente está associada com respostas elevadas desse filtro;
- nesse mapa podem ser visualizados os principais lineamentos que ocorrem na região;
- a maior parte das rochas da **SGI**, **CPN** e **FP** exibem baixos de resposta de S.A.;
- as rochas da **SGgM** exibem porções com S.A. baixo e porções com S.A. elevado;
- as ocorrências auríferas exibem valores elevados na porção sul da área (região dos Garimpos Roque e Catuaba) e valores baixos na região do Garimpo Manduca e Torre e dos Garimpos de Monte do Carmo. Assim, não foi verificada uma relação clara entre o S.A. e a distribuição das ocorrências auríferas.

O mapa de filtro de redução ao pólo sobre a IMT permitiu posicionar a geometria das respostas magnéticas verticalmente sobre as fontes.

A interpretação do mapa obtido permite indicar que:

- ocorre de Sudoeste para Nordeste uma alternância de domínios com predominância de respostas diferenciadas que inclui quatro regiões de respostas elevadas (A, B, C, D, **Figura 73**) e quatro regiões de valores baixos (E, F, G, H, **Figura 73**). Esses domínios ocorrem

como faixas de largura decaquilométrica orientadas segundo o vetor Sudeste-Noroeste;

- em termos litológicos, apenas as intrusões **GCI** e **GRJ** mostraram um padrão claramente diferenciado, já que estão associadas apenas a valores baixos. As outras unidades litológicas exibiram tanto valores elevados quanto valores baixos ao longo de suas áreas de ocorrência;
- neste mapa também se ressaltaram os principais lineamentos magnéticos que ocorrem na região;
- quanto às ocorrências auríferas, observa-se que se encontram associadas a valores elevados, em especial os garimpos da região da Torre, os quais estão vinculados a uma área de resposta muito elevada.

O filtro de primeira derivada aplicado sobre o filtro de redução ao pólo permitiu identificar as fontes rasas e posicioná-las a resposta magnética verticalmente sobre essas fontes.

Nesse mapa observou-se um acentuado padrão de ruído no sentido Sudeste- Noroeste, que prejudicou a obtenção de melhores resultados desse produto. Ainda assim, verificou-se que a feição mais marcante é a delimitação dos principais lineamentos estruturais que seccionam a área de interesse, principalmente no sentido Nordeste-Sudoeste e, em menor proporção, no sentido Sudeste- Noroeste. Esses lineamentos estão associados fortemente às SZCPN, as quais têm seus limites muito bem delimitados pelos lineamentos marcados nesse mapa.

A **Figura 74** exibe o produto gráfico obtido com esse processamento.

O mapa aeromagnetométrico de **filtro integral vertical aplicado sobre os filtro de sinal analítico e AGC** foi elaborado com o objetivo de testar os resultados da integração desse complexo conjunto de filtros, já que cada um apresenta as seguintes propriedades principais:

- o filtro da integral vertical pode ser interpretado como um reflexo da intensidade magnética em profundidade;
- como já ressaltado, o sinal analítico é completamente independente da direção de magnetização e da direção do campo magnético terrestre, de forma que todos os corpos com a mesma geometria têm o mesmo sinal analítico;

- o filtro de **Ganho de Controle Automático (AGC)** converte ondas com amplitude variada em ondas de amplitude semi-constante. O resultado é a remoção de tipos de amplitudes dos conjuntos de dados, o que produz uma representação que dá uma mesma ênfase para sinais com ambas, baixas e altas amplitudes. Perfis de **AGC** são muito úteis para mapeamento estrutural, porque eles tendem a mostrar alinhamentos coerentes que não aparecem na amplitude verdadeira dos dados.

Desse processamento resultou um mapa que mostrou uma acentuada difusão de valores, que não permitiu a extração de resultados relevantes, apesar de demarcar com relativa nitidez os principais lineamentos da área.

Em termos da distribuição das ocorrências auríferas, observou-se que a maioria dos depósitos está associada a valores de filtragem elevados, o que indicou uma boa correlação deste produto para a pesquisa prospectiva.

O mapa da **Figura 75** exhibe os resultados desse processamento.

O mapa de filtro de **primeira derivada aplicado sobre o sinal analítico** foi elaborado em tons de cinza com a finalidade de ressaltar a morfologia dos lineamentos magnéticos. As variações de rugosidades do *grid* representam a conformação das fontes magnéticas. Se for considerado que as fontes (unidades litológicas) estão fortemente controladas pelo conjunto de estruturas tectônicas que ocorre na área, o resultado obtido por esse produto foi plenamente alcançado, já que mostrou a ocorrência de dois padrões de lineamentos principais, quais sejam: padrão predominante de lineamentos magnéticos orientados a Nordeste-Sudoeste e padrão secundário de lineamentos magnéticos filtrados com orientação geral a Sudeste-Noroeste.

Nesse mapa observou-se a ocorrência de domínios com maior rugosidade, que registram uma densidade mais elevada de lineamentos magnéticos, intercalados por regiões com pouca rugosidade que indicam uma baixa densidade de lineamentos.

Em geral, as áreas com maior rugosidade são orientadas a Nordeste- Sudoeste e devem estar associadas às zonas de concentração da deformação tectônica que estão vinculadas às zonas de cisalhamento do **SZCPN**.

Isso significa que as fontes magnéticas rasas que foram detectadas por esse processo de filtragem têm a sua distribuição controlada eminentemente pelo contexto tectôno-estrutural e metamórfico da região.

O mapa da **Figura 76** exhibe os resultados desse processamento.

O mapa aeromagnetométrico de configuração do campo magnético total micronivelado com filtro de integral vertical aplicado sobre o filtro de sinal analítico, com uma profundidade específica de cinco quilômetros permitiu identificar as fontes rasas e todos os corpos com a mesma geometria até essa profundidade.

A análise desse produto permitiu identificar zonas diferenciadas com orientação segundo a estruturação geral Nordeste-Sudeste da área.

A feição maior marcante é a faixa de dados com valores elevados entre 388 e 1204 que ocorre da porção centro sul da área (região da intrusão **GRJ**) até o norte da área (região da intrusão **GMC**). De maneira geral, os valores elevados estão associados às rochas da **SGI**, apesar de ocorrerem porções de outras unidades, tais como o **CPN**, **SGgM** e **SMN**.

Dessa forma, pode-se afirmar que a região de interesse apresenta um núcleo com *trend* Nordeste mais profundo (corpos magnéticos mais profundos); enquanto que as regiões a Oeste e a Leste desse núcleo representariam corpos magnéticos mais rasos, sendo o contato entre essas unidades magnéticas bem marcado. Esses valores magnéticos, por outro lado, podem representar litologias enriquecidas em minerais magnéticos justapostos a unidades litológicas com baixa concentração de minerais magnéticos. Com isso, para que seja efetuada uma correlação consistente das anomalias magnéticas de fontes profundas em termos da estruturação da crosta na área é necessário que seja efetuado um estudo mais aprofundado em termos de modelamento geofísico.

O mapa da **Figura 78** exhibe os resultados do processamento.

CAPÍTULO 5

5- INTEGRAÇÃO DE DADOS E DETERMINAÇÃO DE FAVORABILIDADE MINERAL PARA DEPÓSITOS AURÍFEROS NA REGIÃO DE PORTO NACIONAL (TO)

Esse capítulo exibe as técnicas e produtos gerados a partir da análise multicriterial dos diversos planos de informação construídos e analisados anteriormente.

A premissa básica do geoprocessamento aplicado consistiu na formulação de uma rede de inferências, constituída pelas evidências vinculadas aos depósitos auríferos, associada a uma ponderação de cada uma dessas evidências baseada nas interpretações desenvolvidas sobre cada produto.

A larga variedade de combinações possíveis a partir dos planos de informação, já que todos os PI's foram elaborados com os mesmos parâmetros cartográficos, possibilitou a formulação de diversos mapas integrados, com camadas de particular interesse, tais como, rede de drenagem e distribuição de ocorrências auríferas, o que aumentou consideravelmente o potencial interpretativo do conjunto de dados, bem como, ampliou o conteúdo de resultados possíveis de serem obtidos.

Para tanto, foram efetuados os seguintes procedimentos e elaborados os seguintes produtos:

5.1- GERAÇÃO DOS MAPAS BASE

5.1.1- GERAÇÃO DAS BASES CARTOGRÁFICAS DIGITAIS

O processamento das bases cartográficas consistiu da preparação dos mapas que seriam utilizados como *datum* cartográfico para o estudo. Para tanto, foram utilizadas seis cartas digitais, cujo formato original era a escala 1:50.000. A partir dessa base, foram efetuados os seguintes procedimentos:

a) preparação da moldura, a qual constituiu um arquivo vetorial com formato .dxf que continha as coordenadas limites da área. A moldura foi definida pelos limites do levantamento aerogeofísico;

b) processamento dos dados de toponímia:

Os dados de toponímia são aqueles que representam aspectos fisiográficos da superfície e constituem um importante elemento de análise, visto que fornecem pontos de referência para a amarração de anomalias e áreas de interesse nos produtos gráficos que serão gerados.

Os dados de toponímia da região foram obtidos junto a empresa Verena Minerals Corporation, a qual contratou uma empresa especializada em cartografia digital da cidade de Brasília (DF), para efetuar a vetorização e o georreferenciamento das bases cartográficas. Esse material foi gerado originalmente no *software* Microstation 95 e, posteriormente, foi exportado para o *software* AutoCAD Map 2000, onde se efetuou o seguinte processamento:

- importação das diversas camadas de interesse no formato .dxf;
- inserção do sistema de coordenadas UTM, fuso 22, com elipsóide SAD 69;
- exclusão de inúmeros *layers* que não eram de interesse, tais como: cobertura vegetal, caminhos, etc.;
- conformação de um arquivo de pontos, linhas e polígonos com as seguintes camadas:
 - coordenadas UTM;
 - coordenadas geográficas nos vértices do limite da área de interesse;
 - principais estradas;
 - principais localidades;
 - curvas de nível.
- após a definição das camadas (*layers*), foram efetuadas as correções nas linhas e pontos e o fechamento dos polígonos, operações essenciais para o perfeito geoprocessamento desses planos de informação. Para tanto, utilizou-se o comando Limpeza de vetores, disponível no menu Ferramentas do *software* SPRING.

A **Figura 79** exhibe os principais elementos de toponímia da região de interesse utilizados como base de interpretação para geoprocessamento e integração de dados.

**FIGURA 79. PRINCIPAIS ELEMENTOS
DE TOPONÍMIA UTILIZADOS PARA OS PROCEDIMENTOS
DE INTEGRAÇÃO DE DADOS.**

5.1.2- MAPA DE OCORRÊNCIAS MINERAIS

Diferentemente do mapa da **Figura 5**, que continha o posicionamento das ocorrências auríferas no terreno e a sua denominação local, este mapa foi elaborado para a inserção nos procedimentos de geoprocessamento, onde é necessário que cada ocorrência esteja registrada por um **ponto** que representou no terreno o centro aproximado da área de extração de ouro. Como critério balizador, considerou-se ocorrência aurífera uma área circular com pelo menos 300 metros de raio e, a partir dessa premissa, foi elaborado um procedimento de geração de um mapa de distâncias no formato matricial, que pudesse ser utilizado para os procedimentos de geoprocessamento e integração de dados.

Para a geração desse produto foram desenvolvidos os seguintes procedimentos:

- a) no arquivo georreferenciado que possui os diversos bancos de dados da área foi gerada uma camada denominada “ocorrencias”;
- b) a partir das coordenadas das ocorrências obtidas em campo com GPS, foi gerado um arquivo no formato ASCII, que continha a coordenada UTM Leste, a coordenada UTM Norte e a denominação de cada ocorrência;
- c) no *software* **SPRING** foi gerado um arquivo para receber o arquivo ASCII com as ocorrências. Para isso, foi criada uma categoria temática específica denominada “ocorrencias” e um plano de informação específico denominado “ocorrencias”;
- d) o arquivo “ocorrencias.txt” foi então transformado para o padrão “Texto do MS DOS com formatação”, disponível no *software* Word for Windows e a sua extensão foi renomeada para .spr, formato específico para importação de dados ASCII no **SPRING**;
- e) o arquivo ocorrencias.spr foi importado para o software **SPRING** na categoria ocorrencias, PI ocorrencias, procedimento que possibilitou a geração de um arquivo de pontos pronto para processamento no *software*;
- f) para facilitar a visualização dos dados, foram importados no formato texto as denominações das ocorrências.
- g) após a importação, foi gerado um mapa de distâncias com raio de 300 metros no entorno de cada ponto que representava uma ocorrência. Desse procedimento resultou a geração de dados

matriciais representativos de cada ocorrência que permitiram a sua utilização nos procedimentos de integração de dados.

O mapa de distribuição de ocorrências foi de acentuada importância para os estudos de favorabilidade, já que foi utilizado como parâmetro balizador da eficiência dos algoritmos de predição da favorabilidade. Para tanto, todos os produtos integrados gerados foram avaliados por meio de tabulação cruzada para verificar o quanto das ocorrências conhecidas na região, foram capturadas nas zonas definidas como favoráveis pelos algoritmos.

O mapa da **Figura 80** exibe a distribuição das ocorrências auríferas caracterizadas até o estágio atual das pesquisas na região de Porto Nacional (TO) com uma faixa delimitada no entorno de 300 metros a partir do centro (*buffer* 300 m).

**FIGURA 80. DISTRIBUIÇÃO DAS OCORRÊNCIAS AURÍFERAS
CARACTERIZADAS ATÉ O ESTÁGIO ATUAL DAS PESQUISAS NA REGIÃO DE
PORTO NACIONAL (TO).**

5.1.3- MAPA GEOLÓGICO RECLASSIFICADO

O mapa litoestrutural local foi elaborado a partir da compilação do mapa geológico, escala 1:400.000, produzido por Gottardo (1996) para a região em estudo; esse mapa litoestrutural local foi digitalizado no formato *.dwg (AutoCAD Map), por meio do seguinte processamento:

- a) criação de camadas, cada qual correspondendo a uma unidade litodêmica;
- b) digitalização de polígonos fechados que correspondiam a distribuição no terreno das diversas unidades litoestratigráficas e litodêmicas;
- c) formação de limites (*boundaries*) em cada contato. Os limites constituem uma ferramenta de apoio, disponível no AutoCAD Map, que foi utilizada para a formação de polígonos perfeitamente fechados e com linhas limites perfeitamente superpostas. Esse artifício foi utilizado para permitir a aplicação precisa das técnicas de integração no *software* **SPRING**;
- d) verificação de fechamento, superposição e consistência dos polígonos gerados.
- e) após esses passos, foi gerado um arquivo com o formato .dxf e efetuada a exportação para o *software* **SPRING**. Neste aplicativo, foi gerada uma categoria temática denominada “GEOLOGIA” e um plano de informação denominado “geologia”, para receber os dados de importação;
- e) após o processo de importação foi utilizada a ferramenta “limpar vetor”, disponível no **SPRING** para efetuar a limpeza de eventuais linhas ou polígonos duplicados e tornar o arquivo perfeitamente adequado a utilização para geoprocessamento.

Desse processo resultou um mapa geológico classificado, ou seja: cada unidade geológica distinta foi associada a uma classe, que corresponde a uma classe digital contida no plano de informação “geologia”. Esse mapa pode ser visualizado na **Figura 9**.

Posteriormente, foi efetuada a integração dos dados dos mapas aerogamaespectrométricos e aeromagnetométricos aos contatos geológicos propostos por Gottardo (1996), com o objetivo de melhorar a sistematização das unidades. Esses dados mostraram-se fortemente úteis, visto que a região exibe uma grande limitação em termos de

exposição de rochas e afloramentos, o que agregava um elevado grau de inferência aos contatos geológicos conhecidos.

Os mapas mais relevantes para o detalhamento geológico foram o mapa de contagem total, mapa do canal de Potássio e mapa do canal do Tório, bem como os mapas ternários de canais e razões, que sintetizaram os dados que estavam em mapas distintos e possibilitaram uma melhor visualização das respostas das rochas na área.

Esses mapas possibilitaram uma melhor sistematização das unidades graníticas vinculadas a **SIG** (inclusive com a indicação de faciologias diferenciadas contidas em algumas das intrusões), uma boa divisão das Coberturas Cenozóicas, em especial dos depósitos aluvionares e uma melhor separação das rochas pertencentes à **FP**. Para as unidades granito-gnáissicas e metamorfitos de médio e de alto grau, não foi possível sistematizar outros contatos ou fácies litodêmicas que melhorassem o mapeamento dessas rochas.

Em termos do detalhamento do mapa geológico, os procedimentos consistiram de:

- a) como mapa base foi utilizado o mapa litoestrutural proposto por Gottardo (1996) no formato digital .dxf georreferenciado;
- b) sobre o mapa base foi efetuada a inserção das imagens georreferenciadas correspondentes ao mapeamento do canal do K, do canal do Tório, do canal de contagem total e da razão Th/K, do mapa ternário de canais e do mapa ternário de razões;
- c) após a inserção de cada imagem em uma camada diferenciada, os novos contatos e faciologias identificadas visualmente foram sendo progressivamente ajustados aos contatos vetoriais existentes, de forma que, após a análise pormenorizada de cada imagem, estivesse montado um novo mapa litoestrutural para a área, com um maior grau de sistematização das unidades litodêmicas e litoestratigráficas.

O mapa da **Figura 81** exhibe a reclassificação do mapa geológico, proposta a partir da integração com dados aerogamaespectrométricos.

Neste novo mapa observa-se que a partir da integração dos dados aerogamaespectrométricos foi possível a obtenção das seguintes informações geológicas:

- a) a delimitação dos aluviões pertencentes às Coberturas Cenozóicas que ocorrem na área foi significativamente melhorada, o que permitiu a sua sistematização no Rio Tocantins e nos seus principais tributários na região;

b) na intrusão Granito Ribeirão Jacaré (**GRJ**), foi separada uma fácies máfica que deve ser constituída por rochas de composição menos diferenciada, talvez gabros ou granodioritos, mas que devem compor parte da Suíte.

Em termos de interpretação de dados aeromagnetométricos, se observou a separação de diversas áreas alongadas que representam diques ou intrusões de composição pouco diferenciada em termos geoquímicos (básica a ultrabásica), os quais devem ser melhor sistematizados em campo, mas que devem constituir rochas dioríticas ou gabróicas. Além disso, foi identificada na porção Nordeste da área, próximo ao Garimpo Divisa, um corpo de orientação geral Nordeste-Sudoeste e com forma sigmoidal, o qual teve seus limites perfeitamente distinguidos pelos dados aeromagnetométricos e foi investigado por sondagens e amostragens realizadas pela empresa Verena Minerals Inc. Dessa campanha prospectiva resultaram amostras que indicam que rochas peridotíticas constituem o corpo sigmoidal. Além disso, verificou-se que essas rochas apresentam um acentuado grau de alteração hidrotermal carbonática e deformação tectônica, possivelmente milonitização associada à evolução do **SZCPN**.

Também na região do Garimpo São Domingos, na porção Sul-Sudoeste da área a aeromagnetometria identificou um corpo intrusivo de forma sigmoidal, porém, de menores dimensões, e, por meio de mapeamento de detalhe dessa área, constatou-se a ocorrência de rochas gabróicas no local.

Além desses dois casos mais relevantes, foram separados pelo menos outros 10 locais com respostas similares, os quais devem ser mapeados em detalhe nas campanhas prospectivas futuras, pois possuem diversas características que podem associá-los a novas ocorrências auríferas, entre as quais cabe destacar:

- estão invariavelmente afetadas por deformação tectônica associada às estruturas que compõem o **SZCPN**;
- possuem composição geoquímica pouco diferenciada (básica a ultrabásica) que normalmente são favoráveis à associação com ouro;
- possuem diversas evidências de terem sido afetadas por alteração hidrotermal, especialmente carbonatação, a qual é bastante favorável para a associação com ouro.

No aplicativo **SPRING** foi obtido o valor de distribuição em área de cada unidade na região de interesse, por meio da utilização da ferramenta de tabulação cruzada. O resultado

desse procedimento, importante para o processo de ponderação vinculado à integração de dados pode ser verificado na **Tabela XXV**, conforme segue:

Tabela XXV. Distribuição em km² de cada unidade geológica na região de interesse.

Plano de Informação:GEOLOGIA/geologia	
Representação: Imagem Temática	
Unidade geológica	Area (kmxkm)
CC	1316,40
FP	965,01
FMC	318,61
SGI	802,89
SGI vulcânicas ácidas	45,43
SGI_fácies_máfica	34,22
SMMt	449,53
SMN	1204,64
SGgM	1584,19
CPN	1565,67
SMN_fácies_máfica	119,62
CPN_ultramáficas_milonitizadas	11,96
Rochas vulcânicas básicas	150,85
Área total das classes	8569 km²

FIGURA 81. RECLASSIFICAÇÃO DO MAPA GEOLÓGICO, PROPOSTA A PARTIR DA INTEGRAÇÃO COM DADOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS.

5.1.4 - MAPA DE CONTATOS LITOLÓGICOS

Em províncias metalogênicas com controles de mineralização semelhantes aos observados na região de Porto Nacional (TO) verifica-se que as zonas que correspondem aos contatos entre as diferentes unidades litoestratigráficas e litodêmicas constituem descontinuidades que podem ter favorecido a percolação e a deposição de soluções mineralizadas, de forma que em muitos locais, as áreas mineradas situam-se em contatos entre unidades geológicas. Com base nesse pressuposto, buscou-se verificar a influência dessa variável no processo de mineralização e formação dos depósitos da área, por meio da elaboração de um mapa que ressaltasse a distribuição das ocorrências auríferas e dos contatos geológicos e permitisse a análise de eventuais correlações entre essas entidades. Para tanto, inicialmente, foi necessária a elaboração de um mapa base que contivesse os contatos geológicos no formato digital compatível com o processamento de Mapas de Distância do *software* **SPRING**, ferramenta específica, disponível para esse tipo de análise.

Para tanto, foram efetuados os seguintes procedimentos:

- a) no arquivo que continha o mapa geológico digital georreferenciado com extensão .dxf, foi criada uma nova camada denominada “contatos” e efetuada a digitalização das linhas que materializam os possíveis contatos geológicos no terreno;
- b) neste mesmo mapa, foi criada uma nova camada denominada “ocorrencias”, na qual foram inseridas todas as ocorrências no formato digital de pontos;
- c) após esses procedimentos, o arquivo foi convertido para o formato .dxf, compatível com o *software* **SPRING**, para viabilizar a importação das camadas relativas às ocorrências e aos contatos litológicos.

O mapa georreferenciado foi importado para o *software* **SPRING** e preparado para integração de dados por meio dos seguintes passos:

- a) importação das **linhas** correspondentes à distribuição dos contatos das unidades litodêmicas associadas às ocorrências auríferas a partir de um arquivo .dxf georreferenciado;
- b) inserção da topologia em cada linha que correspondia ao contato de uma unidade litodêmica no terreno. A topologia definida consistiu da limpeza de eventuais linhas duplicadas, bem como o ajuste dos nós dos arcos. Após esse passo, foi efetuada a correlação

entre a linha editada e uma geo-classe que correspondia ao contato de uma unidade litodêmica da área;

c) geração do mapa de distâncias a partir da seleção das linhas de interesse, bem como da escolha de um fator de distância que correspondeu a 300 metros, 150 metros para cada lado da linha que serviu de eixo para o processamento, o que poderia registrar de forma mais adequada a zona de contato entre as unidades no terreno, evitando erros cartográficos e refletindo com maior precisão as interações geoquímicas que podem ter ocorrido nesses locais durante os eventos de mineralização;

d) após a geração do mapa de distância com largura de 300 m foi efetuada a transformação das feições vetoriais (linhas) para o formato matriz por meio do comando Temático/vetor-*raster*. Esse passo foi necessário pois o *software SPRING* executa a maioria das operações de análise geográfica que seriam desenvolvidas a partir de arquivos no formato matriz, como discutido anteriormente.

Após a elaboração desse processamento, o mapa de contatos geológicos estava preparado para a integração de dados pelas técnicas de geoprocessamento.

A **Figura 82** exhibe o mapa de contatos litológicos utilizado nas operações de integração de dados.

**FIGURA 82. MAPA DE CONTATOS LITOLÓGICOS UTILIZADO NAS
OPERAÇÕES DE INTEGRAÇÃO DE DADOS.**

O mapa de contatos geológicos foi um dos planos de informação importantes para a integração de dados e pesquisa de favorabilidade para depósitos auríferos. Para tanto, foi necessária a implementação de um fator de ponderação nesse plano de informação que possibilitasse a hierarquização da favorabilidade dos diferentes contatos geológicos. Dessa forma, foi utilizado um critério para estabelecer a hierarquia entre os contatos, ou seja, a área de coincidência entre ocorrências auríferas registradas no mapa de ocorrências auríferas com *buffer* de 300 metros e formato matricial e o mapa de contatos geológicos no formato matricial. A ferramenta utilizada foi a Tabulação Cruzada disponível no software **SPRING**.

O resultado desse processo consta da **Tabela XXVI**, onde se observa a área de coincidência entre o *buffer* de 300 metros que representa cada ocorrência aurífera já conhecida na região e o mapa de contatos geológicos.

Tabela XXVI. Área de coincidência entre o *buffer* de 300 metros que representa cada ocorrência aurífera já conhecida na região e o mapa de contatos geológicos.

Tabela cruzada de áreas (em Km²):		
Plano-1 (nas linhas) : contatos geológicos		
Plano-2 (nas colunas): ocorrências_buffer300		
	Área do contato para cálculo	Área de ocorrências auríferas no contato
Contatos geológicos	1998	12,55

Após a determinação da área de coincidência entre os diferentes contatos litológicos e as ocorrências auríferas conhecidas, foi estabelecido o valor de ponderação entre os contatos, e a área de coincidência com as ocorrências. O resultado dessa ponderação pode ser verificado na **Tabela XXVII**, abaixo:

Tabela XXVII. Fator de ponderação para cada contato

litológico observado na área de interesse.

	Fator de ponderação
Contatos geológicos	0,3

5.1.5 - MAPA DE DRENAGENS SUPERFICIAIS

O mapa de drenagens superficiais foi elaborado a partir da extração e digitalização das drenagens registradas nas cartas digitais na escala 1:50.000. Após a elaboração desse processamento, o mapa de drenagens estava preparado para a integração de dados pelas técnicas de geoprocessamento.

Este mapa foi utilizado como elemento auxiliar em todos os outros mapas, pois era importante elucidar se determinadas feições observadas, tais como áreas anômalas, tinham correlação com depósitos aluvionares que poderiam mascarar os resultados e causar desvios do foco do trabalho que eram áreas de ocorrência de depósitos primários.

O mapa de drenagens utilizado nas operações de integração de dados consta da **Figura 8**.

5.1.6- MAPA DE SOLOS (PEDOLOGIA)

Para a caracterização da distribuição dos solos da região de interesse foi utilizado o mapa pedológico do Estado do Tocantins (Embrapa 1998b). O processamento deste mapa incluiu os seguintes procedimentos:

- a) inicialmente foi efetuado o **download** do arquivo digital no formato **raster** .jpg a partir da página na Internet da Embrapa (<http://www.cnpm.embrapa.br/projetos/tocant/pedo.html>);
- b) o arquivo digital .jpg foi importado para o **software** Corel Draw e salvo no formato .tif;
- c) o arquivo .tif foi, então, inserido no **software** AutoCAD MAP 2000 e georreferenciado;
- d) o arquivo .tif georreferenciado serviu de base para a montagem de um arquivo vetorial que continha as diferentes classes de solo, com as seguintes características:
 - ✓ camadas específicas para cada classe de solos;
 - ✓ determinação do padrão de coordenadas e projeção UTM/ SAD 69, fuso UTM 22;
 - ✓ vetorização de polígonos fechados com limites perfeitamente coincidentes entre estes (**boundaries**), cada um dos quais abrangia a distribuição de uma classes de solos no terreno;

✓ geração de arquivo no formato .dxf, compatível com o *software* **SPRING**;

e) o arquivo .dxf foi importado para o *software* **SPRING** com todas as suas camadas. Para tanto, foi gerada uma categoria de dados no formato Temático denominada “solos” e um plano de informações correspondente (PI= solos).

Os polígonos que delimitavam as classes foram ajustados e poligonizados, de forma a gerar uma topologia de linha fechada e com cada polígono associado à respectiva classe de solo no terreno.

Após a elaboração desse processamento, o mapa de solos reclassificado estava preparado para a integração de dados pelas técnicas de geoprocessamento.

Tabela XXVIII. Distribuição espacial das classes de solo

que ocorrem na área de interesse.

Cálculo de Áreas/Comprimento por Geo-classe (kmxkm/km) :	
Plano de Informação: SOLOS/solos	
Representação: Mapa Vetorial	
Área (kmxkm)	
Latossolo_vermelho_escuro	36,35
Latossolo_vermelho_amarelo	3.192,85
Solos_hidromorficos	670,09
solos_litolicos	816,82
Área total das classes: 4.716 km²	

Pela observação dos dados da **Tabela** acima, verificou-se que predominam largamente os solos do tipo latossolo vermelho amarelo, posteriormente ocorrem os solos litólicos e os solos hidromórficos e, por último, ocorrem os solos do tipo latossolo vermelho-escuro.

O mapa da **Figura 7** exhibe a distribuição das classes de solo na região de interesse.

5.1.7- MAPA DE COBERTURA DO SOLO

Para a caracterização das interferências ambientais sobre os resultados aerogamaespectrométricos, foi necessária a determinação dos tipologias de cobertura do solo, as quais, como comentado anteriormente, podem atuar fortemente sobre as respostas gama.

Assim, buscou-se a geração do mapa de cobertura do solo, por meio dos seguintes passos:

- a) inicialmente foram obtidas as imagens do satélite LANDSAT 5 TM, composição colorida disponíveis em um mosaico de arquivos digitais no formato .jpg, com as bordas de cada imagem georreferenciada. Esse mosaico está disponível no site da Embrapa (<http://www.cdbrazil.cnpm.embrapa.br/to/index.htm>);
- b) os arquivos digitais foram importados para o aplicativo IMPIMA que faz parte do pacote de *softwares* do **SPRING** e tem a função de gerar imagens no formato .GRIB, as quais podem ser processadas pelo **SPRING**;
- c) no processo de transformação para arquivos .GRIB, cada imagem original foi decomposta em três novas imagens, uma com correspondência para a banda R (red), outra para a banda G (green) e outra para a banda B (blue);
- d) cada conjunto de três bandas (R, G e B) foi importado para o *software* **SPRING** e, então, se procedeu o registro, que corresponde ao georreferenciamento das imagens;
- e) o conjunto de imagens georreferenciadas foi reunida em uma única nova imagem por meio da utilização da ferramenta de mosaicagem disponível no *software* **SPRING**;

A **Figura 83** exhibe o mosaico de imagens LANDSAT da área de interesse.

FIGURA 83.MOSAICO DE IMAGENS LANDSAT DA ÁREA DE INTERESSE.

f) após a elaboração do mosaico, foi efetuada a classificação com a utilização dos seguintes parâmetros:

- método de classificação: por vizinho mais próximo;
- interpolador: vizinho mais próximo;
- resolução da imagem de entrada: 30m;
- resolução da imagem de saída: 30m;
- classes de interesse: solo exposto/ campo/ cultura/ pastagem e cerrado/ mata ciliar/ floresta;

g) a imagem resultante foi recortada, de forma a definir exatamente a área de interesse. Para tanto, foi utilizada a ferramenta de “recorte de plano de informação”, disponível no *software* **SPRING**.

Após a elaboração desse processamento, o mapa de cobertura do solo estava preparado para a integração de dados pelas técnicas de geoprocessamento. A quantificação da distribuição espacial obtida para as classes supracitadas foi a seguinte:

Tabela XXIX. Distribuição espacial das classes de cobertura do solo que ocorrem na área de interesse.

Plano de Informação: COBERTURA_SOLOS/classificacao2-T_recortado	
Representação: Imagem Temática	
Área (kmxkm)	
Vegetação	3106,34
Culturas	1656,76
Água	65,03
Solo	38,09
Área total das classes: 4.866 km²	

Pela observação dos dados da **Tabela** acima, verifica-se que predomina a classe Vegetação, posteriormente ocorrem culturas e, e menor proporção, ocorrem água e áreas com solos expostos. A **Figura 83a** exhibe a distribuição espacial das classes de cobertura do solo na área de interesse.

**FIGURA 83A. MOSAICO DE IMAGENS DO SENSOR LANDSAT 5 TM
CLASSIFICADAS COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CLASSES DE
OCUPAÇÃO DO SOLO NA ÁREA DE INTERESSE.**

5.1.8- MAPA HIPSOMÉTRICO

O Mapa hipsométrico corresponde ao mapa de distribuição das altitudes do terreno em relação ao nível do mar na área de interesse. Este mapa foi gerado no *software* Oasis Montaj 4.2, a partir dos seguintes procedimentos:

- a) obtenção dos dados de altimetria aérea fornecidos pela empresa Verena Minerals Inc.;
- b) montagem de um banco de dados específico para esse processamento no *software* Oasis Montaj 4.2;
- c) geração de um *grid* regular por interpolação via mínima curvatura para gerar um mapa de células da distribuição das altitudes na região de interesse;
- d) inserção do mapa hipsométrico na tela com cores RGB em 128 tons;
- e) exportação da imagem no formato .GEO TIFF georreferenciado;
- f) elaboração do mapa final.

Este mapa serviu para dar suporte às interpretações vinculadas a geomorfologia, solos e modelo digital de elevação, bem como as interreferências específicas desses fatores sobre os dados aerogamaespectrométricos.

A **Figura 84** exibe o mapa hipsométrico da área de interesse.

FIGURA 84. MAPA HIPSOMÉTRICO DA ÁREA DE INTERESSE.

5.1.9- MAPA DE DECLIVIDADE DO TERRENO

A geração do mapa de declividade foi um passo necessário para a plena avaliação das interferências ambientais que podem modificar os resultados aerogamaespectrométricos. Isso decorre da acentuada influência que a declividade do terreno tem sobre a movimentação dos solos e, conseqüentemente, na dispersão do Potássio, do Tório e do Urânio. A declividade modifica a geometria das anomalias, bem como, pode gerar falsas anomalias em zonas de acumulação de solos transportados.

Para a elaboração do mapa de declividade foram desenvolvidos os seguintes procedimentos:

- a) obtenção do arquivo digital de altimetria aérea junto à empresa Verena Minerals Corporation;
- b) edição do arquivo digital de forma a gerar um novo arquivo do tipo ASCII com cabeçalho e rodapé compatíveis com o formato ASCII-**SPRING**, que contivesse a coordenada UTM Leste, a coordenada UTM Norte e a cota absoluta do terreno natural em cada ponto de leitura;
- c) geração de uma categoria de dados do tipo NUMÉRICA (MNT), no arquivo de integração do **SPRING** denominado “altimetria” com um respectivo plano de informações também denominado “altimetria”;
- d) geração de uma grade de dados triangular para determinação matemática da conformação da superfície de relevo.
- e) geração do mapa de declividade em percentuais;
- f) geração de um mapa de classes determinado pelo processo de fatiamento considerando-se 10 intervalos fixos de percentuais qualificados, que variaram de 0-10% até 90-100%.

Tabela XXX. Distribuição espacial das classes de declividade
que ocorrem na área de interesse.

Plano de Informação: FATIAMENTO_DECLIVIDADE/ classes_declividade	
Representação: Imagem Temática	
Área (kmxkm)	
0-10	3783,56
10-20	471
20-30	240,87
30-40	164,43
40-50	98,06
50-60	42,5
60-70	19,43
70-80	9,62
80-90	5,25
90-100	3,31
Área total das classes: 4.838 km²	

Pela observação dos dados da **Tabela** acima, verifica-se que a classe de declividade largamente predominante alcança entre 0 e 10%, o que é característico do relevo plano da região.

A **Figura 85** exhibe a distribuição espacial das classes de declividade na área de interesse.

**FIGURA 85. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS
CLASSES DE DECLIVIDADE NA ÁREA DE INTERESSE.**

5.1.10 - MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

O Modelo Digital de Elevação (MDE) ou Modelo Numérico de Terreno (MNT) é uma representação tridimensional do relevo da área que possibilita uma melhor visualização dos compartimentos geomorfológicos, além de auxiliar nas interpretações desenvolvidas sobre as diversas variáveis ambientais estudadas.

O *software* **SPRING** possibilita a visualização tridimensional de uma grade matemática e, dessa forma, foi gerada uma grade regular, que permitiu uma representação mais consistente do relevo em 3D.

Para a materialização da superfície pode-se superpor à grade qualquer imagem, desde que esta esteja georreferenciada e possua coincidência perfeita com a área da grade. Assim, foi efetuada a superposição de uma imagem em tons de cinza gerada pelo *software* **SPRING**, a partir da exportação destas imagens no formato .GEOTIFF, que mantém os parâmetros do georreferenciamento. O resultado do processo de superposição pode ser visualizado no mapa da **Figura 86**.

A análise do MDE superposto à declividade permitiu verificar a consistência e a boa correlação com o terreno do mapa de declividade, já que as áreas de relevo movimentado possuem declividades mais elevadas, enquanto que as áreas de relevo plano possuem declividades baixas.

Dessa superposição, pode-se verificar que as áreas de relevo plano são marcadas por pastagens, campos e culturas, enquanto que as manchas de vegetação mais exuberantes estão localizadas nos relevos mais elevados e íngremes.

A **Figura 86** exibe o Modelo Digital de Elevação da região de estudo.

FIGURA 86. MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO.

5.1.11- MAPAS DE LINEAMENTOS MORFOESTRUTURAIS

As estruturas tectônicas constituíram um dos principais alvos da pesquisa que conduziu à elaboração desta Tese, em função de serem o principal controle da distribuição dos depósitos auríferos da região. Assim, a busca pela identificação de outras estruturas e outros dados cinemáticos e dinâmicos foi um dos focos buscados com a elaboração dos diversos mapas de lineamentos estruturais. Para tanto, foram elaborados, analisados e interpretados os seguintes planos de informação:

5.1.11.1- MAPA DE RELEVO SOMBREADO

Os dados de altimetria aérea foram obtidos durante o desenvolvimento dos levantamentos aerogeofísicos. Assim, o arquivo original da empresa GEOMAG LTDA. era um arquivo do tipo ASCII/ x, y, z composto pelas seguintes variáveis:

x= coordenada UTM Leste;

y= coordenada UTM Norte;

z= cota do ponto de interesse obtida por meio de altimetria aérea desenvolvida concomitantemente ao levantamento aerogeofísico.

A partir da elaboração desse arquivo, foi possível a formulação do Mapa de relevo sombreado (*shaded relief map*), o qual permitiu uma visualização do registro dos lineamentos estruturais na superfície do terreno. O processo utilizado para a elaboração do *shaded relief map* envolveu a interpolação dos dados no *software* OASIS MONTAJ 4.2 para a geração de um arquivo de *grid* por meio do método da curvatura mínima. Após a geração do arquivo de *grid*, utilizou-se a ferramenta *shaded relief map* disponível no *software* para geração do mapa final. Os parâmetros de pseudo-iluminação foram 45° a partir do *datum* horizontal e em quatro vetores posicionados a 45° a partir do vetor principal Norte 45° Oeste/ sentido Noroeste para Sudeste. Essa disposição da pseudo-iluminação está posicionada de forma mais ortogonal em relação ao padrão predominante Nordeste das estruturas que ocorrem na área.

O modelo gerado foi utilizado como elemento auxiliar para análise dos seguintes conjuntos de dados:

- Estudo de lineamentos estruturais: para salientar as estruturas morfológicas do relevo que podiam representar estruturas tectônicas, foi utilizado um filtro direcional posicionado a 45°

em relação ao norte, com iluminação perpendicular a essa orientação, no sentido Noroeste para Sudeste.

Esse artifício de pseudo-iluminação mostrou-se fortemente eficaz, pois ressaltou uma grande quantidade de lineamentos estruturais do tipo 1, os quais, seguindo os mesmos preceitos postulados para os lineamentos extraídos da imagem de satélite LANDSAT 5 TM por Cunha (1996), devem representar estruturas tectônicas penetrativas. O mapa que continha o *grid* de relevo sombreado foi então exportado do *software* GEOSOFT no formato *.tif. O arquivo *bitmap* gerado foi então importado para o *software* AutoCAD Map e registrado para que a base fosse novamente georreferenciada. A **Figura 87** exhibe o Modelo de Relevo Sombreado (*shaded relief map*) da região de estudo.

No AutoCAD Map, foram vetorizados todos os lineamentos observados, o que possibilitou a geração de um novo mapa de lineamentos; a este mapa, foram adicionadas as ocorrências auríferas em uma camada específica, que possibilitasse a análise conjugada da distribuição dos lineamentos e dessas ocorrências no terreno (**Figura 87 a**).

**FIGURA 87. MODELO DE RELEVO SOMBREADO
(SHADED RELIEF MAP) DA REGIÃO DE ESTUDO.**

**FIGURA 87 a . LINEAMENTOS EXTRAÍDOS DO MODELO DE RELEVO
SOMBREADO (SHADED RELIEF MAP) DA REGIÃO ASSOCIADOS ÀS
OCORRÊNCIAS AURÍFERAS.**

O mapa digital de lineamentos do terreno georreferenciado foi, então, importado e preparado para o processamento no *software* **SPRING** por meio os seguintes passos:

- a) importação da camada que continha as polilinhas correspondentes a distribuição dos lineamentos do tipo 1 e do tipo 2 no terreno, a partir de um arquivo .dxf georreferenciado. Essas camadas foram importadas para uma categoria do tipo Temático, em um PI específico denominado “lin_TERRENO”;
- b) para evitar erros advindos de imprecisões cartográficas e de equívocos de mapeamento, foi utilizada a ferramenta de elaboração de mapas de distâncias (*buffer analisys*) para obter-se um corredor com 50 metros a partir do eixo das polilinhas que registram os lineamentos;
- c) transformação das feições vetoriais (polilinhas) para o formato matriz por meio do comando Temático/vetor- *raster*. Esse passo foi necessário pois o *software* executa a maioria das operações de análise geográfica que seriam desenvolvidas posteriormente a partir de arquivos no formato matriz.

Assim, ao final desse processo, obteve-se um plano de informação distinto, com os lineamentos tipo 1 e com os lineamentos tipo 2, ambos com suas representações vetorial e matricial adequadas para o processamento.

5.1.11.2- MAPA DE LINEAMENTOS EXTRAÍDOS DA IMAGEM LANDSAT 5 TM

O mapa de lineamentos da região de Porto Nacional baseado na interpretação de imagens Landsat foi produzido por Cunha (1996), o qual utilizou uma imagem sintética em composição colorida das bandas 3-4 e 5 do satélite sensor LANDSAT 5 TM obtida ano de 1989, para efetuar a extração visual dos lineamentos. Nesse processo, Cunha (1996) utilizou os preceitos elaborados por Amaro e Strieder (1994) e, assim, efetuou uma extração seletiva de lineamentos que permitiu a identificação de dois conjuntos principais denominados:

- **Lineamentos tipo 1:** que devem corresponder a estruturas penetrativas;
- **Lineamentos tipo 2:** que devem corresponder a falhas e fraturas.

Esses lineamentos foram sistematizados em dois mapas denominados de Mapa de lineamentos tipo 1 e Mapa de lineamentos tipo 2 (Cunha 1996). Para a sua utilização, no contexto dessa Tese, cada um desses dois planos de informação foi convertido para o formato

digital e inserido em camadas diferentes (*layers*) de um arquivo georreferenciado com extensão **.dxf**.

A **Figura 88** exibe o mapa de lineamentos estruturais do tipo 1 extraídos da imagem do sensor LANDSAT 5 TM. Já a **Figura 89** exibe os lineamentos estruturais do tipo 2 também extraídos dessa imagem.

**FIGURA 88. MAPA DE LINEAMENTOS ESTRUTURAIS DO TIPO 1
EXTRAÍDOS DA IMAGEM DO SENSOR LANDSAT 5 TM.**

**FIGURA 89. MAPA DE LINEAMENTOS ESTRUTURAIS DO TIPO 2
EXTRAÍDOS DA IMAGEM DO SENSOR LANDSAT 5 TM.**

5.1.12- MAPA DE LINEAMENTOS MAGNÉTICOS

Para a geração deste mapa derivado, foram utilizados dois mapas base, quais sejam:

- Mapa Aeromagnetométrico de lineamentos definidos pelo eixo de unidades magnéticas definidas a partir do campo magnético total micronivelado (**Figura 69**);
- Mapa Aeromagnetométrico de lineamentos interpretados sobre o mapa de filtro de primeira derivada vertical aplicado sobre o filtro de sinal analítico definidos a partir do campo magnético total micronivelado (**Figura 77**).

O mapa de lineamentos magnéticos foi traçado sobre o mapa do filtro da integral vertical aplicado sobre o *grid* do sinal analítico gerado a partir do campo magnético total micronivelado e corrigido para eliminar os valores negativos. Essa combinação foi utilizada pois esse foi o filtro que melhor salientou as estruturas magnéticas rasas (**Figura 71**). Nesse mapa, foram traçados os lineamentos magnéticos que apresentam maior variação na amplitude magnética (estruturas magnéticas mais marcantes). Os lineamentos magnéticos identificados apresentam os seguintes padrões característicos:

- a) ocorrem duas direções preferenciais de lineamentos: Nordeste e Noroeste;
- b) os lineamentos magnéticos NE predominam largamente na distribuição das feições identificadas. São lineares a levemente curvilíneas e materializam zonas com uma elevada variação de amplitude magnética;
- c) os lineamentos noroeste são lineares e possuem um comprimento menor, apesar de apresentarem as mesmas amplitudes magnéticas que os lineamentos Nordeste.
- d) um terceiro grupo de lineamentos identificados ocorrem em menor proporção e na orientação geral leste-oeste com inflexão para Nordeste. Esses lineamentos mostram-se curvilíneos e formam um padrão sigmoidal. Esse padrão sigmoidal torna-se mais intenso nas proximidades dos lineamentos magnéticos Nordeste, onde ocorre uma inflexão na direção desses. A inflexão desses lineamentos magnéticos para os lineamentos Nordeste mostra-se tão marcada que é possível identificar o sentido do deslocamento das estruturas que marcam as zonas magnéticas Nordeste (levógiro).

Considerando-se que o principal controle sobre a distribuição dos depósitos auríferos na região de Porto Nacional (TO) é estrutural, definido por zonas de cisalhamento

transcorrentes de 1ª e 2ª ordem os mapas de lineamentos magnéticos ganham importância prospectiva, porque permitem delinear o arcabouço estrutural magnético da área de interesse.

O mapa que mais ressaltou o arcabouço de lineamentos que ocorrem na região foi o de filtro da integral vertical aplicado sobre o *grid* de sinal analítico. Nesse mapa observa-se a orientação predominante a Nordeste dos lineamentos magnéticos na área e alguns lineamentos de acentuada magnitude orientados a Noroeste. O critério básico para a definição do traçado do lineamento foi o posicionamento do traço exatamente sobre o contato entre um alto e um baixo magnético, que ocorrem em profusão no mapa em tela.

Para a elaboração do mapa de lineamentos magnéticos, inicialmente, foi efetuada a formatação de um arquivo digital com duas camadas específicas: uma com a imagem processada anteriormente e georreferenciada e outra com uma camada específica para receber os traços dos lineamentos. Após esse procedimento, a imagem foi colocada da tela do software de vetorização (Autocad Map). Nesse software foi efetuada a vetorização dos lineamentos contidos na imagem original, de forma a gerar o mapa de lineamentos magnéticos da região de Porto Nacional (TO), o qual pode ser visualizado na **Figura 90**.

**FIGURA 90. MAPA DE LINEAMENTOS MAGNÉTICOS INTEGRADOS
IDENTIFICADOS PARA A ÁREA DE ESTUDO.**

5.1.13- MAPA DE LINEAMENTOS ESTRUTURAIS INTEGRADO

Os diversos mapas de lineamentos estruturais gerados ao longo dos trabalhos possibilitaram a identificação de uma elevada quantidade de elementos lineares que devem registrar, em sua larga maioria, as estruturas que foram originadas ao longo do desenvolvimento dos eventos deformacionais que ocorreram durante a evolução dos eventos tectono-metamórfico-deformacionais que afetaram essa porção da litosfera.

Uma das principais propriedades utilizadas nesse estudo foi a capacidade de superposição dos diversos produtos, já que todos foram elaborados com os mesmos parâmetros cartográficos digitais. Assim, as camadas referentes aos lineamentos extraídos dos diferentes produtos originais (imgens, *grids*, ect.) foram copiadas para um novo arquivo com a extensão .dxf denominado “integração de lineamentos”, onde foram dispostas em camadas específicas, cada uma com a denominação do produto geoprocessado que a originou, como segue:

- ✓ lineamentos LANDSAT tipo 1;
- ✓ lineamentos LANDSAT tipo 2;
- ✓ lineamentos magnéticos;
- ✓ lineamentos de terreno tipo 1;
- ✓ lineamentos de terreno tipo 2.

Após a formação do arquivo digital com essas camadas específicas, todas foram colocadas simultaneamente em uma única tela para uma análise integrada que buscou a eliminação de lineamentos sobrepostos. A regra básica de análise consistiu da retirada do lineamento com menor comprimento quando ocorresse sobreposição de lineamentos ou quando os lineamentos fossem paralelos e de mesmo comprimento e, mesmo, muito próximos. Neste último caso, um dos lineamentos foi retirado para evitar duplicidade decorrente de imprecisões cartográficas de montagem ou interpretação dos diferentes produtos que geraram os mapas originais.

Desses procedimentos, resultou o Mapa de Lineamentos Estruturais Integrado da região de Porto Nacional (TO), o qual pode ser visualizado na **Figura 91**.

**FIGURA 91. MAPA DE LINEAMENTOS ESTRUTURAIS INTEGRADO DA
REGIÃO DE PORTO NACIONAL (TO).**

5.1.14- MAPA ESTRUTURAL REGIONAL RECLASSIFICADO

O mapeamento das principais zonas de cisalhamento que compõem o **SZCPN** na área de interesse foi de fundamental importância para a definição de áreas prioritárias para o detalhamento das pesquisas prospectivas, bem como para a ponderação da favorabilidade para a ocorrência de depósitos auríferos, quando da realização do processamento para a integração de dados. Considerando-se esse contexto, buscou-se, a partir da elaboração do mapa de lineamentos estruturais integrado (**Figura 91**) e dos mapas de filtragem do campo magnético total a partir da primeira derivada vertical (**Figura 71**) e do sinal analítico sobre a primeira derivada vertical (**Figura 76**), a identificação de outras estruturas que pudessem agregar um maior detalhamento ao arcabouço estrutural da região, de forma a contribuir para o Mapa estrutural de Porto Nacional proposto por Mesquita (1996), o qual pode ser visualizado na **Figura 10**. Assim, a partir da base de dados de dados de campos obtidos por Mesquita (1996), Gottardo (1996) e Cunha (1996) e dos mapas supracitados, foi possível delinear com maior clareza a distribuição das zonas de cisalhamento na região de interesse, o que resultou no Mapa de somatório de lineamentos, o qual pode ser visualizado na **Figura 92**.

FIGURA 92. MAPA DE SOMATÓRIO DE LINEAMENTOS

Considerando-se esse contexto e as denominações definidas por Mesquita (1996), puderam ser efetuadas as seguintes observações:

a) a delimitação das bordas das zonas de cisalhamento de primeira ordem foi efetuada a partir do mapa integrado de lineamentos. A premissiva principal foi o agrupamento dos lineamentos (densidade por área) e o padrão (orientação média dos lineamentos). O mapa da **Figura 93** exhibe os resultados desse processo;

b) foram delimitadas seis zonas de deformação que devem registrar, no terreno, as zonas de cisalhamento transcorrentes associadas ao **SZCPN**;

c) Três das zonas de cisalhamento sistematizadas podem ser correlacionadas com aquelas indicadas por Mesquita (1996), quais sejam (de Oeste para Leste): Zona de Cisalhamento Córrego Muturn (**ZCM**), Zona de Cisalhamento Córrego Cachimbo (**ZCCa**) e Zona de Cisalhamento Córrego Conceição (**ZCCo**);

d) Outras três áreas caracterizadas como zonas de cisalhamento pertencentes ao **SZCPN** foram delimitadas uma na porção Sul-Sudoeste, outra na porção Norte-Noroeste e a última na porção Norte-Nordeste da área;

e) em termos gerais as estruturas possuem orientação geral Nordeste-Sudoeste (em torno de 45°) e conformação retilínea a sigmoidal;

f) em termos específicos pode-se destacar que:

f1) A **ZCM** ocorre na porção Sul-Sudoeste da área e exhibe um padrão curvilíneo. Essa estrutura está posicionada entre a **ZCCo** a Sul e a **ZCCa** a Norte. A espessura média na superfície do terreno é de cerca de 5.000 m e o comprimento é de aproximadamente 25 km. Essa estrutura afeta principalmente as rochas da **SMN** e em menor proporção da **SGgM**. Deve ser observado que essa estrutura ocorre predominantemente ao longo do contato entre a intrusão **GRJ** da Suíte Granítica Ipueiras e os metassedimentos da **SMN**. Não há ocorrências auríferas conhecidas associadas a essa estrutura tectônica.

f2) A **ZCCo** apresenta maior magnitude em termos de dimensões (comprimento e espessura no terreno), já que secciona praticamente toda a área de interesse, desde a sua porção sul, até no Norte, onde encontra-se recoberta pelas rochas da **FP** (Bacia do Parnaíba). A orientação geral é Nordeste-Sudoeste (cerca de 45°) e a forma é curvilínea a sigmoidal; onde a metade Sul da estrutura, considerando-se a área é mais linear e a metade Norte é mais sigmoidal. Em

terrenos de espessura, exibe maiores variações, com porções mais largas intercaladas com porções mais afinadas, o que demonstra um aspecto amendoado, principalmente na porção Norte da estrutura. A espessura numérica é de cerca de 500 m e a espessura maior ultrapassa 10.000 m. Na área de interesse ocorre por aproximadamente 80 km ao longo de um vetor Nordeste-Sudoeste. Essa estrutura afeta as rochas da s **SMN** e a borda leste da intrusão **GRJ** ao Sul, se propaga pelas rochas da **SGgM** no Centro-Norte da área e afeta as rochas da intrusão **GMC** na porção Norte da área. Nesse setor da região observa-se que a estrutura exibe um padrão ramificado, com três ramos principais com relação à distribuição das ocorrências auríferas conhecidas, verifica-se que essa estrutura está associada às 17 principais ocorrências conhecidas na região de Monte do Carmo, as quais estão vinculadas à intrusão **GMC** da Suíte Granítica Ipueiras.

f3) A **ZCCa** ocorre desde a confluência do rio Formiga com o Rio Tocantins na porção Sul da área onde faz contato com a **ZCCo**, até ser recoberta pelas rochas da **FP** na porção Norte da área. A orientação geral dessa estrutura é segundo um vetor Norte-Sudoeste e a conformação é curvilínea ao longo de toda a área. A espessura média no terreno é de cerca de 5.000 m, sendo homogênea ao longo de toda a região. Essa estrutura afeta, de Sul para Norte, as rochas da intrusão **GCI** (borda leste), as rochas da **SGgM** e as rochas da **SMN**. Em termos de vinculação com as ocorrências auríferas conhecidas, verifica-se a associação com pelo menos 32 ocorrências já identificadas, as quais distribuem-se ao longo de todas as porções da estrutura.

Além dessas três estruturas principais, foram sistematizadas outras três porções que devem caracterizar zonas de deformação transcorrente. Essas áreas foram denominadas “A”, “B” e “C” para efeitos de descrição, como segue:

- Área “A”: essa área situa-se na porção sul, borda leste da região de interesse e possui uma orientação geral Nordeste-Sudoeste. Essa área afeta as rochas da **SMN** e possui um forte alinhamento das estruturas ao longo do vetor Nordeste.

- Área “B”: essa área situa-se na porção Centro-Norte da área, na sua borda Oeste. Essa região possui o alinhamento das estruturas no sentido Leste-oeste, diferentemente das outras áreas de deformação. Isso pode ser o registro da inflexão da foliação milonítica de dobras “*en echelon*” posicionadas entre a **ZCCa** a leste e a **ZC Matança** que se situa a Oeste da área. Essa área de deformação afeta as rochas do **CPN** e da **SGgM**.

- Área “C”: essa área situa-se na porção Centro-Norte da área, em sua borda leste. Essa região

possui um forte alinhamento Nordeste-Sudoeste e afeta rochas da **SGgM**, **SMN** e principalmente a **FMC**.

Nessas três áreas não existem ocorrências auríferas mapeadas, nem uma maior caracterização geométrica e metamórfico-deformacional, estudos que devem ser realizados com o avanço das pesquisas.

Em termos de ponderação entre as diferentes zonas de cisalhamento para hierarquização da favorabilidade mineral para ouro, foi utilizada a ferramenta Tabulação Cruzada do *software* **SPRING**, o qual forneceu os seguintes resultados:

Tabela XXXI. Valores de coincidência, em km² das ocorrências auríferas conhecidas em cada uma das principais estruturas que compõem o **SZCPN** na região de interesse.

Plano-1: zonas_cisalhamento	
Plano-2: buffer300_ocorrencias	
Tabela cruzada de areas (em Km²)	
Zona de Cisalhamento	Ocorrências auríferas
ZCCo	0,2781
Outras	2,2122
ZCCa	11,1069

Pela observação dos dados da **Tabela** acima, verifica-se que a estrutura que contém a maior área de ocorrências auríferas é a zona de cisalhamento Córrego Cachimbo, a qual predomina largamente neste item sobre as outras estruturas. A seguir, mas em considerável menor proporção, se destacam as áreas associadas às outras zonas de cisalhamento ainda não sistematizadas e, por último, ocorre a zona de cisalhamento Córrego Conceição.

A partir desse processamento, tornou-se possível estipular uma ponderação para os PI que foram utilizados na integração pelo método **AHP**, como segue:

Tabela XXXII. Valores de ponderação em cada uma das principais estruturas que compõem o SZCPN na região de interesse.

Zona de Cisalhamento	Fator de Ponderação
ZCCo	0.3
Outras	0.3
ZCCa	0.1

Por último, a caracterização dos processos metamórficos e hidrotermais e, em especial a mineralogia gerada por esses processos foi de fundamental importância para a pesquisa prospectiva da área, porque possibilitou um entendimento mais preciso das respostas gamaespectrométricas e magnetométricas observadas, já que estas foram fortemente afetadas por processos dessa natureza.

Assim, a partir desse contexto, Mesquita (1996) identificou e efetuou a caracterização dos processos metamórfico- hidrotermais em duas das zonas de cisalhamento associadas ao SZCPN como segue:

- ZONA DE CISALHAMENTO CÓRREGO CACHIMBO (ZCCa)

As rochas geradas pela deformação e alteração metamórfico-hidrotermal nessa estrutura tectônica são milonitos precoces, quartzo milonitos e filonitos.

Os milonitos precoces se caracterizam pela formação indiscriminada de **mica branca**, que pode formar até porfiroblastos. Na matriz, constituída de **mica branca**, ocorrem monazita e zircão. Os milonitos e filonitos exibem uma variada assembléia mineral composta de **quartzo, mica branca, clorita, carbonato, estaurolita, granada, turmalina, relictos de albita, grafite e sulfetos**. Os quartzo-milonitos são compostos de bandas anastomosadas de **quartzo**, envoltas por uma matriz de **clorita e mica branca**.

Nas regiões mineralizadas, próximas dos veios quartzo, a matriz é substituída por material **grafitoso**.

Dessa paragênese mineral, pode-se concluir que a deformação e o metamorfismo hidrotermal nessa estrutura se processaram em condições do fácies estaurolita.

- ZONA DE CISALHAMENTO MUTUM (ZCM)

Os milonitos precoces apresentam características texturais e mineralógicas semelhantes aos gnáisses, contudo se observa uma formação mais consistente de **mica branca, carbonato e clorita** e a diminuição progressiva de **epidoto, titanita e hematita**, que não ocorrem nos termos miloníticos e filoníticos.

Os milonitos e filonitos tardios que ocorrem nessa estrutura exibem um bandamento metamórfico-hidrotermal com a alternância de bandas de **quartzo**, bandas de **biotita**, bandas de **mica branca e ilmemita**, bandas de **clorita** e bandas de **carbonato**, ou podem ser constituídas por um tipo único de banda. Os minerais que compõem os filonitos e milonitos são **biotita, clorita, mica branca, carbonato, quartzo e albita**. A mineralogia acessória é composta de **ilmenita, rutilo e apatita**.

Dessa paragênese mineral, pode-se concluir que a deformação e o metamorfismo hidrotermal nessa estrutura se processaram em condições do fácies xistos-verdes.

Um dos tópicos mais importantes para os estudos desenvolvidos nessa Tese foi a avaliação de perdas e ganhos de elementos geoquímicos nas zonas de cisalhamento desenvolvida por Mesquita (1996), já que a partir desse tipo de análise foi possível correlacionar as respostas gama e magnetométricas com o registro geoquímico das estruturas.

A **Tabela** abaixo, gerada, em parte, a partir dos dados de Mesquita (1996) indica as características geoquímicas dos processos de perdas e ganhos de elementos nas zonas de cisalhamento **ZCM** e **ZCCa** do **SZCPN**:

Tabela XXXIII. Caracterização geoquímica dos processos de perdas e ganhos de elementos nas zonas de cisalhamento **ZCM** e **ZCCa** do **SZCPN**.

Elemento	Processo de perda ou ganho
Si	Perda acentuada de SiO ₂ nas ZCCa, ZCM
Na	Perda acentuada de Na ₂ O nas ZCCa, ZCM
K	Aumento em ambas ZCCa, ZCM
Mg	Aumento em ambas, mais acentuado na ZCM
Fe	Aumento em ambas, mais acentuado na ZCM
Al	Constante em ambas as zonas ZCCa, ZCM (isoalumínio)
Ti	Aumento em ambas, ZCCa, ZCM
P	Aumento na ZCM, constante na ZCCa

Da análise dessa **Tabela** verificou-se que houve um aumento geral de K e Mg + Fe nas zonas de cisalhamento. Então, isso se refletiu na aerogamaespectrometria de forma que a assinatura de K deve ser maior nas zonas de cisalhamento do que nas encaixantes, já que houve aumento de K. O Th e o U acompanharam o mesmo comportamento do K, de maneira que também ocorreu um aumento desses elementos nas rochas afetadas pelas zonas de cisalhamento, quando comparadas às encaixantes. Isso pode ser demonstrado pelos mapas de anomalias aerogamaespectrométricas que registram, na maioria das vezes, uma associação das anomalias de K com as anomalias de Th e de U.

Com relação ao aumento de Mg+Fe, deve ter decorrido da sua entrada no mineral clorita (em grau muito baixo de metamorfismo), ou na magnetita (em temperaturas um pouco mais elevadas). Isso pode ser verificado pelo aumento da intensidade magnética no filtro de sinal analítico e no filtro de primeira derivada, nos mesmos locais onde ocorreu aumento da formação de áreas anômalas em K e situadas nos limites das zonas de cisalhamento.

Dessa forma, pode-se verificar que as estruturas que compõem o **SZCPN** foram armadilhas estruturais bastante favoráveis para a geração de depósitos auríferos, tanto por aspectos geométricos e cinemáticos, quanto pelos registros geoquímicos e pelas respostas aerogama e aeromagnetométricas associadas.

FIGURA 93. MAPA ESTRUTURAL REGIONAL RECLASSIFICADO A PARTIR DA INTEGRAÇÃO DE DADOS RELATIVOS A LINEAMENTOS ESTRUTURAIIS.

5.2- PONDERAÇÃO DA IMPORTÂNCIA DOS DIVERSOS TIPOS DE LINEAMENTOS MORFOESTRUTURAIS NA DISTRIBUIÇÃO DAS OCORRÊNCIAS AURÍFERAS

Para a geração dos mapas de favorabilidade, um dos procedimentos mais importantes foi a definição de critérios que possibilitassem quantificar a correlação entre as ocorrências auríferas e os lineamentos morfoestruturais extraídos de diferentes fontes (*e.g.* imagens de satélite LANDSAT 5 TM e *shaded relief map*). Para isso, inicialmente, foi efetuada uma análise visual, com o intuito de identificar padrões entre as ocorrências e os lineamentos. Os dados obtidos, de Sudoeste para Noroeste a partir da interpretação da **Figura 87a** foram:

- as ocorrências Filho do seu Né e Três Córregos estão associadas a um lineamento de orientação NE e pequena magnitude;
- a ocorrência São Bento ocorre associada a um lineamento de orientação NE de médio porte;
- a ocorrência Osmar situa-se próximo da intercessão entre um lineamento de orientação NW de grande porte e um lineamento NE de médio porte;
- a ocorrência Brecha Córrego Raposa encontra-se situada sobre um lineamento de forma sigmoidal, pequeno porte e orientação geral NE;
- as ocorrências Alexandria, João Comprido, Matão, Catuaba, e Caracol estão associadas a um mesmo lineamento de porte médio e orientação geral NE;
- na região das ocorrências Roque, Roberto, Fofoca, Veinho, Terezino, e Palhada ocorrem muitos lineamentos de pequeno porte paralelos, com orientação NE;
- as ocorrências Aleixo 1 e Aleixo 2 estão associados a terminação de um lineamento de médio porte de orientação NE;
- as ocorrências Ronaldo 1, Ronaldo 2 e Ronaldo 3 situam-se sobre um lineamento de médio porte e orientação NE;
- a ocorrência Dedéco situa-se sobre um lineamento de pequeno porte e orientação NE;
- a ocorrência Bananal situa-se sobre um lineamento de pequeno porte e orientação NE;

- as ocorrências Represa, Divisa e Divisa 1, estão situadas sobre um lineamento de pequeno porte e orientação NE;
- as ocorrências cidade do Carmo e Alvo Monte do Carmo, situam-se sobre um lineamento de médio porte e orientação NE;
- a ocorrência Tatá situa-se na terminação de um lineamento de pequeno porte e orientação NE;
- a ocorrência Bitonho situa-se sobre um lineamento de médio porte e orientação geral NE;
- a ocorrência Frontal situa-se na intercessão entre um lineamento intercessão NS pequeno porte e um lineamento NW grande porte;
- as ocorrências Magalhães 1, Magalhães 2, Paranaense, Enza, Freire, Manoelito, Fazenda Seu Wilson, Verena, Raiz e Três Veios, estão associadas a lineamentos de pequeno porte e orientação geral Nordeste.

Posteriormente, para a utilização dos lineamentos morfoestruturais no processo de integração de dados foi necessária a elaboração de outros procedimentos que possibilitassem efetuar uma ponderação entre as diferentes classes de lineamentos. Estabeleceu-se como critério de ponderação a área total de ocorrências auríferas associadas a cada tipo de lineamento morfoestrutural. Para tanto, o mapa digital que continha as classes “lineamentos morfoestruturais de terreno”, “lineamentos morfoestruturais LANDSAT Tipo 1” e “lineamentos morfoestruturais LANDSAT Tipo 2” foi exportada do AutoCAD Map 2000, na forma de um arquivo com a extensão **.dxf**, que é compatível com os *software* **SPRING**.

O mapa georreferenciado foi importado para o *software* **SPRING** e preparado para integração de dados por meio dos seguintes passos:

- a) importação das linhas correspondentes a distribuição dos diferentes tipos de lineamentos a partir de um arquivo **.dxf** georreferenciado, cada uma para um PI distinto;
- b) inserção da topologia na classe de dados que correspondia aos lineamentos de cada PI. A topologia definida consistiu da limpeza de eventuais linhas duplicadas, bem como o ajuste dos nós dos arcos. Após esse passo, foi efetuada a correlação entre as linhas editadas e cada uma das geo-classes que correspondiam aos diferentes tipos de lineamentos morfoestruturais;

c) geração de um mapa de distância com 30 metros de largura total, com faixa de 15 metros para cada lado do eixo que foi definido pelos lineamentos pertencentes a cada PI;

d) transformação das feições vetoriais (linhas) para o formato matriz por meio do comando Temático/vetor- matriz (*raster*). Esse passo foi necessário pois o *software SPRING* executa a maioria das operações de análise geográfica que seriam desenvolvidas a partir de arquivos no formato matriz, como discutido anteriormente.

e) como forma de se obter uma ponderação para esses dados, o critério escolhido foi a área de coincidência entre ocorrências auríferas registradas no mapa de ocorrências auríferas com *buffer* de 300 metros e formato matricial e os lineamentos reclassificados para o formato matricial contidos em cada PI. A ferramenta utilizada foi a Tabulação Cruzada disponível no *software SPRING*.

O resultado desse processamento consta da **Tabela XXXIV**, onde se observa a área de coincidência entre o *buffer* de 300 metros que representa cada ocorrência aurífera já conhecida na região e os diferentes tipos de lineamentos morfoestruturais.

Tabela XXXIV. Área de coincidência entre o *buffer* de 300 metros que representa cada ocorrência aurífera já conhecida na região e os mapas de lineamentos morfoestruturais reclassificados.

Tabela cruzada de áreas (em KmxKm):	
Tipologia dos Lineamentos	Área de coincidência
Lineamentos morfoestruturais de satélite LANDSAT Tipo 1	0,4158
Lineamentos morfoestruturais de satélite LANDSAT Tipo 2	0,3177
Lineamentos morfoestruturais de <i>shaded relief map</i> Tipo 1	0,4158
Lineamentos morfoestruturais de <i>shaded relief map</i> Tipo 2	0,0387

Os dados obtidos na **Tabela** acima foram utilizados posteriormente para efetuar a ponderação de favorabilidade entre os diferentes tipos de lineamentos observados. Os

resultados obtidos indicam que os lineamentos morfoestruturais obtidos a partir da imagem LANDSAT 5 TM tipo 1 e os lineamentos do tipo 1 obtidos pela análise do *shaded relief map* são fortemente coincidentes, em termos de correlação com as ocorrências auríferas. Por outro lado os lineamentos morfoestruturais obtidos a partir da imagem LANDSAT 5 TM tipo 2 exibem uma correlação bem mais acentuada com as ocorrências auríferas do que os lineamentos do tipo 2 obtidos pela análise do *shaded relief map*.

A **Figura 94** exibe o mapa de lineamentos estruturais do tipo 1 e do tipo 2 extraídos da imagem LANDSAT com os polígonos de distância de 50 metros no entorno do eixo de cada lineamento.

**FIGURA 94. MAPA DE LINEAMENTOS ESTRUTURAIS DO TIPO 1 E DO TIPO 2
EXTRAÍDOS DA IMAGEM LANDSAT COM OS POLÍGONOS DE DISTÂNCIA DE
50 METROS NO ENTORNO DO EIXO DE CADA LINEAMENTO.**

5.3- CORRELAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS COM AS OCORRÊNCIAS AURÍFERAS

5.3.1- INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS E DE IMT

5.3.1.1- ANÁLISE DAS RESPOSTAS AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS E DE IMT DAS OCORRÊNCIAS AURÍFERAS

Na região de Porto Nacional existem 81 ocorrências auríferas descritas. A análise das respostas aerogamaespectrométricas dessas ocorrências foi um passo fundamental na definição de critérios distintivos para a definição de novas áreas favoráveis, que ainda não foram identificadas.

A análise se baseou nos mapas de células reclassificados e nos dados da **Tabela XXXV**, abaixo relacionada, a qual exhibe a tipologia das respostas das ocorrências auríferas da região de Porto Nacional (TO).

Tabela XXXV. Valores das respostas aerogeofísicas das ocorrências auríferas da região de Porto Nacional (TO).

Denominação da Ocorrência	K	Th	CT	Th/K	TERNARIO CANAIS U-Th-K	TERNÁRIO RAZÕES	TERNÁRIO FATORES	IMT	FF
Aleixo II	145-156	169-180	858-906	1,0-1,8	ALTO U, TH E K	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	BAIXO K (D), MÉDIO U (D)	24658-24712	30-35
Alexandria	170_272	169-180	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH, BAIXA U/K, BAIXA TH/K	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Bananal	170_272	169-180	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Bitonho	170_272	169-180	858-906	1,0-1,8	ALTO U, TH E K	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	BAIXO K (D), MÉDIO U (D)	24658-24712	30-35
Brecha	170_272	169-180	858-906	0,8-1,0	ALTO U, TH E K	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	30-35
Brecha Cor.Raposo	170_272	180-265	1233-2525	1,0-1,8	ALTO U, TH E K	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	35-39
Caracol (Pastor)	170_272	169-180	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH, BAIXA U/K, BAIXA TH/K	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Catuaba	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH, BAIXA U/K, BAIXA TH/K	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Cidade do Carmo	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Dedéco	145-156	180-265	906-1233	0,8-1,0	ALTO U, TH E K	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	BAIXO K (D), MÉDIO U (D)	24658-24712	30-35
Descoberto	170_272	169-180	858-906	0,8-1,0	ALTO U, TH E K	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	30-35
Detector de Metais	170_272	180-265	1233-2525	0,8-1,0	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Dídimo	170_272	180-265	1233-2525	1,0-1,8	ALTO U, TH E K	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Divisa	145-156	169-180	1233-2525	0,6-0,8	ALTO U, TH E K	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	BAIXO K (D), MÉDIO U (D)	24658-24712	30-35
Divisa I	145-156	169-180	1233-2525	0,6-0,8	ALTO U, TH E K	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	BAIXO K (D), MÉDIO U (D)	24658-24712	30-35
Dona Domingas	170_272	160-169	668-858	0,8-1,0	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH, BAIXA U/K, BAIXA TH/K	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	30-35
Dourado I	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Dourado II	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24624-24658	50-85
Dourado III	170_272	180-265	1233-2525	0,8-1,0	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24624-24658	50-85
Dourado IV	170_272	180-265	1233-2525	0,8-1,0	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24624-24658	50-85
Enza	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24624-24658	50-85
Etivaldo	170_272	180-265	906-1233	1,0-1,8	ALTO U, TH E K	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	BAIXO K (D), MÉDIO U (D)	24658-24712	30-35
Fazenda seu Wilson	170_272	180-265	1233-2525	1,0-1,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Filho do seu Né	170_272	169-180	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH, BAIXA U/K, BAIXA TH/K	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Fofoca	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24624-24658	50-85

Tabela XXXV. Valores das respostas aerogeofísicas das ocorrências auríferas da região de Porto Nacional (TO), (continuação 1).

Denominação da Ocorrência	K	Th	CT	Th/K	TERNARIO CANAIS U-Th-K	TERNÁRIO RAZÕES	TERNÁRIO FATORES	IMT	FF
Frontel	170_272	169-180	858-906	0,8-1,0	ALTO U, TH E K	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	BAIXO K (D), MÉDIO U (D)	24658-24712	30-35
Gerbasa	170_272	169-180	906-1233	0,8-1,0	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24624-24658	50-85
João Comprido	170_272	169-180	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Juiz	170_272	180-265	1233-2525	0,8-1,0	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Leste	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	BAIXO K (D), MÉDIO U (D)	24658-24712	50-85
Magalhães I	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24624-24658	50-85
Magalhães II	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24624-24658	50-85
Manduca Norte	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	BAIXO K (D), MÉDIO U (D)	24658-24712	30-35
Manduca Sul	170_272	180-265	1233-2525	1,0-1,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	BAIXO K (D), MÉDIO U (D)	24658-24712	30-35
Manoel Bandeira	170_272	180-265	1233-2525	1,0-1,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	BAIXO K (D), MÉDIO U (D)	24624-24658	50-85
Manoelito	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH, BAIXA U/K, BAIXA TH/K	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24624-24658	50-85
Matão	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Moleque	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Monte do Carmo	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Monte do Carmo	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Monte do Carmo	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Nonato	170_272	180-265	1233-2525	1,0-1,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	30-35
Olímpio	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Osmar	170_272	160-169	1233-2525	0,8-1,0	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH, BAIXA U/K, BAIXA TH/K	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24594-24624	50-85
Otário	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Paiol	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Palhada	170_272	169-180	1233-2525	1,0-1,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	BAIXO K (D), MÉDIO U (D)	24658-24712	39-50
Paranaense	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO U, TH E K	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Paranaense II	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO U, TH E K	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Piritoso	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Primavera	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	30-35
Raiz	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH, BAIXA U/K, BAIXA TH/K	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24624-24658	50-85
Represa	145-156	169-180	1233-2525	0,6-0,8	ALTO U, TH E K	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Roberto I	170_272	169-180	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
RobertoII	170_272	169-180	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85

Tabela XXXV. Valores das respostas aerogeofísicas das ocorrências auríferas da região de Porto Nacional (TO), (continuação 2).

Denominação da Ocorrência	K	Th	CT	Th/K	TERNARIO CANAIS U-Th-K	TERNÁRIO RAZÕES	TERNÁRIO FATORES	IMT	FF
Ronaldo I	170_272	169-180	906-1233	0,8-1,0	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	30-35
Ronaldo II	170_272	169-180	858-906	0,8-1,0	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	30-35
Ronaldo III	170_272	169-180	858-906	0,8-1,0	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	30-35
Roque	170_272	169-180	1233-2525	1,0-1,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Santa Rosa	170_272	169-180	906-1233	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	BAIXO K (D), MÉDIO U (D)	24658-24712	30-35
São Bento	170_272	160-169	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH, BAIXA U/K, BAIXA TH/K	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Tatá	170_272	180-265	1233-2525	1,0-1,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	30-35
Teco	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	30-35
Teresino	170_272	169-180	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH, BAIXA U/K, BAIXA TH/K	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Tiofão	170_272	180-265	1233-2525	0,8-1,0	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Torre	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Trajano	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	30-35
Três Córregos	170_272	169-180	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH, BAIXA U/K, BAIXA TH/K	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24594-24624	50-85
Três Veios	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH, BAIXA U/K, BAIXA TH/K	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
VE 23	170_272	180-265	1233-2525	0,8-1,0	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24624-24658	50-85
Veinho	170_272	180-265	1233-2525	0,8-1,0	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	MÉDIA U/K, TH/K E BAIXA U/TH	BAIXO K (D), MÉDIO U (D)	24658-24712	30-35
Veinho II	170_272	180-265	1233-2525	0,8-1,0	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH, BAIXA U/K, BAIXA TH/K	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Veio 2	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Velha	170_272	180-265	1233-2525	1,0-1,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	30-35
Verena	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH, BAIXA U/K, BAIXA TH/K	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Vilani	170_272	169-180	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Vira Saia	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH, BAIXA U/K, BAIXA TH/K	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Vizinho Zuza (SD)	170_272	160-169	858-906	0,8-1,0	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH, BAIXA U/K, BAIXA TH/K	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	30-35
Zé Freire	170_272	180-265	1233-2525	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH, BAIXA U/K, BAIXA TH/K	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	50-85
Zuza	170_272	160-169	858-906	0,6-0,8	ALTO K, BAIXO U E BAIXO TH	ALTA U/TH, BAIXA U/K, BAIXA TH/K	K(D) E FATOR "F" INTERMEDIÁRIOS	24658-24712	30-35

A análise da tabela de respostas aerogamaespectrométricas das ocorrências auríferas permitiu verificar que:

a) Com relação ao canal do Potássio, as respostas foram predominantemente elevadas, com valores da ordem de 170 a 172 CPS em 75 das ocorrências, ou seja, 93,75% do total. Por outro lado, as ocorrências com valores mais baixos, entre 145 e 156 CPS, foram apenas 5, o que corresponde a 6,25% do total;

b) O canal do Tório apresentou uma distribuição predominante entre 180 e 265 CPS, que constituíram os valores mais elevados (62,5% do total). Em menor proporção ocorreram valores intermediários entre 169 e 180 CPS (31,25%) e, por último ocorreu uma pequena parcela de 5 ocorrências associadas a valores baixos de CPS de Tório entre 160 e 169;

c) Os dados de contagem total indicaram que as respostas foram predominantemente elevadas, os valores entre 1233 e 2525 CPS alcançaram 81,25% (65 ocorrências) do total. Em menor proporção ocorreram valores baixos (858 a 906 CPS) com 11,25% (9 ocorrências) e alguns valores intermediários (906-1233 CPS), que corresponde a 6,25% e 5 ocorrências. Ocorreu um valor muito baixo (668-858 CPS);

d) A razão Tório sobre Potássio apontou valores baixos em 60% das ocorrências (48 itens), seguida de valores intermediários (0,8 a 1), 23,75% que correspondem a 19 itens e com poucos valores elevados (1,0 a 1,8) em 13 ocorrências. Os valores de “Fator” F observados foram predominantemente elevados com 53 ocorrências situadas em áreas com valores entre 50 e 85 de FF, o que corresponde a 66%. Posteriormente ocorreram 25 depósitos com valores baixos entre 30 e 35 de FF (31,25% dos casos). Por último, ocorreu um caso com valor intermediário entre 39 e 50 de FF e outro valor intermediário em uma ocorrência com 35 a 39 de FF.

e) Os dados do *grid* ternário de canais indicaram uma predominância de 82,5% de respostas com alto Potássio, baixo Urânio e baixo Tório, o que corresponde a 66 ocorrências. A outra classe de respostas, com 17,5% e 14 ocorrências indicam altos valores de urânio, Tório e Potássio.

f) O *grid* ternário de razões indicou uma predominância de respostas com média razão U/K média razão Th/K e uma baixa razão U/Th que corresponderam a 40 ocorrências (50%). A seguir, foram obtidas respostas indicativas de uma elevada razão U/Th (22 ocorrências) com 27,5%. Por último, ocorreu a classe com elevada razão U/k, com 18 ocorrências (22,5%);

g) Em termos do *grid* ternário de fatores, observou-se a predominância de respostas com Potássio normalizado (Kd) e Fator F intermediários com 66 ocorrências, ou 82,5%. A outra classe de respostas com 14 ocorrências, ou 17,5% do total indica valores baixos de Potássio normalizado (Kd) e valores médios de Urânio normalizado (Ud);

h) O *grid* de IMT indicou a predominância de valores elevados de campo magnético total, onde a classe 24658 – 24712 nT apresentou 66 ocorrências ou 82,5% do total. A seguir, ocorre a classe com valores intermediários (24624 – 24658 nT) que correspondem a 12 ocorrências e 15% do total. Por último, ocorreu a classe de valores baixos com 24594 – 24624 MT com 2,5% e duas ocorrências associadas.

Em termos gerais, observou-se que as respostas gamaespectrométricas das ocorrências estiveram associadas predominantemente a valores elevados de potássio, de Tório e de contagem total, o que pode ser considerado um indicativo de que as ocorrências estão associadas a concentração de elementos mais incompatíveis, em um comportamento esperado para ouro.

No caso dos grids compostos (razões, fatores ou ternários), observou-se valores intermediários, sendo o grid de Fator F o que representou uma acentuada associação de valores elevados com as ocorrências .

5.3.2- INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROMAGNETOMÉTRICOS

O principal elemento de análise de correlação entre as ocorrências auríferas e a aeromagnetometria é a relação de distribuição entre as ocorrências conhecidas e os lineamentos magnéticos gerados a partir da análise do campo magnético total micronivelado ou do mapa derivado das filtragens aplicadas para melhor ressaltar os lineamentos. Nesse contexto, foram efetuadas duas análises distintas, com as suas respectivas ponderações, quais sejam:

5.3.2.1- INTERPRETAÇÃO ENTRE A DISTRIBUIÇÃO DAS OCORRÊNCIAS AURÍFERAS E OS LINEAMENTOS MAGNÉTICOS DE CAMPO TOTAL

Se o mapa de lineamentos magnéticos de campo total da **Figura 69** for visualizado no sentido Sudoeste para Nordeste, observam-se as seguintes feições principais:

Na porção Sudoeste, ocorre uma forte concentração de lineamentos retilíneos, com forte orientação NE – SW, que seccionam as rochas da **SMN**, predominantemente. Mais em direção a NE, na região do **GRJ**, nota-se que os lineamentos tendem a contornar a intrusão, e o seu registro permanece mais marcado nas rochas da **SMN**. Apenas um lineamento de porte mais considerável secciona a intrusão, com orientação nordeste e posicionado, aproximadamente, na sua porção central.

Na região do Granito Córrego Itabóca, nota-se uma forte ocorrência de lineamentos de orientação NE-SW, posicionados principalmente sobre as rochas da **SGgM** e sobre o **GCI**. Nota-se que esses lineamentos possuem um formato mais curvilíneo e menores comprimentos.

Na porção Norte da área, observa-se uma menor ocorrência de lineamentos, que distribuem-se em todas as unidades da rocha.

Se forem consideradas as ocorrências auríferas e a sua correlação com os lineamentos extraídos, podem ser efetuadas as seguintes avaliações:

- Em termos gerais, todas as ocorrências estão associadas espacialmente a um dos lineamentos magnéticos identificador do SW para NE da área, especificamente, nota-se que:
- As ocorrências Filho do seu Zé e Três Córregos estão associadas a lineamentos de orientação NE e pequeno porte;
- As ocorrências Alexandria e João Comprido situam-se na intercessão entre dois lineamentos, um de pequeno porte outro de médio porte. Este último, também ocorre associado aos garimpos Caracol, Catuaba e Matão;
- As ocorrências Ronaldo 1, 2 e 3 ocorrem associadas a um lineamento de porte médio de orientação NE;
- As ocorrências Bitonho, Divisa e Divisa 1, Represa e Bananal estão todas associadas a um lineamento de forma sigmoidal e orientação principal NE;
- A ocorrência Santa Rosa está associada a um lineamento de orientação NE, quase NS;
- A ocorrência Osmar ocorre associada à terminação de um lineamento de porte médio e orientação NE;

- A ocorrência Gerbasa ocorre associada a um lineamento de pequeno porte, de orientação NE;
- Os garimpos da Fazenda Wilson, Manoelito, Raiz, Três Veios, Freire, Enza, Paranaense e Magalhães 1 e 2 ocorrem associados a um lineamento de grande porte, de orientação NE;
- A ocorrência frontal encontra-se associada a um lineamento de grande porte de orientação NW-SE, assim como as ocorrências Trajano, Velha, Paiol, Torre, Veio 2 , e Piritoso ocorrem associadas a outro lineamento de médio porte e também de orientação NW-SE.

Para a utilização dos lineamentos magnéticos de campo total no processo de integração de dados foi necessária a realização de diversos procedimentos que possibilitassem efetuar uma ponderação desses dados. Estabeleceu-se como critério de ponderação a área total de ocorrências auríferas associadas a lineamentos magnéticos de campo total.

Para tanto, o mapa digital que continha a classe “lineamentos magnéticos de campo total “ foi exportada do AutoCAD Map 2000, na forma de um arquivo com a extensão ***.dxf**, que é compatível com os *software* **SPRING**.

O mapa georreferenciado foi importado para o *software* **SPRING** e preparado para integração de dados por meio dos seguintes passos:

- a) importação das linhas correspondentes a distribuição dos lineamentos no terreno a partir de um arquivo .dxf georreferenciado;
- b) inserção da topologia na classe de dados que correspondia aos lineamentos. A topologia definida consistiu da limpeza de eventuais linhas duplicadas, bem como o ajuste dos nós dos arcos. Após esse passo, foi efetuada a correlação entre as linhas editadas e uma geo-classe que correspondia aos lineamentos magnéticos de campo total;
- c) geração de um mapa de distância com 30 metros de largura total, com faixa de 15 metros para cada lado do eixo que foi definido pelos lineamentos magnéticos;
- d) transformação das feições vetoriais (linhas) para o formato matriz por meio do comando Temático/vetor- matriz (*raster*). Esse passo foi necessário pois o *software* **SPRING** executa a maioria das operações de análise geográfica que seriam desenvolvidas a partir de arquivos no formato matriz, como discutido anteriormente.
- e) como forma de se obter uma ponderação para esses dados, o critério escolhido foi a área de coincidência entre ocorrências auríferas registradas no mapa de ocorrências auríferas com

buffer de 300 metros e formato matricial e os lineamentos reclassificados para o formato matricial. A ferramenta utilizada foi a Tabulação Cruzada disponível no software **SPRING**.

O resultado desse processo consta da **Tabela XXXVI**, onde se observa a área de coincidência entre o *buffer* de 300 metros que representa cada ocorrência aurífera já conhecida na região e o mapa de lineamentos magnéticos de campo total reclassificados.

Tabela XXXVI. Área de coincidência entre o *buffer* de 300 metros que representa cada ocorrência aurífera já conhecida na região e o mapa de lineamentos de campo total reclassificado.

Tabela cruzada de áreas (em Km²):	
Plano-1 (nas linhas) : lin mag campo total	
Plano-2 (nas colunas): ocorrências_buffer300	
Tipologia dos Lineamentos	Área de coincidência
Lineamentos magnéticos de campo total tipo 1	0,2079
Lineamentos magnéticos de campo total tipo 2	0

O dado obtido na **Tabela** acima foi utilizado, posteriormente, para efetuar a ponderação de favorabilidade entre os diferentes tipos de lineamentos observados.

5.3.2.2- INTERPRETAÇÃO DO MAPA DE LINEAMENTOS GERADO PELO FILTRO DE SINAL ANALÍTICO SOBREPOSTO AO FILTRO DE PRIMEIRA DERIVADA VERTICAL

A partir da análise do mapa da **Figura 77**, de sul para norte observa-se que os lineamentos que ocorrem na porção sul da área são predominantemente retilíneos, e de orientação geral N45°E. Na porção central da área, entre as coordenadas UTM N8760000 até N8820000, observa-se que predominam lineamentos de menor porte, com morfologia menos retilínea e distribuição mais difusa, apesar da orientação geral ainda ser a nordeste. Na porção

norte da área, a partir da coordenada UTM N 880000, nota-se uma baixa ocorrência de lineamentos.

Em termos litoestruturais, se observa que os lineamentos na porção sul da área devem corresponder a eixos de dobras S_{m+2} que ocorrem associadas às rochas da **SMN**. Já se forme considerados os granitos da **SGL**, se observa um maior espaçamento e um menor número de lineamentos, o que deve indicar rochas menos afetadas pela deformação.

As zonas de cisalhamento **ZCM** a oeste e **ZCCo** a leste são bem definidas como zonas de concentração de lineamentos que circundam as rochas da **SGL**.

Também se observou, como feição de destaque, quatro zonas de concentração de lineamentos de orientação NW-SE, que seccionam toda a área de estudo.

Considerando-se a correlação entre a distribuição dos lineamentos e as ocorrências auríferas da região, verifica-se que das 81 ocorrências conhecidas, apenas quatro não estão associadas aos lineamentos identificados nesse produto, quais sejam: Brecha Córrego Raposo, Santa Rosa, Detector de Metal, Tio Fão.

As outras 77 ocorrências estão posicionadas sobre ou próximas, lateralmente aos lineamentos identificados, o que indica que os lineamentos aeromagnetométricos identificados pela superposição do filtro de sinal analítico sobre o de primeira derivada vertical identificou com eficácia as estruturas tectônicas que controlam a distribuição dos veios de quartzo mineralizado.

Nota-se, também, que nas áreas de intercessão entre lineamentos de orientação NE e de orientação NW existem pelo menos oito ocorrências sobre, ou muito próximas às zonas de intercessão.

Isso sugere que essas áreas constituíram locais favoráveis para a geração de zonas de dilatância.

Para a utilização dos lineamentos magnéticos filtrados no processo de integração de dados foi necessária a realização de diversos procedimentos que possibilitassem efetuar uma ponderação desses dados. Estabeleceu-se como critério de ponderação a área total de ocorrências auríferas associadas a lineamentos magnéticos de campo total.

Para tanto, o mapa digital que continha a classe “lineamentos magnéticos filtrados” foi exportada do AutoCAD Map 2000, na forma de um arquivo com a extensão **.dxf**, que é compatível com os **software SPRING**.

O mapa georreferenciado foi importado para o **software SPRING** e preparado para integração de dados por meio dos seguintes passos:

- a) importação das linhas correspondentes a distribuição dos lineamentos magnéticos filtrados no terreno a partir de um arquivo **.dxf** georreferenciado;
- b) inserção da topologia na classe de dados que correspondia aos lineamentos magnéticos filtrados. A topologia definida consistiu da limpeza de eventuais linhas duplicadas, bem como o ajuste dos nós dos arcos. Após esse passo, foi efetuada a correlação entre as linhas editadas e uma geo-classe que correspondia aos lineamentos magnéticos de campo total;
- c) geração de um mapa de distância com 30 metros de largura total, com faixa de 15 metros para cada lado do eixo que foi definido pelos lineamentos magnéticos;
- d) transformação das feições vetoriais (linhas) para o formato matriz por meio do comando Temático/vetor- **raster**. Esse passo foi necessário pois o **software SPRING** executa a maioria das operações de análise geográfica que seriam desenvolvidas a partir de arquivos no formato matriz, como discutido anteriormente.
- e) como forma de se obter uma ponderação para esses dados, o critério escolhido foi a área de coincidência entre ocorrências auríferas registradas no mapa de ocorrências auríferas com **buffer** de 300 metros e formato matricial e os lineamentos reclassificados para o formato matricial. A ferramenta utilizada foi a Tabulação Cruzada disponível no software **SPRING**.

O resultado desse processo consta da **Tabela XXXVII**, onde se observa a área de coincidência entre o **buffer** de 300 metros que representa cada ocorrência aurífera já conhecida na região e o mapa de lineamentos magnéticos filtrados reclassificados.

Tabela XXXVII. Área de coincidência entre o *buffer* de 300 metros que representa cada ocorrência aurífera já conhecida na região e o mapa de lineamentos de campo total reclassificado.

Tabela cruzada de áreas (em Km²):	
Plano-1 (nas linhas) : lin mag campo total	
Plano-2 (nas colunas): ocorrências_buffer300	
Tipologia dos Lineamentos	Área de coincidência
Lineamentos magnéticos filtrados tipo 1	0,7731
Lineamentos magnéticos filtrados tipo 2	0,0558

A observação dos resultados da Tabela permite concluir que os lineamentos magnéticos filtrados do tipo 1 possuem uma larga associação com as ocorrências, em comparação aos lineamentos magnéticos filtrados do tipo 2, o que corroborou a análise visual efetuada anteriormente. Os dados obtidos na **Tabela** acima foram utilizados, posteriormente, para efetuar a ponderação de favorabilidade entre os diferentes tipos de lineamentos observados.

5.4- MAPA INTEGRADO DE INTERFERÊNCIAS AMBIENTAIS

De posse do conjunto de mapas base composto por: solos, drenagens, cobertura de solo e declividade, foi gerado um mapa integrado que resultou do cruzamento ponderado desses planos de informação.

Como base teórica para o potencial de erosão, um dos fatores mais importantes para a determinação das interferências ambientais, foram utilizados os critérios estabelecidos por Embrapa (1998a), que cita as principais Características das Classes de Erodibilidade Potencial dos Solos Descritas no Estado do Tocantins como:

MUITO FRACA A FRACA: Compreende áreas formadas por solos, normalmente, de grande significado agrícola. São solos muito profundos, porosos, bem permeáveis - mesmo quando muito argilosos -, friáveis, situados em relevo plano, com declividades que raramente ultrapassam 3%. A ecodinâmica da paisagem é estável (pedogênese > morfogênese) e os processos de escoamento superficial são difusos e lentos.

LIGEIRA: Compreende áreas formadas por solos variando entre bem a fortemente drenados. São solos profundos e ocorrem em relevo suave ondulado (predomínio de declives entre 3 a 8%). A ecodinâmica da paisagem varia de estável à de transição (pedogênese ~ morfogênese). Os processos de escoamento superficial são difusos e lentos, com eventuais escoamentos concentrados.

MODERADA: Compreende áreas formadas por solos variando entre profundos a pouco profundos, com perfis permeáveis e pequenas diferenciações entre horizontes. Ocorrem normalmente em relevos ondulados (8 a 20% de declive). A ecodinâmica da paisagem é de *transição* (pedogênese < ou = morfogênese). Os processos de escoamento superficial são difusos e lentos e com ocorrência dos de tipo concentrado.

FORTE: A maioria dos solos dessa classe são pouco profundos, com drenagem moderada, possuem poucos agentes agregadores e uma estrutura maciça, sem coesão no horizonte superficial (A). A matéria orgânica é inexpressiva e restrita à esse horizonte. Eles ocorrem geralmente em relevo forte ondulado (declives com predomínio de 20 a 45%) e têm permeabilidade um tanto restrita, o que torna-os muito erodíveis. A ecodinâmica da paisagem é *instável* (pedogênese < morfogênese). Os processos de escoamento superficial são difusos e rápidos, concentrados ou até mesmo movimentos de massa, do tipo rastejamento e solifluxão, podem ocorrer.

MUITO FORTE: Compreende áreas formadas por solos rasos e muito rasos com presença de afloramentos de rochas. O relevo predominante vai do montanhoso até o escarpado, com declives maiores ou iguais a 45%. A ecodinâmica da paisagem é *muito instável* (pedogênese << morfogênese). Os processos de escoamento superficial são concentrados. Os movimentos de massa são do tipo deslizamento, desmoronamento, rastejamento e solifluxão, com eventuais quedas de blocos.

ESPECIAL: A condição da maioria dos solos referidos a essa classe vai de imperfeitamente drenados a muito mal drenados, com o nível do lençol freático, normalmente elevado. A ecodinâmica da paisagem é *instável* e de *transição* (pedogênese < ou = morfogênese). Os

processos envolvidos são de escoamento concentrado ao longo da drenagem, remobilização e deposição de sedimentos finos bem como, escoamento difuso e lento nas planícies, terraços fluviais e margens de lagos e, eventualmente, nos terraços fluviais, além de eventuais inundações.

Embrapa (1998a) utilizou a seguinte metodologia para a elaboração deste plano de informação (PI): como ponto de partida foi efetuada a reunião de documentos básicos (solos, geomorfologia, altimetria etc.) e a compatibilização das informações cartográficas, bibliográficas, numéricas e iconográficas disponíveis para o Tocantins. Foi constituído um banco de dados sobre os solos do Estado. Entre várias características integradas, foi avaliado o *fator de erodibilidade (K)* de cada unidade de solo. Ele foi qualitativamente determinado, tendo como base empírica uma parcela teórica de 25 m de comprimento, com declividade uniforme de 9%, em terreno preparado, hipoteticamente, no sentido do declive e deixado livre de vegetação. As informações, integradas no SGI/INPE, serviram para geração de dois PIs básicos: *classes de declividades* e *potencial erosivo dos solos*.

Para a obtenção do PI *classes de declividades*, digitalizaram-se as curvas de nível, equidistantes de 100m, a partir de cartas planialtimétricas do IBGE, na escala 1:250.000. Por meio de manipulações automáticas no Sistema de Informações Geográficas, foi gerado um Modelo Numérico do Terreno (MNT) e uma primeira versão das classes de declividades. Após ajustes com imagens de satélite e de radar, se constituiu o PI definitivo, com os seguintes intervalos de declives: Classe A) <5%; Classe B) 5 a 10%; Classe C) 10 a 15%; Classe D) 15 a 30%; Classe E) 30 a 45% e Classe F) > 45%.

Para a obtenção do PI *potencial erosivo dos solos*, um conjunto de variáveis intrínsecas às 53 unidades de mapeamento (textura, transição de horizontes, permeabilidade interna, estrutura etc.) foi relacionado com a erodibilidade potencial. A partir da combinação dessas variáveis foi gerado um indicador de potencial erosivo para cada unidade de solo, analisada no contexto geomorfológico. Aplicado às unidades de mapeamento, esse indicador serviu para gerar uma primeira versão do PI *potencial erosivo dos solos*. As áreas identificadas foram contextualizadas, segundo as unidades morfoestruturais e morfopedológicas propostas para o Tocantins pelo IBGE/DIGEO-CO-SE, dando origem à versão final do PI.

O PI *erodibilidade potencial dos solos* resultou dos PIs básicos *classes de declividades* e *potencial erosivo dos solos*. Realizaram-se cruzamentos digitais e matrizes de contingência

entre os PIs básicos, para a constituição de uma *matriz de decisão*. Essa *matriz* foi convertida em um *arquivo de regras* de cuja aplicação resultou a primeira versão das cartas de *erodibilidade potencial* do Estado. O tamanho, a forma, a dispersão e a localização das classes de erodibilidade foram consideradas e reclassificadas no contexto da ecodinâmica das paisagens (balanço entre pedogênese e morfogênese). Esse último procedimento deu origem à versão final do PI *erodibilidade potencial dos solos* do Estado do Tocantins.

A partir desse arcabouço, o mapa integrado foi gerado a partir da utilização da seguinte metodologia:

- a) geração de um arquivo digital no formato .dxf que continha em camadas específicas cada uma das classes de anomalias aerogamaespectrométricas identificadas;
- b) importação dos dados para um arquivo do *software SPRING* e inserção destes em uma categoria do modelo Temático/ anomalias_aerogamaespectrometricas, cada classe em um PI específico;
- c) geração de matriz de ponderação: para cada um dos critérios diagnósticos foi utilizado um valor de ponderação segundo o estipulado na ferramenta “Análise **AHP- Analytical Hierarchical Process**” do *software SPRING*, o que gerou a matriz de critérios ponderados da **Tabela XXXVIII**. A partir desse passo, foi elaborado um programa de integração na linguagem LEGAL para quantificação das interferências ambientais, com o arcabouço sintático gerado pela ferramenta “Análise **AHP**”, conforme pode ser observado abaixo:

Tabela XXXVIII. Matriz de critérios ponderados AHP.

Critério	Peso	Critério
FATIAMENTO_D	3	Algo Melhor
COBERTURA_S	6	Bem Melhor
COBERTURA_S	6	Bem Melhor
FATIAMENTO_D	8	Criticamente Melhor
FATIAMENTO_D	6	Bem Melhor
VEGETACAO	2	Um Pouco Melhor
		Igual

Razão de Consistência: 0.059

O programa em Legal utilizado para a análise de interferências ambientais teve a seguinte sintaxe:

```
{
// Pesos a ser aplicados

// COBERTURA_SOLOS = 0.288

// FATIAMENTO_DECLIVIDADE = 0.535

// SOLOS = 0.048

// VEGETACAO = 0.074
```

```
// Razao de consistencia

// CR = 0.059

// Programa em LEGAL

// Este programa deve ser completado

// pelo usuario para incluir os dados

// apresentados entre os sinais de <>

// Definicao dos dados de entrada

Tematico var1 ("COBERTURA_SOLOS");

Tematico var2 ("FATIAMENTO_DECLIVIDADE");

Tematico var3 ("SOLOS");

Tematico var4 ("VEGETACAO");

Tabela tab1 (Ponderacao);

tab1 = Novo (CategoriaIni = "COBERTURA_SOLOS" ,

            "vegetacao":0.8,

            "culturas":0.7,

            "agua":0.9,

            "solo":0.4);

Tabela tab2 (Ponderacao);

tab2 = Novo (CategoriaIni = "FATIAMENTO_DECLIVIDADE" ,

            "0-10":0.3,

            "10-20":0.3,

            "20-30":0.4,

            "30-40":0.7,
```

```

"40-50":0.7,
"50-60":0.7,
"60-70":0.7,
"70-80":0.7,
"80-90":0.7,
"90-100":0.7);

```

Tabela tab3 (Ponderacao);

```

tab3 = Novo (CategoriaIni = "SOLOS" ,
"latossolo_vermelho_escuro":0.7,
"latossolo_vermelho_amarelo":0.7,
"solos_hidromorficos":0.8,
"solos_litolicos":0.4);

```

Tabela tab4 (Ponderacao);

```

tab4 = Novo (CategoriaIni = "VEGETACAO" ,
"campo_cerrado":0.3,
"savana_arborea":0.7);

```

// Definicao do dado de saida

```
Numerico var5 ("FATORES_AMBIENTAIS");
```

// Recuperacao dos dados de entrada

```
var1 = Recupere (Nome="classificacao2-T_recortado");
```

```
var2 = Recupere (Nome="classes_declividade");
```

```
var3 = Recupere (Nome="solos");
```

```
var4 = Recupere (Nome="vegetacao");
```

```
// Criacao do dado de saida

var5 = Novo (Nome="fatores_ambientais_9", ResX=30, ResY=30, Escala=100000,
            Min=0, Max=1);

// Geracao da media ponderada

var5 = 0.288*(Pondere(var1, tab1)) + 0.535*(Pondere(var2, tab2))+
0.048*(Pondere(var3, tab3))+ 0.074*(Pondere(var4, tab4));

}
```

A utilização desses procedimentos permitiu verificar que existem diversas lacunas no arcabouço produzindo automaticamente, de forma que foi necessária a complementação dos dados com ponderadores aplicados pelo operador para a plena implementação do programa.

As regras básicas de análise ponderada contidas no programa são:

- a)** as anomalias que ocorrem em áreas de elevada declividade, acima de 30%, têm maiores chances de apresentarem uma conformação original ou pouco modificada;
- b)** as anomalias que ocorrem em áreas próximas às drenagens têm maior probabilidade de conterem anomalias modificadas, geradas pela acumulação de sedimentos. Para restringir essa regra, foi considerado um corredor de distância de 200 metros a partir do eixo das drenagens;
- c)** as anomalias que ocorrem em áreas com pouca cobertura vegetal têm uma probabilidade maior de exibirem anomalias originais;
- d)** as anomalias que ocorrem em áreas com cobertura vegetal densa e de porte podem mascarar consideravelmente a geometria original das anomalias;
- e)** as anomalias que ocorrem em solos da classe Latossolo vermelho-amarelo têm maior probabilidade de apresentarem conformação original, por outro lado, as anomalias que ocorrem em solos da classe Solos Litólicos têm maior probabilidade de apresentarem conformação modificada.

A partir dessas regras, foi aplicado um fatiamento em três classes sobre o mapa gerado pelo programa em Legal, quais sejam:

- regiões de elevada interferência ambiental;
- regiões de média interferência ambiental;

- regiões de baixa interferência ambiental.

Dessa forma, foi possível implantar um critério de decisão sobre os diversos mapas de anomalias, o que possibilitou avaliar mais precisamente a capacidade de predição de favorabilidade mineral de cada anomalia aerogamaespectrométrica observada.

A **Figura 95** exibe os resultados da integração aplicada para verificação do grau de interferência ambiental sobre as anomalias aerogamaespectrométricas.

Para corroborar a análise, foi efetuada a tabulação cruzada entre as diferentes classes de favorabilidade e o buffer que contém as ocorrências auríferas, de forma a verificar qual a correlação entre essas variáveis. O resultado pode ser verificado na **Tabela XXXIX** abaixo:

Tabela XXXIX. Tabulação cruzada entre classes de interferência de fatores ambientais e ocorrências auríferas.

Tabela cruzada de areas (em KmXKm):	
Plano-1 (nas linhas) : fatiamento_fatores_ambientais	
Plano-2 (nas colunas): ocorrências_buffer300	
	Área de coincidência para cálculo
Interferência elevada	2.3697
Interferência média	1.2690
Interferência baixa	17.7840

FIGURA 95. RESULTADO DA INTEGRAÇÃO APLICADA PARA VERIFICAÇÃO DO GRAU DE INTERFERÊNCIA AMBIENTAL SOBRE AS ANOMALIAS AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS.

Com relação à forma e distribuição das anomalias aerogamaespectrométricas, a análise do modelo digital de elevação gerado por altimetria área de detalhe e do mpa de declividade, ambos, mais preciso que aquela originada a partir da interpolação de curvas de nível das cartas topográficas, forneceu subsídios importantes para análise do padrão de distribuição das anomalias aerogamaespectrométricas que foram identificadas na região. Essa correlação decorre do fato das leituras aerogamaespectrometria estarem relacionadas menos de 50 cm de profundidade, o que determina a forte influência de fatores como grau e processos intemperismo, formas e grau de dissecação do relevo, além da declividade das encostas. Isso pode acarretar o deslocamento e a geração de falsas anomalias, como discutido no capítulo 3, item 3.2.2.2.

A observação do MDE indica a existência dos seguintes compartimentos geomorfológicos principais:

- Domínio de terras elevadas com cotas entre 250 e 690m, subdividido em:

- Serras alinhadas a Nordeste – Sudoeste, definida por cristas das rochas metassedimentares da **SMN**;
- Morros alinhados a Nordeste -Sudoeste, associados as rochas graníticas da **SGI**. As vertentes desses morros exibem uma declividade menor do que aquela das cristas metassedimentares, além de exibirem invariavelmente matacões de tamanho até decamétrico nas encostas.
- Planaltos tabulares, que ocorrem na porção Nordeste da área, constituídas por escarpas abruptas de alta declividade e topo fortemente aplainado. São feições geomorfológicas que ocorrem associadas às rochas sedimentares da formação Pimenteirias, situadas na borda da Bacia Parnaíba.

- Domínio de terras baixas, com cotas entre 180 e 250m, marcado principalmente pela planície de inundação do rio Tocantins e dos seus tributários.

Nesse domínio predominam as rochas da **SGgM** e os filonitos e milonitos associados a essa unidade. Além disso, ocorrem próximo aos canais fluviais, extensos aluviões arenosos, associados ao Quaternário.

Em termos de grau de intemperismo, observa-se que o clima seco-chuvoso da área é fortemente agressivo para os pacotes litológicos, o que conduz á geração da área fortemente

aplainada, bem como a disseminação de pacotes de lateritas ferruginosas sobre todas as litologias da região.

Para corroborar essa análise, foi efetuada a tabulação cruzada entre as áreas com somatório das anomalias aerogamaespectrométricas e o mapa de grau de interferência de fatores ambientais. Os resultados da Tabela XXXX, indicam que:

Tabela XXXX. Tabulação cruzada entre classes de interferência de fatores ambientais e anomalias aerogamaespectrométricas.

Tabela cruzada de areas (em KmxKm):	
Plano-1 (nas linhas) : fatiamento_fatores_ambientais	
Plano-2 (nas colunas): fatiamento_anomalias_gama	
	Área de coincidência para cálculo
Interferência elevada	328,45
Interferência média	275
Interferência baixa	4094

Considerando-se a interrelação entre geomorfologia, intemperismo e a distribuição dos 4 conjuntos das anomalias aerogamaespectrométricas, observa-se o seguinte:

Conjunto 1: situa-se sobre o **GRJ**, da **SGI**, com um domínio de relevo elevado, desde as bordas até o núcleo da intrusão, o que evidencia uma grande possibilidade das anomalias estarem “in situ”.

Conjunto 2: posiciona-se na borda Sudoeste na intrusão **GCI**, de cotas elevadas, com inúmeros matacões mas de anomalias também se encontra predominantemente “in situ”.

Conjunto 3: situado na porção Centro-Norte da intrusão **GCI**, também está predominantemente associado a terras altas, o que parece indicar uma baixa propensão ao deslocamento das anomalias, especialmente na porção mais central da intrusão. Observa-se que as anomalias situam-se basicamente (praticamente 100% da área), no interior da intrusão, não sendo observadas nas terras baixas que a circundam.

Conjunto 4: situa-se na porção Norte-Nordeste da área, em um domínio de cotas intermediárias a altas, pode ser sub-dividido, em termos de associação litológica, em dois sub-conjuntos:

- Conjunto de anomalias associadas as rochas da **SGgM**, situa-se sobre cotas intermediárias que sugere uma maior tendência a registrar anomalias “*in situ*”;
- Conjunto de anomalias associadas a rochas da **SIG (GC)**: são anomalias situadas em cotas mais elevadas, na borda da intrusão granítica, em contato com as rochas da **SMN**. A tendência, devido estarem agrupadas em cotas elevadas e com alta declividade das encostas, é que essas anomalias estejam posicionadas “*in situ*”.

Em termos de análise integrada, pode-se efetuar as seguintes considerações:

- a) O fato de todas as anomalias ocorrerem em zonas superpostas, que formam agrupamentos, ou conjuntos, indica uma maior probabilidade de que estejam posicionadas “*in situ*”, já que, devido a mobilidade geoquímica dos elementos que constituem os diferentes canais e as suas razões, a tendência seria a de ocorrer padrões, ou halos de dispersão e não superposição.
- b) Outra forte evidência de posicionamento “*in situ*” é a localização dos conjuntos, invariavelmente, em área de cotas elevadas, o que indica que apesar dos processos acentuados de intemperismo e de erosão que ocorrem na área, não houveram condições suficientes para o transporte e a dispersão ao longo das áreas mais baixas.
- c) Por fim, apesar dos canais fluviais terem sido bem demarcados por teores mais elevados de K e Th, o que indica concentração por processos supergênicos e erosivos nas áreas baixas de acumulação de sedimentos, não ocorre nenhuma distribuição de áreas anômalas ao longo desses canais fluviais. Isso sugere a eficácia do parâmetro utilizado para a relação de anomalias.

A análise integrada do modelo digital de elevação, do mapa da **Figura 95** e das **Tabelas XXXIX e XXXX** permitiu concluir que na região de Porto Nacional a vegetação basicamente de cerrado e o relevo predominantemente plano devem causar pouca influência ambiental nos estudos aerogeofísicos prospectivos, já que a maioria das áreas anômalas se situa em regiões de baixa interferência de fatores ambientais.

5.5- ESTUDO DE FAVORABILIDADE MINERAL PARA DEPÓSITOS AURÍFEROS

5.5.1- PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS

Para determinação da favorabilidade mineral para depósitos auríferos na área de interesse, foram desenvolvidos os seguintes procedimentos em *software* de geoprocessamento **SPRING**:

- Criação do diretório tese para armazenar todos os produtos necessários ao geoprocessamento dos dados;
- Criação do arquivo tese.dbf como banco de dados gerenciador, no formato dbase IV;
- Criação do projeto “TESE” com as características da **Figura** abaixo:

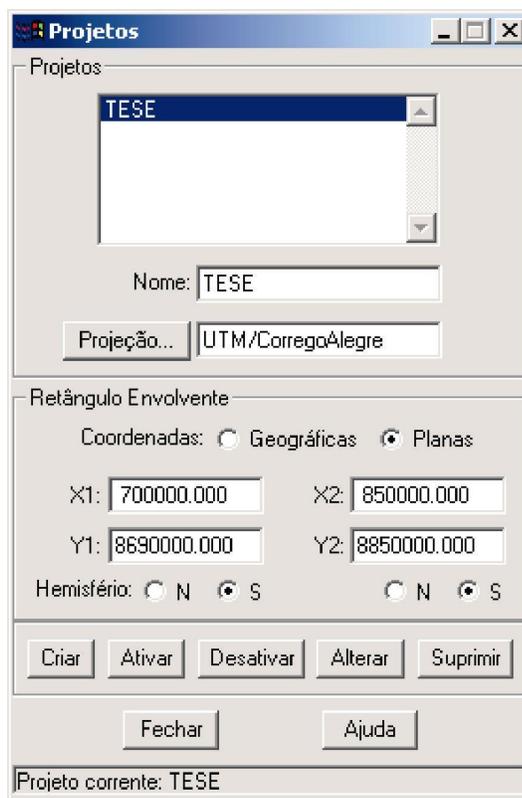


Figura 96. Características do projeto “TESE” no *software* SPRING.

- Criação dos modelos de dados Temático, Numérico e Imagem para receber os dados específicos para processamento;

- Importação dos seguintes tipos de dados no formato vetorial dxf 12 para o modelo temático, em planos de informação específicos: solos, vegetação, drenagens, geologia, lineamentos estruturais, lineamentos magnéticos, mapa de contagem total interpretado, mapa de canal do Potássio interpretado, mapa de canal do Tório interpretado, mapa da razão Th/K interpretado, mapa ternário U- Th- K interpretado, mapa ternário razões U/Th- U/K e Th/K interpretado, mapa ternário Ud-Kd - FF interpretado, mapa de anomalias integradas, mapa do campo magnético total mcronivelado interpretado;
- Importação do mosaico de imagens de satélite LANDSAT 5 TM disponibilizadas por Embrapa 2002 no formato *raster* TIFF para o modelo imagem, em um plano de informação específico;
- Importação dos dados de altimetria aérea no formato ASCII SPRING para o modelo numérico e inserção em um PI específico;
- Geração de topologia e classificação dos mapas temáticos por meio da ferramenta Edição topológica;
- Transformação dos mapas classificados do formato vetorial para matriz por meio da ferramenta “Vetor-Matriz”;
- Geração de grade numérica triangular para geração do mapa de declividade a partir dos dados de altimetria aérea;
- Geração do mapa de declividade a partir da grade triangular;
- Geração de grade retangular para elaboração da visualização 3D do Modelo Digital de Elevação da área;
- Geração de imagem sombreada para superpor ao MDE;
- Geração da imagem 3D com a representação do relevo da área;
- Registro do mosaico de imagens Landsat para georreferenciamento;
- Classificação do mosaico de imagens LANDSAT georreferenciado;
- Análise e modelagem dos diversos conjuntos de dados por meio da técnica **AHP**;
- Edição dos programas em LEGAL para inserção das ponderações específicas para cada PI;
- Geração dos diferentes mapas de favorabilidade;

- Análise crítica e interpretação dos resultados.

A **Tabela XXXXI**, abaixo, exibe os planos de informação utilizados no arquivo SPRING TESE para a integração de dados.

Tabela XXXXI. Planos de informação utilizados no arquivo SPRING TESE
para a análise de favorabilidade mineral.

	PLANO DE INFORMAÇÃO	FIGURA	FORMATO ORIGINAL	FORMATO INTEGRAÇÃO
1	Ocorrências auríferas	5	ASCII SPRING/pontos	Matriz/Geotiff
2	Cobertura vegetal	6	Vetor/dxf- polígonos	Matriz/Geotiff
3	Tipos de solos	7	Vetor/dxf- polígonos	Matriz/Geotiff
4	Rede de drenagens	8	Vetor/dxf- linhas	Matriz/Geotiff
5	Fator F	47	Vetor/dxf- polígonos	Matriz/Geotiff
6	Ternário U-Th-K	48	Vetor/dxf- polígonos	Matriz/Geotiff
7	Ternário razões U/Th-U/K-Th/K	49	Vetor/dxf- polígonos	Matriz/Geotiff
8	Ternário Fator F-U (Th)- K (Th)	50	Vetor/dxf- polígonos	Matriz/Geotiff
9	Anomalias aerogamaespectrométricas	64	Vetor/dxf- polígonos	Matriz/Geotiff
10	Lineamentos magnéticos campo total	69	Vetor/dxf- linhas	Matriz/Geotiff
11	Campo aeromagnetométrico total	70	Vetor/dxf- polígonos	Matriz/Geotiff
12	Lineamentos aeromagnetométricos filtrados	77	Vetor/dxf- linhas	Matriz/Geotiff
13	Mapa litológico reclassificado	81	Vetor/dxf- polígonos	Matriz/Geotiff
14	Mapa de contatos litológicos	82	Vetor/dxf- linhas	Matriz/Geotiff
15	Cobertura dos solos	83a	Imagem- Geotiff	Matriz/Geotiff

Tabela XXXXI. Planos de informação utilizados no arquivo SPRING TESE

para a análise de favorabilidade mineral (continuação).

	PLANO DE INFORMAÇÃO	FIGURA	FORMATO ORIGINAL	FORMATO INTEGRAÇÃO
16	Classes de declividade	85	Imagem- Geotiff	Matriz/Geotiff
17	Lineamentos de terreno	87a	Vetor/dxf- polígonos	Matriz/Geotiff
18	Lineamentos LANDSAT tipo 1	88	Vetor/dxf- linhas	Matriz/Geotiff
19	Lineamentos LANDSAT tipo 2	89	Vetor/dxf- linhas	Matriz/Geotiff
20	Somatório Lineamentos magnéticos	90	Vetor/dxf- linhas	Matriz/Geotiff
21	Somatório Lineamentos	91	Vetor/dxf- linhas	Matriz/Geotiff
22	Configuração das zonas de cisalhamento	93	Vetor/dxf- polígonos	Matriz/Geotiff

5.5.2- ANÁLISE DE FAVORABILIDADE

Os procedimentos de integração de dados foram baseados nos controles de mineralização e no modelo prospectivo dos depósitos auríferos da região, discutidos no Capítulo 2.

A integração de dados foi um processo complexo, devido aos inúmeros planos de informação elaborados nas fases anteriores da pesquisa. Para tanto, buscou-se reduzir os planos de informação a conjuntos afins, de forma que fossem gerados mapas integrados iniciais que posteriormente fossem reunidos em outros produtos que identificassem os controles estrutural, geológico e geoquímico relacionados aos depósitos auríferos.

A partir dessas premissas, foram considerados três controles principais para os depósitos auríferos da região, quais sejam:

5.5.2.1- CONTROLE GEOQUÍMICO

Esse controle foi caracterizado pela associação de alteração metamórfica e hidrotermal vinculada aos processos de deformação tectônica transcorrente que afetaram a área e que contribuíram fortemente para a formação dos eventos de mineralização aurífera.

As premissas da pesquisa foram:

- as áreas mineralizadas devem conter teores de elementos com resposta elevada nos levantamentos aerogamaespectrométricos;
- as áreas de elevados teores de contagem total, K, U e Th, bem como das razões e algoritmos elaborados a partir desses índices devem registrar áreas mais favoráveis para a ocorrência de rochas hidrotermalizadas e, conseqüentemente, mais favoráveis para a ocorrência de depósitos auríferos.

Os produtos aerogamaespectrométricos utilizados na análise de favorabilidade foram:

- Mapa Ternário de razões;
- Mapa Ternário de fatores;
- Mapa de Fator F;
- Mapa de Anomalias Aerogamaespectrométricas

Além destes, também foram utilizados:

- Mapa com o limite das Zonas de cisalhamento;
- Mapa de distribuição de ocorrências auríferas;
- Mapa de interferências ambientais;
- Mapa de distribuição de anomalias aerogamaespectrométricas.

Para a geração do mapa de favorabilidade para o controle geoquímico foi necessária a ponderação de cada uma das três categorias de dados aerogamaespectrométricos escolhidos. Para tanto, inicialmente buscou-se verificar a área de coincidência entre o *buffer* de 300 metros ao redor das ocorrências auríferas e cada plano de informação que continha os diferentes dados aerogamaespectrométricos, conforme pode ser verificado nas tabelas abaixo:

Tabela XXXXII. Áreas de coincidência entre as diferentes razões de canais do levantamento aerogamaespectrométrico e as ocorrências auríferas.

Classes de distribuição de Ternário Razões entre canais	Área total de cada classe	Áreas de coincidência entre as classes e o <i>buffer</i> de 300 m em torno das ocorrências em Km²
Média U/K, Th/K, U/Th	271,61	0,19
Média U/K, Th/K, baixa U/Th	595,27	1,61
Alta U/Th	1111,44	6,67
Alta U/Th, baixa U/K	969,23	10,04
Média U/K, Th/K, baixa U/Th	1872,84	2,93
TOTAL	4820,41	21,46

Tabela XXXXIII. Áreas de coincidência entre os diferentes fatores formulados a partir dos dados do levantamento aerogamaespectrométrico e as ocorrências auríferas.

Classes de distribuição de Ternário Fatores (Ud- Kd- FF)	Áreas de coincidência entre as classes e o <i>buffer</i> de 300 m em torno das ocorrências em Km²
K(d), U(d) e FF elevados	3,67
Baixo K(d), médio U(d) e FF	11,48
K(d) e FF intermediários, baixo U(d)	6,30
TOTAL	21,46

Tabela XXXIV. Áreas de coincidência entre as variáveis Fatores e as ocorrências auríferas.

Classes de distribuição de Ternário Fatores (Ud- Kd- FF)	Áreas de coincidência entre as classes e o buffer de 300 m em torno das ocorrências em Km²
K(d), U(d) e FF elevados	3,67
Baixo K(d), médio U(d) e FF	11,48
K(d), e FF intermediários, baixo U(d)	6,30
TOTAL	21,46

Tabela XXXV. Áreas de coincidência entre a variável Fator “F” e as ocorrências auríferas.

Classes de distribuição de Ternário Fatores (Ud- Kd- FF)	Áreas de coincidência entre as classes e o buffer de 300 m em torno das ocorrências em Km²
FF 50 a 85	11,23
FF 39 a 50	0,61
FF 35 a 39	1,52
FF 30 a 35	8,05

Para a avaliação do grau de associatividade entre as áreas anômalas e as ocorrências auríferas, foi utilizada a ferramenta “Tabulação Cruzada”, de forma a verificar a área de coincidência em km² de cada tipo de anomalia aerogamaespectrométrica em relação às ocorrências auríferas já identificadas. Esse procedimento buscou fundamentar os fatores de ponderação escolhidos para cada tipo de anomalia no processo de integração de dados.

Tabela XXXVI. Áreas de coincidência entre as áreas de anomalias aerogamaespectrométricas e as ocorrências auríferas.

Tipo de Anomalia	Áreas de coincidência entre as classes e o <i>buffer</i> de 300 m em torno das ocorrências em Km²
Contagem Total	1,8927
Fator F	1,8108
U	1,3257
K	0,4959
Kd	0,3834
Th	0,2790
Th-K	0
U-K	0
U-Th	0
Ud	0

A partir do estabelecimento das áreas de coincidência entre os diversos índices aerogamaespectrométricos e o *buffer* de 300 metros das ocorrências auríferas, foi possível o estabelecimento do valor de ponderação de cada PI que seria utilizado, posteriormente, na integração de dados, conforme pode ser visualizado na **Tabela** abaixo.

Tabela XXXXVII. Ponderação dos diferentes planos de informação utilizados na análise de favorabilidade por controle geoquímico.

Plano de Informação	Área de coincidência com as ocorrências auríferas	Fator de ponderação para a integração de dados
Média U/K, Th/K, U/Th	0,19	0,1
Média U/K, Th/K, baixa U/Th	1,61	0,2
Alta U/Th	6,67	0,5
Alta U/Th, baixa U/K	10,04	0,9
Média U/K, Th/K, baixa U/Th	2,93	0,3
K(d), U(d) e FF elevados	3,67	0,3
Baixo K(d), médio U(d) e FF	11,48	0,9
K(d), e FF intermediários, baixo U(d)	6,30	0,5
Alto FF	11,23	0,9
Médio FF	0,61	0,1
Baixo FF	1,52	0,2
Muito baixo FF	8,05	0,7
Anomalia Contagem Total	1,8927	0,2
Anomalia Fator F	1,8108	0,2
Anomalia K	0,4959	0,1
Anomalia Kd	0,3834	0,1

Tabela XXXXVII. Ponderação dos diferentes planos de informação utilizados na análise de favorabilidade por controle geoquímico (continuação).

Plano de Informação	Área de coincidência com as ocorrências auríferas	Fator de ponderação para a integração de dados
Anomalia Th	0,2790	0,1
Anomalia Th-K	0	0
Anomalia U	1,3257	0,2
Anomalia U-K	0	0
Anomalia U-Th	0	0
Ud	0	0

Para a geração dos mapas integrados que visaram avaliar o controle geoquímico foram reunidos, inicialmente, o mapa Ternário de Canais, o mapa Ternário de Fatores e o mapa Ternário de Razões, os quais foram integrados pelo método **AHP**, com os seguintes critérios de ponderação entre as diferentes categorias de dados:

Categories

- GAMA_INTER_CT
- GAMA_INTER_FF
- GAMA_INTER_K
- GAMA_INTER_Th
- GAMA_RAZDES
- GAMA_FATORES

Critério	Peso		Critério
GAMA_FATORES	5	Melhor	GAMA_INTER_C
GAMA_FATORES	5	Melhor	GAMA_RAZDES
GAMA_RAZDES	2	Um Pouco Melhor	GAMA_INTER_C
		Igual	

Razão de Consistência: 0.046

Calcular Peso Fechar Ajuda

Figura 97. Ponderação AHP para os mapas aerogamaespectrométricos ternários.

Dessa ponderação, resultou um programa em LEGAL, onde foram estipulados os fatores de ponderação entre as diferentes classes que compunham os PI's, conforme o critério de coincidência da classe com as ocorrências auríferas, descrito anteriormente. O programa apresentou a seguinte estrutura:

```
{
// Pesos a ser aplicados

// GAMA_FATORES = 0.709

// GAMA_INTER_CANAIS = 0.113

// GAMA_RAZOES = 0.179
```

```
// Razao de consistencia

// CR = 0.046

// Programa em LEGAL

// Este programa deve ser completado

// pelo usuario para incluir os dados

// apresentados entre os sinais de <>

// Definicao dos dados de entrada

Tematico var1 ("GAMA_FATORES");

Tematico var2 ("GAMA_INTER_CANAIS");

Tematico var3 ("GAMA_RAZOES");

Tabela tab1 (Ponderacao);

tab1 = Novo (CategoriaIni = "GAMA_FATORES" ,

            "K(d), U(d) e FF elevados":0.9,

            "Baixo K(d), médio U(d) e FF":0.5,

            "K(d), e FF intermediários, baixo":0.7);

Tabela tab2 (Ponderacao);

tab2 = Novo (CategoriaIni = "GAMA_INTER_CANAIS" ,

            "alto U, Th e K":0.9,

            "Alto K e alto Th":0.8,

            "Alto U e alto Th":0.7,

            "Medio U e Medio Th":0.4,

            "Alto K":0.7,

            "Medio K":0.5);
```

Tabela tab3 (Ponderacao);

```

tab3 = Novo (CategoriaIni = "GAMA_RAZOES" ,

    "media U-K,Th-K,U-Th":0.7,

    "media U-K,Th-K,baixa U-Th":0.5,

    "Alta U-Th":0.7,

    "Alta U-Th, baixa U-K, baixa Th-K":0.5,

    "Media U-K, Th-K, baixa U-Th":0.5);

// Definicao do dado de saida

Numerico var4 ("INTEGRACAO_GAMA_TERNARIOS");

// Recuperacao dos dados de entrada

var1 = Recupere (Nome="gama_fatores");

var2 = Recupere (Nome="gama_inter_canais");

var3 = Recupere (Nome="gama_razoes");

// Criacao do dado de saida

var4 = Novo (Nome="integracao_gama_ternarios", ResX=30, ResY=30, Escala=100000,

    Min=0, Max=1);

// Geracao da media ponderada

var4 = 0.709*(Pondere(var1, tab1)) + 0.113*(Pondere(var2, tab2))+ 0.179*(Pondere(var3,
tab3));

}

```

A execução do programa resultou em uma grade de valores de ponderação, sobre a qual foi efetuado um procedimento de fatiamento nas classes favorabilidade elevada, favorabilidade média e favorabilidade baixa. Desse processamento resultou o mapa da **Figura 98**.

**FIGURA 98. MAPA DE FAVORABILIDADE GERADO PELA INTEGRAÇÃO DOS
MAPAS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS TERNÁRIOS.**

Para possibilitar a avaliação da correlação entre a integração de mapas e a favorabilidade mineral, foi efetuada uma tabulação cruzada entre o fatiamento dos valores do mapa das classes de favorabilidade elevada, favorabilidade média e favorabilidade baixa e do mapa de distribuição de ocorrências auríferas. Desse processamento resultou a tabela abaixo, onde se observou que as ocorrências auríferas se associam principalmente a áreas de favorabilidade média (cerca de 32 ocorrências), favorabilidade baixa (28 ocorrências) e favorabilidade elevada (21 ocorrências).

Tabela XXXXVIII. Tabulação cruzada entre as classes de favorabilidade da integração dos mapas gamaespectrométricos ternários e do mapa de ocorrências auríferas.

Tabela cruzada de areas (em KmxKm):	
Plano-1 (nas linhas) : fatiamento_gama_ternarios	
Plano-2 (nas colunas): ocorrências_buffer300	
	Área de coincidência para cálculo
Favorabilidade elevada	5,2128
Favorabilidade média	8,5239
Favorabilidade baixa	7,7247

A interpretação do mapa da **Figura 98** associado à **Tabela XXXXVIII** indicou que apesar dos esforços em se retirar da ponderação fatores tais como a ocorrência de aluviões enriquecidos em Potássio e de unidades litoestratigráficas com elevado teor de Tório (**FP**), esses fatores ainda influenciaram fortemente o processamento, o que ocasionou a concentração de áreas de favorabilidade elevada em setores associados a essas características. Isso, por sua vez, diminuiu a capacidade preditiva desse produto para a prospecção de depósitos auríferos, já que a maioria das ocorrências foi associada a áreas de favorabilidade baixa e média.

Além disso, um fato de destaque foi a separação de diversas áreas de elevada favorabilidade associadas às rochas da **SGI**. Desse ponto de vista o processamento alcançou o os resultados esperados, já que essas rochas possuíam uma tendência a registrarem valores elevados em termos aerogamaespectrométricos, mas não haviam ainda sido alvo de um zoneamento interno. Com o processamento, foi possível avaliar que algumas áreas interessantes para futuros estudos prospectivos, em especial, a borda norte da intrusão **GCI**, a borda oeste da intrusão **GMC** e a borda norte da intrusão **GRJ**.

Após essa integração, o mapa ternário integrado resultante foi cruzado com o mapa de distribuição de Fator “F”, já que esse produto foi o que apresentou a melhor correlação entre áreas de FF elevado com distribuição de ocorrências auríferas. O processo de cruzamento foi efetuado pelo método **AHP**, com os seguintes critérios de ponderação entre as diferentes categorias de dados:

Critério	Peso		Critério
GAMA_INTER_F	5	Melhor	FATIAMENTO_G
		Igual	

Razão de Consistência: 0.000

Figura 99. Ponderação **AHP** para os mapas aerogamaespectrométricos

ternários integrados e o mapa de FF.

Dessa ponderação, resultou um programa em LEGAL, onde foram estipulados os fatores de ponderação entre as diferentes classes que compunham os PI's, conforme o critério de coincidência da classe com as ocorrências auríferas, como descrito anteriormente. O programa foi elaborado com a seguinte estrutura:

```
{
// Pesos a ser aplicados

// FATIAMENTO_GAMA_TERNARIOS = 0.833

// GAMA_INTER_FF = 0.167

// Razao de consistencia

// CR = 0.000

// Programa em LEGAL

// Este programa deve ser completado

// pelo usuario para incluir os dados

// apresentados entre os sinais de <>

// Definicao dos dados de entrada

Tematico var1 ("FATIAMENTO_GAMA_TERNARIOS");

Tematico var2 ("GAMA_INTER_FF");

Tabela tab1 (Ponderacao);

tab1 = Novo (CategoriaIni = "FATIAMENTO_GAMA_TERNARIOS" ,

            "favorabilidade_elevada":0.8,

            "favorabilidade_media":0.6,

            "favorabilidade_baixa":0.3);

Tabela tab2 (Ponderacao);
```

```

tab2 = Novo (CategoriaIni = "GAMA_INTER_FF" ,
            "FF 50 a 85":0.9,
            "FF 39 a 50":0.7,
            "FF 35 a 39":0.5,
            "FF 30 a 35":0.3);

// Definicao do dado de saida

Numerico var3 ("INTEGRACAO_GAMA_TERNARIOS_FF");

// Recuperacao dos dados de entrada

var1 = Recupere (Nome="fatiamento_gama_ternarios");

var2 = Recupere (Nome="fator_f");

// Criacao do dado de saida

var3      =      Novo  (Nome="integracao_gama_ternarios_FF",  ResX=30,  ResY=30,
Escala=100000,

            Min=0, Max=1);

// Geracao da media ponderada

var3 = 0.833*(Pondere(var1, tab1)) + 0.167*(Pondere(var2, tab2));

}

```

A execução do programa resultou em uma grade de valores de ponderação, sobre a qual foi efetuado um procedimento de fatiamento nas classes favorabilidade elevada, favorabilidade média e favorabilidade baixa. Desse processamento resultou o mapa aerogamaespectrométrico integrado da **Figura 100**.

FIGURA 100. MAPA DE FAVORABILIDADE DETERMINADO PELA INTEGRAÇÃO DOS DADOS DE MAPAS TERNÁRIOS E O MAPA DE FATOR F.

Para possibilitar a avaliação da correlação entre a integração de mapas e a favorabilidade mineral, foi efetuada uma tabulação cruzada entre o fatiamento dos valores do mapa das classes de favorabilidade elevada, favorabilidade média e favorabilidade baixa e do mapa de distribuição de ocorrências auríferas. Desse processamento resultou a tabela abaixo, onde se observou que as ocorrências auríferas se associam principalmente a áreas de favorabilidade média (cerca de 30 ocorrências), favorabilidade baixa (28 ocorrências) e favorabilidade elevada (23 ocorrências).

Tabela XXXXIX. Tabulação cruzada entre as classes de favorabilidade da integração dos mapas gamaespectrométricos ternários + Fator F e do mapa de ocorrências auríferas.

Tabela cruzada de areas (em KmxKm):	
Plano-1 (nas linhas) : fatiamento_gama_ternarios_FF	
Plano-2 (nas colunas): ocorrências_buffer300	
	Área de coincidência para cálculo
Favorabilidade elevada	5,2128
Favorabilidade média	8,5176
Favorabilidade baixa	7,6869

A interpretação do mapa da **Figura 100** associado à **Tabela XXXXIX** indicou que apesar dos esforços em se retirar da ponderação fatores tais como a ocorrência de aluviões enriquecidos em Potássio e de unidades litoestratigráficas com elevado teor de Tório (**FP**), esses fatores ainda influenciaram fortemente o processamento, o que ocasionou a concentração de áreas de favorabilidade elevada em setores associados a essas características. Isso, por sua vez, diminuiu a capacidade preditiva desse produto para a prospecção de depósitos auríferos, já que a maioria das ocorrências foi associada a áreas de favorabilidade baixa e média.

Em termos interpretativos, se verificou, como no mapa da **Figura 98** a separação de diversas áreas de elevada favorabilidade associadas às rochas da **SGI**. Desse ponto de vista o

processamento corroborou os resultados do processamento anterior (**Figura 98**), já que essas rochas possuíam uma tendência a registrarem valores elevados em termos aerogamaespectrométricos, mas não haviam ainda sido alvo de um zoneamento interno. Com o processamento, foi possível avaliar que algumas áreas interessantes para futuros estudos prospectivos, em especial, a borda norte da intrusão **GCI**, a borda oeste da intrusão **GMC** e a borda norte da intrusão **GRJ**.

Posteriormente, para a finalização da avaliação do controle geoquímico, foi efetuado o cruzamento ponderado do mapa que resultou da integração dos mapas aerogamaespectrométricos ternários e o mapa de Fator F com o mapa de Intensidade Magnética Total, processamento, este, que buscou conjugar toda a capacidade das ferramentas aerogeofísicas em determinar a tendência da composição geoquímica das rochas da área.

Dessa forma, foi efetuado um processamento pela técnica **AHP**, com as seguintes características:

Critério	Peso	Critério
CAMPO_MAGNE	2	FATIAMENTO_G
	Igual	

Razão de Consistência: 0.000

Calcular Peso Fechar Ajuda

Figura 101. Características do processamento de integração de dados aerogeofísicos gama e magnetométricos.

Esse processamento permitiu estruturar um programa em Legal, com a seguinte sintaxe:

```
{
// Pesos a ser aplicados
// CAMPO_MAGNETICO_TOTAL = 0.667
// FATIAMENTO_GAMA_TERNARIOS_FF = 0.333
// Razao de consistencia
// CR = 0.000
// Programa em LEGAL
// Este programa deve ser completado
// pelo usuario para incluir os dados
// apresentados entre os sinais de <>
// Definicao dos dados de entrada
Tematico var1 ("CAMPO_MAGNETICO_TOTAL");
Tematico var2 ("FATIAMENTO_GAMA_TERNARIOS_FF");
Tabela tab1 (Ponderacao);
tab1 = Novo (CategoriaIni = "CAMPO_MAGNETICO_TOTAL" ,
            "24712_24726":0.9,
            "24658_24712":0.7,
            "24624_24658":0.5,
            "24594_24624":0.3,
            "24538_24594":0.3);
Tabela tab2 (Ponderacao);
tab2 = Novo (CategoriaIni = "FATIAMENTO_GAMA_TERNARIOS_FF" ,
```

```

    "favorabilidade_elevada":0.9,

    "favorabilidade_media":0.5,

    "favorabilidade_baixa":0.3);

// Definicao do dado de saida

Numerico var3 ("INTEGRACAO_GAMA_TERNARIOS_IMT");

// Recuperacao dos dados de entrada

var1 = Recupere (Nome="campo_mag_total");

var2 = Recupere (Nome="fatiamento_gama_ternarios_FF");

// Criacao do dado de saida

var3 = Novo (Nome="integracao_gama_ternarios_IMT", ResX=30, ResY=30,
Escala=100000,

    Min=0, Max=1);

// Geracao da media ponderada

var3 = 0.667*(Pondere(var1, tab1)) + 0.333*(Pondere(var2, tab2));

}

```

A execução do programa resultou em uma grade de valores de ponderação, sobre a qual foi efetuado um procedimento de fatiamento nas classes favorabilidade elevada, favorabilidade média e favorabilidade baixa. Desse processamento resultou o mapa integrado da **Figura 102**.

Para possibilitar a avaliação da correlação entre a integração de mapas e a favorabilidade mineral, foi efetuada uma tabulação cruzada entre o fatiamento dos valores do mapa das classes de favorabilidade elevada, favorabilidade média e favorabilidade baixa e do mapa de distribuição de ocorrências auríferas. Desse processamento resultou a tabela abaixo, onde se observou que as ocorrências auríferas se associam principalmente a áreas de favorabilidade média (cerca de 57 ocorrências), favorabilidade baixa (9 ocorrências) e favorabilidade elevada (15 ocorrências).

Tabela L. Tabulação cruzada entre as classes de favorabilidade da integração dos mapas gamaespectrométricos ternários + Fator F + mapa de IMT e do mapa de ocorrências auríferas.

Tabela cruzada de areas (em KmxKm):	
Plano-1 (nas linhas) : fatiamento_gama_ternario_IMT	
Plano-2 (nas colunas): ocorrências_buffer300	
	Área de coincidência para cálculo
Favorabilidade elevada	3.9879
Favorabilidade média	15.9300
Favorabilidade baixa	1.4994

**FIGURA 102. MAPA DE FAVORABILIDADE DEFINIDO PARA O
CRITÉRIO DO CONTROLE GEOQUÍMICO.**

A interpretação do mapa da **Figura 102** associado à **Tabela L** indicou que esse produto foi mais restritivo do ponto de vista geoquímico e gerou uma filtragem de fatores tais como aluviões e unidades litoestratigráficas não correlacionáveis aos eventos de mineralização. Dessa forma, o produto mostrou-se mais consistente para a pesquisa prospectiva de áreas favoráveis a depósitos auríferos, mesmo que não tenha ocorrido uma correlação mais acentuada entre os depósitos auríferos conhecidos e as áreas de favorabilidade elevada do que nos produtos elaborados anteriormente.

Assim, pode-se citar que as áreas de favorabilidade elevada verificadas na porção norte da intrusão **GRJ**, na porção oeste do **GMC** e na porção centro-norte do **GCI** devem ser alvo de estudos de detalhamento prospectivo, bem como as novas áreas identificadas na porção norte e na porção sul da área e vinculadas ao **CPN**.

5.5.2.2- CONTROLE GEOLÓGICO E ESTRATIGRÁFICO

Esse controle foi caracterizado pela associação das unidades litodêmicas que o modelo prospectivo prevê como associadas aos eventos de mineralização aurífera e as regiões de contato entre essas unidades, consideradas áreas mais favoráveis para a ocorrência de depósitos auríferos. Como premissa, foram retiradas da análise as unidades Formação Monte do Carmo, Formação Pimenteiras e Coberturas Cenozóicas, as quais não possuem correlação temporal com os depósitos auríferos primários que são alvo desse estudo. Assim, para efeitos de ponderação foram utilizadas as seguintes unidades litodêmicas: Complexo Porto Nacional, Suíte Granítica Ipueiras, Suíte Granito-gnáissica Manduca e Suíte Metassedimentar Natividade. Entre esse conjunto de unidades foi necessário estabelecer uma relação de ponderação que indicasse qual a escala de favorabilidade para a ocorrência de depósitos auríferos.

Para esses procedimentos foram utilizados o mapa litoestrutural reclassificado o mapa de contatos litológicos e o mapa de ocorrências minerais.

Os dados foram preparados por meio dos seguintes passos: o mapa digital que continha cada classe (camada) com unidades litodêmicas de interesse, contatos litológicos e *buffer* de ocorrências auríferas foi exportado do AutoCAD Map 2000, na forma de um arquivo com a extensão ***.dxf**, que é compatível com os *software* **SPRING**.

O mapa georreferenciado foi importado para o *software* **SPRING** e preparado para integração de dados por meio dos seguintes passos:

- a) importação dos polígonos correspondentes a distribuição das unidades litodêmicas e litoestratigráficas no terreno a partir de um arquivo .dxf georreferenciado;
- b) inserção da topologia em cada polígono que correspondia a distribuição de uma unidade litodêmica ou litoestratigráfica no terreno. A topologia definida consistiu do fechamento automático dos polígonos e da limpeza de eventuais linhas duplicadas, bem como o ajuste dos nós dos arcos. Após esse passo, foi efetuada a correlação entre o polígono editado e uma geo-classe que correspondia a uma unidade litodêmica ou litoestratigráfica da área;
- c) transformação das feições vetoriais (polígonos e pontos) para o formato matriz por meio do comando Temático/vetor- matriz (*raster*). Esse passo foi necessário pois o *software* **SPRING** executa a maioria das operações de análise geográfica que seriam desenvolvidas a partir de arquivos no formato matriz, como discutido anteriormente.

Como fator de ponderação que possibilitasse a hierarquização da favorabilidade das diferentes unidades litodêmicas e litoestratigráficas foi utilizado o critério da área de coincidência entre ocorrências auríferas registradas no mapa de ocorrências auríferas com *buffer* de 300 metros e formato matricial e o mapa geológico reclassificado no formato matricial. A ferramenta utilizada foi a Tabulação Cruzada disponível no *software* **SPRING**.

O resultado desse processo consta da **Tabela LI**, onde se observa a área de coincidência entre o *buffer* de 300 metros que representa cada ocorrência aurífera já conhecida na região e o mapa geológico reclassificado, com suas respectivas unidades litodêmicas e litoestratigráficas.

Tabela LI. Área de coincidência entre o *buffer* de 300 metros que representa cada ocorrência aurífera já conhecida na região e o mapa geológico reclassificado.

Tabela cruzada de areas (em Km²):		
Plano-1 (nas linhas) : geologia		
Plano-2 (nas colunas): ocorrências_buffer300		
Denominação da unidade	Área da unidade para cálculo	Área de ocorrências auríferas na unidade
CC	1.315,05	1,34
FP	964,55	0,46
FMC	318,61	0,00
SIG	797,87	5,02

Tabela LI. Área de coincidência entre o *buffer* de 300 metros que representa cada ocorrência aurífera já conhecida na região e o mapa geológico reclassificado (continuação).

Tabela cruzada de areas (em Km²):		
Plano-1 (nas linhas) : geologia		
Plano-2 (nas colunas): ocorrências_buffer300		
SMN	1.201,27	3,36
SGgM	1.577,28	6,90
CPN	1.562,90	2,77
SMMt	449,53	0,00
SMN_facies_mafica	119,62	0,00
CPN_ultramaficas_mil	11,48	0,48
VULC_ACIDAS	44,95	0,47
VULC_BASICAS	150,24	0,61
SIG_facies_mafica	34,22	0,00

Observa-se pela análise desses dados que a unidade **SGgM** possui a maior afinidade com as ocorrências auríferas, com cerca de 20% a mais de área de ocorrências do que a unidade **SIG**, que contém a segunda maior distribuição de área de ocorrência. Em seguida, por ordem decrescente, estão as rochas da **SMN**, do **CPN** e das **CC**; as outras unidades possuem uma afinidade em proporção consideravelmente menor.

Dessa forma, a ponderação seguiu o seguinte critério:

Tabela LII. Fator de ponderação para cada unidade litodêmica e litoestratigráfica observada na área de interesse.

Denominação da unidade	Fator de ponderação
SGgM	0,8
SIG	0,7
SMN	0,5
CPN	0,7
CPN_ultramaficas_mil	0,8
VULC_BASICAS	0,8
VULC_ACIDAS	0,4

Para os contatos geológicos, foram utilizados os mesmos procedimentos, ou seja, o cálculo da coincidência de áreas entre o *buffer* de 300 metros de ocorrências auríferas e o *buffer* de 1.000 metros associado a cada contato de interesse.

Assim, por meio da utilização da ferramenta de Tabulação Cruzada disponível no *software SPRING*, foram obtidos os seguintes resultados:

Tabela LIII. Áreas de coincidência entre os contatos geológicos e as ocorrências auríferas.

Tabela cruzada de areas (em KmxKm):		
Plano-1 (nas linhas) : contatos geológicos		
Plano-2 (nas colunas): ocorrências_buffer300		
	Área do contato para cálculo	Área de ocorrências auríferas no contato
Contatos geológicos	1998	12,55

Após a determinação da área de coincidência entre os diferentes contatos litológicos e as ocorrências auríferas conhecidas, foram estabelecidos os valores de ponderação entre os diferentes contatos, desde a maior até a menor área de coincidência com as ocorrências. O resultado dessa ponderação pode ser verificado na **Tabela xxx**, abaixo:

Tabela LIV. Fator de ponderação para cada contato litológico observado na área de interesse.

	Fator de ponderação
Contatos geológicos	0,3

Para o estudo de favorabilidade foram utilizadas tanto as unidades quanto os contatos litológicos. As unidades que não possuíam correlação genética com os depósitos primários na área de abrangência do estudo foram desconsideradas no processo de ponderação (*i.e.* **CC**, **FP** **SMMt**). A ponderação integrada resultante foi a seguinte:

Tabela LV. Integração dos fatores de ponderação das unidades litodêmicas e dos contatos litológicos.

Denominação do PI	Fator de ponderação
SGgM	0,9
SIG	0,8
SMN	0,6
CPN	0,6
CPN_ultramaficas_mil	0,9
VULC_ACIDAS	0,5
VULC_BASICAS	0,7
Contatos geológicos	0,8

Para avaliação do controle geológico foram reunidos, inicialmente, o mapa geológico e o mapa de contatos geológicos, os quais foram integrados pelo método **AHP**, com os seguintes critérios de ponderação entre as diferentes categorias de dados:

Figura 103. Ponderação **AHP** para os mapas geológico e de contatos geológicos.

Dessa ponderação, resultou um programa em LEGAL, onde foram estipulados os fatores de ponderação entre as diferentes classes que compunham os PI's, conforme o critério de coincidência da classe com as ocorrências auríferas, como descrito anteriormente. O programa apresentou a seguinte estrutura:

```
{
// Pesos a serem aplicados

// CONTATOS_GEOLOGICOS = 0.750

// GEOLOGIA = 0.250

// Razao de consistencia

// CR = 0.000

// Programa em LEGAL

// Este programa deve ser completado

// pelo usuario para incluir os dados

// apresentados entre os sinais de <>

// Definicao dos dados de entrada

Tematico var1 ("CONTATOS_GEOLOGICOS");

Tematico var2 ("GEOLOGIA");

Tabela tab1 (Ponderacao);

tab1 = Novo (CategoriaIni = "CONTATOS_GEOLOGICOS" ,

            "contatos":0.8);

Tabela tab2 (Ponderacao);

tab2 = Novo (CategoriaIni = "GEOLOGIA" ,

            "CC":0,

            "FP":0,
```

```

"FMC":0,
"SGI":0.8,
"SMN":0.6,
"SGgM":0.9,
"CPN":0.6,
"SMMt":0,
"SMN_facies_mafica":0.7,
"CPN_ultramaficas_milonitizadas":0.9,
"VULC_ACIDAS":0.5,
"VULC_BASICAS":0.7,
"SGI_facies_mafica":0.6);

// Definicao do dado de saida

Numerico var3 ("CONTROLE_GEOLOGICO");

// Recuperacao dos dados de entrada

var1 = Recupere (Nome="contatos_buffer1000m");
var2 = Recupere (Nome="geologia");

// Criacao do dado de saida

var3 = Novo (Nome="controle_geologico2", ResX=30, ResY=30, Escala=100000,
            Min=0, Max=1);

// Geracao da media ponderada

var3 = 0.750*(Pondere(var1, tab1)) + 0.250*(Pondere(var2, tab2));

}

```

A execução do programa resultou em uma grade de valores de ponderação, sobre a qual foi efetuado um procedimento de fatiamento com o limite inferior em 0,6 e o limite

superior em 0,825. O passo de separação das classes de fatiamento foi 0,0225 o que resultou em dez classes iguais divididas em

- Favorabilidade elevada com 930,5964 km² de área;
- Favorabilidade média com 546,7959 km² de área;
- Favorabilidade baixa com 479,321 km² de área.

Desse processamento resultou o mapa da **Figura 104**.

FIGURA 104. MAPA DE FAVORABILIDADE PARA CONTROLE LITOLÓGICO.

Para possibilitar a avaliação da correlação entre o mapa resultante das litologias + contatos e a favorabilidade mineral, foi efetuada uma tabulação cruzada entre o fatiamento dos valores do mapa das classes de favorabilidade elevada, favorabilidade média e favorabilidade baixa e do mapa de distribuição de ocorrências auríferas. Desse processamento resultou a tabela abaixo, onde se observou que as ocorrências auríferas se associam principalmente a áreas de favorabilidade média (cerca de 39 ocorrências), favorabilidade baixa (2 ocorrências) e favorabilidade elevada (5 ocorrências). As ocorrências restantes estão posicionadas fora das áreas de contato utilizadas no processamento e consideradas como *background* pelo programa.

Tabela LVI. Tabulação cruzada entre as classes de favorabilidade do mapa de controle geológico e do mapa de ocorrências auríferas.

Tabela cruzada de areas (em KmxKm):	
Plano-1 (nas linhas) : fatiamento_controle_geológico	
Plano-2 (nas colunas): ocorrências_buffer300	
	Área de coincidência para cálculo
Favorabilidade elevada	1,24
Favorabilidade média	10,82
Favorabilidade baixa	0,48

A interpretação do mapa da **Figura 104** associado aos dados da **Tabela LVI** permitiu avaliar que muitas das ocorrências se situam nas regiões de contato entre as unidades geológicas o que comprova que esse controle foi efetivo nos eventos de mineralização que afetaram a área. Além disso, verificou-se, também, que os contatos das rochas da **SGI** com as outras unidades, em especial a **SMN** e o **CPN** configuraram regiões de favorabilidade elevada e, portanto, devem ser considerados nas futuras campanhas prospectivas.

5.5.2.3- CONTROLE ESTRUTURAL

Este controle, considerado o mais importante sobre a distribuição e magnitude dos depósitos auríferos conhecidos, foi materializado na análise de favorabilidade pelas seguintes categorias de dados:

- Lineamentos integrados;
- Lineamentos magnéticos;
- Lineamentos de terreno;
- Lineamentos LANDSAT;
- Delimitação das zonas de cisalhamento de primeira ordem;
- Mapa de distribuição de ocorrências auríferas.

Para a geração do mapa de favorabilidade para o controle estrutural foi aplicado um fator de ponderação geral considerando a área de coincidência entre o *buffer* de 300 metros ao redor das ocorrências auríferas e cada plano de informação que continha os diferentes tipos de lineamentos morfoestruturais e magnéticos que devem registrar a distribuição e a geometria das estruturas tectônicas no terreno. Também foram utilizados os limites das zonas de cisalhamento reclassificados e ponderados anteriormente.

Tabela LVII. Ponderação dos diferentes planos de informação utilizados na análise de favorabilidade por controle estrutural.

Plano de Informação	Área de coincidência com as ocorrências auríferas (km ²)	Fator de ponderação
Lineamentos de terreno Tipo 2	0,0387	0,5
Lineamentos magnéticos filtrados Tipo 2	0,0558	0,9
Lineamentos magnéticos campo total	0,2079	0,7

Tabela LVII. Ponderação dos diferentes planos de informação utilizados na análise de favorabilidade por controle estrutural (continuação).

Plano de Informação	Área de coincidência com as ocorrências auríferas (km ²)	Fator de ponderação
Limite da Zona de Cisalhamento Conceição	0,2781	0,7
Lineamentos LANDSAT Tipo 2	0,3177	0,7
Lineamentos de terreno Tipo 1	0,4158	0,7
Lineamentos LANDSAT Tipo 1	0,5049	0,7
Lineamentos magnéticos filtrados Tipo 1	0,7731	0,9
Limite das outras Zonas de Cisalhamento incluindo a ZC Mutum	2,2122	0,9
Limite da Zona de Cisalhamento Cachimbo	11,1069	0,9

A análise dos resultados posicionados na **Tabela LVII** permitiu concluir que os lineamentos magnéticos filtrados tipo 1 possuem um maior grau de associação com as ocorrências auríferas, com quase 30% a mais de associatividade do que os lineamentos LANDSAT tipo 1 e cerca de 20% a mais do que os lineamentos de terreno do tipo 1, obtidos a partir do “*shaded relief.map*”. Os lineamentos do tipo 2 obtidos a partir do MDE, imagens LANDSAT e filtragem sobre os dados magnéticos exibem um baixo grau de associação com as ocorrências auríferas. Se forem considerados os limites das zonas de cisalhamento, observou-se que a ZC Cachimbo possui a maioria das ocorrências situadas no interior dos seus limites. Após, ocorre a associação com as ZC Mutum e outras ainda não identificadas e, por último, ocorre a associação com a ZC Conceição, que exibe uma baixa correlação com as ocorrências auríferas.

A partir dos dados produzidos por Cunha (1996), verificou-se que as intercessões de lineamentos constituem um local preferencial para a ocorrência de depósitos auríferos. Assim,

buscou-se utilizar o potencial das ferramentas de integração de dados do *software* **SPRING** para determinar essas posições no terreno e utilizá-las como outro produto na integração de dados. Para tanto, foi elaborada uma ponderação pelo método **AHP**, com as seguintes premissas básicas:

- a) os lineamentos do tipo 1 magnéticos e morfoestruturais possuem predominantemente orientação a Nordeste- Sudoeste;
- b) os lineamentos do tipo 2 magnéticos e morfoestruturais possuem predominantemente orientação a Noroeste- Sudeste;
- c) o cruzamento entre lineamentos do tipo 1 e do tipo 2 determina uma intercessão que deve constituir um local mais favorável para a ocorrência de depósitos;
- d) no processo de ponderação, os lineamentos do tipo 1 e os lineamentos do tipo 2 possuem peso igual a 0,5 cada, o que conduziu o programa à determinação das áreas de intercessão.

A partir dessas premissas, foram elaboradas duas inferências **AHP** e dois programas em **LEGAL** com o objetivo de determinar a correlação entre as intercessões e as ocorrências auríferas.

Primeiramente foram analisados os lineamentos **LANDSAT**, o que resultou no seguinte programa em **LEGAL**:

```
{
// Pesos a ser aplicados
// LIN_LANDSAT_T1 = 0.5
// LIN_LANDSAT_T2 = 0.5
// Razao de consistencia
// CR = 0.000
// Programa em LEGAL
// Este programa deve ser completado
// pelo usuario para incluir os dados
// apresentados entre os sinais de <>
```

```

// Definicao dos dados de entrada

Tematico var1 ("LIN_LANDSAT_T1");

Tematico var2 ("LIN_LANDSAT_T2");

Tabela tab1 (Ponderacao);

tab1 = Novo (CategoriaIni = "LIN_LANDSAT_T1" ,

            "tipo1":0.5);

Tabela tab2 (Ponderacao);

tab2 = Novo (CategoriaIni = "LIN_LANDSAT_T2" ,

            "tipo2":0.5);

// Definicao do dado de saida

Numerico var3 ("INTERCESSAO_LIN_LANDSAT");

// Recuperacao dos dados de entrada

var1 = Recupere (Nome="somatorio_buffer30m_tipo1");

var2 = Recupere (Nome="buffer30m_linlandsat_t2");

// Criacao do dado de saida

var3 = Novo (Nome="intercessao_lin_landsat", ResX=30, ResY=30, Escala=100000,

            Min=0, Max=1);

// Geracao da media ponderada

var3 = 0.5*(Pondere(var1, tab1)) + 0.5*(Pondere(var2, tab2));

}

```

A execução das instruções do programa gerou uma grade que registra a influência das intercessões entre lineamentos sobre a distribuição dos depósitos auríferos. Desse processamento resultaram os dados da **Tabela LVIII**.

Tabela LVIII. Tabulação cruzada entre as intercessões de lineamentos
LANDSAT e as ocorrências auríferas.

Tabela cruzada de areas (em KmxKm):	
Plano-1 (nas linhas) : fatiamento_intercessao_lin_lands	
Plano-2 (nas colunas): buffer300	
	Área de coincidência para cálculo
Intercessões LANDSAT	0,0279

Posteriormente, foram analisados os lineamentos magnéticos filtrados, o que resultou no seguinte programa em LEGAL:

```
{
// Pesos a serem aplicados

// LIN_MAG_TIPO1F = 0.5

// LIN_MAG_TIPO2F = 0.5

// Razao de consistencia

// CR = 0.000

// Programa em LEGAL

// Este programa deve ser completado

// pelo usuario para incluir os dados

// apresentados entre os sinais de <>
```

```

// Definicao dos dados de entrada

Tematico var1 ("LIN_MAG_TIPO1F");

Tematico var2 ("LIN_MAG_TIPO2F");

Tabela tab1 (Ponderacao);

tab1 = Novo (CategoriaIni = "LIN_MAG_TIPO1F" ,

            "tipo1":0.5);

Tabela tab2 (Ponderacao);

tab2 = Novo (CategoriaIni = "LIN_MAG_TIPO2F" ,

            "tipo2":0.5,

            "tipo1":0);

// Definicao do dado de saida

Numerico var3 ("INTERCESSAO_LIN_MAGF");

// Recuperacao dos dados de entrada

var1 = Recupere (Nome="somatorio_buffer30m_blocos_lin_m");

var2 = Recupere (Nome="buffer30m_linmag_t2");

// Criacao do dado de saida

var3 = Novo (Nome="intercessao_lin_magf", ResX=30, ResY=30, Escala=100000,

            Min=0, Max=1);

// Geracao da media ponderada

var3 = 0.5*(Pondere(var1, tab1)) + 0.5*(Pondere(var2, tab2));

}

```

A execução das instruções do programa gerou uma grade que registra a influência das intercessões entre lineamentos sobre a distribuição dos depósitos auríferos. Desse processamento resultaram os dados da **Tabela LIX**.

Tabela LIX. Tabulação cruzada entre as intercessões de lineamentos LANDSAT e as ocorrências auríferas.

Tabela cruzada de areas (em Km²):	
Plano-1 (nas linhas) : fatiamento_intercessao_lin_lands	
Plano-2 (nas colunas): buffer300	
	Área de coincidência para cálculo
Intercessões Lin Magf	0

Desse processamento, que visou quantificar a ocorrência de depósitos auríferos em zonas de intercessão de lineamentos, pode-se verificar que há uma baixa correlação entre essas variáveis, o que se contrapõe ao esperado pelo contexto estrutural da região. Uma forma de interpretar essa discrepância poderia ser o fato de que a intercessão foi dimensionada para um pixel de 30 metros, a fim de que fosse compatível com as outras imagens geradas nos processamentos anteriores. Com uma expressão no terreno de 900 m² (30m x 30m), a possibilidade dos depósitos estarem em um ponto de coincidência com as intercessões tinha uma probabilidade muito baixa de se realizar. Assim, dada essa limitação do processamento, não devem ser descartadas as intercessões de estruturas como locais preferenciais para a pesquisa prospectiva; ao invés disso, deverão ser efetuados novos estudos, com outros tamanhos de pixel, que busquem capturar com maior acurácia a correlação entre intercessões e os depósitos auríferos.

**FIGURA 105. MAPA DE FAVORABILIDADE DEFINIDO PELO CONTROLE
ESTRUTURAL PARA OS DEPÓSITOS AURÍFEROS.**

O mapa de controle estrutural evidenciou que todas as ocorrências conhecidas estão associadas ou às principais zonas de cisalhamento da região, ou, quando situadas fora das paredes das zonas de cisalhamento, estão associadas a lineamentos estruturais de alguma das classes estudadas. A partir desse contexto, verificou-se que os estudos desenvolvidos corroboraram o modelo prospectivo adotado e que as áreas mais favoráveis para a prospecção situam-se no interior das zonas de cisalhamento, em especial nas porções onde ocorrem lineamentos de maior porte e, nestes, nos locais de intercessão de dois ou mais lineamentos.

5.6- INTEGRAÇÃO DOS MAPAS DE CONTROLES

Com o intuito de apurar ainda mais os resultados prospectivos e restringir as áreas de maior favorabilidade, foram integrados pelo método **AHP**, os diversos mapas integrados, em especial os mapas de controles, estrutural, geoquímico e geológico, com o objetivo de gerar os mapas de favorabilidade final.

Assim, inicialmente foi efetuado o cruzamento dos mapas de **controle geoquímico** (**Figura 102**) que registra as classes de favorabilidade elevada, média e baixa para a distribuição integrada e ponderada das variáveis “Intensidade Magnética Total”, “mapas aerogamespectrométricos ternários (canais, razões e fatores)” e “**controle geológico**” (distribuição das unidades geológicas relevantes aos depósitos auríferos primários e área de contato entre essas unidades). Desse processamento resultou o mapa da **Figura 106**, o qual registra as áreas de favorabilidade elevada, média e baixa a partir do somatório ponderado desses dois controles. Assim, foram obtidas as seguintes distribuições em área das classes de favorabilidade:

Tabela LX. Medidas de classes de favorabilidade obtidas a partir da integração dos mapas de controle geológico e controle geoquímico.

Classe	Área de coincidência para cálculo (km²)
Favorabilidade elevada	249,84
Favorabilidade média	1.033,63
Favorabilidade baixa	582,77

**FIGURA 106. MAPA DE FAVORABILIDADE DEFINIDO PELO SOMATÓRIO DE
CONTROLE GEOLÓGICO E CONTROLE GEOQUÍMICO.**

Para possibilitar a avaliação da correlação entre a integração de mapas e a favorabilidade mineral, foi efetuada uma tabulação cruzada entre o fatiamento dos valores do mapa das classes de favorabilidade elevada, favorabilidade média e favorabilidade baixa e do mapa de distribuição de ocorrências auríferas. Desse processamento resultou a tabela abaixo, onde se observou que as ocorrências auríferas se associam principalmente a áreas de favorabilidade média (cerca de 33 ocorrências), favorabilidade baixa (4 ocorrências) e favorabilidade elevada (9 ocorrências), o restante das ocorrências não se situou em nenhuma das classes de favorabilidade.

Tabela LXI. Tabulação cruzada entre as classes de favorabilidade do mapa de integração de controle geológico e controle geoquímico e do mapa de ocorrências auríferas.

Tabela cruzada de areas (em Km²):	
Plano-1 (nas linhas) : fatiamento_controle_geológico	
Plano-2 (nas colunas): ocorrências_buffer300	
	Área de coincidência para cálculo
Favorabilidade elevada	2,30
Favorabilidade média	9,14
Favorabilidade baixa	1,08

Posteriormente, com o intuito de restringir ainda mais as áreas de favorabilidade elevada e, assim, minimizar a área de novos alvos prospectivos, foi elaborado um algoritmo que continha o somatório de todas as áreas anômalas em termos aerogamaespectrométricos, sendo que cada classe de anomalia foi ponderada, de maneira a possibilitar uma hierarquização do conjunto. Para tanto, foi utilizado o *software* **SPRING** e o seguinte programa em LEGAL::

{

```
// Pesos a ser aplicados

// ANOMALIAS_RECORTADAS = 0.750

// ANOMALIAS_TOTAL = 0.250

// Razao de consistencia

// CR = 0.000

// Programa em LEGAL

// Este programa deve ser completado

// pelo usuario para incluir os dados

// apresentados entre os sinais de <>

// Definicao dos dados de entrada

Tematico var1 ("ANOMALIAS_RECORTADAS");

Tematico var2 ("ANOMALIAS_TOTAL");

Tabela tab1 (Ponderacao);

tab1 = Novo (CategoriaIni = "ANOMALIAS_RECORTADAS" ,

            "CTOTAL":0.7,

            "FF":0.9,

            "K":0.7,

            "Kd":0.8,

            "Th":0.6,

            "Th-K":0.7,

            "U":0.6,

            "U-K":0.6,

            "U-Th":0.6,
```

```

        "Ud":0.7);

Tabela tab2 (Ponderacao);

tab2 = Novo (CategoriaIni = "ANOMALIAS_TOTAL" ,

        "Th":0.6,

        "Th-K":0.7,

        "U":0.6,

        "U-K":0.6,

        "U-Th":0.6,

        "Ud":0.7,

        "CTOTAL":0.7,

        "FF":0.9,

        "K":0.7,

        "Kd":0.8);

// Definicao do dado de saida

Numerico var3 ("ANOMALIAS_GAMA_FINAL");

// Recuperacao dos dados de entrada

var1 = Recupere (Nome="ANOMALIAS_RECORTADAS");

var2 = Recupere (Nome="ANOMALIAS_TOTAL");

// Criacao do dado de saida

var3 = Novo (Nome="anomalias_gama", ResX=30, ResY=30, Escala=100000,
        Min=0, Max=1);

// Geracao da media ponderada

var3 = 0.750*(Pondere(var1, tab1)) + 0.250*(Pondere(var2, tab2));

}

```

O programa permitiu a elaboração de uma grade que continha as áreas de favorabilidade elevada, favorabilidade média e favorabilidade baixa a partir da localização e do somatório ponderado das áreas anômalas em termos aerogamaespectrométricos.

Esse produto foi, então, integrado com o mapa de controle geológico e geoquímico, por meio da utilização do seguinte programa em LEGAL:

```
{
// Pesos a serem aplicados

// ANOMALIAS_FINAL = 0.600

// FATIAMENTO_INTEGRACAO_GEOXGEOQ = 0.400

// Razao de consistencia

// CR = 0.000

// Programa em LEGAL

// Este programa deve ser completado

// pelo usuario para incluir os dados

// apresentados entre os sinais de <>

// Definicao dos dados de entrada

Tematico var1 ("ANOMALIAS_FINAL");

Tematico var2 ("FATIAMENTO_INTEGRACAO_GEOXGEOQ");

Tabela tab1 (Ponderacao);

tab1 = Novo (CategoriaIni = "ANOMALIAS_FINAL" ,

            "anomalias":0.9);

Tabela tab2 (Ponderacao);

tab2 = Novo (CategoriaIni = "FATIAMENTO_INTEGRACAO_GEOXGEOQ" ,

            "favorabilidade elevada":0.8,
```

```

    "favorabilidade media":0.6,
    "favorabilidade baixa":0.3);

// Definicao do dado de saida

Numerico var3 ("INTEGRACAO_FINAL");

// Recuperacao dos dados de entrada

var1 = Recupere (Nome="anomalias_final");

var2 = Recupere (Nome="fatiamento_integracao_geoxgeoq");

// Criacao do dado de saida

var3 = Novo (Nome="integracao_final", ResX=30, ResY=30, Escala=100000,
            Min=0, Max=1);

// Geracao da media ponderada

var3 = 0.6*(Pondere(var1, tab1)) + 0.4*(Pondere(var2, tab2));

}

```

Desse processamento resultou o mapa da **Figura 107**, o qual registra as áreas de favorabilidade elevada, média e baixa a partir do somatório ponderado do controle geológico + controle geoquímico e das áreas anômalas em termos aerogamaespectrométricos.

Com esse processamento, foram obtidas as seguintes distribuições em área das classes de favorabilidade:

**FIGURA 107. MAPA DE FAVORABILIDADE DEFINIDO PELA INTEGRAÇÃO DE
CONTROLE GEOLÓGICO, CONTROLE GEOQUÍMICO E ÁREAS ANÔMALAS
EM TERMOS AEROGAMESPECTROMÉTRICOS.**

Tabela LXII. Medidas de classes de favorabilidade obtidas a partir da integração dos mapas de controle geológico + controle geoquímico e áreas de anomalias aerogamaespectrométricas.

Classe	Área de coincidência para cálculo (km²)
Favorabilidade elevada	57,77
Favorabilidade média	68,14
Favorabilidade baixa	25,11

Para possibilitar a avaliação da correlação entre a integração de mapas e a favorabilidade mineral, foi efetuada uma tabulação cruzada entre o fatiamento dos valores do mapa das classes de favorabilidade elevada, favorabilidade média e favorabilidade baixa e do mapa de distribuição de ocorrências auríferas. Desse processamento resultou a tabela abaixo, onde se observou que as ocorrências auríferas se associam principalmente a áreas de favorabilidade média (cerca de 5 ocorrências) e favorabilidade elevada (4 ocorrências), o restante das ocorrências não se situou em nenhuma das classes de favorabilidade.

Tabela LXIII. Tabulação cruzada entre as classes de favorabilidade do mapa de integração de controle geológico e controle geoquímico e do mapa de ocorrências auríferas.

Tabela cruzada de areas (em Km²):	
Plano-1 (nas linhas) : fatiamento_integração_final	
Plano-2 (nas colunas): ocorrências_buffer300	
	Área de coincidência para cálculo
Favorabilidade elevada	1,05
Favorabilidade média	1,43
Favorabilidade baixa	0,04

Ainda, se for considerado que o principal controle da distribuição dos depósitos auríferos é o estrutural, foi adotado como critério essencial da pesquisa prospectiva que todos os mapas integrados sempre considerem a distribuição de lineamentos estruturais no momento da avaliação prospectiva das áreas. Dessa forma, foram gerados novos mapas que consideram além da integração proposta, as diferentes classes de lineamentos estruturais. Isso está demonstrado nos mapas das **Figuras 108, 109, 110, 111 e 112**. Assim, sempre que for considerada uma área de elevada favorabilidade nos mapas integrados, deve-se buscar no seu interior os locais que possuem lineamentos estruturais e, nestes, posições de interseção entre dois ou mais lineamentos; nessas porções, deve estar a maior probabilidade de ocorrência de depósitos auríferos na área de estudo.

**FIGURA 108. MAPA INTEGRADO SOMATÓRIO DE LINEAMENTOS DA ÁREA
DE INTERESSE + FAVORABILIDADE GAMA TERNÁRIOS.**

**FIGURA 109. MAPA INTEGRADO SOMATÓRIO DE LINEAMENTOS DA ÁREA
DE INTERESSE + FAVORABILIDADE GAMA TERNARIOS + FF.**

**FIGURA 110. MAPA INTEGRADO SOMATÓRIO DE LINEAMENTOS DA ÁREA
DE INTERESSE + FAVORABILIDADE GAMA TERNÁRIOS + FF + IMT.**

**FIGURA 111. MAPA INTEGRADO SOMATÓRIO DE LINEAMENTOS DA ÁREA
DE INTERESSE + FAVORABILIDADE CONTROLE GEOLÓGICO +
FAVORABILIDADE CONTROLE GEOQUÍMICO**

FIGURA 112. MAPA INTEGRADO SOMATÓRIO DE LINEAMENTOS + FAVORABILIDADE MINERAL BASEADA NA INTEGRAÇÃO DE DADOS CONTROLE GEOLÓGICO + CONTROLE GEOQUÍMICO + ANOMALIAS AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS.

CAPÍTULO 6

CAPÍTULO 6- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA CONTINUIDADE DAS PESQUISAS

A região de Porto Nacional vem sendo alvo de estudos e campanhas prospectivas para ouro por longo tempo. Durante este período, foram gerados inúmeros conjuntos de dados que demonstraram, progressivamente, a elevada complexidade geológica e metalogenética da região.

Dado esse contexto, verificou-se que a região de Porto Nacional ao mesmo tempo que dispõe de inúmeros conjuntos de dados que possibilitaram refinar consideravelmente as metodologias prospectivas, possui também uma elevada complexidade geológico-estrutural e metalogenética que somente pode ser corretamente avaliada por meio da utilização de técnicas robustas de integração de dados e geoprocessamento.

Nesse sentido, cabe ressaltar alguns resultados obtidos pelos estudos desenvolvidos na região:

AEROGEOFÍSICA

A utilização de dados advindos de um levantamento aerogeofísico de alta resolução permitiu a obtenção dos seguintes resultados e diretrizes:

- a aerogamaespectrometria mostrou-se uma ferramenta muito útil para a determinação de zonas anômalas em K, Th e U, sendo estas normalmente associadas aos depósitos auríferos;
- a aerogamaespectrometria permitiu delinear novas áreas para mapeamento que poderão refinar em muito os contatos geológicos, as variações faciológicas e a distribuição das unidades litodêmicas e litoestratigráficas da região, em especial as rochas de composição granitóide e as coberturas cenozóicas. No caso das Coberturas Cenozóicas, essa característica pode ser muito importante para o mapeamento de outras áreas da região central do Brasil que possuem características geomorfológicas semelhantes e depósitos auríferos aluvionares;

- a aeromagnetometria auxiliou grandemente no reconhecimento de lineamentos estruturais que devem constituir o arcabouço tectono-estrutural da região; ressalta-se que, devido ao acentuado aplainamento do relevo, apenas com uma ferramenta prospectiva dessa natureza foi possível identificar inúmeros lineamentos que não possuíam expressão ou registro na superfície do terreno. Dessa forma, pode-se verificar que com um processamento acurado e as filtragens adequadas, o potencial prospectivo dessa ferramenta, especialmente em áreas onde os depósitos são em veios, é de enorme valia para a pesquisa;
- o mapa integrado de zonas aerogamaespectrométricas anômalas exibiu quatro agrupamentos principais, onde ocorre a superposição das anomalias de canais, de contagem total, de razões, de U e K normalizados pelo Th e Fator F. Esses locais apresentaram uma característica ímpar de superposição de anomalias de todos os canais, fatores e razões, de forma que devem registrar, no terreno, rochas com elevada concentração de elementos potencias para associação genética e espacial com o minério aurífero;
- os mapas ternários se mostraram muito úteis à interpretação integrada de dados, já que sintetizam as respostas dos canais (ternário U-Th-K), das razões (U/Th- Th/K- U/K) e dos fatores aplicados (FF- Ud- Kd);
- após o procedimento de recorte dos mapas gama totais para a retirada da unidade metassedimentar Formação Monte do Carmo e unidades sedimentares da Bacia do Parnaíba (Formação Pimenteiras), todas sem vinculação com as ocorrências auríferas, foram geradas novas zonas anômalas e, para efeitos de análise, um novo mapa integrado de anomalias. Na contraposição dos dois mapas, observa-se uma acentuada coincidência das áreas anômalas, o que evidencia que a única modificação considerável que adviu da retirada das unidades litológicas foi um rebaixamento da média e do desvio padrão das anomalias, sem afetar a posição espacial das mesmas. Porém, considerando que as anomalias obtidas a partir dos mapas recortados são mais restritivas, foram estas as utilizadas nos processamentos posteriores de integração de dados.

ARCABOUÇO ESTRUTURAL

Entre as principais contribuições em termos do arcabouço estrutural que puderam ser agregadas a partir dos trabalhos desenvolvidos nessa Tese, podem ser citadas:

- a deformação transcorrente que gerou o **SZCON** pode ser verificada também em registros aeromagnetométricos, o que indicou a ocorrência das estruturas em sub-superfície, pelo menos até a profundidade de 5 km, como pode ser identificado no mapa da figura 78 (Filtro da Integral Vertical sobre o sinal Analítico);
- a deformação transcorrente também formou zonas de cisalhamento de orientação geral nordeste de menor magnitude, que puderam ser identificadas pelo somatório de lineamentos estruturais identificados nos diversos produtos gerados nessa Tese (aeromagnetometria, relevo sombreado, modelo digital de elevação). Assim, pode-se concluir que para regiões fortemente aplainadas e com pouca exposição de afloramentos de rocha que permitam delinear o arcabouço estrutural a partir de mapeamento litoestrutural de detalhe, a integração de diversos produtos é condição “*sine qua non*” para a caracterização geométrica mais precisa das estruturas tectônicas que ocorrem na área;
- a integração de dados permitiu identificar inúmeras estruturas de pequeno porte que constituíram um fator bastante considerável para o controle da distribuição dos depósitos auríferos.

Em termos cronológicos, foi possível, por meio da observação das relações de truncamento entre as estruturas, o estabelecimento da ordem de evolução das estruturas associadas ao **SZCPN** na região. Assim, verificou-se que:

- as zonas de cisalhamento marcadamente Nordeste-Sudoeste são mais recentes e truncaram zonas de formação mais antigas. Como exemplo desse processo, pôde ser delimitada pela análise dos mapas gerados, uma dessas zonas de dimensões consideráveis na porção Centro-Nordeste da área;
- as zonas de deformação mais antigas foram fortemente truncadas, o que resultou a dificuldade de identificação dessas zonas nos mapas. Além disso, a intrusão das rochas granitóides da **SGI** também contribuiu para a redução da área de exposição de zonas de deformação dessa natureza;
- se forem consideradas as zonas de deformação mais antigas, se observou na porção centro-Noroeste da área a ocorrência de uma área com disposição fortemente curvilínea dos lineamentos que está registrada no terreno por rochas fortemente dobradas da **SgGM**;

PROSPECÇÃO

A capacidade preditiva dos modelos exploratórios e prospectivos tem aumentado grandemente nos últimos anos, de forma fortemente associada a capacidade de processamento computacional cada vez maior. Este último aspecto, de cunho essencialmente operacional, mas indissociável das pesquisas e da qualidade dos resultados obtidos, tem tornado a integração de dados digitais em ambiente geoprocessado uma ferramenta cada vez mais robusta e aplicável à pesquisa mineral.

Neste contexto, na região de Porto Nacional (TO), foi possível o desenvolvimento de um método de pesquisa baseado nos dados obtidos e no seu intercruzamento via análise de suporte à decisão, tendo a lógica matemática como premissa de procedimento e a experiência da equipe de trabalho como apoio qualitativo à interpretação dos resultados obtidos. Buscou-se, dessa forma, utilizar ao máximo durante o desenvolvimento dos trabalhos, aplicativos computacionais de livre distribuição, o que pode se constituir em um fator facilitador da disseminação das técnicas utilizadas, de forma a gerar mais resultados e tecnologias para o segmento da mineração no Brasil.

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa se verificou que, ao contrário de outras províncias metalogenéticas brasileiras e, mesmo, de outros escudos pré-cambrianos de características litotectônicas e metamórficas similares, a região de Porto Nacional (TO) exhibe diversos controles do processo de mineralização que definiram a distribuição atual dos depósitos. Dada essa acentuada complexidade, apenas a ponderação correta dos diversos controles investigados poderá indicar com um grau de confiança aceitável a favorabilidade para ocorrência dos depósitos auríferos.

Entre os principais critérios prospectivos, em ordem hierarquizada de importância, devem ser citados:

- 1- a ocorrência de estruturas tectônicas associadas ao **SZCPN**, registradas por lineamentos estruturais do tipo 1, em especial, quando estes intesessionam lineamentos do tipo 2 em áreas de favorecimento à dilatação estrutural;
- 2- os contatos litológicos entre as rochas da **SGgM** e **SIG**, **CPN** e **SGgM** e **SIG** e **SMN**;

3- as porções interiores das rochas da **SGI**, quando estas registram deformação por cisalhamento transcorrente e, conjuntamente, alteração hidrotermal, em especial, potassificação.

INTEGRAÇÃO DE DADOS

A região de Porto Nacional (TO) mostrou-se fortemente propícia ao desenvolvimento de estudos de geoprocessamento e integração de dados pois:

- possui um arcabouço geológico relativamente bem conhecido;
- dispõe de inúmeras bases de dados elaboradas sob critérios consistentes e com elevada resolução em termos de escala;
- possui uma elevada quantidade de ocorrências o que permitiu uma análise rigorosa dos resultados;
- possui um modelo descritivo e um modelo genético-evolutivo complexo para os eventos de mineralização aurífera, porém, ambos estão suficientemente testados para a utilização em estudos de integração de dados.

A existência de inúmeros planos de informação distintos elaborados para a integração e a pesquisa prospectiva tornou imprescindível a utilização de ferramentas de geoprocessamento baseadas em inferência geográfica e análise multicriterial. Para tanto, foram utilizados procedimentos de cartografia digital e gerenciamento de bancos de dados para a formulação das bases de estudo e, posteriormente, ocorreu a integração dos PI's segundo ponderações específicas, que consideraram a correlação dos Planos de Informação com as ocorrências auríferas conhecidas.

O processo de integração baseou-se no método **AHP** (Processo Analítico Hierárquico) vinculado a uma base multi-criterial que permitiu a ponderação entre diferentes categorias de dados e entre as várias classes que compõem o PI.

Com base na integração dos dados geológicos, estruturais, aerogeofísicos e ambientais, foi possível a geração de mapas de favorabilidade mineral para a região, onde foram separadas e hierarquizadas áreas com indicação como preferenciais para o detalhamento das pesquisas prospectivas.

Em termos de técnicas de geoprocessamento e integração de dados, a geração de bases georreferenciadas em um conjunto único e com o cuidado de preservar a acurácia dos

produtos gráficos e dados correlatos permitiu a geração de inúmeros produtos cartográficos, bem como a verificação de diversos aspectos que, separadamente ou visualmente, não poderiam ser obtidos. Esse ponto deve ser ressaltado, visto que foram gerados mais de vinte PI's diferenciados possíveis de serem integrados de inúmeras maneiras. Se os métodos de análise tradicional tivessem sido utilizados, apenas uma pequena parte do potencial interpretativo e prospectivo desses conjuntos de dados teria sido aproveitada.

Se for considerado como foco o geoprocessamento e a pesquisa mineral, se observou a elevada aplicabilidade do *software* **SPRING** para trabalhos dessa natureza, visto que, além de ser um *software* de distribuição livre e possível de ser obtido até pela Internet, apresenta robustez para o processamento de grandes conjuntos de dados, facilidade de implementação de rotinas de inferência, em especial relacionadas ao cálculo de favorabilidade, bem como possui intrinsecamente em seu arcabouço construtivo os melhores e mais modernos conceitos técnicos de integração de dados e inferência geográfica. Ainda nesse sentido, o método **AHP** disponibilizado diretamente pelo *software* **SPRING** em seu módulo de análise geográfica, se mostrou fortemente consistente como ferramenta de análise, integração de dados e geração de mapas de favorabilidade para a área, principalmente em função de:

- permitir uma avaliação ponderada de múltiplos critérios prospectivos;
- permitir a verificação da consistência da ponderação construída;
- ser de rápida implementação, a partir de uma função já incorporada ao *software* **SPRING**;
- dispensar um extenso conhecimento da linguagem **LEGAL**, pois já fornece um arcabouço montado do programa de interesse;
- apresentar um grau de confiança elevado e um grau de coincidência bastante considerável com as ocorrências conhecidas, o que sugeriu que as novas áreas indicadas podem constituir blocos promissores para futuras campanhas prospectivas;

Em termos dos resultados obtidos, verificou-se que:

- a metodologia de avaliação de interferência de fatores ambientais orientada por **SIG** é uma importante ferramenta de apoio à decisão na interpretação de dados aerogeofísicos, em especial aerogamaespectrométricos e, mais ainda, com relação a áreas com valores anômalos desses produtos;

- a pesquisa prospectiva orientada por controles de mineralização permitiu a geração de uma rede de inferência geográfica consistente e ao mesmo tempo de rápida implementação;
- em termos estruturais, a integração de lineamentos obtidos por diversos tipos de produtos distintos aumentou consideravelmente o conhecimento do conjunto de possíveis estruturas controladoras dos depósitos auríferos em veios. Além disso, permitiu melhorar o conhecimento da distribuição das zonas de cisalhamento do **SZCPN** e definir domínios com maior intensidade de deformação, os quais são mais favoráveis para a localização de novos depósitos auríferos;
- a integração do controle estrutural delineado a partir do somatório de lineamentos com as áreas de elevada favorabilidade em termos geológicos e geoquímicos permitiu a geração de um arcabouço prospectivo consistente para a definição de novas áreas para a pesquisa prospectiva para ouro na região.
- o controle geológico, obtido por meio da integração do mapa geológico e do mapa de contatos geológicos também indicou diversas novas áreas de elevada favorabilidade que devem ser melhor investigadas nas próximas campanhas prospectivas a serem realizadas na região;
- a geração de um controle geoquímico a partir da análise das propriedades magnetométricas e gamaespectrométricas de rochas e solos apresentou uma forte similaridade com a distribuição conhecida das unidades litodêmicas e litoestratigráficas, em especial em suas seções-tipo na região, o que conferiu um grau elevado de consistência para o mapa gerado;
- ainda com relação ao controle geoquímico, foi observada a ocorrência de diversas novas áreas de favorabilidade elevada, as quais não possuem ocorrências conhecidas e que, portanto, devem ser exploradas em estudos futuros. Por outro lado, se forem consideradas as ocorrências conhecidas, verificou-se que esse mapa capturou com boa relevância o conjunto de depósitos já identificados na região;
- a utilização de uma metodologia de separação de áreas com valores aerogamaespectrométricos anômalos, balizada pela identificação e quantificação das interferências ambientais e agregada à integração de dados (controle geoquímico + controle geológico + áreas anômalas) permitiu a separação de áreas de favorabilidade elevada mais restritas e, portanto, mais propícias para o detalhamento via *follow-up* prospectivo;

Nesse contexto, ressalta-se o elevado potencial prospectivo da região de Porto Nacional (TO) como se pôde verificar a partir dos dados obtidos nesse trabalho. Para que ocorra a viabilização de novos empreendimentos mineiros nessa área, alguns estudos adicionais devem ser desenvolvidos, tais como:

- integração dos dados aerogeofísicos, estruturais, geológicos e de sensoriamento remoto com os dados prospectivos de sedimento de corrente e geoquímica dos solos que já estão disponíveis na área;
- aumento da pesquisa geofísica de campo nas áreas com favorabilidade mais acentuada sistematizadas nesse estudo, a fim de definir locais para adensamento de sondagens a trado ou percussão.

A junção desses dados com os mapas de favorabilidade e critérios prospectivos desenvolvidos nessa Tese podem conduzir a separação de novos blocos ou mesmo ao redirecionamento das pesquisas nos blocos conhecidos da área.

CAPITULO 7

7- BIBLIOGRAFIA

ADAMS, S., 1986, Using geological information to develop exploration strategies for epithermal deposits, in **Epithermal Deposits**, Chapter. 12, p. 273-298. (In: Bayesian and Multivariate Methods Applied to Favorability Quantification on Recôncavo Basin and Ribeira Belt, Brazil).

AGTENBERG, F.P. 1989. Systematic approach to dealing with uncertainty of geoscience information in mineral exploration. In: **Apcom Symposium**, 21, Las Vegas, Proceedings, 165-178.

ALBERTOS, P. (1992). Fuzzy Controllers - **AI Techniques in control** - Pergamon Press.

ALMEIDA FILHO, R. 1995. Integração e análise espacial de dados na pesquisa mineral através de modelos empíricos de prospecção: um exemplo no planalto de Poços de Caldas. **Revista Brasileira de Geofísica**, 13 (2):127-142.

ALMEIDA FILHO, R. 1996. Integração de dados aeromagnéticos, geológicos e de sensoriamento remoto no estudo do complexo máfico-ultramáfico de Campo Formoso-BA. XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia, Resumo das Publicações, Salvador.

AMARO, V.E. & STRIEDER, A.J. 1994. Análise de fotolineamentos e de padrões estruturais em imagens de satélite. IN: **Congr. Bras. Geol.**, 38, Baln. Camboriú (SC), SBG/SC, 1994, Bol. Res. Exp., Vol. 1:443-444

ARAÚJO, C.C.; MACEDO, A.B., SAITO, S.N.G. 1999. Determinação da favorabilidade de mineralizações de chumbo no Vale do Ribeira com Técnicas de Geoprocessamento. **GIS BRASIL 1999**.

ARONOFF, S. 1989. **Geographic Information Systems**. WDL Publications, Canada.

ATHERTON, 1993. Granite magmatism. **Journal of the Geological Society of London**, v.150, p. 1009-1023.

BARBOSA, O.; RAMOS, J.R. de A.; GOMES, F.A.; HEMBOLD, R. 1966. **Geologia estratigráfica, estrutural e econômica da área do Projeto Araguaia**. Rio de Janeiro, DNPM/DGM, Monografia 19.

BARLEY, M. E.; EISENRHOL, B. N.; GROVES; D. I.; PERING, C. S.; VEARCOMBE, J. R. 1989. Late Archean convergent margin tectonic and gold mineralization; a new look at the Norseman-Wiluna Belt, Western Australia. **Geology**, v. 17, p.826-829.

BARRETO NETO, A. A. 2000. Padrões de acurácia em banco de dados geológicos para determinação de áreas anômalas de chumbo, zinco e prata usando sistemas de informações georeferenciadas. Dissertações Defendidas - Metalogênese e Geoquímica – 2000.

BEMERGUY, R.L.; BORGES, M.S. & COSTA, J.B.S. 1994. Geomorfologia da região de Natividade - Estado de Tocantins. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38, Baln. Camboriú, 1994. Anais... Baln. Camboriú, SBG, v.3, p.194-195.

BEZERRA, P.E.L.; CUNHA, B.C.C.; IANHEZ, A.C.; POTIGUAR, L.A.T.; PITTHAN, J.H.L.; SOUZA JR., J.J.; MONTALVÃO, R.M.G. ; SOUZA, A.M.S. 1981. Associação plutono-vulcânica de Ipueiras. In: **SIMP. GEOL. DO CENTRO-OESTE**, 1, Goiânia, 1981. **Atas ...** Goiânia, SBG, p.363-375.

BONHAM-CARTER, G. F. 1994. Integration of geoscientific data using GIS. pag. 171-184.

BONHAM-CARTER, G.F.; Agtemberg, F.P.; WRIGTH, D.F. 1988. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, V.54, p. 1585-1592.

BONIN, B. 1990. From orogenic to anorogenic settings: evolution of granitoid suites after a major orogenesis. **Geological Journal**, v. 25.

BRAGHIN, M. A.. 1997. Utilização das lógicas booleana e fuzzy para análise metalogenética na Folha Pilar do Sul (SP) via sistema de informações geográficas. http://www.ige.unicamp.br/pgraduacao/tesesdmg/teses1997/pgraduacao_teses_def_1997_res10.htm

BRANDÃO, V. 2000. Inferência Espacial para Determinação de Áreas Favoráveis à Ocorrência de Cu e Zn no Pojuca, Carajás, Pará. Curso de Pós-graduação. SER-300 “**Introdução do Geoprocessamento**”, Trabalhos de Curso, Trabalhos da Turma 2000, INPE..

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

BURROUGH P.A, MCDONNELL R.A., 1998. *Principals of Geographical Information Systems*: Oxford University Press. BURROUGH, P. 1986. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Clarendon Press.

BURROWS, D. R. ; SPOONER, E. T. C., 1989, Relationships between Archean gold quartz vein-shear zone mineralization and igneous intrusions in the Val d'Or and Timmins areas, Abitibi subprovince, Canada. Keayes, R.R, Ramsay, W.R.H. ; Groves, D.I. (eds.) *The Geology of Gold Deposits, Perspectives in 1988. Economic Geology Monograph 6* , p. 424-444.

CÂMARA G., SOUZA, R.C.M., FREITAS, U.M., GARRIDO, J. 1996. "SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling". **Computers & Graphics**, 20: (3) 395-403, May-Jun.

CÂMARA, G.; CASANOVA, M.A.; HEMERLY, A.; MEDEIROS, C.M.B.M.; MAGALHÃES, G. C. 1996. **Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica**. UNICAMP IX Escola de Computação (1a. ed.). SAGRES Editora, Curitiba, 1997 (2a. ed.).

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V.; PAIVA, J. A. & D'ALGE, J. C. L. 2000. **Geoprocessamento: Teoria e Aplicações**. INPE, Livro Virtual.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. "Mapas e Suas Representações Computacionais". In : Assad, E.; Sano, E.E. (eds.), **Sistema de Informações Geográficas. Aplicações na Agricultura**. Brasília, DF, EMBRAPA, 1998 (2a. edição, revista e ampliada).

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. "Operações de Análise Geográfica". In : Assad, E.; Sano, E.E.(eds.), *Sistema de Informações Geográficas. Aplicações na Agricultura*. Brasília, DF, EMBRAPA., 1998 (2a. edição, revista e ampliada).

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S., 1998. "Princípios Básicos do Geoprocessamento". In : Assad, E.; Sano, E.E.(eds.), **Sistema de Informações Geográficas. Aplicações na Agricultura**. Brasília, DF, EMBRAPA, (2a. edição, revista e ampliada).

CÂMARA, G.; ORTIZ, M. J. "Sistemas de Informação Geográfica para Aplicações Ambientais e Cadastrais: Uma Visão Geral" . In: SOUZA E SILVA, M., **"Cartografia, Sensoriamento e Geoprocessamento"**, Cap. 2, pp.59-88. Lavras, UFLA/SBEA, 1998.

CAMERON, E. M.; HATTORI, K., 1987. Archean gold mineralization and oxidized hydrothermal fluids. **Economic Geology**, v. 82, p. 1177-1191.

CAMERON, E. M. 1993. Precambrian gold: perspectives from the top and bottom of shear zones. **The Canadian Mineralogist**, v. 31, p. 917-944.

CASTRO, N. A. 1997. Contribuição ao conhecimento geológico-metalogenético associado aos granitóides intrusivos no Grupo Brusque (SC) com base na utilização de informações geológicas, aerogamaespectrométricas e LANDSAT/TM-5. Teses Defendidas – Metalogênese e Geoquímica – 1997. http://www.ige.unicamp.br/pgraduacao/tesesdmg/teses1997/pgraduacao_teses_def_1997_res9.htm

CAUSENS, B.L.; LUDDEN, J.N. 1991. Radiogenic isotope studies of oceanic basalts: a window into the mantle. In: Heaman, L.; Ludden, J.N. (eds.) Short Course handbook applications of radiogenic isotope system to problems in geology. Mineral. Assoc. Canada, Toronto, Canada, 448 p.

CHAPEL, B. W. & WHITE, A.J.R., 1974. Two contrasting granite types. **Pacific Geology**, 8, 173-174.

CLARK, D.A. 1997. Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, 17 (2), 83-103

COKER, W. B.; GALLEY, A. G. 1996. A Multidisciplinary Approach to Massive Sulphide Research in the Rusty Lake Greenstone Belts, Manitoba. **Geological Survey of Canada, Bulletin** 426, p. 3-14.

COLLINS W. J.; BEAMS, S. D.; WHITE, A. J. R.; CHAPPELL, B. W. 1982. Nature and Origin of A-Type Granites with Particular reference to southeastern Australia, **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 80, p. 189-200.

COSTA, J. B. S. 1985. **Aspectos lito-estruturais e evolução crustal da região Centro-Norte de Goiás**. Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências. Curso de Pós Graduação em Geofísica e Geologia. 209 p. Belém, Pará. Doutorado em Geologia (inédito).

COSTA, J. B. S. HASUI, Y. GORAYEB, P. S. de S. 1988 a. Relações estruturais entre a faixa Araguaia e o maciço Goiano na região de Paraíso do Norte - Gurupi, GO. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA**, 35^o, Anais. Belém, Pará, v. 5, p. 2187-2196

COSTA, J. B. S. HASUI, Y. HARALYI, N. L. E. 1988 **b**. A zona de articulação dos blocos Brasília e Araguacema no Centro-Norte de Goiás. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35º**, Anais..., SBG, Belém, Pará. v. 5.

COSTA, J.B.S. ; HASUI, Y. 1988 **c**. Aspectos do Lineamento Transbrasiliano na região de Porto Nacional-Natividade, GO. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35º**, Anais ... Belém, Pará, SBG, v.5., p. 2208-2216.

COSTA, J.B.S.; LEMOS, R.L.; MARTINS, J.P.A.; BELTRÃO, J.F.; GÓES, A.M.; HASUI, Y. 1984. Geologia da região de Porto Nacional. **Revista Brasileira de Geociências**, v.14, n.1, p.3-11.

COSTA, J.B.S.; MARTINS, J.P. de A.; BELTRÃO, J.F.; GÓES, A.M.; LEMOS, R.L.; GORAYEB, P.S. de S. 1982. **Projeto Porto Nacional**, Convênio DNPM/UFPA, Relatório Final.

COSTA, L.A.M.; PORTELA, A.C.P.; NILSON, A.A.; VALE, C. R. O.; MAECHETTO, C.L.M.; SANTOS, E.L. dos; MENEGUESSO, G.; INDA, H.A.V.; STERNA, L.H.; MARCHETTO, M. BAPTISTA; M.B.; FRATIN, O.; MOSSMANN, R.; OLIVEIRA, T.F. de ; SILVA, W.G. da. 1976. **Projeto Leste do Tocantins- Oeste do São Francisco**. PROSPEC/DNPM, Relatório Final.

COWARD, M.P. ; RIES, A.C. Collision Tectonics. **Geological Society of America Special Publication** 19: 67-81.

COWEN, D. 1990. GIS versus CAD versus DBMS: what are the Differences? In: **Introductory Readings in Geographical Information Systems**, pages 52_61. Taylor and Francis.

CUNHA, F.S.S. 1996. Análise estrutural e estatística de lineamentos aplicada à pesquisa mineral: o caso da região de Porto Nacional (TO). **Dissertação de Mestrado**. Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (inédito).

DAVID, M. 1977. Geostatistical Ore Reserve Estimation. Elsevier, New York, 464 pp. (In: **Quantification and geology: methods of pattern detection and of integrating multidisciplinary knowledge**).

DEWEY J. F., 1988. Extensional collapse of orogens. **Tectonics**, v. 7 n. 6, p. 1123-1139.

DICKSON, B.L. & Scott, K.M. 1990. Radioelements distribution in whetered granitoids and aeolian soils in NSW. AMIRA P263: Improving the interpretation of airborne gamma-ray surveys. **CSIRO Division of Exploration Geoscience, Maio de 1990, Unpublished Report.**

DICKSON, B.L. & SCOTT, K.M. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, 17(2), 187-200.

DUARTE, M. I. M. 1998. Análise integrada de dados aplicada à geologia do Supergrupo Rio das Velhas (NE Quadrilátero Ferrífero). **Teses Defendidas - Metalogênese e Geoquímica – 1998.**

EASTMAN, R. J. 1995. **Idrisi for Windows 1.0 Student Manual**. Graduate School of Geography. Clark University, Worcester, MA.

EISENLOHR, B. N., GROVES, D. & PARTINGTON, G. A. 1989. Crustal-scale shear zones and their significance to Archaean gold mineralization in Western Australia. **Mineralium Deposita** 24, 1-8.

ELETROBRÁS-SIPOT, 1998. Mapa do Potencial Hidrelétrico Brasileiro para usinas acima de 10 MW. ELETROBRÁS-SIPOT.

EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE 1998a. **Zoneamento Agroecológico (ZAE) do Estado do Tocantins/ Mapa Erodibilidade**. Trabalho desenvolvido pela Embrapa Monitoramento por Satélite em parceria com a Diretoria de Zoneamento Ecológico-Econômico (DZE), da Secretaria de Planejamento (SEPLAN) do Estado do Tocantins. Endereço eletrônico na Internet: <http://www.cnpm.embrapa.br/projetos/tocant/erod.html>

EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE 1998b. **Zoneamento Agroecológico (ZAE) do Estado do Tocantins/ Mapa Pedológico**. Trabalho desenvolvido pela Embrapa Monitoramento por Satélite em parceria com a Diretoria de Zoneamento Ecológico-Econômico (DZE), da Secretaria de Planejamento (SEPLAN) do Estado do Tocantins. Endereço eletrônico na Internet: <http://www.cnpm.embrapa.br/projetos/tocant/pedo.html>

EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE 1998c. **Zoneamento Agroecológico (ZAE) do Estado do Tocantins/ Mapa Vegetação Potencial**. Trabalho desenvolvido pela Embrapa Monitoramento por Satélite em parceria com a Diretoria de Zoneamento Ecológico-

Econômico (DZE), da Secretaria de Planejamento (SEPLAN) do Estado do Tocantins. Endereço eletrônico na Internet: <http://www.cnpm.embrapa.br/projetos/tocant/vege.html>

EMBRAPA 2002. CD Brasil visto do Espaço/ Estado do Tocantins, escala compatível com 1:25.000. <http://www.cdbrasil.cnpm.embrapa.br/to/index.htm?PHPSESSID=359cfa7accf44b85903a8f8f3586704f>

FERREIRA, F. J. F., RIFFEL, S. B., FORLIN, M., GUIMARÃES, G. B. 2001. Gamaespectrometria do Granito Serra do Carambeí - PR. http://www.geologia.ufpr.br/geofisica/7CISBGf_LPGA_UFPR_07.PDF

FORD, K.L. & O'REILLY, G.A., 1985. Airborne gamma-ray spectrometric surveys as an indicator of granophile element specialization and associated mineral deposits in the granitic rocks of the Meguma Zone of Nova Scotia, Canada. In: **High heat production (HHP) granites, hydrothermal circulation and ore genesis**. The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp.113-133.

FORNAZZARI NETO, L., FERREIRA, F. J. F., CAMPOS, A. F. 2001. Gamaespectrometria Aplicada à Prospecção de Ouro na Folha Botuverá-SC. http://www.geologia.ufpr.br/geofisica/7CISBGf_LPGA_UFPR_04.PDF

FORNAZZARI NETO, L., FERREIRA, F. J. F., FORLIN, M. & ROSTIROLLA, S. P. 2001. Gamaespectrometria da Ocorrência de Ouro do Morro do Carneiro Branco-SC. http://www.geologia.ufpr.br/geofisica/7CISBGf_LPGA_UFPR_03.PDF

FRANCA-ROCHA, W., BONHAM-CARTER, G. & MISI, A.. 1999. Weights of evidence method applied to mineral deposits modelling in the Irecê basin, Bahia, Brazil. **GIS BRASIL 1999**, p. 14.

FRASER, N. & AGAR, B. 1997. GIS integration of airborne multispectral, geophysical and other mineral exploration data at the El Halcon porphyry copper prospect, Copiapo, Chile. **Twelfth International Conference and Workshops on Applied Geologic Remote Sensing**, Denver, Colorado, 17-19 November 1997.

FULLER, B.D. 1967. Two dimensional frequency analysis and design of grid operators. **Mining Geophysics**, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 658-708.

- GARCIA, M. A. T. 1999. Integração de dados multiespectrais e aerogeofísicos na identificação de áreas favoráveis a mineralizações auríferas na região de Gentio do Ouro, Chapada Diamantina (BA). Teses Defendidas - Metalogênese e Geoquímica - 1999
- GOMIDE, F. A. C. & E GUDWIN R. R.. 1994. **Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy**. Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial, Faculdade de Engenharia Elétrica (FEE), UNICAMP.
- GORAYEB, P.S de S. 1996. **Petrologia e evolução crustal das rochas de alto grau da região de Porto Nacional (TO)**. Belém, Pará. 258 p. Tese de Doutorado em Geociências, Curso de Pós Graduação em Geociências, Universidade Federal do Pará.
- GOTTARDO, E & STRIEDER, A.J. 1997. O que são os Lineamentos Trans-brasileiros? Uma revisão da aplicação do termo e das suas implicações geo-tectônicas. In: **VI SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS**, Pirenópolis (GO), SBG-DF, 1997, Bol. Resumos Expandidos, p. 13-15
- GOTTARDO, E. 1996. Alojamento de rochas granitóides e a sua relação com os depósitos auríferos em veios da região de Porto Nacional (TO). **Dissertação de Mestrado**. Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 250 p. (inédito).
- GOVETT, G.J.S. 1983. Handbook of exploration geochemistry. **Rock Geochemistry in Mineral Exploration**, v.3, 462 p.
- GROVES, D. I. ; PHILIPS, G.N. 1987. The genesis and tectonic controls on Archean gold deposits of the Western Australia Shield: a metamorphic replacement model. **Ore Geology Reviews**, v. 2., p. 287-322.
- GUALDA, G. A. R., FERREIRA, F. J. F., PORTELA FILHO, C. V., VLACH, S. R. F. Integração de Dados Aerogamaespectrométricos e Geológicos para a Individualização de Maciços Graníticos na Região da Serra da Graciosa (PR). 2001. http://www.geologia.ufpr.br/geofisica/7CISBGf_LPGA_UFPR_05.PDF
- GUILBERT, J.M. ; PARK, C.F. JR. 1986. **The geology of ore deposits**. W.H. Freeman and Company, 922 p.
- GUNN, P.J. 1975. Linear transformation of gravity and magnetic fields, **Geophysical Prospecting**, 23, 300-312.

- GUNN, P.J. & DENTITH, M.C., 1997. Magnetic responses associated with mineral deposits. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, 17(2), 145-158.
- GUNN, P.J., MAIDMENT, D. & MILLIGAN, P.R., 1997. Interpreting aeromagnetic data in areas of limited outcrop. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, 17(2), 175-185.
- HANSEN, R. O. (1993). Interpretative gridding by anisotropic Kriging. **Geophysics**, vol. 58, n.10, p. 1491-1497.
- HARRIS, B. 1989. Beyond Geographic Information Systems: Computers and the Planning Professional, **Journal of the American Planning Association**, 55, p. 85-90.
- HARRIS, N.B.W.; PEARCE, J.A. ; TINDLE, A.G. 1986. Geochemical characteristics of collision zone magmatism. In: Coward, M.P. ; Ries, A.C. Collision Tectonics. **Geological Society of America Special Publication** , v.19, p. 67-81.
- HASUI Y., COSTA J. B. S. & ABREU F. A. M. de, 1984. Província Tocantins setor setentrional. **O pré-Cambriano do Brasil**, p. 187-204.
- HASUI Y., COSTA J. B. S., GARAYEB P. S. de S., LEMOS R. L. GAMA Jr. T. ; BEMERGUY R. L., 1984, Geologia do Pré-Cambriano da Região de Paraíso do Norte de GOIÁS, GO. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33^o** , Anais..., Rio de Janeiro, RJ, SBG, p. 2220-2233.
- HASUI Y.; TASSINARI C. C. G.; SIGA Jr. O.; TEIXEIRA W.; ALMEIDA F. F. M. de ; KAWASHITA K., 1980. Datação Rb-Sr e K-Ar do centro-norte do Brasil e seu significado geológico-geotectônico. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31^o** , Anais..., Balneário de Camboriú, SC, SBG, v. 5, p. 2659-2676.
- HASUI, Y.; BARTORELLI, A.; MORTARI, D.; RIBEIRO, A.C.O. ; JÁCOMO, A.A.C. 1987. Considerações sobre a geologia da região entre Porto Nacional e Ipueiras, GO. **Revista Brasileira de Geociências**, v.17, n.3, p.295-301.
- HASUI, Y.; SENA COSTA, J.B. 1990. O Cinturão Araguaia: Um novo enfoque estrutural-estratigráfico. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36^o** , Anais..., Bélem, Pará, SBG, v.6. p. 2535-2549.

HENLEY, R. W. & BERGER, B. R., 1993, What is an exploration model anyway? -an analysis of the cognitive development and use of models in mineral exploration. **Geological Association of Canada Special Paper** n. 40, p. 41-50

HILL, 1993. Mantle plumes and continental tectonics. **Lithos** 30(3/4): 193-206.

HODGSON, C.J. 1989. **Patterns of Mineralization**. In: BURNSNALL, J.T.; HODGSON, C.J.; HUBERT, C.; KERRICH, R.W.; MARQUIS, P.; MURPHY, J.B.; OSMANI, I.; POULSEN, H.; ROBERT, F.; SANBORN-BARRIE, M.; STOTT, G. ; WILLIAMS, H.R. 1989. **Mineralization and shear zones**. Geological Association of Canada - Short Course Notes - V.6. Montréal, Québec. 299p.

IRVINE, R.J. & SMITH, M.J., 1990. Geophysical exploration for epithermal gold deposits. **Journal of Geochemical Exploration**, 36, 375-412.

ISHIHARA, S., 1977. The Magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. **Mining Geology**, 27, 293-305.

ISLES, D.J., HARMAN, P.G. & CUNNEN, J.P. 1989. The contributions of high resolution aeromagnetics to Archean gold exploration in the Kalgoorlie region, Western Australia. **Economic Geology, Monograph** 6, 389-397.

JAQUES, A. L.; WELLMAN, P.; WHITTAKER, A. & WYBORN, D. 1997. High resolution geophysics in modern geological mapping. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, 17(2), 159-174.

JOURNEL, A.G. 1996. Modelling uncertainty and spatial dependence: Stochastic imaging. **Geographical Information Systems**, V. 10, n° 5, 517-522.

KERRICH, R.; FRYER, B.J.; KING, R.W., WILLMORE, L.M. and VANHESSE, E. 1987. Crustal outgassing and LILE enrichment in major lithosphere structures, Archean Abitibi Greenstone Belts: evidence on the source reservoir from the strontium and carbon isotopic tracers. **Contributions on Mineralogy and Petrology**, v. 97, p. 156-178.

KOIDE, H.; BHATTACHARJI, S. 1975. Formation of fractures around magmatic intrusions and their role in ore localization. **Economic Geology**, v. 70, p. 781-799.

KRONER, A. 1992. Crust Formation and Plate Motion in the Early Archean. **Science**, v. 256, p. 1405-1410.

LAFON, J.M.; KOTSCHOUBEY B. ; BARRRADAS, J.A.S. 1994. Rb-Sr and Pb-Pb Dating of the Proterozoic Igneous Rocks and Associated Mineralizations in the Monte do Carmo Region, State of Tocantins, Brazil. **7º CONGRESSO CHILENO DE GEOLOGIA**.

LOISELLE, M.C. ; WONES, D.R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. **Geological Society of America, Abs. with Progs.**, v.11, 468.

MACLEOD, I.N., JONES, K. & TING FAN DAÍ, 1993. 3-D analytic signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. **Exploration Geophysics**, 24, 679-688.

MAGUIRE, D., GOODCHILD, M. & RHIND, D. Editors. 1993. **Geographical Information Systems - volume I**. John Wiley and Sons, 2 edition.

MAMEDE, L.; ROSS, J.L.S. ; SANTOS, L.M. 1981. Geomorfologia. In: BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto RADAM. **Folha SC.22 Tocantins**. Rio de Janeiro, 1981. (Levantamento de Recursos Naturais, 22).

MANCHINI, D. P. & PAPPA, G. L.. 2001. <http://www.din.uem.br/~ia/preview/fuzzy/index.htm>, Página eletrônica na internet sobre o tema “ Lógica Fuzzy”.

MARRERO, C. R. C. 1999. Análise do controle estrutural metalogênico em cuba centro-oriental, com base em dados integrados. Resumo nº 584- **Tese de Doutorado** - Agosto de 1999. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

MARSCHAK, S.; MITRA, G. 1988. **Basic methods of structural geology**. Prentice Hall, New Jersey, 446 p.

MATHERON, G. 1971. **The theory of regionalized variables and its applications**. Paris, Lês Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique de Fontainebleu, 211p.

MATHERON, G., 1963, Principles of geostatistics: Economic Geology, 58, 1.246-1.266. (In: **Inerpretive Gridding by Anisotropic Kriging**).

MAURICE, Y.T. & CHARBONNEAU, B.W. 1987. U and Th concentration process in Canadian Granitoids, their detection by airborne gamma ray spectrometry and their relationship to granophile mineralization. *Revista Brasileira de Geociências*, 17 (4), p. 644-646.

MEDEIROS, C.B, CASANOVA, M., CÂMARA,G.: "The DOMUS Project - Building on OODB GIS for Environmental Control". In: Jürg Nievergelt, Thomas Roos, Hans-Jörg Schek, Peter Widmayer (Eds.), **Proceedings of IGIS '94: International Workshop on Advanced Information Systems. Lecture Notes in Computer Science**, Vol. 884, **SPRINGER** 1994, p. 45-54.

MEIRELES, H.P. ; KOTSCHOUBEY, B. 1994. Geologia e Mineralizações Auríferas da Área do Morro do Lajeado, Porto Nacional, TO. **4º Simpósio de Geologia da Amazônia**, SBG /95-97.

MESQUITA, M.J.M. 1996. Controle estrutural e alteração hidrotermal nos depósitos de ouro da região de Porto Nacional, TO. Porto Alegre. **Tese de Doutorado** - Instituto de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geociências da UFRGS.

MILESKI, E.; DOI, S. & FONZAR, B.C. 1981. Vegetação - Estudo Fitogeográfico. In: BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. **Projeto RADAM. Folha SC.22 Tocantins**. Rio de Janeiro, 1981. (Levantamento de Recursos Naturais, 22).

MILLER, C. 1989. Syntectonic plutonism (?). **EOS**, v. 70, n.32.

MILLER, R.B. & PATERSON, S.R. 1994. The transition from magmatic to high temperature solid-state deformation: implications from the Mount Stuart Batholith, Washington. **Journal of Structural Geology**, v. 16, n. 6, p. 853-865.

MILLIGAN, P.R. & GUNN, P.J. 1997. Data enhancement & presentation. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, 17(2), 63-75.

MINTY, B.R.S. 1997. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, 17(2), 39-50.

MOREIRA, F.R. da SILVA, ; CÂMARA, G.N. & ALMEIDA FILHO, R. 1999. Integração e análise espacial de dados em pesquisa mineral. **GIS BRASIL 1999**, 24p.

MOREIRA, F.R. da SILVA, 2001. Uso e avaliação de técnicas de integração e análise espacial de dados em pesquisa mineral aplicadas ao planalto de Poços de Caldas. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto. INPE, São José dos Campos, 168 p.

MOSIER, D. L. & BLISS, J. D., 1992, Introduction and overview of mineral deposit modeling. **U.S. Geological Survey Bulletin** n. 2004, p. 1-5.

- MOURA, P. A. 1997. Potencialidade mineral da porção média do Vale do Ribeira (SP) para mineralizações auríferas, obtida de um sistema de informação geográfica – SIG. Teses Defendidas- Metalogênese e Geoquímica– 1997. http://www.ige.unicamp.br/pgraduacao/tesesdmg/teses1997/pgraduacao_teses_def_1997_res8.htm
- NAMIKAWA, L. M. 1995. Um método de ajuste de superfície para grades triangulares considerando linhas características". (Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil, 113 p.
- NAUDY, H. 1967. Essai de filtrage non-lineaire applique aux profils aeromagnetiques. **Geophysical Prospecting**, 16, 171-178.
- NYE, 1957. **Physical properties of crystals**. Oxford University Press, London.
- OLIVEIRA, A. I. & LEONARDOS, O. H. 1943. **Geologia do Brasil**. Ministério da Agricultura, Governo do Brasil.
- OSAKO, L. S. 1999. Estudo do potencial mineral do depósito uranífero de Lagoa Real, BA, com base em dados geológicos, aerogeofísicos e de sensoriamento remoto. Teses Defendidas - Metalogênese e Geoquímica - 1999.
- OSTROVSKIY, E. Ya. 1975. Antagonism of radioactive elements in wallrock alteration fields and its use in aerogamma spectrometric prospecting. **International Geological Review**, 17, 461-8.
- PASSCHIER, C.W.; MYERS, J.S. & KRONER, A. 1990. **Field Geology of high-grade gneiss terrains**. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 150p.
- PATERSON, S.R.; VERNON, R.H. & TOBISH, O.T. 1989. A review of criteria for identification of magmatic and tectonic foliation in granitoids. **Journal of Structural Geology**, v. 14, p. 291-300.
- PENDOCK, N. & NEDELJKOVIC, V. Integrating geophysical data sets using probabilistics methods. In: Thematic Conference and Workshop on Applied Geologic Remote Sensing, 11., Las Vegas, 1996. **Proceedings**. Nevada: 1996, v.2, p.621-628.
- PERRING C. S., GROVES D. I., SHELLABEAR J. N., & HALLBERG J. A. 1991. The “porphyry-gold” association in the Norseman-Wiluna belt of Western Australia: implications for models of Archean gold metallogeny. **Precambrian Research**, v. 51, p. 85-113.

PERRING C., BARLEY M. E., CASSIDY K. F., GROVES D. I., McNAUGHTON N. J., ROCK N. M. S., BETTENAY L. F., GOLDING S. D., e HALLBERG J. A., 1989. The association of linear orogenic belts, mantle-crustal magmatism, and archean gold mineralization in the eastern yilgarn block of western Australia. Keayes, R.R, Ramsay, W.R.H.; Groves, D.I. (eds.) *The Geology of Gold Deposits, Perspectives in 1988. Economic Geology Monograph 6*, p. 571-584.

PERROTTA, M. M. Projeto modelamento dos depósitos auríferos do Vale do Ribeira, Fase II. <http://www.cprm-sp.gov.br/atua/monica/modelamento.htm#indice>.

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

PITCHER, W. S. 1979. The nature, ascent and emplacement of granitic magmas. **Journal of Geological Society of London** ,v.136, p.627-662.

PITCHER, W.S. 1978. The anatomy of a batholith. **Journal of Geological Society of London**, v.135, p. 157-182.

PLANT, J.A.; SIMPSON, P.R.; GREEN, P.M.; WATSON, J.V. ; FOWLER, M.B. 1983. Metalliferous and mineralized Caledonian granites in relation to regional metamorphism and fracture systems in northern Scotland. **Trans. Instn. Min. Metall.** sec. B., v.92, B 33-42.

PORTELA FILHO, C. V., FERREIRA, F. J. F., SALAMUNI, E., BAHNIUK, J. 2001. Comparação entre Granitóides de parte da Serra do Mar no Estado do Paraná através da Aerogamaespectrometria. http://www.geologia.ufpr.br/geofisica/7CISBGf_LPGA_UFPR_06.PDF

QUADROS, T. F. P. 2000. Integração de Dados em Mapeamento de Favorabilidade Mineral para Ouro na Ilha Cristalina de Rivera (Uruguai). **Tese de Doutorado**. Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. (inédito).

REDDY, R.K.T.; BONHAM-CARTER, G.F.; GALLEY, A.G. **Developing a geographic expert system for regional mapping of volcanogenic massive sulfide (VMS) deposit potential**. Ontario: Geological Survey of Canada, 1992. p.112-124.

REMACRE, A. Z.; 1996. Variogramas para interpolação em Geofísica. *Geociências*(São Paulo), Vol. 15, No. 1, pag. 17-39.

ROBERT, F.; POULSEN, K.H. & DUBÉ, B. 1994. Structural analysis of lode gold deposits in deformed terranes. **Geological Survey of Canada - Open File Report 2850**. Ottawa. 140p.

ROLDÃO, D. G. 2000. Análise integrada de dados estruturais e geofísicos no controle de depósitos minerais na região oeste do Escudo Sul-riograndense (RS, Brasil). **Dissertação de Mestrado**. Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (inédito).

ROSTIROLLA, S. P. 1997. Alguns aspectos da avaliação de favorabilidade em geologia exploratória. *Revista Brasileira de Geociências*, N° 04, Vol. 27, p. 327-338.

SAATY, T.L. 1992. **Multicriteria decision making- The analytical hierarchy process**. Pittsburg, RWS Publications.

SALOMÃO NETO, J. 1989. **Projeto Porto Nacional**, Verena Mineração. Relatório final de pesquisa DNPM 861.618/85, Brasília, DF.

SANTOS, M.M. 1989. Contribuição a geologia e a geoquímica do depósito Pontal, Tocantins. **Dissertação de Mestrado**- Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Brasília (inédito).

SANTOS, S. C. & AMARAL, G. 1999. Integração de dados aeromagnéticos e geológicos da Folha NA.20-V-D através do IDRISI. **GIS BRASIL 1999**, arquivo digital em CD ROM, 6 p.

SANTOS, J.O.S. ; LOGUÉRCIO, S.O.C. 1984. A parte meridional do Cráton Amazônico (Escudo Brasil Central) e as bacias do alto Tapajós e Parecis- Alto Xingu. In: Schobbenhaus, C., Campos, D. de A.; Derze, G.H. ; Hasmus, H.E., (coords.) **Geologia do Brasil**, DNPM, Brasília, p. 93-127.

SCHREIBER D. W.; FONTBOTÉ L. ; LOCHMANN D. 1990. Geologic setting, paragenesis, and physicochemistry of gold quartz veins hosted by plutonic rocks in the Patáz region. **Economic Geology**, v. 85, p. 1328-1347.

SCHREIBER D. W.; FONTBOTÉ L. ; LOCHMANN D. 1990. Geologic setting, paragenesis, and physicochemistry of gold quartz veins hosted by plutonic rocks in the Patáz region. **Economic Geology**, v. 85, p. 1328-1347.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E DE RECURSOS HÍDRICOS DO DISTRITO FEDERAL. 2003. Textos sobre geologia, hidrogeologia, solos e geomorfologia em parte

adaptados do Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. <http://www.semarh.df.gov.br/site/cap03/06.htm>.

SËNGOR, A.M.C. 1990. Plate tectonics and orogenic research after 25 years: a thethyan perspective. **Earth and Sciences Review**, v. 27, p 1-201.

SIBSON, R.H., 1990. Faulting and fluid flow, *in* Nesbitt, B.E., ed., Short course on fluids in tectonically active regimes of the continental crust. **Mineralogical Association of Canada**, p. 93-132.

SMITH, T., MENON, S., STAR, J. & ESTES, J. 1987. Requirements and Principles for the Implementation and Construction of Large-scale Geographic Information Systems. **International Journal of Geographical Information Systems**, 1(1):13_31.

SPECTOR, A. & PARKER, W. 1979. Computer compilation and interpretation of of geophysical data. **Geophysics**, 35, 293-302.

STRIEDER, A. J. 1993. Tectônica Colisional no Brasil Central: Evolução e Implicações no Padrão Estrutural. **4º Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos - SBG Núcleo MG12/297-301**.

STRIEDER, A.J.; GOTTARDO, E.; CUNHA, F.S.S.; BINOTTO, R.B. ; MESQUITA, M.M. 1994. O significado tectônico dos Lineamentos Transbrasilianos no processo colisional neoproterozóico da Província Estrutural do Tocantins: uma hipótese de trabalho. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38^o, Anais...**, SBG, Balneário Camboriú/SC, v.1, p.267-269.

STRIEDER, A.J.; SUITA, M.T.F. 1998. Neoproterozoic tectonic evolution of Tocantins Structural Province, Central Brazil. **Precambrian Research** (submetido).

STUDEMEINSTER, P.A., 1983. The redox state of iron: a powerful indicator of hydrothermal alteration. **Geoscience Canada**, 10, 189-194.

SUPPE, J. 1985. **Principles of structural geology**. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 537 p.

TARLOWSKI, C.; GUNN, P. J. & MACKEY, T., 1997. Magnetic responses associated with mineral deposits. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, 17(2), 145-158.

TCHALENKO, J.S. 1970. Similarities between shear zones of different magnitudes. **Geological Society of America Bulletin**, v.81, p.1625-1640.

TIGHE. 1995. Examples of applications of GIS in Mineral exploration. <http://www.cogs.ns.ca/~gis605/essay.html>.

TOBISCH, O.; PATERSON, S.R. 1988. Analysis and interpretation of composite foliations in areas of progressive deformation. **Journal of Structural Geology**, v. 10, n. 7, p. 745-754.

TOMLIN, D. (1990) Geographic information systems and Cartographic Modeling. Prentice Hall, New York.

VACQUIER, V., STEENLAND, N.C., HENDERSON, R.G. & ZEITZ, 1951. Interpretation of aeromagnetic maps. **Geological Society of America Memoir** 47.

VASCONCELLOS, R. M. de. 1994. Geofísica em levantamentos geológicos no Brasil. ; Org. por VASCONCELLOS, R. M. de; METELO, M. J.; MOTTA, A. & GOMES, R. D. COMPANHIA DE PESQUISAS SE RECURSOS MINERAIS. **Publicação Técnica**, p. 01-165.

VIGNERESSE, J. L. 1995. Crustal regime of deformation and ascent of granitic magma. **Tectonophysics**, v. 249, p.187-202.

WANG L. G.; McNAUGHTON N. J. ; GROVES D. I.,1993, An overview of the relationship between granitoid intrusions and gold mineralisation in the archaean Murchison province, western Australia. **Mineralium Deposita**, v. 28, p. 482-494.

WEBSTER, S.S.,1984. A Magnetic Signature for tin deposits in south-east Australia. **Exploration Geophysics**, 15, 15-32.

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

WILLIAMS, P.F. 1985. Multiply deformed terrains - problems of correlation. **Journal of Structural Geology**, v.7, n. 3/4, p.269-280.

WILSON, M. 1989. **Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach**. 468 p.

WITHJACK, M.O.; SCHEINER, C. 1982. Fault Patterns Associated with Domes - An Experimental Analytical Study. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 66, n.3, p. 302-316.

WRIGHT, D.F., AND BONHAM-CARTER, G.F., 1996. VHMS favourability mapping with GIS-based integration models, Chisel Lake-Anderson Lake area, in : Bonham-Carter, Galley, and Hall (eds.): EXTECHI: A multidisciplinary approach to massive sulfide research in the Rusty Lake-Snow Lake greenstone belts, Manitoba. **Geological Survey of Canada, Bulletin 426**, p. 339-376.

YEATES, A. N., Wyatt, B. W. & Tucker, D. H., 1982. Application of gamma-ray spectrometry to prospecting for tin and tungsten granites, particularly within the Lachlan Fold Belt, New South Wales. **Economic Geology**, 77, 25-1738.