UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM TERRENO
CRISTALINO UTILIZANDO-SE ANÁLISE INTEGRADA DE
DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO, GEOFÍSICOS E
TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO,
REGIÃO DE LINDÓIA, SP.**

Vanessa Madrucci

Orientador: Prof. Dr. Fábio Taloli

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO
2004

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM TERRENO
CRISTALINO UTILIZANDO-SE ANÁLISE INTEGRADA DE DADOS
DE SENSORIAMENTO REMOTO, GEOFÍSICOS E TÉCNICAS DE
GEOPROCESSAMENTO, REGIÃO DE LINDÓIA, SP

VANESSA MADRUCCI

Orientador: Prof. Dr. Fabio Taioli

DEDALUS - Acervo - IGC

30900015629

TESE DE DOUTORAMENTO

COMISSÃO JULGADORA

	Nome	Assinatura
Presidente:	Prof. Dr. Fabio Taioli	
Examinadores:	Dr ^a . Amélia João Fernandes	
	Prof. Dr. Carlos Alberto Mendonça	
	Prof. Dr. Ginaldo Ademar da Cruz Campanha	
	Dr ^a . Mônica Mazzini Perrotta	

SÃO PAULO
2004

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM TERRENO
CRISTALINO UTILIZANDO-SE ANÁLISE INTEGRADA DE DADOS
DE SENSORIAMENTO REMOTO, GEOFÍSICOS E TÉCNICAS DE
GEOPROCESSAMENTO, REGIÃO DE LINDÓIA, SP.**

Vanessa Madrucci

Orientador: Prof. Dr. Fabio Taioli

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO
2004

**A Bianca e Luigi que
enchem de alegria a minha vida
e aos meus pais, Álfio e Eliete que
tanto me incentivaram.**

Agradecimentos

A Deus, por tudo.

Ao prof. Dr. Fabio Taioli pela orientação, incentivo e ajuda constantes, além da confiança.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo 00/05740-2, pela bolsa de doutorado e ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo pelo suporte acadêmico.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela cessão de imagens de satélite. A Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) pelo fornecimento de dados aerogeofísicos e de dados de poços tubulares.

Ao Instituto Geológico de São Paulo (nas pessoas de Dra. Sonia Nogueira e Dr. Tarcísio Montanheiro) e ao laboratório de Aerofotogeografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da USP, pela cessão de fotografias aéreas.

Ao Instituto Florestal de São Paulo (Projeto Biota) pela sessão de cartas topográficas digitalizadas.

A empresa Jundsondas e a Minergeo pela disponibilização de dados de poços tubulares.

Ao químico Neliton de Toledo pela amizade e grande ajuda nas visitas às empresas mineradoras da região de Lindóia. Ao Sr. José Cremasco e a Sra. Ana Paula Fernandes pela permissão dos trabalhos em sua propriedade, pelo transporte até os locais das nascentes, bem como a disponibilização de dados de poços. Ao químico Eduardo Pirani, do Balneário Municipal de Águas de Lindóia, pela atenção, permissão da visita às nascentes e disponibilização de dados. Ao Sr. José (do conjunto aquático municipal de Serra Negra), Sr. Fabre, ao Radio Hotel de Serra Negra e ao SAAE de Águas de Lindóia nas pessoas Sr. Rogério e Sr. Nenê, e às empresas de água mineral: Lindóia Capital (Sr. Marcos), Santa Helena, Serra Negra – Fonte Nossa Senhora Aparecida (Sra. Simone Giralí), Fontana (Sr. Osmar Fontana), Água Única (Sr. José Paiva), Flamim – Lindóia Bioleve, pela atenção e disponibilização de dados.

Ao relator anônimo da FAPESP pelas contribuições importantes ao trabalho.

Ao prof. Dr. Ginaldo Adhemar da Cruz Campanha e ao prof. Theodoro Isnard Ribeiro de Almeida pelas sugestões dadas na qualificação.

Ao prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas pelas discussões sobre o levantamento geofísico de eletrorresistividade.

A Thelma Aisengart dos Santos pelo suporte técnico sobre o programa Geosoft Oásis Montaj. Ao geofísico Dr. Adriano Marchioreto pela disponibilização do programa RES2DINV da empresa Alta Resolução, para o tratamento de dados geofísicos de eletrorresistividade.

Ao prof. Dr. Marcelo Rocha pelas dicas a respeito das análises estatísticas.

Aos amigos Paulo Rodrigues de Lima (Paulinho) e Thiago Piacentini ("Mestre") pela grande ajuda nos levantamentos geofísicos de eletrorresistividade. A ajuda técnica aliada ao bom humor foi fundamental para o sucesso da execução dos levantamentos geofísicos.

Ao amigo prof. Dr. Paulo Veneziani pelas discussões acerca do mapa morfoestrutural, dos dados estruturais de campo e pela leitura criteriosa do volume da tese.

A amiga Dra. Mônica Mazzini Perrotta (CPRM) pelas discussões acerca da hidrogeologia da área de estudo e da modelagem por pesos de evidência.

Às queridas Ana Paula Cabanal e Magali Polli Fernandes Rizzo, secretárias da seção de pós-graduação, pela amizade, simpatia e apoio constantes.

As amigas sempre presentes: Luciana Fernandes, Rosana Okida, Veridiana Martins, Ana Paula Lazarini e Joseli Ferreira e aos colegas da pós-graduação pela amizade e incentivo.

Não poderia deixar de agradecer ao querido Carlos César de Araújo pela grande ajuda nos trabalhos de campo e pelas sugestões significativas sobre as análises por geoprocessamento. Além disso, seu incentivo foi muito importante para a elaboração desta tese.

A grande amiga Janaina Barrios Palma, pela ajuda incondicional, principalmente nos momentos mais difíceis. Não tenho palavras para agradecer tanto carinho.

Um agradecimento especial aos meus pais, Álfio e Eliete, pelo amor e incentivo constantes e a toda a minha família que sempre torceu e rezou por mim, meu muito obrigado.

Sumário

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 Introdução e Justificativas	1
1.2 Objetivos	3
CAPÍTULO 2	5
ÁREA DE ESTUDO	5
2.1 Localização e acessos	5
2.2 Aspectos Fisiográficos e Geomorfológicos	7
<u>2.2.1 Fisiografia</u>	<u>7</u>
<u>2.2.2 Geomorfologia</u>	<u>8</u>
2.3 Geologia	9
<u>2.3.1 Geologia Regional</u>	<u>9</u>
<u>2.3.2 Geologia Local</u>	<u>14</u>
2.4 Aspectos Hidrogeológicos	23
<u>2.4.1 Balanço Hídrico</u>	<u>23</u>
<u>2.4.1 Características Geométricas e Hidráulicas</u>	<u>24</u>
<u>2.4.3 Hidrogeoquímica e qualidade das águas subterrâneas</u>	<u>27</u>
CAPÍTULO 3	28
MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1. Materiais	28
3.2. Métodos	33
<u>3.2.1. Estudo Regional</u>	<u>35</u>
3.2.1.1 Pré-processamento das imagens ETM+ Landsat 7 e de dados aerogeofísicos	35
3.2.1.2 Processamento: Realce e Integração dos dados	43
3.2.1.3 Modelo Numérico de Terreno (MNT)	45
3.2.1.4 Construção de banco de dados georreferenciado	45
3.2.1.5 Interpretação dos dados aeromagnetométricos	46
3.2.1.6 Fotointerpretação das imagens e dos produtos integrados	46
3.2.1.7 Análises por geoprocessamento e geração do modelo hidrogeológico prospectivo regional	60
3.2.1.8 Análise de favorabilidade utilizando técnicas de geoprocessamento	61
<u>3.2.2. Estudo de detalhe</u>	<u>68</u>
3.2.2.1 Fotointerpretação	68
3.2.2.2 Método geofísico de eletrorresistividade	68
CAPÍTULO 4	77
RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
4.1 Ocorrência de fontes	77
1. Fonte Santa Helena (Serra Negra)	81
2. Fonte São Carlos (Serra Negra)	82
3. Fonte Santo Agostinho (Serra Negra)	83

4. Fonte Nossa Senhora de Lourdes (Serra Negra)	85
5. Fonte Nossa Senhora Aparecida (Serra Negra)	85
6. Fonte Abandonada – Estrada do Barroão (Serra Negra)	86
7. Fonte do Sítio São Rafael (Serra Negra)	87
8. Fonte São Francisco I, II e III (Serra Negra)	88
9. Fonte Santo Antonio e Fonte Nossa Senhora do Rosário (Serra Negra)	90
10. Fonte Santa Maria I e II (Serra Negra/Monte Alegre do Sul)	91
11. Fontes Filomena, Madame Curie e São Roque (Águas de Lindóia)	92
12. Fonte Santa Isabel e Fonte São Sebastião (Águas de Lindóia)	93
13. Fonte São Luiz Gonzaga (nascente 1 e 2) (Águas de Lindóia)	93
14. Fontes São Jorge, Santa Rita e José Cremasco (Lindóia)	93
15. Fontes São Benedito, São José e Santa Bernadete (Lindóia)	94
16. Fontes Nossa Senhora das Brotas, São Bernardo, São Francisco (Lindóia)	94
17. Fontes São Bento e Pompéia (Socorro)	95
4.2 Análise dos dados em SIG	97
4.2.1 Dados de poços	97
a) <i>Produtividade de poços x distância de lineamentos (que representam as zonas de cisalhamento dúcteis a dúcteis rúpteis na área)</i>	<i>98</i>
b) <i>Produtividade de poços x intersecção de lineamentos (zonas de cisalhamento)</i>	<i>100</i>
c) <i>Produtividade de poços x densidade de comprimento de lineamentos (zonas de cisalhamento)</i>	<i>101</i>
d) <i>Produtividade de poços x densidade de lineamentos (zonas de cisalhamento)</i>	<i>103</i>
e) <i>Produtividade de poços x direção de lineamentos (zonas de cisalhamento)</i>	<i>105</i>
f) <i>Produtividade de poços x litologia</i>	<i>107</i>
g) <i>Produtividade de poços x mapa de isofreqüência de zonas de juntas</i>	<i>110</i>
h) <i>Produtividade de poços x mapa morfoestrutural</i>	<i>111</i>
i) <i>Produtividade x classes de declividade</i>	<i>113</i>
j) <i>Produtividade x morfologia</i>	<i>115</i>
k) <i>Produtividade x grau de dissecação</i>	<i>117</i>
l) <i>Produtividade de poços x pedologia</i>	<i>118</i>
m) <i>Produtividade de poços x manto de intemperismo</i>	<i>120</i>
n) <i>Produtividade de poços x feição topográfica</i>	<i>120</i>
4.2.2 Dados de nascentes	121
a) <i>fontes x distância de lineamentos (zonas de cisalhamento)</i>	<i>122</i>
b) <i>fontes x intersecção de lineamentos (zonas de cisalhamento)</i>	<i>123</i>
c) <i>fontes x densidade de lineamentos por comprimento (zonas de cisalhamento)</i>	<i>123</i>
d) <i>fontes x densidade de lineamentos (zonas de cisalhamento)</i>	<i>125</i>
e) <i>fontes x direções dos lineamentos (zonas de cisalhamento)</i>	<i>127</i>
f) <i>fontes x litologia</i>	<i>129</i>
g) <i>fontes x mapa de isofreqüência de zonas de juntas</i>	<i>131</i>
h) <i>fontes x mapa morfoestrutural</i>	<i>133</i>

i) fontes x mapa de declividade.....	134
j) fontes x morfologia.....	135
k) fontes x grau de dissecação	136
l) fontes x mapa pedológico	137
m) fontes x feição topográfica.....	138
4.3 Modelo Hidrogeológico Regional e Parâmetros de Prospecção de Água Subterrânea ...	139
<u>4.3.1 Lineamentos Estruturais (zonas de cisalhamento)</u>	<u>140</u>
<u>4.3.2 Litologia</u>	<u>141</u>
<u>4.3.3 Isofrequência de zonas de juntas</u>	<u>142</u>
<u>4.3.4 Morfoestruturas</u>	<u>142</u>
<u>4.3.5 Geomorfologia</u>	<u>142</u>
<u>4.3.6 Pedologia</u>	<u>143</u>
<u>4.3.7 Declividade</u>	<u>143</u>
<u>4.3.8 Manto de intemperismo</u>	<u>143</u>
<u>4.3.9 Topografia</u>	<u>144</u>
<u>4.3.10 Ocorrência de fontes.....</u>	<u>144</u>
4.4 Análise de Favorabilidade.....	145
- MÉTODO CONDUZIDO PELO CONHECIMENTO	145
4.4.1 Análise Booleana	149
4.4.2 - Análise por combinação linear ponderada	153
4.4.3 - Análise por média ponderada ordenada	158
- MÉTODO CONDUZIDO PELOS DADOS	163
4.4.4 - Análise por Pesos de Evidência	163
4.4.7 Comparação entre os mapas de favorabilidade	181
4.5 Estudo de Detalhe: Fotointerpretação e Levantamento Geofísico de Eletorresistividade	186
<u>4.5.1 Área 1 – Mineração Cremasco (Lindóia)</u>	<u>188</u>
4.5.1.1 Fotointerpretação	189
4.5.1.2 Levantamento Geofísico de Eletorresistividade	190
4.5.1.3 Interpretação conjunta dos dados	197
<u>4.5.2 Área 2 – Serra Negra: Rodovia Serra Negra – Amparo e Morro das Antenas</u>	<u>200</u>
4.5.2.1 Fotointerpretação	202
4.5.2.2 Levantamento Geofísico de Eletorresistividade	204
4.5.2.3 Interpretação conjunta dos dados	210
CAPÍTULO 5	217
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	217
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	220
ANEXOS	227

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Localização da área de estudo. Fonte: DAEE-UNESP, 1982 a e DAEE-UNESP, 1982 b	6
Figura 2.2.1 – Bacias dos rios Mogi Guaçu e Pardo e localização da área de estudo. Fonte: IGC-DAEE (1996).	7
Figura 2.2.2 – Relevo da região do Circuito das Águas (Águas de Lindóia)	8
Figura 2.3.1.2 - Faixa Alto Rio Grande e Nappe Socorro-Guaxupé.	10
Figura 2.3.1.3 - Principais feições estruturais brasileiras na região limítrofe entre os Estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro. Fonte: Modificado de Artur e Wernick (1986) e Ebert <i>et al.</i> (1993)	13
Figura 2.3.2.1 – Mapa geológico da área.	16
Figura 2.3.2.2 – Esboço tectônico da área de estudo. Fonte: Modificado de Artur (1988) e Campos Neto <i>et al.</i> (1990).	18
Figura 2.3.2.3 a) Arranjo espacial, em planta das estruturas associadas a zona de cisalhamento transcorrente dextral idealizada (Modificado de Christie-Blick e Biddle, 1985 e Woodcock e Richards, 2003). B) Detalhe da zona de deslocamento principal e as descontinuidades que se desenvolvem em níveis dúctil e rúptil.	22
Figura 2.4.1 – Modelo hidrogeológico simplificado de aquífero cristalino. Modificado de Hirata e Ferreira, 2001	25
Figura 2.4.2 - Histograma de frequência da capacidade específica dos poços (banco de dados 1, anexo 1)	25
Figura 2.4.3 - Histograma de frequência da capacidade específica dos poços (banco de dados 2, anexo 1).	26
Figura 2.4.4 – Gráfico de dispersão entre profundidade e produtividade de poços.	27
Figura 3.1.1 – Articulação das folhas topográficas IBGE na área de estudo.	28
Figura 3.1.2 - Mapa da rede de drenagem compilado das folhas topográficas IBGE (1:50.000) e complementadas com a imagem ETM+ Landsat 7, pancromática.	29
Figura 3.1.3– Tipos de fontes: a) fonte de depressão, b) fonte de contato, c) fonte artesiana de fratura, d) fonte tubular de dissolução cárstica. Fonte: Manoel Filho (1997).	33
Figura 3.2.1 – Fluxograma indicando as etapas do estudo regional.	34
Figura 3.2.2 – Fluxograma indicando as etapas do estudo de detalhe	35
Figura 3.2.3 – Gráfico de dispersão entre o comprimento de onda médio das bandas do ETM+ (219/75) e o número digital médio de amostras do alvo água.	36
Figura 3.2.4 – Gráfico de dispersão entre o comprimento de onda médio das bandas do ETM+ (219/76) e o número digital médio de amostras do alvo água.	37
Figura 3.2.5- Desenho esquemático do mosaico das duas cenas ETM+-Landsat 7 (219/75 e 219/76) que recobrem a área de estudo e o contorno da área de estudo.	38
Figura 3.2.6- Imagem magnetométrica, a) bruto b) erros de nivelamento c) imagem magnetométrica com correção de micronivelamento.	41
Figura 3.2.7- Imagem magnetométrica fase do sinal analítico em níveis de cinza e colorida.	43
Figura 3.2.7 – Imagem ETM+ (1CP) e lineamentos fotointerpretados.	49
Figura 3.2.8 – Produto integrado ETM+ PC1 e fase do sinal analítico e os lineamentos fotointerpretados.	50
Figura 3.2.9 - Imagem ETM+ pancromática e os principais lineamentos interpretados na área e seu significado tectônico.	52
Figura 3.2.10- Estilos de distribuição de fraturas observadas ao longo de lineamentos (Parizek, 1987 <i>apud</i> Fernandes, 1997).	53
Figura 3.2.12 - Mapa de isofrequência de zonas de juntas.	56
Figura 3.2.13 - Diagrama de rosetas das direções das zonas de juntas.	56
Figura 3.2.14a- Esquema do traçado de curvas morfoestruturais a partir da rede de drenagem e 3.2.14b- modelo de tendência de fluxo de água subterrânea.	58
Figura 3.2.15- Mapa morfoestrutural elaborado, a partir dos lineamentos estruturais e das formas simétricas - assimétricas da rede de drenagem e da topia.	60
Figura 3.2.16 – Operadores lógicos booleanos.	64
Figura 3.2.17 – Fluxograma com os passos da análise multicriterial (método conduzido pelo conhecimento).	65
Figura 3.2.18 – Fluxograma com os passos da análise por pesos de evidência (método conduzido pelos dados).	67
Figura 3.2.19 - Esquema de uma Sondagem Elétrica Vertical (SEV) utilizando o arranjo Schlumberger.	70

Figura 3.2.20 - Exemplo de uma curva de campo e o respectivo modelo geoeletrico.....	71
Figura 3.2.21 - Exemplo de aplicação de uma SEV.....	71
Figura 3.2.22 - Exemplo de aplicação de um caminhamento elétrico.....	72
Figura 3.2.23 - Caminhamento elétrico utilizando o arranjo dipolo-dipolo.....	72
Figura 3.2.24 - Anomalias de resistividade aparente em vale, em topo e em declividades de 30°.	74
Fonte: Fox <i>et al.</i> (1980).....	74
Figura 3.2.25 - Resistivímetro SAS 300B. À esquerda, a unidade principal e o módulo de potência (booster). À direita, visão frontal do equipamento exibindo os seletores de operação do mesmo.....	75
Figura 3.2.26 - ABEM SAS 300B (unidade principal e booster) em campo (a). ABEM SAS 300B (unidade principal e booster) em campo e eletrodos durante um caminhamento elétrico (b).....	75
Figura 4.1.1- Mapa geológico simplificado da região do Circuito das Águas, ocorrências de fontes e poços cadastrados.	78
Figura 4.1.2 detalhe do mapa geológico e perfis geológicos.....	79
Figura 4.1.3- Mapa morfoestrutural, feições estruturais brasileiras, indicação da falha de Monte Sião (FMS) e Falha de Ibitinga (FI) e localização das fontes cadastradas.....	80
Figura 4.1.4 a - nascente 1, fonte Santa Helena, as setas indicam fraturas abertas paralelas à foliação, por onde observa-se a surgência de água, e fraturas de direção NW-SE, preenchidas.	82
Figura 4.1.4b - nascente 3, fonte Santa Helena, a seta indica fratura aberta de direção N-S, com surgência de água.....	82
Figura 4.1.5 - Diagrama de rosetas das direções das fraturas medidas na fonte Santa Helena.....	82
Figura 4.1.6 a- Local da nascente Fonte São Carlos (Serra Negra - SP); Figura 4.1.6 b - Nascente Fonte São Carlos, a seta indica a fratura aberta por onde observa-se a surgência da água.....	83
Figura 4.1.7 - Diagrama de rosetas das direções das fraturas medidas na fonte São Carlos.....	83
Figura 4.1.8 - Afloramento de gnaiss nas proximidades da Fonte Santo Agostinho.....	84
Figura 4.1.9 - Diagrama de rosetas das direções das fraturas.....	84
Figura 4.1.10 - Fonte Nossa Senhora de Lourdes (bica).....	85
Figura 4.1.11 - Diagrama de rosetas das direções das fraturas nas proximidades da fonte Nossa Senhora de Lourdes.....	85
Figura 4.1.12 a - Quartzito cataclástico, com foliação na direção N55E/74SE, com presença de fraturas escalonadas; 4.1.12 b e 4.1.12 c - Detalhe da nascente Fonte Estrada do Barroão, a seta indica a fratura aberta (N 40E/vertical) por onde ocorre a surgência de água.....	86
Figura 4.1.13 - diagrama de rosetas das direções das fraturas no local da fonte estrada do Barroão.....	87
Figura 4.1.14 - Morro das Antenas, local da Fonte do Sítio São Rafael.....	87
Figura 4.1.15 - gnaiss fraturado próximo ao local da nascente da Fonte do Sítio São Rafael.....	87
Figura 4.1.16 - Local da nascente da Fonte São Francisco.....	89
Figura 4.1.17 a - Nascente da Fonte São Francisco em rocha gnáissica. b - Fraturas de direção N-S (X) e E-W (T), que se interceptam e por onde a água surge.....	89
Figura 4.1.18 - Perfil geológico dos arredores da empresa mineradora Fontana.....	90
Figura 4.1.19 a - Local da Nascente da Fonte Santa Maria, 4.1.19 b -Nascente da Fonte Santa Maria, em quartzito, intensamente fraturado.....	91
Figura 4.1.20. - Diagrama de rosetas das direções das fraturas.....	91
Figura 4.1.21 a e 4.1.21b. - Nascente da fonte Filomena, em quartzito foliado e fraturado. A água surge com temperatura em torno de 28° C.....	92
Figura 4.1.22. - Nascente da fonte José Cremasco, em gnaiss.....	93
Figura 4.1.23 a - Projeção ciclográfica dos planos das fraturas abertas observadas nos locais das nascentes e b - a projeção dos pólos dos planos dessas fraturas.....	95
Figura 4.1.24 - Diagrama de rosetas das direções de fraturas abertas de alto mergulho observadas nas fontes do Circuito das Águas.....	95
Figura 4.2.1.1a - Gráfico de curva acumulada de probabilidade aritmética e b - curva acumulada de logprobabilidade aritmética.....	97
Figura 4.2.1.2 - Mapa de lineamentos estruturais (zonas de cisalhamento) e poços cadastrados...	98
Figura 4.2.1.2 - Distância de lineamentos X Capacidade Específica.....	99
Figura 4.2.1.3 - Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua distância em relação aos lineamentos	99
Figura 4.2.1.4- Distância de intersecções de lineamentos X Capacidade Específica.....	100
Figura 4.2.1.5 - Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua distância da intersecção dos lineamentos	101
Figura 4.2.1.6 - Mapa de densidade de lineamentos por comprimento e poços cadastrados.....	102

Figura 4.2.1.7 - Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa de densidade de comprimento de lineamentos.....	102
Figura 4. 2.1.8 - Mapa de densidade de lineamentos (zonas de cisalhamento) e poços cadastrados.....	103
Figura 4.2.1.9 - Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa de densidade de lineamentos.....	104
Figura 4.2.1.10 - Gráfico de rosetas das direções dos lineamentos (zonas de cisalhamento).....	105
Figura 4.2.1.11 - Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização nos azimutes de lineamentos.....	105
Figura 4.2.1.12 - Mapa Geológico e poços cadastrados na área.	106
Figura 4.2.1.13- Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa geológico.	107
Figura 4.2.1.14- Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização em relação aos contatos geológicos.	108
Figura 4.2.1.15 - Mapa de isofrequência de zonas de juntas interpolado somente para a região do Circuito das Águas e os poços cadastrados na área.	109
Figura 4.2.1.16- Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa de contagem de zonas de juntas.	110
Figura 4.2.1.17 - Mapa morfoestrutural, a - com os poços cadastrados e b - detalhe em 3-D.....	111
Figura 4.2.1.18- Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização nas morfoestruturas.....	112
Figura 4.2.1.19 - Mapa de declividade e poços cadastrados na área.....	112
Figura 4.2.1.20- Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa de declividade.....	113
Figura 4.2.1.21 - Mapa Geomorfológico: classificação morfológica e poços cadastrados na área.	114
Figura 4.2.1.22 - Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa geomorfológico (morfologia).....	114
Figura 4.2.1.23 - Mapa Geomorfológico: classificação em grau de dissecação e poços cadastrados na área.....	115
Figura 4.2.1.24 - Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa geomorfológico (grau de dissecação).....	116
Figura 4.2.1.25 - Mapa Pedológico e poços cadastrados na área.....	117
Figura 4.2.1.26- Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa pedológico.....	117
Figura 4.2.1.27 - Mapa de unidades geoambientais (CPRM, 2002) e poços cadastrados.....	118
Figura 4.2.1.28- Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização em relação aos dados de espessura do manto de intemperismo das unidades geoambientais.....	119
Figura 4.2.1.29- Modelo numérico de terreno e poços cadastrados.....	120
Figura 4.2.1.30- Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização em relação às feições topográficas.....	121
Figura 4.2.2.1 - Mapa de lineamentos estruturais (zonas de cisalhamento) e ocorrência de fontes.....	122
Figura 4.2.2.2 - Distância de lineamentos x quantidade de fontes.....	122
Figura 4.2.2.3 - Frequência acumulada de dados de vazão de fontes agrupados em função de sua localização em relação à distância de intersecção de lineamentos.....	123
Figura 4.2.2.4 - Mapa de densidade de lineamentos (zonas de cisalhamento) por comprimento e ocorrência de fontes.....	124
Figura 4.2.2.5 - Gráfico da quantidade de fontes e sua localização no ma de densidade de lineamentos por comprimento.....	124
Figura 4.2.2.6- Frequência acumulada da vazão das fontes agrupadas em função de sua localização em relação ao mapa de densidade de lineamentos por comprimento.....	125
Figura 4.2.2.7 - Mapa de densidade de lineamentos (zonas de cisalhamento) e ocorrência de fontes.....	126
Figura 4.2.2.8 - Gráfico da quantidade de fontes e sua localização no mapa de densidade de lineamentos	126
Figura 4.2.2.9- Frequência acumulada da vazão das fontes agrupadas em função de sua localização em relação ao mapa de densidade de lineamentos.....	127
Figura 4.2.2.10 - Gráfico das direções dos lineamentos próximos às fontes.....	128
Figura 4.2.2.11 - Frequência acumulada da vazão das fontes agrupadas em função da sua localização nas direções dos lineamentos.....	128
Figura 4.4.2.12 - Mapa de geológico e ocorrência de fontes.....	129

Figura 4.2.2.13 – Quantidade de fontes e tipos litológicos.....	130
Figura 4.2.2.14 – Quantidade de fontes e distância entre os contatos litológicos.....	130
Figura 4.2.2.15– Frequência acumulada da vazão das fontes agrupadas em função de sua distância dos contatos geológicos.....	131
Figura 4.2.2.16 – Mapa de isofrequência de zonas de juntas e localização das fontes.....	132
Figura 4.2.2.17 – Quantidade de fontes e sua localização em relação ao mapa de isofrequência de zonas de juntas.....	132
Figura 4.2.2.18 –mapa morfoestrutural e ocorrência de fontes.....	133
Figura 4.2.2.19 – Quantidade de fontes e sua localização em relação ao mapa morfoestrutural.....	133
Figura 4.2.2.20 – Mapa de declividade e ocorrência de fontes.....	134
Figura 4.2.2.21 – Gráfico da quantidade de fontes e sua localização no mapa de declividade	134
Figura 4.2.2.22 – Mapa geomorfológico- morfologia e ocorrência de fontes.....	135
Figura 4.2.2.23 – Gráfico da quantidade de fontes e sua localização no mapa geomorfológico (morfologia).....	136
Figura 4.2.2.24 – Mapa de geomorfológico (grau de dissecação) e ocorrência de fontes.....	136
Figura 4.2.2.25 – Gráfico da quantidade de fontes e sua localização no mapa geomorfológico.....	137
Figura 4.2.2.27 – Mapa de pedológico e ocorrência de fontes.....	138
Figura 4.2.2.28 – Gráfico da quantidade de fontes e sua localização no mapa pedológico.....	138
Figura 4.2.2.29 – Modelo numérico de terreno e fontes cadastradas.	139
Figura 4.2.2.30 – Gráfico da quantidade de fontes e sua localização de acordo com as principais feições topográficas.	139
Figura 4.4.1 - Mapa de Favorabilidade à ocorrência de água subterrânea obtido pela Análise Booleana, fontes e poços cadastrados.....	151
Figura 4.4.2 - Gráfico de frequência acumulada da capacidade específica de poços agrupados em função da sua localização no mapa de favorabilidade (análise booleana).....	152
Figura 4.4.3 - Tabulação cruzada entre ocorrência de fontes (%) e sua localização no mapa de favorabilidade (análise booleana).....	152
Figura 4.4.4– Mapa de Favorabilidade por combinação linear ponderada.....	156
Figura 4.4.5 - Gráfico de frequência acumulada da capacidade específica de poços agrupados em função da sua localização no mapa de favorabilidade por análise CLP.....	157
Figura 4.4.6 – Tabulação cruzada entre ocorrência de fontes e mapa de favorabilidade.....	157
Figura 4.4.7 - Gráfico de frequência acumulada da capacidade específica de poços agrupados em função da sua localização no mapa de favorabilidade por análise CLP	158
Figura 4.4.8– Mapa de Favorabilidade de ocorrência de água subterrânea por média ponderada ordenada.....	161
Figura 4.4.9 - Gráfico de frequência acumulada da capacidade específica de poços agrupados em função da sua localização no mapa de favorabilidade por análise MPO.....	162
Figura 4.4.10 – Tabulação cruzada entre ocorrência de fontes e mapa de favorabilidade.....	162
Figura 4.4.11 - Frequência acumulada de fontes e seus dados de vazão agrupados em função de sua localização no mapa de favorabilidade por MPO.....	163
Figura 4.4.12 - Variações de contraste para as distâncias acumuladas dos lineamentos.....	166
Figura 4.4.13 - Variações de contraste para as distâncias acumuladas dos lineamentos.....	167
Figura 4.4.14 – Mapas de evidência binários usados na análise de favorabilidade.....	176
Figura 4.4.15 – Gráfico de área acumulada de pontos de treinamento em função da favorabilidade calculada na modelagem.	177
Figura 4.4.16 – Mapa de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea pela análise por pesos de evidência, classificado em três classes: não permissivo, permissivo e favorável.....	178
Figura 4.4.17 - Gráfico de frequência acumulada da capacidade específica de poços agrupados em função da sua localização no mapa de favorabilidade por análise de pesos de evidência.....	179
Figura 4.4.18 – Mapa de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea pela análise por pesos de evidência, classificado em cinco classes.....	180
Figura 4.4.19 - Gráfico de frequência acumulada da capacidade específica de poços agrupados em função da sua localização no mapa de favorabilidade por análise de pesos de evidência.....	181
Figura 4.4.20 – Mapa de diferenças de classe MPO e CLP.....	182
Figura 4.4.21 – Mapa de diferenças de classe B e CLP.....	183
Figura 4.4.22 – Mapa de diferenças de classe B e MPO.....	183
Figura 4.4.23 – Mapa de diferenças de classe PE e CLP.....	184
Figura 4.4.24 – Mapa de diferenças de classe PE e MPO.....	184
Figura 4.4.25 – Mapa de diferenças de classe PE e B.....	185
Figura 4.5.1a – Mapa de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea (por combinação linear ponderada) e áreas selecionadas para o estudo de detalhe. (Figura 4.5.1a , 4.5.1b, 4.5.1c e 4.5.1d).	186

Figura 4.5.2 – Área de estudo de detalhe, região de Lindóia (Mineração Cremasco).....	188
Figura 4.5.3 – Gráfico de rosetas das direções dos traços de fratura fotointerpretados.....	189
Figura 4.5.4 – Fotografia aérea (escala 1:25.000) da área: fraturas mapeadas, estacas dos caminhamentos elétricos e locais das SEVs. Os traços laranja pontilhados são os lineamentos fotointerpretados do produto integrado ETM-MAG que correspondem às zonas de cisalhamento.....	190
Figura 4.5.5 – Resultados da Inversão dos dados da SEV 1.....	191
Figura 4.5.6 – Pseudo-seção de resistividade aparente e perfil de resistividade gerado pelo modelo de inversão.....	192
Figura 4.5.7 – Resultados da Inversão dos dados da SEV 2.....	194
Figura 4.5.8 – Pseudo-seção de resistividade aparente e perfil de resistividade gerado pelo modelo de inversão.....	195
Figura 4.5.9 – Pseudo-seção de resistividade aparente e perfil de resistividade gerado pelo modelo de inversão.....	196
Figura 4.5.10 – Fraturas mapeadas e perfil de resistividade. No perfil de resistividade a cor azul representa baixos valores e a cor vermelha representa altos valores de resistividade.....	197
Figura 4.5.11 – Fraturas mapeadas e perfil de resistividade. No perfil de resistividade a cor azul representa baixos valores e a cor vermelha representa altos valores de resistividade.....	198
Figura 4.5.12 – Fraturas mapeadas e perfil de resistividade. No perfil de resistividade a cor azul representa baixos valores e a cor vermelha representa altos valores de resistividade.....	199
Figura 4.5.13 – Área de estudo de detalhe, região de Serra Negra.....	201
Figura 4.5.14 – Gráfico de rosetas das fraturas	202
Figura 4.5.16 - Fotografia aérea (escala 1:25.000) da área de estudo de semi-detalle: estrada Serra Negra – Amparo. Locais dos caminhamentos elétricos, SEV, poços e fontes cadastrados e fraturas mapeadas.....	202
Figura 4.5.16 - Gráfico de rosetas das fraturas.....	203
Figura 4.5.17 - Fotografia aérea (escala 1:25.000) da área de estudo de semi-detalle: estrada Serra Negra – Amparo. Locais dos caminhamentos elétricos, SEV, poços e fontes cadastrados, foliação e fraturas.....	203
Figura 4.5.18 – Resultados da Inversão dos dados da SEV 1.....	205
Figura 4.5.19 – Pseudo-seção de resistividade aparente e perfil de resistividade gerado pelo modelo de inversão.....	206
Figura 4.5.20 – Pseudo-seção de resistividade aparente e perfil de resistividade gerado pelo modelo de inversão.....	207
Figura 4.5.21 – Resultados da Inversão dos dados da SEV 2.....	209
Figura 4.5.22 – Pseudo-seção de resistividade aparente e perfil de resistividade gerado pelo modelo de inversão.....	210
Figura 4.5.23– Fraturas mapeadas e perfil de resistividade. No perfil de resistividade a cor azul representa baixos valores e a cor vermelha representa altos valores de resistividade.....	211
Figura 4.5.24– Fraturas mapeadas e perfil de resistividade. No perfil de resistividade a cor azul representa baixos valores e a cor vermelha representa altos valores de resistividade.....	212
Figura 4.5.25 – Fraturas mapeadas e perfil de resistividade. No perfil de resistividade a cor azul representa baixos valores e a cor vermelha representa altos valores de resistividade.....	214
Figura 4.5.24 – Detalhe do mapa de favorabilidade por CLP (região de Lindóia) e perfis de eletrorresistividade.....	215
Figura 4.5.25 – Detalhe do mapa de favorabilidade por PE (região de Lindóia) e perfis de eletrorresistividade.....	216

Lista de Tabelas

Tabela 2.4.1 – Resumo das averiguações nas principais bacias hidrográficas.....	24
Tabela 2.4.2 - Potencial hídrico subterrâneo com base em dados de poços.....	25
Tabela.3.1.1- Características espectrais do sistema ETM+ Fonte: USGS, www Landsat7.usgs.gov/about.html (2000).....	28
Tabela 3.1.2- Características do aerolevantamento geofísico do projeto São Paulo-Rio de Janeiro. Fonte: CPRM (1995).....	29
Tabela 3.2.1 – Características dos alinhamentos de relevo e drenagem.....	51
Tabela 3.2.3 – Variações da resistividade de rochas em função do conteúdo de água. Fonte: modificado de Telford <i>et al.</i> (1990).....	69
Tabela 4.1.2 - Fontes do circuito das águas e suas características hidrogeológicas. Fonte: Szikszay e Teissedre (1978), Yoshinaga (1990) e dados de campo.....	95
Tabela 4.4.1 – Parâmetros Prospectivos – Fator Lineamentos (Zonas Cisalhamento).....	150
Tabela 4.4.2 – Parâmetros Prospectivos – Fator Litologia.....	150
Tabela 4.4.3 – Parâmetros Prospectivos – Fator Isofrequência de Zonas de Juntas.....	150
Tabela 4.4.4 – Parâmetros Prospectivos – Fator Morfoestruturas.....	150
Tabela 4.4.5 – Parâmetros Prospectivos – Fator Declividade.....	151
Tabela 4.4.6 – Parâmetros Prospectivos – Fator Pedologia.....	151
Tabela 4.4.7 – Parâmetros Prospectivos – Fator Morfologia.....	151
Tabela 4.4.8 – Parâmetros Prospectivos – Fator Grau de Dissecção	151
Tabela 4.4.9 – Parâmetros Prospectivos – Fator Ocorrência de Fontes.....	151
Tabela 4.4.10 – Fatores e classes usados na análise booleana	153
Tabela 4.4.11 – Escala de pesos utilizada pelo programa idrisi	156
Tabela 4.4.12 - Matriz de comparação aos pares – ponderação relativa.....	156
Tabela 4.4.13 - Pesos dos fatores obtidos pela análise de comparação aos pares.....	157
Tabela 4.13 Quadro resumo simplificado – análise por combinação linear ponderada.....	158
Tabela 4.4.14 - Pesos de ordenação – análise por média ponderada ordenada.....	162
Tabela 4.4.15 - Quadro resumo simplificado – análise por mmédia ponderada ordenada.....	163
Tabela 4.4.16 – Pesos de evidência e contrastes calculados para distâncias acumuladas de lineamentos (zonas de cisalhamento)	166
Tabela 4.4.17 – Pesos de evidência e contrastes calculados para distâncias acumuladas de intersecção de lineamentos (zonas de cisalhamento)	167
Tabela 4.4.18 – Pesos de evidência e contrastes calculados para o mapa de densidade de lineamentos (zonas de cisalhamento).....	167
Tabela 4.4.19 – Pesos de evidência e contrastes calculados para o mapa geológico.....	168
Tabela 4.4.20 – Pesos de evidência e contrastes calculados para o mapa geológico (unidades litológicas agrupadas).....	168
Tabela 4.4.21 – Pesos de evidência e contrastes calculados para distâncias acumuladas dos contatos geológicos	169
Tabela 4.4.22 – Pesos de evidência e contrastes calculados para o mapa de isofrequência de zonas de juntas.....	169
Tabela 4.4.23 – Pesos de evidência e contrastes calculados para o mapa morfoestrutural.....	170
Tabela 4.4.24 – Pesos de evidência e contrastes calculados para o mapa de declividade.....	170
Tabela 4.4.25 – Pesos de evidência e contrastes calculados para o mapa pedológico	170
Tabela 4.4.26 – Pesos de evidência e contrastes calculados para o mapa morfológico	171
Tabela 4.4.27 – Pesos de evidência e contrastes calculados para o mapa de graus de dissecção	171
Tabela 4.4.28 – Teste de independência condicional entre os mapas binários de evidências (valores de probabilidade calculados em função do teste χ^2)	172
Tabela 4.4.29 – Pesos de evidência e contrastes calculados para distâncias acumuladas de proximidade de lineamentos e contatos geológicos	173
Tabela 4.4.30 – Pesos de evidência e contrastes para o mapa geomorfológico (morfologia e grau de dissecção).....	173
Tabela 4.4.31 – Teste de independência condicional entre os mapas binários de evidências (valores de probabilidade calculados em função do teste χ^2).....	173
Tabela 4.4.32 – Teste de independência condicional entre os mapas binários de evidências (valores de probabilidade calculados em função do teste χ^2)	174
Tabela 4.4.33 – Pesos de evidência e contrastes para o mapa dlj (densidade de lineamentos + isofrequência de zonas de juntas).....	175
Tabela 4.4.34 – Pesos de evidência e contrastes para o mapa de distâncias lci (lineamentos + contatos geológicos + intersecção)	175

Tabela 4.4.35 – Teste de independência condicional entre os mapas binários de evidências (valores de probabilidade calculados em função do teste χ^2).....	175
Tabela 4.4.36 – Teste de independência condicional entre os mapas binários de evidências (valores de probabilidade calculados em função do teste χ^2).....	176
Tabela 4.4.36 – Síntese dos fatores e critérios definidos pela análise de pesos de evidência.....	177
Tabela 4.4.34 – Coeficientes de correlação <i>Spearman</i> (por classes) entre os mapas de favorabilidade.....	181
Tabela 4.5.1 – Posições das estacas (ce-1) e direções dos traços de fraturas relacionados aos baixos valores na seção de resistividade.....	197
Tabela 4.5.2 – Posições das estacas (ce- 2) e direções dos traços de fraturas relacionados aos baixos valores na seção de resistividade.....	198
Tabela 4.5.3 – Posições das estacas (ce -3) e direções dos traços de fraturas relacionados aos baixos valores na seção de resistividade.	199
Tabela 4.5.4 – Posições das estacas e direções dos traços de fraturas relacionados aos baixos valores na seção de resistividade.	211
Tabela 4.5.5 – Posições das estacas e direções dos traços de fraturas relacionados aos baixos valores na seção de resistividade.	213
Tabela 4.5.6 – Posições das estacas e direções dos traços de fraturas relacionados aos baixos valores na seção de resistividade.	214

RESUMO

Este trabalho aborda o estudo do aquífero fraturado na região de Lindóia, Estado de São Paulo. Apresenta dois enfoques, um estudo regional que envolve a elaboração de um modelo hidrogeológico prospectivo e a avaliação de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea e um estudo de detalhe, com a realização de levantamentos geofísicos de eletrorresistividade em áreas previamente selecionadas nos mapas de favorabilidade.

O estudo regional consistiu na construção de um banco de dados espacial em um sistema de informações geográficas (SIG) e envolveu a análise integrada de dados de sensoriamento remoto, aeromagnetométricos e rede de drenagem (para a elaboração dos mapas de lineamentos estruturais, de distância de lineamentos, de densidade de lineamentos, morfoestrutural, de isofrequência de zonas de juntas), topografia, mapas geológicos, geomorfológicos, pedológicos, dados geológicos de campo e dados de produtividade de poços e ocorrência de fontes.

A tectônica transpressiva de idade proterozóica que ocorreu na região, foi responsável pela geração de zonas de cisalhamento dúcteis a dúcteis rúpteis, dextrais, cuja direção principal é N45E. Estas zonas de cisalhamento foram mapeadas em produtos de sensores remotos e aeromagnetométricos e verificadas em campo por meio de medidas estruturais de foliações miloníticas. Em campo constatou-se que as fraturas existentes coincidem com as direções do modelo teórico empírico adotado indicando que tais fraturas são reativações dessas linhas de fraqueza crustal por esforços posteriores.

Os resultados das análises por geoprocessamento auxiliaram na definição de um modelo hidrogeológico para a região, onde os fatores de maior importância são lineamentos (que representam zonas de cisalhamento dúcteis a dúcteis rúpteis pré-cambrianas), litologia, zonas de juntas e morfoestruturas. A partir do modelo hidrogeológico regional realizou-se a análise de favorabilidade por geoprocessamento. Dois métodos de análise foram utilizados, o método conduzido pelo conhecimento (análises booleana, combinação linear ponderada e média ponderada ordenada) e o método conduzido pelos dados (pesos de evidência). Os resultados obtidos pela tabulação cruzada entre os mapas de favorabilidade e os novos dados de produtividade de poços mostram certa semelhança entre os métodos utilizados, porém nota-se que as análises por pesos de evidência e média ponderada ordenada possuem resultados mais pessimistas do que as análises booleana e combinação linear ponderada, pois apresentam menores áreas favoráveis.

As áreas de estudo de detalhe foram escolhidas por representarem áreas mapeadas como alta favorabilidade à ocorrência de água subterrânea. Após a interpretação de fraturas em fotografias aéreas, definiram-se as direções dos caminhamentos elétricos e os locais das sondagens elétricas verticais. Os resultados obtidos demonstraram a coerência do modelo hidrogeológico regional e dos mapas de favorabilidade, já que as zonas mais fraturadas e preenchidas por água (representadas pelos baixos valores de resistividade) encontram-se de maneira geral próximas as fraturas de direções NE-SW e secundariamente NS e NW-SE e nas áreas mapeadas como elevado potencial para água subterrânea.

Dessa forma, os métodos de análises por geoprocessamento são importantes na definição de áreas alvo para o estudo hidrogeológico de detalhe. Também fica evidente a importância de levantamentos geofísicos de eletrorresistividade para a definição de locais favoráveis para a perfuração de poços.

ABSTRACT

This work presents the regional and detail study of fractured aquifer, in the Lindoia region, São Paulo State. The regional study consists in defining a prospective hydrogeological model and groundwater favorability evaluation. The detail study consists of selecting target areas based on the favorability maps and executing geophysics resistivity surveys.

The regional study consisted of organizing a spatial data base with a geographic information system (GIS) and carrying out the data integration analysis: remote sensing, airborne magnetic, drainage (to elaborate lineaments map, lineaments buffer map, lineaments density, morphostructural, joint zones density), topographic, geological, geomorphologic and pedologic maps, field data and well yield data and springs occurrence.

The proterozoic transpressional tectonics generates NE-SW dextral ductile, ductile-brittle shear zones. These shear zones were mapped by remote sensing and airborne magnetic data and field data. The fractures overprint these Precambrian structures record the extensional tectonics later. These analysis help defining a hydrogeological model for the region. The most significant prospective factors are lineaments, lithology, joint zones and morphostructures.

The geoprocessing favorability analysis was carried out based on this hydrogeological model. Two methods were applied, a knowledge method (Boolean, Weighted Linear Combination and Order Weighted Average) and a data-driven method (Weights of Evidence). The results obtained by cross tabulation between the favorability maps and well yield new data show the likeness between the methods, but the Order Weighted Average and Weights of Evidence analysis present more pessimistic results than Boolean and Weighted Linear Combination analysis.

The detail study areas were chosen due to represent high groundwater favorability mapping areas. Fracture features were interpreted on airborne photographs and thereafter the sites of resistivity surveys were defined. The results show a coherence between the regional hydrogeological model and favorability maps. The fractured zones that contain water (low resistivity values) are generally located near to NE-SW fracture directions and, secondarily, NS and NW-SE directions and areas with high groundwater favorability .

Therefore, geoprocessing analysis methods are significant to define target areas to hydrogeological study while resistivity surveys are fundamental to identify final well locations.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução e Justificativas

Atualmente verifica-se a importância das águas subterrâneas para o abastecimento da população, indústrias e propriedades rurais. Em regiões onde predominam rochas cristalinas (ígneas ou metamórficas) a infiltração, circulação e acumulação de água estão associadas aos diversos parâmetros geológicos e geomorfológicos.

Vários autores analisam a produtividade de poços comparados com parâmetros geológicos e geomorfológicos em regiões cristalinas, porém ocorrem divergências em relação aos fatores mais importantes relacionados à produtividade de poços. Por exemplo, Mabee *et al.* (1994), Teeuw (1995), Sander *et al.* (1996), Sander (1997), Fernandes e Rudolph (2001) admitem a importância dos lineamentos estruturais na produtividade de poços, por outro lado, Banks *et al.* (1992 *apud* Henriksen, 1995) e Greenbaum (1992) não observam uma correlação positiva entre produtividade de poços e a presença de lineamentos. Henriksen (1995) considera o fator topografia mais importante do que o fator litologia na produtividade de poços e Yin e Brook (1992) consideram o fator topografia, aliado aos traços de fratura interpretados como fatores importantes na produtividade de poços.

As rochas cristalinas fraturadas apresentam um grande potencial para a acumulação de água, porém para que se obtenha sucesso em perfurações de poços é necessário que se avaliem os recursos e as ocorrências dos aquíferos fraturados em relação aos condicionantes geológicos de modo mais preciso. Essa avaliação pode ser realizada pela definição dos parâmetros mais importantes relacionados à infiltração, circulação e armazenamento de água subterrânea, pela elaboração de um modelo hidrogeológico prospectivo para a área e finalmente pela realização de análises de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea.

A utilização de um sistema de informações geográficas (SIG) é fundamental para este tipo de trabalho, pois possibilita que todas as informações necessárias (como imagens de satélite, mapas temáticos, dados de poços e fontes, dados geológicos de campo) estejam contidas em um banco de dados espacial, o que permite a sistematização de todo o processo de análise dos dados por técnicas de geoprocessamento (Bonham-Carter, 1994), tomando o processo de análise mais eficiente.

A utilização de imagens de sensoriamento remoto (Waters *et al.*, 1990) integradas digitalmente com dados aerogeofísicos (Harris *et al.* 1990, Harris *et al.* 1994, Paradella *et al.* 1998, Madrucci, 2000) se justifica pela rapidez e qualidade na interpretação de feições estruturais tais como lineamentos, fraturas, foliação e morfoestruturas.

A compilação e digitalização de mapas geológicos, geomorfológicos, pedológicos, topográficos, bem como dados geológicos de campo, também são fundamentais na etapa de análise de dados e definição dos parâmetros prospectivos. Com base nestes dados, realizam-se as análises por geoprocessamento entre a produtividade dos poços tubulares cadastrados e a ocorrência de nascentes e suas relações com os diversos parâmetros analisados (lineamentos interpretados, morfoestruturas, densidade de zonas de juntas, litologia, topografia, entre outras) para auxiliar no estudo hidrogeológico regional da área, e na definição do modelo hidrogeológico prospectivo.

A definição do modelo hidrogeológico regional é fundamental para a realização da análise de favorabilidade. Técnicas de análises por geoprocessamento para a geração de mapas de favorabilidade mineral têm sido utilizadas com sucesso por diversos autores no estudo de ocorrências petrolíferas e de minerais metálicos (Bonhan-Carter, 1994; Perrota, 1996; Rostirolla *et al.*, 1998; Harris *et al.*, 2001; Araújo e Macedo, 2002). Porém, poucos trabalhos utilizam técnicas de geoprocessamento para a elaboração de mapa de favorabilidade à ocorrência de água subterrânea em terrenos cristalinos. Sander (1997) utiliza métodos probabilísticos para selecionar os parâmetros para a escolha de áreas alvo. Moore *et al.* (2002) através de técnicas de geoprocessamento elaboram um mapa de favorabilidade à ocorrência de determinadas produtividades.

O mapa de favorabilidade apresenta como resultado as áreas mais e menos favoráveis à ocorrência de água subterrânea e com isso definem-se áreas de maior potencial para a locação de poços produtivos e, portanto, áreas alvo para estudo de detalhe.

No estudo de detalhe, métodos geofísicos elétricos têm sido utilizados com sucesso na determinação de locais para a perfuração de poços em terrenos fraturados (Gallas, 2000; Vouillamoz *et al.*, 2003). A definição dos perfis geofísicos deve levar em consideração as feições estruturais mais favoráveis à infiltração, circulação e armazenamento de água, já definidas na etapa de análise.

Por fim, os resultados obtidos nos levantamentos geofísicos devem confirmar os resultados obtidos na análise de favorabilidade, auxiliando na definição de um modelo hidrogeológico mais detalhado para a região.

A importância deste estudo consiste na definição dos parâmetros geológicos/geomorfológicos de maior importância para a favorabilidade de ocorrência de água subterrânea para a região do Circuito das Águas, com a definição de um modelo hidrogeológico prospectivo. Outro aspecto importante deste estudo consiste na elaboração de mapas de favorabilidade, utilizando-se duas técnicas distintas de geoprocessamento: o método conduzido pelo conhecimento e o método conduzido pelos dados; que irão identificar as áreas mais favoráveis para a ocorrência de água subterrânea. Dessa forma o mapa de favorabilidade é útil para a determinação de áreas alvo

para o estudo de detalhe e juntamente com os levantamentos geofísicos de detalhe auxiliam na identificação dos locais para perfuração de poços produtivos. Isso é importante, uma vez que essa região se caracteriza pela grande quantidade de empresas mineradoras de água, bem como uma grande rede de hotéis e propriedades rurais.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho consiste em delinear e escalonar o potencial para a prospecção de água subterrânea na região do Circuito das Águas (São Paulo), utilizando-se análises por geoprocessamento. As análises envolvem diversos critérios, tais como o padrão de fraturamento regional, lineamentos, caracterização de áreas anômalas (morfoestruturas) a partir da interpretação da imagem ETM+ e do produto integrado ETM+-aeromagnetométricos, além de dados litológicos, topográficos, geomorfológicos analisados em função dos valores de produtividades de poços e ocorrência de nascentes. Como resultado final obtém-se um modelo hidrogeológico prospectivo conceitual regional e o mapa de favorabilidade à ocorrência de águas subterrâneas (escala 1:100.000).

Pretende-se avaliar os resultados obtidos no mapa de favorabilidade e também conhecer melhor a geometria do aquífero, em áreas-teste, utilizando-se para isto, levantamentos geofísicos de eletrorresistividade e comparando-se os resultados obtidos com o mapa de favorabilidade e dados estruturais.

São objetivos específicos deste trabalho:

1. Realizar o cadastramento de poços e nascentes (fontes) na área.
2. Utilizar o método de geração de produtos integrados digitalmente que envolve o tratamento dos dados aerogeofísicos magnetométricos, o pré-processamento da imagem ETM+ (correção radiométrica, atmosférica e geométrica) e o processamento (realce e integração IHS).
3. Interpretar a imagem ETM+ e o produto integrado ETM+-aeromagnetometria de maneira a se realizar um estudo tectônico da área. Nesta etapa serão elaborados mapas de lineamentos estruturais, mapas de isofrequência de zonas de juntas, mapa morfoestrutural, etc.
4. Compilar e digitalizar mapas geológicos, geomorfológicos, pedológicos, topográficos.
5. Organização de todas as informações num banco de dados espaciais, utilizando-se um sistema de informação geográfica (SIG). Este banco de dados apresenta todas as informações georreferenciadas, tais como dados de poços, de ocorrência de nascentes, imagens de satélite, mapas geológicos, fotointerpretações, dados estruturais de campo, etc.
6. Realizar análises por geoprocessamento entre a produtividade de poços e ocorrência de nascentes e os diversos parâmetros (litologia, lineamentos, morfoestruturas, dados de campo,

entre outros) para auxiliar na determinação de parâmetros positivamente ou negativamente relacionados à produtividade de poços na área e à ocorrência de água subterrânea.

7. A partir dos resultados das análises elaborar um modelo hidrogeológico prospectivo de água subterrânea na área.

8. Dado o modelo hidrogeológico, elaborar mapas de favorabilidade à ocorrência de água subterrânea, utilizando-se os parâmetros prospectivos previamente definidos. Para a elaboração do mapa de favorabilidade são utilizados dois métodos distintos: o conduzido pelo conhecimento e o conduzido pelos dados.

9. Comparação dos resultados obtidos nas análises de favorabilidade em função da tabulação cruzada entre os mapas e novos dados de produtividade de poços.

10. Determinar áreas alvo para o estudo de detalhe (de acordo com os resultados obtidos nos mapas de favorabilidade) e realizar levantamentos geofísicos de eletrorresistividade.

11. Interpretar os levantamentos geofísicos elétricos, com ênfase na detecção de zonas fraturadas, avaliar a espessura do manto de alteração e profundidade do topo rochoso.

CAPÍTULO 2

ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização e acessos

A área de estudo está inserida na porção leste do Estado de São Paulo, na região do Circuito das Águas. O limite leste da área é formado pela divisa dos Estados de São Paulo e Minas Gerais e o limite oeste pelo contato entre as rochas pré-cambrianas e a Bacia sedimentar do Paraná.

A área possui aproximadamente 2000 km² e abrange as cidades de Serra Negra, Lindóia, Águas de Lindóia, Socorro, Itapira e Espírito Santo do Pinhal. O acesso à região é feito a partir da cidade de São Paulo, pela Rodovia dos Bandeirantes (Figura 2.1).

A região possui como principais atividades econômicas empresas engarrafadoras de água mineral (procedentes de fontes naturais e poços artesianos), turismo, comércio, serviços e atividade agrícola (café e laranja principalmente).

Fig. 2.1 – Localização da área de estudo (DAEE-UNESP, 1982 a e DAEE-UNESP, 1982 b)

2.2 Aspectos Fisiográficos e Geomorfológicos

2.2.1 Fisiografia

O clima predominante na região é subtropical muito úmido a úmido. Segundo a classificação em regiões ecológicas de Setzer (DAEE, 1981), a área de estudo está inserida no Complexo Cristalino Mais Quente.

A região do Complexo Cristalino caracteriza-se por uma topografia acidentada, o clima é subtropical, praticamente sem estiagem, com totais anuais de chuva superiores a 1300 mm, crescendo nas direções das cristas das serras, e evapotranspiração anual menor que 1000 mm baixando na direção das serras (DAEE, 1981). Na área de estudo, a rede hidrográfica compreende parte da bacia do rio Mogi-Guaçu. A Figura 2.2.1 apresenta a área de estudo com a divisão das bacias hidrográficas.

Fig. 2.2.1 – Bacias dos rios Mogi Guaçu e Pardo e localização da área de estudo

Fonte: IGC-DAEE (1996)

2.2.2 Geomorfologia

A área de estudo está inserida na unidade morfoestrutural Cinturão Orogênico do Atlântico (Ross e Moroz, 1997), na unidade morfoescultural Planalto Atlântico que se caracteriza por apresentar uma topografia acidentada em virtude da variada constituição litológica.

A região do Circuito das Águas situa-se no Planalto Atlântico, dentro da zona geomorfológica definida por IPT (1981) de “Serrania de Lindóia” e por Ross e Moroz (1997) como “Planalto de Serra Negra/Lindóia”. Esta unidade geomorfológica limita-se ao sul com o Planalto de Jundiaí, a oeste com a Depressão Periférica e a nordeste adentra o Estado de Minas Gerais. Segundo Ross e Moroz (1997), nesta unidade predominam formas de relevo constituídas basicamente por morros e cristas com topos aguçados e topos convexos. No nível alto do Planalto de Serra Negra/Lindóia predominam as altimetrias entre 900 e 1.100 metros, já no nível médio do Planalto as altimetrias variam de 700 a 800 metros. As declividades nas regiões serranas atingem índices superiores a 40% e nos níveis mais baixos estão entre 20 e 30%.

A drenagem possui um padrão dendrítico, com adaptações às direções estruturais NE-SW. Na região de Serra Negra, Lindóia e Águas de Lindóia a drenagem apresenta características típicas de relevos desenvolvidos em estrutura dobrada, com paralelismo das cristas quartzíticas e gnássicas e vales ortoclinais. O rio do Peixe (afluente do Rio Mogi Guaçu) secciona transversalmente todo o conjunto serrano através de passagens epigênicas e seus afluentes estão representados pelos vales ortoclinais (Ross e Moroz, 1997). A Figura 2.2.2 mostra o aspecto acentuado do relevo da região.

Fig. 2.2.2 – Relevo da região do Circuito das Águas (Águas de Lindóia)

2.3 Geologia

2.3.1 Geologia Regional

Muitos trabalhos, como os de Ebert (1957 *apud* Ebert, 1968); Ebert (1984); Hasui *et al.* (1980); Fiori *et al.* (1981); Wernick *et al.* (1981); Campanha *et al.* (1982); Sad *et al.* (1982); Basei *et al.* (1986); Zanardo (1987); Artur (1988); Artur *et al.* (1990); Campos Neto *et al.* (1990); entre outros, têm focado a região do pré-Cambriano do Estado de São Paulo e áreas adjacentes, onde é dada ênfase à complexidade da sua estruturação geológica, bem como à variabilidade litológica e geocronológica das diferentes unidades geológicas.

Com relação aos modelos geotectônicos para a área, existe uma grande diversidade para acomodar a natureza, evolução, disposição espacial e relações das diversas unidades geológicas caracterizadas. É importante ressaltar que a maioria destes modelos tem em comum a conclusão da existência de uma evolução policíclica para a região. Segundo Lazarini (2000) é possível fazer uma análise conjunta baseada nos modelos geotectônicos existentes para a região e indicar um modelo de evolução geológica resultante da colisão continental, para a área em estudo, no Neoproterozóico. Segundo Artur e Wernick (1986), os principais vetores convergentes teriam disposição aproximadamente E-W.

- Litoestratigrafia

Zanardo (1987) e Artur *et al.* (1988) apresentam para a região do sul do Estado de Minas Gerais e áreas adjacentes do Estado de São Paulo, uma individualização das unidades pré-Cambrianas aflorantes, em associações de infra-estrutura e supracrustais.

Associações supracrustais são associações de rochas sedimentares e vulcânicas, metamórficas ou não, que foram depositadas via de regra sobre um substrato mais antigo, profundamente erodido, constituído por ortognaisses, migmatitos e granitóides, representado por antigas infra-estruturas. As associações de infra-estrutura são representadas principalmente, por ortognaisses e migmatitos, sobre a qual são depositadas seqüências supracrustais. Correspondem, pois ao embasamento destas.

A região aqui considerada resulta da somatória de vários fenômenos de acreção vertical e retrabalhamento crustal que ali se desenvolveram durante o Arqueano e o Proterozóico. Tais dados indicam que a referida área foi atingida por sucessivos fenômenos orogênicos que afetaram seguidamente a infra-estrutura. Em termos de tectônica de placas, a expressiva migmatização transamazônica e brasiliense são indicativas de que os fenômenos orogênicos ocorreram segundo moldes que sugerem a participação de extensivas colisões continentais (Artur *et al.*, 1988).

- Tectônica

O cráton do São Francisco (CSF) dimensionado por Almeida (1977), representa uma entidade tectônica estável no Ciclo Brasileiro, circundado por faixas móveis ou orógenos que se desenvolveram principalmente no Neoproterozóico. Segundo Fuck (1993), a estabilização final destas faixas desempenhou importante papel na aglutinação de parte do Gondwana. A borda sul do CSF constitui-se numa região tectonicamente complexa, onde se dá a junção da Faixa Brasília (FB), de direção norte-sul e idade brasileira, com metassedimentos mesoproterozóicos que compõem a denominada Faixa Alto Rio Grande (FARG) (Hasui e Oliveira, 1984). Campos Neto (1991) inclui no âmbito da FARG rochas granito-grássicas migmatíticas de idades paleoproterozóica e arqueana.

Na região de junção entre estas faixas ocorre uma estrutura de forma triangular denominada de Maciço de Guaxupé (definido primeiramente por Almeida *et al.*, 1976), limitada lateralmente por zonas de cisalhamento direcionais ou por empurrões. A oeste o Maciço está encoberto pelos sedimentos da Bacia do Paraná. Ao sul da FARG ocorre outra unidade geotectônica composta predominantemente por rochas ortoderivadas, incluindo granulitos, em parte similares àqueles reconhecidos no Maciço de Guaxupé (MGXP). Campos Neto *et al.* (1984) consideram estas rochas como integrantes de uma unidade única, denominada Nappe de Empurrão Socorro-Guaxupé (NESG) (Figuras 2.3.1.1 e 2.3.1.2).

Fig. 2.3.1.1 - Principais Unidades geotectônicas da região limítrofe dos Estados de São Paulo e Minas Gerais. Fonte: Modificado de CPRM (1999).

Fig. 2.3.1.2 - Faixa Alto Rio Grande e Nappe Socorro-Guaxupé.

Fonte: Campos Neto *et al.* (1990).

Ebert *et al.* (1993), admitem para a área situada na borda sul e sudeste do Cráton do São Francisco a ocorrência de uma colisão oblíqua entre 3 blocos crustais (Brasília, Vitória e São Paulo), com o tensor principal de direção aproximada leste-oeste. A articulação dos blocos e sua obducção manifestaram-se através de uma tectônica tangencial, envolvendo cavalgamentos e embricamentos ao longo de zonas de cisalhamento dúctil de baixo ângulo. Com o progressivo encurtamento e espessamento crustal, a tectônica tangencial evoluiu para uma tectônica direcional, expressa através de extensas zonas de cisalhamento dúctil-rúptil de médio a alto ângulo, que recortam a região Sudeste do Brasil.

Muitos autores, tais como (Hasui *et al.*, 1990; Ebert *et al.*, 1993; Endo e Machado, 1993; Zanardo, 1998 *apud* Lazarini, 2000, entre outros) admitem a implantação de dois cinturões de cisalhamento transcorrentes, que ocorreram *tardi* movimento tangencial, denominados Campo do Meio (CTCM) e Atlântico ou Paraíba do Sul (CTRPS). Segundo estes autores os cinturões reativam zonas de cisalhamento pré-existent nos terrenos mais antigos (Figura 2.3.1.3).

O Cinturão de Cisalhamento Campo do Meio (Hasui *et al.*, 1990) possui natureza sinistral transpressiva, com direção WNW-ESE e NW-SE. Localiza-se ao longo da junção entre os Blocos São Paulo e Brasília, na zona de sutura que ocorre a noroeste, entre crosta inferior (Complexo Guaxupé) e os terrenos Arqueanos pertencentes ao prolongamento meridional do cráton do São Francisco.

O Cinturão de Cisalhamento Atlântico ou Rio Paraíba do Sul localiza-se entre os Blocos São Paulo e Vitória, ocorre na denominada Faixa Ribeira (FR), considerada por Almeida *et al.* (1973 *apud* CPRM, 1999) como entidade geotectônica de idade brasileira, com forte estruturação nordeste. Este cinturão com a ramificação Ouro Fino possui natureza dextral transpressiva (Hasui *et al.*, 1990; Ebert *et al.*, 1991; Machado e Endo, 1994), é constituído por uma rede de zonas transcorrentes dextrais e dúcteis, que gera dobras, rupturas, deslocamentos laterais e verticais, ocasionando intercalações e imbricações tectônicas entre as diferentes unidades, fazendo com que o Complexo Itapira (supracrustal) esteja intercalado com o Complexo Amparo (infracrustal) e entre os fragmentos da crosta inferior a superior do bloco cavalgante (Complexos Guaxupé, Socorro, etc). Este cinturão de cisalhamento também controla a colocação dos granitos tardi a pós colisionais e nos seus estágios finais gerou as bacias molássicas do tipo *pull apart*, representadas pelas formações Eleutério e Pouso Alegre.

Segundo Zanardo *et al.* (1998 *apud* Lazarini, 2000), durante a atuação das transcorrências, os fragmentos da crosta inferior comportaram-se de maneira competente, fazendo com que a deformação fosse assimilada principalmente pelas supracrustais cavalgadas e, em menor parte, pelas infracrustais mais antigas.

Fig 2.3.1.3 - Principais feições estruturais brasileiras na região limítrofe entre os Estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro.
Fonte: Modificado de Artur e Wernick (1986) e Ebert *et al.* (1993)

- Neotectônica

Hasui *et al.* (1982) descrevem que as rochas do embasamento cristalino (de idade pré-cambriana) das bacias tafrogênicas do Sudeste do Brasil, são cortadas por falhas transcorrentes Cambro-Ordovicianas, de direção E-W e NE-SW e também por juntas subverticais de origem tardia no Ciclo Brasileiro, as quais normalmente configuram 4 famílias: uma paralela a subparalela à foliação, outra normal a subnormal à foliação e duas oblíquas à foliação das rochas metamórficas. Estas direções também foram observadas em campo.

Hasui *et al.* (1982) admitem que as falhas E-W e NE-SW influenciaram a localização das falhas normais da reativação no Mesozóico-Cenozóico, assim como as juntas constituíram anisotropias que favorecem o alívio dos novos sistemas de tensões. Dessa forma, a identificação das antigas direções de fraqueza crustal torna-se extremamente importante, pois são essas direções de fraqueza que serão reativadas por esforços tectônicos posteriores.

Hasui *et al.* (1982), descrevem na área de estudo uma zona sismogênica denominada de Pinhal, na região de soerguimento de Mogi Guaçu. Assumpção *et al.* (1997), estudaram a sismicidade no Sudeste do Brasil e identificaram duas áreas sísmicas principais: a plataforma continental e a parte sul da Faixa Brasília e Cráton do São Francisco. A área montanhosa das serras do Mar e da Mantiqueira (na Faixa Ribeira) e a Bacia do Paraná são bem menos ativas sismicamente.

Em Minas Gerais três novos mecanismos focais foram determinados com estações locais e regionais. Na região de Betim, o mecanismo encontrado foi de um falhamento inverso com componente transcorrente. Em Formiga o mecanismo foi de falhamento normal com componente de transcorrência. Os seis mecanismos focais conhecidos na parte sul do Cráton do São Francisco e na Faixa de Dobramentos Brasília indicam falhamentos inversos e normais, com uma direção comum para a tensão horizontal máxima entre E-W e NE-SW (Assumpção *et al.*, 1997).

2.3.2 Geologia Local

- Litoestratigrafia

Os dados aqui apresentados resultaram da compilação dos mapas geológicos, em escala 1:50.000, referentes à Folha Mogi Guaçu (Campanha *et al.*, 1982), Folha Amparo (Basei *et al.*, 1986), Folha Águas de Lindóia (Zanardo, 1987) e Folha Socorro (Sad *et al.*, 1982) e Artur (1988). A Figura 2.3.2.1 apresenta o mapa geológico compilado.

A área é constituída por rochas do embasamento cristalino cuja idade varia do Paleoproterozóico ao Neoproterozóico. A região sofreu uma evolução policíclica que modificou as rochas de origem através de metamorfismo, cisalhamento, migmatização e intrusões ígneas.

Existe uma estruturação marcante na direção NE-SW, com a presença de anticlinais e sinclinais.

Segundo Teixeira *et al.* (1997), as rochas aflorantes na região podem ser diferenciadas em dois grupos: rochas de infraestrutura e de supraestrutura (ou supracrustal).

As rochas da infraestrutura tiveram origem mais antiga e são constituídas por gnaisses e migmatitos ortoderivados, isto é, derivados de material magmático oriundo do manto e que, em níveis crustais sofreu várias transformações devido às variações de pressão e temperatura (Teixeira *et al.*, 1997).

As rochas da supraestrutura evoluíram em níveis crustais elevados, a partir da sedimentação continental e em bacia oceânica com vulcanismo associado (Teixeira *et al.*, 1997). Quando esta bacia se inverteu ou se fechou (aproximadamente em 1,8 Ga), seus sedimentos sofreram intensa deformação acompanhada de metamorfismo e manifestações magmáticas (Teixeira *et al.*, 1997).

Os Complexos Amparo (incluindo o Complexo Mostardas) e Socorro representam as unidades geológicas predominantemente de infraestrutura e o Complexo Itapira representa as unidades predominantemente de supraestrutura. Estes complexos apresentam idade paleoproterozóica.

No município de Águas de Lindóia predominam a noroeste da zona de cisalhamento Monte Sião (de direção NE-SW) exposições de rochas pertencentes ao Complexo Itapira, e ao sudeste desta zona de cisalhamento, predominam rochas pertencentes ao Complexo Amparo (Figura 2.3.2.1). Segundo Zanardo (1987), a zona de cisalhamento Monte Sião apresenta grande heterogeneidade litológica, nela estão expostas rochas pertencentes ao Complexo Amparo e ao Complexo Itapira. Além disso as rochas pertencentes a esta zona de cisalhamento apresentam um predomínio de feições deformacionais dúcteis sobre feições deformacionais rúpteis.

Nas proximidades do município de Socorro, ocorre o contato entre as rochas gnáissicas do Complexo Amparo e as rochas granitóides pertencentes ao Complexo Socorro (Figura 2.3.2.1). Este contato é definido pela zona de cisalhamento de Ibatinga, que possui direção NE-SW e direção de empurrão SE para NW, fazendo com que as rochas do Complexo Socorro cavalguem as rochas do Complexo Amparo. Ainda neste domínio, Sad *et al.* (1982) separam dentro do Complexo Amparo o denominado Complexo Mostardas. Trata-se de uma associação rochosa que constitui uma faixa com largura de 5 km e se estende ao longo da zona de cisalhamento de Ibatinga. É constituída essencialmente por milonitos.

Fig. 2.3.2.1 – Mapa geológico simplificado da área de estudo.

Compilado de Campanha *et al.* (1982), Sad *et al.*, (1982), Basei *et al.* (1986) e Zanardo (1987).

O contato entre as rochas do Complexo Itapira (paleoproterozóicas), localizado a sul e as rochas granitóides do Complexo Pinhal (neoproterozóicas), localizadas a norte, é dada pela zona de cisalhamento de Jacutinga, de direção NE-SW. A zona de cisalhamento Jacutinga é caracterizada pela presença de rochas miloníticas e gnaisses e granitóides por vezes cataclásticos (Campanha *et al.*, 1982).

As unidades litoestratigráficas podem ser descritas resumidamente da seguinte maneira:

- Complexo Amparo:

É constituído principalmente por gnaiss de aspecto homogêneo a bandado, migmatitos cinza gnaissificados, com estrutura homogênea a bandada, quartzito e intercalações de gnaiss e migmatito, gnaiss e anfibolitos (Teixeira *et al.*, 1997).

- Complexo Mostardas

Caracteriza-se basicamente pela associação rochosa representante das séries protomilonito-milonito-ultramilonito e milonito gnaiss blastomilonítico, intimamente misturados e transicionais entre si, formando unidades paralelas umas com as outras. (Sad *et al.*, 1982).

- Complexo Socorro

Caracteriza-se por rochas miloníticas, principalmente no contato com as rochas do Complexo Mostardas e por rochas graníticas deformadas, com presença de foliação milonítica e cataclástica.

- Complexo Itapira

É constituído por gnaisses e migmatitos, muitas vezes intercalados com xistos, quartzitos e localmente com anfibolitos e quartzitos micáceos. Além dessas litologias, ocorrem rochas miloníticas, principalmente associadas a zona de cisalhamento Monte Sião.

- Complexo Pinhal

Esta unidade é representada por granitóides não deformados e deformados, mica-xisto e gnaisses migmatíticos.

- Complexo Morungaba

Tratam-se de corpos graníticos, de pequenas dimensões, intrusivos nas rochas do Complexo Amparo. Esses corpos graníticos são classificados como granitos porfíricos, apresentando foliação cataclástica.

- Tectônica

A área apresenta-se estruturada sob a forma de blocos tectônicos de composição litológica e feições estruturais distintas, com a presença de zonas de cisalhamento transcorrentes dextrais, desenvolvida no final do pré-Cambriano superior e durante o Eopaleozóico sendo reativada,

em regime de falha normal, sucessivamente, durante todo o Fanerozóico. Este evento resultou em soerguimentos, abatimentos e basculamentos dos diferentes blocos tectônicos em questão (Artur e Wernick, 1986).

A área de estudo pode ser dividida em dois blocos tectônicos (Figura 2.3.2.2):

a) Faixa Alto Rio Grande (Campos Neto *et al.*, 1990): localiza-se nas proximidades das cidades de Itapira, Amparo, Serra Negra, Lindóia e Águas de Lindóia. É definida ao norte pela faixa de cisalhamento Ouro Fino (zona de cisalhamento transcorrente Jacutinga) e ao sul pela faixa de cisalhamento Pouso Alegre (zona de cisalhamento Ibitinga), ambas com direção NE-SW.

b) Nappe de Empurrão Socorro-Guaxupé: localiza-se na região da cidade de Socorro. É definida à oeste pela zona de cisalhamento Pouso Alegre (zona de cisalhamento Ibitinga), de direção NE-SW.

Fig. 2.3.2.2 - Esboço tectônico da área de estudo.

Fonte: Modificado de Artur (1988) e Campos Neto *et al.* (1990).

Artur (1988) definiu a faixa de cisalhamento Pouso Alegre como porções mais expressivas de rochas cisalhadas com baixo ângulo de mergulho que resultam de um conjunto de cavalgamentos ligados a movimentos de caráter regional. Segundo Artur (1988) esta faixa de

cisalhamento corresponde aos domínios frontais e terrenos parautoctonos que sofreram o efeito da pressão durante o deslizamento de blocos alóctones. Como resultado desta movimentação sub-horizontal de blocos, com movimentos verticais associados, obtém-se imbricamento tectônico envolvendo seqüências supracrustais e porções da infra-estrutura, resultando num padrão de deformação heterogêneo dado pela presença de rochas fortemente deformadas nas vizinhanças dos planos de transporte de massas rochosas e de rochas menos deformadas, ou mesmo poupadas, situadas entre planos de falhas mais espaçados.

A espessura da faixa de cisalhamento Pouso Alegre varia desde 1,2 a 20 km. Acha-se igualmente dobrada e cortada pelo Complexo Granítico de Morungaba, cuja idade situa-se entre 590 e 540 Ma (Vlach, 1985). Afeta tanto rochas da seqüência supracrustal quanto da infra-estrutura, transformando-as em rochas com texturas miloníticas, blastomiloníticas, milonito gnaiss e protomilonitos, originando seqüências bandadas e listradas de composição variável, indicando um caráter dúctil. É caracterizada pela predominância de estruturas de imbricamento tectônico envolvendo seqüências de coberturas e porções de infra-estrutura devido a falhamentos essencialmente de empurrão. Possui foliação tectônica freqüentemente sub-horizontal, localmente empinados por redobramentos e pela superposição de falhamentos transcorrentes.

Dentro da faixa de cisalhamento Pouso Alegre, estão inseridas a zona de cisalhamento Ibitinga e a zona de cisalhamento de Monte Sião. A zona de cisalhamento de Ibitinga apresenta orientação NE-SW, com baixo ângulo de mergulho e empurrão segundo SE-NW.

A zona de cisalhamento de Monte Sião cruza as cidades de Serra Negra e Lindóia. Possui direção média N53E no Estado de Minas Gerais e N30E no Estado de São Paulo, com mergulho para o sul, mostrando uma inflexão que tende ao paralelismo com a zona de cisalhamento de Jacutinga que se localiza ao norte. A zona de cisalhamento Monte Sião possui caráter transcorrente dextral e alto mergulho (Zanardo, 1987).

Segundo Zanardo (1987), os resultados das movimentações ocorridas, configuram, nos tempos atuais terrenos que foram alçados à sudeste da zona de cisalhamento Monte Sião e terrenos subsidentes a noroeste desta, implicando no predomínio de rochas supracrustais a noroeste e de rochas infracrustais a sudeste desta zona de cisalhamento.

Segundo Artur (1988), a faixa de cisalhamento Ouro Fino corresponde a uma faixa dúctil-rúptil, essencialmente ligada às falhas transcorrentes com componentes verticais e de empurrão. Na área de estudo esta faixa de cisalhamento situa-se nos arredores da cidade de Itapira, possui direção geral ENE-WSW e desenvolve-se do leste de Minas Gerais até o arredores de Jacutinga e Itapira, onde inflete para NE-SW para desaparecer sob os sedimentos da bacia do Paraná nas proximidades de Santo Antônio da Posse. Corresponde à zona de cisalhamento transcorrente de Jacutinga, de idade brasileira, que corta diagonalmente o extremo norte da

área, possui direção aproximada N60E e mergulhos preferencialmente para o norte. Possui caráter dúctil-rúptil a rúptil e com sentido de movimento dextral. É responsável pela delimitação do curso do rio Mogi Guaçu (Rodrigues, 1976; Ebert *et al.*, 1993).

Segundo Artur (1988), a faixa de cisalhamento Ouro Fino não exhibe sinais de redobramento regional e intercepta rochas da Faixa de Cisalhamento Pouso Alegre, o que denota geneticamente um caráter mais jovem, mesmo ocorrendo certa superposição temporal entre seus desenvolvimentos. Este caráter mais jovem reflete-se na litologia a qual é constituída essencialmente por protomilonitos, milonitos e cataclasitos que denotam deformações predominantemente rúpteis-dúcteis e rúpteis. Hama *et al.* (1979 *apud* Artur, 1988) realizaram datações em rochas graníticas cataclasadas da Faixa de cisalhamento Ouro Fino e sugerem uma idade para o fenômeno rúptil ao redor de 500 Ma.

- Síntese da evolução tectônica na área

Segundo Ebert *et al.* (1996), as rochas desta região foram afetadas por uma tectônica tangencial contracional devida a convergência oblíqua de blocos continentais. Esta tectônica tangencial foi responsável pela geração de cavalgamentos dúcteis (como a zona de cisalhamento de baixo ângulo de Ibatinga) afetando as rochas do Complexo Socorro (650 Ma).

Posteriormente com o progressivo encurtamento e espessamento crustal, a tectônica tangencial evoluiu para uma tectônica transpressional dextral (595 Ma), com direção de máximo esforço compressivo (σ_1) igual a E-W (Ebert *et al.*, 1996). Essa tectônica transpressional dextral foi responsável pela geração de zonas de cisalhamento dúcteis-rúpteis de médio a alto ângulo, de direção NE-SW (como a zona de cisalhamento Monte Sião e zona de cisalhamento Jacutinga).

A zona de cisalhamento Monte Sião (dúctil-rúptil) e a zona de cisalhamento Jacutinga (dúctil-rúptil a rúptil) possuem direção principal NE-SW e na área de estudo infletem para NNE-SSW (Figura 2.3.1,3). Isto é observado em imagens de satélite, dados bibliográficos e em dados de campo (foliação milonítica).

A área de estudo se localiza numa região de flexura convergente (*restraining bends*) dentro de uma zona de cisalhamento de caráter transpressivo dextral, com a presença de duplexes compressivos (Ebert *et al.*, 1993). A Figura 2.3.2.3 esquematiza uma zona de cisalhamento transcorrente dextral de orientação N45E, a localização da área de estudo nesta zona de cisalhamento e as feições de cisalhamento dúctil, dúctil-rúptil e rúptil que nela ocorrem.

Conforme mostra a Figura 2.3.2.3, em nível dúctil e dúctil-rúptil as direções **Y** (zona de cisalhamento principal), **P** e **R** (zonas de cisalhamento secundárias) apresentam um padrão anastomosado que se reflete na foliação milonítica. Na área de estudo, as direções de Y, P e R

correspondem a N45E, N30E e N60E respectivamente. As direções **X** e **R'** correspondem a N10W e N60W.

Essas estruturas geradas no Pré-Cambriano representam regiões de fraqueza crustal reativadas por esforços tectônicos posteriores. Pode-se considerar três fases da tectônica distensiva, responsável pelas reativações (rúpteis) das estruturas pré-cambrianas: uma no Paleozóico, com a formação da Bacia do Paraná; um pico de distensão generalizada no Mesozóico, representado por derrames e intrusões, como por exemplo a Formação Serra Geral e as alcalinas do Itatiaia e outro pico no Terciário, com a formação de bacias, tais como a de São Paulo e Taubaté. Dessa forma, este tectonismo distensivo provocou a reativação das antigas linhas de fraqueza crustal, que até o final do Pré-Cambriano exerciam controles deformacionais compressivos na área estudada.

Conforme apresentado as rochas dessa região apresentam-se intensamente tectonizadas, com a presença de foliação metamórfica, com proeminente bandamento deformacional e composicional. Além disso, essa região é caracterizada por intenso fraturamento resultante das reativações das linhas de fraqueza crustal pré-cambrianas por esforços tectônicos posteriores. Por consequência, essas rochas possuem alta densidade de superfícies planares que se constituem em planos de fraqueza e em descontinuidades estruturais, características que as tornam propícias à infiltração, circulação e armazenamento de água, com potencial para a existência de bons aquíferos subterrâneos (CPRM, 2002).

A topografia acidentada e os desníveis altimétricos, associados ao intenso fraturamento das rochas são favoráveis para que o lençol freático aflore, em vários locais, com boas vazões o ano inteiro. Isso também evidencia o potencial para a existência de bons aquíferos subterrâneos. Além disso, a tectônica terciária responsável pelo basculamento de blocos e formação de altos e baixos morfoestruturais, também desempenha papel importante na identificação de áreas favoráveis à infiltração, circulação e armazenamento de água.

Fig. 2.3.2.3 a) Arranjo espacial, em planta das estruturas associadas a zona de cisalhamento transcorrente dextral idealizada (Modificado de Christie-Blick e Biddle, 1985 e Woodcock e Richards, 2003). B) Detalhe da zona de deslocamento principal e as discontinuidades que se desenvolvem em níveis dúctil e rúptil.

2.4 Aspectos Hidrogeológicos

2.4.1 Balanço Hídrico

Neste trabalho são apresentados os dados de balanço hídrico fornecidos pelo DAEE (1974). Para a obtenção dos valores do balanço hídrico nesta região, DAEE (1974) utilizou dados hidrométricos (evaporação potencial, pluviometria, fluviometria) obtidos através de postos hidrometeorológicos, pluviométricos e fluviométricos fornecidos pelo Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH), Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) e Companhia Energética do Estado de São Paulo (CESP).

Segundo DAEE (1974) a evaporação potencial (**Evp**) possui um valor de 2000 mm anuais (postos de Poços de Caldas e Mocóca). A média diária de 10 em 10 dias, atinge um valor de 8 mm/dia nos dias secos entre novembro e fevereiro e 3 mm/dia nos meses de março a Junho. As chuvas apresentam um papel preponderante sobre a evaporação na área. Apesar de sua importância, tanto a Evaporação aparente (**Ea**) quanto a Evaporação potencial (**Evp**) apresentam variações diárias pequenas quando comparadas às chuvas, que constituem um fenômeno aleatório tanto na quantidade quanto na distribuição no tempo e no espaço DAEE (1974).

De uma maneira geral, os rios da região possuem uma considerável reserva subterrânea de alimentação contínua, mesmo nos períodos mais secos, fato que indica a existência de camadas mais ou menos permeáveis, nas várias bacias, com a proporção entre a vazão de estiagem e a vazão total anual dos rios, entre 50 e 75%, demonstrando a reserva de água subterrânea geralmente nas camadas mais próximas da superfície, com a base da drenagem localizada no leito do rio (DAEE, 1981).

A recarga profunda calculada enquanto excesso da recarga total, que não alimenta o escoamento básico dentro dos limites da bacia, pode proporcionar a passagem da água de uma bacia à outra sem aflorar, até encontrar condições geológicas favoráveis para a infiltração mais profunda, recarregando os aquíferos mais importantes; ela também pode percolar ao longo das várzeas dos rios, onde a base é impermeável com camadas superiores fraturadas e/ou decompostas em áreas cristalinas. A recarga profunda é um volume pequeno comparado aos demais elementos do ciclo hidrológico, explicada pelo fato de que a infiltração profunda é um processo muito lento, com o armazenamento acima do nível base escoando para o rio, e apenas uma fração deste escoamento subterraneamente. Os valores de recarga profunda não são observáveis e representam 0,8 a 4,7% do total precipitado (DAEE, 1974).

A seguir serão apresentados os dados de balanço hídrico (DAEE, 1974), segundo as bacias principais presentes na área de estudo:

a) Bacia do rio Mogi Guaçu (cabeceira)

A área de drenagem é de 3.872 km², subdividida em 7 trechos, com predominância total de formações cristalinas. De uma maneira geral, mantêm-se as mesmas características como no caso das cabeceiras do rio Pardo. A relação entre escoamento básico e total é da ordem de 65%, devido também a uma ocorrência maior da precipitação e das conseqüentes enchentes.

b) Bacia do rio Mogi-Guaçu (médio até a foz)

A área de drenagem é de 9.780 km², subdividida em 8 trechos, com a predominância da formação cristalina (60%). A relação entre escoamento básico e total é da ordem de 62% nas partes cristalinas e 68% nas partes arenosas, com valores que variam de 180 a 260 dias e a retenção total calculada é da ordem de 1.232 Mm³.

A Tabela 2.4.1 apresenta o resumo das averiguações realizadas por DAEE (1974) na bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu.

**TABELA 2.4.1 – RESUMO DAS AVERIGUAÇÕES NAS PRINCIPAIS BACIAS
HIDROGRÁFICAS**

Bacia	Área das formações geológicas (km ²)					Área superficial permeável km ²	Precipitação (10 ⁶ m ³ /a)	Escoamento Total (10 ⁶ m ³ /a)	Escoamento básico (10 ⁶ m ³ /a)	Reserva ativa (10 ⁶ m ³ /a)
	Bauru	Basalto	Botucatu	Pirambóia	Cristalino					
Rio Mogi Guaçu (cabeceira)					3872	1882,7	6536,4	1848,3	1068,6	578,16
Rio Mogi Guaçu (Médio a foz)	575	338	1660	1438	5809	6079,0	1272,1	3342,9	2267,4	1232,27

Fonte: DAEE (1974)

2.4.1 Características Geométricas e Hidráulicas

Na área ocorre um sistema aquífero cristalino, em rochas de idade pré-Cambriana. O aquífero ocorre em descontinuidades provocadas por fraturamento das rochas (porosidade de fissuras), caracterizando zonas aquíferas localizadas, com extensão e profundidades condicionadas pela intensidade do fraturamento.

Segundo DAEE (1981), a camada de alteração ou manto de intemperismo destas rochas apresenta uma grande importância na recarga do aquífero e conseqüentemente no escoamento da rede de drenagem. Dependendo do tipo litológico, altitude, clima e fraturamento, o manto de intemperismo na área pode apresentar espessuras entre 10 e 70 metros. Neste aquífero as zonas produtoras situam-se a profundidades de até 165 metros (DAEE, 1981). A Figura 2.4.1 apresenta um esquema simplificado de circulação de água no sistema aquífero cristalino.

Figura 2.4.1 – Modelo hidrogeológico simplificado de aquífero cristalino (Modificado de Hirata e Ferreira, 2001)

De acordo com os dados de poços obtidos (um total de 66), os valores de capacidade específica variam de 0,01 m³/h/m a 8 m³/h/m. A Tabela 2.4.2 apresenta uma síntese do potencial hídrico subterrâneo da área baseado em dados de poços. A Figura 2.4.2 apresenta o histograma de frequência da capacidade específica dos poços.

TABELA 2.4.2 - POTENCIAL HÍDRICO SUBTERRÂNEO COM BASE EM DADOS DE POÇOS

Número de poços estudados	Profundidade média dos poços (m)	Capacidade Específica (m ³ /h/m)				
		Média aritmética	Mediana	Valor máx.	Valor mín.	Desvio Padrão
66	124,7	0,66	0,15	8,0	0,01	1,37

Figura 2.4.2 - Histograma de frequência da capacidade específica dos poços (banco de dados 1, anexo 1)

Conforme pode ser observado no gráfico, os dados de produtividade dos poços apresentam uma distribuição fortemente assimétrica (log-normal).

Além deste banco de dados, analisou-se estatisticamente o segundo banco de dados de poços (total de 28) que será utilizado na verificação dos mapas de favorabilidade. A Figura 2.4.3 apresenta o histograma de frequência da capacidade específica dos poços. Conforme pode ser observado, este banco de dados apresenta um comportamento estatístico semelhante ao banco de dados apresentado anteriormente. Apresentam uma distribuição fortemente assimétrica (log-normal), valores de média, mediana e desvio padrão iguais a 0,512, 0,102 e 0,910 respectivamente.

Figura 2.4.3 - Histograma de frequência da capacidade específica dos poços (banco de dados 2, anexo 1)

Com base nos dados de poços cadastrados (banco de dados 1), elaborou-se também um gráfico da distribuição dos poços em função da capacidade específica e da profundidade (Figura 2.4.4). Nota-se que poços com profundidade de até 160 metros apresentam os maiores valores de capacidade específica (acima de $0,66 \text{ m}^3/\text{h/m}$, que é a média para a região), porém também apresentam valores baixos (próximos de $0,02 \text{ m}^3/\text{h/m}$). Os poços acima de 160 metros apresentam as mais baixas produtividades (em torno de $0,01 \text{ m}^3/\text{h/m}$).

Fig. 2.4.4 – Gráfico de dispersão entre profundidade e produtividade de poços.

Nota-se que para uma mesma profundidade, como a de 100 metros, por exemplo, ocorrem poços de produtividades baixas ($0,02 \text{ m}^3/\text{h/m}$) e altas ($3 \text{ m}^3/\text{h/m}$). Essa variação de produtividade observada no gráfico significa que a profundidade do poço não é garantia de alta produtividade, pois a produtividade do poço está relacionada com fatores geológico-estruturais e geomorfológicos. Porém, é necessário ter o cuidado de avaliar a necessidade de se perfurar poços desta ordem de profundidade (acima de 200 metros), uma vez que o gráfico indica que as baixas produtividades estão associadas às maiores profundidades.

2.4.3 Hidrogeoquímica e qualidade das águas subterrâneas

Segundo DAEE (1981) as águas subterrâneas, em âmbito regional na área de estudo, são classificadas predominantemente como: águas bicarbonatadas cálcicas, bicarbonatadas sódicas e bicarbonatadas mistas, onde o íon cálcio predomina. De acordo com dados fornecidos por algumas empresas mineradoras de água, na região de Águas de Lindóia, as águas são classificadas como oligominerais, fluoretadas, fracamente a fortemente radioativa na fonte, o que as classifica como águas minerais, para finalidades balneárias e de engarrafamento.

Do ponto de vista físico-químico o aquífero não apresenta maiores problemas de qualidade de água para abastecimento público, usos agrícola e industrial (DAEE, 1981).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

Para o desenvolvimento da presente Tese foram utilizados os seguintes materiais:

a) Cartas topográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na escala 1:50.000, digitalizadas pelo Instituto Florestal - Projeto Biota/Fapesp, num total de 7 cartas, inseridas em SIG. A Figura 3.1.1 apresenta a articulação das folhas.

Fig. 3.1.1 – Articulação das folhas topográficas IBGE na área de estudo.

b) Imagens ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*) Landsat 7, em formato digital, referentes às órbitas ponto: 219/75, data de passagem referente a agosto de 2001 (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 e a banda pancromática) e 219/76, com data de passagem referente a setembro de 1999 (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 e a banda pancromática), ambas com azimute solar 50°, elevação solar de 45° e resolução espacial de 30 metros nas bandas de 1 a 7 e 15 metros nas bandas pancromáticas, fornecidas pelo acervo (CDteca) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. As características espectrais do sistema ETM+ estão descritas na Tabela 3.1.1.

TABELA 3.1.1 – CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DO SISTEMA ETM+

Banda	Posição no Espectro (μm)	Região do Espectro
1	0,45-0,515	visível (azul)
2	0,525-0,605	visível (verde)
3	0,63-0,69	visível (vermelho)
4	0,75-0,9	infravermelho próximo (refletido)
5	1,55-1,75	infravermelho (refletido)
6	10,4-12,5	infravermelho termal (emitido)
7	2,09-0,35	infravermelho (refletido)
Pan	0,52-0,9	visível e infravermelho próximo

Fonte: USGS, www Landsat7.usgs.gov/about.html (2000)

c) Mapa de rede de drenagem. Foram utilizadas as drenagens digitalizadas das folhas topográficas IBGE, escala 1:50.000. Em ambiente SIG e utilizando-se a imagem ETM+ Landsat 7 (pancromática), os vetores da drenagem foram complementados. Os vetores da drenagem foram sobrepostos à imagem ETM+ e editados. A Figura 3.1.2 apresenta o mapa da rede de drenagem da área de estudo.

Fig. 3.1.2 - Mapa da rede de drenagem compilado das folhas topográficas IBGE (1:50.000) e complementadas com a imagem ETM+ Landsat 7, pancromática.

d) Mapas geológicos: foram digitalizados e compilados mapas geológicos, em escala 1:50.000, referentes à Folha Mogi Guaçu (Campanha *et al.*, 1982), Folha Amparo (Basei *et al.*, 1986), Folha Águas de Lindóia (Zanardo, 1987), Folha Socorro (Sad *et al.*, 1982).

e) Mapa pedológico: foi digitalizado o mapa pedológico, escala 1:500.000 (Oliveira *et al.*, 1999) para auxiliar na etapa de análise de dados e definir os pesos aos parâmetros prospectivos.

f) Mapa geomorfológico: foi digitalizado o mapa geomorfológico, escala 1:500.000 (IPT/USP, 1997) para auxiliar na etapa de análise de dados e definir os pesos aos parâmetros prospectivos.

g) Dados aerogeofísicos magnetométricos referentes ao Projeto Aerogeofísico São Paulo - Rio de Janeiro, parte São Paulo, sub área VI, fornecidos pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). O levantamento aerogeofísico São Paulo - Rio de Janeiro (subárea VI) foi executado entre 05/01/1979 e 25/02/1979, pela ENCAL S.A. (Consultoria e Aerolevantamentos) e os dados foram corrigidos pela CPRM em 1988.

No aerolevantamento foi utilizada uma aeronave Bandeirante e os seguintes equipamentos: magnetômetro Geometrics G-803 e gamaespectrômetro Geometrics GR-800 A. Os dados estão em formato ASCII x, y, z, onde x representa as coordenadas de longitude, y as de latitude e z o valor magnético campo total reduzido do IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*), valor magnético campo total nivelado, campo total corrigido da variação diurna, esses em nanoteslas (nT). A Tabela 3.1.2 apresenta as características do aerolevantamento

TABELA 3.1.2- CARACTERÍSTICAS DO AEROLEVANTAMENTO GEOFÍSICO DO PROJETO SÃO PAULO-RIO DE JANEIRO

CARACTERÍSTICAS DO AEROLEVANTAMENTO	
Direção das linhas de vôo	N-S
Espaçamento entre as linhas de vôo	1 km
Direção das linhas de controle	E-W
Espaçamento das linhas de controle	10 km
Intervalo entre as medições geofísicas sucessivas	100 m
Altura média do vôo sobre o terreno	150 m
Volume dos detectores	3072 pol ³
Canais	U, Th, K e CT (cps), Mag (nT)

Fonte: CPRM (1995).

h) Fotografias aéreas (escala 1:25.000): foram utilizadas fotografias aéreas referentes ao Levantamento de Regiões Cafeeiras, IBC/SA de 1972 (região de Lindóia), emprestadas pelo Instituto Geológico e ao Levantamento Fotogramétrico do Estado de São Paulo, de 1962 (região de Serra Negra), emprestadas pelo Laboratório de Aerofotogeografia, da Faculdade de Filosofia Letras Ciências Humanas da Universidade de São Paulo.

i) Dados geológicos de campo: foram visitadas várias ocorrências de fontes e nestes locais, bem como nas suas proximidades, analisaram-se afloramentos, sendo descritos os tipos litológicos e adquiriram-se medidas de estruturas dúcteis (como foliação milonítica e xistosidade), de estruturas rúpteis-dúcteis (como foliação cataclástica) e de estruturas rúpteis (juntas e falhas, aqui definidas como fraturas).

j) Dados de poços e fontes

Esses dados foram obtidos junto à CPRM, através do sistema de informações de águas subterrâneas (SIAGAS); através de alguns arquivos do Departamento de Águas e Esgoto do Estado (DAEE) que se encontravam na CPRM (regional de São Paulo); dados de empresas

perfuradora de poços (Jundsondas), dados do estudo de águas subterrâneas realizado pelo DAEE (1981), dados de cadastramento de fontes e poços de água mineral do DNPM (cadastro *on line*); dados apresentados em teses de doutoramento, dissertações de mestrado e trabalhos publicados em revistas; e dados obtidos na etapa de campo.

Foram cadastrados 43 fontes e 94 poços tubulares com dados de produtividade, na área de estudo. Os dados de nascentes (fontes) e poços foram inseridos dentro de um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Cabe lembrar que existem dois bancos de dados diferentes com as informações de poços, um será usado na etapa de análise dos parâmetros prospectivos (total de 66 poços) e o outro será utilizado para a avaliação dos resultados dos mapas de favorabilidade (total de 28 poços). Os dados de poços e fontes cadastrados encontram-se no ANEXO I.

- Poços Tubulares

Neste trabalho o parâmetro utilizado para avaliar a produção dos poços foi a capacidade específica (Q/s), que é uma relação entre a vazão explorável e o rebaixamento provocado. Corresponde à quantidade de água retirada do poço, por unidade de tempo e por unidade de rebaixamento. Representa melhor as características hidráulicas do aquífero em relação à vazão.

$$C = \frac{Q}{(ND - NE)}$$

onde:

C: capacidade específica ($m^3/h/m$)

Q: vazão (m^3/h)

ND: nível dinâmico (m)

NE: nível estático (m)

O parâmetro que exerce maior controle sobre o valor da capacidade específica é a transmissividade (Fernandes, 1999). Em aquíferos fraturados, a transmissividade pode ser calculada pela seguinte fórmula (Novakowski, 1995 *apud* Fernandes, 1999):

$$T = \frac{\rho \cdot g}{12\mu \cdot (2b)^3}$$

onde:

T: transmissividade

ρ : densidade da água

g: aceleração da gravidade

μ : viscosidade da água

2b: somatória das aberturas das fraturas individuais atravessadas pelo poço.

Dessa forma, a capacidade específica é controlada principalmente pela abertura total de fraturas atravessadas pelo poço.

Muitos autores, tais como DAEE (1981), Costa (1986), Chilton e Foster (1995), Fernandes e Rudolph (2001), utilizaram a capacidade específica (quando disponível) para a avaliação de produtividade dos poços, devido a este ser o indicador mais seguro da produção potencial de um poço quando comparado com a vazão.

- Fontes (surgência natural/nascentes)

Adotou-se neste trabalho, além do uso de dados de poços tubulares profundos para o estudo hidrogeológico da área, as ocorrências de nascentes de água. As fontes podem ser definidas como ocorrências de água subterrânea que afloram naturalmente na superfície terrestre e podem ser consideradas como áreas de descarga do aquífero e, portanto, as áreas de recarga devem estar em áreas potenciométricamente mais elevadas, não distantes das captações de interesse.

Principalmente na região de Águas de Lindóia ocorrem muitas nascentes de água que mantêm boa vazão o ano inteiro. Segundo Yoshinaga (1990) as águas oriundas das nascentes nas cidades de Lindóia e Águas de Lindóia são misturas de águas mais superficiais e de águas mais profundas que ali emergem. Dessa forma, a ocorrência de nascentes (com boa vazão o ano inteiro) indica que o substrato rochoso possui alta capacidade de armazenamento de água, isto é trata-se de um bom aquífero.

Outra grande vantagem de se utilizar nascentes no estudo do aquífero fraturado é a possibilidade de se visualizar e definir (por meio de medidas estruturais) as famílias de fraturas interconectadas, bem como as direções e mergulhos destas fraturas por onde se observa a surgência de água. Essas direções de fraturas serão as mais favoráveis para o armazenamento de água subterrânea. Além disso, é possível fazer uma comparação entre as medidas estruturais feitas nas proximidades das fontes com os lineamentos fotointerpretados e as fraturas mapeadas.

Dessa forma, a utilização dos dados das nascentes auxilia no estudo hidrogeológico da área. Para se avaliar a "produção potencial" das fontes foram utilizados dados de vazão (l/s). A Figura 3.1.3 apresenta diferentes tipos de ocorrências de fontes, sendo a fonte artesiana de fratura o tipo observado na área de estudo.

Fig. 3.1.3– Tipos de fontes: a) fonte de depressão, b) fonte de contato, c) fonte artesiana de fratura, d) fonte tubular de dissolução cárstica. Fonte: Manoel Filho (1997).

3.2. MÉTODOS

O método utilizado na elaboração deste trabalho consiste em duas partes: estudo regional (escala 1:100.000) e estudo de detalhe (escala 1:25.000). O estudo regional consiste em nove etapas (Figura 3.2.1):

- pré-processamento e processamento das imagens ETM+ e dos dados aerogeofísicos;
- fotointerpretação geológica de imagens ETM+, da rede de drenagem e do produto integrado ETM+-aeromagnetométrica;
- geração de mapas de lineamentos, de densidade de lineamentos, de densidade de lineamentos por comprimento, isofreqüência de zonas de juntas, morfoestruturas, declividade, modelo numérico de terreno, litológico, entre outros;
- levantamento geológico de campo
- construção de banco de dados georreferenciado (SIG);
- análise por geoprocessamento (tabulação cruzada) entre os dados de poços e os lineamentos estruturais, morfoestruturas, isofreqüência de zonas de juntas, modelo numérico de terreno (MNT), geologia, geomorfologia, pedologia e dados de campo, para a identificação de parâmetros prospectivos relacionados à ocorrência de água subterrânea;
- geração de um modelo hidrogeológico regional;
- geração dos mapas de favorabilidade à ocorrência de água subterrânea utilizando o método conduzido pelos dados e o método conduzido pelo conhecimento.
- Avaliação dos resultados obtidos pelos mapas de favorabilidade realizando-se a tabulação cruzada entre novos dados de poços e os mapas gerados.

Fig. 3.2.1 – Fluxograma indicando as etapas do estudo regional

O estudo de detalhe envolve cinco etapas (Figura 3.2.2):

- escolha de áreas para o estudo de detalhe. As áreas serão seleccionadas no mapa de favorabilidade em função da sua classificação como alta favorabilidade.
- fotointerpretação de fotografias aéreas em escalas 1:25.000, com objetivo de se identificar as principais fraturas e, a partir destes dados, definir as direções dos perfis geofísicos.
- georreferenciamento das fotografias aéreas e inserção num SIG

- d) realização de levantamentos geofísicos de eletrorresistividade (caminhamento elétrico e sondagem elétrica vertical);
- e) realização da inversão dos dados geofísicos e interpretação dos dados, com o objetivo de se avaliar com maior detalhe os resultados das análises de favorabilidade, bem como refinar o modelo hidrogeológico prospectivo para a área de estudo.

Fig. 3.2.2 – Fluxograma indicando as etapas do estudo de detalhe

3.2.1. Estudo Regional

3.2.1.1 Pré-processamento das imagens ETM+ Landsat 7 e de dados aerogeofísicos

O pré-processamento refere-se ao processamento inicial das imagens de sensoriamento remoto e de dados aerogeofísicos para a correção de ruídos ou imperfeições, que muitas vezes estão contidos nelas. As etapas de pré-processamento aplicadas nas imagens ETM+ e aerogeofísicas são descritas a seguir.

- Imagens ETM+ Landsat 7

a) Correção Atmosférica

A atmosfera afeta o dado adquirido pelo sensor de dois modos: adicionando valores de brilho (o espalhamento atmosférico tem efeito aditivo, que é inverso à quarta potência do comprimento de onda - $1/\lambda^4$ - isto é, o espalhamento *Rayleigh* ou molecular); e subtraindo os valores de brilho associado principalmente à presença de água na atmosfera e/ou aerossóis (espalhamento *Mie*).

Para a correção atmosférica da imagem ETM+ foi utilizado o método de “subtração do pixel escuro” que assume que os pixels, para os quais o sensor mediu os valores mais baixos, possui um valor de reflectância zero, ou a irradiância sobre o pixel é zero ou ambos ocorrem (Chavez Jr, 1975).

O alvo escolhido para a correção atmosférica foi a água (foram coletadas amostras ao longo de drenagens e lagos), pois o gráfico número digital (ND) x comprimento de onda (λ) das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do ETM+ desse alvo apresentou uma forma assintótica, com uma tendência de decréscimo do valor em função do aumento do comprimento de onda (que segue a relação $1/\lambda^4$ do espalhamento *Rayleigh*).

O valor utilizado para a correção atmosférica para cada uma das imagens foi o resultado da média dos NDs dos dez alvos selecionados para cada banda. Esses valores da média do ND foram subtraídos para cada banda, utilizando-se a função “operações aritméticas” do programa SPRING (NETGIS, 1997). As Figuras 3.2.3 e 3.2.4 apresentam o gráfico de dispersão do número digital médio para os 10 alvos água pelo comprimento de onda médio das bandas do ETM+, para as imagens 219/75 e 219/76. Na imagem pancromática não foi realizada correção atmosférica.

Fig. 3.2.3 – Gráfico de dispersão entre o comprimento de onda médio das bandas do ETM+ (219/75) e o número digital médio de amostras do alvo água.

Fig. 3.2.4 – Gráfico de dispersão entre o comprimento de onda médio das bandas do ETM+ (219/76) e o número digital médio de amostras do alvo água.

b) Correção Geométrica

As imagens geradas por sensores remotos (sejam elas fotografias aéreas ou imagens orbitais) estão sujeitas a uma série de distorções espaciais e não possuem, de modo geral, precisão cartográfica quanto ao posicionamento dos objetos, superfícies ou fenômenos nelas representados. A transformação de uma imagem de modo que ela assuma as propriedades de escala e de projeção de um mapa é chamada de correção geométrica (Crósta, 1993).

O processo de correção geométrica, segundo Mather (1987), Crósta (1993), Richards (1993), Shimabukuro *et al.* (1998), consiste basicamente em três etapas:

- Estabelecer a relação entre o sistema de coordenadas do mapa e o da imagem;
- Estabelecer um conjunto de pontos de controle, para definir a posição dos pixels na imagem corrigida;
- Estabelecer o fator de reamostragem (interpolação), isto porque, muitas vezes, a correção geométrica modifica o número original de pixels contidos numa cena, e a interpolação permite estimar o número digital a ser atribuído a cada pixel na imagem de saída de forma que esta não tenha alterações radiométricas significativas.

Na correção geométrica foi utilizado o programa SPRING. Os pontos de controle foram coletados por teclado, através da escolha de pontos nos mapas topográficos. O sistema de referência utilizado para o estudo foi o UTM (*Universal Transverse Mercator*) e o *datum* Córrego Alegre, sendo o meridiano de origem 45° W (oeste de *Greenwich*).

Na imagem 219/75, bandas 1 a 7, foram coletados 19 pontos de controle e na banda pancromática foram coletados 12 pontos de controle, bem distribuídos nas imagens. O erro

residual médio foi de 21 m para as bandas 1 a 7 e 4,5 m para a pancromática. Na imagem 219/76 coletados 19 pontos de controle (bandas 1 a 7) e 12 pontos de controle (pancromática), também com uma boa distribuição nas imagens. O erro residual médio foi de 25 m (1 a 7) e 6 m (pancromática). Para todas as imagens foi escolhido e aplicado um polinômio de segundo grau e um interpolador bilinear.

A partir do erro médio, foi definido o pixel de 30 metros como tamanho de pixel comum para a integração dos dados ETM+ (bandas 1 a 7) e aerogeofísicos, e o pixel de 15 metros para a integração da banda pancromática e dados aerogeofísicos, com o objetivo de manter a integridade geométrica e radiométrica na integração (Toutin, 1995).

c) Mosaico das Imagens e recorte da área de estudo

Mosaico é o processo de colagem de imagens adjacentes para se obter o recobrimento maior de uma determinada área (NETGIS, 1997). Neste trabalho, a imagem 219/75, que corresponde à parte norte da área em estudo foi "mosaicada" com a imagem 219/76, que corresponde à parte sul da área. Foram realizados dois mosaicos, entre as imagens ETM+ 219/75 e 219/76 (bandas 1 a 7) e ETM+ 219/75 e 219/76 (pancromática), Figura 3.2.5.

Segundo NETGIS (1997), todas imagens a serem mosaicadas devem estar registradas com um erro residual médio o menor possível, a fim de se evitar lacunas entre as partes coladas e descontinuidades entre as feições geográficas.

Figura 3.2.5- Desenho esquemático do mosaico das duas cenas ETM+-Landsat 7 (219/75 e 219/76) que recobrem a área de estudo e o contorno da área de estudo.

- Dados aerogeofísicos magnetométricos

O método de prospecção magnético baseia-se no estudo das variações do campo geomagnético terrestre por contraste em magnetização crustal e tem importância no mapeamento de estruturas (falhas e dobras) e unidades de magnetização diferentes (Parro, 1998). Segundo Vasconcellos *et al.* (1984), o campo magnético terrestre é formado por três contribuições principais:

- campo principal ou interno: cuja origem está relacionada à estrutura interna da Terra e apresenta uma suave variação espacial (representa 99% do campo total);
- campo externo: representa uma pequena variação do campo geomagnético, tem origem externa e varia rapidamente de modo parcialmente cíclico e parcialmente aleatório;
- campo gerado por variações do campo principal (anomalias magnéticas locais): relativamente constantes no tempo e no espaço, causadas por anomalias magnéticas próximas da superfície da crosta terrestre. Estas variações constituem os objetivos das prospecções magnéticas.

As alterações locais no campo magnético principal resultam da variação nos teores de minerais magnéticos de rochas próximas à superfície terrestre. Ocasionalmente essas anomalias são suficientemente intensas para duplicar o campo magnético principal. Normalmente, as anomalias magnéticas locais apresentam valores de intensidade variando entre 50 nT e 5.000 nT. Geralmente não persistem em grandes extensões e são os alvos de interesse na prospecção magnética.

Segundo Vasconcellos *et al.* (1994), as variações do campo principal são produzidas em maior ou menor grau em função da presença de minerais magnéticos nas rochas. Os minerais magnéticos mais comuns são: magnetita (Fe_3O_4), maghemita (Fe_2O_3), hematita (Fe_2O_3), ilmenita (FeTiO_3). Desses minerais, o mais importante no magnetismo das rochas é a magnetita, incluindo as titanomagnetitas, comuns nos basaltos.

As variações no campo geomagnético freqüentemente são diagnósticas de concentrações de minerais magnéticos, de fraturas na crosta terrestre e estruturas características de áreas favoráveis para a ocorrência de petróleo (Vasconcellos *et al.*, 1994).

Segundo Vasconcellos *et al.* (1994), quanto maior a concentração de minerais magnéticos nas rochas, mais acentuado torna-se o relevo magnético. Dessa forma, rochas sedimentares (exceto formações ferríferas) apresentam relevos magnéticos suaves, enquanto rochas ígneas com magnetita produzem um relevo magnético acidentado no mapa de contorno magnético. As rochas metamórficas podem apresentar relevos suaves, moderados ou acidentados, em função da origem das rochas e das alterações provocadas pelos processos metamórficos.

Os dados geofísicos são usualmente apresentados em forma de mapas de contorno, perfis e blocos diagrama. Segundo Drury e Walker (1987), os dados geofísicos em formato imagem

apresentam uma série de vantagens com relação aos mapas de contorno, como a preservação das informações dos dados originais, além de facilitar a interpretação visual, onde os valores das intensidades geofísicas apresentam-se como níveis de cinza ou cores. Como o sistema visual humano é mais sensível às variações de cores do que aos níveis de cinza, as imagens coloridas são mais utilizadas. Outro fator importante na utilização dos dados geofísicos em formato imagem é a possibilidade de se integrar digitalmente as imagens geofísicas com outras imagens de sensores orbitais, tais como TM-Landsat, RADARSAT, e outros.

Os dados aerogeofísicos são coletados ao longo de linhas paralelas, espaçadas a uma certa distância, apresentando uma maior densidade de dados ao longo destas linhas. Portanto, existe a necessidade de se transformar esses dados em uma malha regular e esse procedimento é feito através do uso de interpoladores. A escolha do tipo de interpolador e do tamanho da célula da grade são fatores importantes no processamento dos dados geofísicos e irão depender das características dos dados geofísicos originais utilizados.

Neste trabalho, a etapa de pré-processamento dos dados magnetométricos consistiu, de maneira simplificada, nas seguintes etapas: conversão dos dados originais em grades regulares de 250 metros; geração das imagens magnetométricas, sendo aplicadas nestas imagens micronivelamento, bem como técnicas de realce de estruturas quando necessárias. Essas etapas foram feitas utilizando-se o *software* Geosoft Oasis Montaj (Geosoft, 1995).

1 - Micronivelamento

Segundo Minty (1991) o micronivelamento é uma técnica simples utilizada para remover erros residuais de nivelamento de dados aerogeofísicos, através de técnicas de filtragem direcional. Geosoft (2002), define o micronivelamento como a filtragem de um banco de dados (em forma de grade) para reduzir ou remover efeitos não geológicos causados pelo ruído de alto comprimento de onda, ao longo das linhas do aerolevantamento. A escolha do método de interpolação bidirecional foi realizada em função da distribuição dos dados originais e também do procedimento de micronivelamento adotado. O método bidirecional é indicado para interpolar rapidamente linhas de dados que estejam aproximadamente paralelas, pois tende a intensificar *trends* perpendiculares às direções das linhas do levantamento (Geosoft, 1995). Em dados aerogeofísicos os melhores resultados são alcançados quando a interpolação é feita por curvatura mínima, krigagem e bidirecional (Parro, 1998).

O método de micronivelamento bi-direcional deriva do erro do *grid*, assumindo que o dados interpolados consistem na geologia, num campo regional, e em erros de nivelamento. Estes são então separados em vários estágios, através de filtragens passa-baixa durante os processos de geração de grade.

O canal escolhido para a interpolação foi o magnetométrico reduzido do IGRF. O interpolador escolhido foi o bidirecional. Para a definição do tamanho das células, adotou-se o

procedimento de Vasconcellos *et al.* (1994), que estabelece a dimensão das células entre 1/4 e 1/8 do espaçamento das linhas de vôo. Dessa forma, as grades geradas foram de 250 x 250 metros (equivalente a 1/4 do espaçamento das linhas de vôo, que neste caso é de 1 km).

A Figura 3.2.6 apresenta a imagem magnetométrica bruta (a), o erro de nivelamento (b) e a imagem magnetométrica final, com micronivelamento (c). Comparando-se as imagens das figuras 3.2.6a e 3.2.6c nota-se que na imagem 3.2.6c desaparecem as feições de direção N-S, influenciadas pelas linhas de vôo, observadas claramente na imagem da figura 3.2.6a. Isso é uma grande vantagem, pois a presença dessas feições pode levar a interpretações estruturais errôneas.

Fig. 3.2.6- Imagem magnetométrica, a) bruto b) erros de nivelamento c) imagem magnetométrica com correção de micronivelamento

II- Técnicas utilizadas no realce das estruturas

Existem muitas técnicas que são utilizadas para o realce de estruturas nas imagens magnetométricas. Neste trabalho foram aplicadas duas técnicas: Sinal Analítico e Fase do Sinal Analítico.

a) Sinal Analítico

A interpretação do posicionamento das fontes magnéticas é dificultada pela natureza dipolar do campo magnético e pela magnetização remanescente presente nas fontes, que causam assimetria e deslocamentos das respostas. Para resolver estes problemas, foram desenvolvidas técnicas de transformação da fase da indução magnética medida, sendo as mais usadas a redução ao pólo e a redução ao equador.

Porém, estas duas transformações pressupõem que a magnetização das fontes seja totalmente induzida e caso essa suposição não se aplique, as respostas geradas tornam-se ainda mais difíceis de serem interpretadas se não existir algum tipo de conhecimento sobre a magnetização remanescente dos corpos magnéticos.

Uma forma de resolver estes problemas de interpretação da posição das fontes magnéticas é através do uso da técnica de sinal analítico (Gunn *et al.*, 1998; Fuck, 2000). O sinal analítico é definido como função complexa, associada a qualquer função real, cuja parte real é representada pela própria função real e a imaginária pela transformada de Hilbert dessa função real (Bracewell, 1986 *apud* Fuck, 2000).

Segundo Gunn *et al.* (1998), esta é uma técnica importante na separação de grandes corpos, pois a amplitude do sinal analítico resulta em respostas simétricas, cujos picos independem de qualquer outro fator e encontram-se exatamente acima das bordas das fontes causadoras. Os autores também enfatizam o uso do sinal analítico para se verificar a qualidade do resultado da redução ao pólo dos dados. O procedimento de geração de sinal analítico foi realizado no programa Geosoft Oasis Montaj.

b) Fase do Sinal Analítico

A fase do sinal analítico é uma técnica utilizada para o realce de estruturas e discontinuidades que possuam alguma expressão magnética, sendo útil no mapeamento de estruturas geológicas. O sinal analítico é uma função complexa e a sua fase corresponde ao ângulo entre a parte real e a parte imaginária em cada ponto desta função, ou seja, entre a derivada vertical e o gradiente do campo magnético.

Uma vantagem da utilização da fase do sinal analítico em relação aos filtros das derivadas é o fato da fase possuir maior poder de resolução das estruturas magnéticas. A fase consegue resolver o problema do grande número de estruturas apresentados nas imagens das derivadas (que nem sempre correspondem realmente a feições estruturais), como torna mais definidos os diversos domínios magnéticos (Fuck, 2000). A Figura 3.2.7 apresenta as imagens da fase do sinal analítico.

Fig. 3.2.7- Imagem magnetométrica fase do sinal analítico em níveis de cinza e colorida

3.2.1.2 Processamento: Realce e Integração dos dados

- Realces Espectrais

Os realces no domínio espectral são os resultados de transformações matemáticas aplicadas à imagem original que resultam em uma nova imagem transformada, cujos valores independem da influência da vizinhança entre os pixels. (Paradella, 1998).

Não existem regras que acomodem os vários interesses na obtenção de uma única melhor imagem. Geralmente vários produtos que enfocam diferentes tratamentos são necessários para que, combinados, apresentem as informações requeridas pelo interessado. Dessa maneira, uma imagem realçada pode conter menos informação que a imagem original, porém o realce adequado mostrará a informação de maior importância para a análise posterior do fotointérprete (Paradella, 1998). A seguir serão descritos os tipos de realce realizados em cada uma das imagens utilizadas neste trabalho.

a) Imagem ETM+ Landsat 7

- Transformação por componentes principais (TCP)

Duas imagens são ditas correlacionadas quando, dada a intensidade de um determinado pixel em cada uma delas, pode-se deduzir com razoável aproximação a intensidade do pixel correspondente na outra imagem (Crósta, 1993).

A análise por componentes principais pode ser resumida, de maneira simplificada, como: dado um número N de imagens brutas, serão analisadas as correlações entre elas de maneira a produzir um novo conjunto de N novas imagens, com nenhuma correlação entre si. Esse novo conjunto de imagens terá as seguintes características: o primeiro componente principal (1º CP) irá conter a informação que é comum a todas as N bandas originais; sendo que os CPs de

ordem mais alta irão conter feições espectrais cada vez menos significantes, até o último CP, que concentrará a informação que sobrar (Crósta, 1993).

Do ponto de vista quantitativo, a porcentagem de informações nos dois últimos CPs é muito inferior aos CPs anteriores, porém do ponto de vista qualitativo, essa pequena porcentagem pode corresponder, justamente, à informação de interesse, como por exemplo determinados minerais indicativos da presença de jazidas, que por se tratar de feições espectrais muito específicas, se concentrarão nos últimos CPs.

Em imagens multiespectrais, cada sucessivo CP possui menos informação que os seus predecessores. Quando as imagens CPs são submetidas a um aumento de contraste, no sentido de se obter uma mesma variância para o 1º e o 2º CPs, o espaço de atributos será consideravelmente ampliado, permitindo uma melhor diferenciação dos materiais presentes na superfície terrestre tais como, rochas, solos, vegetação, etc (Crósta, 1993). Madrucci (2000) realiza uma comparação entre dois produtos integrados: banda 4 (TM-Landsat-5) - canal de contagem total e primeiro componente principal - canal de contagem total e conclui que o produto integrado com o primeiro componente principal realça melhor as características texturais de relevo e drenagem, sendo um produto adequado para a fotointerpretação geológica.

Dessa maneira, foi realizada na imagem ETM+ (bandas 1 a 7) a transformação por componentes principais com o objetivo de utilizar o primeiro componente principal, para a integração com os canais gamaespectrométricos e magnetométricos.

- Integração digital de dados – Transformação IHS

Optou-se pela utilização da transformação IHS como técnica de integração de dados, pois de acordo com Harris *et al.* (1994) esta é a técnica mais flexível e que apresenta o melhor desempenho para a combinação e integração de dados geológicos multifontes.

O espaço de cores conhecido por IHS é uma forma alternativa ao espaço RGB de representação de cores. No espaço IHS, as cores são definidas por três atributos (ao invés de três quantidades de cores primárias) que são: Intensidade (*Intensity-I*), Matiz (*Hue-H*) e Saturação (*Saturation-S*).

O espaço IHS pode ser graficamente representado como um cone de base triangular, cilíndrica ou hexacônica. A transformação IHS é usada no processamento de imagens de satélite através de um processo de múltiplas etapas. Informações mais detalhadas sobre as representações e a fundamentação matemática dos modelos de transformação do espaço RGB para o espaço IHS podem ser encontradas em King *et al.* (1984) e Gillespie *et al.* (1987).

As vantagens do sistema de coordenadas IHS sobre o RGB são: os aspectos informativos de uma imagem são apresentados usando-se atributos de cores identificáveis e quantificáveis,

podendo ser distintamente percebidos; as variações numéricas nos dados da imagem podem ser representados de maneira uniforme num intervalo de cores facilmente perceptível e; o controle individual sobre os componentes cromático (H) e acromático (S) da imagem é possível (Harris *et al.*, 1990).

- Geração dos produtos integrados pelo método IHS

A integração da imagem ETM+ (1CP) com a imagem magnetométrica (fase do sinal analítico) realizou-se da seguinte maneira:

- a) Importação da imagem magnetométrica (fase do sinal analítico)/gama/mapas e conversão para o espaço RGB;
- b) Transformação RGB para IHS, utilizando-se os canais obtidos no item a;
- c) Substituição dos canais Intensidade (I) pela imagem ETM+ -Landsat 7 (1ª componente principal - CP) realçada linearmente, Saturação (S) por um valor constante (nível de cinza=70) e manutenção do canal de Matiz (H) original;
- d) Retorno ao espaço RGB, através da aplicação da transformação inversa IHS para RGB.

3.2.1.3 Modelo Numérico de Terreno (MNT)

O modelo numérico de terreno foi gerado a partir dos dados topográficos (folhas IBGE, escala 1:50.000), cujas curvas topográficas foram digitalizadas, com seus respectivos valores de Z (cota) e inseridas dentro de um sistema de informação geográfica (SIG). Foram utilizados os programas Spring e ArcView.

O modelo numérico de terreno foi calculado a partir da interpolação por rede triangular irregular (*TIN – triangular irregular network*). Nos dois programas utilizados (Spring e Arc View) o interpolador utilizado na construção do TIN segue o método da triangulação de Delaunay.

Após a geração da imagem MNT é possível gerar imagens sombreadas e modelos digitais de elevação, auxiliando no entendimento da topografia da área, bem como sua relação com os lineamentos estruturais e dados aerogeofísicos.

3.2.1.4 Construção de banco de dados georreferenciado

Bonham-Carter (1994), define um sistema de informação geográfica (SIG) como um sistema computadorizado, para manipular dados espaciais. Segundo Araújo (1999), define-se SIG como um sistema para organização, padronização, indagação, análise e produção cartográfica de dados espaciais e seus atributos, com coordenadas conhecidas ou arbitrárias e relações topológicas definidas. Define-se geoprocessamento como as atividades que envolvem a utilização de sistemas para a manipulação de informações espaciais com coordenadas de sistemas conhecidos ou sistemas definidos arbitrariamente.

A utilização destas tecnologias é justificada pela facilidade de entrada e recuperação de dados no sistema, bem como pelas inúmeras metodologias de análise por geoprocessamento. Dessa forma, as imagens processadas foram inseridas num banco de dados espacial de modo a se realizar a fotointerpretação dos lineamentos e das zonas de juntas. Posteriormente, o mapa morfoestrutural e os dados de poços e fontes cadastrados, mapas geológico, pedológico, geomorfológico e topográfico, MNT, declividade e dados de campo também foram inseridos neste banco de dados para se realizar as análises espaciais entre os parâmetros prospectivos e os dados de produtividade de poços e ocorrências de fontes.

Além disso, na etapa de avaliação da favorabilidade para ocorrência de água subterrânea é fundamental que todas as informações de interesse estejam armazenadas num banco de dados georreferenciado, permitindo a utilização das ferramentas de análise.

3.2.1.5 Interpretação dos Dados Aeromagnetométricos

Segundo Vasconcellos *et al.* (1994), na interpretação dos alinhamentos magnéticos, geralmente indicativos de contatos litológicos e/ou fraturamentos, considera-se as seguintes características nos mapas de contorno e imagens:

- a) interrupção de altos magnéticos;
- b) interrupção de baixos magnéticos;
- c) mudança de gradiente;
- d) padrões de contorno em linhas retas.

A distribuição da magnetita pode ser influenciada pela tectônica, pois a tectônica tem importância fundamental no controle dos caminhos pelos quais os fluidos percolam as rochas. Falhamentos em grande escala, que se estendem a grandes profundidades, podem servir de condutor para soluções quentes, criando um ambiente redutor, onde a magnetita pode se depositar nas paredes das rochas, tanto pela redução da hematita quanto pela precipitação a partir de complexos de cloretos férricos em solução (Vasconcellos *et al.*, 1994).

Inversamente, água de superfície contendo oxigênio, infiltrando-se nas zonas de cisalhamento, destrói a magnetita, oxidando-a para hematita. Em ambos os casos, a distribuição original da magnetita é alterada em função dos processos tectônicos.

3.2.1.6 Fotointerpretação das imagens e dos produtos integrados

Utilizou-se o método sistemático de fotointerpretação desenvolvido por Guy (1966), Riverau (1972) e Soares e Fiori (1976), adaptado para aplicações em imagens de satélite por Veneziani e Anjos (1982), o qual se baseia no estudo das propriedades estruturais das feições e ou objetos contidos nas imagens fotográficas para a definição do modelo de um fenômeno.

O método sistemático possui um modo de aplicação único, isto é, busca o encadeamento lógico dos elementos texturais, estabelecendo uma correspondência entre a imagem

fotográfica, o resultado de uma interpretação de um dado tema e o modelo de um fenômeno. Em outras palavras, através da análise das propriedades das formas, procura-se estabelecer a relação função x objetos, feições, condições (Veneziani, 1988). A seguir serão discutidas as etapas da aplicação deste método:

a) Fotoleitura

Consiste na identificação das feições ou objetos sobre as imagens fotográficas. Os elementos texturais que foram analisados neste trabalho são os de drenagem e de relevo, pois são feições de grande importância para a caracterização geológica, dado que a forma e a estruturação do relevo e da drenagem estão diretamente relacionados com o tipo de rocha (resistência à erosão, permeabilidade, etc) e com seu grau de deformação (rúptil a dúctil) .

Para facilitar a fotointerpretação o primeiro procedimento realizado é o traçado da rede de drenagem a partir de folhas topográficas e depois a complementação desta pelas imagens ETM+ (composição colorida 543 - RGB; bandas 4 e 5, primeiro componente principal e banda pancromática).

b) Fotoanálise

Consta do estudo das relações entre as imagens e a associação e ordenação de partes destas. Nesta etapa são realizados os seguintes procedimentos:

- traçado das feições retilíneas a ligeiramente curvas de drenagem e relevo para a elaboração do mapa de isofrequência de zonas de juntas;
- traçado dos grandes lineamentos estruturais para auxiliar, junto com o mapa da rede de drenagem, na elaboração do mapa morfoestrutural;
- traçado das feições retilíneas e paralelas da drenagem de primeira ordem, fortemente estruturadas, que podem indicar traços de foliação.

c) Fotointerpretação

A fotointerpretação baseia-se no estudo da imagem fotográfica visando a descoberta e avaliação, por métodos indutivos e dedutivos, para compreender os princípios e os processos aos quais criaram as feições e objetos identificados. Nesta etapa foram gerados os mapas traços de zonas de juntas, isofrequência de zonas de juntas, lineamentos estruturais, morfoestrutural e de foliações.

- Mapa de Lineamentos Estruturais

O termo lineamento definido por O'Leary *et al.* (1976) é uma feição linear mapeável, simples ou composta, contínua ou descontínua, da superfície terrestre, cujas partes estão alinhadas em um arranjo retilíneo ou suavemente curvo e que difere distintamente dos padrões de feições que lhe são adjacentes, refletindo um fenômeno de subsuperfície.

Segundo Lowman *et al.* (1987) e Harris (1991), nas imagens de satélite existe uma atenuação das feições topográficas localizadas na direção de iluminação do sensor, com variação de mais ou menos 20° . Como a imagem ETM+ foi adquirida sob condições de iluminação com fonte solar de azimuth 50° , as feições estruturais que apresentam direção aproximadamente N50E ($\pm 20^{\circ}$) são atenuadas ou não identificadas. Além disso, como a imagem ETM+ é de data recente, muitas vezes a interpretação de lineamentos pode ser prejudicada devido ao uso e ocupação do solo.

Para solucionar este problema pode-se utilizar imagens integradas com azimuth de iluminação solar (sensores ópticos) ou azimuth de imageamento (radar) diferentes, tais como TM-Radarsat ou Radarsat ascendente e descendente para interpretação dos lineamentos, como realizado por Madrucci (2000), porém o custo é elevado. Outra maneira de solucionar tais problemas é a integração digital da imagem óptica com dados aeromagnetométricos (fase do sinal analítico).

Os lineamentos estruturais foram obtidos a partir de interpretação em tela num SIG. Utilizou-se como base para a interpretação o produto integrado 1^o CP ETM+ - fase do sinal analítico. Este produto apresenta as informações estruturais fornecidas pela fase do sinal analítico (representadas pelos matizes) e as informações texturais de relevo e drenagem fornecidas pela imagem ETM+. Dessa forma, o produto integrado ETM+ e fase do sinal analítico possibilita ao fotointérprete uma análise conjunta das informações magnetométricas e de relevo e drenagem.

Realizou-se a interpretação observando-se as feições lineares de drenagem (preferencialmente) e de relevo fornecida pela imagem ETM+ e também pela resposta magnetométrica fase do sinal analítico (valores altos representados pela cor magenta) que indicam estruturas e descontinuidades com alguma expressão magnética. Além deste produto, utilizou-se também a imagem pancromática ETM+ (devido à resolução de 15 metros) e a rede de drenagem da área, em formato digital.

A rede de drenagem foi utilizada principalmente para comparação com as feições de drenagem interpretadas no produto integrado. Certos elementos lineares interpretados no produto integrado ETM+-fase do sinal analítico algumas vezes não aparecem na rede de drenagem digitalizada, principalmente em função da resposta da magnetometria.

O produto integrado ETM+ (1^o CP) e magnetometria (fase do sinal analítico) foi importante na interpretação dos lineamentos estruturais, principalmente nos locais onde a atividade antrópica é intensa, prejudicando a fotointerpretação destas feições estruturais representadas pelos alinhamentos de drenagem (Madrucci *et al.* 2003). Outras feições muito nítidas no produto integrado, se observadas unicamente na imagem ETM+ não aparecem (Figuras 3.2.7 e 3.2.8).

Fig. 3.2.7 – Imagem ETM+ (1CP) e lineamentos fotointerpretados.

Fig. 3.2.8 – Produto integrado ETM+ PC1 e fase do sinal analítico e os lineamentos fotointerpretados.

Além disso, algumas características dos alinhamentos de drenagem e relevo permitem a sua interpretação tectônica. A Tabela 3.2.1 apresenta algumas características dos alinhamentos de drenagem e relevo. Alguns tipos de lineamentos podem ser interpretados como zonas de cisalhamento dúcteis e dúcteis/rúpteis em função de indicadores cinemáticos observados nas imagens e em afloramentos.

TABELA 3.2.1 – CARACTERÍSTICAS DOS ALINHAMENTOS DE RELEVO E DRENAGEM

	Fatores diagnósticos	Exemplos
Alinhamentos de relevo e drenagem	Traço retilíneo a curvilíneo; modifica a orientação dos traços de acamamento-foliação.	Falhamento transcorrente:
	Traço arqueado; condiciona assimetrias de relevo e drenagem; condiciona o padrão e a uniformidade da rede de drenagem; condiciona diferenças de densidade de lineações de relevo e drenagem; dá origem a quebras positivas e negativas de relevo.	Falhamento inverso/empurrão:
	Traço retilíneo; não condiciona assimetria de drenagem; não condiciona a uniformidade da rede de drenagem.	Falhamento normal:
	Padrão amendoado, refletido na rede de drenagem e em feições de relevo. Foliação milonítica apresentando variações de direção e mergulho.	Zona de cisalhamento:

Fonte: Modificada de Veneziani (1987); Hasui e Costa (1991).

A Figura 3.2.9 apresenta os principais lineamentos, interpretados como zona de cisalhamento dúctil de baixo ângulo (empurrão) e zonas de cisalhamento transcorrentes dúctil-rúptil (alto ângulo).

Fig. 3.2.9 - Imagem ETM+ pancromática e os principais lineamentos interpretados na área e seu significado tectônico.

Conforme pode ser observado nas Figuras 3.2.8 e 3.2.9, a presença de zonas de cisalhamento transcorrentes dextrais, representadas pela zona de cisalhamento de Monte Sião e zona de cisalhamento de Jacutinga é bem evidenciada devido ao padrão amendoado refletido em feições de relevo e de drenagem, bem como nas variações de direção da foliação. Além disso, nota-se o padrão de lineamentos bem marcados, de direção NE-SW, evidenciados pelas altas respostas magnetométricas.

Assim como verificado por Zanardo (1987), nota-se que a zona de cisalhamento de Monte Sião, de direção aproximada N30E, mostra uma inflexão que tende ao paralelismo com a zona de cisalhamento Jacutinga, de direção aproximada N65E (Figura 3.2.9). O cavalcamento mapeado por Sad *et al.* (1982) aqui definido como zona de cisalhamento Ibitinga, de direção NE-SW e empurrão segundo SE-NW, também foi identificado com base na fotointerpretação dos lineamentos e está bem marcado pelas altas respostas magnetométricas.

Dessa forma, o mapa de lineamentos estruturais neste trabalho, corresponde ao mapa de zonas de cisalhamento dúcteis e dúcteis-rúpteis (de idade Pré-Cambriana) presentes na área. Nota-se a predominância das estruturas de direção N45E (que correspondem à direção de cisalhamento principal Y), N30E e N60E (que correspondem às direções de cisalhamento secundárias P e R respectivamente). As direções N10W e N60W que correspondem as direções de X e R' também são identificadas.

A importância dos lineamentos no estudo de aquíferos fraturados consiste no fato de que estas feições representam grandes estruturas tectônicas. Na área de estudo representam zonas de cisalhamento Pré-Cambrianas de baixo ângulo (dúctil) e de alto ângulo (dúctil-rúptil). Além disso, como as estruturas Pré-Cambrianas representam zonas de fraqueza, reativadas por processos tectônicos posteriores, também estão associadas às regiões mais fraturadas no terreno e conseqüentemente podem representar regiões mais favoráveis à infiltração, circulação e armazenamento de água subterrânea. A Figura 3.2.10 apresenta estilos de distribuição de fraturas observadas ao longo de lineamentos.

Fig. 3.2.10- Estilos de distribuição de fraturas observadas ao longo de lineamentos (Parizek, 1987 *apud* Fernandes, 1997).

A partir do mapa de lineamentos (que corresponde ao mapa de zonas de cisalhamento) foram gerados os seguintes mapas: de lineamentos separados por direção, de intersecção de lineamentos, de distância de lineamentos (*buffers*), de distância da intersecção de lineamentos, de densidade de lineamentos (contagem de lineamentos por unidade de área) e de densidade de lineamentos por comprimento (soma do comprimento de lineamentos por unidade de área). Esses mapas foram utilizados na etapa de análise dos parâmetros prospectivos, para a definição da importância de cada um deles na produtividade de poços e também nas análises de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea.

- Mapa de Isofrequência de Zonas de Juntas

Utilizando-se do mapa da rede de drenagem digitalizado a partir das cartas topográficas IBGE (em escala 1:50.000) e complementados com a imagem ETM+ (pancromática) foram digitalizadas as feições lineares retilíneas de drenagem) adotando-se um valor arbitrário de 0,25 cm (que corresponde a 250 m no terreno, escala 1:100.000). Esta dimensão foi fixada com o intuito apenas de facilitar a contagem durante o procedimento estatístico que envolve a elaboração de um mapa de curvas de isofrequência (contagem das zonas de juntas por unidade de área).

Os critérios adotados foram semelhantes aos utilizados por Veneziani (1987) e constam do seguinte (tanto para o traçado das feições lineares quanto para a sua interpretação):

- a) delinear apenas e/ou preferencialmente as feições transversais aos eixos de simetria-assimetria da drenagem e/ou relevo. Isto porque as feições paralelas a estes eixos, em áreas deformadas por processos compressivos, são, quase sempre, representantes de foliações;
- b) delinear as feições retilíneas, pois estas representam a intersecção de planos de fratura verticais com a superfície do terreno. Isto é importante porque os sistemas de fraturas verticais que se estendem por vários quilômetros (até centenas de quilômetros) são representantes de linhas de fraqueza crustal, reativadas por processos distensivos. Já as feições ligeiramente a medianamente curvilíneas, representam a intersecção de planos de fraturas com médios a baixos ângulos de mergulho (devido aos efeitos erosivos) e normalmente são resultantes de deformações localizadas, como dobras flexurais. Neste caso iriam comprometer a análise estatística para a definição das antigas linhas de fraqueza crustal reativadas;
- c) fratura: adotou-se o conceito de Ramsay e Huber (1987) que a define como um plano de ruptura em um corpo rochoso que pode ser considerado junta quando não há movimento relativo entre os blocos separados por tal plano e, falha, quando existe movimento;

- d) zonas de juntas: adotou-se os conceitos de Plika (1974), Veneziani (1987), Crepani (1988), que se referem a sistemas de fraturas paralelos a subparalelos, com espaçamento bem definido (centimétrico a métrico), estendem-se por dezenas até centenas de quilômetros e podem atingir grandes profundidades.

Alguns autores como Nickelsen (1974), Plika (1974), Veneziani (1987), Crepani (1988) descrevem algumas características importantes das zonas de juntas como:

- a) a quantidade de zonas de juntas ou de um conjunto em particular, aumenta próxima a falhas expressivas, relacionando a associação genética das falhas ao conjunto de zonas de juntas;
- b) os conjuntos de zonas de juntas podem emergir de rochas mais antigas e se estender verticalmente através de rochas sobrejacentes mais novas;
- c) podem ser usadas para determinar o padrão tectônico de uma determinada área, pois esboçam as feições tectônicas e fornecem uma visão preliminar de linhas tectônicas importantes;
- d) alguns conjuntos de zonas de juntas, representados por grandes lineamentos, são persistentes desde o Arqueano, afetam a sedimentação, a tectônica, a expressão fisiográfica e até mesmo a localização de depósitos minerais;

Uma grade de 2 x 2 cm que corresponde a 2.000 metros no terreno (escolhida de modo empírico pois, segundo Veneziani (1987), mostrou-se a mais adequada para trabalhos na escala 1:250.000 e 1:100.000) foi gerada e "sobreposta" às feições lineares de drenagem, para que se pudesse fazer uma contagem destas feições e posteriormente sua interpolação. Esse procedimento de contagem das feições para cada célula (sendo plotados no centro equivalente a cada quadrado o valor obtido da contagem) e a interpolação destes valores para gerar uma superfície foi feita utilizando-se um SIG (Arc View).

Foram realizados alguns testes com dois diferentes interpoladores (inseridos no SIG utilizado): inverso do quadrado da distância e *spline*. O melhor resultado obtido foi com o interpolador *spline*.

O mapa de isofrequência de zonas de juntas (em tons de cinza) foi transformado numa superfície colorida (RGB), atribuindo-se cores às classes existentes, para facilitar a interpretação. A Figura 3.2.11 apresenta o mapa de isofrequência de zonas de juntas.

Foram definidas 9 classes de densidade de sistemas de fraturas (obtidas pela contagem dos traços de fraturas), mostrando o zoneamento das áreas com maior concentração de deformação rúptil (Figura 3.2.12). As classes definidas foram as seguintes: 0-1,7; 1,7-3,0; 3,0-4,2; 4,2-5,5; 5,5-6,8; 6,8-8,1; 8,1-9,4; 9,4-10,7; 10,7-12. Foram consideradas como áreas de

alta frequência as classes 8,1-9,4; 9,4-10,7 e 10,7-12 e de baixa frequência as classes 0-1,7; 1,7-3,0 e 3,0-4,2.

As maiores frequências localizam-se nas porções central e sul da área de estudo. Nestas áreas ocorrem gnaisses, migmatitos, milonitos e quartzitos. Para uma análise das direções principais das zonas de juntas, elaborou-se o gráfico de rosetas (Fig. 3.2.13). Conforme pode ser observado as direções das zonas de juntas apresentam uma distribuição preferencial segundo as direções N-S, N20-30E, E-W e N50-70E. Estas direções coincidem com as direções de X, P, Y, T e R pré-cambrianas, o que indica a reativação destas linhas de fraquezas crustais, porém com movimentos verticais.

Fig. 3.2.12 - Mapa de isofrequência de zonas de juntas.

Fig. 3.2.13 - Diagrama de rosetas das direções das zonas de juntas.

Uma grande vantagem apresentada pelo mapa de isofrequência de zonas de juntas é que este indica as áreas mais fraturadas, bem como as direções principais dos sistemas de fraturamentos. Estas regiões são preferenciais à infiltração, circulação e armazenamento de água subterrânea na região, que está diretamente relacionada aos sistemas de fraturamentos.

- Mapa Morfoestrutural

O mapa morfoestrutural foi elaborado a partir do mapa de drenagem e do mapa de lineamentos estruturais. Baseou-se na análise das simetrias - assimetrias da rede de drenagem e, também, da tropia, que permite o traçado de curvas não cotadas as quais indicam o comportamento das grandes flexuras regionais.

Os princípios da análise morfoestrutural foram desenvolvidos para a geologia do petróleo em bacias sedimentares e são descritos em Riverau (1972), Mattos *et al.* (1982), Soares *et al.* (1982) entre outros.

Vários autores (Sampaio, 1987; Oliveira, 1997, Madrucci *et al.*, 2002) elaboraram mapas morfoestruturais para regiões cristalinas, (como é o caso da área de estudo deste trabalho) baseados em duas premissas fundamentais:

- a) Esforços compressivos significativos, capazes de gerar deformações acentuadas (dúcteis) nas rochas, encerraram-se no final do Neoproterozóico em todo o território brasileiro, de um modo geral. A partir desta época passaram a predominar esforços distensivos que resultaram no surgimento das grandes sinéclises (bacias do Paraná, Maranhão, Amazonas) e grábens, tais como Pimenta Bueno (RO), Cachimbo (MT), entre outros, no início do Fanerozóico. Um pico de distensão generalizada ocorreu no Mesozóico, representado por derrames e intrusões, como por exemplo a Formação Serra Geral (bacia do Paraná) e as alcalinas do Itatiaia.

Outro pico deu-se no Terciário, com a formação de bacias, tais como a de São Paulo e Taubaté, além de sedimentação generalizada e aluvio-coluvionar.

- b) Este tectonismo distensivo provocou a reativação das antigas linhas de fraqueza crustal, que até o final do Pré-Cambriano exerciam controles deformacionais compressivos na área estudada. O movimento por gravidade (falhas normais, reversas, etc) de blocos, nas regiões cristalinas envolveu todo o pacote litoestrutural pré-existente, soerguendo-o em determinados locais, rebaixando-o em outros, isto é, gerando flexuras de dimensões quilométricas até em escala de afloramentos e os "altos e baixos estruturais" determinados pelas flexuras, estão refletidos na rede de drenagem atual.

Desta forma, analisando-se a simetria - assimetria e a tropia da rede de drenagem, bem como os limites dos blocos determinados pelas antigas linhas de fraqueza crustal é possível delinear curvas não cotadas que representam as flexuras (altos e baixos estruturais). É importante

ressaltar, como nas demais áreas temáticas de mapeamento, que o detalhe morfoestrutural depende da escala de trabalho. No caso, é compatível com a escala 1:100.000, isto é, o mapa representa feições regionais.

Na elaboração deste mapa também foi realizada a identificação dos principais lineamentos que ocorrem na área e que teriam influência na definição dos desenhos das anomalias morfoestruturais, seja truncando ou deslocando a anomalia, fechando ou limitando a área da anomalia ou mesmo invertendo o mergulho regional ou local.

O mapa morfoestrutural tem grande importância no estudo hidrogeológico, pois os altos morfoestruturais indicarão zonas de recarga e os baixos, zonas de acumulação, onde as estruturas verticais (que delimitam o basculamento dos blocos) em conexão com outras fraturas poderão induzir o maior fluxo de água subterrâneas em direção aos baixos morfoestruturais (Valente *et al.*, 2001).

Além disso, o mapa morfoestrutural auxilia no delineamento das linhas de tendência de fluxo de água subterrânea regional (Sampaio, 1987). As formas assimétricas de drenagem e relevo são indicativas da ocorrência de estratos inclinados, que mergulham no sentido dos afluentes mais longos (drenagem consequente).

As Figuras 3.2.14a e 3.2.14b apresentam um exemplo de modelo de tendência de fluxo de água subterrânea pela análise de assimetria de drenagem (mapa morfoestrutural). Em a, a situação mostrada em planta, obtida a partir da interpretação da imagem de satélite; em b, a interpretação estrutural desta situação.

Fig. 3.2.14a- Esquema do traçado de curvas morfoestruturais a partir da rede de drenagem e **3.2.14b-** modelo de tendência de fluxo de água subterrânea.

Segundo Sampaio (1987), esta avaliação de fluxo de água subterrânea deve ser empregada preferencialmente em regiões dominadas por unidades geológicas estratificadas ou foliadas.

Numa região constituída basicamente por rochas metavulcânicas e metassedimentares, estruturadas sob a forma de antiformes e sinformes (como por exemplo na região de Serra Negra e Águas de Lindóia), devido a tectônica de fraturamento regional gerar uma notável compartimentação de blocos, delimitados por descontinuidades estruturais, considera-se que o

delineamento das linhas de tendência esteja condicionado preferencialmente ao basculamento destes blocos. Isto significa afirmar que é viável a tendência de fluxo de água subterrânea em um bloco basculado ser discordante ao plano de vergência da foliação que nele está contido.

Neste caso o fluxo de água ocorrerá de forma mais intensa através de fraturas, segundo o sentido do caimento geral do bloco e culminará no seu limite, apesar de infiltrar-se também ao longo de estratos e foliações. (Sampaio, 1987). Cabe ressaltar que através de um estudo detalhado das estruturas presentes na área, ter-se-á uma definição mais confiável desta tendência de fluxo de água subterrânea.

Após confeccionado o mapa de morfoestruturas, este foi digitalizado, atribuindo valores para cada linha (modelo numérico de terreno). Posteriormente, gerou-se uma grade regular seguida por um modelo digital de elevação no formato imagem.

A Figura 3.2.15 apresenta o mapa morfoestrutural elaborado a partir dos lineamentos estruturais e das formas simétricas - assimétricas da rede de drenagem e da topia. Analisando-se este mapa, nota-se que as morfoestruturas estão condicionadas a um padrão marcado por altos e baixos estruturais, com suas formas e direções orientadas segundo as variações dos lineamentos presentes, que delimitam os limites dos blocos. Estes blocos podem ser identificados como compartimentos tectono-estruturais, com flexuras positivas e negativas que estão condicionadas aos basculamentos destes. Os altos e baixos estruturais são relacionados às reativações distensivas ocorridas principalmente no Terciário.

A região de Amparo, Serra Negra, Águas de Lindóia, Lindóia e Socorro apresentam um padrão bem marcado de altos e baixos morfoestruturais, alinhados segundo a direção NE-SW.

Fig. 3.2.15- Mapa morfoestrutural elaborado, a partir dos lineamentos estruturais e das formas simétricas - assimétricas da rede de drenagem e da topia.

3.2.1.7 Análises por geoprocessamento e geração do modelo hidrogeológico prospectivo regional

Segundo Rostirolla (1997), na fase inicial de programas exploratórios, a organização do conhecimento geológico é uma etapa fundamental para se hierarquizar os alvos com melhor possibilidade de sucesso. O sucesso na prospecção é proporcional ao grau de desenvolvimento do modelo de depósito e à qualidade da informação.

Muitos autores realizam estudos para prospecção de água subterrânea em terrenos cristalinos e os resultados de acordo com fatores de maior importância são variados, não havendo um modelo hidrogeológico prospectivo "padrão" para esse tipo de terreno.

Dessa forma, com o objetivo de se reconhecer os principais parâmetros relacionados a infiltração, circulação e armazenamento de água subterrânea, para a região do circuito das águas, realizaram-se análises estatísticas entre os dados de produtividade de poços e os diversos parâmetros a serem analisados.

3.2.1.8 Análise de favorabilidade utilizando técnicas de geoprocessamento

- Trabalhos anteriores

Técnicas de análises por geoprocessamento para a geração de mapas de favorabilidade mineral têm sido utilizadas com sucesso por diversos autores no estudo de ocorrências petrolíferas e de minerais metálicos (Bonham-Carter *et al.*, 1988; Perrota, 1996; Rostirolla, 1997; Rostirolla *et al.*, 1998; Harris *et al.*, 2001 e Araújo e Macedo, 2002). Porém, poucos trabalhos utilizam técnicas de geoprocessamento para a elaboração de mapa de favorabilidade à ocorrência de água subterrânea em terrenos cristalinos.

Krishnamurthy, *et al.* (1996) utilizam técnicas de geoprocessamento para identificar e delinear o potencial hidrogeológico de uma área com 780 m². Utilizam dados litológicos, lineamentos estruturais, geomorfológicos, densidade de drenagem, tipo de solos e declividade do terreno. Agrupam os polígonos de cada um dos temas de acordo com os pesos atribuídos às classes dos mapas. São os autores que atribuem os pesos às classes.

Sander (1997) com o objetivo de identificar áreas promissoras para estudos de detalhe nas regiões de Botswana e Gana (África), utiliza a técnica de estatística Bayesiana. Os critérios escolhidos para a análise foram lineamentos estruturais (interpretados em imagens de satélite), vegetação, drenagem e geologia, e foi utilizada a opinião de peritos para a definição de pesos. Como resultado final foram elaborados gráficos de correlação entre os dados de produtividade dos poços e as probabilidades obtidas.

Barreto *et al.* (2000) apresentam o mapa de favorabilidade hidrogeológica para o Estado do Rio de Janeiro (escala 1:250.000), utilizando análise multicriterial e técnicas de geoprocessamento. Os parâmetros utilizados na análise são: declividade, densidade de fraturas, tipo de solos, uso do solo e cobertura vegetal, litologia e densidade de drenagem. Neste caso, são os autores que atribuem os pesos às classes e utilizam dados de vazão de poços para confrontar com as classes de favorabilidade do mapa final.

Moore *et al.* (2002) com o objetivo de selecionar áreas para estudos de detalhe em New Hampshire (Estados Unidos) utilizam técnicas de regressão multivariada para avaliar quais fatores são positivamente ou negativamente relacionados com a produtividade dos poços. Como fatores positivos, tem-se a proximidade de lineamentos, tamanho da área de drenagem em gradientes acima do poço, algumas unidades geológicas. Os fatores negativamente relacionados com a produtividade são locais em topos de morros, locais com inclinações íngremes em altas elevações e algumas unidades geológicas. Como resultado final, os autores elaboraram um mapa de favorabilidade.

A diferença dos mapas elaborados nesta tese em relação aos estudos de Krishnamurthy *et al.* (1996), Barreto *et al.* (2000), entre outros, consiste principalmente nos seguintes fatores:

a) realizaram-se análises de favorabilidade utilizando-se dois métodos (Bonham- Carter, 1994): o conduzido pelo conhecimento (*knowledge driven*) e o conduzido pelos dados (*data driven*) e os resultados são comparados.

b) realizaram-se análises quantitativas entre os prováveis parâmetros prospectivos e a produtividade de poços e ocorrência de fontes. Essas análises foram realizadas com o objetivo de compreender melhor a influência destes fatores na área de estudo, pois de acordo com resultados obtidos por vários autores (Greenbaun, 1992; Banks *et al.*, 1992 *apud* Heriksen, 1995), não existe um consenso entre os parâmetros que influenciam na produtividade de poços em regiões cristalinas.

c) na análise de favorabilidade pelo método conduzido pelo conhecimento, foram utilizadas as opiniões de peritos, que são geólogos com experiência em hidrogeologia em terrenos cristalinos. Estes peritos responderam a um questionário a respeito da importância dos parâmetros prospectivos, onde foram atribuídos pesos às classes. A importância de se utilizar opiniões dos peritos, consiste na utilização destas opiniões para melhor definir os fatores e pesos utilizados nas análises de favorabilidade. Araújo (1999) utilizou a opinião de peritos para auxiliar na definição de fatores e pesos em análises de favorabilidade mineral por geoprocessamento e obtém resultados satisfatórios. Sander (1997) utilizou a opinião de peritos (também entrevistados por meio de questionário) para dar o peso aos diferentes dados temáticos para a avaliação de água subterrânea em terreno cristalino;

d) no método conduzido pelo conhecimento, os pesos dados aos fatores e às classes não são apenas valores médios dos pesos dados pelos peritos. A opinião dos peritos foi utilizada conjuntamente com a análise quantitativa realizada pela autora e também com dados de revisão bibliográfica dos modelos hidrogeológicos em terrenos fraturados para a definição de fatores, classes e seus respectivos ponderadores, auxiliando na construção de um modelo conceitual regional e na geração do mapa de favorabilidade.

e) na análise de favorabilidade pelo método conduzido pelos dados, utilizaram-se dados de poços com valores de produtividade considerados elevados (acima de $0,4 \text{ m}^3/\text{h/m}$) e ocorrência de fontes.

f) a avaliação dos resultados dos mapas de favorabilidade elaborados a partir dos dois métodos, foi feita pela tabulação cruzada entre esses mapas e dados de produtividade de poços os quais não foram utilizados na análise dos parâmetros prospectivos. Além disso, foi realizada uma comparação entre os mapas de favorabilidade usando o coeficiente de correlação de classes *Spearman*.

- Análise de Favorabilidade – conceitos fundamentais

Segundo Bonham-Carter (1994), a análise num SIG, além de ser conduzida visualmente também pode ser conduzida por medidas, cálculos estatísticos, regressões e outras operações. Segundo Araújo (1999), a definição de mapas de favorabilidade envolve a análise de dados espaciais visando a predição da ocorrência de mineralizações, no caso deste trabalho, da ocorrência de água subterrânea.

Para a análise de favorabilidade mineral, é possível utilizar dois métodos de quantificação: o conduzido pelo conhecimento (*knowledge-driven*) e o conduzido pelos dados (*data-driven*) (Bonham-Carter, 1994). O método conduzido pelos dados caracteriza-se pela utilização de ocorrências minerais (no caso os dados de produtividade de poços tubulares e fontes) para, por indução, definir zonas favoráveis à ocorrência de água subterrânea relacionadas às diversas características da área (como proximidade de lineamentos, geologia, morfoestruturas, etc.). O método conduzido pelo conhecimento utiliza um modelo de mineralização para a área de estudo (no caso seria um modelo hidrogeológico conceitual de fluxo e armazenamento de água subterrânea) e por dedução, a partir dos diversos dados, define zonas de favorabilidade à ocorrência das mineralizações (neste estudo seria a ocorrência de água subterrânea) associadas ao modelo utilizado.

Segundo Bonham-Carter (1994), o método conduzido pelo conhecimento pode ser aplicado através de diferentes modelos de análise, entre eles destacam-se o modelo lógico booleano e o modelo de índices somativos ou ponderados ("*index overlay*"). Já o método conduzido pelos dados pode basear-se no modelo de pesos de evidência ("*weights of evidence*"), regressão logística e redes neurais.

- Modelo Lógico Booleano

Segundo Bonham-Carter (1994), neste método cada mapa pode ser considerado um nível de evidência. As evidências apresentadas em cada mapa são reduzidos a dois valores: **1** quando a proposição é satisfeita (verdadeira) e **0** quando a proposição não é satisfeita (falsa). A combinação de diversos mapas pode ser feita a partir dos operadores lógicos booleanos, que são: intersecção (**AND**), união (**OR**), exclusão (**NOT**), exclusão comum a todos os conjuntos (**XOR**).

O operador **AND** considera verdadeira apenas a intersecção dos conjuntos. Já o operador **OR** considera como verdadeira a união de todos os conjuntos. O operador **NOT** corresponde a uma operação de exclusão. O operador **XOR** apresenta um resultado verdadeiro somente se A e B tiverem valores diferentes, de outra maneira o resultado é falso (Araújo, 1999). A Figura 3.2.16 apresenta graficamente os operadores, utilizando o diagrama de Venn.

Fig. 3.2.16 – Operadores lógicos booleanos

Dessa forma, segundo Bonhan-Carter (1994), aplicação do modelo lógico booleano resultará num mapa dividido em duas classes: locais favoráveis e locais desfavoráveis. A vantagem da utilização do método booleano é a simplicidade. Porém, ao se utilizar o modelo booleano, considera-se que os critérios analisados na favorabilidade possuem igual importância. Assim sendo, uma análise mais detalhada requer a ponderação das evidências baseadas na sua significância.

- *Modelo de índices somativos ("Index overlay")*

Segundo Bonhan-Carter (1994), neste método cada mapa de entrada é usado como evidência e pode possuir diferentes pesos, dependendo da sua significância na hipótese considerada. Se os mapas são multi-classes, para cada classe do mapa é dada uma pontuação diferente. É conveniente definir as pontuações numa tabela de atributos para cada mapa de entrada. A média da pontuação é então definida como:

$$S = \frac{\sum_i^n S_{ij} \cdot W_i}{\sum_i^n W_i}$$

onde: **S** é a pontuação ponderada para um objeto (polígono, pixel)

W_i é o peso para o i-ésimo mapa de entrada

S_{ij} é a pontuação para a classe enésima do i-ésimo mapa; o valor de j depende da classe de cada ocorrência.

Esta técnica é caracterizada pela definição prévia da importância relativa de cada dado espacial e seus respectivos atributos. Esta importância relativa pode ser resumida na expressão de pesos diferentes para cada mapa temático. A combinação dos mapas de diferentes pesos tem como objetivo gerar uma saída em que se definem várias classes, onde os maiores valores indicarão um maior número de condições satisfeitas e os menores valores as áreas de menor probabilidade de se satisfazer às condições do modelo utilizado. Os

métodos de análise por combinação linear ponderada (CLP) e média ponderada ordenada (MPO) são variações do modelo de índices somativos e serão descritas no item Resultados.

Dessa forma, na análise conduzida pelo conhecimento (análise multicriterial por combinação linear ponderada e média ponderada ordenada), após definido o modelo hidrogeológico utilizam-se as opiniões de peritos, juntamente com a análise quantitativa realizada e também com revisão bibliográfica dos modelos hidrogeológicos em terrenos fraturados para a definição de fatores, classes e seus respectivos ponderadores. A geração do mapa de favorabilidade à ocorrência de água subterrânea baseou-se na utilização de critérios múltiplos por geoprocessamento. Para a avaliação do método utilizado e dos resultados obtidos pelo mapa de favorabilidade realizaram-se tabulações cruzadas entre este mapa e as ocorrências de fontes e novos dados de produtividade de poços. A Figura 3.2.17 apresenta o fluxograma das análises multicriterial (método conduzido pelo conhecimento).

Fig. 3.2.17 – Fluxograma com os passos da análise multicriterial (método conduzido pelo conhecimento).

- Método Bayesiano: Modelo de Pesos de Evidência

No modelo de pesos de evidência (probabilidade Bayesiana), a partir de um conjunto de dados representativo das ocorrências (pontos de treinamento) é considerada uma probabilidade

prévia de ocorrência dos depósitos e os critérios diagnósticos dos processos de mineralização (mapas de evidência) são então sujeitos à análise Bayesiana (Rostirolla *et al.*, 1998; Carranza e Hale, 2000).

Dessa forma, a probabilidade posterior é calculada, baseada nos pesos de evidência para a presença ou ausência de determinados critérios diagnósticos de cada um dos mapas de evidência binários.

No modelo estatístico bayesiano, baseado em Agterberg *et al.* (1990), Bonham-Carter *et al.* (1989) e apresentado por Rostirolla *et al.* (1997), define-se um ponderador para permitir a representação das condições de necessidade e suficiência. Segundo este modelo, em todas as células avaliadas, a chance posterior $Ch(H|E_j^k)$ de ser encontrado um depósito (ou hipótese H) é dada pelo somatório da chance prévia $Ch(H)$ com os ponderadores w_j^k referentes às evidências E_j^k :

$$\ln Ch(H|E_j^k) = w_j^k + \ln Ch(H)$$

onde:

k : refere-se à presença (+) ou ausência (-) da variável.

w_j^k : razões de probabilidade.

Todos os níveis georreferenciados adicionais devem ser computados como mapas binários. Para E_j ($j=1, 2, 3, \dots, n$) mapas, o somatório é representado pelas seguintes equações:

$$\ln Ch(H|E_1^k \cap E_2^k \cap \dots \cap E_n^k) = \sum_{j=1}^n w_j^k + \ln Ch(H)$$

$$Ch(H|E_1^k \cap E_2^k \cap \dots \cap E_n^k) = \exp \left\{ \sum_{j=1}^n w_j^k + \ln Ch(H) \right\}$$

Dessa forma, o método consiste em se determinar a probabilidade de um evento (probabilidade posterior ou favorabilidade para cada célula avaliada), a partir da chance posterior (Rostirolla, 1997).

Assim sendo, na análise conduzida pelos dados (análise bayesiana – pesos de evidência), após definido o modelo hidrogeológico, selecionam-se os mapas de evidência e calculam-se os pesos de evidência (w^+ e w^-) para cada classe dos mapas temáticos; posteriormente definem-se os fatores fortemente positivos à ocorrência de água subterrânea e elaboram-se mapas binários os quais serão atribuídos os pesos w^+ e w^- . Com base nos mapas binários, realiza-se o

teste de independência condicional e por fim, elabora-se o mapa de favorabilidade (mapa de probabilidade posterior), com base na probabilidade prévia da ocorrência e nos pesos de evidência (w^+ e w^-) de cada mapa envolvido na análise. Para a avaliação do método utilizado e dos resultados obtidos pelo mapa de favorabilidade realizam-se tabulações cruzadas entre este mapa e os novos dados de produtividade de poços. A Figura 3.2.18 apresenta o fluxograma da análise de pesos de evidência (método conduzido pelos dados).

Fig. 3.2.18 – Fluxograma com os passos da análise por pesos de evidência (método conduzido pelos dados).

A análise booleana foi realizada no programa *Arc View* e as análises por combinação linear ponderada e média ponderada ordenada foram realizadas no programa *Idrisi*. A análise de pesos de evidência foi realizada no programa *Arc View*, com a extensão *Spatial Data Modeller* (Kemp *et al.*, 2001). A comparação entre os diferentes mapas de favorabilidade também foi realizada no programa *Arc View* (extensão *Spatial Data Modeller*). Detalhes sobre os procedimentos das análises multicriterial e por pesos de evidência serão apresentados no Capítulo Resultados e Discussões.

3.2.2. Estudo de detalhe

3.2.2.1 Fotointerpretação

- Traçado de fraturas das fotografias aéreas

Utilizou-se o método sistemático (Soares e Fiori, 1976). Foram interpretados os elementos texturais de relevo e drenagem, com ênfase às quebras negativas de relevo e à estruturação da rede de drenagem.

A quebra negativa constitui uma forma rebaixada no relevo, formada pela disposição estruturada das rupturas de declive com a concavidade voltada para cima. A estruturação da rede de drenagem está relacionada às lineações de drenagem retilíneas.

As zonas de fraturamento constituem zonas de desenvolvimento preferencial de linhas de drenagem retilíneas. Interpretam-se como traços de fratura quando estabelecidos sobre faixas de concentração de fraturamentos. Os traços de fratura correspondem a zonas de concentração de juntas. Zonas homólogas com maior densidade de traços de fratura refletem rochas de maior grau de ruptibilidade.

No estudo de água subterrânea em terreno cristalino, é importante identificar estas regiões mais fraturadas, pois estas são mais favoráveis à infiltração, circulação e armazenamento de água.

Realizou-se a fotointerpretação das fotografias referentes aos dois aerolevantamentos (de 1962, região de Serra Negra e de 1972, região de Lindóia), ambas em escala 1:25.000. Posteriormente as fotografias aéreas e as fraturas mapeadas foram georreferenciadas e todas as informações foram digitalizadas e integradas em ambiente SIG.

3.2.2.2 Método geofísico de eletrorresistividade

A escolha do método geofísico de eletrorresistividade foi feita em função da sua resposta em relação aos parâmetros de interesse, no caso deste estudo: a determinação da presença de água em discontinuidades das rochas, a profundidade do topo rochoso e a espessura do manto de alteração. As técnicas utilizadas neste trabalho são sondagem elétrica vertical (SEV) e caminhamento elétrico (CE). A seguir serão apresentados os princípios do método geofísico de eletrorresistividade, bem como das técnicas utilizadas.

- Eletrorresistividade

O método da eletrorresistividade permite obter de forma indireta o valor de resistividade elétrica (ρ) dos materiais geológicos em subsuperfície. Dentre todas as propriedades físicas das rochas e dos minerais, a resistividade elétrica (ρ) é a que apresenta o maior intervalo de variações. As Tabelas 3.2.2 e 3.2.3 exibem alguns valores deste parâmetro em rochas e minerais comuns.

TABELA 3.2.2 - EXEMPLO DE VALORES DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE ALGUNS MINERAIS, ROCHAS E ÁGUA

Mineral ou Rocha	Resistividade ($\Omega.m$)
Água superficial (rochas ígneas)	$0,1 - 3 \cdot 10^3$
Água superficial (rochas sedimentares)	$10 - 100$
Água do mar	$1 - 100$
Diabásio	$20 - 5 \cdot 10^7$
Basalto	$10 - 1,3 \cdot 10^7$
Gnaiss (seco)	$3 \cdot 10^6$
Gnaiss (fraturas preenchidas por água)	$6,8 \cdot 10^4$
Granito (seco)	$1,3 \cdot 10^6$
Granito (fraturas preenchidas por água)	$4,5 \cdot 10^3$
Xisto	$20 - 10^4$
Quartzito	$10 - 2 \cdot 10^8$
Folhelhos	$20 - 2 \cdot 10^3$
Conglomerados	$2 \cdot 10^3 - 10^4$
Arenitos	$1 - 6,4 \cdot 10^8$
Calcários	$50 - 10^7$

Fonte: Modificado de Telford *et al.* (1990).

TABELA 3.2.3 – VARIAÇÕES DA RESISTIVIDADE DE ROCHAS EM FUNÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA.

Rocha	% H ₂ O	Resistividade ($\Omega.m$)
Granito	0,31	$4,4 \cdot 10^3$
	0,19	$1,8 \cdot 10^6$
	0	10^{10}
Basalto	0,95	$4 \cdot 10^4$
	0	$1,3 \cdot 10^8$

Fonte: Modificado de Telford *et al.* (1990).

A execução desta metodologia se dá através da injeção de corrente elétrica no subsolo e da leitura da diferença de potencial obtida. A corrente elétrica é transmitida através de dois eletrodos cravados no solo, designados por **AB** ou eletrodos de corrente. A diferença de potencial, que se estabelece no local devido à passagem desta corrente elétrica, é medida por intermédio de um outro par de eletrodos, também cravados no solo e designados por **MN** ou eletrodos de potencial. Nesta metodologia podem ser adotadas duas técnicas de aquisição de campo: a sondagem elétrica vertical (SEV) e o caminhamento elétrico (CE).

a) Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

A Sondagem Elétrica Vertical (SEV) investiga as variações de resistividade elétrica com a profundidade, abaixo do ponto de interesse, isto é, investiga variações verticais em subsuperfície. As medidas são efetuadas através de um arranjo composto por quatro eletrodos, dispostos simetricamente em relação ao ponto investigado, o centro do arranjo. Utilizando-se o arranjo *Schlumberger*, os eletrodos de potencial (M e N) permanecem próximos a este ponto enquanto os de corrente (A e B) são progressivamente afastados a cada leitura efetuada. À

medida que se aumenta o espaçamento AB, maior será o volume amostrado em subsuperfície e, portanto, maiores serão as profundidades investigadas (Figura 3.2.19).

Figura 3.2.19 - Esquema de uma Sondagem Elétrica Vertical (SEV) utilizando o arranjo *Schlumberger*.

O posicionamento das SEV's deve permitir a abertura máxima dos eletrodos de corrente (A e B) sempre em condições de pouca variação topográfica e ao longo de uma linha reta. O arranjo mais utilizado é o *Schlumberger* onde o espaçamento entre os eletrodos de potencial (M e N) é muito pequeno em relação aos de corrente (A e B). A resistividade determinada é um valor aparente, resultado da contribuição de todo o pacote investigado, geralmente heterogêneo, e pode ser calculada através da seguinte fórmula:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

ρ_a = resistividade aparente ($\Omega.m$)

ΔV = diferença de potencial medida (V)

I = corrente elétrica (A)

K = fator geométrico que depende da disposição do quadripolo ABMN (m)

No processamento dos dados, utiliza-se uma curva em escala bi-log, onde os valores de resistividade aparente medidos são plotados no eixo das ordenadas, tendo como abscissa o espaçamento AB/2 correspondente. A interpretação desta curva fornece um modelo geoeletrico do ponto investigado, constituído por camadas plano paralelas, cada qual apresentando uma espessura com o respectivo valor de resistividade elétrica verdadeira (Figura 3.2.20).

Figura 3.2.20 - Exemplo de uma curva de campo e o respectivo modelo geolétrico.

Este modelo poderá ser correlacionado a um perfil geológico local, fornecendo informações, por exemplo, sobre profundidade do embasamento, espessura do manto de alteração, profundidade do nível d'água e caracterização de litologias (Figura 3.2.21).

Figura 3.2.21 - Exemplo de aplicação de uma SEV.

b) Caminhamento Elétrico (CE)

O caminhamento elétrico, ao contrário da SEV, é uma típica investigação horizontal a uma ou várias profundidades aproximadamente constantes com medidas efetuadas ao longo de perfis. Tem por objetivo a definição das variações laterais da resistividade em subsuperfície, encontrando grandes aplicações no mapeamento de contatos geológicos, identificação de zonas de falhas e fraturas, mapeamento de plumas de contaminação ou quaisquer estruturas ou corpos representados por uma heterogeneidade lateral de resistividade (Figura 3.2.22).

Figura 3.2.22 - Exemplo de aplicação de um caminhamento elétrico.

Os arranjos de campo utilizados para execução desta técnica são bastante variados. Neste trabalho utilizou-se o arranjo dipolo-dipolo. Segundo Gallas (2000), a grande vantagem da utilização do arranjo dipolo-dipolo é o fato de se tratar de um arranjo simétrico, sendo mais fácil a interpretação de uma pseudo-seção, principalmente quanto a determinar-se com segurança a posição de uma anomalia detectada. Neste arranjo, o quadripolo é alinhado ao longo do perfil e o espaçamento entre o dipolo ($x = AB = MN$) é definido de acordo com o objetivo do trabalho. A profundidade de investigação cresce à medida que se aumenta "R" e é dada teoricamente pelo valor $R/2$ (Figura 3.2.23).

Figura 3.2.23 – Caminhamento elétrico utilizando o arranjo dipolo-dipolo.

O valor da resistividade elétrica aparente é dado por

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

onde $K = 2 \cdot \pi \cdot G \cdot x$ e

$$G = \frac{1}{\left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} + \frac{1}{n+2} \right)}$$

ρ_a = resistividade aparente ($\Omega.m$)

ΔV = diferença de potencial medida (V)

I = corrente elétrica (A)

K = fator geométrico que depende da disposição do quadripolo ABMN (m).

As medidas de resistividade aparente podem ser efetuadas adotando-se várias profundidades de investigação ($n=1, 2, 3$, etc.) e são atribuídas à intersecção das linhas que partem 45° em relação ao centro dos dipolos AB e MN. A cada conjunto de medidas, os dipolos são deslocados ao longo do perfil. Como resultado, os dados são plotados e interpolados, gerando uma pseudo-seção de resistividade aparente, utilizada na interpretação. As pseudo-seções são representações úteis para a interpretação dos dados, porém não devem ser consideradas como uma imagem literal da subsuperfície, pois a profundidade de investigação não depende unicamente da configuração geométrica do arranjo utilizado, mas também dos contrastes das resistividades das litologias em subsuperfície. Por isso, estas não são as verdadeiras profundidades de investigação e nem suas resistividades reais, sendo denominadas de pseudo-seções (Hallof, 1957 *apud* Edwards, 1977). A interpretação de anomalias é geralmente feita de forma qualitativa ou semi-qualitativa, ou utilizando-se programas para inversão dos dados e geração de modelos geoeletricos.

c) Inversão de dados e correção topográfica

O método de inversão consiste na determinação de um modelo bi-dimensional (2-D) de resistividade a partir do conhecimento da geologia local e dos dados obtidos nos levantamentos elétricos de campo (Griffiths e Barker, 1993). Neste trabalho utilizou-se o programa RES 2D INV (Geotomo Software, 2003).

O modelo 2-D usado neste programa de inversão divide a subsuperfície num número de blocos retangulares. O arranjo dos blocos é fixado à distribuição dos dados na pseudo-seção, portanto o número de blocos não deve exceder o número de dados. O programa determina a resistividade dos blocos retangulares que apresentarão uma pseudo-seção de resistividade aparente que concorda com as medidas realizadas.

Para a definição da profundidade o *software* utiliza a técnica proposta por Edwards (1977) onde para o caso do arranjo dipolo-dipolo, a espessura da primeira camada fica a 0,3 vezes o espaçamento dos eletrodos e a profundidade de cada camada subsequente normalmente aumenta 10%.

O programa utiliza na rotina de inversão uma técnica de otimização denominada de "*smoothness-constrained least-squares*" (Groot-Hedlin & Constable, 1990; Sasaki, 1992). Esta otimização procura reduzir a diferença entre os valores de resistividade aparente calculados e os medidos em campo, ajustando a resistividade do modelo de blocos. A medida desta diferença é dada pelo "*root mean squared (RMS) error*" (Loke e Barker, 1996).

Além da necessidade da utilização de técnicas de inversão dos dados de eletrorresistividade para uma interpretação mais condizente com a realidade, Fox *et al.* (1980) apresentam resultados da influência da topografia nas anomalias de resistividade do arranjo dipolo-dipolo (Figura 3.2.24).

Fox *et al.* (1980) concluem que vales produzem uma resistividade aparente baixa (na porção central) na pseudo-seção de resistividade, margeados por zonas de alta resistividade aparente. Topos produzem um alto na porção central, margeados por baixos. Os efeitos topográficos são importantes para declividades com ângulos de 10 graus ou mais e comprimento de rampas equivalente a um comprimento do dipolo ou maior. Essas anomalias induzidas pelo terreno podem causar interpretações errôneas se a topografia não foi incluída na modelagem numérica. Segundo os autores a técnica computacional dos elementos finitos soluciona o problema da topografia. O programa de inversão utilizado neste trabalho possui um módulo de correção topográfica que utiliza a técnica dos elementos finitos.

Fig. 3.2.24 – Anomalias de resistividade aparente em vale, em topo e em declividades de 30°.

Fonte: Fox *et al.* (1980).

- Equipamentos

Nos levantamentos de eletrorresistividade utilizou-se o resistivímetro *Terrameter*, modelo SAS 300B, fabricado pela empresa sueca ABEM. O equipamento é composto de um sistema

contendo transmissor e receptor em uma única unidade, alimentado por bateria de NiCd. A corrente transmitida é um valor fixo, ajustado através de um seletor, podendo variar de 0,2 a 500 mA. O sinal é enviado com mudança de polaridade da corrente, minimizando eventuais problemas de polarização de eletrodos. O potencial espontâneo (SP) é automaticamente compensado e a leitura fornecida pelo equipamento é a razão $\Delta V/I$, onde ΔV é a medida da diferença de potencial e I , a corrente injetada no terreno. Os valores de resistividade elétrica aparente podem ser obtidos multiplicando-se este valor lido pela constante geométrica conhecida (função da geometria do quadripolo, ABMN).

Para a melhoria da razão sinal/ruído, ou quando maiores profundidades de investigação são requeridas, pode ser utilizado um módulo-acessório denominado *booster*, que possibilita o aumento da potência do equipamento. Como acessórios, utilizaram-se fios de conexão, trenas não metálicas e eletrodos metálicos para o envio de corrente e leitura do potencial. A Figura 3.2.25 apresenta uma ilustração do equipamento ABEM Terrameter SAS 300B, utilizado no trabalho de campo.

Figura 3.2.25 - Resistivímetro SAS 300B. À esquerda, a unidade principal e o módulo de potência (*booster*). À direita, visão frontal do equipamento exibindo os seletores de operação do mesmo.

Devido às dimensões reduzidas do equipamento e sua portatibilidade, as operações de campo foram facilitadas, principalmente durante a execução da técnica do caminhamento elétrico, onde os deslocamentos do aparelho são constantes. A Figura 3.2.26 apresenta o equipamento em operação no campo.

Figura 3.2.26 - ABEM SAS 300B (unidade principal e *booster*) em campo (a). ABEM SAS 300B (unidade principal e *booster*) em campo e eletrodos durante um caminhamento elétrico (b).

3.2.2.3 Definição dos perfis geofísicos de eletrorresistividade, levantamento de campo e interpretação dos resultados

É importante lembrar que no estudo de aquíferos fraturados, para a melhor definição dos locais e das direções dos perfis de eletrorresistividade, é de extrema importância o mapeamento de fraturas em fotografias aéreas. Com base nas fraturas mapeadas o caminhamento é feito de modo a cruzar, o mais perpendicularmente possível as estruturas geológicas, para caracterizar de uma maneira mais adequada a área de interesse.

Com o objetivo de se avaliar quais as direções de fraturas são mais favoráveis à acumulação de água subterrânea, optou-se por realizar os levantamentos geofísicos de modo a cruzar o maior número de estruturas de diferentes direções.

Realizaram-se tanto na região de Lindóia como na região de Serra Negra três perfis de caminhamento elétrico e duas sondagens elétricas verticais. No caminhamento elétrico foi utilizado o arranjo dipolo-dipolo, com espaçamento entre eletrodos de 30m e com 5 níveis de investigação em profundidade. Os detalhes de cada caminhamento elétrico, bem como suas direções e extensões serão apresentadas no Capítulo Resultados e Discussões. Para a realização das sondagens elétricas verticais, utilizou-se o arranjo *Schlumberger*, com abertura máxima entre eletrodos variando em função da profundidade do topo rochoso. A definição do local das sondagens elétricas verticais foi feita também em função do caminhamento elétrico. A localização das SEVs e os detalhes de cada SEV também serão apresentados no capítulo Resultados e Discussões.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ocorrência de fontes

Conforme descrito no capítulo 2, a região do Circuito das Águas está inserida tectonicamente num domínio de zonas de cisalhamento dúctil a dúctil-rúptil (Pré-Cambrianas), de direção regional NE-SW. Estas zonas de cisalhamento são denominadas de zona de cisalhamento de Ibitinga (baixo ângulo, com empurrão de SE para NW), zona de cisalhamento Monte Sião (transcorrente dextral) e zona de cisalhamento de Jacutinga (transcorrente dextral). Com base no modelo tectônico adotado para a área de estudo (capítulo 2), a direção de máximo esforço compressivo é E-W e a direção da zona de cisalhamento principal está em torno de N45E (=Y). Observa-se na área um padrão anastomosado da zona de cisalhamento principal, influenciado pela zona de cisalhamento secundária em torno de N20E (=P) e em torno de N60E (=R).

De acordo com os dados obtidos nas proximidades das nascentes, tais como foliação milonítica, xistosidade e direções de fraturas, é possível correlacionar as direções de fraturamento com as feições dúcteis e dúcteis-rúpteis das zonas de cisalhamento transcorrentes Pré-Cambrianas.

As feições estruturais Pré-Cambrianas representam zonas de fraqueza crustal que foram reativadas pelos esforços distensivos posteriores. Dessa forma, as direções das estruturas Pré-Cambrianas são mais favoráveis à infiltração, circulação e armazenamento de água subterrânea.

Existem muitas nascentes (fontes) nesta região, sendo cadastradas 42. Yoshinaga (1990) realizou análises isotópicas nas águas das nascentes da região do Circuito das Águas e concluiu que estas águas são misturas de águas mais superficiais de águas mais profundas que ali emergem. Além disso, é possível verificar, na maior parte das nascentes, a surgência de água em fraturas, nas quais é possível realizar medidas estruturais. A Figura 4.1.1 apresenta o mapa geológico simplificado da região e as ocorrências de fontes e os poços cadastrados.

Fig. 4.1.1- Mapa geológico simplificado da região do Circuito das Águas, ocorrências de fontes e poços cadastrados.

Conforme pode ser observado, as fontes encontram-se alinhadas, segundo a direção N30E. Além disso, nota-se que as fontes na região de Lindóia, Águas de Lindóia e Serra Negra encontram-se a oeste da zona de cisalhamento de Monte Sião e as fontes na região de Socorro encontram-se a oeste da zona de cisalhamento de Ibitinga. A Figura 4.1.2 apresenta um detalhe do mapa geológico com as fontes cadastradas e dois perfis geológicos, um de direção E-W e outro de direção NW-SE.

Fig. 4.1.2- Detalhe do mapa geológico simplificado da região do Circuito das Águas com ocorrências de fontes e perfis geológicos.

Considerando-se as fontes como pontos de descarga do aquífero cristalino, as áreas de recarga encontram-se nas regiões potenciométricamente mais elevadas, uma vez que a água subterrânea, mesmo circulando em fraturas, movimenta-se segundo a diferença de carga hidráulica, de maior para menor. Analisando-se o perfil geológico CD, observa-se que a oeste da zona de cisalhamento Monte Sião e a oeste da zona de cisalhamento de Ibitinga, encontram-se regiões topograficamente mais elevadas. Além disso, devem ser considerados os tipos litológicos bem como o grau de fraturamento dessas rochas que favorecem a infiltração e circulação de água subterrânea.

O mapa morfoestrutural que representa as flexuras regionais geradas pelo basculamento de blocos (Figura 4.4.3) indica as possíveis áreas de recarga (altos morfoestruturais) e acumulação (intermediários e baixos morfoestruturais). Conforme pode ser observado as fontes localizam-se nas regiões mapeadas como baixos e intermediários. Outro aspecto importante a ser considerado na localização das fontes é o fato de que as zonas de cisalhamento Monte Sião e Ibitinga funcionam como uma zona de barreira de fluxos, o que faz com que as fontes se localizem a oeste destas.

Fig. 4.1.3- Mapa morfoestrutural, feições estruturais brasileiras, indicação da falha de Monte Sião (FMS) e Falha de Ibitinga (FI) e localização das fontes cadastradas.

A seguir serão descritas as ocorrências visitadas, bem como as apresentadas na literatura.

1. Fonte Santa Helena (Serra Negra)

A fonte Santa Helena é utilizada por uma empresa engarrafadora de água mineral (Água Mineral Serra Negra, fonte Santa Helena). Consiste de 4 nascentes, todas azulejadas, fechadas com uma tampa de vidro e que permanecem trancadas.

- nascente 1: a água surge das fraturas de um migmatito granítico, com bolsões de quartzo, pertencente ao Complexo Itapira e presença de foliação com orientação N35E/35SE. Existem duas direções principais de famílias de fraturas, uma com direcção em torno de N35E/35SE e N62E/35SE por onde se observa a surgência de água e outra com direcções N40W/90, N40W/85SW e N30W/90, representada por fraturas preenchidas (Figura 4.1.4a). As famílias de fraturas orientadas segundo as direcções N30E/35SE, N62E/35SE, N40W/85SW e N30W/90 coincidem com as direcções de P, R e R' Pré-Cambrianas, o que indica a reactivação destas linhas de fraqueza crustal, porém com movimentos verticais.

- nascente 2: a água surge de fraturas em um migmatito granítico pertencente ao Complexo Itapira, com foliação orientada N60E/75SE. Observam-se três famílias de fraturas predominantes, uma de direcção N10W/79NE a N4W/75NE, por onde se nota a surgência de água; outra de direcção em torno de N40W/77SW, as quais são cortadas pelas fraturas N10W/79NE; e a família de direcção N60E/75SE. Nas porções mais leucocráticas da rocha (ricas em feldspato potássico) nota-se a intensa alteração do feldspato. Tais fraturas são reactivações ao longo das estruturas Pré-Cambrianas X, R' e R (respectivamente).

- nascentes 3 e 4: a água surge das fraturas de um granito leucocrático, denominado de Granito Morungaba, de idade neoproterozóica (intrusivo no Complexo Itapira), com três famílias de fraturas: uma principal, com direcção em torno de N10E/79NE, por onde nota-se a surgência da água; e em torno de N61E/83NW; e de N62W/57SE, Figura 4.1.4b. As orientações das fraturas coincidem com as direcções de X e R e R', Pré-Cambrianas, o que indica a reactivação destas linhas de fraqueza crustal, porém com movimentos verticais.

Figura 4.1.4 a - nascente 1, fonte Santa Helena, as setas indicam fraturas abertas paralelas à foliação, por onde observa-se a surgência de água, e fraturas de direcção NW-SE, preenchidas. **Figura 4.1.4b** - nascente 3, fonte Santa Helena, a seta indica fratura aberta de direcção N-S, com surgência de água.

A Figura 4.1.5 apresenta o diagrama de rosetas das direções de fraturamentos verticais a subverticais nas quatro nascentes. Conforme pode ser observado há uma predominância das direções N45W, N60E, N10E e N45E que correspondem respectivamente as direções R', R, X e Y Pré-Cambrianas, sendo portanto reativações das antigas linhas de fraqueza crustal.

Fig 4.1.5 – Diagrama de rosetas das direções das fraturas medidas na fonte Santa Helena.

2. Fonte São Carlos (Serra Negra)

A nascente Fonte São Carlos abastece (através de canalização sob a terra) a fonte São Carlos, fonte dos Italianos (essas duas localizadas na praça John Kennedy) e a fonte Menino Jesus de Praga (localizada dentro do conjunto aquático municipal). A nascente encontra-se a montante (Figura 4.1.6a), sendo operada pela prefeitura municipal de Serra Negra.

Foi possível observar a água surgindo das fraturas de um gnaiss migmatítico, pertencente ao Complexo Amparo, intensamente fraturado (Figura 4.16b). A abertura das fraturas é de aproximadamente 6 mm, e o espaçamento entre as famílias de fraturas é de aproximadamente 20 cm.

Fig. 4.1.6a– Local da nascente Fonte São Carlos (Serra Negra - SP); Fig. 4.1.6 b – Nascente Fonte São Carlos, as setas indicam as fraturas por onde observa-se a surgência da água.

Observa-se a água surgindo das fraturas N13E/80SE. De acordo com o modelo tectônico adotado para área (com σ_1 aproximadamente E-W) estas fraturas correspondem à direção de X relativa às estruturas Pré-Cambrianas. Também foram observadas fraturas com direções

N20E/83NW que correspondem às estruturas Pré-Cambrianas do tipo P e fraturas com direção N80E/55NW (correspondem às estruturas Pré-Cambrianas do tipo T). Ao redor da fonte foram observadas fraturas de direções N42W/12SW. A direção N42W/12SW corresponde à direção de R'. A Figura 4.1.7 apresenta o diagrama de rosetas das direções das fraturas verticais a subverticais.

Fig 4.1.7 – Diagrama de rosetas das direções das fraturas medidas na fonte São Carlos.

3. Fonte Santo Agostinho (Serra Negra)

Esta fonte também se localiza no centro da cidade de Serra Negra, próxima ao terminal rodoviário. Aparentemente a água está minando pelas fraturas de um gnaiss com pórfiros de feldspato potássico pertencente ao Complexo Amparo, porém não se tem certeza se de fato este seja o local da nascente.

Nas proximidades desta fonte, há a presença de afloramentos de gnaisses, levemente alterados, intensamente fraturados, nas quais foram efetuadas medidas estruturais (Fig. 4.1.8). O plano de fratura N5E/55NW (X) apresenta-se bem marcado (indicado pela seta), sendo que esta família de fraturas possui um espaçamento aproximado de 12 cm. Os planos de direção N80W/40SW (correspondentes a T) possuem, em alguns locais, aberturas milimétricas. A foliação, medida em dois afloramentos, apresenta direção N62E/65NW (que corresponde a direção de R).

Fig. 4.1.8 - Afloramento de gnaiss nas proximidades da Fonte Santo Agostinho.

A Figura 4.1.9 apresenta o diagrama de rosetas das direções de fraturamento nas proximidades da fonte Santo Agostinho. As direções e mergulhos das fraturas medidas são os seguintes: N39E/88SE (Y), N50E/75SE (Y), N80W/40SW (T), N64W/50SW (R'), N66W/50SW (R'), N30W/50SW (R'), N30E/33NW (P), N39E/88SE (Y), N50E/75SE (Y), N85W/vert (T), N79/80NE (T), N5E/55NW (X) e N14/25NW (X).

Fig 4.1.9 – Diagrama de rosetas das direções das fraturas.

4. Fonte Nossa Senhora de Lourdes (Serra Negra)

Se localiza dentro do Parque Represa Dr. Jovino Siqueira, próximo à rodovia Serra Negra-Amparo. Conforme mostra Figura 4.1.10, trata-se de uma bica, porém não foi possível localizar o local da nascente. Atrás da bica encontra-se um afloramento de gnaiss de textura fina, bastante fraturado, que de acordo com o mapa geológico compilado faz parte do Complexo Itapira.

Fig. 4.1.10 – Fonte Nossa Senhora de Lourdes (bica).

A Figura 4.1.11 apresenta o gráfico de rosetas das direções principais de fraturamento. As medidas das fraturas foram: N60W/63NE (R'), N68W/60NE (R'), N70W/43NE (T), N52W/68NE (R'), N44W/80NE (R'), N60E/52NW (R), N22E/86SE (P), N52W/78NE (R') e N40W/54NE (R').

Fig 4.1.11 – Diagrama de rosetas das direções das fraturas nas proximidades da fonte Nossa Senhora de Lourdes.

5. Fonte Nossa Senhora Aparecida (Serra Negra)

Localiza-se a poucos metros do parque Represa Dr. Jovino Siqueira, no bairro das Posses. Fica a sudoeste de Serra Negra, no fundo de um vale. Trata-se de uma empresa mineradora de água (Água Mineral Natural Serra Negra), que existe há 30 anos.

Não foi possível entrar no local da nascente, porém, segundo Szikszay e Teissedre (1978), a água mina a partir de fraturas e xistosidade dos migmatitos (Complexo Itapira). Próximo à nascente observa-se um gnaiss granítico, pouco fraturado, cujas fraturas apresentam as seguintes medidas estruturais: N37E/75NW, N65W/78NE e N90/84N, sendo que esta última apresenta abertura de aproximadamente 5 cm. Estas direções correspondem a reativações das estruturas Pré-Cambrianas Y, R' e T.

6. Fonte Abandonada – Estrada do Barroão (Serra Negra)

O acesso à fonte é feito, a partir da cidade de Serra Negra, em direção ao Alto da Serra/Hotel São Mateus, rua Paulo Marchi. Fica à beira da estrada, à meia encosta do morro. No local é possível ver a água surgindo de fraturas de direção N40E/vertical (Y), em um quartzito milonítico, com foliação variando de N55E/74SE (R) a N24E/61SE (P) pertencente ao Complexo Amparo (Figuras 4.1.12a, 4.1.12b e 4.1.12c). Observa-se também fraturas escalonadas, que correspondem à reativação das direções de fraturas conjugadas R e R' de Riedel (Figura 4.1.12a). Essas direções também estão condizentes com o modelo teórico adotado para a área (Capítulo 2).

Fig. 4.1.12 a – Quartzito cataclástico, com foliação na direção N55E/74SE, com presença de fraturas escalonadas; 4.1.12 b e 4.1.12 c – Detalhe da nascente Fonte Estrada do Barroão, a seta indica a fratura aberta (N 40E/vertical) por onde ocorre a surgência de água.

A rocha apresenta-se intensamente fraturada, as direções dos sistemas de fraturamentos são: N40E/vertical (Y), N63E/70NW (R), N52W/85SE (R'), N55E/vertical (R), N22W/65SE (X), N6W/60E (X) e N22E/70 (P), N90/60N (T), N2W/73NW (X), N40E/84NE (Y), N40E/80NE (Y), N80W/85NE (T). A Figura 4.1.13 apresenta o diagrama de rosetas das direções dos fraturamentos. Observa-se que as direções preferenciais de fraturamentos correspondem às direções Y, R', R, X e T referentes às estruturas Pré-Cambrianas.

Fig 4.1.13 – diagrama de rosetas das direções das fraturas no local da fonte Estrada do Barroão.

7. Fonte do Sítio São Rafael (Serra Negra)

O acesso à fonte é feito seguindo a estrada do Barroão e passando a casa do proprietário do sítio São Rafael, subindo o morro (em meio a um cafezal). A fonte fica à meia encosta do Morro das Antenas (também chamado de Serra Negra), que é um dos pontos mais altos da cidade. A Figura 4.1.14 mostra o Morro das Antenas, onde se localiza a fonte.

Figura 4.1.14 – Morro das Antenas, local da Fonte do Sítio São Rafael.

Não foi possível chegar ao local exato da nascente (onde a água surge das fraturas) devido à grande quantidade de vegetação e ao solo muito espesso. Trata-se de um gnaisse bandado, bastante fraturado pertencente também ao Complexo Amparo, com direção de foliação N02E/60E (X) e famílias de fraturas muito persistentes, com espaçamento entre as fraturas de 5 cm e direções N79W/84NE (T) e N85W/85NE (T). A Figura 4.1.15 ilustra o afloramento.

Fig. 4.1.15 – gnaiss fraturado próximo ao local da nascente da Fonte do Sítio São Rafael.

8. Fonte São Francisco I, II e III (Serra Negra)

Estas fontes se localizam no Rancho Santana, de propriedade da empresa mineradora Fontana, de propriedade do Sr. Osmar Fontana. O acesso ao local é feito pela estrada Serra Negra-Lindóia, após o Hotel Vale do Sol, a uns 2 km da primeira bifurcação desta estrada. O proprietário permitiu o acesso ao local da fonte São Francisco I, que fica trancada (Figura 4.1.16). Segundo informação verbal do proprietário, a surgência ocorre naturalmente na própria rocha sobre a qual foi removido o espesso capeamento de rocha alterada para alcançar o nível ideal de captação.

Fig. 4.1.16 – Local da nascente da Fonte São Francisco.

Foi possível observar a água minando das fraturas de um gnaiss granítico, com porfiroblastos de feldspato potássico, intensamente fraturado, pertencente ao Complexo Amparo. A água surge de fraturas abertas (aproximadamente 1 cm) que se interceptam, com direções aproximadas de E-W (T) e N-S (X), conforme mostra as Figuras 4.1.17a e 4.1.17b. A Figura

4.1.18 apresenta o perfil geológico das proximidades da empresa mineradora, presente no relatório de Área de Proteção, elaborado por uma empresa de consultoria.

Fig. 4.1.17 a – Nascente da Fonte São Francisco em rocha gnáissica. b – Fraturas de direção N-S (X) e E-W (T), que se interceptam e por onde a água surge.

Fig. 4.1.18 – Perfil geológico dos arredores da empresa mineradora Fontana

Analisando-se o perfil, nota-se que o Morro das Antenas constitui-se na zona de recarga do aquífero neste local, pois é topograficamente mais elevado, além de ser constituído por quartzito extremante fraturado, permitindo maior infiltração, circulação e armazenamento de água subterrânea. Além disso, é importante salientar que ocorrem fontes tanto ao lado oeste

(Fonte São Francisco) quanto ao lado leste do Morro das Antenas (Fonte Barroco e Sítio São Rafael), evidenciando que este se trata de zona de recarga do aquífero.

9. Fonte Santo Antonio e Fonte Nossa Senhora do Rosário (Serra Negra)

A fonte Santo Antonio se localiza no centro da cidade e é propriedade do Radio Hotel. Segundo Szikszay e Teissedre (1978), a fonte nasce num granodiorito milonitizado de cor clara e dentro do granodiorito encaixam-se lentes metamorfasadas com estruturas miloníticas. O gnaiss que aflora na entrada da cidade é cortado por veios de pegmatito e adquire uma textura de migmatito, pertencente ao Complexo Amparo.

Na fonte N.S. do Rosário afloram rochas pertencentes ao Complexo Amparo de composição granodiorítica melanocrática (granodiorito a hornblenda) com núcleos leucocráticos (granodiorito à biotita, com quartzo e andesina). A nascente se encontra no granodiorito a hornblenda (Szikszay e Teissedre, 1978).

10. Fonte Santa Maria I e II (Serra Negra/Monte Alegre do Sul)

Localiza-se na estrada Serra Negra – Monte Alegre e pertence à empresa mineradora de água “Aqua Única”, de propriedade do Sr. Dito. O acesso a nascente (que fica trancada) foi permitido pelo proprietário (Figura 4.1.19a). O local por onde ocorre a surgência de água das fraturas é fechado com uma caixa de aço inox, porém parte do afloramento de quartzito (Complexo Itapira), intensamente fraturado, fica exposto (Figura 4.1.19b), onde foi possível realizar medidas estruturais.

Foram identificadas fraturas (com aberturas de aproximadamente 1 cm) nas direções: N70W/54SW (R'), N64W/59SW (R') e N85W/65NE (T). Outros sistemas de fraturamentos foram identificados: N74W/55SW (T), N80E/50SE (T), N84E/85NW (T), N88E/72NW (T), N72W/53SW (R'), N72W/55SW (R'), N51W/43SW (R'), N70W/43SW (R'), N87W/55SW (T), N88W/55SW (R). Analisando-se o gráfico de rosetas (Figura 4.1.20), nota-se que o padrão de fraturamento está condicionado preferencialmente às direções WNW-ESE.

Fig. 4.1.19 a – Local da Nascente da Fonte Santa Maria, 4.1.19 b –Nascente da Fonte Santa Maria, em quartzito, intensamente fraturado.

Fig 4.1.20. – Diagrama de rosetas das direções das fraturas.

11. Fontes Filomena, Madame Curie e São Roque (Águas de Lindóia)

Localizam-se no Balneário Municipal. Situam-se a poucos metros uma da outra e estão inseridas numa faixa de mica-xisto e quartzito, pertencentes ao Complexo Itapira com foliação milonítica variando de N20/60SE a N60/80 SE. Essa variação da foliação milonítica demonstra o padrão anastomosado da feição de cisalhamento principal (de direção N45E= Y) e das feições de cisalhamento secundárias (de direção N20E=P e N60E=R) Pré-Cambrianas. Essas rochas são intensamente fraturadas, com presença de veios de quartzo paralelos a foliação. Realizaram-se medidas de fraturas (próximo às fontes), num afloramento de quartzito com intercalações de rochas granitóides. Foram observadas as seguintes direções N32W/60SW (X), N33W/61SW (X) e N24E/vertical (P). A seguir serão descritas as fontes do balneário.

- Fonte Filomena: a água surge de fraturas em quartzito, com foliação em torno de N35E/60SE (Y). Observam-se duas famílias de fraturas: uma paralela à foliação (Y) e outra aproximadamente ortogonal à foliação, em torno de N45W (R'), por onde ocorre a surgência da água. As Figuras 4.1.21a e 4.1.21b apresentam a fonte Filomena.

- Fonte Madame Curie e São Roque: segundo Szikszay e Teissedre (1978) as águas destas fontes surgem nos contatos entre os mica-xistos e rochas granitóides ou entre os granitóides e quartzitos.

Fig 4.1.21 a e 4.1.21b. – Nascente da fonte Filomena, em quartzito foliado e fraturado. A água surge com temperatura em torno de 28° C.

12. Fonte Santa Isabel e Fonte São Sebastião (Águas de Lindóia)

Segundo Szikszay e Teissedre (1978), não foi possível conhecer a geologia do ponto de surgência da fonte Santa Isabel, porém, as rochas aflorantes foram identificadas como micaxistos contendo lentes de quartzo e quartzito todos pertencentes ao Complexo Itapira. Esta fácies possui uma direção N-S e mergulho subvertical e é a continuação dos mica-xistos identificados mais ao norte do balneário.

A fonte São Sebastião localiza-se um pouco mais a oeste da fonte Santa Isabel, surgindo dos gnaisses (também pertencentes ao Complexo Itapira), através de fraturas.

13. Fonte São Luiz Gonzaga (nascente 1 e 2) (Águas de Lindóia)

As nascentes pertencem à empresa Lindóia Capital. Encontram-se em gnaiss milonítico (Complexo Itapira), com foliação N38/80SE (Y). Há a presença de veios de quartzo cortando ortogonalmente a foliação e fraturas também ortogonais a foliação, com direção aproximada N45W (R').

14. Fontes São Jorge, Santa Rita e José Cremasco (Lindóia)

As nascentes pertencem à Mineração Cremasco - Lindóia São Jorge. O local das nascentes é caracterizado pela topografia acidentada. Ocorrem em fraturas de gnaisses migmatíticos com veios de quartzo cortando a foliação, pertencentes ao Complexo Itapira (Figura 4.1.22). A surgência da água ocorre em fraturas paralelas ao plano de foliação da rocha. As medidas de foliação obtidas nas fontes foram:

- Fonte São Jorge: N62E/88 NW, N58E/85 SE (R).
- Fonte Santa Rita: N18E/80NW (P), N30E/65SE (P)
- Fonte José Cremasco: N16E/89 SE (P), N14E/85NW (P)

Fig 4.1.22. – Nascente da fonte José Cremasco, em gnaissse.

15. Fontes São Benedito, São José e Santa Bernadete (Lindóia)

Estas fontes pertencem ao Complexo Itapira. As águas da fonte São Benedito nascem das fraturas que cortam o biotita gnaissse, que é cortado também por veios de granito aplítico leucocrático. No sentido da xistosidade, observa-se a presença de nódulo de anfibolito boudinado (Szikszay e Teissedre, 1978).

A fonte Santa Bernardete surge das fraturas de um gnaissse migmatítico millonitizado, com veios de quartzo. A direção principal de fraturamento é N60-70W (Szikszay e Teissedre, 1978 e Yoshinaga, 1990).

16. Fontes Nossa Senhora das Brotas, São Bernardo, São Francisco (Lindóia)

Segundo Szikszay e Teissedre (1978), todas ocorrem em migmatitos, numa faixa de transição entre o fácies migmatítico e gnáissico. De acordo com o mapa geológico compilado as fontes se localizam nas rochas do Complexo Itapira.

Na fonte N. S. das Brotas, Szikszay e Teissedre (1978) observaram veios de quartzo cortando os gnaisses milonitizados e na fonte São Francisco ocorrem gnaisses com veios de quartzo e anfibolitos. Na fonte São Bernardo, segundo Szikszay e Teissedre (1978) a rocha é um migmatito.

Em todas essas fontes as águas surgem das fraturas. Segundo Yoshinaga (1990), a direção das fraturas principais nestas fontes são:

- N. S. das Brotas: N80-90W e N50-60E que correspondem respectivamente às direções T e R do modelo proposto;
- São Bernardo: N20-30E, correspondente às fraturas tipo P.
- São Francisco: N20-30E, correspondente às fraturas tipo P.

17. Fontes São Bento e Pompéia (Socorro)

Segundo Szikszay e Teissedre (1978), a fonte São Bento se encontra num gnaissé rosado de direção N30E, com mergulho subvertical e surge de fraturas dessa rocha. A fonte Pompéia nasce no contato entre veio de quartzo e gnaissé, este com direção N45E (Y). Essas rochas pertencem ao Complexo Mostardas.

A Tabela 4.1.1 apresenta uma síntese das fontes do Circuito das Águas, com suas localizações e características hidrogeológicas.

**TABELA 4.1.2 - FONTES DO CIRCUITO DAS ÁGUAS E SUAS CARACTERÍSTICAS
HIDROGEOLÓGICAS.**

MUNICÍPIO	FONTE	LITOLOGIA	FORMA DE OCORRÊNCIA	VAZÃO (l/s)	UTM E (m)	UTM N (m)
Águas de Lindóia	São Lourenço:					
	Levíssima I	quartzito	fraturas	0,00917		
	Santa Clara	quartzito	fraturas	0,0010	334225,000	7515677,000
	Levíssima II	quartzito	fraturas	0,005		
	Fonte do Brejal	migmatito	fraturas	0,0003	331500,000	7514100,000
	Prefeitura	migmatito milonitizado	fraturas	0,00086	331950,000	7514150,000
	Fonte do Sertãozinho	quartzito	fraturas	2,50	334050,000	7514050,000
	Santa Isabel	mica-xisto e quartzito	fraturas	0,00167	332060,908	7512546,230
	São Sebastião	gnaisse	fraturas	0,00208	331712,497	7512007,778
	Balneário FUMEST:					
Lindóia	Mme. Curie	leptinito, mica-xisto e quartzito	contato leptinito- quartzito	0,0167	332854,000	7513628,000
	Filomena	quartzito	fraturas	3,33	332842,000	7513616,000
	São Roque	leptinito, mica-xisto e quartzito	contato leptinito- mica-xisto	7,78	332795,000	7513613,000
	São Benedito	biotita-gnaissé	fraturas	0,25	331379,924	7509236,332
	São Francisco	gnaisse, migmatito	fraturas	1,10	328250,000	7508450,000
	São Bernardo	migmatito	fraturas	1,05	328750,000	7508750,000
	Santa Bernardete	gnaisse	fraturas	0,73	331350,000	7509750,000
	N.S. das Brotas	migmatito e veios de quartzito	Fraturas	1,67	329600,000	7507350,000
	São Jorge	migmatito e veios de quartzito e anfíbólito	fraturas	1,00	328529,000	7507927,000
	Fonte Vida nºN4	migmatito	fraturas	0,0065	331700,000	7510300,000
	Fonte Vida nºN2	migmatito	fraturas	0,004	331450,000	7509950,000
	Fonte da Pracinha	migmatito	fraturas	0,00069	330200,000	7509550,000
	N.S. das Brotas 1	migmatito	fraturas	0,00581	330600,000	7509600,000
	N. S. das Brotas 2	migmatito	fraturas	0,00589	331050,000	7509700,000
	Fonte da Estrada	migmatito milonitizado	fraturas	0,00011	331700,000	7509500,000
	Fonte São Luis	migmatito milonitizado	fraturas	0,00039	331250,000	7508900,000
	Fonte da Estrada BR-360	migmatito	fraturas	0,104	329913,000	7506095,000
	Fonte Jatobá	gnaisse ?	fraturas	27,7	331210,980	7508040,940
	Santo Antonio	granodiorito milonitizado	fraturas	0,12	325477,000	7498458,000
Serra Negra	N.S. Aparecida	migmatito	fraturas	1,42	321671,000	7495961,000
	São Carlos	gnaisse migmatítico	fraturas	-	325354,000	7498699,000
	Barroão	gnaisse bandado	fraturas	1,06	327396,000	7496823,000
	Sítio São Rafael	gnaisse bandado	fraturas	-	327730,000	7497322,000
	São Francisco I e II	gnaisse granítico	fraturas	-	327423,000	7498859,000
	Santa Maria I e II	quartzito	fraturas	-	325164,000	7494100,000
	Santa Helena	migmatito/granito	fraturas	-	323635,000	7495474,000
Socorro	São Bento	gnaisse	fraturas	0,13	342636,101	7501176,012
	Pompéia	gnaisse e pegmatito	contato veio de quartzito e gnaisse	1,10	341519,320	7502036,865

Fonte: Szikszay e Teissedre (1978), Yoshinaga (1990) e dados de campo.

A Figura 4.1.23a apresenta a projeção ciclográfica dos planos das fraturas com aberturas milimétricas a centimétricas observadas nos locais das nascentes e a Figura 4.1.24b a projeção dos pólos dos planos dessas fraturas.

Fig. 4.1.23 a - projeção ciclográfica dos planos das fraturas abertas observadas nos locais das nascentes e b - a projeção dos pólos dos planos dessas fraturas.

Observa-se uma predominância de fraturas com aberturas milimétricas a centimétricas nas direções NE, N-S e NW, sendo predominantes as fraturas com altos mergulhos. Devido a maior parte das fraturas apresentarem alto ângulo de mergulho, elaborou-se o gráfico de rosetas das direções das fraturas abertas (somente as de alto mergulho), para uma melhor visualização das principais direções (Figura 4.1.24).

Fig. 4.1.24 - Diagrama de rosetas das direções de fraturas abertas de alto mergulho observadas nas fontes do Circuito das Águas.

Nota-se a predominância do fraturamento segundo as direções N45-55E, N20-30E e N40-50W e secundariamente N-S-N10E e E-W. Essas orientações correspondem respectivamente as direções Y e R, P, R', X e T do modelo teórico-empírico adotado, apresentado no capítulo 2, relacionado as zonas de cisalhamento dúcteis a dúcteis-rúpteis (pré-cambrianas) presentes na área.

Outro aspecto importante observado nas fontes é a direção da foliação milonítica das rochas. Em grande parte das nascentes, observa-se intenso fraturamento na direção da foliação milonítica onde por muitas vezes observou-se surgência de água. Isso também indica que as

direções das anisotropias pré-existent das rochas (estas anisotropias geradas nos eventos tectônicos brasileiros, como a zona de cisalhamento Monte Sião e a zona de cisalhamento de Ibitinga), por se tratarem de regiões de maior fraqueza crustal foram reativadas por processos tectônicos posteriores.

Dessa forma, as zonas de cisalhamento (principal e secundárias) Pré-Cambrianas são importantes condicionantes das direções de fraturamentos atuais, favorecendo a infiltração, circulação e armazenamento de água subterrânea na região.

4.2 Análise dos dados em SIG

4.2.1 Dados de poços

Os dados de produtividade de poços cadastrados (total de 65) apresentam uma distribuição estatística log-normal, pois a distribuição de frequências acumuladas desenham um "S" quando lançadas em gráfico de probabilidade aritmética (abscissa em escala aritmética) e alinham-se em torno de uma reta quando estes são plotados em gráfico de log-probabilidade aritmética (abscissa em escala logarítmica), conforme apresenta a Figura 4.2.1.1. Além disso, o coeficiente de variação é maior que 1,2, o que também evidencia o caráter assimétrico de sua distribuição (Yamamoto *et al.*, 2000).

Fig. 4.2.1.1a – Gráfico de curva acumulada de probabilidade aritmética e b - curva acumulada de log-probabilidade aritmética.

Em função da distribuição dos dados de poços ser assimétrica, a correlação entre os poços e alguns parâmetros de interesse é dada pelo coeficiente *Spearman*. Os valores de correlação de *rank Spearman* (r) igual a 1 indicam perfeita correlação entre as classes. Valores de r igual a -1 indicam perfeita correlação inversa e r igual a zero indica que os dois parâmetros são independentes (Davis, 2002). A análise dos dados também é feita na forma de gráficos de frequência acumulada.

A seguir serão apresentados os resultados das análises entre a produtividade de poços e diversos parâmetros geológicos, estruturais, geomorfológicos, pedológicos entre outros. Estas análises foram realizadas com o objetivo de auxiliar na identificação dos fatores favoráveis e desfavoráveis à ocorrência de água subterrânea na região, pois conforme verificado na

literatura, não existe um consenso sobre os parâmetros prospectivos para água subterrânea em terrenos fraturados.

a) *Produtividade de poços x distância de lineamentos (que representam as zonas de cisalhamento dúcteis a dúcteis rúpteis na área)*

A Figura 4.2.1.2 apresenta o mapa de lineamentos e a localização dos poços. A análise entre os valores de produtividade dos poços e distância dos lineamentos realizou-se em três etapas. Primeiro elaborou-se um mapa de distância entre os lineamentos, estabelecendo-se corredores ("buffer") em torno dos lineamentos. Os valores das distâncias foram definidos em classes de 100 metros.

Fig. 4.2.1.2 - Mapa de lineamentos estruturais (zonas de cisalhamento) e poços cadastrados

Realizou-se a tabulação cruzada entre as distâncias de lineamentos e calculou-se o coeficiente de correlação *Spearman*. A Figura 4.2.1.3 apresenta o gráfico de dispersão entre distância de lineamentos e capacidade específica e os resultados da correlação *Spearman*.

Coeficiente de correlação
Spearman

$n=66$
 $r_s=-0,35$
 $IC\ 95\%=-0,55\ a\ 0,12$
 $t=0,0038$
 $n\ \text{até}\ 200\ m=44$
 $n\ >200\ m=22$

Fig. 4.2.1.2 - Distância de lineamentos X Capacidade Específica

Nesta análise, o valor do coeficiente de correlação *Spearman* (-0,35) indica que a capacidade específica dos poços possui alguma correlação negativa com a distância de lineamentos, ou seja, quanto maior a distância de lineamentos menor a capacidade específica dos poços.

Dada a existência de uma correlação negativa e que os maiores valores de produtividade encontrados (acima de $0,66\ m^3/h/m$) estão relacionados aos poços mais próximos aos lineamentos (entre as distâncias de 100 e 200 metros), admite-se que a área de influência dos lineamentos na produtividade de poços é de até 200 metros, considerando-se lineamentos interpretados em escala de trabalho 1:100.000.

A Figura 4.2.1.3 apresenta o gráfico de frequência acumulada da capacidade específica de poços em função da distância dos lineamentos. Este gráfico comprova que para a área de estudo pode-se considerar como influência na produtividade uma distância de até 200 metros dos lineamentos. O valor de produtividade acima de $0,66\ m^3/h/m$ corresponde a um valor superior à média dos poços perfurados na área.

Coeficiente de correlação
Spearman

$n=66$
 $r_s=-0,29$
 $IC\ 95\%=-0,5\ a\ 0,05$
 $t=0,0183$
 $n\ \text{até}\ 200\ m=44$
 $n\ >200\ m=22$

Fig. 4.2.1.3 - Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua distância em relação aos lineamentos

Considerando os resultados obtidos na análise, admite-se que o fator "lineamentos" tem considerável importância na favorabilidade de ocorrência de água subterrâneas, bem como as classes de distância de lineamentos.

b) Produtividade de poços x intersecção de lineamentos (zonas de cisalhamento)

A análise da produtividade dos poços em relação à distância da intersecção dos lineamentos foi realizada em duas etapas. Primeiro foram digitalizados os pontos de intersecção entre os lineamentos e depois foi elaborado um mapa de distâncias dos pontos de intersecção, com classes de 50 metros. Em seguida realizou-se a tabulação cruzada entre os dados e calculou-se o coeficiente de correlação *Spearman*. (Figuras 4.2.1.4).

Coeficiente de correlação
Spearman

n=66
rs=-0,17
IC 95%=-0,40 a -0,07
t=0,1716
n até 600 m=41
n >600 m=25

Fig. 4.2.1.4- Distância de intersecções de lineamentos X Capacidade Específica

O coeficiente de correlação *Spearman* (-0,17) indica alguma correlação negativa entre intersecção de lineamentos e produtividade de poços. A correlação negativa representa que quanto maior a distância da intersecção dos lineamentos menor a capacidade específica dos

Conforme pode ser observado, os maiores valores de capacidade específica (acima de 0,66 m³/h/m que corresponde ao valor de produtividade médio da área) relacionam-se às distâncias entre as intersecções de lineamentos de até 600 metros. Os baixos valores de produtividade relacionam-se de modo geral com as distâncias mais elevadas (acima de 600 metros).

Dessa forma, no caso das intersecções dos lineamentos as distâncias de influência na produtividade de poços são sensivelmente maiores em relação aos lineamentos isolados. Adotou-se o valor abaixo de 600 metros como distância de intersecção de lineamentos com nível de influência na produtividade de poços, conforme observado no gráfico de frequência acumulada da Figura 4.2.1.5. Nota-se que para as distâncias acima de 600 metros, os valores de capacidade específica dos poços são consideravelmente mais baixos que os valores de poços locados a uma distância de até 600 metros.

Fig. 4.2.1.5 - Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua distância da intersecção dos lineamentos

Considerando os resultados obtidos nesta análise, admite-se que o fator "lineamentos" tem considerável importância na análise de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea, bem como as classes de distância de intersecção de lineamentos.

c) Produtividade de poços x densidade de comprimento de lineamentos (zonas de cisalhamento)

Elaborou-se o mapa de densidade de lineamentos por comprimento com o auxílio do programa Arc View. A dimensão da célula utilizada para contagem foi de 2000 metros. A Figura 4.2.1.6 apresenta o mapa de densidade de lineamentos por comprimento e os poços cadastrados.

Fig. 4.2.1.6 - Mapa de densidade de lineamentos por comprimento e poços cadastrados

As maiores densidades encontram-se próximas às áreas urbanas dos municípios de Águas de Lindóia, Lindóia e Serra Negra. Nota-se um eixo de direção NE-SW, com altos valores de somatória de comprimento de lineamentos. Esse eixo corresponde à zona de cisalhamento transcorrente Monte Sião.

A Figura 4.2.1.7 apresenta o gráfico da frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa de densidade de comprimento de lineamentos. Dos 66 poços analisados, 13 pertencem a classe de baixa densidade, 38 pertencem a classe intermediária e 15 pertencem a classe alta densidade.

Fig. 4.2.1.7 - Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa de densidade de comprimento de lineamentos

O coeficiente de correlação *Spearman* indica baixa correlação positiva. Porém, analisando-se o gráfico de frequência acumulada indica um comportamento semelhante de poços locados em diferentes classes de densidade até valores de produtividade próximos de $0,3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. A partir destes valores, nota-se que os poços com valores de produtividade acima de $1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (valores superiores à média) encontram-se em áreas mapeadas como intermediária e alta densidade de contagem de comprimento de lineamentos.

Considerando os resultados obtidos nesta análise, admite-se que o fator “densidade de comprimento de lineamentos” tem considerável importância para a favorabilidade de ocorrência de água subterrâneas, principalmente as classes intermediária e alta de contagem de comprimento de lineamentos.

d) Produtividade de poços x densidade de lineamentos (zonas de cisalhamento)

Elaborou-se o mapa de densidade de lineamentos com o auxílio do programa Arc View. A dimensão da célula utilizada para contagem também foi de 2000 metros. A Figura 4.2.1.8 apresenta o mapa de densidade de lineamentos e os poços cadastrados.

Fig. 4. 2.1.8 - Mapa de densidade de lineamentos (zonas de cisalhamento) e poços cadastrados

Este mapa é muito semelhante ao mapa de densidade de lineamentos por comprimento. Neste mapa também é bem marcante um eixo de direção NE-SW, com altos valores de densidade de lineamentos (contagem de lineamentos por área), nas proximidades das cidades de Águas de

Lindóia, Lindóia e Serra Negra, que representa a zona de cisalhamento transcorrente Monte Sião.

A Figura 4.2.1.9 apresenta o gráfico da frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa de densidade de lineamentos e o coeficiente de correlação *Spearman*.

O coeficiente de correlação *Spearman* também mostra baixa correlação negativa, indicando que os maiores valores de capacidade específica relacionam-se com baixos valores de densidade de lineamentos por contagem. O gráfico de frequência acumulada também mostra que áreas mapeadas como baixa densidade apresentam valores de produtividade, de uma maneira geral, mais altos do que poços locados em áreas mapeadas como alta densidade. Ocorre uma variação considerável da produtividade de poços em áreas mapeadas como alta densidade, isto é, tanto os valores de produtividade mais baixos como os mais altos encontram-se na classe mapeada como alta densidade.

Fig. 4.2.1.9 - Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa de densidade de lineamentos

Considerando os resultados obtidos nesta análise, constata-se que poços mais produtivos estão mais relacionados a lineamentos mais extensos (por unidade de área) do que maior quantidade de lineamentos por unidade de área. Dessa forma, admite-se que o fator "densidade de lineamentos" (contagem por unidade de área) não tem muita importância na análise de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea e portanto, este fator não será considerado na análise de favorabilidade.

e) *Produtividade de poços x direção de lineamentos (zonas de cisalhamento)*

A Figura 4.2.1.10 apresenta o gráfico de rosetas das direções de lineamentos interpretados nas imagens de satélite e no produto integrado ETM+ - aeromagnetometria, que representam as zonas de cisalhamento dúctil a dúctil-rúptil na área, com direção da zona de cisalhamento principal em torno de N45E. Nota-se que as direções preferenciais das zonas de cisalhamento (lineamentos) são N20-30E (direção da zona de cisalhamento secundária P), N45-55E (direção da zona de cisalhamento principal Y), N60-70E (direção da zona de cisalhamento secundária R), seguido das direções E-W, N-S e NW-SE (que correspondem a direções T, X e R').

Fig. 4.2.1.10 - Gráfico de rosetas das direções dos lineamentos (zonas de cisalhamento)

Realizou-se a tabulação cruzada entre as produtividades de poços e as direções dos lineamentos. Cabe ressaltar que quando o poço se localizava na intersecção de dois lineamentos, foram consideradas na análise as duas direções conjuntamente. Quando o poço se localizava em um único lineamento, a direção deste lineamento foi analisada isoladamente.

A Figura 4.2.1.11 apresenta o gráfico da frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função das direções dos lineamentos em que esses poços se localizam.

Fig. 4.2.1.11 - Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização nos azimutes de lineamentos.

Os poços que se localizam na intersecção de lineamentos de direções NE (Y, P e R) e NS (X) e em lineamentos de direção NE (Y, P e R) são os que possuem os maiores valores de produtividade (mínimo de $0,8 \text{ m}^3/\text{h/m}$ e máximo de $8 \text{ m}^3/\text{h/m}$ e mínimo de $0,6 \text{ m}^3/\text{h/m}$ e máximo de $0,9 \text{ m}^3/\text{h/m}$, respectivamente). A intersecção de lineamentos NE (Y, P e R) e NW (R') também apresentam produtividades acima da média. Os lineamentos de direção EW (T) e os de direção NW (R') são os que apresentam os menores valores de produtividade (abaixo de $0,2 \text{ m}^3/\text{h/m}$). Porém, poços que se localizam na intersecção de lineamentos NW (R') ou EW (T) com lineamentos NE (Y, P e R) ou NS (X) possuem produtividades maiores quando comparados às direções de lineamentos isolados.

Assim sendo, pode-se admitir que intersecções de lineamentos de direções NE-NS e NE-NW e lineamentos de direção NE são mais favoráveis a infiltração, circulação e armazenamento de água subterrânea. Porém existem direções que não puderam ser analisadas, pois não havia ocorrência de poços nas suas proximidades, como a intersecção de lineamentos de direções NS e EW e de direção EW. Portanto na análise de favorabilidade poderá ser atribuído um peso maior para os lineamentos de direção NE e para as intersecções de lineamentos de direções NE-NS e NE-NW.

f) Produtividade de poços x litologia

Para realizar esta análise foram compilados os mapas geológicos, em escala 1:50.000, referente à Folha Mogi Guaçu (IPT, 1982), Folha Amparo (Basei *et al.*, 1986), Folha Águas de Lindóia (Zanardo, 1987), Folha Socorro (Sad *et al.*, 1982) e Folhas Aguai, Pinhal e Munhoz (Artur, 1988). A Figura 4.2.1.12 apresenta o mapa geológico compilado, separado em função do tipo litológico predominante e os poços cadastrados.

Fig. 4.2.1.12 – Mapa Geológico e poços cadastrados na área.

1. Produtividade de poços x tipos litológicos

A unidades geológicas foram agrupadas em função do tipo litológico predominante. Dessa forma foram definidas quatro unidades litológicas: gnaiss, migmatito, granito/granitóide e quartzito. Com base nestas unidades litológicas e nas descrições dos poços, realizou-se a tabulação cruzada entre litologia e produtividade dos poços. O resultado desta tabulação é apresentado em forma de gráfico (Figura 4.2.1.13).

Fig. 4.2.1.13– Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa geológico.

Nota-se que os poços localizados em áreas mapeadas como gnaiss apresentam os maiores valores de capacidade específica. Migmatitos e milonitos apresentam um comportamento semelhante ao das rochas gnáissicas, porém os milonitos apresentam valores máximos de produtividade de poços em torno de $1 \text{ m}^3/\text{h/m}$. Os poços localizados em quartzitos apresentam como valor mais baixo de produtividade $0,03 \text{ m}^3/\text{h/m}$ e o valor mais alto em torno de $4 \text{ m}^3/\text{h/m}$. Os poços localizados em granitos e granitóides apresentam valores mais baixos de produtividade (abaixo de $0,66 \text{ m}^3/\text{h/m}$). Porém cabe salientar a ocorrência de um poço localizado na litologia granito/granitóide deformados, com valor de produtividade aproximadamente de $1 \text{ m}^3/\text{h/m}$ que foi inserido na classe gnaiss para a elaboração do gráfico.

Essa análise comprova a importância do tipo litológico na análise de favorabilidade à ocorrência de água subterrânea. Os maiores valores de produtividade encontrados em rochas deformadas (foliadas e bandadas), tais como gnaiss, migmatito, milonito e granitóides deformados é devido, principalmente, ao fato destas estruturas representarem regiões de fraqueza rochas, favorecendo o fraturamento nas direções da foliação e com isso a maior

infiltração, circulação e armazenamento de água. Dessa forma, rochas deformadas e foliadas devem apresentar peso maior na análise de favorabilidade.

Os quartzitos devido ao intenso fraturamento também se caracterizam pela ocorrência de poços de produtividade elevada, o que deve ser levado em consideração na etapa de definição de pesos às classes para a elaboração do mapa de favorabilidade. Os granitóides e granitos não deformados serão os que irão apresentar o menor peso na análise de favorabilidade (em função da produtividade dos poços), mas deve se destacar a importância dessas mesmas rochas, porém deformadas, observadas na análise de produtividade. Cabe ressaltar que na área de estudo, ocorrem muitos locais onde o substrato rochoso é aflorante e por isso, mesmo que não ocorra a presença de solo poroso ou manto de alteração espesso, essas regiões podem apresentar alta infiltração e armazenamento de água devido ao intenso fraturamento deste substrato.

2. Produtividade de poços x contatos geológicos

Levando-se em consideração a experiência de um dos peritos que respondeu o questionário sobre os pesos aos parâmetros prospectivos, realizou-se a análise entre a produtividade dos poços e os contatos geológicos.

Numa primeira etapa, foram gerados corredores "buffers" em torno dos contatos geológicos. Escolheu-se uma distância de 250 metros em função dos resultados obtidos nas análises de distância de lineamentos. Posteriormente realizou-se a tabulação cruzada entre o mapa de distância dos contatos geológicos e os dados de produtividade de poços. O gráfico 4.2.1.14 apresenta o resultado desta tabulação cruzada na forma de frequência acumulada da capacidade específica dos poços em função da distância dos contatos geológicos.

Fig. 4.2.1.14- Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização em relação aos contatos geológicos.

Nota-se claramente que poços locados a uma distância de até 250 metros em relação aos contatos geológicos são mais produtivos que os poços locados mais distantes (acima de 250 metros) desses contatos. Dessa forma, o fator distância dos contatos geológicos deve ser considerado como de grande importância na análise de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea.

g) Produtividade de poços x mapa de isofrequência de zonas de juntas

O mapa de isofrequência de zonas de juntas apresenta 9 classes, separadas em classes de baixa, intermediária e alta densidade (Figura 4.2.1.15).

Fig. 4.2.1.15 – Mapa de isofrequência de zonas de juntas e os poços cadastrados na área.

Analisando-se o mapa (Figura 4.15), nota-se que maior parte dos poços estão locados em áreas classificadas como densidade intermediária de zonas de juntas. O resultado da tabulação cruzada entre este mapa e os dados de produtividade dos poços é apresentado na forma de gráfico de frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função da sua localização no mapa de densidade de zonas de juntas (Figura 4.2.1.16).

Fig. 4.2.1.16– Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa de contagem de zonas de juntas.

A classe de baixa densidade é a que apresenta em média os valores de produtividade de poços mais baixos (abaixo de $0,66 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, que é a capacidade específica média para a área). As classes intermediária e alta possuem os maiores valores de produtividade de poços, acima de $0,66 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$.

Considerando os resultados obtidos nesta análise, admite-se que o fator “densidade de zonas de juntas” tem considerável importância na favorabilidade de ocorrência de água subterrâneas, bem como as suas classes de contagem.

h) Produtividade de poços x mapa morfoestrutural

A Figura 4.2.1.17 apresenta o mapa morfoestrutural, com três classes (baixo, intermediário e alto) e os poços cadastrados na área.

Fig. 4.2.1.17 – Mapa morfoestrutural, a – com os poços cadastrados e b – detalhe em 3-D

A Figura 4.2.1.18 apresenta o gráfico resultante da tabulação cruzada entre os dados de produtividade de poços e sua localização em relação ao mapa morfoestrutural. Através do gráfico, nota-se que os poços mais produtivos (acima de $0,66 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$) estão locados em regiões de intermediários e baixos morfoestruturais.

Fig. 4.2.1.18- Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização nas morfoestruturas

Considerando os resultados obtidos nesta análise, admite-se que o fator “morfoestruturas” tem considerável importância na favorabilidade de ocorrência de água subterrânea, bem como suas classes de baixo e intermediário morfoestrutural.

i) Produtividade x classes de declividade

A Figura 4.2.1.19 apresenta o mapa de declividade da região e os poços cadastrados. O mapa possui 5 classes de declividade (em graus). As maiores declividades localizam-se nas cidades de Águas e Lindóia, Lindóia e Serra Negra.

Fig. 4.2.1.19 – Mapa de declividade e poços cadastrados na área.

Segundo Barreto *et al.* (2000), a declividade é um fator preponderante para processos de infiltração, pois a inclinação do terreno controla o escoamento superficial, ou seja, quanto mais inclinado for o terreno, menor será a infiltração e maior o escoamento superficial. A Figura 4.2.1.20 apresenta o gráfico de frequência acumulada dos poços em função da sua localização no mapa de declividade.

Fig. 4.2.1.20– Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa de declividade.

Analisando-se o gráfico, nota-se que os poços locados nas classes de declividade 5 a 15 graus apresentam os maiores valores de produtividade. Porém, as classes 0 a 15 graus e 15 a 25 graus também possuem poços com produtividades elevadas (acima de $0,66 \text{ m}^3/\text{h/m}$). Poucos poços estão locados nas áreas classificadas como declividade entre 25 a 35 graus, mas verifica-se que estes possuem baixa produtividade.

As áreas classificadas como declividade acima de 35 graus, não possuem poços. Pode-se definir estas áreas como restrições para a locação de poços devido às baixas produtividades verificadas na classe 25 a 35 graus e também pelo fato de que regiões de altas declividades são mais favoráveis ao escoamento superficial e não à infiltração, circulação e armazenamento de água. Além disso, a perfuração de poços em terrenos de declividades acentuadas não é viável, levando-se em consideração a dificuldade de se chegar aos locais com caminhões e equipamentos necessários. Assim sendo, a classe de declividade acima de 35° será considerada neste estudo, uma restrição.

Cabe ressaltar que dados de vegetação poderiam auxiliar nesta análise, uma vez que a vegetação tem papel importante nos processos de infiltração e juntamente com a declividade poderiam fornecer alguma correlação com dados de produtividades de poços. As classes com declividades maiores que 35 graus serão consideradas áreas de restrição, ou seja, não devem

ser locados poços nestas áreas, uma vez que se tratam de áreas de difícil acesso para a perfuração de poços.

j) Produtividade x morfologia

A Figura 4.2.1.21 apresenta o mapa da morfologia do terreno, segundo o mapa geomorfológico escala 1:500.000 (IPT/USP, 1997) e os poços cadastrados. A maior parte dos poços cadastrados localiza-se em regiões classificadas como topos aguçados e topos convexos. A Figura 4.2.1.22 apresenta o gráfico da frequência acumulada dos poços e seus valores de produtividade em função da classificação morfológica do terreno.

Fig. 4.2.1.21 – Mapa Geomorfológico: classificação morfológica e poços cadastrados na área.

Fig. 4.2.1.22 – Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa geomorfológico (morfologia).

Nota-se um comportamento semelhante entre os poços localizados em regiões morfológicamente classificadas como topos aguçados e topos convexos. Os poços localizados em regiões classificadas como topos tabulares possuem valores máximos de produtividade da ordem de 1 m³/h/m, valores estes inferiores aos observados nas regiões de topos aguçados e topos convexos.

Como as classes apresentam um comportamento semelhante, o peso dado ao fator geomorfologia (morfologia) na análise de favorabilidade será pequeno.

k) Produtividade x grau de dissecação

Segundo Lima (2002), um relevo é dissecado quando está sendo submetido à influência de agentes erosivos. Segundo o autor, a elaboração de níveis de dissecação, por agentes erosivos, pode estar ligada a fatores climáticos, litológicos ou tectônicos, ou a uma conjugação dos mesmos.

A Figura 4.2.1.23 apresenta o mapa geomorfológico, em classes de grau de dissecação e a localização dos poços cadastrados.

Fig. 4.2.1.23 – Mapa Geomorfológico: classificação em grau de dissecação e poços cadastrados na área.

A Figura 4.2.1.24 apresenta o gráfico da frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados de acordo com o grau de dissecação do terreno.

Fig. 4.2.1.24 – Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa geomorfológico (grau de dissecação).

Nota-se um comportamento semelhante entre os poços locados em diferentes graus de dissecação. Porém fica claro que as maiores produtividades relacionam-se com os maiores graus de dissecação. Quando se analisam os valores de produtividade mais baixos (próximo de zero), observa-se que eles ocorrem em poços localizados em áreas mapeadas como média dissecação.

Dessa forma, pode-se atribuir um valor maior para as classes de grau de dissecação alta e muito alta na análise de favorabilidade. Como as classes apresentam um comportamento semelhante, o peso dado ao fator geomorfologia (grau de dissecação) na análise de favorabilidade será pequeno.

1) Produtividade de poços x mapa pedológico

A Figura 4.2.1.25 apresenta o mapa pedológico, escala 1:500.000 (Oliveira *et al.*, 1999) e os poços cadastrados. O mapa pedológico reflete a morfologia do terreno, pois os latossolos se desenvolvem em chapadões ao passo que os argissolos mostram maior desenvolvimento em zonas dissecadas, em relevos de porte médio com densidade de drenagem mais alta que os latossolos. Os latossolos são maduros, muito profundos, porosos e com pequena diferenciação entre os horizontes pedogenéticos. Os argissolos possuem diferenciação marcante entre os horizontes. Nota-se que todos os poços cadastrados encontram-se em áreas mapeadas como argissolos.

Fig. 4.2.1.25 – Mapa Pedológico e poços cadastrados na área.

A Figura 4.2.1.26 apresenta o gráfico de frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função do tipo de solo. Analisando-se o gráfico da Figura 4.26, observa-se que todas as classes de argissolos possuem um comportamento semelhante em relação à produtividade de poços, porém os solos classificados *PVA 8* e *PVA 6* apresentam as maiores produtividades. Essas classes se caracterizam pela textura média argilosa e por ocorrer em relevo montanhoso.

Fig. 4.2.1.26– Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa pedológico.

A importância na definição do tipo de solo está relacionada à infiltração de águas meteóricas, uma vez que solos mais espessos e permeáveis serão mais favoráveis à esta infiltração. De acordo com as análises, pode-se considerar a importância das classes de argissolos na análise de favorabilidade. Porém, é importante salientar que apesar de não ocorrerem poços locados nas áreas mapeadas como latossolos, mas com base em dados da literatura (Barreto *et al.*, 2000), a classe latossolo apresenta maior favorabilidade à infiltração de água subterrânea do que os argissolos, pois possui melhor drenagem.

m) Produtividade de poços x manto de intemperismo

Para esta análise foi utilizado o mapa de unidades geoambientais (CPRM, 2002), Figura 4.2.1.27. As unidades geoambientais foram agrupadas em função de diversos parâmetros geológicos, geomorfológicos, pedológicos, entre outros. Para cada unidade geoambiental há uma breve descrição sobre o manto de intemperismo presente, como espessura e características para infiltração de água. Como são poucos os dados de poços obtidos que possuem este tipo de descrição (perfil do poço) optou-se por utilizar o mapa da CPRM, juntamente com os dados sobre manto de intemperismo de alguns poços para confirmar a descrição do mapa de unidades geoambientais.

Fig. 4.2.1.27 – Mapa de unidades geoambientais (CPRM, 2002) e poços cadastrados

Segundo dados da CPRM (2002), as unidades mapeadas como 10-A6, 10-B5a e 10-G8 possuem manto de intemperismo com espessura reduzida para reter e eliminar poluentes e para se constituir num bom aquífero superficial. As unidades mapeadas como 10-E8 e 10-E7 possuem manto de intemperismo com espessura reduzida ou inexistente. As unidades mapeadas como 10-B4, 10-E5, 10-F4, 10-F5 e 10-G4 apresentam manto de intemperismo espesso e em alguns locais favoráveis a existência de aquífero superficial.

O gráfico da Figura 4.2.1.28 apresenta o resultado da tabulação cruzada entre produtividade de poços e espessura do manto de intemperismo.

Fig. 4.2.1.28-- Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização em relação aos dados de espessura do manto de intemperismo das unidades geoambientais.

Observa-se no gráfico que o fator espessura do manto de intemperismo não possui significativa influência quando relacionado à produtividade de poços. Poços localizados em áreas mapeadas como manto de intemperismo espesso e de espessura reduzida apresentam um comportamento muito parecido. Poços localizados em áreas de manto de intemperismo com espessura reduzida ou inexistente apresentam as mais baixas produtividades, mas também as mais altas produtividades. Isso significa que na área de estudo, o manto de intemperismo (que não ultrapassa 40 metros de espessura) não é um fator controlador da infiltração de água subterrânea, mas sim o fraturamento das rochas, as quais encontram-se expostas na área de estudo. É o fraturamento que aumenta a permeabilidade e permite a maior infiltração e conseqüentemente circulação e armazenamento.

Dessa forma, o fator espessura do manto de intemperismo não será considerado na elaboração do mapa de favorabilidade à ocorrência de água subterrânea.

n) Produtividade de poços x feição topográfica

Segundo Yin e Brook (1992) e Henriksen (1995) em regiões de rochas cristalinas a produtividade de poços está relacionada com a feição topográfica. Dessa forma, optou-se por realizar análises entre a capacidade específica de poços e sua localização de acordo com a feição topográfica (vale, vertente ou topo) para verificar se este parâmetro está influenciando a produtividade de poços na região de Lindóia. A Figura 4.2.1.29 apresenta o modelo numérico de terreno da área e a localização dos poços cadastrados.

Fig. 4.2.1.29– Modelo numérico de terreno e poços cadastrados

Com base no modelo numérico de terreno, a área foi dividida em três unidades topográficas: vale, vertente e topo. A Figura 4.2.1.30 apresenta o gráfico de frequência acumulada da capacidade específica de poços agrupados em função da sua localização topográfica.

Fig. 4.2.1.30— Frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização em relação às feições topográficas.

O coeficiente *Spearman* (igual a zero) indica a ausência de correlação entre a topografia e a produtividade de poços. No gráfico de frequência acumulada, observa-se que poços locados em vales e topos apresentam um comportamento muito semelhante em relação à produtividade. Além disso, muitas vezes os vales são paralelos a grandes lineamentos, os quais se caracterizam por um padrão de fraturamento intenso, auxiliando na infiltração, circulação e armazenamento de água.

Os poços locados em vertentes apresentam um comportamento interessante, pois possuem as mais baixas produtividades, mas também apresentam produtividades elevadas (acima de 0,66 m³/h/m). As baixas produtividades podem ser explicadas devido a pequena espessura do manto de alteração ou até mesmo sua ausência juntamente com um elevado escoamento superficial, que ocorrem neste tipo de unidade topográfica, que diminuem a infiltração, circulação e armazenamento de água. Por outro lado, as elevadas produtividades se relacionam com o alto índice de fraturamento das rochas, muitas vezes aflorantes. Esse fraturamento é responsável pela elevada infiltração, circulação e armazenamento de água, fazendo com que regiões classificadas como vertentes também tenham poços produtivos.

Dessa forma, como as diferentes feições topográficas possuem poços com produtividades baixas e elevadas, o parâmetro topografia não será considerado na análise de favorabilidade.

4.2.2 Dados de nascentes

As análises realizadas entre as ocorrências de fontes e os diversos parâmetros geológicos, geomorfológicos, pedológicos, teve como objetivo verificar se os mesmos parâmetros que

influenciam a produtividade de poços também influenciam a ocorrência de nascentes. Em caso positivo, as nascentes podem ser utilizadas para a avaliação do mapa de favorabilidade.

a) fontes x lineamentos estruturais (zonas de cisalhamento dúcteis a dúcteis rúpteis)

A análise entre a ocorrência de fontes e a distância dos lineamentos (zonas de cisalhamento) também se realizou em duas etapas. Primeiro elaborou-se um mapa de distância entre os lineamentos, estabelecendo-se corredores ("buffer") em torno dos lineamentos. Os valores das distâncias foram definidos em classes de 50 metros.

Posteriormente fez-se a tabulação cruzada entre o mapa de distâncias dos lineamentos e a localização das fontes. A Figura 4.2.2.1 apresenta o mapa de lineamentos e presença de fontes e a Figura 4.2.2.2 apresenta o gráfico resultante da tabulação cruzada entre ocorrência de fontes e distância de lineamentos.

Fig. 4.2.2.1 – Mapa de lineamentos estruturais (zonas de cisalhamento) e ocorrência de fontes.

Fig. 4.2.2.2 – Distância de lineamentos x quantidade de fontes

Conforme pode ser observado, a maioria das fontes na área (95% do total de fontes cadastradas) se localiza próxima a até 200 metros dos lineamentos interpretados, semelhante ao apresentado na análise da produtividade de poços em relação à presença de lineamentos. Isto significa que estas regiões são mais intensamente fraturadas e, portanto, mais favoráveis à infiltração, circulação e armazenamento de água.

b) fontes x intersecção de lineamentos (zonas de cisalhamento)

Admitiu-se um valor de 600 metros de distância de intersecção dos lineamentos (obtido na análise com os poços) e gerou-se um mapa de "buffers" de 600 metros. Posteriormente realizou-se a tabulação cruzada entre ocorrência de fontes e mapa de distância de intersecção de lineamentos. Por fim realizou-se uma análise da vazão das fontes em função de sua distância em relação as intersecções de lineamentos (Figura 4.2.2.3).

Fig. 4.2.2.3 – Frequência acumulada de dados de vazão de fontes agrupados em função de sua localização em relação à distância de intersecção de lineamentos.

Conforme pode ser observado a maioria das fontes ocorrem a uma distância de até 600 em relação às intersecções de lineamentos. Além disso, as maiores vazões também ocorrem até 600 metros da intersecção de lineamentos. Isso significa que a intersecção de lineamentos é um fator importante e deve ser considerado na análise de favorabilidade.

c) fontes x densidade de lineamentos por comprimento (zonas de cisalhamento)

Da mesma maneira como realizado na análise da produtividade de poços, também foi realizada a tabulação cruzada entre o mapa de densidade de lineamentos por comprimento (Figura 4.2.2.4) e a ocorrência de fontes. O resultado da tabulação cruzada é apresentado na forma de gráfico (Fig. 4.2.2.5).

Fig. 4.2.2.4 – Mapa de densidade de lineamentos (zonas de cisalhamento) por comprimento e ocorrência de fontes.

Fig. 4.2.2.5 – Gráfico da quantidade de fontes e sua localização no mapa de densidade de lineamentos por comprimento

Observa-se que a maior quantidade de fontes se localiza nas áreas mapeadas como intermediária e alta densidade de comprimento de lineamentos. Para uma avaliação mais detalhada, optou-se por realizar a tabulação cruzada entre a vazão das fontes e sua localização no mapa de contagem de lineamentos por comprimento. Cabe ressaltar que de todas as fontes cadastradas somente 67% possuem dados de vazão. O resultado desta tabulação cruzada é apresentado na forma de gráfico de frequência acumulada de casos (%) pela vazão das fontes (Figura 4.2.2.6).

Fig. 4.2.2.6– Frequência acumulada da vazão das fontes agrupadas em função de sua localização em relação ao mapa de densidade de lineamentos por comprimento.

É interessante notar que as regiões mapeadas como alta densidade possuem uma quantidade considerável de fontes, além de possuir as fontes com as maiores vazões. A maior quantidade de fontes localiza-se nas áreas mapeadas como intermediária densidade e também possuem dados elevados de vazão, porém, menores do que as fontes localizadas em regiões de alta densidade. Já as regiões de mapeadas como de baixa densidade possuem poucas fontes e estas com dados de vazão baixos.

Isso significa que áreas de alta e intermediária densidade de comprimento de lineamentos são mais favoráveis à infiltração, circulação e armazenamento de água, pois se caracterizam por regiões de maior fraqueza e conseqüentemente pelo maior fraturamento.

d) fontes x densidade de lineamentos (zonas de cisalhamento)

Da mesma maneira como realizado na análise da produtividade de poços, também foi realizada a tabulação cruzada entre o mapa de densidade de lineamentos (Figura 4.2.2.7) e a ocorrência de fontes. Observa-se que a maior parte das fontes está alinhada segundo um eixo NE-SW (zona de cisalhamento Monte Sião), que corresponde às maiores contagens de lineamentos por unidade de área. O resultado da tabulação cruzada é apresentado na forma de gráfico (Figura 4.2.2.8).

Fig. 4.2.2.7 – Mapa de densidade de lineamentos (zonas de cisalhamento) e ocorrência de fontes.

Fig. 4.2.2.8 – Gráfico da quantidade de fontes e sua localização no mapa de densidade de lineamentos

Observa-se que a maior quantidade de fontes se localiza nas áreas mapeadas como intermediária e alta densidade de comprimento de lineamentos. Para uma avaliação mais detalhada, também se realizou a tabulação cruzada entre a vazão das fontes e sua localização no mapa de contagem de lineamentos. O resultado desta tabulação cruzada é apresentado na forma de gráfico de frequência acumulada de casos (%) pela vazão das fontes (Figura 4.2.2.9).

Fig. 4.2.2.9– Frequência acumulada da vazão das fontes agrupadas em função de sua localização em relação ao mapa de densidade de lineamentos.

As fontes com as maiores vazões encontram-se em áreas mapeadas como alta e intermediária densidade, mas diferente do observado no mapa de comprimento de lineamentos, não fica claro que as maiores vazões encontram-se nas mais altas densidades. Porém, mesmo na área mapeada como baixa densidade, apesar de possuir poucas fontes, estas possuem vazões consideráveis, próximas de 1 l/s. Isso significa que o mapa de densidade de lineamentos não tem muita importância na identificação de áreas favoráveis a ocorrência de água subterrânea, uma vez que os resultados obtidos nas análises não demonstram claramente a influência deste parâmetro na vazão e ocorrência de fontes. Isso também foi observado na análise da produtividade de poços em relação a este mapa.

e) fontes x direções dos lineamentos (zonas de cisalhamento)

Todas as fontes cadastradas se localizam ou em até 200 metros dos lineamentos ou na região de intersecção de lineamentos (até 600 metros), o que comprova a importância do fator lineamento. Para o melhor entendimento da importância deste fator, realizou-se a tabulação cruzada entre as direções dos lineamentos e a quantidade de fontes e entre as direções dos lineamentos e a vazão das fontes.

A Figura 4.2.2.10 apresenta o gráfico das direções dos lineamentos que estão próximos às fontes. Conforme pode ser observado, a maior quantidade de fontes se localiza em lineamentos de direção NE (Y, P e R) e na intersecção de lineamentos de NE (Y, P e R) e NW (R'), NE (Y, P e R) e NS (X), EW (T) e NS (X) e NE (Y, P e R) – NS (X) – NW (R'). Estas direções coincidem com as direções das fraturas medidas próximas às fontes (medidas em campo).

Fig. 4.2.2.10 – Gráfico das direções dos lineamentos próximos às fontes.

A Figura 4.2.2.11 apresenta o gráfico de frequência acumulada da vazão das fontes e sua localização em função das direções de lineamentos.

Fig. 4.2.2.11 – Frequência acumulada da vazão das fontes agrupadas em função da sua localização nas direções dos lineamentos.

Observa-se que fontes localizadas próximas a lineamentos de direções NW e NW-NS apresentam as menores vazões. As fontes localizadas nas direções NE, NE-NS, NE-NW e NE-NS-NE, NE-NS-EW apresentam um comportamento semelhante, em relação aos dados de vazão.

Esta análise demonstra que semelhante ao observado com os dados de poços, as direções das zonas de cisalhamento, representada pelos lineamentos, possuem significativa importância na ocorrência de fontes.

f) fontes x litologia

A Figura 4.2.2.12 apresenta o mapa geológico compilado, separado em função do tipo litológico predominante e as fontes cadastradas.

Fig. 4.4.2.12 – Mapa de geológico e ocorrência de fontes.

É interessante notar que as unidades litológicas, de uma maneira geral, possuem orientação NE-SW, seguindo o padrão tectônico da área.

1. fontes x tipos litológicos

A Figura 4.2.2.13 apresenta o resultado da tabulação cruzada entre quantidade de fontes a sua localização no mapa geológico. Nota-se que 70% das fontes localizam-se em gnaisses e migmatitos nas cidades de Águas de Lindóia, Lindóia e Serra Negra.

Fig. 4.2.2.13 – Quantidade de fontes e tipos litológicos.

2. fontes x contatos geológicos

Outro fator analisado foi a ocorrência de fontes e sua localização em função da proximidade dos contatos geológicos. Admitiu-se uma distância de até 250 metros em relação aos contatos geológicos, em função dos dados obtidos pela análise com os poços. A Figura 4.2.2.14 apresenta o resultado da tabulação cruzada entre a ocorrência de fontes e a sua localização de acordo com a distância dos contatos geológicos.

Fig. 4.2.2.14 – Quantidade de fontes e distância entre os contatos litológicos.

Nota-se que do total de fontes cadastradas, praticamente metade se localiza a distâncias de até 250 metros dos contatos geológicos e a outra metade se localiza a distâncias maiores que 250 metros. Optou-se em realizar uma análise mais detalhada utilizando-se os dados de vazão das fontes, com o objetivo de se verificar se o fator contato geológico tinha uma influência significativa na ocorrência de fontes. A Figura 4.2.2.15 apresenta o gráfico resultante.

Fig. 4.2.2.15— Frequência acumulada da vazão das fontes agrupadas em função de sua distância dos contatos geológicos.

Observando-se o gráfico, pode-se notar um comportamento muito semelhante entre a vazão das fontes e a distância dos contatos geológicos. O coeficiente *Spearman* (igual a zero) indica a inexistência de correlação. Porém, observando-se o gráfico de frequência acumulada, nota-se que as fontes com as maiores vazões, na maioria encontram-se próximas (até 250 m) de contatos geológicos. Isso acontece porque na área de estudo, muitas vezes os contatos litológicos são também contatos litoestruturais, isto é, são feições estruturais, como falhas, que são responsáveis pela colocação das litologias lado a lado. Essas feições estruturais aumentam a porosidade secundária das rochas, auxiliando na maior infiltração, circulação e armazenamento de água.

g) fontes x mapa de isofrequência de zonas de juntas

A Figura 4.2.2.16 apresenta o mapa de isofrequência de zonas de juntas e as ocorrências de fontes.

Fig. 4.2.2.16 – Mapa de isofrequência de zonas de juntas e localização das fontes.

A Figura 4.2.2.17 apresenta o gráfico resultante da tabulação cruzada entre presença de fontes e mapa de isofrequência de zonas de juntas.

Fig. 4.2.2.17 – Quantidade de fontes e sua localização em relação ao mapa de isofrequência de zonas de juntas

Nota-se que não ocorrem nascentes em regiões classificadas como baixa densidade de zonas de juntas. O resultado obtido também evidencia a importância de se mapear as áreas mais fraturadas, pois estas estão relacionadas com ocorrência de fontes (surgência natural de água) e conseqüentemente à maior infiltração, circulação e armazenamento de água.

h) fontes x mapa morfoestrutural

A Figura 4.2.2.18 apresenta o mapa morfoestrutural e a ocorrência de fontes. Realizou-se a tabulação cruzada entre ocorrência de fontes as suas localizações em relação ao mapa morfoestrutural, representada pelo gráfico da Figura 4.2.2.19.

Fig. 4.2.2.18 –mapa morfoestrutural e ocorrência de fontes

Fig. 4.2.2.19 – Quantidade de fontes e sua localização em relação ao mapa morfoestrutural

Conforme pode ser observado, 90% das fontes que ocorrem nesta região se localizam em áreas mapeadas no mapa morfoestrutural como baixo e intermediário. Isto confirma a interpretação das regiões de alto morfoestrutural como áreas de recarga e as de baixo e intermediário como áreas de acumulação e descarga.

i) fontes x mapa de declividade

A Figura 4.2.2.20 apresenta o mapa de declividade da região e as fontes cadastradas. O mapa possui 5 classes de declividade (em graus). As maiores declividades localizam-se nas cidades de Águas e Lindóia, Lindóia e Serra Negra. A Figura 4.2.2.21 apresenta o gráfico da quantidade de fontes em função da sua localização no mapa de declividade.

Fig. 4.2.2.20 – Mapa de declividade e ocorrência de fontes.

Fig. 4.2.2.21 – Gráfico da quantidade de fontes e sua localização no mapa de declividade

É interessante observar que nenhuma fonte se localiza em áreas mapeadas como declividade maior do que 35°. Esses dados juntamente com os resultados obtidos na análise de produtividade de poços e classes de declividade, indicam que as classes de declividade acima

de 35° podem ser consideradas como baixa favorabilidade, pois altas declividades estão relacionadas ao maior escoamento superficial das águas e não à infiltração circulação e armazenamento de água. Dessa forma a possibilidade de perfurar poços nessas áreas, com vazão considerável é pequena, conforme verificado pelos dados. Além disso, a perfuração de poços em terrenos de declividades acentuadas não é viável, levando-se em consideração a dificuldade de se chegar aos locais com caminhões e equipamentos necessários. Assim sendo, a classe de declividade acima de 35° será considerada neste estudo, uma restrição.

j) fontes x morfologia

A Figura 4.2.2.22 apresenta o mapa da morfologia do terreno (segundo o mapa geomorfológico escala 1:500.000 (IPT/USP, 1997) e as fontes cadastradas. A maior parte das fontes cadastradas localiza-se em regiões classificadas como topos aguçados. A Figura 4.2.2.23 apresenta o gráfico resultante da tabulação cruzada entre a quantidade de fontes e sua localização no mapa de classificação morfológica do terreno.

Fig. 4.2.2.22 – Mapa geomorfológico- morfologia e ocorrência de fontes.

Fig. 4.2.2.23 – Gráfico da quantidade de fontes e sua localização no mapa geomorfológico (morfologia)

Nota-se que 65% das fontes localizam-se em regiões morfologicamente classificadas como topos aguçados e 35% em topos convexos. Verifica-se que nenhuma fonte se localiza nas áreas de topos tabulares. Dessa forma, pode-se atribuir um valor maior para as classes de morfologia de topos aguçados e topos convexos na análise de favorabilidade. Como as classes apresentam um comportamento semelhante, o peso dado ao fator geomorfologia (morfologia) na análise de favorabilidade será pequeno.

k) fontes x grau de dissecação

A Figura 4.2.2.24 apresenta o mapa geomorfológico, em classes de grau de dissecação e a localização das fontes cadastradas. A Figura 4.55 apresenta o gráfico resultante da tabulação cruzada entre a quantidade de fontes o grau de dissecação do terreno.

Fig. 4.2.2.24 – Mapa de geomorfológico (grau de dissecação) e ocorrência de fontes.

Fig. 4.2.2.25 – Gráfico da quantidade de fontes e sua localização no mapa geomorfológico

Conforme pode ser observado, a maior parte das fontes se localizam em áreas com grau de dissecação alto, mas também ocorrem fontes nas áreas mapeadas como média e muito alta. Nenhuma fonte está localizada em áreas mapeadas como baixa dissecação.

Assim como verificado na análise com a produtividade de poços, pode-se atribuir um valor maior para as classes de grau de dissecação mais altos (intermediário a muito alto) na análise de favorabilidade. Porém, como as classes apresentam um comportamento semelhante o peso dado ao fator geomorfologia (grau de dissecação) na análise de favorabilidade será pequeno.

l) fontes x mapa pedológico

A Figura 4.2.2.26 apresenta o mapa pedológico, escala 1:500.000 (Oliveira *et al.*, 1999) e as fontes cadastradas. Nota-se que todas as fontes cadastradas localizam-se em áreas mapeadas como argissolos.

A Figura 4.2.2.27 apresenta o gráfico resultante da tabulação cruzada entre a quantidade de fontes e o tipo de solo. Analisando-se o gráfico da Figura 4.2.2.27, observa-se que os solos classificados como PVA 8 e PVA 6 possuem as maiores quantidades de fontes, destacando-se o PVA 6. Essas classes se caracterizam pela textura média argilosa e por ocorrer em relevo montanhoso.

Fig. 4.2.2.27 – Mapa de pedológico e ocorrência de fontes.

Fig. 4.2.2.28 – Gráfico da quantidade de fontes e sua localização no mapa pedológico

Da mesma forma como observado com os dados de poços, não ocorrem fontes nas áreas mapeadas como latossolos. De acordo com as análises, pode-se considerar a importância das classes de argissolos na análise de favorabilidade. Mas com base em dados da literatura (Barreto *et al.*, 2000), a classe latossolo apresenta maior favorabilidade à infiltração de água subterrânea do que os argissolos, pois possui melhor drenagem.

m) fontes x feição topográfica

Da mesma maneira como realizado com os dados de poços, analisou-se a ocorrência de fontes em função das feições topográficas (vale, vertente e topo). A Figura 4.2.2.29 apresenta o modelo numérico de terreno e as fontes cadastradas e a Figura 4.2.2.30 o gráfico resultante da tabulação cruzada entre ocorrência de fontes e feições topográficas.

Fig. 4.2.2.29 – Modelo numérico de terreno e fontes cadastradas.

Fig. 4.2.2.30 – Gráfico da quantidade de fontes e sua localização de acordo com as principais feições topográficas.

A maior parte das fontes (98%) se localiza em feições topográficas classificadas como vertente e vale. Isso indica que as fontes, que são surgências naturais, estão fortemente relacionadas com as feições topográficas, aliadas a presença de fraturas.

4.3 MODELO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL E PARÂMETROS DE PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

Com base nos resultados das análises, dados de campo e dados da literatura, foram definidos alguns parâmetros prospectivos relacionados a um modelo hidrogeológico regional para a área de estudo.

Dentre os parâmetros prospectivos destacam-se as feições estruturais (foliações miloníticas e fraturas) principalmente as de direção NE-SW, os contatos geológicos (também na sua maioria NE-SW), as elevadas densidades de lineamentos (que representam zonas de cisalhamento dúcteis a dúcteis rúpteis) e de zonas de juntas e os baixos morfoestruturais que apresentaram forte correlação com as ocorrências de fontes e poços com elevadas produtividades.

Os parâmetros prospectivos aqui definidos serão avaliados para que possam ser utilizados nas análises de favorabilidade. Nas análises pelo método conduzido pelo conhecimento esses parâmetros serão avaliados pelos peritos, na forma de pesos aos fatores e às classes. Na análise pelo método conduzido pelos dados serão avaliados pela análise de pesos de evidência. A seguir, são descritos, em ordem decrescente de importância, os principais parâmetros prospectivos:

4.3.1 Lineamentos Estruturais (zonas de cisalhamento)

Os lineamentos estruturais apresentam elevada importância, uma vez que a área é constituída por rochas cristalinas polimetamórficas, intensamente deformadas, estes lineamentos correspondem a zonas de cisalhamento dúcteis a dúcteis rúpteis geradas no Pré-Cambriano. Essas zonas de cisalhamento representam regiões de fraqueza crustal, reativadas por processos distensivos posteriores gerando um intenso fraturamento, favorável à infiltração, circulação e armazenamento de água. Conforme observado em campo muitas fraturas têm a mesma direção da foliação milonítica das rochas o que comprova a importância das estruturas Pré-Cambrianas (anisotropias pré-existent).

- Distância de lineamentos

Determinou-se para a área de estudo e para a escala de trabalho (1:100.000) que a distância da influência dos lineamentos é de 200 metros. Isso significa que os poços e fontes mais distantes que 200 metros dos lineamentos podem ser considerados como fora da área de influência dos lineamentos, isto é, as regiões próximas dos lineamentos (até 200 m) representam áreas mais fraturadas e, portanto, mais favoráveis à infiltração, circulação e armazenamento de água de subterrânea.

- Intersecção de lineamentos

Considera-se para a área de estudo e para a escala de trabalho (1:100.000) um padrão de até 600 metros de distância como área de influência da intersecção de lineamentos. As intersecções aumentam a área de influência dos lineamentos. Teoriza-se que isso é ocasionado pela maior largura das zonas fraturadas nas regiões de intersecção de lineamentos em relação às zonas fraturadas de um único lineamento. Dessa forma, as áreas de intersecção de lineamentos são mais favoráveis à infiltração, circulação e armazenamento de água.

- Densidade de lineamentos por comprimento

O mapa de densidade de lineamentos por comprimento teve um resultado mais interessante do que o mapa de densidade de lineamentos por contagem. No primeiro mapa fica claro que áreas com a maior densidade de comprimento relaciona-se aos poços mais produtivos e à maior ocorrência de fontes. Isso indica, que para a maior infiltração, circulação e armazenamento de água, são mais importantes as estruturas mais extensas por unidade de área do que pequenas estruturas em maior quantidade.

- Direção de lineamentos

Com base nas feições de cisalhamento dúcteis e dúcteis-rúpteis presentes na área (de acordo com o modelo teórico-empírico adotado, capítulo 2), as principais direções de lineamentos são NE-SW (P, Y e R), N-S (X), NW-SE (R') e E-W (T). Nas análises é evidente a influência dos lineamentos de direção NE e de lineamentos que se interceptam segundo as direções NE-NS na produtividade de poços.

4.3.2 Litologia

Constatou-se pelos resultados das análises que o tipo litológico e principalmente os contatos geológicos possuem grande influência na infiltração, circulação e armazenamento de água subterrânea em terrenos fraturados.

- Contatos geológicos

Observou-se, para a área de estudo que os contatos geológicos (distância de até 250 m) se caracterizam pela presença de fontes e pela presença de poços com elevadas produtividades. Isso acontece porque na área de estudo, muitas vezes os contatos litológicos são também contatos litoestruturais, isto é, são feições estruturais, como zonas de cisalhamento. Essas feições estruturais pré-cambrianas, reativadas por processos distensivos, aumentam a porosidade secundária das rochas, auxiliando na maior infiltração, circulação e armazenamento de água.

- Tipo litológico

O tipo litológico tem considerável importância na definição de áreas favoráveis à infiltração, circulação e armazenamento de água subterrânea. Os resultados das análises mostram que rochas deformadas foliadas e bandadas (gnaisse, migmatito, milonito e granitóides deformados) se relacionam às altas produtividades de poços. Isso se deve principalmente em função destas estruturas Pré-Cambrianas representarem regiões de fraqueza, reativadas por processos distensivos posteriores que gera o fraturamento nestas direções e conseqüentemente a maior infiltração, circulação e armazenamento de água.

Os quartzitos intensamente fraturados também se caracterizam pela ocorrência de poços de produtividade elevada, o que deve ser levado em consideração na etapa de definição de pesos às classes para a elaboração do mapa de favorabilidade.

Os granitóides e granitos não deformados serão os que irão apresentar o menor peso na análise de favorabilidade (em função da produtividade dos poços), devido a essas rochas terem um caráter mais maciço, dificultando a infiltração percolação e armazenamento de água.

4.3.3 Isofrequência de zonas de juntas

As isofrequências de zonas de juntas mostram que as classes mapeadas como altas e intermediárias são as que apresentam os maiores valores de produtividade de poços. Porém, áreas mapeadas como alta isofrequência também possuem alguns poços com valores de produtividade baixos (em torno de $0,02 \text{ m}^3/\text{h/m}$). Isso significa que além da ocorrência de várias fraturas, outros fatores geológicos devem ser considerados, como direção de fraturamento, análise morfoestrutural, etc.

Em relação à ocorrência de nascentes, todas se localizam em áreas mapeadas como alta a intermediária isofrequência de zonas de juntas. Dessa forma, fica evidente a importância do grau de fraturamento no estudo de aquíferos cristalinos.

4.3.4 Morfoestruturas

O mapa morfoestrutural comparado com a produtividade de poços mostra que os maiores valores de produtividade estão relacionados com regiões intermediárias e de baixo morfoestrutural. Em relação à ocorrência de nascentes cadastradas, 90% destas localizam-se nas áreas mapeadas como baixo e intermediário morfoestrutural.

Isso reforça a importância deste mapa para o estudo hidrogeológico, já que, teoricamente, os altos morfoestruturais indicam as zonas de recarga e os baixos e intermediários as zonas de acumulação, onde as estruturas verticais (que delimitam o basculamento dos blocos) em conexão com outras fraturas poderão induzir o maior fluxo de água subterrânea em direção aos baixos morfoestruturais.

4.3.5 Geomorfologia

De acordo com as análises, tanto os fatores morfológicos como os graus de dissecação possuem pequena importância em relação à infiltração, circulação e armazenamento de água. Dentro do fator morfologia, tem-se como maior favorabilidade topos aguçados e convexos em relação aos topos tabulares. Isso é explicado principalmente pela estruturação da área e pelo grau de fraturamento mais intenso que ocorre nas áreas de topos aguçados e convexos.

Em relação ao grau de dissecação, nota-se de acordo com as análises, que as classes muito dissecada e dissecada estão relacionadas às maiores favorabilidades. Isso ocorre porque os

níveis de dissecação estão condicionados aos fatores litológicos e tectônicos, uma vez que as áreas mapeadas como mais dissecadas coincidem com as áreas de maior estruturação, isto é mais deformadas e fraturadas.

Optou-se por unir os fatores morfologia e grau de dissecação, como um único fator, o fator geomorfologia, uma vez que ambos apresentam pequeno peso na análise de favorabilidade.

4.3.6 Pedologia

A importância na definição do tipo de solo está relacionada à infiltração de águas meteóricas, uma vez que solos mais espessos e permeáveis serão mais favoráveis à esta infiltração. É importante salientar que apesar de não ocorrerem poços locados nas áreas mapeadas como latossolos, mas com base em dados da literatura (Barreto *et al.*, 2000), a classe latossolo apresenta maior favorabilidade à infiltração de água subterrânea do que os argissolos, pois possui melhor drenagem.

Cabe ressaltar que na área de estudo, ocorrem muitos locais onde o substrato rochoso é aflorante e por isso, mesmo que não ocorra a presença de solo permeável ou manto de alteração espesso, essas regiões podem apresentar alta infiltração e armazenamento de água devido ao intenso fraturamento deste substrato. Por isso, o fator pedologia terá uma pequena importância na avaliação de favorabilidade.

4.3.7 Declividade

O fator declividade é importante principalmente em relação às áreas de restrição, isto é, áreas onde não se devem local poços (favorabilidade igual a 0). Todas as classes analisadas apresentam comportamentos semelhantes, porém, a classe com declividade maior que 35° foi considerada como uma área de restrição, não somente pelo maior escoamento superficial causado pelo declive (o que dificulta a infiltração da água) evidenciado pela ausência de fontes e poços com boa produtividade, mas também porque a perfuração de poços em terrenos de declividades acentuadas não é viável, levando-se em consideração a dificuldade de se chegar aos locais com caminhões e equipamentos necessários.

4.3.8 Manto de intemperismo

De acordo com dados da literatura, em regiões cristalinas, principalmente na África, a espessura do manto de intemperismo possui extrema importância na infiltração da água subterrânea. Porém, através das análises realizadas, observou-se que tanto regiões com manto de intemperismo espesso (aproximadamente 40 metros) como áreas com ausência de manto de intemperismo, possuem respostas semelhantes em relação à produtividade de poços.

Isso acontece porque em muitos locais o substrato rochoso é aflorante e por isso, mesmo que não ocorra a presença de manto de alteração espesso, essas regiões podem apresentar alta

infiltração e armazenamento de água devido ao intenso fraturamento deste substrato. Por isso, o fator manto de intemperismo não será utilizado na avaliação de favorabilidade.

4.3.9 Topografia

Alguns autores (Yin e Brook, 1992 e Henriksen, 1995) consideram o fator topografia (feições de vale, vertente e topo) como principal condicionante para ocorrência de água subterrânea. Porém, de acordo com as análises realizadas entre estas feições e a produtividade de poços na área, observou-se que para todos os fatores considerados ocorrem poços produtivos e pouco produtivos. Devido a esse comportamento semelhante observado entre as feições de vale, vertente e topo, o fator topografia não será utilizado na análise de favorabilidade.

4.3.10 Ocorrência de fontes

A ocorrência de fontes é um parâmetro muito importante na definição de áreas favoráveis. Como resultados das análises entre os parâmetros de interesse e as fontes foi muito parecido com os obtidos nas análises com poços, optou-se por utilizar as ocorrências de fontes na tabulação cruzada com os mapas de favorabilidade resultantes das análises booleana, combinação linear ponderada e média ponderada ordenada. Já para a análise por pesos de evidência os dados de fontes foram utilizados juntamente com poços muito produtivos, como pontos de treinamento.

Além dos dados de fontes, também são utilizados dados de produtividade de poços (os quais não foram utilizados nas análises) para a verificação da qualidade dos mapas de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea.

4.4 ANÁLISE DE FAVORABILIDADE

MÉTODO CONDUZIDO PELO CONHECIMENTO

a) Avaliação de favorabilidade utilizando critérios múltiplos por geoprocessamento

Segundo Araújo (1999), a análise de favorabilidade mineral é baseada em critérios. Os critérios formam a base de uma decisão a partir de elementos que podem ser medidos ou avaliados. Esta inferência é baseada nos objetivos da avaliação. Na avaliação de favorabilidade, os parâmetros prospectivos são os critérios, e as áreas de maior favorabilidade de ocorrência mineral são os objetivos da avaliação. Segundo Eastman *et al.* (1995) e Eastman (1997), os critérios podem ser de dois tipos: os fatores e as restrições.

O fator, de um modo geral, é um critério que aumenta ou diminui o peso de uma determinada alternativa para a atividade em consideração. A restrição limita as alternativas em consideração (Eastman, 1997). No caso da avaliação de favorabilidade para água subterrânea, a proximidade de lineamentos pode ser considerada um fator e as declividades acentuadas uma restrição.

Neste trabalho de avaliação de favorabilidade, os fatores são constituídos pelos elementos principais relacionados aos parâmetros prospectivos, ou seja, os fatores são constituídos de elementos estruturais, litológicos, morfoestruturais, geomorfológicos, pedológicos e declividade. Estes fatores são subdivididos em classes. Por exemplo: dentro do fator lineamentos, podem-se considerar as classes de proximidade de lineamentos, proximidade da intersecção de lineamentos, densidade de lineamentos e direção de lineamentos.

Para a avaliação a partir de vários critérios (como é o caso da favorabilidade de água subterrânea) pode-se utilizar, segundo Eastman (1997), a sobreposição booleana, a combinação linear ponderada (CLP) e média ponderada ordenada (MPO), estas duas últimas são variações do método de índices somativos (Bonham-Carter, 1994).

Segundo Eastman (1997) e Araújo (1999), a sobreposição booleana reduz os fatores a elementos binários e os combina a partir de operadores booleanos com o **AND (E)** e **OR (OU)**. Utilizando-se o operador AND (intersecção) obtém-se o mínimo de áreas favoráveis possíveis, ou seja, obtém-se apenas as áreas onde há sobreposição de informações em todos os níveis de informação utilizados. Com o operador OR (união), obtém-se o máximo de áreas favoráveis possíveis, ou seja, o mapa final conta com todas as informações de todos os níveis de informação utilizados. A combinação linear ponderada (CLP) é aplicada segundo a equação:

$$F = \sum P_{ij} \cdot X_i$$

Onde: F: favorabilidade

P_{ij}: peso da classe j no mapa i

X_i: peso do mapa i

O método de combinação linear ponderada (CLP) padroniza os fatores a uma escala numérica comum. Como resultado, obtém-se um mapa contínuo de favorabilidade que pode ser reclassificado para intervalos adequados à tomada de decisões ou ainda, pode-se definir um limiar para separar as áreas de interesse. Segundo Araújo e Macedo (2002) este procedimento é caracterizado por gerar um resultado situado entre a sobreposição booleana utilizando-se o operador AND e a sobreposição booleana utilizando-se o operador OR, ou seja, é possível definir um mapa de favorabilidade num conjunto intermediário entre a operação de união (hipótese otimista) e a de intersecção (hipótese pessimista). Além disso, este procedimento diferencia-se da sobreposição booleana, pois considera os **pesos** de cada fator. No caso booleano os fatores são rígidos, verdadeiros ou falsos. Na análise linear ponderada pode-se utilizar uma escala contínua de favorabilidade para cada fator.

O procedimento de análise da média ponderada ordenada é semelhante à combinação linear ponderada. Porém, neste método considera-se também o peso de ordenação de cada fator. O peso de ordenação serve para modificar os pesos de cada mapa antes destes serem aplicados. A média ponderada ordenada (MPO) é aplicada segundo a equação (Eastman, 1997):

$$F = \sum P_{ij}.X_i.P_{oi}$$

Onde: F: favorabilidade

P_{ij} : peso da classe j no mapa i

X_i : peso do mapa i

P_{oi} : peso de ordenação do mapa i

Segundo Araújo e Macedo (2002) a MPO permite ponderação dos fatores pela ordenação de importância destes e também considera o peso absoluto de cada variável.

b) Definição dos pesos aos parâmetros prospectivos

A definição de pesos aos critérios é etapa fundamental na avaliação de favorabilidade. Neste sentido busca-se uma ponderação objetiva, segundo conhecimento geológico factual, mas que também deve considerar idéias subjetivas baseadas em experiências anteriores. Os pesos finais apresentados nas tabelas foram definidos pela bolsista, com base nas análises dos dados, nas opiniões de peritos e em dados bibliográficos.

As Tabelas 4.4.1 a 4.4.10 apresentam, na ordem decrescente de importância, os parâmetros prospectivos (fatores e classes), definidos pela autora e os pesos atribuídos a eles pelos peritos.

TABELA 4.4.1 – PARÂMETROS PROSPECTIVOS – FATOR LINEAMENTOS (zonas cisalhamento)

<i>Descrição dos parâmetros prospectivos</i>	Perito 1	Perito 2	Perito 3	Perito 4	Final
Peso do fator Lineamento	8	5	10		10
<i>Descrição</i>					
Proximidade de lineamentos (até 250 m)	10	8	10	10	10
Intersecção de lineamentos (até 600 m)	9	10	10	10	10
Densidade de lineamentos por comprimento:					
Baixa densidade	6	6	6	7	6
Intermediária	8	8	8	9	9
Alta densidade	10	10	10	9	10
Direção de lineamento NE	5	10	-	10	10
Outras direções	9	8	-	6	6
Direção intersec. NE-NS	6	10	-	10	10
Direção intersec. NE-NE	6	10	-	9	9
Direção intersec. NE-NW	6	10	-	8	8
Outras direções intersec.	7	7	-	7	7

TABELA 4.4.2 – PARÂMETROS PROSPECTIVOS – FATOR LITOLOGIA

<i>Descrição dos parâmetros prospectivos</i>	Perito 1	Perito 2	Perito 3	Perito 4	Final
Peso do fator Litologia	8	-	8	10	9
<i>Descrição</i>					
Rochas deformadas e foliadas	10	-	10	10	10
Granitos e granitóides não deformados	6	-	5	4	4
Proximidade de contatos litológicos (até 250 m)	9	-	10	10	10

TABELA 4.4.3 – PARÂMETROS PROSPECTIVOS – FATOR ISOFREQÜÊNCIA DE ZONAS DE JUNTAS

<i>Descrição dos parâmetros prospectivos</i>	Perito 1	Perito 2	Perito 3	Perito 4	Final
Peso do fator zonas de juntas	8	10	10	9	9
<i>Descrição</i>					
Baixa	5	6	6	5	5
Intermediária	9	8	8	9	9
Alta	10	10	10	10	10

TABELA 4.4.4 – PARÂMETROS PROSPECTIVOS – FATOR MORFOESTRUTURAS

<i>Descrição dos parâmetros prospectivos</i>	Perito 1	Perito 2	Perito 3	Perito 4	Final
Peso do fator Morfoestruturas	6	4	-	8	8
<i>Descrição</i>					
Baixo morfoestrutural	10	10	-	10	10
Intermediário	10	8	-	10	10
Alto morfoestrutural	5	6	-	4	5

TABELA 4.4.5 – PARÂMETROS PROSPECTIVOS – FATOR DECLIVIDADE

<i>Descrição dos parâmetros prospectivos</i>	Perito 1	Perito 2	Perito 3	Perito 4	Final
Peso do fator declividade	4	4	7	3	2
<i>Descrição</i>					
0°-5°	10	10	10	8	7
5°-15°	8	8	8	8	7
15°-25°	6	6	6	8	7
25°-35°	3	3	3	6	7
> 35°	0	0	0	0	0

TABELA 4.4.6 – PARÂMETROS PROSPECTIVOS – FATOR PEDOLOGIA

<i>Descrição dos parâmetros prospectivos</i>	Perito 1	Perito 2	Perito 3	Perito 4	Final
Peso do fator pedologia	5	-	7	2	2
<i>Descrição</i>					
argissolo	9	-	8	9	8
latossolo	10	-	10	10	9
gleissolo	3	-	5	2	0

TABELA 4.4.7 – PARÂMETROS PROSPECTIVOS – FATOR MORFOLOGIA

<i>Descrição dos parâmetros prospectivos</i>	Perito 1	Perito 2	Perito 3	Perito 4	Final
Peso do fator morfologia	3	0	4	2	2
<i>Descrição</i>					
Topos aguçados	2	0	2	3	3
Topos convexos	3	0	3	3	3
Topos tabulares	3	0	3	2	2

TABELA 4.4.8 – PARÂMETROS PROSPECTIVOS – FATOR GRAU DE DISSECAÇÃO

<i>Descrição dos parâmetros prospectivos</i>	Perito 1	Perito 2	Perito 3	Perito 4	Final
Peso do fator grau de dissecação	3	0	4	2	2
<i>Descrição</i>					
Muito alta	4	0	3	3	3
Alta	4	0	3	3	3
Média	2	0	5	2	2
Baixa	2	0	5	2	2

TABELA 4.4.9 – PARÂMETROS PROSPECTIVOS – FATOR OCORRÊNCIA DE FONTES

<i>Descrição dos parâmetros prospectivos</i>	Perito 1	Perito 2	Perito 3	Perito 4	Final
Peso do fator ocorrência de fontes	10	10	-	10	10
<i>Descrição</i>					
baixa	5	5	-	5	7
intermediária	9	8	-	10	10
alta	0	10	-	10	10

O fator ocorrência de fontes possui um peso muito elevado, mas é um fator restrito às cidades de Serra Negra, Lindóia e Águas de Lindóia. Como o resultado das análises entre fontes e os parâmetros prospectivos foram semelhantes às análises entre poços e os parâmetros, optou-se pela utilização da presença de fontes para a verificação da confiabilidade do mapa de favorabilidade gerado.

Em relação aos fatores grau de dissecação e morfologia, por se tratarem de critérios geomorfológicos, estes serão unidos como um único fator geomorfologia, assim como realizado por Langevin *et al.* (1991). Além dos fatores apresentados, o fator declividades acima de 35° serão consideradas restrições.

b) Construção dos fatores

Na construção dos fatores foram considerados os pesos atribuídos aos parâmetros prospectivos, numa escala de 0 a 10, os quais foram reclassificados numa escala contínua de favorabilidade de 0 a 255, onde 0 é não favorável e 255 é favorável.

Na construção de fatores, utilizou-se o módulo *fuzzy*, com função de pertinência linear para se reescalonar os valores de uma escala de 0 a 10 (pesos dos parâmetros prospectivos) para outra de 0 a 255 (escala exigida pelo programa Idrisi para a análise), especialmente para a reclassificação de níveis de informação mantendo-se a proporcionalidade dos valores originais. Na definição dos pontos de controle das funções lineares observaram-se os valores máximo e mínimo para cada nível de informação.

É importante ressaltar que nos fatores onde ocorre sobreposição de classes, como por exemplo no fator litologia, onde são considerados tipo litológico (escala de 0-255) e proximidade de contatos geológicos (escala de 0-255), as imagens referentes aos parâmetros litologia e contatos foram somados e a imagem resultante foi reclassificada para um intervalo de 0 a 255, utilizando-se a função de pertinência linear fuzzy. Neste caso, uma escala de 0 a 510 ($255 + 255$) é reclassificada para 0 a 255.

4.4.1 Análise Booleana

Conforme descrito anteriormente, a análise booleana considera apenas valores binários, isto é 0 e 1. Dessa forma, para esta análise foram utilizados os fatores lineamentos, litologia, isofrequência de zonas de juntas, morfoestruturas, declividade, pedologia, geomorfologia e manto de intemperismo como níveis de evidência e as classes foram reclassificadas para valores binários, onde o valor 1 significa presença de evidência e 0 ausência de evidência.

Na construção dos fatores, a partir dos elementos que compõem as classes, utilizou-se a operação lógica booleana OR (união). Isto é, para o fator litologia, por exemplo, foram consideradas favoráveis (valor 1) as rochas deformadas e a proximidade de até 250 metros entre os contatos geológicos. A Tabela 4.4.10 apresenta os fatores e as classes utilizados na análise booleana. Cabe lembrar que as classes dos fatores tiveram que ser simplificadas em função da análise booleana não considerar classes intermediárias e apenas valores binários.

TABELA 4.4.10 – FATORES E CLASSES USADOS NA ANÁLISE BOOLEANA

Fator	Classe (favorável)	Operador booleano para cada fator	Operador booleano final no mapa de favorabilidade
Lineamento (L)	até 200 m (dist. lineam)	OR	(L AND Lt AND Zj AND M AND P)
	até 600 m (intersecção)		
	alta densidade intermediária densidade		
Litologia (Lt)	Rochas deformadas e foliadas	OR	
	Distância entre contatos geológicos (até 250 m)		
Zonas de juntas (ZJ)	alta densidade intermediária densidade	OR	
Morfoestrutura (M)	Baixo e intermediário	OR	
Pedologia (P)	argissolo latossolo	OR	

OBS: Os fatores geomorfologia e manto de intemperismo foram descartados nesta análise, pois as classes pertencentes a cada um destes dois mapas seriam consideradas favoráveis, fazendo com que o mapa inteiro fosse favorável.

Por fim, na elaboração do mapa de favorabilidade booleano, utilizou-se a operação lógica booleana AND (intersecção), de modo a se encontrar áreas onde ocorre a sobreposição de todos os fatores, ou seja, onde todas as condições são satisfeitas.

Além disso, utilizaram-se os valores de declividade acima de 35°, como fator de restrição, ou seja, independente do resultado da análise booleana essas regiões são classificadas como não favoráveis.

A Figura 4.4.1 apresenta o mapa de favorabilidade realizado através da análise booleana. O resultado do mapa é dado por duas classes: favorável e não favorável. As áreas favoráveis à ocorrência de água subterrânea foram definidas somente onde ocorre a sobreposição de todas as informações previstas nos parâmetros prospectivos.

Fig. 4.4.1 - Mapa de Favorabilidade à ocorrência de água subterrânea obtido pela Análise Booleana, fontes e poços cadastrados.

Para verificar a coerência do mapa, realizou-se a tabulação cruzada entre a produtividade de poços e o mapa de favorabilidade. A Figura 4.4.2 apresenta o gráfico de frequência acumulada da capacidade específica de poços agrupados em função de sua localização no mapa da favorabilidade booleano. Conforme pode ser observado, a classe mapeada como favorável apresenta os poços com maiores valores de capacidade específica. Porém nota-se que as duas classes (favorável e não favorável) possuem um comportamento semelhante em relação às mais baixas produtividades, isto é, as duas classes apresentam poços com as mais baixas produtividades (valores até $0,04 \text{ m}^3/\text{h/m}$).

Fig. 72 - Fig. 4.4.2 - Gráfico de frequência acumulada da capacidade específica de poços agrupados em função da sua localização no mapa de favorabilidade (análise booleana)

A Figura 4.4.3 apresenta o resultado da tabulação cruzada entre ocorrência de fontes e o mapa de favorabilidade booleano.

Fig. 4.4.3 - Tabulação cruzada entre ocorrência de fontes (%) e sua localização no mapa de favorabilidade (análise booleana)

Observa-se que 90,7% das fontes cadastradas ocorrem nas áreas mapeadas como favoráveis à ocorrência de água subterrânea. Isso significa que o mapa possui certa coerência, uma vez que as surgências naturais estão relacionadas às áreas de maior infiltração, circulação de água e armazenamento de água. Porém, como a análise booleana, não considera os pesos dados aos fatores prospectivos, nem os valores dados às diferentes classes, o mapa de favorabilidade gerado apresenta um caráter muito geral fazendo com que seja necessário um refinamento maior das classes de favorabilidade.

4.4.2 - Análise por combinação Linear Ponderada

A diferença principal da análise por combinação linear ponderada em comparação com a análise booleana é que a primeira utiliza a variabilidade de todas as classes de fatores, que são expressos na forma de dados contínuos. Dessa forma, é possível a utilização de classes de pouca favorabilidade até valores extremos de importância (Araújo e Macedo, 2002).

Os fatores são ponderados de acordo com sua importância relativa. Esta importância relativa é denominada de peso de compensação. Segundo Eastman *et al.* (1995), existem várias técnicas para a definição de pesos, porém uma das mais utilizadas é a comparação aos pares, desenvolvida por Saaty (1977 *apud* Eastman, 1997).

Nesta técnica, os pesos são definidos pelo usuário e devem considerar os dois fatores envolvidos na análise de determinado par. Segundo Saaty (1977 *apud* Eastman, 1997), a avaliação dessas comparações aos pares utiliza uma escala de nove valores contínuos. O programa utilizado (Idrisi) apresenta a escala de pesos conforme mostra a tabela 4.4.11.

TABELA 4.4.11 – Escala de pesos utilizada pelo Programa Idrisi

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
extremamente	fortemente	moderadamente	igualmente		moderadamente	fortemente	extremamente	
POUCO IMPORTANTE						MUITO IMPORTANTE		

Na definição dos pesos de compensação, compara-se cada par possível e avalia-se a matriz de comparações aos pares. O procedimento requer que o principal auto-vetor da matriz de comparação aos pares seja computado para produzir o conjunto de pesos de compensação melhor ajustados (Eastman *et al.*, 1995).

A tabela 4.4.12 apresenta os pesos atribuídos aos pares de fatores, para a análise de favorabilidade de água subterrânea. E a tabela 4.4.13 apresenta os pesos de compensação gerados pelo programa e que serão utilizados na análise CLP.

TABELA 4.4.12 - Matriz de comparação aos pares – ponderação relativa

FATORES	lineamentos	litologia	juntas	morfoestruturas	pedologia	geomorfologia
lineamentos	1					
litologia	1/3	1				
juntas	1/5	1/5	1			
morfoestruturas	1/5	1/5	1	1		
pedologia	1/9	1/9	1/9	1/9	1	
geomorfologia	1/9	1/9	1/9	1/9	1	1

TABELA 4.4.13 - Pesos dos fatores obtidos pela análise de comparação aos pares

Fatores	Pesos de compensação
lineamentos	0,4183
litologia	0,2079
juntas	0,2079
morfoestruturas	0,1189
pedologia	0,0235
geomorfologia	0,0235

A tabela 4.4.14 apresenta um quadro resumo simplificado dos pesos atribuídos pelos peritos para cada classe e dos pesos de compensação, utilizados na análise de favorabilidade. O resultado apresentado na soma ponderada corresponde ao maior valor possível em um pixel derivado da sobreposição de classes de valor máximo para cada fator. É importante ressaltar que se trata de um quadro simplificado, pois na tabela não aparecem os casos em que há sobreposição de informações em um mesmo fator. Por exemplo, dentro do fator litologia, tem-se sobreposição de tipo litológico (rochas deformadas: 255, granitos/granitóides: 102 ou outras rochas: 0) e distância de contatos geológicos (até 250 metros: 255 ou acima de 250 metros: 0). Neste caso, as imagens referentes aos os parâmetros litologia e contatos foram somados, e as áreas anômalas do fator litologia teriam um valor igual a 510 ($255 + 255$), porém esta imagem foi reclassificada para um intervalo de 0 a 255. Este procedimento foi aplicado para todos os fatores utilizados sempre que havia sobreposição de classes dentro de um mesmo fator, como o fator lineamentos.

Dessa forma, para saber o valor de um pixel na análise por CLP, cujo fator lineamento seja proximidade de lineamentos até 200 metros, proximidade da intersecção de lineamentos até 600 metros e densidade de lineamentos alta; fator litologia sejam rochas deformadas e proximidade de contatos geológicos até 250 metros, fator zonas de juntas alta densidade, fator morfoestrutura baixo, fator pedologia latossolo e fator geomorfologia topos convexos e grau de dissecação alta, executa-se a seguinte operação algébrica:

$$(255 \times 0,4183) + (255 \times 0,2079) + (255 \times 0,2079) + (255 \times 0,1189) + (154 \times 0,0235) + (154 \times 0,0235) = 250,22$$

**A TABELA 4.13 QUADRO RESUMO SIMPLIFICADO – ANÁLISE POR COMBINAÇÃO
LINEAR PONDERADA**

FATOR	CLASSES	PESO DA CLASSE (0 - 255)	PESO DE COMPENSAÇÃO	AVALIAÇÃO	SOMA DOS PESOS	SOMA PONDERADA
Lineamento	até 250 m	255	0,4183	106,66	1	250,22
	acima de 250 m	0		0		
	até 600 m	255		106,66		
	acima de 600 m	0		0		
	baixa densidade	153		63,99		
	intermediária	229,5		95,99		
	alta densidade	255		106,66		
	Direção NE	255		106,66		
	Outras direções	153		63,99		
	Direção intersec. NE-NS	255		106,66		
	Direção intersec. NE-NE	229,5		95,99		
	Direção intersec. NE-NW	204		85,33		
	Outras direções intersec.	178,5		74,66		
Litologia	rochas deformadas e foliadas	255	0,2079	53,01		
	granitos e granitóides	102		21,20		
	outras rochas	0		0		
	contatos litológicos (até 250 m)	255		53,01		
	contatos litológicos (acima de 250 m)	0		0		
Isotrefrência de zonas de juntas	baixa densidade	127,5	0,2079	26,50		
	intermediária	229,5		47,71		
	alta densidade	255		53,01		
Mapa morfoestrutural	baixo	255	0,1189	30,31		
	intermediário	255		30,31		
	alto	127,5		15,15		
Pedologia	argissolo	204	0,0235	4,79		
	latossolo	229,5		5,39		
	gleissolo	51		1,19		
Geomorfologia (morfologia e grau de dissecação)	topos aguçados e dissecação muito alta e alta	154	0,0235	3,61		
	topos aguçados e dissecação média e baixa	128		3,0		
	topos convexos e dissecação muito alta e alta	154		3,61		
	topos convexos e dissecação média e baixa	128		3,0		
	topos tabulares e dissecação muito alta e alta	128		3,0		
	topos tabulares e dissecação média e baixa	102		2,39		
	planície fluvial e dissecação baixa	51		1,19		

Assim como realizado na análise booleana, o fator declividade foi considerado restrição, ou seja, declividades acima de 35 graus foram consideradas como não favorável independente de outros fatores. Por fim, o mapa de favorabilidade, em classes de 0 a 255 foi reclassificado para

0 a 10. A Figura 4.4.4 apresenta o mapa de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea, em 10 classes.

Fig. 4.4.4– Mapa de Favorabilidade por combinação linear ponderada

Para avaliar a eficiência do mapa de favorabilidade, realizou-se a tabulação cruzada entre o mapa de favorabilidade e a capacidade específica de poços, os quais não foram utilizados nas etapas de análise. A partir da tabulação cruzada elaborou-se o gráfico de frequência acumulada de poços, agrupados em classes de favorabilidade (Figura 4.4.5).

Fig. 4.4.5 - Gráfico de frequência acumulada da capacidade específica de poços agrupados em função da sua localização no mapa de favorabilidade por análise CLP.

As classes do mapa de favorabilidade foram agrupadas em 5: classes de 10 a 9 – excelente, classes de 8 a 6 – boa, classes de 5 a 4 – moderada, classes de 3 a 1 – pouca, classes de 0 – não favorável. Krishnamurthy (1996), também definiu 5 classes na elaboração do mapa de favorabilidade para água subterrânea.

Observa-se que a classe de excelente favorabilidade apresenta poços com elevadas produtividades, sendo a maioria acima da média ($0,66 m^3/h/m$) e a classe de moderada favorabilidade apresenta poços de produtividade mais baixa do que as classes boa e excelente favorabilidade, indicando a coerência do mapa. Nenhum poço estava localizado em áreas mapeadas como pouca e nenhuma favorabilidade.

Além da análise com os poços, realizou-se uma tabulação cruzada entre a ocorrência de fontes e este mapa de favorabilidade, que está representada na forma de gráfico (Figura 4.4.6).

Fig. 4.4.6 – Tabulação cruzada entre ocorrência de fontes e mapa de favorabilidade.

Observa-se que as fontes cadastradas ocorrem nas áreas mapeadas como maior favorabilidade à ocorrência de água subterrânea (classes excelente e boa favorabilidade). Nenhuma fonte está inserida nas classes de mais baixas favorabilidades (classes moderada e pouca favorabilidade e não favorável). Isso significa que o mapa possui certa coerência, uma vez que as surgências naturais estão relacionadas às áreas de maior infiltração, circulação e armazenamento de água.

Para uma melhor avaliação deste mapa, realizou-se a tabulação cruzada entre a vazão de fontes e este mapa de favorabilidade. O resultado da tabulação cruzada é apresentado na forma de gráfico de frequência acumulada de casos em função de sua localização no mapa de favorabilidade (Figura 4.4.7).

Fig. 4.4.7 - Gráfico de frequência acumulada da capacidade específica de poços agrupados em função da sua localização no mapa de favorabilidade por análise CLP

Observando-se o gráfico, nota-se que as classes mapeadas como excelente e boa favorabilidade apresentam um comportamento semelhante em relação a vazão das fontes. Porém, observa-se que a classe mapeada como excelente favorabilidade apresenta os maiores valores de vazão de fontes, indicando que esta classe é de fato mais favorável à ocorrência de água subterrânea. Os dados demonstram a adequabilidade deste mapa para o estudo de locais de estudo de detalhe para futura locação de poços.

4.4.3 - Análise por média ponderada ordenada

Neste método, além da utilização dos pesos de compensação dados aos fatores, como na análise por CLP, utilizam-se pesos de ordenação. Segundo Eastman (1997), na análise por MPO a influência dos pesos de compensação é governada por um conjunto de pesos de

ordenação. Estes pesos de ordenação são utilizados no controle da compensação entre os fatores e são os pesos atribuídos aos fatores (opinião de peritos) e que não foram utilizados na análise por CLP, sendo definidos numa escala de 0 a 1. Dessa forma, os pesos definidos para os fatores (escala de 0 a 10) foram reescalados, conforme apresenta a tabela 4.4.14.

**A TABELA 4.4.14 - PESOS DE ORDENAÇÃO – ANÁLISE POR MÉDIA PONDERADA
ORDENADA**

Fatores	Peso definido pelos peritos (0 - 10)	Peso de ordenação (0 - 1)
Lineamentos (z. de cisalhamento)	10	0,25
litologia	9	0,225
juntas	9	0,225
morfoestruturas	8	0,2
pedologia	2	0,05
geomorfologia	2	0,05

Segundo Araújo e Macedo (2002), a principal diferença entre as análises CLP e MPO é a consideração de uma ordem de importância distinta para cada fator, ou seja, é feita a multiplicação dos pesos de compensação pelos pesos de ordenação, os quais foram previamente definidos. Além disso, na análise por MPO, os ponderados desenvolvidos para os fatores não possuem somatória igual a 1, como na análise por CLP.

A partir dos pesos de compensação, dos pesos de cada classe e dos pesos de ordenação para cada fator, apresenta-se um quadro resumo simplificado (Tabela 4.4.15).

O resultado na soma ponderada corresponde ao maior valor possível em um pixel, derivado da sobreposição de classes de valor máximo para cada fator, como na análise por CLP. Dessa forma, para saber o valor de um pixel na análise por MPO, cujo fator lineamento seja proximidade até 200 metros, proximidade da intersecção até 600 metros e densidade alta; fator litologia sejam rochas deformadas e proximidade de contatos geológicos até 250 metros, fator zonas de juntas alta densidade, fator morfoestrutura baixo, fator pedologia latossolo e fator geomorfologia topos convexos e grau de dissecação alta, executa-se a seguinte operação algébrica:

$$(255 \times 0,4183 \times 0,25) + (255 \times 0,2079 \times 0,225) + (255 \times 0,2079 \times 0,225) + (255 \times 0,1189 \times 0,2) + (154 \times 0,0235 \times 0,05) + (154 \times 0,0235 \times 0,05) = 57,22$$

Assim como realizado na CLP, o fator declividade foi considerado como restrição, ou seja, declividades acima de 35 graus foram consideradas como não favorável independente de outros fatores. Por fim, o mapa de favorabilidade, em classes de 0 a 255 foi reclassificado para 0 a 10. A Figura 4.4.8 apresenta o mapa de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea, em 10 classes.

A TABELA 4.4.15 QUADRO RESUMO SIMPLIFICADO – ANÁLISE POR MÉDIA PONDERADA ORDENADA

FATOR	CLASSES	PESO DA CLASSE (0 - 255)	PESO DE COMPENSAÇÃO	PESO DE ORDENAÇÃO	PESO MODIFICADO	AVALIAÇÃO	SOMA DOS PESOS	SOMA PONDERADA
Lineamentos	até 250 m	255	0,4183	0,25	0,105	26,77	0,225	57,22
	acima de 250 m	0				0		
	até 600 m	255				26,77		
	acima de 600 m	0				0		
	baixa densidade	153				16,06		
	intermediária	229,5				24,09		
	alta densidade	255				26,77		
	Direção NE	255				26,77		
	Outras direções	153				16,06		
	Direção intersec. NE-NS	255				26,77		
	Direção intersec. NE-NE	229,5				24,09		
	Direção intersec. NE-NW	204				21,42		
	Outras direções intersec.	178,5				18,74		
						11,98		
Litologia	rochas deformadas e foliadas	255	0,2079	0,225	0,047	4,79		
	granitos e granitóides	102				0		
	outras rochas	0				11,98		
	contatos litológicos (até 250 m)	255				0		
	contatos litológicos (acima de 250 m)	0				5,99		
						10,78		
Zonas de juntas	baixa densidade	127,5	0,2079	0,225	0,047	11,98		
	intermediária	229,5				6,12		
	alta densidade	255				6,12		
Morfoest	baixo	255	0,1189	0,2	0,024	3,06		
	intermediário	255				0,20		
	alto	127,5				0,22		
Pedol	argissolo	204	0,0235	0,05	0,001	0,05		
	latossolo	229,5				0,15		
	gleissolo	51				0,13		
Geomorfologia (morfologia e grau de dissecção)	topos aguçados e dissecção muito alta e alta	154	0,0235	0,05	0,001	0,15		
	topos aguçados e dissecção média e baixa	128				0,13		
	topos convexos e dissecção muito alta e alta	154				0,15		
	topos convexos e dissecção média e baixa	128				0,13		
	topos tabulares e dissecção muito alta e alta	128				0,13		
	topos tabulares e dissecção média e baixa	102				0,10		
	planície fluvial e dissecção baixa	51				0,05

Fig. 4.4.8– Mapa de Favorabilidade de ocorrência de água subterrânea por média ponderada ordenada.

As classes de favorabilidade foram reagrupadas da seguinte forma: classes de 10 a 9 – excelente, classes de 8 a 6 – boa, classes 5 a 4 – moderada, classes 3 a 1 – pouca e classe 0 – não favorável. Krishnamurthy *et al.* (1996), também escolheu 5 classes para a elaboração do mapa de favorabilidade para água subterrânea.

Para a avaliação do mapa de favorabilidade por MPO, realizou-se a tabulação cruzada entre este mapa e a capacidade específica de poços. A Figura 4.4.9 apresenta o gráfico de frequência acumulada de poços e os valores de capacidade específica agrupados em função de sua localização no mapa de favorabilidade.

Fig. 4.4.9 - Gráfico de freqüência acumulada da capacidade específica de poços agrupados em função da sua localização no mapa de favorabilidade por análise MPO

Observa-se que os poços de maior produtividade localizam-se nas áreas mapeadas como excelente e boa favorabilidades. A classe mapeada como moderada favorabilidade possui somente um poço cadastrado, com valor de capacidade específica próximo de 0,2 m³/h/m. A classe mapeada como pouca favorabilidade apresenta os poços com as mais baixas produtividades (0,02 m³/h/m a 0,1 m³/h/m).

Também se realizou a tabulação cruzada entre a ocorrência de fontes e este mapa de favorabilidade, que está representada também na forma de gráfico (Figura 4.4.10).

Fig. 4.4.10 - Tabulação cruzada entre ocorrência de fontes e mapa de favorabilidade

Observa-se que as fontes cadastradas ocorrem nas áreas mapeadas como maior favorabilidade à ocorrência de água subterrânea (classes excelente e boa favorabilidade). Nenhuma fonte está inserida nas classes de mais baixa favorabilidade. Isso significa que o mapa possui certa coerência, uma vez que as surgências naturais estão relacionadas às áreas de maior infiltração, circulação e armazenamento de água.

Fig. 4.4.11 - Frequência acumulada de fontes e seus dados de vazão agrupados em função de sua localização no mapa de favorabilidade por MPO.

Para uma melhor avaliação deste mapa de favorabilidade, optou-se por realizar uma análise em função das vazões das fontes e sua localização no mapa de favorabilidade. A Figura 4.4.11 apresenta o gráfico de frequência acumulada de fontes e seus dados de vazão em l/s agrupados em função de sua localização no mapa de favorabilidade.

Nota-se que a classe de excelente favorabilidade, apesar de possuir menos fontes apresenta um comportamento muito semelhante ao da classe boa favorabilidade, em relação à vazão das fontes.

MÉTODO CONDUZIDO PELOS DADOS

4.4.4 - Análise por Pesos de Evidência

A modelagem por pesos de evidência inclui três fases: especificação, predição e teste de independência condicional (Raines *et al.*, 2000). Posteriormente, a avaliação do mapa de favorabilidade final neste trabalho foi feita por tabulação cruzada entre este mapa e novos dados de produtividade de poços.

a) Especificação:

- Pontos de Treinamento

Primeiramente selecionaram-se os pontos de treinamento, que são conjuntos de locais de ocorrências minerais, neste caso foram escolhidos poços com produtividade acima de 0,4 m³/h/m, que é um valor intermediário entre a média de produtividade dos poços (0,6 m³/h/m) e a mediana (0,1 m³/h/m) e as fontes cadastradas, num total de 56 dados. Assume-se que os pontos de treinamento têm características comuns que permitirão a predição de sua presença em outros locais similares. Dessa forma, os pontos de treinamento têm a função de quantificar

o grau relativo de importância das evidências. O tamanho da célula (unidade de área) escolhida foi 0,1 km².

- Definição da área de estudo

A área de estudo deve ser definida, tomando-se o cuidado de delinear o contorno com precisão, uma vez que a modelagem considera a associação espacial entre os pontos de treinamento e as classes dos mapas.

- Preparação dos dados para a utilização como temas de evidência

Os temas de evidência foram definidos em função da análise realizada no item Análise dos Dados. Para os mapas de lineamentos, intersecção de lineamentos e de contatos geológicos, onde havia a necessidade de uma análise com a proximidade destas feições, optou-se pela realização de corredores (*buffers*) de distância para o cálculo de pesos de evidência e definição da distância de corte.

Já para os mapas com classes definidas, como densidade de lineamentos, isofrequência de zonas de juntas, geológico, geomorfológico, pedológico e declividade, teve-se o cuidado na definição das classes dos mapas para o cálculo dos pesos de evidência.

- Cálculo de pesos de evidência e geração de mapas binários

A associação espacial de cada mapa de evidência é realizada de acordo com a localização dos pontos de treinamento. Uma tabela com os pesos de evidência W^+ (presença do padrão anômalo) e W^- (ausência do padrão anômalo), desvio padrão, contraste (C) e contraste normalizado (Stud C) é gerada para cada uma das classes dos mapas temáticos.

O contraste (C) é definido como a diferença entre W^+ e W^- e fornece uma medida de associação espacial entre as ocorrências e o padrão binário (0=ausência e 1= presença). O C é positivo e maior do que 1 quando a evidência possuir forte correlação positiva com os depósitos, isto é, a presença da evidência aumenta a probabilidade de ocorrência do depósito (Rostirolla *et al.*, 1998). Quando o C é negativo a presença de evidência diminui a probabilidade de ocorrência do depósito e neste caso não é um critério diagnóstico de processos de mineralização (Rostirolla *et al.*, 1998). Quando a evidência tiver pouca ou nenhuma correlação com os depósitos ($C \cong 0$) a evidência deve ser descartada, pois esta não influencia a probabilidade de ocorrência do depósito. O contraste normalizado é definido como a razão entre o contraste e o desvio padrão do contraste. Segundo Bonham-Carter (1994) o contraste normalizado serve como guia de significância da associação espacial, isto é, o contraste normalizado mostra a medida de significância do contraste em relação às incertezas dos pesos e aos dados ausentes. Segundo Raines (1999), o valor de contraste normalizado deve ser maior que 1,96, para ser aceitável, com um nível de confiança de 97,5 %.

Para se calcular os pesos de evidência para o mapa de lineamentos, de intersecção de lineamentos e de contatos geológicos realizou-se uma análise de proximidade denominada "pesos cumulativos ascendentes". Neste tipo de análise as zonas próximas aos pontos de treinamento são mais preditivas e a área e o número de pontos são determinados cumulativamente começando com a primeira zona de *buffer* em torno de uma feição, passando a próxima e assim sucessivamente. Para cada distância cumulativa os pesos e o contraste são determinados assumindo que a distância é o ponto de corte entre a presença (próxima a feição) e ausência (fora da feição). Bonham-Carter *et al.* (1988) admitem que o valor máximo de contraste fornece a distância de corte. Porém, segundo Carranza e Hale (2000), em alguns casos, quando os valores máximos de contraste estão associados a poucas ou nenhuma ocorrência, o valor de contraste normalizado indica a distância mais significativa de corte.

Para se calcular os pesos de evidência de mapas temáticos, tais como densidade de lineamentos, isofrequência de zonas de juntas, geológico, geomorfológico, pedológico, declividade, utiliza-se a análise categórica, onde os valores dos atributos são não ordenados. Para a definição das classes dos mapas binários, utilizaram-se os valores de contraste abaixo de 0 para evidência negativa, igual a 0 para ausência de evidência e acima de 0 para evidência positiva. A extensão ArcSDM do programa Arc View, tem uma opção para generalizar cada um dos temas de evidência, baseado nos valores das tabelas de pesos de evidência, adicionado-se um novo campo na tabela de atributos, com os novos valores reclassificados (binários).

A seguir são apresentados os resultados das análises de pesos de evidência para cada mapa temático.

- Proximidade de Lineamentos (zonas de cisalhamento)

A partir do mapa de distância (*buffer*) de 100 em 100 metros dos lineamentos, obteve-se a avaliação de pesos de evidência em relação à proximidade de lineamentos, conforme apresenta a tabela 4.4.16. O valor máximo de contraste (igual a 3,3) situa-se a distância de 500 metros dos lineamentos. Porém, observa-se que não ocorrem pontos de treinamento a essas distâncias, uma vez que os pontos de treinamento são fornecidos na tabela na forma de frequência acumulada. Optou-se por escolher o valor de corte de acordo com o maior valor de contraste normalizado (assim como o realizado por Carranza e Hale, 2000), pois este apresenta um número mais representativo de pontos de treinamento, sendo o valor de contraste normalizado igual a 7,66, relacionado ao valor de corte da distância de lineamentos igual a 100 metros. Este valor de distância está próximo ao valor utilizado na análise por combinação linear ponderada que é de 200 metros. A Figura 4.4.12 apresenta o gráfico das variações de contraste para as distâncias acumuladas dos lineamentos.

TABELA 4.4.16 – Pesos de evidência e contrastes calculados para distâncias acumuladas de lineamentos (zonas de cisalhamento) *

Dist (m)	AREA_KM 2	AREA_UNIDADES	P. TREIN.	W+	W-	C	DP_C	C NORMALIZ
100	388,9100	3889,1000	44	1,2219	-1,2771	2,4990	0,3262	7,6612
200	584,7600	5847,6000	50	0,9391	-1,8042	2,7433	0,4324	6,3450
300	788,9100	7889,1000	53	0,6961	-2,2884	2,9844	0,5937	5,0271
400	932,6000	9326,0000	54	0,5465	-2,5151	3,0616	0,7203	4,2507
500	1094,5900	10945,9000	55	0,4039	-2,9589	3,3628	1,0092	3,3322
600	1190,8200	11908,2000	55	0,3192	-2,7746	3,0938	1,0092	3,0656
700	1270,5600	12705,6000	56					
800	1350,0900	13500,9000	56					
900	1415,7700	14157,7000	56					
1000	1470,5600	14705,6000	56					
1001	1666,3600	16663,6000	56					
-99	51,5000	515,0000	0					

* número de pontos de treinamento: 56, área de estudo 1717,86 km²

Fig. 4.4.12 - Variações de contraste para as distâncias acumuladas dos lineamentos.

- Proximidade da intersecção de lineamentos (zonas de cisalhamento)

A partir do mapa de distância (*buffer*) de 100 em 100 metros da intersecção de lineamentos, obteve-se a avaliação de pesos de evidência em relação à proximidade da intersecção de lineamentos, conforme apresenta a tabela 4.4.17. Conforme pode ser observado, o valor máximo de contraste (igual a 2,65) situa-se a distância de 100 metros dos lineamentos. Porém, observa-se que ocorrem poucos pontos de treinamento a essas distâncias. Optou-se por escolher o valor de corte de acordo com o maior valor de contraste normalizado (assim como o realizado por Carranza e Hale, 2000), pois este apresenta um número mais representativo de pontos de treinamento, sendo o valor de corte da distância da intersecção de lineamentos igual a 400 metros (contraste normalizado igual a 8,66). Este valor de distância está próximo ao valor utilizado na análise por combinação linear ponderada que é de 600 metros. A Figura 4.4.13 apresenta o gráfico das variações de contraste para as distâncias acumuladas das intersecções de lineamentos.

TABELA 4.4.17 – Pesos de evidência e contrastes calculados para distâncias acumuladas de intersecção de lineamentos (zonas de cisalhamento) *

Dist (m)	AREA KM2	AREA_UNIDADES	P. TREIN.	W+	W-	C	DP_C	C NORMALIZ
100	13,5900	135,9000	6	2,5489	-0,1049	2,6538	0,4409	6,0185
200	34,6500	346,5000	10	2,1079	-0,1748	2,2826	0,3532	6,4621
300	75,0800	750,8000	17	1,8589	-0,3133	2,1722	0,2931	7,4116
400	122,6200	1226,2000	26	1,7917	-0,5436	2,3353	0,2696	8,6615
500	192,5200	1925,2000	30	1,4780	-0,6369	2,1149	0,2691	7,8603
600	255,3900	2553,9000	36	1,3762	-0,8525	2,2287	0,2797	7,9672
700	320,5400	3205,4000	38	1,2008	-0,9065	2,1074	0,2868	7,3472
800	400,0300	4000,3000	46	1,1700	-1,4285	2,5984	0,3494	7,4369
900	482,3300	4823,3000	47	1,0026	-1,4600	2,4626	0,3643	6,7605
1000	565,3700	5653,7000	49	0,8843	-1,6310	2,5154	0,4044	6,2199
1001	1556,5900	15565,9000	56					
-99	161,2700	1612,7000	0					

* número de pontos de treinamento: 56, área de estudo 1717,86 km²

Fig. 4.4.13 - Variações de contraste para as distâncias acumuladas dos lineamentos.

- Densidade de lineamentos (zonas de cisalhamento)

A Tabela 4.4.18 apresenta análise de pesos de evidência entre o mapa de densidade de lineamentos e os pontos de treinamento. Nota-se que as classes de densidade alta e intermediária apresentam correlação positiva ($C > 0$) e a classe baixa densidade correlação negativa ($C < 0$). Também na análise pelo método conduzido pelo conhecimento, as classes de densidade de lineamentos alta e intermediária são as classes de maior valor.

TABELA 4.4.18 – Pesos de evidência e contrastes calculados para o mapa de densidade de lineamentos (zonas de cisalhamento)*

Dens. Lineam.	AREA KM2	REA_UNIDADE	P. TREIN.	W+	W-	C	DP_C	C NORMALIZ
baixa	1116,4203	11164,2030	6	-1,8077	0,9457	-2,7535	0,4323	-6,3686
intermed	561,3606	5613,6060	33	0,5899	-0,4943	1,0842	0,2721	3,9842
alta	36,0117	360,1170	17	2,7156	-0,3415	3,0571	0,2957	10,3384
-99	4,8231	48,2310	0					

* número de pontos de treinamento: 56, área de estudo 1717,86 km²

- Unidades geológicas

A análise do mapa geológico é apresentada na tabela 4.4.19. Conforme pode ser observado, as classes do mapa geológico que apresentam correlação positiva são: gnaiss e quartzito (valores de $C > 0$). Porém, quando as litologias são separadas em grupos maiores: rochas deformadas e foliadas, outras rochas (granitóides, granitos, rochas sedimentares) e sedimentos inconsolidados, a análise apresenta que as “rochas deformadas e foliadas” apresentam correlação positiva e as “outras rochas” e “sedimentos” apresentam correlação negativa, tabela 4.4.20. Para a análise de favorabilidade optou-se pela utilização das classes litológicas agrupadas, pois se verificou em campo a presença de fraturas (com surgência de água) não somente em gnaiss, mas também em outras rochas deformadas, como migmatitos, milonitos, etc. Além disso, a análise pelo método conduzido pelo conhecimento também utilizou essa classificação.

TABELA 4.4.19 – Pesos de evidência e contrastes calculados para o mapa geológico*

Litologia	AREA KM2	AREA_UNIDADES	P. TREIN.	W+	W-	C	DP_C	C NORMALIZ
anfibolito	1,1100	11,1000	0					
diabásio	3,0900	30,9000	0					
gnaisse	247,7000	2477,0000	32	1,3486	-0,6867	2,0354	0,2709	7,5129
gnaisse intercalado com quartzito	8,4300	84,3000	0					
gnaisse/ migmatito	212,5700	2125,7000	6	-0,1826	0,0243	-0,2069	0,4327	-0,4782
granitóide	288,4500	2884,5000	5	-0,6712	0,0985	-0,7697	0,4691	-1,6409
granitóide deformado	118,8700	1188,7000	1	-1,3951	0,0568	-1,4518	1,0095	-1,4382
micaxisto	0,1600	1,6000	0					
migmatito	436,0800	4360,8000	5	-1,0851	0,2134	-1,2985	0,4690	-2,7689
migmatito/gnaiss_anfibolito	1,5100	15,1000	0					
milonito	218,5800	2185,8000	5	-0,3933	0,0484	-0,4417	0,4692	-0,9414
quartzito	20,0500	200,5000	2	1,0871	-0,0243	1,1113	0,7236	1,5358
rochas sedimentares	49,2700	492,7000	0					
sedimentos	47,9900	479,9000	0					
	64,0000	640,0000	0					

* número de pontos de treinamento: 56, área de estudo 1717,86 km²

TABELA 4.4.20 – Pesos de evidência e contrastes calculados para o mapa geológico (unidades litológicas agrupadas)*

Unid. Litol. Agrupadas	AREA KM2	AREA_UNIDADES	P. TREIN.	W+	W-	C	DP_C	C NORMALIZ
outras rochas	341,8010	3418,0102	6	-0,6663	0,1181	-0,7845	0,4320	-1,8158
rochas deformadas e foliadas	1296,8141	12968,1409	49	0,1023	-0,4673	0,5696	0,3818	1,4921
sedimentos	31,3059	313,0587	1	-0,0662	0,0012	-0,0674	1,0105	-0,0667
	2,2311	1,0000	0					

* número de pontos de treinamento: 56, área de estudo 1717,86 km²

- Proximidade de contatos geológicos

A partir do mapa de distância (*buffer*) de 100 em 100 metros dos contatos geológicos, obteve-se a avaliação de pesos de evidência em relação à proximidade desses contatos, conforme apresenta a tabela 4.4.21. Conforme pode ser observado, o valor máximo de contraste (igual a 0,78) situa-se a distância de 800 metros dos contatos. Porém, observa-se que ocorrem poucos pontos de treinamento a essas distâncias, uma vez que os pontos de treinamento são fornecidos da tabela na forma de frequência acumulada. Optou-se por escolher o valor de corte

de acordo com o maior valor de contraste normalizado (assim como o realizado por Carranza e Hale, 2000), pois este apresenta um número mais representativo de pontos de treinamento, sendo o valor de corte da distância de lineamentos igual a 600 metros.

TABELA 4.4.21 – Pesos de evidência e contrastes calculados para distâncias acumuladas dos contatos geológicos*

Dist (m)	AREA KM2	AREA_UNIDAD	P. TREIN.	W+	W-	C	DP_C	C NORMALIZ
100	346.8600	3468.6000	19	0.4355	-0.1666	0.6022	0.2829	2.1286
200	499.6900	4996.9000	25	0.3444	-0.2111	0.5555	0.2694	2.0623
300	650.7300	6507.3000	31	0.2952	-0.2753	0.5705	0.2693	2.1186
400	754.5200	7545.2000	33	0.2093	-0.2398	0.4491	0.2721	1.6507
500	869.3500	8693.5000	36	0.1545	-0.2292	0.3837	0.2793	1.3734
600	942.1800	9421.8000	42	0.2285	-0.4779	0.7064	0.3090	2.2859
700	1005.2600	10052.6000	44	0.2101	-0.5276	0.7377	0.3261	2.2622
800	1070.3200	10703.2000	46	0.1918	-0.5893	0.7810	0.3493	2.2359
900	1127.1500	11271.5000	47	0.1614	-0.5757	0.7371	0.3643	2.0235
1000	1177.3800	11773.8000	47	0.1176	-0.4571	0.5748	0.3643	1.5777
1001	1577.2500	15772.5000	56					
-99	140.6100	1406.1000	0					

* número de pontos de treinamento: 56, área de estudo 1717,86 km²

- Isofrequência de zonas de juntas

A tabela 4.4.22 apresenta análise de pesos de evidência do mapa de isofrequência de zonas de juntas. Nota-se que as classes de contagem alta e intermediária apresentam correlação positiva (contraste igual a 0,72 e 0,25 respectivamente) e a classe de baixa contagem apresenta correlação negativa (contraste igual a -0,82). As classes de isofrequência alta e intermediária são as classes de maior valor nas análises pelo método conduzido pelo conhecimento.

TABELA 4.4.22 – Pesos de evidência e contrastes calculados para o mapa de isofrequência de zonas de juntas*

Classes de densidade	AREA KM2	AREA_UNIDADES	P. TREIN.	W+	W-	C	DP_C	C NORMALIZ
baixa	525,0330	5250,3300	10	-0,6158	0,2046	-0,8203	0,3493	-2,3484
intermediária	897,1749	8971,7490	35	0,1032	-0,1514	0,2546	0,2765	0,9208
alta	168,7383	1687,3830	11	0,6193	-0,1069	0,7262	0,3373	2,1528
-99	127,6695	1276,6950	0					

*número de pontos de treinamento: 56, área de estudo 1717,86 km²

- Morfoestruturas

O resultado da análise de morfoestruturas é apresentado na tabela 4.4.23. A classe mapeada como baixo morfoestrutural apresenta correlação positiva (contraste igual a 0,58) e as classes mapeadas como intermediário e alto morfoestrutural apresentam correlação negativa (contraste igual a - 0,17 e - 1,42 respectivamente). Na análise por combinação linear ponderada, além da classe de baixo morfoestrutural a classe de intermediário morfoestrutural também é considerada importante na análise de favorabilidade.

TABELA 4.4.23 – Pesos de evidência e contrastes calculados para o mapa morfoestrutural*

Classes de morfoest	AREA KM2	AREA_UNIDADES	P. TREIN.	W+	W-	C	DP_C	C NORMALIZ
alto	227,6856	2276,8556	2	-1,3138	0,1062	-1,4200	0,7204	-1,9710
baixo	558,4718	5584,7184	26	0,3577	-0,2316	0,5893	0,2684	2,1954
intermediário	931,6144	9316,1445	28	-0,0815	0,0888	-0,1703	0,2677	-0,6362

*número de pontos de treinamento: 56, área de estudo 1717,86 km²

- Declividade

A tabela 4.4.24 apresenta análise de pesos de evidência do mapa de declividade. Nota-se que as classes 15-25 graus e 25-35 graus apresentam correlação positiva (contraste igual a 0,50 e 0,28 respectivamente) e as outras classes apresentam correlação negativa, com exceção da classe > 35 graus, que não apresenta pontos de treinamento. Na análise por combinação linear ponderada e média ponderada ordenada considerou-se como restrição as declividades acima de 35 graus.

TABELA 4.4.24 – Pesos de evidência e contrastes calculados para o mapa de declividade*

classes de declividade	AREA KM2	AREA_UNIDADES	P. TREIN.	W+	W-	C	DP_C	C NORMALIZ
0-5 graus	669,6700	6696,7000	18	-0,2277	0,1291	-0,3569	0,2866	-1,2453
5-15 graus	632,7300	6327,3000	21	-0,0162	0,0098	-0,0261	0,2765	-0,0942
15-25 graus	277,8100	2778,1000	14	0,4032	-0,1049	0,5081	0,3093	1,6426
25-35 graus	67,6200	676,2000	3	0,2751	-0,0135	0,2887	0,5948	0,4854
> 35 graus	12,4200	124,2000	0					
-99	57,6100	576,1000	0					

*número de pontos de treinamento: 56, área de estudo 1717,86 km²

- Pedologia

A análise realizada no mapa pedológico indica que os pontos de treinamento localizam-se somente em uma única classe (latossolo), conforme mostra a tabela 4.4.25. Por isso, não é possível calcular os pesos de evidência e, portanto não o mapa pedológico deve ser um mapa de evidência descartado na análise de favorabilidade.

TABELA 4.4.25 – Pesos de evidência e contrastes calculados para o mapa pedológico*

Tipo de solo	AREA KM2	AREA_UNIDADES	P. TREIN.	W+	W-	C	DP_C	C NORMALIZ
gleissolo	49,4400	494,4000	0					
argissolo	1352,4200	13524,2000	56					
latossolo	225,7300	2257,3000	0					
-99	90,2700	902,7000	0					

*número de pontos de treinamento: 56, área de estudo 1717,86 km²

- Geomorfologia

A análise da geomorfologia indica que a classe do mapa morfológico “topos aguçados” e classe de grau de dissecação “alta” apresentam correlações positivas (contraste igual a 1,83 e , respectivamente), conforme apresentado nas tabelas 4.4.26 e 4.4.27.

TABELA 4.4.26 – Pesos de evidência e contrastes calculados para o mapa morfológico*

morfologia	AREA KM2	AREA_UNIDADES	P. TREIN.	W+	W-	C	DP_C	C NORMALIZ
planícies fluviais	23,9692	239,6921	0					
topos aguçados	346,5767	3465,7674	35	1,0885	-0,7445	1,8330	0,2767	6,6246
topos convexos	813,7801	8137,8008	19	-0,3838	0,2748	-0,6587	0,2827	-2,3301
topos tabulares	451,4065	4514,0646	2	-2,0477	0,2877	-2,3354	0,7203	-3,2423

*número de pontos de treinamento: 56, área de estudo 1717,86 km²

TABELA 4.4.27 – Pesos de evidência e contrastes calculados para o mapa de graus de dissecção*

Grau de dissecção	AREA KM2	REA_UNIDADE	P. TREIN.	W+	W-	C	DP_C	C NORMALIZ
alta	613,3534	6133,5336	37	0,5691	-0,6125	1,1816	0,2827	4,1797
baixa	254,2264	2542,2641	1	-2,1668	0,1515	-2,3182	1,0093	-2,2969
média	635,6058	6356,0579	15	-0,3731	0,1809	-0,5540	0,3022	-1,8332
muito alta	132,5469	1325,4693	3	-0,4150	0,0295	-0,4445	0,5942	-0,7482

*número de pontos de treinamento: 56, área de estudo 1717,86 km²

b) Predição

Nesta etapa gera-se o mapa de probabilidade posterior, utilizando-se a combinação ponderada dos mapas de evidência binários gerados na etapa de especificação.

A probabilidade posterior é a probabilidade condicional de ocorrência dos pontos de treinamento, considerando-se as informações dos mapas de evidência binários, ou seja, é a probabilidade prévia atualizada pela aplicação da regra de Bayes. Porém, a aplicação do método de pesos de evidência assume a independência condicional dos temas de evidência em relação aos pontos de treinamento.

c) Teste de independência condicional

Segundo Bonham-Carter (1994), o método de pesos de evidência assume que todos os mapas de evidência usados no modelo são condicionalmente independentes para uma estimativa válida de probabilidade posterior. Dessa forma, o teste de independência condicional (que utiliza a estatística qui-quadrado – X^2) é realizado com o objetivo de se avaliar a independência condicional dos mapas de evidência binários (aos pares). Com base nos resultados, alguns mapas podem ser descartados da modelagem, pois devido a presença de dependência condicional, estes estão sendo representados por outras evidências. Neste caso, pode-se eliminar ou combinar os mapas condicionalmente dependentes (Perrotta, 1996).

A estatística X^2 é calculada pelo número de ocorrências (pontos de treinamento) observadas e que pertencem a cada uma das classes dos mapas comparados com o número esperado de ocorrências.

A tabela 4.4.28 apresenta os valores de probabilidade calculados segundo o teste de independência condicional (respeitando-se o limite $X^2_{0,95,1} = 3,8$) dos mapas de evidência binários. A hipótese nula de independência condicional é testada se o valor medido do teste X^2

excede o valor teórico do teste X^2 , dado um nível de significância de 95% e com 1 grau de liberdade, igual a 0,05 (= 1 - probabilidade). Dessa forma, valores de probabilidade menores que 0,05 indicam dependência condicional. Nota-se que os mapas de evidência "proximidade de lineamentos" e "contatos geológicos" apresentam dependência condicional (valores abaixo de 0,05), os mapas de "densidade de lineamentos" e "isofrequência de zonas de juntas" apresentam dependência condicional em relação ao mapa de "morfologia" e os mapas de "geologia" e "morfologia" apresentam dependência condicional em relação ao mapa de "graus de dissecação".

TABELA 4.4.28 – Teste de independência condicional entre os mapas binários de evidências (valores de probabilidade calculados em função do teste X^2) *

MAPA DE EVIDÊNCIA	PL	PI	DL	ZJ	CG	M	MF	GD	DECLIVIDADE
Geologia	0,9864	0,9241	0,9200	0,9724	0,9998	0,9989	0,4914	0,0000	0,9997
Proximidade de lineamentos (PL)		0,1425	0,9127	0,7905	0,0000	0,9438	0,9984	0,8583	0,8943
Proximidade da intersecção de lineamentos (PI)			0,8767	0,4673	0,9770	0,5140	0,9908	0,8829	0,6792
Densidade de lineamentos (DL)				0,9358	0,9262	0,1586	0,0000	0,5435	0,6210
Isofrequência de zonas de juntas (ZJ)					0,1050	0,1806	0,0000	0,2703	0,6401
Contatos Geológicos (CG)						0,9809	0,9997	0,8851	0,7508
Morfoestrutura (M)							0,8236	0,5477	0,9874
Morfologia (MF)								0,0000	0,9964
Grau de dissecação (GD)									0,9865
Valores <0,05 indicam dependência condicional									
Teste de independência condicional global	0,2100								

* em cinza os valores de probabilidade < 0,05 que indicam dependência condicional entre os mapas de evidências

Dessa forma, optou-se pela junção (operador booleano OR) do mapa de lineamentos e de contatos geológicos, pois os contatos geológicos são coincidentes ou paralelos aos lineamentos, devido a forte estruturação tectônica (de direção NE) na área. Partindo do princípio de que o mapa de morfologia e o de grau de dissecação são fatores geomorfológicos, também optou-se pela junção destes (operador booleano OR). Para os dois novos mapas "lineamentos + contatos" e "morfologia + grau de dissecação", calcularam-se os pesos de evidência (tabela 4.4.29 e 4.4.30).

No mapa "lineamentos + contatos" o valor de corte foi distância 100 metros (valor de contraste normalizado igual a 5,82). No mapa "morfologia + grau de dissecação" uniram-se as classes de morfologia e de grau de dissecação da mesma maneira como realizado na análise pelo método conduzido pelo conhecimento, contendo no total 4 classes: topos aguçados e dissecação muito alta e alta e topos convexos e dissecação muito alta e alta (4), topos aguçados e dissecação média e baixa, topos convexos e dissecação média e baixa e topos tabulares e dissecação muito alta e alta (3), topos tabulares e dissecação média e baixa (2) e planície fluvial e dissecação baixa (1).

TABELA 4.4.29 – Pesos de evidência e contrastes calculados para distâncias acumuladas de proximidade de lineamentos e contatos geológicos *

Dist (m)	AREA KM2	AREA UNIDADES	P. TREIN.	W+	W-	C	DP C	C NORMALIZ
100	647,9700	6479,7000	47	0,7800	-1,3424	2,1225	0,3642	5,8278
200	895,8900	8958,9000	52	0,5557	-1,8783	2,4340	0,5191	4,6887
300	1108,9700	11089,7000	54	0,3791	-2,2533	2,6324	0,7203	3,6548
400	1239,6900	12396,9000	55	0,2856	-2,6854	2,9710	1,0092	2,9439
500	1362,3200	13623,2000	55	0,1909	-2,3568	2,5476	1,0092	2,5243
600	1428,2600	14282,6000	56					
700	1477,8000	14778,0000	56					
800	1522,0800	15220,8000	56					
900	1557,0800	15570,8000	56					
1000	1583,6700	15836,7000	56					
1001	1677,6200	16776,2000	56					
-99	40,2400	402,4000	0					

* número de pontos de treinamento: 56, área de estudo 1717,86 km²

TABELA 4.4.30 – Pesos de evidência e contrastes para o mapa geomorfológico (morfologia e grau de dissecação)*

Classes_geom	AREA KM2	AREA_UNIDADES	P. TREIN.	W+	W-	C	DP_C	C NORMALIZ
1	23.9481	239.4810	0					
2	450.0594	4500.5940	2	-2.0464	0.2872	-2.3336	0.7203	-3.2397
3	414.6705	4146.7050	14	-0.0156	0.0053	-0.0209	0.3091	-0.0676
4	744.3666	7443.6660	40	0.4511	-0.6459	1.0971	0.2962	3.7036
-99	85.5711	855.7110	0					

* número de pontos de treinamento: 56, área de estudo 1717,86 km²

A tabela 4.4.31 apresenta os valores de probabilidade calculados segundo o teste de independência condicional dos mapas binários de evidência. Conforme pode ser observado, o mapa de evidência geomorfologia apresenta dependência condicional em relação ao mapa geológico, portanto a evidência geomorfologia será descartada da análise de favorabilidade. A tabela 4.4.32 apresenta os valores de probabilidade calculados segundo o teste de independência condicional dos mapas binários de evidência, sem considerar o mapa de evidência "geomorfologia". Conforme apresenta a tabela não ocorre nenhum valor de probabilidade abaixo de 0,05, o que indica a independência condicional de todos os mapas de evidência.

TABELA 4.4.31 – Teste de independência condicional entre os mapas binários de evidências (valores de probabilidade calculados em função do teste X^2) *

MAPA DE EVIDÊNCIA	LC	PI	DL	ZJ	D	M	GEOMORFOLOGIA
Geologia	0,3368	0,7578	0,5971	0,9741	0,9347	0,3163	0,0000
Proximidade de lineamentos e Contatos (LC)		0,1680	0,6288	0,7946	0,9085	0,9149	0,9074
Proximidade da intersecção de lineamentos (PI)			0,8767	0,4673	0,6792	0,5140	0,9241
Densidade de lineamentos (DL)				0,9358	0,6210	0,1586	0,9200
Isofrequência de zonas de juntas (ZJ)					0,6401	0,1806	0,9724
Declividade (D)						0,9874	0,9997
Morfoestrutura (M)							0,9989
Valores <0,05 indicam dependência condicional							
Teste de independência condicional global	0,3600						

* em cinza o valor de probabilidade < 0,05 que indica dependência condicional entre os mapas de evidências

TABELA 4.4.32 – Teste de independência condicional entre os mapas binários de evidências (valores de probabilidade calculados em função do teste X^2)

MAPA DE EVIDÊNCIA	LC	PI	DL	ZJ	M	D
Geologia	0.9074	0.9241	0.9200	0.9724	0.9989	0.9997
Proximidade de lineamentos e Contatos (LC)		0.1680	0.6288	0.7946	0.9149	0.9085
Proximidade da intersecção de lineamentos (PI)			0.8767	0.4673	0.5140	0.6792
Densidade de lineamentos (DL)				0.9358	0.1586	0.6210
Isofreqüência de zonas de juntas (ZJ)					0.1806	0.6401
Morfoestrutura (M)						0.9874
Valores <0,05 indicam dependência condicional						
Teste de independência condicional global	0.4000					

Conforme explicado anteriormente, o mapa de favorabilidade para a ocorrência de água subterrânea, baseado na modelagem por pesos de evidência, consiste na avaliação da probabilidade posterior, com base na probabilidade prévia. Como a probabilidade prévia é definida como o número de depósitos conhecidos (pontos de treinamento) por unidade de área, um último teste pode ser aplicado para verificação da condição de independência condicional em relação aos pontos de treinamento.

Segundo Bonham-Carter (1994) se o total de depósitos previstos é muito maior do que 10% do número de depósitos observados é possível que a independência condicional esteja sendo violada e novos procedimentos, como a eliminação de mapas ou combinações entre mapas dependentes, devem ser realizados na resolução deste problema. O programa SDM calcula o teste de independência condicional global, que é a razão entre o número de depósitos observados e o número de depósitos calculados. A razão de probabilidade condicional é sempre menor do que 1, mas deve ficar sempre entre 0,85 e 0,90. Em caso contrário a condição de dependência condicional está sendo violada.

Conforme apresenta a tabela 4.4.32, o valor do teste de independência condicional global é 0,4, isso indica que a condição de independência condicional está sendo violada. Dessa forma, optou-se por unir os temas de evidência zonas de juntas e densidade de lineamentos (zonas de cisalhamento), pois estes temas podem ser condicionalmente dependentes em função de estarem representando regiões de fraqueza crustal. O novo mapa de evidência "isofreqüência de zonas de juntas + densidade de lineamentos" (DLJ) foi criado. Optou-se também por unir o mapa de evidência "intersecção de lineamentos" com o mapa de evidência "contatos geológicos + lineamentos", pois a intersecção de lineamentos também é representada no mapa de lineamentos, esse novo mapa de evidência foi denominado (LCI). A tabela 4.4.33 e 4.4.34 apresenta os pesos de evidência atribuídos às classes dos mapas DLJ e LCI.

TABELA 4.4.33 – Pesos de evidência e contrastes para o mapa DLJ (densidade de lineamentos + isofrequência de zonas de juntas)*

Classes de densidade	AREA KM2	AREA_UNIDADES	P. TREIN.	W+	W-	C	DP_C	C NORMALIZ
baixa	403.9254	4039.2540	1	-2.5831	0.2517	-2.8348	1.0092	-2.8090
intermediária	1176.4548	11764.5480	26	-0.3921	0.5380	-0.9301	0.2685	-3.4647
alta	133.4124	1334.1240	29	1.9137	-0.6500	2.5637	0.2690	9.5313
-99	4.8231	48.2310	0					

* número de pontos de treinamento: 56, área de estudo 1717,86 km²

TABELA 4.4.34 – Pesos de evidência e contrastes para o mapa de distâncias LCI (lineamentos + contatos geológicos + intersecção)*

Distância	AREA KM2	AREA_UNIDADES	P. TREIN.	W+	W-	C	DP_C	C NORMALIZ
100	573.9237	5739.2370	45	0.8597	-1.2117	2.0714	0.3367	6.1513
200	877.6008	8776.0080	54	0.6156	-2.5961	3.2118	0.7202	4.4592
300	1103.8284	11038.2840	55	0.4034	-2.9580	3.3614	1.0092	3.3309
400	1243.7487	12437.4870	55	0.2835	-2.6796	2.9631	1.0092	2.9361
500	1354.6638	13546.6380	56					
600	1432.3293	14323.2930	56					
700	1487.0835	14870.8350	56					
800	1528.1955	15281.9550	56					
900	1561.1355	15611.3550	56					
1000	1587.0591	15870.5910	56					
1001	1679.6682	16796.6820	56					
-99	38.9475	389.4750	0					

* número de pontos de treinamento: 56, área de estudo 1717,86 km²

A tabela 4.4.35 apresenta os valores de probabilidade calculados segundo o teste de independência condicional dos mapas binários de evidência. O valor do teste de independência condicional global é 0,69, o que indica que ainda existe alguma dependência condicional. Dessa forma, optou-se por descartar a evidência “intersecção de lineamentos” e usar a evidência “lineamentos + contatos” (LC) ao invés da evidência “lineamentos + contatos + intersecção” (LCI). A tabela 4.4.36 apresenta os valores de probabilidade calculados segundo o teste de independência condicional dos mapas binários de evidência, sem considerar o mapa de evidência LCI e considerando o mapa de evidência LC. Conforme apresenta a tabela o valor do teste de independência condicional global é 0,85, o que indica a independência condicional de todos os mapas de evidência. Dessa forma, os mapas de evidência podem ser utilizados para a análise de favorabilidade.

TABELA 4.4.35 – Teste de independência condicional entre os mapas binários de evidências (valores de probabilidade calculados em função do teste X^2)

MAPA DE EVIDÊNCIA	G	D	LCI	Morfoestruturas
Densidade de lineamentos + densidade de juntas (DLJ)	0.9855	0.2326	0.8381	0.2493
Geologia (G)		0.9997	1.0000	0.9989
Declividade (D)			0.8133	0.9874
lineamentos + contatos + intersecção lineam. (LCI)				0.9187
Valores <0,05 indicam dependência condicional				
Teste de independência condicional global	0.6900			

TABELA 4.4.36 – Teste de independência condicional entre os mapas binários de evidências (valores de probabilidade calculados em função do teste X^2)

MAPA DE EVIDÊNCIA	G	M	D	prox. lineam + contatos (LC)
Densidade de lineamentos + densidade de juntas (DL)	0.9855	0.2493	0.2326	0.2412
Geologia (G)		0.9989	0.9997	0.9074
Morfoestrutura (M)			0.9874	0.9149
Declividade (D)				0.9085
Valores <0,05 indicam dependência condicional				
Teste de independência condicional global	0.8500			

A Figura 4.4.14 apresenta os mapas de evidência binários utilizados na modelagem por pesos de evidência e a tabela 4.4.36 apresenta os pesos e os contrastes de cada fator utilizado para a análise de favorabilidade em ordem decrescente de contraste.

TABELA 4.4.36 – Síntese dos fatores e critérios definidos pela análise de pesos de evidência.

Fator	Contraste	Contraste Normalizado	W^+	W^-
Densidade de lineamentos e densidade de zonas de juntas (alta)	2,56	9,53	1,91	-0,65
Proximidade de lineamentos e de contatos geológicos (100 m)	2,12	5,82	0,78	-1,34
Morfoestrutura (baixo)	0,58	2,19	0,35	-0,23
Geologia (rochas deformadas e foliadas)	0,56	1,4	0,10	-0,46
Declividade	15-25°	0,5	1,64	0,40
	25-35°	0,28	0,48	0,27

d) Mapas de favorabilidade

Segundo Raines (1999) é possível utilizar o gráfico de frequência acumulada dos pontos de treinamento em função dos valores de favorabilidade obtidos na modelagem (probabilidade posterior), para se definir as categorias de favorabilidade do mapa. A Figura 4.4.15 apresenta este gráfico em função da modelagem realizada.

Fig. 4.4.15 – Gráfico de área acumulada de pontos de treinamento em função da favorabilidade calculada na modelagem.

Conforme pode ser observado, o gráfico indica que existem três populações de favorabilidade, com quebras significativas nos valores de favorabilidade 0,0015 e 0,02. Estes valores de quebra são usados para definir três categorias de favorabilidade. Valores de favorabilidade menores que 0,0015 são interpretados neste modelo como não permissivo para ocorrência de água subterrânea. A quebra do valor de favorabilidade 0,02 separa áreas permissivas de áreas favoráveis. A probabilidade prévia usada no modelo é 0,003 (definida pelo programa SDM). A Figura 4.4.16 apresenta o mapa de favorabilidade, classificado em três categorias (não permissivo ou não favorável, permissivo e favorável).

Fig. 4.4.16 – Mapa de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea pela análise por pesos de evidência, classificado em três classes: não permissivo, permissivo e favorável.

Para a avaliação do mapa de favorabilidade pelo método de pesos de evidência, realizou-se a tabulação cruzada entre este mapa e a produtividade de poços. O resultado é apresentado na forma de gráfico de frequência acumulada da capacidade específica de poços e sua localização no mapa de favorabilidade (Figura 4.4.17).

Fig. 4.4.17 - Gráfico de frequência acumulada da capacidade específica de poços agrupados em função da sua localização no mapa de favorabilidade por análise de pesos de evidência

Conforme pode ser observado, os poços com maiores valores de produtividade localizam-se nas áreas classificadas como favorável e secundariamente como permissivas. Os poços com valores médios mais baixos de capacidade específica localizam-se nas classes não permissivas. Dessa forma, admite-se que este mapa indica de fato as áreas de maior infiltração, circulação e armazenamento de água subterrânea.

Como este mapa apresenta somente três classes, optou-se por reclassificá-lo em 5 classes de favorabilidade (não favorável, pouca, moderada, boa e excelente), como realizado nas análises por CLP e MPO. As classes de favorabilidade foram definidas da seguinte maneira: 0 – 0,0015 (não favorável), 0,0015 – 0,003 (pouca favorabilidade), 0,003 – 0,008 (moderada favorabilidade), 0,008 – 0,04 (boa favorabilidade), 0,04 – 0,16 (excelente favorabilidade). A Figura 4.4.18 apresenta o mapa de favorabilidade de água subterrânea.

Fig. 4.4.18 – Mapa de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea pela análise por pesos de evidência, classificado em cinco classes.

Realizou-se a tabulação cruzada entre a produtividade de poços e o mapa de favorabilidade por pesos de evidência com cinco classes. A Figura 4.4.19 apresenta o gráfico de frequência acumulada da capacidade específica dos poços agrupados em função de sua localização no mapa de favorabilidade. Como somente um poço se localizava na classe moderada, este foi incluído na classe de pouca favorabilidade.

Fig. 4.4.19 - Gráfico de frequência acumulada da capacidade específica de poços agrupados em função da sua localização no mapa de favorabilidade por análise de pesos de evidência

Conforme pode ser observado, as classes mapeadas como excelente e boa favorabilidade apresentam os poços com as mais altas capacidades específicas. As classes mapeadas como pouca favorabilidade e não favoráveis apresentam um comportamento muito semelhante em relação à produtividade dos poços. Nestas classes se localizam os poços com as mais baixas produtividades (abaixo de $0,2 \text{ m}^3/\text{h/m}$).

4.4.7 Comparação entre os mapas de favorabilidade

Segundo Harris *et al.* (2001), os mapas de favorabilidade resultantes de diferentes métodos de análise podem ser comparados entre si (aos pares) usando-se os coeficientes de correlação *Spearman*. A correlação é feita por classes ("ranks") ponderadas por área. Segundo Davis (2002), se o coeficiente de classes *Spearman* for igual a zero, indica que os dois mapas são independentes, se for igual a 1 indica que os mapas possuem correspondência perfeita e se for igual a -1 , perfeita correlação negativa. A tabela 4.4.34 apresenta os coeficientes de correlação *Spearman* entre os mapas de favorabilidade obtidos pela análise Booleana (B), análise por combinação linear ponderada (CLP), análise por média ponderada ordenada (MPO) e por pesos de evidência (PE).

TABELA 4.4.34 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO *SPEARMAN* (POR CLASSES) ENTRE OS MAPAS DE FAVORABILIDADE

Mapas de favorabilidade	CLP	MPO	PE
B	0,5	0,4	0,2
CLP		0,6	0,2
MPO			0,1

Conforme mostram os coeficientes de correlação todos os mapas de favorabilidade gerados apresentam correlação positiva. Os mapas que apresentam a maior correlação são os gerados pelas análises CLP e MPO. Isso ocorre porque os fatores referentes aos parâmetros prospectivos utilizados nas duas análises são os mesmos, variando somente o peso de ordenação utilizado somente na análise MPO. O mapa de PE apresenta as mais baixas correlações quando comparado com os outros mapas. Isso é explicado porque na análise por PE foram utilizados parâmetros prospectivos diferentes dos utilizados nas análises pelo método conduzido pelo conhecimento. A diferença dos parâmetros prospectivos utilizados se deu principalmente para satisfazer a condição de independência condicional, necessária na análise por PE.

Para uma melhor visualização das diferenças entre os mapas de favorabilidade, foram gerados os mapas de diferenças de classes do coeficiente *Spearman* (Figuras 4.4.20 a 4.4.25). As classes são geradas utilizando-se uma classificação por áreas iguais. O mapa apresenta em cores cinza as áreas iguais nos dois mapas analisados, os valores maiores do primeiro mapa em relação ao segundo aparecem em tons de vermelho, sendo maior a saturação de vermelho quanto maior a diferença entre os mapas. As cores azuis indicam os maiores valores do segundo mapa em relação ao primeiro, quanto maior a diferença, maior a saturação do azul.

Fig. 4.4.20 – Mapa de diferenças de classe MPO e CLP

Fig. 4.4.21 – Mapa de diferenças de classe B e CLP

Fig. 4.4.22 – Mapa de diferenças de classe B e MPO

Fig. 4.4.23 – Mapa de diferenças de classe PE e CLP

Fig. 4.4.24 – Mapa de diferenças de classe PE e MPO

Fig. 4.4.25 – Mapa de diferenças de classe PE e B

4.5 ESTUDO DE DETALHE: FOTOINTERPRETAÇÃO E LEVANTAMENTO GEOFÍSICO DE ELETRORRESISTIVIDADE

Com base nos mapas de favorabilidade, foram selecionadas duas áreas para estudo de detalhe, uma em Lindóia e outra, em Serra Negra, ambas classificadas como alta favorabilidade a ocorrência de água subterrânea (Figura 4.5.1a , 4.5.1b, 4.5.1c e 4.5.1d).

Fig. 4.5.1a – Mapa de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea (por combinação linear ponderada) e áreas selecionadas para o estudo de detalhe.

O objetivo deste estudo de detalhe é avaliar o resultado do mapa de favorabilidade e refinar o modelo hidrogeológico prospectivo para a região. A avaliação foi feita utilizando-se métodos geofísicos de eletrorresistividade e fraturas mapeadas, visando a identificação de locais favoráveis a locação de poços (presença de zonas fraturadas preenchidas por água), identificar as principais direções das zonas fraturadas favoráveis à acumulação de água e avaliar a espessura do manto de alteração e a profundidade do topo rochoso.

A seguir serão apresentados os resultados do estudo de detalhe para as duas áreas e a definição do modelo geológico mais detalhado para a área.

Fig. 4.5.1 b – Mapa de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea booleana; 4.5.1.c - por média ponderada ordenada; 4.5.1 d – por pesos de evidência. Os retângulos indicam as áreas selecionadas para o estudo de detalhe. Notar que em todos os mapas as áreas selecionadas para o estudo de detalhe apresentam regiões classificadas como de excelente favorabilidade a ocorrência de água subterrânea (representadas pelas cores vermelhas).

4.5.1 Área 1 – Mineração Cremasco (Lindóia)

Esta área apresenta topografia variando de 680 metros a 1060 metros, cinco poços cadastrados (dois deles com perfil geológico) e 3 fontes visitadas onde foram realizadas medidas estruturais (Figura 4.5.2).

Fig. 4.5.2 – Área de estudo de detalhe, região de Lindóia (Mineração Cremasco)

De acordo com o mapa geológico compilado, as rochas pertencem ao Complexo Itapira (de idade neoproterozóica), e são classificadas como “Biotita hornblenda gnaisses bandados”. O bandamento é paralelo à direção da foliação. As bandas escuras são de biotita hornblenda gnaiss anfibolítico (Basei *et al.*, 1986).

4.5.1.1 Fotointerpretação

As fraturas mapeadas a partir das fotografias aéreas possuem as seguintes orientações preferenciais com mergulho vertical a sub-vertical: N60-70E, N40-60W, N40-50E, N70-80E, N20-30E, E-W e N-S, conforme mostra o gráfico de rosetas (Figura 4.5.3).

Fig. 4.5.3 – Gráfico de rosetas das direções das fratura mapeadas

A Figura 4.5.4 apresenta a fotografia aérea, com as fraturas mapeadas, as zonas de cisalhamento e os locais onde foram realizadas as SEVs e os caminhamentos elétricos.

Fig. 4.5.4 – Fotografia aérea (escala 1:25.000) da área: fraturas mapeadas, estacas dos caminhamentos elétricos e locais das SEVs. Os traços laranja pontilhados são os lineamentos fotointerpretados do produto integrado ETM-MAG que correspondem às zonas de cisalhamento.

4.5.1.2 Levantamento Geofísico de Eletrorresistividade

Realizaram-se três perfis de caminhamento elétrico, arranjo dipolo-dipolo. O espaçamento entre eletrodos foi de 30m com 5 níveis de investigação em profundidade. Realizaram-se também duas SEVs, arranjo *Schlumberger*. As planilhas referentes aos dados de campo são apresentadas no anexo II. Os resultados e as interpretações dos dados geofísicos são apresentados a seguir.

a) Perfil 1:

- Características do levantamento geofísico

O perfil 1 de caminhamento elétrico foi realizado na rodovia Lindóia – Itapira, possui direção aproximadamente E-W, definido por 38 estações de medidas equidistantes de 30m. Esse perfil geofísico teve início na porção W (estaca 0) e foi finalizado na estaca 37 (porção E). O posicionamento de cada estação (estaca) foi obtido por intermédio de GPS. A SEV foi realizada na estaca 14, com abertura máxima entre eletrodos de corrente igual a 300 m ($AB/2=150$ m).

- Apresentação e Interpretação dos resultados

SEV – 1

A Figura 4.5.5 apresenta o resultado da inversão dos dados da SEV-1. O gráfico ($AB/2 \times$ resistividade aparente) apresenta os dados de campo (pontos vermelhos) sobrepostos a uma curva contínua que equivale à resposta do modelo geoeletrico calculado (em termos de resistividade verdadeira, espessura da camada e profundidade do topo da mesma). A linha pontilhada representa o modelo de resistividade das camadas. O ajuste obtido (diferença entre o valor medido e calculado a partir do modelo) pode ser avaliado através de um erro de mínimos quadrados (*RMS error*) também apresentado na Figura 4.5.5.

Fig. 4.5.5 – Resultados da Inversão dos dados da SEV 1

Identificaram-se 5 camadas geoeletricas, sendo que as camadas 1 e 2 podem ser consideradas como uma única camada em função de pequena espessura apresentada. As camadas 1 e 2 representam uma cobertura superficial/solo seco, apresentam espessura de 4,4 metros e valores de resistividade próximo de 1.000 $\Omega \cdot m$. A camada 3 trata-se de um solo mais saturado (613 $\Omega \cdot m$) com profundidade de sua base em torno de 16,5 m e espessura 12,1 m. A camada 4 foi interpretada como rocha alterada, com resistividade em torno de 640 $\Omega \cdot m$ e

espessura 20,6. A pequena variação de resistividade entre as camadas 3 e 4 é devida a ambas apresentarem água em seus interstícios. A camada 5 representa o topo do embasamento, está a 37 metros de profundidade com resistividade em torno de 2800 $\Omega.m$.

CE – 1

A Figura 4.5.6 apresenta a pseudo-seção de resistividade aparente (seção superior) e o perfil resultante da inversão dos dados, incluindo correção topográfica (seção inferior). Nesta seção está representada também a SEV-1.

Fig. 4.5.6 – Pseudo-seção de resistividade aparente e perfil de resistividade gerado pelo modelo de inversão

Como pode ser observado (Fig. 4.5.6) o topo do embasamento (no local da SEV-1) localiza-se a 37 metros de profundidade. A partir deste dado é possível inferir a profundidade do topo rochoso para toda a seção, com base no dado de resistividade da rocha sã (em torno de 2800 $\Omega.m$).

Analisando-se o perfil (Fig. 4.5.6), nota-se claramente algumas variações de resistividade (baixas resistividades em torno de 150 $\Omega.m$) em pacotes com resistividade elevada (1.800

$\Omega.m$). Esta informação pode indicar a presença de zonas fraturadas, as quais devem estar preenchidas por água.

b) Perfil 2:

- Características do levantamento geofísico

O perfil 2 de caminhamento elétrico foi realizado na propriedade da Mineração Cremasco, possui direção aproximadamente E-W e é praticamente paralelo ao perfil 1. É definido por 22 estações de medidas eqüidistantes de 30m. Esse perfil geofísico teve início na porção E (estaca 0) e finalizou na estaca 21 (porção W). O posicionamento de cada estação (estaca) foi obtido por intermédio de GPS. A SEV foi realizada na estaca 16, com abertura máxima entre eletrodos de corrente igual a 80 m ($AB/2=40$ m).

- Apresentação e Interpretação dos resultados

SEV – 2

A Figura 4.5.7 apresenta o resultado da inversão dos dados da SEV-2. O gráfico ($AB/2$ x resistividade aparente) apresenta os dados de campo (pontos vermelhos) sobrepostos a uma curva contínua que equivale à resposta do modelo geoeletrico calculado (em termos de resistividade verdadeira, espessura da camada e profundidade da base da mesma). A linha pontilhada representa o modelo de resistividade das camadas. O ajuste obtido (diferença entre o valor medido e calculado a partir do modelo) pode ser avaliado através de um erro de mínimos quadrados (*RMS error*) também apresentado na Figura 4.5.7.

Fig. 4.5.7 – Resultados da Inversão dos dados da SEV 2

Identificaram-se 4 camadas geoeletricas, a camada 1 representa uma cobertura superficial/solo seco, apresentando uma profundidade de 0,6 metros e valor de resistividade próximo de 900 $\Omega.m$. A camada 2 trata-se de um solo mais saturado (150 $\Omega.m$) com profundidade em torno de 8 m e espessura 7 m. A camada 3 foi interpretada como rocha alterada (saprolito), com resistividade em torno de 200 $\Omega.m$ e espessura 7 m. A pequena variação de resistividade entre as camadas 3 e 4 é devida a ambas apresentarem água em seus interstícios. A camada 4 representa o topo do embasamento e está a 15 metros de profundidade com resistividade em torno de 4000 $\Omega.m$.

Devido à existência de dois poços cadastrados nas proximidades da SEV, com perfis construtivos e litológicos, foi possível “calibrar” a interpretação desta SEV, conforme mostra a Figura 4.5.2.

CE – 2

A Figura 4.5.8 apresenta a pseudo-seção de resistividade aparente (seção superior) e o perfil resultante da inversão dos dados, incluindo correção topográfica (seção inferior). Nesta seção está representada também a SEV-3.

Fig. 4.5.8 – Pseudo-seção de resistividade aparente e perfil de resistividade gerado pelo modelo de inversão

Como pode ser observado (Figura 4.5.8) o topo do embasamento (no local da SEV-1) localiza-se a 15 metros de profundidade. A partir deste dado é possível inferir a profundidade do topo rochoso para toda a seção, com base no dado de resistividade da rocha sã (a partir de 1800 $\Omega.m$).

Analisando-se o perfil (Figura 4.5.8) nota-se claramente algumas variações de resistividade (baixas resistividades em torno de 600 $\Omega.m$) em pacotes com resistividade elevada (1600 $\Omega.m$). Esta informação pode indicar a presença de zonas fraturadas, as quais devem conter água.

c) Perfil 3:

- Características do levantamento geofísico

O perfil 3 de caminhamento elétrico foi realizado na propriedade da Mineração Cremasco, possui direção aproximadamente NE-SW, definido por 45 estações de medidas eqüidistantes de 30m. Esse perfil geofísico teve início na porção SW (estaca 0) e foi finalizado na estaca 44 (porção NE). O posicionamento de cada estação (estaca) foi obtido por intermédio de GPS.

- Apresentação e Interpretação dos resultados

CE -3

A Figura 4.5.9 apresenta a pseudo-seção de resistividade aparente (seção superior) e o perfil resultante da inversão dos dados, incluindo correção topográfica (seção intermediária). A seção inferior é um detalhe ampliado da seção intermediária e corresponde também ao dado invertido.

Fig. 4.5.9 – Pseudo-seção de resistividade aparente e perfil de resistividade gerado pelo modelo de inversão

Como pode ser observado (Figura 4.5.9) o topo do embasamento localiza-se a aproximadamente 10 metros de profundidade (resistividade da rocha sã a partir de 1800 $\Omega.m$).

Analisando-se o perfil (Figura 4.5.9), nota-se claramente algumas variações de resistividade (baixas resistividades em torno de 600 $\Omega.m$) em pacotes com resistividade elevada (a partir de 1600 $\Omega.m$). Esta informação pode indicar a presença de zonas fraturadas, as quais devem conter água.

4.5.2.3 Interpretação conjunta dos dados

Com o objetivo de determinar as variações de resistividade nas seções geoeletricas 2-D e associá-las ao fraturamento presente nas rochas, identificaram-se os locais dessas variações (pela posição das estacas dos caminhamentos) e realizou-se a comparação entre esses locais e a presença de traços de fraturas mapeados a partir das fotografias aéreas.

Na seção de resistividade resultante do caminhamento 1 observam-se três regiões que podem ser caracterizadas como zonas fraturadas, contendo água (devido aos baixos valores de resistividade), caracterizando o aquífero. Próximo a estas regiões foram mapeados traços de fraturas (Figura 4.5.10), cujas orientações são apresentadas na tabela 4.5.10.

Fig. 4.5.10 – Fraturas mapeadas e perfil de resistividade. No perfil de resistividade a cor azul representa baixos valores e a cor vermelha representa altos valores de resistividade.

TABELA 4.5.1 – Posições das estacas (CE-1) e direções dos traços de fraturas relacionados aos baixos valores na seção de resistividade.

Posição da estaca (m)	Orientação das fraturas	Direções pré-cambrianas (reativadas)
90	N50E/vert	Y
150 e 180	N20W/vert, N50E/vert	X, Y
300	N50E/vert, N40E/vert e N50W/vert	Y, R'
810	N40E/vert	Y
960	NS/vert	X
990	N70E/vert	R

Nesta seção, observa-se também que as regiões próximas às estacas 300 m e 810 m são as que apresentam maior potencial aquífero, uma vez que a baixa resistividade é bem marcada na seção e se estende em profundidade. É importante ressaltar que os traços de fratura que cruzam essas regiões apresentam orientações N50E/vert, N40E/vert e N50W/vert.

Na região próxima a estaca 300, onde foram mapeados traços de fratura orientados segundo N40E/vertical, N50E/vertical e N50W/vertical, ocorre a intersecção de zonas de cisalhamento (interpretadas na imagem ETM-MAG), orientadas segundo N40E e N35W, como observado na Figura 4.5.4.

Na seção de resistividade resultante do caminhamento 2 também observam-se regiões que podem ser caracterizadas como zonas fraturadas que contêm água (devido aos baixos valores de resistividade), uma no início da seção e outra nas proximidade da estaca 450 m. Próximo a estas regiões foram interpretados traços de fraturas (Figura 4.5.11), cujas orientações são apresentadas na tabela 4.5.2.

Fig. 4.5.11 – Fraturas mapeadas e perfil de resistividade. No perfil de resistividade a cor azul representa baixos valores e a cor vermelha representa altos valores de resistividade.

TABELA 4.5.2 – Posições das estacas (CE- 2) e direções dos traços de fraturas relacionados aos baixos valores na seção de resistividade.

Posição da estaca (m)	Direção das fraturas	Direções pré-cambrianas (reativadas)
30 e 60	E-W/vert	T
150 e 180	N 10W	X
270	NS/vert N 45E/vert e N60W/vert	X, Y, R'
330	N 5W/vert e N 45E/vert	X e Y
360	N 5W/vert e N 65E/vert	X e R
390	N 65E/vert	R
420 a 480	N 65E/vert e N 50W/vert	R e R'
540 e 570	N 40E/vert e N 25E/vert	Y e P

Nesta seção, a região próxima às estacas 420 a 480 apresenta baixa resistividade com continuidade em profundidade, o que indica a o potencial aquífero das fraturas N 65E e N 50W. Existem dois poços locados a aproximadamente 60 metros das estacas 180 e 210. Esses poços apresentam baixa produtividade (0,07 m³/h/m e 0,149 m³/h/m). Na seção de resistividade é possível verificar que nas proximidades das estacas 180 e 210 não ocorrem zonas de baixa resistividade que indicam zonas fraturadas que contem água.

A seção referente ao caminhamento 3 apresenta em meio aos altos valores de resistividade característicos de gnaisses (acima de 1.200 Ω .m) porções de baixos valores de resistividade (menores que 800 Ω .m). Essas regiões de baixas resistividades são indicativas de zonas fraturadas que contem água. A Figura 4.5.12 apresenta as fraturas mapeadas e que são interceptadas pelo caminhamento elétrico. A tabela 4.5.3 apresenta a posição das estacas e as direções das fraturas.

Fig. 4.5.12 – Fraturas mapeadas e perfil de resistividade. No perfil de resistividade a cor azul representa baixos valores e a cor vermelha representa altos valores de resistividade.

TABELA 4.5.3 – Posições das estacas (CE –3) e direções dos traços de fraturas relacionados aos baixos valores na seção de resistividade.

Posição da estaca (m)	Direção das fraturas	Direções pré-cambrianas (reativadas)
480 e 510	N 20E/vert	P
570	N 25E/vert	P
690 a 870	N 20E/vert, NS/vert e N 10W/vert	P, X e X
900	NS/vert	X
1080 e 1110	N20W/vert	X
1230	N50W/vert e NS/vert	R' e X
1260	NS/vert	X

Nas proximidades do caminhamento 3, ocorrem três nascentes. Conforme observado em campo, nesses locais a água mina de fraturas paralelas à foliação (direção NE-SW) de alto mergulho, em gnaisses bandados. Observa-se que o perfil geofísico cruza um traço de fratura mapeado, de orientação NE, nas proximidades das estacas 480-510 o qual também cruza o local de umas das nascentes, indicando o potencial das fraturas NE-SW para acumulação de água subterrânea. Além disso, dois poços estão locados a aproximadamente 140 metros da estaca 1170. Esses poços apresentam baixa produtividade ($0,10 \text{ m}^3/\text{h/m}$ e $0,08 \text{ m}^3/\text{h/m}$) e não foram verificadas fraturas neste local.

Nota-se na seção de resistividade que regiões localizadas nas proximidades das estacas 480-510, 570 e 690-870 apresentam forte indício de serem zonas fraturadas que contêm água, uma vez que os baixos valores de resistividade são coincidentes com as fraturas mapeadas, se estendem em profundidade e são delimitados por regiões de alta resistividade, o que indica que se trata de uma mesma rocha (gnaisse), que possui locais de baixa resistividade em função da presença de água nas fraturas. Mais uma vez fica evidente a importância da identificação das fraturas orientadas segundo as direções N20E e NS para a definição de locais mais favoráveis à acumulação e armazenamento de água.

4.5.2 Área 2 – Serra Negra: Rodovia Serra Negra – Amparo e Morro das Antenas

Região do trecho da rodovia Serra Negra-Amparo apresenta topografia que varia de 680 metros a 1280 metros. Existe um poço cadastrado nas suas proximidades com perfil geológico e 5 fontes visitadas (4 delas pertencente à Mineradora Santa Helena e 1 localizada no parque municipal Jovino Siqueira). As análises estruturais realizadas nas fontes Santa Helena indicam a presença de fraturas verticais nas seguintes direções: N30E a N60E paralelas à foliação milonítica e N40W e N-S. O morro das Antenas apresenta a maior elevação topográfica da cidade (1270 m) e nas proximidades do caminhamento encontram-se 3 fontes cadastradas, sendo que a mais próxima é a fonte do Barrocão e um poço com perfil geológico. Análises estruturais realizadas no local da fonte do Barrocão indicam a predominância de fraturas verticais de direção aproximada N40E, paralelas à foliação. A Figura 4.5.13 apresenta o modelo digital de elevação, poços e fontes cadastrados.

De acordo com o mapa geológico compilado, o trecho estudado da rodovia Serra Negra-Amparo localiza-se sobre rochas pertencentes ao Complexo Itapira (de idade paleoproterozóica), classificadas como “Biotita hornblenda gnaisses bandados”. O bandamento é paralelo à direção da foliação. As bandas escuras são de biotita hornblenda gnaisse anfibolítico (Basei *et al.*, 1986).

O Morro das Antenas é constituído por quartzitos micáceos, pertencentes ao Complexo Amparo (de idade paleoproterozóica), intensamente fraturados.

Fig. 4.5.13 – Área de estudo de detalhe, região de Serra Negra

4.5.2.1 Fotointerpretação

As fraturas mapeadas nas proximidades da estrada Serra Negra-Amparo são verticais e possuem as seguintes orientações de acordo com o gráfico de rosetas: N60-70E, N70-80E, N30-40E, N50-60E, N20-30W, N50-60W (Figura 4.5.14).

Fig. 4.5.14 - Gráfico de rosetas das fraturas

A Figura 4.5.15 apresenta a fotografia aérea, as localizações das fraturas e os locais onde foram realizadas as SEVs e os caminhamentos elétricos.

Fig. 4.5.16 - Fotografia aérea (escala 1:25.000) da área de estudo de semi-detalle: estrada Serra Negra – Amparo. Locais dos caminhamentos elétricos, SEV, poços e fontes cadastrados e fraturas mapeadas.

No morro das Antenas, as fraturas (verticais) apresentam orientações predominantes são N40-50E, N60-70W, N60-80E e N70-80W conforme mostra o gráfico de rosetas (Figura 4.5.16). A Figura 4.5.17 apresenta a fotografia aérea, com os traços de fraturas e os locais onde foram realizadas as SEVs e os caminhamentos elétricos.

Fig. 4.5.16 - Gráfico de rosetas das fraturas

Fig. 4.5.17 - Fotografia aérea (escala 1:25.000) da área de estudo de semi-detalle: estrada Serra Negra – Amparo. Locais dos caminhamentos elétricos, SEV, poços e fontes cadastrados, foliação e fraturas.

4.5.2.2 Levantamento Geofísico de Eletrorresistividade

Realizaram-se na estrada Serra Negra-Amparo dois perfis de caminamento elétrico, e no Morro das Antenas um caminamento elétrico, todos com arranjo dipolo-dipolo e espaçamento entre eletrodos de 30m, com 5 níveis de investigação em profundidade. Realizaram-se também duas SEVs, arranjo *Schlumberger*, uma no primeiro caminamento e outra no terceiro. As planilhas referentes aos dados de campo são apresentadas no anexo II. Os resultados e as interpretações dos dados geofísicos são apresentados a seguir.

a) Perfis 1 e 2:

- Características do levantamento geofísico

Os perfis 1 e 2 de caminamento elétrico foram realizados na rodovia Serra Negra – Amparo. Possuem direção NNE-SSW, o primeiro perfil foi definido por 55 estações e o segundo perfil por 16 estações. O perfil geofísico 1 teve início na porção NNE (estaca 0) e foi finalizado na estaca 54 (porção SSW). O perfil geofísico 2 teve início na porção NNE (estaca 0) e foi finalizado na estaca 15 (porção SSW). O posicionamento de cada estação (estaca) foi obtido por intermédio de GPS. A SEV foi realizada na estaca 34 do perfil 1, com abertura máxima entre eletrodos de corrente igual a 400 m ($AB/2=200$ m).

- Apresentação e Interpretação dos resultados

SEV – 1

A Figura 4.5.18 apresenta o resultado da inversão dos dados da SEV-1. O gráfico ($AB/2 \times$ resistividade aparente) apresenta os dados de campo (pontos vermelhos) sobrepostos a uma curva contínua que equivale à resposta do modelo geoeletrico calculado (em termos de resistividade verdadeira, espessura da camada e profundidade da base da mesma). A linha pontilhada representa o modelo de resistividade das camadas. O ajuste obtido (diferença entre o valor medido e calculado a partir do modelo) pode ser avaliado através de um erro de mínimos quadrados (*RMS error*) também apresentado na Figura 4.5.18.

Fig. 4.5.18 – Resultados da Inversão dos dados da SEV 1

Na interpretação dos resultados da SEV identificaram-se 4 camadas geolétricas, sendo que as camadas 1 e 2 podem ser consideradas como uma única camada em função de pequena espessura apresentada. As camadas 1 e 2 representam uma cobertura superficial/solo seco, apresentam uma espessura de 6 metros e valores médios de resistividade próximos de 2.000 $\Omega \cdot m$. A camada 3 foi interpretada como um solo mais saturado e/ou rocha alterada, com profundidade até 38 m e espessura 32 m. A camada 4 representa o topo da rocha sã, está a 38 metros de profundidade com resistividade em torno de 1750 $\Omega \cdot m$.

CE – 1

A Figura 4.5.19 apresenta a pseudo-seção de resistividade aparente (seção superior) e o perfil resultante da inversão dos dados, incluindo correção topográfica (seção inferior). Nesta seção está representada também a SEV-1.

Fig. 4.5.19 – Pseudo-seção de resistividade aparente e perfil de resistividade gerado pelo modelo de inversão

Como pode ser observado (Figura 4.5.19) o topo do embasamento (no local da SEV-1) localiza-se a 35 metros de profundidade. A partir deste dado é possível inferir a profundidade do topo rochoso para toda a seção, com base no dado de resistividade da rocha sã (a partir de 800 $\Omega.m$).

Analisando-se o perfil (Figura 4.5.19), nota-se claramente algumas variações de resistividade (baixas resistividades em torno de 200 $\Omega.m$) em pacotes com resistividades mais elevadas (a partir de 600 $\Omega.m$). Esta informação pode indicar a presença de zonas fraturadas, as quais devem conter água.

CE – 2

Este caminhamento é aproximadamente uma continuação do primeiro. A Figura 4.5.20 apresenta a pseudo-seção de resistividade aparente (seção superior) e o perfil resultante da inversão dos dados, incluindo correção topográfica (seção inferior).

Fig. 4.5.20 – Pseudo-seção de resistividade aparente e perfil de resistividade gerado pelo modelo de inversão

Como pode ser observado (Figura 4.5.20) o topo do embasamento, caracterizado pelos mais altos valores de resistividade localiza-se a 45 metros de profundidade. A partir deste dado é possível inferir a profundidade do topo rochoso para toda a seção, com base no dado de resistividade da rocha sã (a partir de $800 \Omega \cdot m$).

Analisando-se o perfil (Figura 4.5.20), nota-se claramente algumas variações de resistividade (baixas resistividades em torno de $200 \Omega \cdot m$) em pacotes com resistividades mais elevadas (a partir de $400 \Omega \cdot m$). Esta informação pode indicar a presença de zonas fraturadas, as quais devem conter água.

b) Perfil 3:

- Características do levantamento geofísico

O perfil 3 de caminhamento elétrico foi realizado no Morro das Antenas, possui direção NE-SW. Localiza-se próximo à nascente do Barroão. É definido por 25 estações de medidas equidistantes de 30m. Esse perfil geofísico teve início na porção NE (estaca 0) e foi finalizado na estaca 24 (porção SW). O posicionamento de cada estação (estaca) foi obtido por intermédio de GPS. A SEV foi realizada na estaca 13, com abertura máxima entre eletrodos de corrente igual a 26 m ($AB/2=13$ m). Nesta região ocorre quartzito, aflorante. A escolha desta área se deu em função da presença da fonte do Barroão.

- Apresentação e Interpretação dos resultados

SEV – 2

A Figura 4.5.21 apresenta o resultados da inversão dos dados da SEV-2. O gráfico ($AB/2$ x resistividade aparente) apresenta os dados de campo (pontos vermelhos) sobrepostos a uma curva contínua que equivale à resposta do modelo geoelétrico calculado (em termos de resistividade verdadeira, espessura da camada e profundidade do topo da mesma). A linha pontilhada representa o modelo de resistividade das camadas. O ajuste obtido (diferença entre o valor medido e calculado a partir do modelo) pode ser avaliado através de um erro de mínimos quadrados (*RMS error*) também apresentado na Figura 4.5.21.

Fig. 4.5.21 – Resultados da Inversão dos dados da SEV 2

Na interpretação dos resultados das SEV's identificaram-se 2 camadas geoeletricas, a camada 1 representa rocha alterada, com espessura de 2,5 metros e valores de resistividade próximo de 23000 $\Omega \cdot m$. A camada 2 trata-se do topo da rocha sã e está a 2,5 metros de profundidade, com resistividade em torno de 31000 $\Omega \cdot m$.

CE – 3

A Figura 4.5.22 apresenta a pseudo-seção de resistividade aparente (seção superior) e o perfil resultante da inversão dos dados, incluindo correção topográfica (seção inferior). Nesta seção está representada também a SEV-2.

Fig. 4.5.22 – Pseudo-seção de resistividade aparente e perfil de resistividade gerado pelo modelo de inversão

Como pode ser observado (Figura 4.5.22) o topo do embasamento é aflorante em alguns locais e no local da SEV localiza-se a poucos metros de profundidade. Analisando-se o perfil, é possível notar uma variação muito significativa nos valores de resistividade (resistividades em torno de $55.000 \Omega.m$ variando para 5.000 a $20.000 \Omega.m$). Esta informação pode indicar a presença de zonas fraturadas, as quais devem conter água.

4.5.2.3 Interpretação conjunta dos dados

a) Fraturamento e geofísica

Com o objetivo de determinar as variações de resistividade nas seções geoeletricas 2-D e associá-las ao fraturamento presente nas rochas, identificaram-se os locais dessas variações (pela posição das estacas dos caminhamentos) e realizou-se a comparação entre esses locais

e a presença de fraturas mapeadas nas fotografias aéreas. Além disso utilizaram-se dados de fontes e poços cadastrados para auxiliar na interpretação. Na seção de resistividade resultante do caminhamento 1 observam-se algumas regiões que podem ser caracterizadas como zonas fraturadas, preenchidas por água (devido aos baixos valores de resistividade), caracterizando o aquífero. Próximo a estas regiões foram interpretados traços de fraturas (Figura 4.5.23), cujas orientações são apresentadas na tabela 4.5.4.

Fig. 4.5.23– Fraturas mapeadas e perfil de resistividade. No perfil de resistividade a cor azul representa baixos valores e a cor vermelha representa altos valores de resistividade.

TABELA 4.5.4 – Posições das estacas e direções dos traços de fraturas relacionados aos baixos valores na seção de resistividade.

Posição da estaca (m)	Direção das fraturas	Direções pré-cambrianas (reativadas)
240	N60E/vert e N10W/vert	R e X
840	E-W/vert, N50E/vert	T e Y
930	N60W/vert e N70E/vert	R' e R
1140	N30W/vert, N55E/vert	R' e Y

De acordo com os resultados obtidos pela SEV, o topo do embasamento localiza-se a 30 metros de profundidade e com base nos valores de resistividade é possível inferir o topo do embasamento para toda seção. As regiões da seção localizadas entre as estacas 800 e 1000 metros apresentam variações significativas de resistividade, em profundidade e verticais e são coincidentes com as fraturas mapeadas, que podem indicar a presença de zonas fraturadas que contem água. Da mesma forma, a região da seção nas proximidades da estaca 240 metros pode ser indicativa de fraturas que contem água. As fraturas que interceptam as regiões analisadas são preferencialmente de orientação N60E/vert, ocorrendo também fraturas N10W/vert, N60W/vert e E-W/vert.

Na seção 2, admite-se que o topo rochoso esteja a aproximadamente 45 metros de profundidade, em função dos mais elevados valores de resistividade da seção (a partir de 650 $\Omega.m$). Também são observados nessa seção baixos valores de resistividade (abaixo de 250 $\Omega.m$), contínuos em profundidade, em meio a meios de alta resistividade (acima de 600 $\Omega.m$) e coincidentes com as fraturas mapeadas, o que pode caracterizar zonas aquíferas. Próximo a estas regiões foram mapeados traços de fraturas (Figura 4.5.24), cujas orientações são apresentadas na tabela 4.5.5.

Fig. 4.5.24– Fraturas mapeadas e perfil de resistividade. No perfil de resistividade a cor azul representa baixos valores e a cor vermelha representa altos valores de resistividade.

TABELA 4.5.5 – Posições das estacas e direções dos traços de fraturas relacionados aos baixos valores na seção de resistividade.

Posição da estaca (m)	Direção das fraturas	Direções pré-cambrianas (reativadas)
90	N 40W/vert	R'
210 a 240	N55E/vert	R
330	N55W/vert	R'
420	N60E/vert	R

É interessante notar que na mesma fratura (de direção N60E) que cruza as proximidades da estaca 420 metros, está locado um poço, com valor de capacidade específica de 8 m³/h/m. Na seção de eletrorresistividade é possível notar que de fato se trata de uma zona fraturada, que contém água, devido as baixas respostas de resistividade. As direções das fraturas observadas nos locais das nascentes próximas a este caminhamento (fontes São Jorge, Santa Rita e José Cremasco) possuem direções N62E/88 NW, N58/85 SE, N30/65SE e N16/89 SE.

O caminhamento elétrico 3, realizado no Morro das Antenas, apresenta características interessantes relacionadas à presença de fraturas preenchidas por água. Conforme mostra a SEV realizada neste local trata-se de rocha maciça (quartzito), com uma delgada camada (aproximadamente 2 metros) de rocha alterada. Porém, a seção de resistividade indica regiões com considerável diminuição de resistividade (abaixo de 20.000 $\Omega.m$) em meio aos elevados valores de resistividade (de 20.000 $\Omega.m$ a 70.000 $\Omega.m$). Essas regiões de baixa resistividade são contínuas em profundidade e podem representar zonas fraturadas que contém água. Próximo a estas regiões foram mapeados traços de fraturas (Figura 4.5.25), cujas direções são apresentadas na tabela 4.5.6.

Fig. 4.5.25 – Fraturas mapeadas e perfil de resistividade. No perfil de resistividade a cor azul representa baixos valores e a cor vermelha representa altos valores de resistividade.

TABELA 4.5.6 – Posições das estacas e direções dos traços de fraturas relacionados aos baixos valores na seção de resistividade.

Posição da estaca (m)	Direção das fraturas	Direções pré-cambrianas (reativadas)
120	N65E/vert	R
270	N60E/vert	R
390	N75E/vert	R
600	N20W/vert, N60W/vert	X e R'

As orientações preferenciais de fraturamento, que são N65E/vert, N60E/vert e N75E/vert (principalmente) e N20W/vert. A nascente do Barroão, próxima a este caminhamento, se localiza próxima à intersecção de dois traços de fratura (N60E/vert e N20W/vert) e em campo observou-se que as fraturas possuem direção N40E/vert, paralelas à foliação, o que comprova a importância do fraturamento N60E/vert para a infiltração, circulação e armazenamento de água subterrânea.

b) Mapa de favorabilidade e dados geofísicos de eletrorresistividade

Com o objetivo de se avaliar os resultados dos mapas de favorabilidade (região de Lindóia), os perfis geofísicos de eletrorresistividade foram comparados com os mapas de favorabilidade (Figuras 4.5.24 e 4.5.25). Conforme pode ser observado as baixas respostas de resistividade

estão associadas às classes de excelente e boa favorabilidade dos mapas por combinação linear ponderada e pesos de evidência. Isso mostra que a avaliação de favorabilidade regional e os parâmetros hidrogeológicos prospectivos utilizados realmente indicam áreas mais favoráveis à ocorrência de água subterrânea para a área de estudo, auxiliando na definição de alvos para o estudo de detalhe.

Fig. 4.5.24 – Detalhe do mapa de favorabilidade por CLP (região de Lindóia) e perfis de eletrorresistividade

Fig. 4.5.25 – Detalhe do mapa de favorabilidade por PE (região de Lindóia) e perfis de eletrorresistividade.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No estudo regional, a análise conjunta dos dados de sensoriamento remoto, dados aerogeofísicos magnetométricos, mapas geológico e geomorfológico compilados, dados geológicos de campo e dados de ocorrência de fontes e produtividades de poços contribuiu para a construção de um modelo hidrogeológico regional para a área, onde a presença de lineamentos, a densidade de zonas de juntas, as feições morfoestruturais, tipo litológico, presença de contatos geológicos, declividade, morfologia e pedologia condicionam a recarga e a acumulação de água subterrânea na região.

A utilização de imagens de sensoriamento remoto integradas com dados aeromagnetométricos (fase do sinal analítico) foram fundamentais na etapa de interpretação de lineamentos, possibilitando a percepção de lineamentos que são atenuados devido ao azimute de iluminação solar da imagem ETM+. Os lineamentos interpretados representam as zonas de cisalhamento dúctil e dúctil rúptil geradas pela tectônica transpressiva dextral que ocorreu no Pré-Cambriano. Tais regiões representam linhas de fraqueza crustal, que foram reativadas por processos tectônicos distensivos posteriores. Isso é comprovado pelas análises estruturais realizadas nas localidades das fontes que permitiram a identificação das direções principais de fraturamentos. As fraturas verticais a sub-verticais, por onde ocorre a surgência de água, apresentam direções N45E, N20E, N60E, N10W, N60W e E-W que correspondem respectivamente à reativação das feições estruturais Y, P, R, X, R' e T Pré-Cambrianas.

Ainda no contexto de estudo regional, os dois métodos de análise de favorabilidade para ocorrência de água subterrânea (método conduzido pelo conhecimento e o método conduzido pelos dados) se mostraram eficientes.

O mapa booleano apresenta somente duas classes de favorabilidade (favorável e não favorável). Estas classes apresentam-se coerentes em relação à produtividade de poços e ocorrência de fontes, isto é, na classe favorável encontram-se os poços de maior produtividade e 95% das ocorrências de fontes. Porém, este mapa é muito geral, havendo a necessidade de uma classificação mais detalhada de favorabilidade.

O mapa por combinação linear ponderada apresenta os poços mais produtivos na classe mapeada como excelente favorabilidade. As classes boa e moderada apresentam um comportamento semelhante em relação a produtividade de poços, porém a classe de favorabilidade classificada como boa apresenta poços com valor médio de capacidade específica maior do que a classe de moderada favorabilidade. As fontes se localizam somente nas classes de excelente e boa favorabilidade.

O mapa gerado por média ponderada ordenada possui menos áreas mapeadas como excelente e boa favorabilidade em comparação ao mapa por combinação linear ponderada. Mesmo assim, as classes mapeadas como excelente e boa favorabilidade possuem os poços com maior produtividade. A classe mapeada como pouca favorabilidade apresenta os poços com produtividades mais baixas.

O mapa gerado por pesos de evidência separa muito bem as classes mais favoráveis das menos favoráveis. No mapa de três classes (não permissiva, permissiva e favorável), observa-se que os poços mais produtivos encontram-se na classe mapeada como favorável. As classes mapeadas como permissiva e não permissiva apresentam um comportamento semelhante em relação a produtividade de poços, porém a classe permissiva apresenta valores maiores de produtividade de poços do que a classe não permissiva.

No mapa de pesos de evidência separado em 5 classes, observa-se que a classe mapeada como excelente favorabilidade apresenta os poços com as maiores produtividades. A classe mapeada como de boa favorabilidade também apresenta poços produtivos, porém com valores um pouco menores do que a de excelente favorabilidade. As classes mapeadas como pouca favorabilidade e não favorável apresentam um comportamento semelhante apresentando produtividade de poços baixa.

Quando se analisa a correlação entre os mapas de favorabilidade, nota-se que existe uma maior correlação entre os mapas gerados pelo método conduzido pelo conhecimento. Isso ocorre porque foram utilizados os mesmos fatores prospectivos nas análises por combinação linear ponderada e média ponderada ordenada. Já na análise por pesos de evidência foi necessário reagrupar mapas e descartar outros em função da necessidade de independência condicional entre os temas de evidência.

Em relação a todos os mapas gerados, nota-se que na classe de favorabilidade classificada como excelente encontram-se os poços mais produtivos. Todos os mapas apresentaram que a região próxima de Serra Negra, Lindóia e Águas de Lindóia (zona de cisalhamento transcorrente Monte Sião) e nas proximidades da zona de cisalhamento transcorrente de Jacutinga representam regiões de excelente favorabilidade para ocorrência de água subterrânea. A maior diferença entre os mapas está na determinação das classes de baixa e intermediária de favorabilidade.

A combinação linear ponderada se mostrou como uma análise mais otimista, ao passo que as análises por média ponderada ordenada e pesos de evidência se mostraram mais pessimistas, pois as áreas de maior favorabilidade destas são menores em relação as áreas de maior favorabilidade do mapa por combinação linear ponderada.

Um fator importante que deve ser considerado em relação às análises de favorabilidade é que tanto nas análises realizadas pelo método conduzido pelo conhecimento quanto pelo método

conduzido pelos dados não foram utilizados dados de poços não produtivos, uma vez que não se dispunha de maiores detalhes a respeito desses poços (se não eram produtivos por algum problema construtivo ou se eram secos). Porém, análises de favorabilidade utilizando-se dados de poços não produtivos para indicar as áreas não favoráveis podem ser uma alternativa para melhorar ainda mais os resultados dos mapas de favorabilidade a ocorrência de água subterrânea.

O levantamento geofísico de eletrorresistividade nas duas áreas de detalhe confirmou a grande importância das fraturas verticais de direção N45E, N20E e N60E (paralelas a foliação das rochas) e secundariamente das fraturas verticais de direção N60W e N10W para a prospecção de água subterrânea na região. Estas direções coincidem com as direções de fraqueza geradas no Pré-Cambriano representado pelas direções Y, P, R, R' e X. Além disso, a intersecção de fraturas orientadas segundo NE-NE, NE-NW e NW-NS se mostraram importantes para a acumulação de água. Porém, observou-se nas seções geofísicas que algumas fraturas de direção NE não apresentaram indicações da presença de água (baixos valores de resistividade) o que torna o levantamento geofísico fundamental para definição dos locais para a perfuração de poços.

Observou-se também, que em alguns locais, as fraturas mapeadas em escala de maior detalhe, coincidiam com as zonas de cisalhamento. Muitas vezes essas regiões apresentaram respostas baixas de resistividade em meio a altas respostas, indicando a presença de água nas fraturas das rochas.

O levantamento geofísico de eletrorresistividade também mostrou a pequena espessura de solo e manto de intemperismo na área, demonstrando a pequena influência destes nos processos hidrogeológicos da área, sendo as fraturas os principais condicionantes hidrogeológicos.

Comparando-se os dados do levantamento geofísico com os mapas de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea, observa-se uma coerência das baixas respostas de resistividade com as classes de melhor favorabilidade. Isso comprova que os métodos de análises e os parâmetros prospectivos utilizados são adequados para o mapeamento de favorabilidade na área de estudo.

Dessa forma, no estudo de aquíferos fraturados em terrenos cristalinos, recomenda-se a análise integrada de dados de sensoriamento remoto e aerogeofísicos para a caracterização das regiões de fraqueza crustal, como zonas de cisalhamento dúcteis a dúcteis-rúpteis, e a utilização de técnicas de geoprocessamento para as análises de favorabilidade, com o objetivo de definir áreas alvo para o estudo de detalhe. A realização de levantamentos geofísicos de eletrorresistividade complementa o estudo de favorabilidade regional e é fundamental para o sucesso na definição de locais para a perfuração de poços.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGTERBERG, F. P.; BONHAM-CARTER, G.F.; WRIGHT, D.F. 1990. Statistical pattern integration for Mineral Exploration. In: Gaal, G. e Merriam, D.F. (eds.) *Computer applications in resource estimation prediction and assessment for metals and petroleum*. Pergamon Press, Oxford, 19p.
- ALMEIDA, F. F. M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B. B. de. 1976. The Upper Precambrian of South America. *Boletim do Instituto de Geociências*. v. 7, p. 45-80.
- ALMEIDA, F.F.M. de. 1977. O cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, v.7, p.349-364.
- ARAÚJO C.C. & MACEDO, A.B. 2002. Multicriteria geologic data analysis for mineral favorability mapping: application to a metal sulphide mineralized área Ribeira Valley Metallogenic Province, Brazil. *Natural Resources Research*, v. 11, p.29-43.
- ARAÚJO, C.C. 1999. *Aplicação de geoprocessamento na análise de favorabilidade para mineralizações de chumbo, zinco e cobre nas folhas Cerro Azul e Apiaí, Vale do Ribeira (SP e PR)*. São Paulo, 151 p. (Dissertação de Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- ARTUR, A. C. e WERNICK, E. 1986. Interpretação geotectônica de alguns aspectos do embasamento cristalino do Estado de São Paulo e áreas adjacentes do Estado de Minas Gerais. Congresso Brasileiro de Geologia 34, *Anais*, v. 3, p.1285-1295.
- ARTUR, A. C.; WERNICK, E.; KAWASHITA, K. 1988. Geocronologia de unidades litoestratigráficas do embasamento cristalino da região sul de Minas Gerais e áreas adjacentes do Estado de São Paulo. Congresso Brasileiro de Geologia 35, *Anais*, v.6, p.2854-2864.
- ARTUR, A. C.; WERNICK, E.; KAWASHITA, K. 1990. Migmatitos policíclicos do sul de Minas Gerais e áreas adjacentes do Estado de São Paulo: caracterização estrutural/petrográfica e dados geocronológicos. Congresso Brasileiro de Geologia 36, *Anais*, v.6, p. 2827-2842.
- ARTUR, A.C. 1988. *Evolução policíclica da infra-estrutura da porção sul do Estado de Minas Gerais e regiões adjacentes do Estado de São Paulo*. São Paulo, 231p. (Tese de Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- ASSUMPCÃO, M., BARBOSA, J., BERROCAL, J., BASSINI, A., VELOSO, J., MARZA, V., HUELSEN, M., RIBOTTA, L. 1997. Seismicity patterns and focal mechanisms in southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, v.15, n.2, p.119 - 132.
- BARRETO, A.B. da C. et al. 2000. Hidrogeologia do Estado do Rio de Janeiro. In: CPRM *Projeto Rio de Janeiro: Estudo Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro*. Brasília, CD-ROM.
- BASEI, M.A.S., CAMPOS NETO, M.C., BERGMANN, M., FIGUEIREDO, M.C.H. de. 1986. *Geologia da Folha Amparo – 1:50.000*. 109 p.
- BONHAM-CARTER, G.F.; AGTERBERG, F.P.; WRIGHT, D.F. 1988. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. *Photogrammetric Eng.*, v. 54, n.11, p. 1585-1592.
- BONHAM-CARTER, G.F.; AGTERBERG, F.P.; WRIGHT, D.F. 1989. Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential. In: Agterberg, F.P. e Bonham-Carter, G.F. (eds.) *Statistical applications in the earth sciences*. Geol. Survey Canada Paper 9-9, p. 171-183.
- BONHAM-CARTER, G.F. 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists – Modelling with GIS*. 1 ed. Ontario, Pergamon, 398p.
- CAMPANHA, G.A.C.; FERNANDES, L.A.; GIMENEZ FILHO, A. 1982. *Geologia das porções paulistas das quadrículas de Mogi Guaçu e Águas de Lindóia*. Escala 1:50.000. IPT, 94 p.
- CAMPOS NETO, M. C; BASEI, M. A. S.; ALVES, F. R.; VASCONCELOS, A. C. B. DE. 1984. A nappe de cavalgamento Socorro (SP-MG). Congresso Brasileiro de Geologia 33, *Anais*, v. 4, p. 1809-1822.
- CAMPOS NETO, M. DA C. 1991. *A porção ocidental da Faixa Alto Rio Grande – Ensaio de evolução tectônica*. São Paulo, 210 p. (Tese de Doutorado)– Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- CAMPOS NETO, M.C, PERROTA, M.M., PELOGGIA, A.U.G. 1990. A porção ocidental da Faixa Alto Rio Grande (SP-MG). Congresso Brasileiro de Geologia 36, *Anais*, v. 6, p. 2615-2630.

- CARRANZA, E. J. M.; HALE, M. 2000. Geologically constrained probabilistic mapping of gold potential, Baguio District, Philippines. *Natural Resources Research*, v. 9, n. 3, p. 237-253.
- CHAVEZ Jr., P. S. 1975. Atmosferic, solar and MTF corrections for ERTS digital imagery. Phoenix: *American Society Photogrammetry*, p. 69-79.
- CHILTON, P.J. e FOSTER, S.S.D. 1995. Hydrogeological characterization and water-supply potential of basement aquifers in tropical Africa. *Hydrogeological Journal*, v. 3, n. 1, p. 36-49.
- CHRISTIE-BLICK, N.; BIDDLE, K.T. 1985. Deformation and basin formation along strike-slip faults. In: K.T. Biddle and N. Christie-Blick (ed) *Strike-slip deformation, basin formation and sedimentation*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 37, p.1-34.
- COSTA, W. D. 1986. Análise dos fatores que atuam no aquífero fissural: área piloto dos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. São Paulo, 225 p. (Tese de doutoramento) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- CPRM, 2002. Atlas Geoambiental das bacias hidrográficas dos rios Mogi Guaçu e Pardo (SP). CD-ROM.
- CPRM, 1999. *Nota explicativa da carta geológica da Folha Santos*. Projeto integração geológico-metalogenética, Folha Rio de Janeiro SF 23. Escala 1:250.000. São Paulo, 26 p.
- CPRM, 1995. *Catálogo geral de produtos e serviços*. Geologia: Levantamentos aerogeofísicos, 2ed, 395 p.
- CREPANI, E. 1988. Análise de fraturas através de imagens fotográficas de baixa resolução espacial: uma contribuição ao estudo da evolução tectônica da região da Chapada do Araripe. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 5, *Anais*, v. 2, p. 366-380.
- CRÓSTA, A. P. 1993. *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. Campinas: Instituto de Geociências, UNICAMP, 170 p.
- DAEE UNESP 1982 a. *Mapa geológico do Estado de São Paulo*. Folha Ribeirão Preto (SF-23-V-C). Escala 1:250.000.
- DAEE UNESP 1982 b. *Mapa geológico do Estado de São Paulo*. Folha Campinas (SF-23-Y-A). Escala 1:250.000.
- DAEE. 1974. *Estudo de águas subterrâneas, Região Administrativa 6 – Ribeirão Preto*. v. 1, 75p.
- DAEE. 1981. *Estudo de águas subterrâneas, Região Administrativa 5 – Campinas*. v. 1, 343 p.
- DAVIS, J.C. 2002. *Statistics and data analysis in geology*. 3th edition. 638 p.
- DRURY, S. A. ; Walker, A. S. D. 1987. Display and enhancement of gridded aeromagnetic data of the Solway Basin. *International Journal of Remote Sensing*, v. 8, n. 10 p. 1433-1444.
- EASTMAN, J.R. 1997. *Idrisi for windows, User's Guide, version 2.0*. Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis, Clark University.
- EASTMAN, J.R.; JIN, W.; KYEN, A.K.; TOLEDANO, J. 1995. Raster procedures for multi-criteria/Multi-objective decisions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 61, n.5, p. 539-547.
- EBERT, H. 1968. Ocorrência da fácies granulítica no sul de Minas Gerais e áreas adjacentes, em dependência da estrutura orogênica: hipótese sobre sua origem. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 40 (suplemento): 215-229,
- EBERT, H. 1984. *In memoriam*. Os Paraibides entre São João Del Rei e Itapira e a bifurcação entre Paraibides e Araxáides. *Publicação Sociedade Brasileira de Geologia* - núcleo de São Paulo, n. 12, p.72-103.
- EBERT, H. D.; CHEMALE Jr., F.; BABINSKI, M.; ARTUR, A.C.; VAN SCHMUS, W.R. 1996. Tectonic setting and U/Pb zircon dating of the plutonic Socorro Complex in the transpressive Rio Paraíba do Sul shear belt, SE Brazil. *Tectonics*, v. 15, n. 2, p. 688-699.
- EBERT, H. D.; HASUI, Y.; COSTA, J. B. S. 1991. O caráter transpressivo do cinturão transcorrente Rio Paraíba do Sul. Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos 3, *Boletim*, p. 139-141.
- EBERT, H. D.; HASUI, Y.; SARTORATO, G.; ALMEIDA, S. H.; COSTA, J. B. S. 1993. Arcabouço estrutural e tectônica transpressiva das faixas móveis da borda sul e sudeste do Cráton do São Francisco e da Sintaxe de Guaxupé. Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos 4, *Boletim*, v.12, p. 166-171.

- EDWARDS, L.S. 1977. A modified pseudo-section for resistivity and induced polarization. *Geophysics*, v. 3, p. 78-95.
- ENDO, I. e MACHADO, R. 1993. Sistema de cisalhamento transatlântico: um modelo tectônico transpressional para o neoproterozóico do Brasil oriental. Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos 4, *Boletim*, v. 12, p. 356-358.
- FERNANDES, A. 1999. Tectônica cenozóica na porção média da bacia do rio Piracicaba e sua aplicação à hidrogeologia. São Paulo, 244 p. (Tese de doutoramento) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- FERNANDES, A.J.; RUDOLPH, D.L. 2001. The influence of Cenozoic tectonics on the groundwater-production capacity of fractured zones: a case study in São Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal*, v.9, p. 151-167.
- FIORI, A. P.; WERNICK, E.; ARTUR, A. C. 1981. Caracterização de migmatitos e anatexitos da região nordeste do Estado de São Paulo e Sul de Minas Gerais. Simpósio Regional de Geologia 3, *Atas*, v. 1, p.310-323.
- FOX, R.C., HOHMANN, G.W., KILLPACK, T.J., RIJO, L. 1980. Topographic effects in resistivity and induced polarization surveys. *Geophysics*, v.45, p. 75-93.
- FUCK, R.A. 1993. As faixas de dobramentos marginais do Cráton do São Francisco: síntese dos conhecimentos. In: *O cráton do São Francisco*. Salvador, SBG, p. 161-185.
- FUCK, R.F. 2000. *Interpretação de dados magnetométricos, eletromagnetométricos e gamaespectrométricos da região central da Serra dos Carajás, PA*. Brasília, 185 p. (Dissertação de Mestrado)- Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.
- GALLAS, J.D.F. 2000. *Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental*. Rio Claro, 174 p. (Tese de doutoramento)- Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- GEOSOFT, 1995. *Geosoft mapping and processing system*. Toronto, Geosoft Inc., 50p.
- GEOSOFT. 2002. *Geosoft technical note: microlevelling using bi-directional gridding*. In: www.geosoft.com/news. Consulta realizada em abril de 2002.
- GEOTOMO SOFTWARE. 2003. *RES2DINV: Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method*, vers. 3.4.
- GILLESPIE, A. R.; KAHLE, A. B.; WALKER, R. E. 1987. Color enhancement of highly correlated images. I. Decorrelation and HSI contrast stretch. *Remote Sensing of Environment*, v. 20, n. 3, p. 209-235.
- GREENBAUN, D. 1992. Structural influences on the occurrence of groundwater in SE Zimbabwe. In: Wright, E.P. and Burgess, W.G. (eds). *Hydrogeology of Crystalline basement aquifers in Africa*. Geological Society Special Publication, n. 66, p. 77-85.
- GROOT-HEDLIN, C. e CONSTABLE, S. 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, v.55, p.1613-1624.
- GUNN, P; MEIXNER, T.; MILLIGAN, P; MACKEY, T. 1998. *Interpretation of airborne magnetic and radiometric surveys*. Canberra: Australian Geological Survey Organisation. Airborne geophysics group, 113 p.
- GUY, M. 1966. Quelques principes e quelques experiences sur la methodologie de la photo-interpretation. *Symposium International de Photo-Interpretation 2., Acte*, v.1, p. 2-41.
- HARRIS, J. R. 1991. Mapping of regional structure of eastern Nova Scotia using remotely sensed imagery: implications for regional tectonics and gold exploration. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v.17, p.122-135.
- HARRIS, J. R., BOWIE, C., RENCZ, A. N., GRAHAM, D. 1994. Computer-enhancement techniques for the integration of remotely sensed, geophysical, and thematic data for the geosciences. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 20, p. 210-221.
- HARRIS, J. R., MURRAY, R., HIROSE, T. 1990. IHS transform for the integration of radar imagery and other remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 56, p.1631-1641.

- HARRIS, J.R.; WILKINSON, K.; FUMERTON, S.; BERNIER, M.A.; AYER, J.; DAHN, R. 2001. Application of GIS processing techniques for producing mineral prospectivity maps – a case study: mesothermal Au in the Swayze Greenstone Belt, Ontario, Canada. *Natural Resources Research*, v. 10, n. 2, p. 91-124.
- HASUI et al., 1982. *Geologia, tectônica, geomorfologia e sismologia regionais de interesse às usinas nucleares da praia de Itaorna*. São Paulo, IPT- Monografias, 159 p.
- HASUI, Y. e COSTA, J. B. S. 1991. *Zonas e cinturões de cisalhamento*, Belém, UFPA, 144p.
- HASUI, Y. e OLIVEIRA, M. A. F. 1984. *Província Mantiqueira, setor central*. In: Almeida e Hasui (eds.). *O Pré Cambriano do Brasil*, Edgar Blücher Ltda, p. 308-344.
- HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; BISTRICHI, C. A. 1980. Estruturas e tectônica do pré-Cambriano de São Paulo e Paraná. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 52, n. 1, p. 61-76.
- HASUI, Y.; EBERT, H. D.; COSTA, J. B. S. 1990. Estruturação de extremidade oriental da chamada Cunha de Guaxupé: dados preliminares. Congresso Brasileiro de Geologia 36, *Anais*, p. 2296-2308.
- HENRIKSEN, H. 1995. Relation between topography and well yield in boreholes in crystalline rocks, Sogn og Fjordane, Norway. *Ground Water*, v. 33, n. 4, p. 635-643.
- HIRATA, R.C.A. E FERREIRA, L.M.R. 2001. Os aquíferos da bacia hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 31, p. 43-50.
- IGC/DAEE. 1996. *Unidades hidrográficas de gerenciamento de recursos hídricos do Estado de São Paulo*. São Paulo. (Escala: 1:1.000.000).
- IPT, USP. 1997. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo- 1:500.000. Laboratório de geomorfologia – Depto. de Geografia- FFLCH.
- IPT. 1981. *Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo. IPT. v.1 e 2.
- KEMP, L.; BONHAM-CARTER, G.F.; LOONEY C.G. 2001. Arc SDM and Data Xplore – Spatial data modeler for Arc View and Spatial Analyst. *User Guide*.
- KING, R. W.; KAUPP, V. H.; WAITE, W. P.; MCDONALD, H. C. 1984. Digital color space transformations. International Geoscience Applications Remote Sensing Symposium, *Proceedings*, p.649-654.
- KRISHNAMURTHY, J. JAYARAMAN, V., MANIVEL, H. 1996. An approach to demarcate ground water potential zones through remote sensing and geographical information system. *International Journal of Remote Sensing*, v.17, p. 1867-1884.
- LANGVIN, C.; PERNEL, F.; POINTET, T. 1991. Aide à la décision em matière de prospection hydrogéologique: l'analyse multicritère au service de l'évaluation du potentiel aquifère, em milieu fissure (granite de Huelgoat, Finistère, France). *Hydrogéologie*, n. 1, p. 51-64.
- LAZARINI, A. P. 2000. *Petrologia de metabasitos/ultrabasitos da região de Águas de Lindóia*. Rio Claro, 134 p. (Dissertação de mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- LIMA, M.I.C. de. 2002. Análise de drenagem através de dados de sensoriamento remoto. CD-ROM.
- LOKE, M. H.; BARKER, R. D. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, v. 44, p. 131-152.
- LOWMAN, P. D. JR; HARRIS, J.; MASUOKA, P. M; SINGHROY, V. H; SLANEY, V. R. 1987. Shuttle Imaging radar (SIR-B) investigations of the Canadian shield: inicial report. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 25, p.139-159.
- MABEE, S.B., HARDCASTLE, C.H., WISE, D.U. 1994. A method of collecting and analyzing lineaments for regional scale fractured-bedrock aquifer studies. *Ground Water*, v. 32, p. 884-894.
- MACHADO, R. E ENDO, I. 1994. Superposição cinemática brasileira no cinturão de cisalhamento Atlântico e na Cunha de Guaxupé. Congresso Brasileiro de Geologia 38, *Boletim de Resumos Expandidos*, v.1, p. 189-191.
- MADRUCCI, V. 2000. *Avaliação dos produtos integrados TM-Landsat, RADARSAT e gamaespectrométricos, na caracterização tectônica e mapeamento geológico de área mineralizada em ouro na região de Alta Floresta - MT*. São José dos Campos, 187p. (Dissertação de Mestrado) – Divisão de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

- MADRUCCI, V., VENEZIANI, P., PARADELLA, W.R. 2002. Estudo estrutural através da interpretação de imagens TM-Landsat 5 e sua associação com mineralizações auríferas em Alta Floresta, Mato Grosso. In: Klein, E.L., Vasquez, M.L., Rosa-Costa, L.T (eds) *Contribuições à Geologia da Amazônia* 3, p. 215-226.
- MADRUCCI, V.; ARAÚJO, C.C.; TAIOLI, F. 2003. Sensoriamento remoto, aerogeofísica e geoprocessamento aplicados ao estudo de aquífero fraturado em terreno cristalino, leste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, n.2 suplem, p. 43-52.
- MANOEL FILHO, J. 1997. *Ocorrência das águas subterrâneas* In: Feitosa, F. A. C. e Manoel Filho, J. (eds.) *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Fortaleza, CPRM, LABHID-UFPE, 412 p.
- MATTER, P. M. 1987. *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*. Chichester: John Wiley, 352 p.
- MATTOS, J. T., BALIEIRO, M. G., SOARES, P. C., BARCELLOS, P. E., MENESES, P. R., CSORDAS, S. M. 1982. *Análise morfoestrutural com uso de imagens MSS-Landsat e radar para pesquisa de hidrocarbonetos no Estado de São Paulo*. São José dos Campos, INPE, 167 p.
- MINTY, B.R.S. 1991. Simple Micro-levelling for aeromagnetic data. *Exploration Geophysics*, v. 22, p.591-592.
- MOORE, R.B; SCHWARZ, G.E.; CLARK JR., S.F.; WALSH, G.J.; DEGNAN, J.R. 2002. *Factors related to well yield in the fractured-bedrock aquifer of New Hampshire*. U.S. Geological Survey professional paper 1660. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. 51p.
- NETGIS, 1997. Geoprocessamento e informática. *SPRING: sistema de processamento e de informações georreferenciadas*. Versão 2.0 - release 2.04. São José dos Campos, 4v.
- NICKELSEN, R. P. 1974. Early jointing and cumulative fracture patterns. In: International Conference on the New Basement Tectonics 1, *Proceedings*, p. 193-199.
- O'LEARY, D. W., FRIEDMAN, J. D., POHN, H. A. 1976. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin*, v. 87, p.1463-1469.
- OLIVEIRA, J.B. DE, CAMARGO, M.N., ROSSI, M. CALDERANO FILHO, B. 1999. *Mapa pedológico do Estado de São Paulo – 1:500.000*. Campinas.
- OLIVEIRA, S. A. M. 1997. *Uso e aplicações de sensoriamento remoto no estudo do controle hidrogeológico do aquífero termal de Caldas Novas- GO*. São José dos Campos, 111p. (Dissertação de Mestrado) - Divisão de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- PARADELLA, W. R. 1998. *Processamento digital de imagens de sensores remotos aplicados às geociências [transparência]*. São José dos Campos.
- PARADELLA, W.R., SANTOS, A.R., DALL'AGNOL, R., PIETSCH, R.W., SANT'ANNA, M.V. 1998. A geological investigation based on airborne (SAREX) and spaceborne (RADARSAT-1) SAR integrated products in the Central Serra dos Carajás granite area, Brazil. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 24, p. :376-392.
- PARRO, P.S. 1998. *Magnetometria e gamaespectrometria aerotransportadas na interpretação geológico-estrutural da região dos rios Juruena e Teles Pires – MT*. Brasília, 63 p. (Dissertação de Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Brasília.
- PERROTA, M. M. 1996. Potencial aurífero de uma região no Vale do Ribeira, São Paulo, estimado por modelagem de dados geológicos, geoquímicos, geofísicos e de sensores remotos num sistema de informações geográficas. São Paulo, 149 p. (Tese de doutoramento) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- PLIKA, M. 1974. Observations on joint zones in Moravia, Czechoslovakia. International Conference on the New Basement Tectonics 1, *Proceedings*, p. 279-289.
- RAINES, G.L. 1999. Evaluation of weights of evidence to predict epithermal gold deposits in the Great Basin of Weastern United States. *Natural Resources Research*, v. 8, n. 4, p. 257-276.
- RAINES, G.L.; BONHAM-CARTER G.F.; KEMP, L. 2000. Predictive probabilistic modeling using Arc View GIS. In: *ArcUser Guide*, p. 45-53.

- RAMSAY, J. G. E HUBER, M. I. 1987. *The techniques of modern structural geology, 2: folds and fractures*. London, Academic Press, 700 p.
- RICHARDS, J.A. 1993. *Remote sensing digital image analysis: an introduction*. Springer-Verlag, 2nd, revised and enlarged edition, 340 p.
- RIVERAU, J.C. 1972. Notas de aula do curso de fotointerpretação. *XI Semana de estudos Ouro Preto – fotografia aérea e aplicações técnicas*, n. 11, p. 75-121.
- RODRIGUES, J.E. 1976. *O falhamento transcorrente de Jacutinga*. São Paulo, 44 p. (Dissertação de mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- ROSS, J.L.S.; MOROZ, I.C. 1997. *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo*. Escala 1:500.000, v.1, Universidade de São Paulo, 64p.
- ROSTIROLLA, S. P.; SOARES, P.C.; CHANG, H.K. 1998. Bayesian and multivariate methods applied to favorability quantification in Recôncavo Basin and Ribeira Belt, Brazil. *Nonrenewable Resources*, v. 7, n.1, p. 7-24.
- ROSTIROLLA, S.P. 1997. Alguns aspectos da avaliação de favorabilidade em geologia exploratória. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 27, n. 4, p. 327-338.
- SAD, J.H.G., BARBOSA, A.L.M., PAIVA, J.A.M., ROLINA, V.K., PINTO, C.P. 1982. *Geologia e Recursos Minerais da quadrícula de Socorro – SP, 1:50.000*. Pró-Minério, 286 p.
- SAMPAIO, O.S. 1987. *Estudo de fraturamentos como subsídio à pesquisa de água subterrânea no estado de Sergipe: uma abordagem através de dados de sensoriamento remoto*. São José dos Campos, 95p. (Dissertação de Mestrado) -Divisão de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- SANDER, P. 1997. Water-well sitting in hard-rock areas: identifying promising targets using a probabilistic approach. *Hydrogeology Journal*, v. 5, p. 32-43.
- SANDER, P., CHESLEY, M.M., MINOR, T.B. 1996. Groundwater assessment using remote sensing and GIS in a rural groundwater project in Ghana: lessons learned. *Hydrogeology Journal*, v. 4, p. 40-49.
- SASAKI, Y. 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, v. 40, p. 453-464.
- SHIMABUKURO, Y. E.; NOVO, E. M. L. M; MERTES, L. A. K. 1998. Mosaico digital de imagens Landsat TM da planície do rio Solimões – Amazonas no Brasil. *Publicação interna*, INPE. São José dos Campos, 45 p.
- SOARES, P.C. E FIORI, A.P. 1976. Lógica e Sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Noticiário Geomorfológico*, v. 16, p. 107-121.
- SOARES, P.C., LUZ, M.E.R., REDAELLI, R., GUERRA, S.M.S. 1982. Análise morfoestrutural em fotos aéreas: aplicação na prospecção de hidrocarbonetos na bacia do Paraná. *Simp. Bras. Sensoriamento Remoto 2, Anais*, v.1, p.157-168.
- SZIKSZAY, M E TEISSEDRE, J.M. 1978. Análise Hidrogeoquímica preliminar das Fontes da região de Águas de Lindóia, *Revista Brasileira de Geociências*, v. 8, n. 3, p.235-248.
- TEEUW, R. M. 1995. Groundwater exploration using remote sensing and low-cost geographical information system. *Hydrogeology Journal*, v.3, n.3, p.21-30.
- TEIXEIRA, A.L.; NEGRI F. DE A.; SOBRINHO, J.M.A. 1997. *Zoneamento das áreas de recarga dos aquíferos do balneário do município de Águas de Lindóia*. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Geológico. São Paulo, 78 p.
- TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E.; KEYS, D.A. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge, Cambridge University Press, 770 p.
- TOUTIN, T. 1995. Intégration de données multi-source: comparaison de méthodes géométriques. *International Journal of Remote Sensing*, v. 16, n. 5, p. 2795-2811.
- USGS, 2000. www Landsat7.usgs.gov/about.html.
- VALENTE, C.R.; OLIVEIRA, S. M.A.; VENEZIANI, P. 2001. Controle neotectônico das águas subterrâneas no Estado do Rio de Janeiro. Congresso Brasileiro de Sensoriamento Remoto 10, *Anais*, CDROM.

- VASCONCELLOS, R. M.; METELLO, M. J.; MOTTA, A.C.; GOMES, R. D. 1994. *Geofísica para levantamentos geológicos*. Rio de Janeiro, CPRM, 165 p.
- VENEZIANI, P. 1987. *Análise de movimentos da tectônica rúptil e rúptil-dúctil através da interpretação de produtos de sensores remotos na região do Espinhaço Meridional (MG): uma correlação com processos evolutivos*. São Paulo, 186 p. (Tese de doutoramento) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- VENEZIANI, P. 1988. *Apostila da disciplina fotogeologia de imagens orbitais*, curso de mestrado em Sensoriamento Remoto. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 40 p.
- VENEZIANI, P. e ANJOS, C.E. 1982. *Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia*. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 61p.
- VLACH, 1985. *Geologia, petrografia e geocronologia das regiões meridional e oriental do complexo de Morungaba, SP*. São Paulo, 253 p. (Dissertação de mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- VOUILLAMOZ, J.M., LEGCHENKO, A., ALBOUY, Y., BAKALOWICZ, M., BALTASSAT, J.M., AL-FARES, W. 2003. Localization and saturated karst aquifer with magnetic resonance sounding and resistivity imagery. *Ground Water*, v. 41, n. 5, p. 578-586.
- WATERS, P., GREENBAUM, D., SMART, P.L., OSMASTON, H. 1990. Applications of remote sensing to groundwater hydrogeology. *Remote Sensing Reviews*, v. 4, p. 223-264.
- WERNICK, E.; ARTUR, A. C.; FIORI, A. P. 1981. Reavaliação de dados geocronológicos da região nordeste do Estado de São Paulo e unidades equivalentes dos Estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. *Simpósio Regional de Geologia 3, Atas*, v. 1, p. 328-342.
- WOODCOCK, N. H.; RICKARDS, B. 2003. Transpressive duplex and flower structure: Dent Fault System, NW England. *Journal of Structural Geology*, v. 25, p. 1981-1992.
- YAMAMOTO, J. K.; BETTENCOURT, J. S; MONTANHEIRO, T. J. 2000 *Análise Estatística*. Apostila do curso geoestatística aplicada. São Paulo, Universidade de São Paulo, 19 p.
- YIN, Z.Y; BROOK, G. A. 1992. The topographic approach to locating high-yield wells in crystalline rocks: does it work? *Ground Water*, v. 30, n. 1, p. 96-102.
- YOSHINAGA, S. 1990. *Estudos hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos das águas minerais e termais de Águas de Lindóia e Lindóia, SP*. São Paulo, 113 p. (Dissertação de Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- ZANARDO, A. 1987. *Análise petrográfica e microestrutural das rochas da Folha Águas de Lindóia*. São Paulo, 270 p. (Dissertação de Mestrado) - Instituto de Geociências, - Universidade de São Paulo.

ANEXO 1

Poços e nascentes cadastrados

Poços Cadastrados - banco da dados 1

MUNICIPIO	FONTE INFORMAÇÃO	PROF. (m)	VAZAO (m3/h)	NE (m)	ND (m)	CAP. ESP (m3/h/m)	X_UTM	Y_UTM
SERRA NEGRA	DAEE	41	3.00	16.00	34.00	0.17	324854	7499141
SERRA NEGRA	DAEE	99	11.00	2.00	47.00	0.24	324620	7499630
SERRA NEGRA	DAEE	103	8.00	7.00	52.00	0.18	323860	7498607
SERRA NEGRA	DAEE	106	19.00	6.00	50.00	0.43	323802	7498698
SERRA NEGRA	DAEE	120	2.00	35.00	95.00	0.03	322765	7496933
SERRA NEGRA	DAEE	300	3.00	14.00	40.00	0.12	323719	7498482
LINDOIA	DAEE	132	8.00	9.00	93.00	0.10	329264	7508327
LINDOIA	DAEE	82	12.00	2.00	55.00	0.23	331307	7509734
LINDOIA	DAEE	150	5.00	10.00	79.00	0.07	330847	7509944
LINDOIA	DAEE	100	2.00	3.00	70.00	0.03	331555	7507891
LINDOIA	DAEE	100	11.00	7.00	62.00	0.20	331666	7508230
SERRA NEGRA	DAEE	347	8.00	11.00	130.00	0.07	328204	7503455
SERRA NEGRA	DAEE	200	12.00	27.00	84.00	0.21	328952	7503002
SERRA NEGRA	DAEE	100	3.00	0.00	88.00	0.03	328009	7502991
SERRA NEGRA	DAEE	69	1.00	6.00	45.00	0.03	328066	7503023
LINDOIA	DAEE	50	7.00	6.00	25.00	0.37	331311	7509334
LINDOIA	DAEE	103	2.00	1.00	65.00	0.03	331453	7509428
SOCORRO	DAEE	70	24.00	5.00	40.00	0.69	341109	7501533
SOCORRO	DAEE	111	4.00	14.00	60.00	0.09	342521	7497549
SOCORRO	DAEE	70	36.00	3.00	42.00	0.92	338621	7504583
SOCORRO	DAEE	93	7.00	14.00	56.00	0.17	340770	7503929
SOCORRO	DAEE	60	40.00	0.00	42.00	0.95	342403	7503453
SERRA NEGRA	DAEE	21	4.00	6.00	6.00	0.66	329417	7504914
SERRA NEGRA	DAEE	45	5.00	20.00	20.00	0.25	322611	7497915
LINDOIA	DAEE	150	3.00	7.00	30.00	0.13	331153	7508102
AGUAS DE LINDOIA	DAEE	204	5.00	38.00	102.00	0.08	331301	7512902
ITAPIRA	DAEE	155	5.00	5.00	80.00	0.07	321895	7515381
AGUAS DE LINDOIA	DAEE	72	13.00	9.00	13.00	3.25	331958	7512940
LINDOIA	DAEE	20	7.00	0.00	5.00	1.40	331805	7513800
ESPIRITO SANTO DO PINHA	DAEE	100	1.00	6.00	50.00	0.02	318011	7544283

MUNICIPIO	FONTE INFORMAÇÃO	PROF. (m)	VAZAO (m3/h)	NE (m)	ND (m)	CAP. ESP (m3/h/m)	X_UTM	Y_UTM
ESPIRITO SANTO DO PINHA	DAEE	80	3.00	16.00	50.00	0.09	319521	7545008
ESPIRITO SANTO DO PINHA	DAEE	120	10.00	16.00	36.00	0.50	317306	7543352
ESPIRITO SANTO DO PINHA	DAEE	142	10.00	2.00	20.00	0.56	312817	7540191
ESPIRITO SANTO DO PINHA	DAEE	370	11.00	9.00	120.00	0.10	320008	7544983
MOJI GUACU	DAEE	157	60.00	6.00	60.00	1.11	309620	7534646
ITAPIRA	DAEE	81	3.00	40.00	60.00	0.15	309607	7512403
ITAPIRA	DAEE	35	12.00	9.00	9.00	1.33	312309	7513606
ITAPIRA	DAEE	115	9.00	10.00	70.00	0.15	310852	7518141
ITAPIRA	DAEE	80	6.00	0.00	52.00	0.12	310314	7517734
ITAPIRA	DAEE	180	5.00	28.00	100.00	0.07	313719	7519991
ITAPIRA	DAEE	200	5.00	2.00	127.00	0.04	314171	7520396
ITAPIRA	DAEE	120	14.00	3.00	3.00	4.66	319258	7515934
AGUAS DE LINDOIA	DAEE	100	2.00	12.00	70.00	0.03	332402	7514145
AGUAS DE LINDOIA	DAEE/1981	0	0.00	0.00	0.00	4.10	332242	7512801
SERRA NEGRA	DAEE/1981	0	0.00	0.00	0.00	1.70	322089	7495175
SERRA NEGRA	DAEE/1981	0	0.00	0.00	0.00	8.00	322387	7495572
AGUAS DE LINDOIA	Yoshinaga/1990	142	6.94	5.00	45.83	0.61	332450	7514500
AGUAS DE LINDOIA	Yoshinaga/1990	100	0.67	12.00	70.00	0.04	332400	7514150
AGUAS DE LINDOIA	Yoshinaga/1990	204	1.39	38.00	102.00	0.08	331500	7512900
AGUAS DE LINDOIA	Yoshinaga/1990	72	4.00	10.00	13.00	4.80	331950	7512450
LINDÓIA	Yoshinaga/1990	150	1.42	10.00	79.00	0.07	330850	7509950
LINDÓIA	Yoshinaga/1990	83	2.11	10.40	18.88	0.90	331350	7509850
LINDÓIA	Yoshinaga/1990	82	3.06	2.00	55.00	0.21	331300	7509250
LINDÓIA	Yoshinaga/1990	103	0.61	1.00	65.00	0.03	331450	7509450
LINDÓIA	Yoshinaga/1990	80	0.97	15.00	47.00	0.11	331250	7509200
LINDÓIA	Yoshinaga/1990	50	2.08	6.00	25.00	0.39	331300	7509350
LINDÓIA	Yoshinaga/1990	132	2.22	9.40	107.30	0.08	329250	7508350
LINDÓIA	Yoshinaga/1990	150	0.83	7.00	30.00	0.13	331150	7508100
LINDÓIA	Yoshinaga/1990	100	3.19	7.00	62.00	0.21	331650	7508250
LINDÓIA	Yoshinaga/1990	100	0.56	3.00	70.00	0.03	331550	7507900
LINDÓIA	Yoshinaga/1990	70	3.41	12.87	27.00	0.90	330750	7509650

MUNICIPIO	FONTE INFORMAÇÃO	PROF. (m)	VAZAO (m3/h)	NE (m)	ND (m)	CAP. ESP (m3/h/m)	X UTM	Y UTM
SERRA NEGRA	Trabalho de campo	150	6.00	0.00	7.50	0.80	321631	7496020
SERRA NEGRA	Trabalho de campo	152	2.40	0.00	85.00	0.03	327400	7498990
SERRA NEGRA	Trabalho de campo	234	2.66	0.00	149.35	0.02	327410	7498910
SERRA NEGRA	Trabalho de campo	252	2.48	0.00	189.35	0.01	327380	7499010
SERRA NEGRA	Trabalho de campo	300	1.00	0.00	160.20	0.01	327430	7498920

Poços Cadastrados - banco da dados 2 (usados na avaliação dos mapas de favorabilidade)

MUNICIPIO	FONTE INFORMAÇÃO	VAZÃO (m3/h)	NE (m)	ND (m)	REBAIX.(m)	CAP. ESP (m3/h/m)	X UTM	Y UTM
ÁGUAS DE LINDÓIA	Inst. Geológico	1.95	7.00	170.00	163.00	0.012	332570	7514150
ÁGUAS DE LINDÓIA	Inst. Geológico	8.90	5.70	67.00	61.30	0.145	337450	7516430
ÁGUAS DE LINDÓIA	Inst. Geológico	16.00	16.00	37.00	21.00	0.761	331710	7513240
ÁGUAS DE LINDÓIA	Inst. Geológico	12.00	13.50	44.00	30.50	0.393	333730	7513990
ÁGUAS DE LINDÓIA	Inst. Geológico	28.00	2.00	30.00	28.00	1.000	332700	7515050
ÁGUAS DE LINDÓIA	Inst. Geológico	9.00	2.00	18.00	16.00	0.562	332780	7515200
ÁGUAS DE LINDÓIA	Inst. Geológico	8.00	2.00	80.00	78.00	0.102	332210	7513810
ÁGUAS DE LINDÓIA	Inst. Geológico	40.00	14.07	33.49	19.42	2.059	331790	7513770
ÁGUAS DE LINDÓIA	Inst. Geológico	3.71	27.00	34.00	7.00	0.530	331600	7512860
ÁGUAS DE LINDÓIA	Inst. Geológico	13.87	9.91	13.30	3.39	4.091	332200	7512450
ÁGUAS DE LINDÓIA	Inst. Geológico	21.10	0.00	122.00	122.00	0.172	329330	7513270
ÁGUAS DE LINDÓIA	Inst. Geológico	0.79	25.00	60.00	35.00	0.022	334290	7515640
ÁGUAS DE LINDÓIA	Inst. Geológico	7.00	6.00	80.00	74.00	0.094	334290	7515550
ÁGUAS DE LINDÓIA	Inst. Geológico	1.50	18.00	72.00	54.00	0.027	331460	7512010
ÁGUAS DE LINDÓIA	Inst. Geológico	15.00	8.00	44.00	36.00	0.416	331550	7512160
ÁGUAS DE LINDÓIA	Inst. Geológico	3.10	20.29	62.93	42.64	0.072	331830	7513700
ÁGUAS DE LINDÓIA	Inst. Geológico	2.40	25.00	130.00	105.00	0.022	332930	7510110
ITAPIRA	Jundsondas	2.88	5.98	44.73	38.75	0.074	314420	7511080
ITAPIRA	Jundsondas	0.62	16.48	49.23	32.75	0.018	311470	7525470
ESPÍRITO SANTO DO PINHA	Jundsondas	4.50	0.00	126.85	126.00	0.036	320490	7542280
ÁGUAS DE LINDÓIA	Jundsondas	9.68	25.96	29.80	3.90	2.482	331690	7513660
ÁGUAS DE LINDÓIA	Jundsondas	14.40	22.61	126.39	103.78	0.135	334230	7515700
SERRA NEGRA	Jundsondas	6.55	2.10	109.28	107.18	0.061	333010	7499430
SERRA NEGRA	Jundsondas	0.02	73.85	176.46	102.61	0.000	320900	7498970
SERRA NEGRA	Jundsondas	5.54	10.85	35.11	24.26	0.228	319870	7497540
SERRA NEGRA	Jundsondas	4.24	71.28	139.15	67.87	0.062	324080	7501710
LINDÓIA	Minergeo	5.03	15.00	87.20	72.20	0.070	329369	7508640
LINDÓIA	Minergeo	9.00	44.00	104.13	60.13	0.149	329382	7508640

Fontes cadastradas

NOME DA FONTE	X_COORD	Y_COORD
Fonte São Carlos	325354.00000	7498699.00000
Fonte Santo Agostinho	325254.00000	7498894.00000
Fonte Santo Antonio	325477.00000	7498458.00000
Fonte N. S. Aparecida	321671.00000	7495961.00000
Fonte Santana e Santa Terezinha	321541.00000	7496077.00000
Fonte N. S. de Lourdes	322600.00000	7496198.00000
Estrada do Barroão	327396.00000	7496823.00000
Sítio São Rafael	327960.00000	7497276.00000
cafezal - Sítio São Rafael	327730.00000	7497322.00000
Fonte S. Francisco I, II III	327423.00000	7498859.00000
Fonte Santa Maria I e II	325164.00000	7494100.00000
nascente 04 (Fonte Santa Helena)	323281.00000	7495624.00000
nascente 03 (Fonte Santa Helena)	323382.00000	7495533.00000
nascente 02 (Fonte Santa Helena)	323613.00000	7495484.00000
nascente 01 (Fonte Santa Helena)	323635.00000	7495474.00000
Fonte Filomena	332842.00000	7513616.00000
Fonte Madame Curie	332854.00000	7513628.00000
Fonte São Roque	332795.00000	7513613.00000
Fonte São Luiz Gonzaga	334225.00000	7515677.00000
Fonte São Jorge	328529.00000	7507927.00000
Fonte Santa Rita	328523.00000	7507861.00000
Fonte José Cremasco	328609.00000	7507671.00000
Fonte Jatobá	331210.98000	7508040.94000
Fonte Jd. da Laje	329913.00000	7506095.00000
Fonte do Brejal	331500.00000	7514100.00000
Prefeitura	331950.00000	7514150.00000
Fonte do Sertãozinho	334050.00000	7514050.00000
Fonte Vida, n.4	331700.00000	7510300.00000
Fonte Vida, n.2	331450.00000	7509950.00000
Fonte da Pracinha	330200.00000	7509550.00000
N. S. das Brotas 1	330600.00000	7509600.00000
N. S. das Brotas 2	331050.00000	7509700.00000
Santa Bernadete	331350.00000	7509750.00000
Fonte da Estrada	331700.00000	7509500.00000
Fonte São Bernardo	328750.00000	7508750.00000
Fonte São Luis	331250.00000	7508900.00000
Fonte São Francisco	328250.00000	7508450.00000
N.S. das Brotas	329600.00000	7507350.00000
Santa Isabel	332060.90758	7512546.23048
São Sebastião	331712.49721	7512007.77808
São Benedito	331379.92367	7509236.33191
São Bento	342636.10122	7501176.01214
Pompéia	341519.31968	7502036.86458

ANEXO 2

Dados dos levantamentos geofísicos de eletrorresistividade

SEV 1 - Serra Negra

AB/2	MN/2	K	delta V/ / l	ro
1.5	0.5	6.28	107.3	674
2.0	0.5	11.78	68.50	807
3.0	0.5	27.49	39.5	1086
4.0	0.5	49.48	25.9	1282
5.0	0.5	77.75	18.1	1407
6.0	0.5	112.31	12.99	1459
8.0	0.5	200.28	7.86	1574
10.0	0.5	313.37	4.75	1489
13.0	0.5	530.14	2.35	1246
15.0	0.5	706.07	1.603	1132
20.0	0.5	1255.85	0.686	862
25.0	2.0	487.73	1.383	706
30.0	2.0	703.72	0.768	571
40.0	2.0	1253.50	0.302	410
50.0	2.0	1960.35	0.176	376
60.0	2.0	2824.29	0.135	412
80.0	2.0	5023.41	0.0908	487
100.0	2.0	7850.84	0.07	581
130.0	2.0	13270.09	0.048	668
150.0	2.0	17668.32	0.038	702
200.0	2.0	31472.78	0.026	849

coord. x	coord. y
323037	7496542

SEV 2 - Serra Negra

AB/2	MN/2	K	delta V/ / l	ro
1.5	0.5	6.28	3610	22682
2.0	0.5	11.78	2010	23680
3.0	0.5	27.49	886	24355
4.0	0.5	49.48	499	24691
5.0	0.5	77.75	329	25581
6.0	0.5	112.31	234	26281
8.0	0.5	200.28	133.2	26677
10.0	0.5	313.37	86.4	27076
13.0	0.5	530.14	59.7	31650

coord. x	coord. y
327647	7497377

SEV 1 - Lindóia

AB/2	MN/2	K	$\Delta V / I$	$\rho (\Omega.m)$
1.5	0.5	6.28	78	490
2.0	0.5	11.78	41.50	489
3.0	0.5	27.49	21.2	583
4.0	0.5	49.48	13.78	682
5.0	0.5	77.75	9.51	739
6.0	0.5	112.31	6.83	767
8.0	0.5	200.28	3.95	791
10.0	0.5	313.37	2.46	771
13.0	0.5	530.14	1.35	716
15.0	0.5	706.07	1.009	712
20.0	0.5	1255.85	0.52	653
25.0	2.0	487.73	0.833	736
30.0	2.0	703.72	0.577	736
40.0	2.0	1253.50	0.338	754
50.0	2.0	1960.35	0.242	804
60.0	2.0	2824.29	0.182	844
80.0	2.0	5023.41	0.126	963
100.0	2.0	7850.84	0.103	1139
130.0	2.0	13270.09	0.083	1431
150.0	2.0	17668.32	0.066	1490

coord. x	coord. y
329356	7508743

SEV 2 - Lindóia

AB/2	MN/2	K	delta V / I	ro
1.5	0.5	6.28	70.3	442
2.0	0.5	11.78	27.10	319
3.0	0.5	27.49	7.42	204
4.0	0.5	49.48	3.61	179
5.0	0.5	77.75	2.17	169
6.0	0.5	112.31	1.508	169
8.0	0.5	200.28	0.886	177
10.0	0.5	313.37	0.587	184
13.0	0.5	530.14	0.351	186
15.0	0.5	706.07	0.257	181
20.0	0.5	1255.85	0.154	193
25.0	0.5	1962.71	0.183	359
25.0	2.0	487.73	0.59	360
30.0	2.0	703.72	0.504	427
40.0	2.0	1253.50	0.5	595

coord. x	coord. y
329137	7508670

Caminhamento elétrico 1 - Serra Negra

A	B	M	N	delta V / I	K	ro ap
0	30	60	90	0.231	565	131
		90	120	0.004	2262	9
		120	150	0.008	5655	45
		150	180	0.0027	11310	31
		180	210	0.0192	19792	380
30	60	90	120	0.834	565	471
		120	150	0.292	2262	661
		150	180	0.1043	5655	590
		180	210	0.0397	11310	449
		210	240	0.0146	19792	289
60	90	120	150	0.676	565	382
		150	180	0.1892	2262	428
		180	210	0.0798	5655	451
		210	240	0.0419	11310	474
		240	270	0.0162	19792	321
90	120	150	180	0.316	565	179
		180	210	0.1013	2262	229
		210	240	0.0457	5655	258
		240	270	0.0165	11310	187
		270	300	0.009	19792	178
120	150	180	210	0.321	565	181
		210	240	0.1004	2262	227
		240	270	0.031	5655	175
		270	300	0.0159	11310	180
		300	330	0.0098	19792	194
150	180	210	240	0.378	565	214
		240	270	0.0771	2262	174
		270	300	0.0321	5655	182
		300	330	0.0159	11310	180
		330	360	0.0082	19792	162
180	210	240	270	0.356	565	201
		270	300	0.1149	2262	260
		300	330	0.0464	5655	262
		330	360	0.0191	11310	216
		360	390	0.0149	19792	295
210	240	270	300	0.403	565	228
		300	330	0.1088	2262	246
		330	360	0.039	5655	221
		360	390	0.0246	11310	278
		390	420	0.0137	19792	271
240	270	300	330	0.367	565	207
		330	360	0.0801	2262	181
		360	390	0.0426	5655	241
		390	420	0.021	11310	238
		420	450	0.0171	19792	338
270	300	330	360	0.32	565	181
		360	390	0.0943	2262	213
		390	420	0.0399	5655	226
		420	450	0.0291	11310	329
		450	480	0.01165	19792	231
300	330	360	390	0.261	565	147
		390	420	0.0815	2262	184
		420	450	0.0497	5655	281
		450	480	0.01941	11310	220
		480	510	0.01448	19792	287
330	360	390	420	0.256	565	145
		420	450	0.108	2262	244
		450	480	0.0344	5655	195
		480	510	0.0221	11310	250
		510	540	0.01146	19792	227

estacas	coord x	coord y
0	323284	7497509
30	323286	7497477
60	323289	7497452
90	323271	7497421
120	323264	7497388
150	323257	7497363
180	323247	7497333
210	323240	7497303
240	323232	7497273
270	323225	7497240
300	323203	7497246
330	323201	7497215
360	323200	7497187
390	323193	7497155
420	323186	7497129
450	323180	7497105
480	323176	7497082
510	323170	7497046
540	323160	7497014
570	323162	7496988
600	323157	7496953
630	323142	7496930
660	323134	7496897
690	323119	7496868
720	323114	7496838
750	323110	7496808
780	323096	7496783
810	323092	7496753
840	323084	7496722
870	323077	7496693
900	323063	7496667
930	323061	7496638
960	323043	7496602
990	323040	7496580
1020	323040	7496549
1050	323039	7496514
1080	323026	7496492
1110	323015	7496461
1140	323010	7496436
1170	323002	7496405
1200	322992	7496376
1230	322985	7496348
1260	322973	7496317
1290	322968	7496296
1320	322952	7496266
1350	322938	7496240
1380	322917	7496217
1410	322897	7496198
1440	322872	7496177
1470	322851	7496161
1500	322827	7496140
1530	322802	7496124
1560	322778	7496106
1590	322756	7496083
1620	322732	7496069

A	B	M	N	delta V / I	K	ro ap
360	390	420	450	0.381	565	215
		450	480	0.0947	2262	214
		480	510	0.0544	5655	308
		510	540	0.0235	11310	266
		540	570	0.0108	19792	214
390	420	450	480	0.912	565	515
		480	510	0.0758	2262	171
		510	540	0.0302	5655	171
		540	570	0.01119	11310	127
		570	600	0.00777	19792	154
420	450	480	510	0.303	565	171
		510	540	0.0886	2262	200
		540	570	0.0276	5655	156
		570	600	0.01737	11310	196
		600	630	0.00984	19792	195
450	480	510	540	0.295	565	167
		540	570	0.0582	2262	132
		570	600	0.032	5655	181
		600	630	0.01602	11310	181
		630	660	0.00739	19792	146
480	510	540	570	0.226	565	128
		570	600	0.0883	2262	200
		600	630	0.0372	5655	210
		630	660	0.01581	11310	179
		660	690	0.01491	19792	295
510	540	570	600	0.243	565	137
		600	630	0.059	2262	133
		630	660	0.0219	5655	124
		660	690	0.01717	11310	194
		690	720	0.0144	19792	285
540	570	600	630	0.264	565	149
		630	660	0.0542	2262	123
		660	690	0.0302	5655	171
		690	720	0.01946	11310	220
		720	750	0.00813	19792	161
570	600	630	660	0.268	565	151
		660	690	0.0872	2262	197
		690	720	0.0488	5655	276
		720	750	0.01879	11310	213
		750	780	0.01559	19792	309
600	630	660	690	0.261	565	147
		690	720	0.0839	2262	190
		720	750	0.0266	5655	150
		750	780	0.01951	11310	221
		780	810	0.0127	19792	251
630	660	690	720	0.245	565	138
		720	750	0.0414	2262	94
		750	780	0.025	5655	141
		780	810	0.0149	11310	169
		810	840	0.0059	19792	117
660	690	720	750	0.266	565	150
		750	780	0.0764	2262	173
		780	810	0.0398	5655	225
		810	840	0.0141	11310	159
		840	870	0.01358	19792	269
690	720	750	780	0.293	565	166
		780	810	0.0876	2262	198
		810	840	0.0255	5655	144
		840	870	0.0218	11310	247
		870	900	0.0108	19792	214

A	B	M	N	delta V / I	K	ro ap
720	750	780	810	0.63	565	356
		810	840	0.0619	2262	140
		840	870	0.0373	5655	211
		870	900	0.01921	11310	217
		900	930	0.00912	19792	181
750	780	810	840	0.485	565	274
		840	870	0.1566	2262	354
		870	900	0.0591	5655	334
		900	930	0.0233	11310	264
		930	960	0.0066	19792	131
780	810	840	870	0.229	565	129
		870	900	0.1285	2262	291
		900	930	0.0326	5655	184
		930	960	0.0088	11310	100
		960	990	0.0131	19792	259
810	840	870	900	0.537	565	303
		900	930	0.0496	2262	112
		930	960	0.0124	5655	70
		960	990	0.0138	11310	156
		990	1020	0.0127	19792	251
840	870	900	930	0.327	565	185
		930	960	0.0525	2262	119
		960	990	0.0478	5655	270
		990	1020	0.0404	11310	457
		1020	1050	0.0249	19792	493
870	900	930	960	0.1937	565	109
		960	990	0.0781	2262	177
		990	1020	0.0565	5655	320
		1020	1050	0.0311	11310	352
		1050	1080	0.01774	19792	351
900	930	960	990	0.361	565	204
		990	1020	0.0768	2262	174
		1020	1050	0.0558	5655	316
		1050	1080	0.0127	11310	144
		1080	1110	0.0162	19792	321
930	960	990	1020	0.568	565	321
		1020	1050	0.1013	2262	229
		1050	1080	0.0418	5655	236
		1080	1110	0.028	11310	317
		1110	1140	0.0216	19792	428
960	990	1020	1050	0.718	565	406
		1050	1080	0.0997	2262	226
		1080	1110	0.0605	5655	342
		1110	1140	0.0333	11310	377
		1140	1170	0.027	19792	534
990	1020	1050	1080	0.575	565	325
		1080	1110	0.1714	2262	388
		1110	1140	0.0783	5655	443
		1140	1170	0.054	11310	611
		1170	1200	0.025	19792	495
1020	1050	1080	1110	0.425	565	240
		1110	1140	0.214	2262	484
		1140	1170	0.0806	5655	456
		1170	1200	0.0365	11310	413
		1200	1230	0.0478	19792	946
1050	1080	1110	1140	0.326	565	184
		1140	1170	0.189	2262	428
		1170	1200	0.0792	5655	448
		1200	1230	0.0499	11310	564
1080	1110	1140	1170	0.449	565	254
		1170	1200	0.1675	2262	379
		1200	1230	0.1165	5655	659

A	B	M	N	delta V / l	K	ro ap
1110	1140	1170	1200	0.486	565	275
		1200	1230	0.228	2262	516
1140	1170	1200	1230	1.022	565	577

Caminhamento elétrico 2 - Serra Negra

A	B	M	N	delta V / l	K	ro ap
0	30	60	90	1.059	565	598
		90	120	0.1721	2262	389
		120	150	0.0445	5655	252
		150	180	0.03	11310	339
		180	210	0.0275	19792	544
30	60	90	120	1.15	565	650
		120	150	0.1664	2262	376
		150	180	0.074	5655	418
		180	210	0.0534	11310	604
		210	240	0.0352	19792	697
60	90	120	150	0.741	565	419
		150	180	0.202	2262	457
		180	210	0.1112	5655	629
		210	240	0.0654	11310	740
		240	270	0.0414	19792	819
90	120	150	180	0.713	565	403
		180	210	0.243	2262	550
		210	240	0.102	5655	577
		240	270	0.0608	11310	688
		270	300	0.0303	19792	600
120	150	180	210	0.501	565	283
		210	240	0.1218	2262	276
		240	270	0.0511	5655	289
		270	300	0.0214	11310	242
		300	330	0.0229	19792	453
150	180	210	240	0.712	565	402
		240	270	0.1619	2262	366
		270	300	0.046	5655	260
		300	330	0.03	11310	339
		330	360	0.019	19792	376
180	210	240	270	1.085	565	613
		270	300	0.1407	2262	318
		300	330	0.0629	5655	356
		330	360	0.031	11310	351
		360	390	0.017	19792	336
210	240	270	300	0.848	565	479
		300	330	0.1324	2262	299
		330	360	0.0514	5655	291
		360	390	0.0256	11310	290
		390	420	0.018	19792	356
240	270	300	330	0.523	565	295
		330	360	0.1127	2262	255
		360	390	0.04	5655	226
		390	420	0.0247	11310	279
		420	450	0.0174	19792	344

estacas	coord x	coord y
0	322610	7495922
30	322522	7495909
60	322494	7495893
90	322480	7495868
120	322459	7495843
150	322444	7495822
180	322426	7495796
210	322413	7495770
240	322396	7495743
270	322379	7495713
300	322375	7495683
330	322350	7495630
360	322341	7495604
390	322328	7495579
420	322317	7495551
450	322309	7495521

A	B	M	N	delta V / I	K	ro ap
270	300	330	360	0.489	565	276
		360	390	0.0937	2262	212
		390	420	0.0477	5655	270
		420	450	0.0242	11310	274
		450	480	0.0202	19792	400
300	330	360	390	0.49	565	277
		390	420	0.1235	2262	279
		420	450	0.0473	5655	267
		450	480	0.0396	11310	448
330	360	390	420	0.496	565	280
		420	450	0.0764	2262	173
		450	480	0.047	5655	266
360	390	420	450	0.403	565	228
		450	480	0.0834	2262	189
390	420	450	480	0.768	565	434

Caminhamento elétrico 3 - Serra Negra

A	B	M	N	delta V / I	K	ro ap
0	30	60	90	16	565	9040
		90	120	2.9	2262	6560
		120	150	1.52	5655	8596
		150	180	0.187	11310	2115
		180	210	0.18	19792	3563
30	60	90	120	24.6	565	13899
		120	150	12.46	2262	28185
		150	180	4.94	5655	27936
		180	210	4.16	11310	47050
		210	240	3.68	19792	72835
60	90	120	150	52.3	565	29550
		150	180	10.2	2262	23072
		180	210	8.43	5655	47672
		210	240	5.96	11310	67408
		240	270	6.3	19792	124690
90	120	150	180	17.83	565	10074
		180	210	8.23	2262	18616
		210	240	4.96	5655	28049
		240	270	3.71	11310	41960
		270	300	2.05	19792	40574
120	150	180	210	29.5	565	16668
		210	240	6.92	2262	15653
		240	270	6.15	5655	34778
		270	300	1.79	11310	20245
		300	330	1.967	19792	38931
150	180	210	240	42.7	565	24126
		240	270	10.9	2262	24656
		270	300	4.95	5655	27992
		300	330	1.903	11310	21523
		330	360	1.818	19792	35982
180	210	240	270	54.5	565	30793
		270	300	13.67	2262	30922
		300	330	4.89	5655	27653
		330	360	0.556	11310	6288
		360	390	2.28	19792	45126

estacas	coord x	coord y
0	327664	7497638
30	327663	7497636
60	327633	7497678
90	327620	7497658
120	327613	7497628
150	327611	7497598
180	327590	7497573
210	327574	7497552
240	327559	7497529
270	327444	7497464
300	327536	7497476
330	327512	7497448
360	327495	7497428
390	327482	7497399
420	327469	7497373
450	327461	7497349
480	327446	7497317
510	327432	7497295
540	327419	7497266
570	327407	7497242
600	327392	7497214
630	327377	7497188
660	327366	7497161
690	327343	7497139
720	327320	7497120

A	B	M	N	delta V / l	K	ro ap
210	240	270	300	55.3	565	31245
		300	330	10.19	2262	23050
		330	360	5.08	5655	28727
		360	390	2.73	11310	30876
		390	420	2.12	19792	41959
240	270	300	330	45.8	565	25877
		330	360	11.42	2262	25832
		360	390	4.95	5655	27992
		390	420	2.96	11310	33478
		420	450	2.25	19792	44532
270	300	330	360	58.1	565	32827
		360	390	16.96	2262	38364
		390	420	9.27	5655	52422
		420	450	4.91	11310	55532
		450	480	3.49	19792	69074
300	330	360	390	47.7	565	26951
		390	420	17.7	2262	40037
		420	450	8.06	5655	45579
		450	480	4.89	11310	55306
		480	510	2.13	19792	42157
330	360	390	420	66.8	565	37742
		420	450	20.8	2262	47050
		450	480	10.95	5655	61922
		480	510	4.02	11310	45466
		510	540	3.73	19792	73824
360	390	420	450	61.7	565	34861
		450	480	22.8	2262	51574
		480	510	7.15	5655	40433
		510	540	5.89	11310	66616
		540	570	3.84	19792	76001
390	420	450	480	68.9	565	38929
		480	510	16.33	2262	36938
		510	540	11.16	5655	63110
		540	570	6.5	11310	73515
		570	600	3.78	19792	74814
420	450	480	510	46.3	565	26160
		510	540	22	2262	49764
		540	570	12.56	5655	71027
		570	600	5.05	11310	57116
		600	630	3.93	19792	77783
450	480	510	540	76.6	565	43279
		540	570	32.7	2262	73967
		570	600	12.13	5655	68595
		600	630	7.88	11310	89123
		630	660	3.38	19792	66897
480	510	540	570	54.8	565	30962
		570	600	15.43	2262	34903
		600	630	8.14	5655	46032
		630	660	3.06	11310	34609
		660	690	1.47	19792	29094
510	540	570	600	80.7	565	45596
		600	630	27.5	2262	62205
		630	660	11.04	5655	62431
		660	690	3.77	11310	42639
		690	720	2.1	19792	41563

A	B	M	N	delta V / l	K	ro ap
540	570	600	630	93.6	565	52884
		630	660	22.4	2262	50669
		660	690	8.85	5655	50047
		690	720	3.63	11310	41055
570	600	630	660	68.7	565	38816
		660	690	16.36	2262	37006
		690	720	6.79	5655	38397
600	630	660	690	61.9	565	34974
		690	720	16	2262	36192
630	660	690	720	50.5	565	28533

Caminhamento elétrico 1 - Lindóia

A	B	M	N	delta V / l	K	ro ap
0	30	60	90	2.43	565	1373
		90	120	0.387	2262	875
		120	150	0.242	5655	1369
		150	180	0.183	11310	2070
		180	210	0.0812	19792	1607
30	60	90	120	1.603	565	906
		120	150	0.83	2262	1877
		150	180	0.473	5655	2675
		180	210	0.208	11310	2352
		210	240	0.1525	19792	3018
60	90	120	150	0.992	565	560
		150	180	0.343	2262	776
		180	210	0.1444	5655	817
		210	240	0.0436	11310	493
		240	270	0.02	19792	396
90	120	150	180	1.496	565	845
		180	210	0.498	2262	1126
		210	240	0.0807	5655	456
		240	270	0.0372	11310	421
		270	300	0.0266	19792	526
120	150	180	210	2.05	565	1158
		210	240	0.321	2262	726
		240	270	0.0725	5655	410
		270	300	0.0495	11310	560
		300	330	0.0446	19792	883
150	180	210	240	0.592	565	334
		240	270	0.0965	2262	218
		270	300	0.0588	5655	333
		300	330	0.0562	11310	636
		330	360	0.065	19792	1286
180	210	240	270	0.32	565	181
		270	300	0.0838	2262	190
		300	330	0.0572	5655	323
		330	360	0.0586	11310	663
		360	390	0.0413	19792	817
210	240	270	300	0.406	565	229
		300	330	0.1076	2262	243
		330	360	0.0691	5655	391
		360	390	0.0448	11310	507
		390	420	0.0299	19792	592

Estacas	x	y
0	328677	7508840
30	328704	7508831
60	328734	7508820
90	328766	7508814
120	328788	7508802
150	328820	7508795
180	328844	7508789
210	328867	7508776
240	328902	7508779
270	328937	7508771
300	328959	7508767
330	328994	7508758
360	329025	7508754
390	329057	7508752
420	329085	7508751
450	329114	7508750
480	329143	7508752
510	329172	7508755
540	329204	7508758
570	329236	7508756
600	329262	7508756
630	329294	7508760
660	329325	7508761
690	329356	7508761
720	329382	7508760
750	329412	7508762
780	329443	7508766
810	329476	7508756
840	329506	7508748
870	329533	7508742
900	329563	7508731
930	329590	7508722
960	329617	7508712
990	329646	7508703
1020	329676	7508696
1050	329704	7508683
1080	329732	7508673
1110	329766	7508670

A	B	M	N	delta V / I	K	ro ap
240	270	300	330	0.255	565	144
		330	360	0.1119	2262	253
		360	390	0.0646	5655	365
		390	420	0.038	11310	430
		420	450	0.01837	19792	364
270	300	330	360	0.465	565	263
		360	390	0.1407	2262	318
		390	420	0.0752	5655	425
		420	450	0.0378	11310	428
		450	480	0.0298	19792	590
300	330	360	390	0.333	565	188
		390	420	0.1216	2262	275
		420	450	0.0502	5655	284
		450	480	0.0402	11310	455
		480	510	0.0382	19792	756
330	360	390	420	0.321	565	181
		420	450	0.0965	2262	218
		450	480	0.0662	5655	374
		480	510	0.0573	11310	648
		510	540	0.0329	19792	651
360	390	420	450	0.257	565	145
		450	480	0.1144	2262	259
		480	510	0.0817	5655	462
		510	540	0.0442	11310	500
		540	570	0.0361	19792	714
390	420	450	480	0.353	565	199
		480	510	0.1522	2262	344
		510	540	0.0667	5655	377
		540	570	0.0454	11310	513
		570	600	0.0261	19792	517
420	450	480	510	0.328	565	185
		510	540	0.0987	2262	223
		540	570	0.0542	5655	307
		570	600	0.0268	11310	303
		600	630	0.01935	19792	383
450	480	510	540	0.358	565	202
		540	570	0.1271	2262	288
		570	600	0.0498	5655	282
		600	630	0.0326	11310	369
		630	660	0.0308	19792	610
480	510	540	570	0.42	565	237
		570	600	0.1257	2262	284
		600	630	0.0683	5655	386
		630	660	0.0559	11310	632
		660	690	0.0365	19792	722
510	540	570	600	0.278	565	157
		600	630	0.1082	2262	245
		630	660	0.0766	5655	433
		660	690	0.0497	11310	562
		690	720	0.0419	19792	829
540	570	600	630	0.279	565	158
		630	660	0.1395	2262	316
		660	690	0.0711	5655	402
		690	720	0.0547	11310	619
		720	750	0.0541	19792	1071

A	B	M	N	delta V / I	K	ro ap
570	600	630	660	0.326	565	184
		660	690	0.1081	2262	245
		690	720	0.074	5655	418
		720	750	0.0557	11310	630
		750	780	0.0332	19792	657
600	630	660	690	0.461	565	260
		690	720	0.1498	2262	339
		720	750	0.0986	5655	558
		750	780	0.047	11310	532
		780	810	0.0295	19792	584
630	660	690	720	0.697	565	394
		720	750	0.275	2262	622
		750	780	0.1088	5655	615
		780	810	0.0679	11310	768
		810	840	0.0422	19792	835
660	690	720	750	0.867	565	490
		750	780	0.216	2262	489
		780	810	0.1101	5655	623
		810	840	0.0366	11310	414
		840	870	0.0679	19792	1344
690	720	750	780	1.029	565	581
		780	810	0.31	2262	701
		810	840	0.1532	5655	866
		840	870	0.1425	11310	1612
		870	900	0.0547	19792	1083
720	750	780	810	0.841	565	475
		810	840	0.302	2262	683
		840	870	0.263	5655	1487
		870	900	0.0933	11310	1055
		900	930	0.0295	19792	584
750	780	810	840	0.584	565	330
		840	870	0.386	2262	873
		870	900	0.1021	5655	577
		900	930	0.0373	11310	422
		930	960	0.0295	19792	584
780	810	840	870	1.173	565	663
		870	900	0.283	2262	640
		900	930	0.0808	5655	457
		930	960	0.0418	11310	473
		960	990	0.0219	19792	433
810	840	870	900	1.194	565	675
		900	930	0.217	2262	491
		930	960	0.0876	5655	495
		960	990	0.0472	11310	534
		990	1020	0.032	19792	633
840	870	900	930	1.434	565	810
		930	960	0.384	2262	869
		960	990	0.1974	5655	1116
		990	1020	0.126	11310	1425
		1020	1050	0.229	19792	4532
870	900	930	960	0.497	565	281
		960	990	0.1798	2262	407
		990	1020	0.108	5655	611
		1020	1050	0.1783	11310	2017
		1050	1080	0.0038	19792	75

A	B	M	N	delta V / I	K	ro ap
900	930	960	990	0.422	565	238
		990	1020	0.152	2262	344
		1020	1050	0.1591	5655	900
		1050	1080	0.0112	11310	127
		1080	1110	0.0361	19792	714
930	960	990	1020	0.39	565	220
		1020	1050	0.306	2262	692
		1050	1080	0.016	5655	90
		1080	1110	0.0453	11310	512
960	990	1020	1050	0.894	565	505
		1050	1080	0.015	2262	34
		1080	1110	0.0674	5655	381
990	1020	1050	1080	0.433	565	245
		1080	1110	0.08	2262	181
1020	1050	1080	1110	0.44	565	249

Caminhamento elétrico 2 - Lindóia

A	B	M	N	delta V / I	K	ro ap
0	30	60	90	1.087	565	614
		90	120	0.643	2262	1454
		120	150	0.41	5655	2319
		150	180	0.14	11310	1583
		180	210	0.15	19792	2969
30	60	90	120	1.392	565	786
		120	150	0.228	2262	516
		150	180	0.0955	5655	540
		180	210	0.0974	11310	1102
		210	240	0.098	19792	1940
60	90	120	150	0.404	565	228
		150	180	0.142	2262	321
		180	210	0.063	5655	356
		210	240	0.0648	11310	733
		240	270	0.0906	19792	1793
90	120	150	180	0.1097	565	62
		180	210	0.375	2262	848
		210	240	0.157	5655	888
		240	270	0.0631	11310	714
		270	300	0.055	19792	1089
120	150	180	210	0.565	565	319
		210	240	0.283	2262	640
		240	270	0.1875	5655	1060
		270	300	0.0678	11310	767
		300	330	0.0391	19792	774
150	180	210	240	1.068	565	603
		240	270	0.442	2262	1000
		270	300	0.1436	5655	812
		300	330	0.0774	11310	875
		330	360	0.0361	19792	714
180	210	240	270	3.48	565	1966
		270	300	0.808	2262	1828
		300	330	0.386	5655	2183
		330	360	0.1742	11310	1970
		360	390	0.0882	19792	1746

Estacas	x	y
0	329544	7508514
30	329521	7508526
60	329493	7508532
90	329451	7508537
120	329435	7508574
150	329421	7508577
180	329390	7508578
210	329363	7508573
240	329335	7508572
270	329309	7508588
300	329284	7508602
330	329259	7508622
360	329234	7508637
390	329211	7508655
420	329191	7508670
450	329160	7508675
480	329132	7508663
510	329107	7508655
540	329085	7508661
570	329048	7508666
600	329021	7508676
630	328991	7508679

A	B	M	N	delta V / I	K	ro ap
210	240	270	300	2.67	565	1509
		300	330	1.097	2262	2481
		330	360	0.41	5655	2319
		360	390	0.211	11310	2386
		390	420	0.1151	19792	2278
240	270	300	330	2.51	565	1418
		330	360	0.712	2262	1611
		360	390	0.343	5655	1940
		390	420	0.1675	11310	1894
		420	450	0.0858	19792	1698
270	300	330	360	1.269	565	717
		360	390	0.497	2262	1124
		390	420	0.218	5655	1233
		420	450	0.093	11310	1052
		450	480	0.0244	19792	483
300	330	360	390	1.079	565	610
		390	420	0.357	2262	808
		420	450	0.1296	5655	733
		450	480	0.0355	11310	402
		480	510	0.0348	19792	689
330	360	390	420	1.169	565	660
		420	450	0.29	2262	656
		450	480	0.0629	5655	356
		480	510	0.0489	11310	553
		510	540	0.0306	19792	606
360	390	420	450	1.29	565	729
		450	480	0.1672	2262	378
		480	510	0.1127	5655	637
		510	540	0.0612	11310	692
		540	570	0.0443	19792	877
390	420	450	480	0.602	565	340
		480	510	0.204	2262	461
		510	540	0.0986	5655	558
		540	570	0.115	11310	1301
		570	600	0.0304	19792	602
420	450	480	510	0.627	565	354
		510	540	0.206	2262	466
		540	570	0.1503	5655	850
		570	600	0.072	11310	814
		600	630	0.0423	19792	837
450	480	510	540	0.414	565	234
		540	570	0.0764	2262	173
		570	600	0.1901	5655	1075
		600	630	0.0454	11310	513
480	510	540	570	0.768	565	434
		570	600	0.068	2262	154
		600	630	0.0984	5655	556
510	540	570	600	0.315	565	178
		600	630	0.1424	2262	322
540	570	600	630	0.499	565	282

Caminhamento elétrico 3 - Lindóia

A	B	M	N	delta V / I	K	ro ap
0	30	60	90	2.2	565	1243
		90	120	1.043	2262	2359
		120	150	0.509	5655	2878
		150	180	0.335	11310	3789
		180	210	0.1332	19792	2636
30	60	90	120	3.56	565	2011
		120	150	1.308	2262	2959
		150	180	0.524	5655	2963
		180	210	0.286	11310	3235
		210	240	0.1953	19792	3865
60	90	120	150	2.92	565	1650
		150	180	0.852	2262	1927
		180	210	0.386	5655	2183
		210	240	0.244	11310	2760
		240	270	0.1795	19792	3553
90	120	150	180	2.45	565	1384
		180	210	0.768	2262	1737
		210	240	0.406	5655	2296
		240	270	0.273	11310	3088
		270	300	0.1864	19792	3689
120	150	180	210	1.57	565	887
		210	240	0.576	2262	1303
		240	270	0.336	5655	1900
		270	300	0.21	11310	2375
		300	330	0.204	19792	4038
150	180	210	240	1.032	565	583
		240	270	0.394	2262	891
		270	300	0.228	5655	1289
		300	330	0.1915	11310	2166
		330	360	0.1351	19792	2674
180	210	240	270	0.832	565	470
		270	300	0.347	2262	785
		300	330	0.261	5655	1476
		330	360	0.1672	11310	1891
		360	390	0.0983	19792	1946
210	240	270	300	0.766	565	433
		300	330	0.405	2262	916
		330	360	0.242	5655	1369
		360	390	0.1333	11310	1508
		390	420	0.1068	19792	2114
240	270	300	330	0.971	565	549
		330	360	0.425	2262	961
		360	390	0.1988	5655	1124
		390	420	0.1444	11310	1633
		420	450	0.1374	19792	2719
270	300	330	360	1.037	565	586
		360	390	0.371	2262	839
		390	420	0.317	5655	1793
		420	450	0.277	11310	3133
		450	480	0.126	19792	2494

Estacas	x	y
0	328251	7507933
30	328274	7507951
60	328296	7507972
90	328316	7507995
120	328339	7508010
150	328365	7508030
180	328389	7508045
210	328415	7508056
240	328442	7508067
270	328468	7508081
300	328496	7508093
330	328522	7508105
360	328547	7508117
390	328572	7508131
420	328600	7508145
450	328626	7508159
480	328653	7508172
510	328686	7508178
540	328711	7508171
570	328734	7508155
600	328764	7508149
630	328793	7508146
660	328824	7508150
690	328848	7508166
720	328864	7508190
750	328883	7508214
780	328896	7508238
810	328917	7508260
840	328936	7508286
870	328958	7508302
900	328987	7508317
930	329012	7508328
960	329039	7508340
990	329066	7508353
1020	329090	7508368
1050	329114	7508391
1080	329136	7508403
1110	329158	7508418
1140	329187	7508435
1170	329209	7508451
1200	329234	7508466
1230	329265	7508473
1260	329292	7508480
1290	329320	7508496
1320	329343	7508512

A	B	M	N	delta V / I	K	ro ap
300	330	360	390	1.091	565	616
		390	420	0.607	2262	1373
		420	450	0.497	5655	2811
		450	480	0.311	11310	3517
		480	510	0.108	19792	2138
330	360	390	420	1.397	565	789
		420	450	0.827	2262	1871
		450	480	0.498	5655	2816
		480	510	0.16	11310	1810
		510	540	0.165	19792	3266
360	390	420	450	1.474	565	833
		450	480	0.721	2262	1631
		480	510	0.209	5655	1182
		510	540	0.202	11310	2285
		540	570	0.085	19792	1682
390	420	450	480	2.19	565	1237
		480	510	0.5	2262	1131
		510	540	0.342	5655	1934
		540	570	0.157	11310	1776
		570	600	0.0926	19792	1833
420	450	480	510	1.79	565	1011
		510	540	1.105	2262	2500
		540	570	0.413	5655	2336
		570	600	0.1906	11310	2156
		600	630	0.1412	19792	2795
450	480	510	540	2.59	565	1463
		540	570	0.714	2262	1615
		570	600	0.285	5655	1612
		600	630	0.1423	11310	1609
		630	660	0.1173	19792	2322
480	510	540	570	2.57	565	1452
		570	600	0.544	2262	1231
		600	630	0.256	5655	1448
		630	660	0.1307	11310	1478
		660	690	0.11	19792	2177
510	540	570	600	1.757	565	993
		600	630	0.653	2262	1477
		630	660	0.277	5655	1566
		660	690	0.248	11310	2805
		690	720	0.0554	19792	1096
540	570	600	630	1.322	565	747
		630	660	0.34	2262	769
		660	690	0.221	5655	1250
		690	720	0.0806	11310	912
		720	750	0.0234	19792	463
570	600	630	660	2.01	565	1136
		660	690	0.609	2262	1378
		690	720	0.1811	5655	1024
		720	750	0.0764	11310	864
		750	780	0.037	19792	732
600	630	660	690	1.74	565	983
		690	720	0.446	2262	1009
		720	750	0.1604	5655	907
		750	780	0.0653	11310	739
		780	810	0.0468	19792	926

A	B	M	N	delta V / I	K	ro ap
630	660	690	720	2.29	565	1294
		720	750	0.526	2262	1190
		750	780	0.1432	5655	810
		780	810	0.0985	11310	1114
		810	840	0.0294	19792	582
660	690	720	750	1.341	565	758
		750	780	0.0481	2262	109
		780	810	0.0693	5655	392
		810	840	0.0307	11310	347
		840	870	0.137	19792	2712
690	720	750	780	1.469	565	830
		780	810	0.436	2262	986
		810	840	0.0821	5655	464
		840	870	0.01671	11310	189
		870	900	0.0507	19792	1003
720	750	780	810	4	565	2260
		810	840	0.463	2262	1047
		840	870	0.1224	5655	692
		870	900	0.0279	11310	316
		900	930	0.0363	19792	718
750	780	810	840	1.665	565	941
		840	870	0.29	2262	656
		870	900	0.0367	5655	208
		900	930	0.0377	11310	426
		930	960	0.01872	19792	371
780	810	840	870	1.238	565	699
		870	900	0.099	2262	224
		900	930	0.0638	5655	361
		930	960	0.02	11310	226
		960	990	0.0262	19792	519
810	840	870	900	0.351	565	198
		900	930	0.1512	2262	342
		930	960	0.0507	5655	287
		960	990	0.0436	11310	493
		990	1020	0.0244	19792	483
840	870	900	930	0.44	565	249
		930	960	0.111	2262	251
		960	990	0.0527	5655	298
		990	1020	0.0135	11310	153
		1020	1050	0.00766	19792	152
870	900	930	960	1.046	565	591
		960	990	0.409	2262	925
		990	1020	0.1245	5655	704
		1020	1050	0.0891	11310	1008
		1050	1080	0.0577	19792	1142
900	930	960	990	1.928	565	1089
		990	1020	0.432	2262	977
		1020	1050	0.269	5655	1521
		1050	1080	0.1638	11310	1853
		1080	1110	0.108	19792	2138
930	960	990	1020	1.126	565	636
		1020	1050	0.417	2262	943
		1050	1080	0.212	5655	1199
		1080	1110	0.1245	11310	1408
		1110	1140	0.0824	19792	1631

A	B	M	N	delta V / I	K	ro ap
960	990	1020	1050	1.401	565	792
		1050	1080	0.47	2262	1063
		1080	1110	0.229	5655	1295
		1110	1140	0.1292	11310	1461
		1140	1170	0.1111	19792	2199
990	1020	1050	1080	1.239	565	700
		1080	1110	0.323	2262	731
		1110	1140	0.1386	5655	784
		1140	1170	0.0939	11310	1062
		1170	1200	0.07	19792	1385
1020	1050	1080	1110	1.073	565	606
		1110	1140	0.245	2262	554
		1140	1170	0.1368	5655	774
		1170	1200	0.09	11310	1018
		1200	1230	0.0889	19792	1760
1050	1080	1110	1140	0.746	565	421
		1140	1170	0.231	2262	523
		1170	1200	0.117	5655	662
		1200	1230	0.0972	11310	1099
		1230	1260	0.0633	19792	1253
1080	1110	1140	1170	0.621	565	351
		1170	1200	0.1879	2262	425
		1200	1230	0.128	5655	724
		1230	1260	0.0752	11310	851
		1260	1290	0.0697	19792	1380
1110	1140	1170	1200	0.614	565	347
		1200	1230	0.205	2262	464
		1230	1260	0.1086	5655	614
		1260	1290	0.0867	11310	981
		1290	1320	0.0747	19792	1478
1140	1170	1200	1230	0.795	565	449
		1230	1260	0.261	2262	590
		1260	1290	0.1792	5655	1013
		1290	1320	0.1475	11310	1668
1170	1200	1230	1260	0.684	565	386
		1260	1290	0.298	2262	674
		1290	1320	0.209	5655	1182
1200	1230	1260	1290	1.141	565	645
		1290	1320	0.433	2262	979
1230	1260	1290	1320	0.9	565	509