LILIAN CHAVEZ-KUS

ANÁLISE DA TECTÔNICA RÚPTIL EM ROCHAS DO EMBASAMENTO DA BACIA DE CURITIBA COM VISTAS À DETERMINAÇÃO DE ÁREAS FAVORÁVEIS À EXPLORAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Geologia Exploratória, Curso de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador:
Prof. Dr. Eduardo Salamuni (UFPR)

Co-orientador:
Prof. Dr. Sidnei Pires Rostirolla (UFPR)

CURITIBA
2003

TERMO DE APROVAÇÃO

Lílian Chavez

"ANALISE DA TECTÔNICA RÚPTIL EM ROCHAS DO EMBASAMENTO DA BACIA DE CURITIBA COM VISTAS À DETERMINAÇÃO DE ÁREAS FAVORÁVEIS À EXPLORAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA".

Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Exploratória, da Universidade Federal do Paraná, Comissão formada por:

Curitiba, 22 de Abril de 2003.

Professor Doutor Norberto Morales - UNESP

Professor Doutor Alberto Pio Fiori - UFPR

Professor Doutor Eduardo Salamuni - UFPR
Presidente

A profunda alegria do coração é como uma bússola
a indicar o caminho da vida. É preciso segui-la,
mesmo que se entre numa trilha repleta de
dificuldades.

(Madre Teresa)

AGRADECIMENTOS

Muitas foram as pessoas que de alguma forma estiveram presentes durante a elaboração deste trabalho. Algumas estiveram diretamente ligadas ao meu aprendizado e outras foram pessoas queridas que me deram apoio e motivação. Como disse um colega "é na peneira dos pequenos detalhes que se conhecem as pessoas mais preciosas". Acredito que todos ao nosso redor estão sempre de alguma forma interagindo constantemente em nossos caminhos. Às vezes de forma muito sutil, mas mesmo assim provocando movimento e transformação.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu pai Mario, minha mãe Luiza, meu irmão Anderson e minha irmã Eliane, família da qual me orgulho por pertencer. Pessoas especiais e participativas que sempre me incentivaram dando completo apoio. Sem a amizade e energia destes entes queridos talvez o meu crescimento não tivesse sido o mesmo.

Ainda com relação a minha família quero mencionar meu marido Günter Kus, amigo geólogo e grande companheiro de vida que tanto me ajudou em todos os sentidos, inclusive profissional, sempre abrindo caminhos e lutando para que ambos possamos crescer juntos, obrigado. Sou grato também aos meus sogros Peter e Lydia, pessoas encantadoras. O meu agradecimento também vai para Bárbara e Stefan.

Agradeço em especial ao meu orientador o Prof. Dr. Eduardo Salamuni pelas discussões e diálogos enriquecedores com os quais tenho aprendido desde a época da graduação e muito mais ainda nestes últimos dois anos. É uma imensa satisfação tê-lo como mestre e também amigo. Não posso deixar de citar o Prof. Dr. Riad Salamuni (*in memorian*), precursor de idéias, inclusive o tema deste mestrado. Embora o professor Riad já tenha feito a sua "viajem", fica aqui neste mundo as suas inúmeras contribuições e nosso respeito por ele.

Ao meu co-orientador o Prof. Dr. Sidnei P. Rostirolla agradeço pelas trocas de idéias e sugestões sempre positivas. O meu reconhecimento também vai aos professores doutores Alberto Pio Fiori e Paulo C. Soares, assim como aos demais professores e colegas da geologia na UFPR também sou grata pela convivência no dia a dia e troca de informações. Na Alemanha fico grata por ter sido tão bem acolhida pelo Prof. Dr. Bernd Lammerer (Department of Earth- and Environmental Sciences, Section Geology, LMU - Ludwig Maximilians Universität München).

Sou extremamente grata ao Prof. Paulo Justiniano pelo incontável auxílio e orientação durante as análises geoestatísticas.

Aos meus colegas de grupo agradeço pela convivência tranqüila e muitas vezes divertida. Aos meus queridos amigos Christoph Jaster e Elaine Bonacim, pessoas importantes que mesmo a distância se mantém sempre presentes, mantendo o laço com a terra natal.

Agradeço em geral a todas as pessoas que me auxiliaram dentre elas, Eliane M. Stroparo, Milena Xavier Martins e Sarita Pavin.

O meu sincero agradecimento também vai as construtoras de poços artesianos Acquasul, Hidropel, Kupersul e Perfugel pela cooperação mostrada ao cederem gentilmente informações que possibilitaram algumas das análises realizadas. Também sou grata ao Departamento e Coordenação do Curso de Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Enfim agradeço a todos aqueles que acreditam em uma existência em comum e lutam para que a educação não seja privilégio de poucos, mas sim de toda uma nação.

SUMÁRIO

ÍNDICE I

LISTA DE FIGURAS V

LISTA DE FOTOS XV

LISTA DE ABREVIATURAS XIX

RESUMO XX

ABSTRACT XXII

1 INTRODUÇÃO 01

2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS 06

3 METODOS E MATERIAIS DE TRABALHO 08

4 CONTEXTO GEOLÓGICO GERAL 20

5 CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO 35

6 DESENVOLVIMENTO DAS INFORMAÇÕES BASE 46

7 ANÁLISE MORFOMÉTRICA/MORFOESTRUTURAL DAS DRENAGENS 52

8 ANÁLISE ESTRUTURAL DO EMBASAMENTO DA BACIA DE CURITIBA 61

9 CRUZAMENTO DOS DADOS E ANÁLISES EM AMBIENTE DE SIG 109

10 ANÁLISE ESTATÍSTICA 144

11 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA 170

12 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES 204

REFERÊNCIAS 208

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 Considerações iniciais 1

1.2 Estado da arte 2

1.3 Localização da área e vias de acesso 3

1.4 Articulação das cartas topográficas do Município de Curitiba 5

2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS 6

2.1 Objetivos gerais 6

2.2 Objetivos específicos 6

3 MÉTODOS E MATERIAIS DE TRABALHO 8

3.1 Considerações gerais 8

3.1.1 Análise estrutural 11

3.1.2 Análise de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) 12

3.1.3 Análise através da Modelagem Geoestatística 13

3.2 Aquisição dos dados base pertinentes a área de pesquisa 16

3.3 Desenvolvimento das informações base 16

3.4 Equipamentos, materiais e instrumentos utilizados 17

3.5 Recursos operacionais 18

4 CONTEXTO GEOLÓGICO GERAL 20

4.1 Aspectos regionais 20

4.2 Aspectos estruturais 26

4.3 Origem e tectônica da bacia e do embasamento 27

4.4 Evolução geotectônica da Bacia de Curitiba e sua relação com água subterrânea 28

4.5 Geomorfologia 31
4.5.1 Considerações gerais 31

5 CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO 35
5.1 Tipos litológicos observados no município de Curitiba 35
5.1.1 Embasamento *35*
5.1.2 Rochas metassedimentares 37
5.1.3 Intrusivas Básicas (diques) *38*
5.1.4 Formação Guabirotuba *39*
5.1.5 Depósitos aluvionares *42*
5.2 Aqüíferos no município de Curitiba e região metropolitana 42

6 DESENVOLVIMENTO DAS INFORMAÇÕES BASE 46
6.1 Base de dados em ambiente de SIG (Sistema de Informações Geográficas) 46
6.2 Aquisição e estrutura dos dados base 48
6.3 Cadastro de poços tubulares profundos 49
6.4 Ambiente de SIG e poços tubulares profundos 50

7 ANÁLISE MORFOMÉTRICA/MORFOESTRUTURAL DAS DRENAGENS 52

8 ANÁLISE ESTRUTURAL DAS ROCHAS DO EMBASAMENTO DA BACIA DE CURITIBA 61
8.1 Generalidades 61
8.2 Análises estruturais rúpteis 61
8.2.1 Caracterização dos dados estruturais em cada ponto *61*
8.2.2 Análise em conjunto das famílias de fraturas existentes *97*
8.3 Análise dos campos de tensão 98
8.3.1 Aspectos iniciais *98*
8.3.2 Considerações teóricas e sínteses gerais *99*
8.4 Diagramas estruturais obtidos com a solução dos tensores 102

9 CRUZAMENTO DOS DADOS E ANÁLISE EM AMBIENTE DE SIG 109
9.1 Modelo Digital de Relevo (MDR) 109
9.2 Confiabilidade no traçado de lineamentos de relevo a partir de um modelo simulado 114
9.3 Critérios observados no traçado de lineamentos a partir de drenagens 115
9.4 Análise de conectividade de fraturas 116
9.5 Lineamentos de relevo traçados a partir do MDR 117
9.6 Lineamentos traçados a partir de anomalias e alinhamentos de drenagens 123
9.7 Cruzamento dos dados estruturais obtidos em campo com os lineamentos do MDR e lineações de drenagens 128
9.8 Considerações gerais 142

10 ANÁLISE ESTATÍSTICA 144
10.1 Introdução 144
10.2 Objetivos 144
10.3 Estrutura e análise dos dados 146
10.3.1 Variável Categoria (tipos de usos) 148
10.3.2 Variável Vazão (m³/h) 152
10.3.1 Variável Profundidade (m) 155
10.3.4 Variável data (ano) 156
10.3.5 Variável nível dinâmico (ND) e nível estático (NE) 157
10.3.6 Variável entrada d'água (EA) 159
10.3.7 Variável divisão regional de Curitiba 162
10.4 Discussões dos resultados 166

11 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA 170
11.1 Introdução 170
11.1.1 Passos para a modelagem geoestatística 170
11.1.2 Parâmetros de um semivariograma próximo do Ideal 171
11.2 Leitura dos dados no formato "geodata" e verificação de tendências no aqüífero fraturado da bacia 173

11.2.1 Distribuição da variável vazão e valor do parâmetro de transformação (lambda) *176*
11.2.2 Variograma empírico omnidirecional *177*
11.2.3 Teste de correlação espacial para a variável vazão *181*
11.2.4 Variogramas direcionais *183*
11.3 Escolha do Modelo (base conceitual adotada) 184
11.3.1 Estimativa dos parâmetros iniciais do modelo *186*
11.3.2 Cálculo da "Máximo Verossimilhança" *187*
11.4 Validação cruzada *("Cross validation")* 191
11.5 Estimativa da variável vazão no município de Curitiba 195
11.6 Interpretação dos resultados geoestatisticos 199

12 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES 204

REFERÊNCIAS 208

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Localização da área de estudo, em cinza, mostrando os limites geográficos do município de Curitiba e parte da região metropolitana (modificado de SALAMUNI, 1998), pg. 03.

Figura 1.2: Os pontos representam os afloramentos visitados na área de estudo (polígono em azul). Em vermelho podem ser observadas as principais rodovias que cruzam a cidade e em cinza é mostrado o sistema viário do município. Como ponto de referência foi plotado (em verde claro) a área referente ao terreno do Centro Politécnico (UFPR), pg. 04.

Figura 1.3: Mosaico ilustrando a articulação das cartas topográficas (em cinza), na escala 1:20.000 adquiridas da COMEC, que incorporam a área de estudo. Como pontos de referência foram acrescentados em vermelho o limite do município de Curitiba e em azul as principais drenagens, pg. 05.

Figura 3.1: Fluxograma mostrando o desenvolvimento do trabalho, pg. 09.

Figura 3.2: Fluxograma ilustrando os métodos de análise adotados, o processamento das informações e os resultados esperados, pg. 10.

Figura 4.1: Mapa geológico da Bacia de Curitiba e arredores (mod. SALAMUNI, 1998), pg. 25.

Figura 4.2: Mapa de localização das principais bacias tafrogênicas do sudeste e sul do Brasil, relacionadas ao "Rift da Serra do Mar" (mod. SCHOBBENHAUS et al. 1984 e SALAMUNI, 1998), pg. 29.

Figura 4.3: Sistemas geomorfológicos interpretados a partir de imagem digital gerada através de dados planialtimétricos de cartas na escala 1:50.000 da região de Curitiba. O contorno em azul mostra os limites da cidade (mod. de SALAMUNI, 1998), pg. 34.

Figura 5.1: Exemplos de poços perfurados no centro da cidade com valores de vazões acima de $5m^3/h$, pg. 44.

Figura 5.2: O quadro **"A"** mostra a distribuição geral dos poços tubulares profundos na área. No quadro **"B"** foram sobrepostos ao MDR alguns poços com as maiores vazões obtidas dentro do município de Curitiba; Em azul escuro foi plotado a divisão regional da área de acordo com IPPUC (*op.cit*), pg. 45.

Figura 6.1: Estrutura base do banco de dados criado nesta dissertação, pg. 46.

Figura 6.2: Quadro mostrando exemplo de poços tubulares profundos em ambiente de SIG e sua ligação com uma tabela de atributos contendo informações hidrogeológicas e geológicas diversas, pg. 51.

Figura 7.1: Quadro ilustrando a seqüência (rotina computacional) seguida dentro do *software* ARCVIEW 3.2® para gerar as drenagens automáticas a partir do MDR, pg. 53.

Figura 7.2: (a) Mapa de drenagens gerado no trabalho de SALAMUNI (1998), (b) mapa de drenagens gerado automaticamente a partir do MDR e (c) mapa de drenagens gerado pelo cruzamento dos dois planos de informação anteriores citados. Em vermelho foi delimitado o contorno da cidade de Curitiba, enquanto que os círculos em verde mostram alguns exemplos de problemas ocorridos em "A" e "B", pg. 54.

Figura 7.3: Padrão de drenagem em treliça, pg. 57.

Figura 7.4: Em vermelho foram delimitadas as zonas homólogas sobre o (MDR) e em azul as drenagens da região. Os números indicam respectivamente as áreas com: (1) padrão de treliça, (2a) padrão sub-dendrítico (menor densidade de drenagem), (2b) padrão sub-dendrítico (maior densidade de drenagem) e (3) padrão retangular, pg. 59.

Figura 7.5: No quadro "A" pode ser observado o limite das zonas homólogas (em vermelho) delimitando as drenagens (em azul). Os números representam o tipo de padrão de drenagem de acordo com a referência ao lado. No quadro "B" pode ser observado os contornos das zonas homólogas sobre as litologias da área, pg. 60.

Figura 8.1: Diagramas estruturais para o ponto 01 (Pedreira desativada do parque Tanguá), pg. 62.

Figura 8.2: No local (pedreira Tanguá) as relações entre as diferentes famílias de fraturas foram traçadas em folha de transparência diretamente sobre o afloramento. A direção dos planos N20-30E parece ter movimentação anti-horária e as estruturas N-S e N10W movimentação horária, pg. 65.

Figura 8.3: Desenho feito em folha de transparência diretamente sobre o afloramento (pedreira Tanguá). A rocha apresenta faixas bem catacladas, com comunição mineral. As direções N-S e N10-30E são as mais marcantes, pg. 66.

Figura 8.4: Desenho feito em folha de transparência diretamente sobre o afloramento (pedreira Tanguá). A direção N20-35E é a mais marcante, pg. 67.

Figura 8.5: Diagramas estruturais para o ponto 02 (afloramento nas imediações do parque Tingui), pg. 68.

Figura 8.6: Diagramas estruturais para o ponto 04 (afloramento na beira da estrada, CIC), pg. 69.

Figura 8.7: Diagramas estruturais para o ponto 05 (afloramento na beira da estrada, CIC), pg. 69.

Figura 8.8: Diagramas estruturais para o ponto 06 (afloramento na beira da estrada, CIC), pg. 70.

Figura 8.9: Diagramas estruturais para o ponto 08 (afloramento na beira da estrada, CIC), pg.71.

Figura 8.10: Diagramas estruturais para o ponto 10 (limite sul de Curitiba com o município Fazenda do Rio Grande), pg. 72.

Figura 8.11: Diagramas estruturais para o ponto 12 (pedreira Transemrra, bairro Cascatinha), pg. 72-73.

Figura 8.12: Diagramas estruturais para o ponto 16 (pedreira Transemrra, bairro Cascatinha), pg. 74.

Figura 8.13: Diagramas estruturais para o ponto 17 (afloramento próximo a fábrica de papel Trombini S.A., bairro Cascatinha), pg. 75.

Figura 8.14: Diagramas estruturais para o ponto 18 (bairro Santa Felicidade), pg. 75.

Figura 8.15: Diagramas estruturais para o ponto 18 (afloramento em frente ao Restaurante Cascatinha, bairro Santa Felicidade), pg. 76.

Figura 8.16: Diagramas estruturais para o ponto 20 (afloramento atrás do restaurante Cascatinha, bairro Santa Felicidade), pg. 77.

Figura 8.17: Desenho feito em folha de transparência diretamente sobre o afloramento. Pelo deslocamento do bandamento gnáissico é indicado movimentação anti-horária tanto paras as direções dos planos das falhas N-S quanto para as direções N30-40E, pg. 78.

Figura 8.18: Mais um detalhe do afloramento atrás do restaurante Cascatinha mostrando deslocamento do bandamento gnáissico mostrando movimentação anti-horária para os planos das falhas N-S e N30-40E, pg. 79.
Figura 8.19: Diagramas estruturais para o ponto 22 (pedreira Roça Grande, limite norte com município de Colombo), pg. 80.
Figura 8.20: Diagramas estruturais para o ponto 23 (pedreira Paulo Leminsky, bairro Tingui), pg. 81-82.
Figura 8.21: O desenho feito diretamente sobre o afloramento (pedreira Paulo Leminsnky), mostra as relações entre alguns planos de fraturas observados na área. As direções N-S e N05-30E são bem marcantes e parecem configurar um padrão sistemático, pg. 83.
Figura 8.22: Diagramas estruturais para o ponto 24 (pedreira do Atuba, bairro Atuba), pg. 84.
Figura 8.23: Diagramas estruturais para o ponto 25 (pedreira Pussoli, bairro Butiatuvinha), pg. 84-85.
Figura 8.24: Diagramas estruturais para o ponto 26 (pedreira Maringá, limite entre o município de Campo Largo e os bairros de Butiatuvinha e Orleans), pg. 86.
Figura 8.25: (letras "A" e "B"): Possíveis ajustes dos campos de tensão na Bacia de Curitiba, tendo como base a análise das drenagens de primeira ordem, portanto as mais recentes (segundo SALAMUNI, 1998), pg. 101.
Figura 8.26: Determinação dos campos de tensão para o ponto 01, pg. 103.
Figura 8.27: Determinação dos campos de tensão para o ponto 06, pg. 104.
Figura 8.28: Determinação dos campos de tensão para so pontos 12 e 16, pg. 104.
Figura 8.29: Determinação dos campos de tensão para o ponto 20, pg. 104.
Figura 8.30: Determinação dos campos de tensão para o ponto 22, pg. 105.
Figura 8.31: Determinação dos campos de tensão para o ponto 23, pg. 105.
Figura 8.32: Determinação dos campos de tensão para o ponto 25, pg. 105.
Figura 8.33: Determinação dos campos de tensão para o ponto 26, pg. 106.
Figura 8.34: Determinação dos campos de tensão para os pontos 06, 12, 16 e 20, pg. 106.
Figura 8.35: Visão geral dos campos de tensões calculados para cada ponto de afloramento, sobrepostos sobre o MDR da área. Os diagramas contendo as isolinhas mostram a determinação dos esforços tectônicos utilizando o método dos

diedros retos, enquanto que os símbolos indicam os tensores calculados pelo método de TURNER (1953), pg. 108.

Figura 9.1: A seqüência "a, b e c" mostra as etapas seguidas até a geração do *grid* final, pg. 110.

Figura 9.2: Mapa geológico, pontos de afloramentos e divisão regional (IPPUC) sobrepostos ao MDR gerado com o *software* ARCVIEW 3.2®, pg. 112.

Figura 9.3: Mapa geológico e divisão administrativa da área (em branco) sobrepostos ao MDR gerado com o *software* ARCVIEW 3.2®, pg. 113.

Figura 9.4: Anomalia em "V" ou em candelabro, pg. 115.

Figura 9.5: Traçado de todos os lineamentos de relevo a partir do MDR tendo como base além do MDR, o mapa de lineamentos elaborado por SALAMUNI (1998) onde constam falhas e fraturas observadas em fotos aéreas e em campo, pg. 118.

Figura 9.6: Traçado sobre o MDR de lineamentos de relevo (em azul) nos altos e baixos topográficos de orientação N-W, utilizando iluminação no azimute 135 e exagero vertical de 10 vezes, pg. 1196.

Figura 9.7: Os traços em vermelho representam os lineamentos de relevo de orientação E-W determinados sobre MDR a partir de altos e baixos topográficos (iluminação no azimute 315 e 10 vezes de exagero vertical), pg. 120.

Figura 9.8: Traçado de lineamentos de relevo (em azul) de orientação NE sobre o MDR tendo como base os altos e baixos topográficos (iluminação no azimute 270 e 10 vezes de exagero vertical), pg. 121.

Figura 9.9: A partir de altos e baixos topográficos foram traçados os lineamentos de relevo (em vermelho) de orientação N-S sobre o MDR (iluminação no azimute 90 e 10 vezes de exagero vertical), pg. 122.

Figura 9.10: Nesta figura é mostrado o traçado de todos os lineamentos estruturais (em vermelho) a partir das lineações de drenagens. Como referência foi utilizado também o MDR da área e o mapa de lineações de drenagem elaborado por SALAMUNI (1998), pg. 124.

Figura 9.11: Na direção NW as lineações de drenagens parecem estar fortemente desenvolvidas segundo uma orientação em torno de N45W (em azul). Um segundo padrão de lineações (em vermelho), também muito marcante, parece obedecer a direção de N20-25W, pg. 125.

Figura 9.12: As lineações de relevo de direção em torno de EW foram traçadas em azul e os de direção próxima a N-S em vermelho, pg. 126.

Figura 9.13: Na figura acima: em azul foram traçadas as lineações de drenagem de direções em torno de N20E; em vermelho foram representadas, as lineações, no intervalo de N45-50E; e em verde um terceiro padrão que se aproxima mais da direção N65E, pg. 127.

Figura 9.14: Em vermelho foram digitalizadas as direções médias dos planos das falhas observados em campo no ponto 02. As linhas em branco representam os lineamentos traçados a partir do MDR. Verifica-se que as direções das falhas coincidem com padrões dos lineamentos maiores traçados sobre o MDR, pg. 129.

Figuras 9.15: Sobreposição das rosetas de freqüência (em azul) mostrando o cruzamento das direções das falhas medidas em campo nos pontos efetivamente tectonizados, sobre os lineamentos (em verde) traçados a partir do MDR, pg. 130.

Figuras 9.16: Sobreposição das rosetas de freqüências (em vermelho) obtidas com o programa STEREONETT v. 2.46 mostrando o cruzamento das direções das fraturas, observadas em campo nos pontos efetivamente tectonizados, sobre os lineamentos (em verde) traçados a partir do MDR, pg. 131.

Figura 9.17: Cruzamento dos planos médios das falhas de direção NE (em azul escuro) observadas em campo, com os lineamentos do MDR (em azul claro). Sobre a imagem foi acrescentada a representação do modelo de RIEDEL (1929), pg. 133.

Figura 9.18: Cruzamento dos planos médios das falhas de direção N-S e EW (em azul escuro) observadas em campo, com os lineamentos do MDR (em verde e azul claro). Sobre a imagem foi acrescentada a representação do modelo de RIEDEL (1929), pg. 134.

Figura 9.19: Cruzamento dos planos médios das falhas de direção NW (em azul escuro) observadas em campo, com os lineamentos do MDR (em azul claro), pg. 135.

Figura 9.20: Cruzamento dos planos médios das fraturas de direção NE (em verde) observadas em campo, com os lineamentos do MDR (em azul), pg. 136.

Figura 9.21: Cruzamento dos planos médios das falhas de direção N-S e EW (traços mais espessos em verde) observados em campo, com os lineamentos do MDR (traços mais finos em verde e azul claro), pg. 137.

Figura 9.22: Cruzamento dos planos médios das falhas de direção NW (em verde) observadas em campo, com os lineamentos do MDR (em azul), pg. 138.
Figura 9.23: Cruzamento dos planos médios observados em campo de falhas (em vermelho) e fraturas (em azul) de direção N15-20W e N15-25E com as lineações de drenagens (em branco), pg. 139.
Figura 9.24: Cruzamento dos planos médios observados em campo de falhas (em vermelho) e fraturas (em azul) de direção N-S e EW com as lineações de drenagens (em branco), pg. 140.
Figura 9.25: Cruzamento dos planos médios observados em campo de falhas (em vermelho) e fraturas (em azul) de direção NW e NE com as lineações de drenagens (em branco), pg. 141.
Figura 10.1: Gráfico de setores em círculos mostrando a distribuição de uso dos poços tubulares profundos na cidade de Curitiba, pg. 149.
Figura 10.2: Gráfico trivariante mostrando a relação entre o uso e número de poços em um intervalo de tempo definido, pg. 149.
Figura 10.3: O gráfico trivariante ilustra os principais tipos de usos de poços tubulares de acordo com a divisão regional da área, pg. 150.
Figura 10.4: Divisão regional do município de Curitiba de acordo com IPPUC (2001). Os pontos amarelos representam pelo menos 700 poços tubulares na área, pg. 151.
Figura 10.5: Gráfico *boxplot* para a variável vazão dos poços tubulares de Curitiba, pg. 152.
Figura 10.6: Histograma em barras dos valores originais ilustrando a média de vazão de acordo com intervalos definidos desta variável, pg. 153.
Figura 10.7: Gráfico do tipo em pizza mostrando em % cinco intervalos de classes com a variável vazão. Para o teste foram utilizados o total de 798 poços, pg. 153.
Figura 10.8: Cruzamento de pelo menos 700 poços tubulares profundos de Curitiba com o mapa de lineamentos de relevo da área, pg. 154.
Figura 10.9: Teste em caixa (*boxplot*) ilustrando a profundidade média dos poços tubulares perfurados no município de Curitiba, pg. 155.
Figura 10.10: Histograma bidimensional ilustrando a distribuição dos poços tubulares de acordo com suas respectivas profundidades, pg. 155.

Figura 10.11: Histograma bidimensional mostrando a curva de crescimento de freqüência acumulada dos poços tubulares profundos perfurados na cidade de Curitiba entre os anos de 1950 até 2001, pg. 156.
Figura 10.12: Histograma de barras ilustrando a distribuição dos poços tubulares versus período (em anos), pg. 157.
Figura 10.13: Teste em caixa ilustrando a profundidade média do nível dinâmico após ocorrer bombeamento sistemático do poço, pg. 158.
Figura 10.14: Teste em caixa (*boxplot*) ilustrando a profundidade média do nível estático. Para esta análise foram considerados 624 casos válidos, pg. 158.
Figura 10.15: Histograma ilustrando a média do nível estático dos poços tubulares pré-bombeamento, pg. 159.
Figura 10.16: Teste em caixa ilustrando a média geral dos valores das entradas d'água (EA), pg. 159.
Figura 10.17: Histograma mostrando distribuição da variável entrada d'água do tipo lognormal, pg. 160.
Figura 10.18: Gráfico de distribuição de probabilidade usando coeficiente do tipo lognormal para a variável entrada d'água (EA), pg. 160.
Figura 10.19: Gráfico do tipo *scatterplot* junto com histograma mostrando uma correlação positiva entre as variáveis entrada d'água e profundidade, pg. 161.
Figura 10.20: Médias dos valores das entradas d'água versus profundidades mostrando uma correlação positiva entre ambas as variáveis, pg. 162.
Figura 10.21: Teste em caixa (*boxplot*) mostrando as médias das vazões de acordo com as regiões em que os poços tubulares profundos foram perfurados na cidade, pg. 163.
Figura 10.22: Teste *boxplot* para variável profundidade versus as divisões administrativas do município, pg. 164.
Figura 10.23: Teste *boxplot* para a variável hidrogeológica nível dinâmico versus a divisão regional do município, pg. 164.
Figura 10.24: Teste *boxplot* para a variável hidrogeológica nível estático versus a divisão regional do município, pg. 165.
Figura 10.25: Gráfico do tipo *boxplot* cruzando a variável entrada d'água com as divisões regionais de Curitiba (IPPUC, *op.cit.*), pg. 166.
Figura 11.1: Variograma empírico com características próximas do ideal, pg. 172.

Figura 11.2: (A) distribuição da variável vazão na cidade Curitiba; (B) e (C) comportamento da variável segundo as coordenadas X e Y; (D) gráfico do tipo *scatterplot3D*, pg. 174.

Figura 11.3: Sumário contendo informações estatísticas básicas a respeito das variáveis vazão e profundidade no município de Curitiba, pg. 175.

Figura 11.4: (A) histograma dos valores originais dos dados de vazão; (B) histograma dos valores transformados (Log); (C) teste *boxcox* para achar o valor de lambda (0,2); (D) gráfico *boxplot* indicando o valor médio da vazão em torno de 1,7 m^3/h (Log), ou 4,8 m^3/h (valor não transformado), pg. 176.

Figura 11.5 (A e B): (A) representação do conjunto de dados da variável vazão sem o ponto anômalo no teste do tipo *boxplot;* (B) teste boxcox para recalcular o parâmetro lambda, pg. 177.

Figura 11.6 (A e B): (A) variograma omnidirecional dos dados transformados da variável vazão, com distância máxima de **h** de 10 km e tolerância 90° (*software* geoR); (B) utilizando distância máxima de 5 km, pg. 178.

Figura 11.7: Comportamento do variograma omnidirecional de nuvens (*cloud*) para a variável vazão, no município de Curitiba, segundo o qual não ocorre tendência, pg. 179.

Figura 11.8: Teste em caixa para ilustrar a diferença entre estimador "clássico" e "modulus". O estimador "modulus" é menos influenciado por valores extremos, pg. 180.

Figura 11.9: Teste mostrando variograma empírico para a variável vazão, na cidade de Curitiba, com distância máxima de 3 km aplicando em (A) o estimador "classico" e em (B) "modulus" , pg. 180.

Figura 11.10: Exemplo teórico de teste de variograma envelope (mod. JUSTIANIANO, P., 1999), pg. 181.

Figura 11.11: (A) e (B): (A) Variograma envelope com distância máxima de 5 km e (B) teste com (h) de 3 km, pg. 182.

Figura 11.12: Os variogramas (A, B, C e D) mostram, cada um, quatro direções para investigar a correlação da variável vazão, pg. 183.

Figura 11.13: Ajuste dos parâmetros da curva: (a) **"a olho",** (b) mínimo dos quadrados pela função ***variofit*** e (c) pelo princípio da **"Máximo Verossimilhança",** função ***likfit***, pg. 186.

Figura 11.14: Ajuste do variograma testando os modelos de Matern, Esférico e Gaussiano através da função variofit, pg. 187.

Figura 11.15: Parâmetros da função *likfit* usados para ajustar o modelo ao variograma, pg. 188.

Figura 11.16: Sumário contendo os resultados obtidos durante o cálculo realizado pela função *likfit* para estimar os parâmetros do modelo que melhor se ajustaram ao variograma (*software* geoR) , pg. 189.

Figura 11.17: Validação cruzada para o modelo escolhido usando a função *likfit* (Máximo Verossimilhança) para ajustar o variograma empírico de direção 0^{o}, distância máxima de 3km, *nugget* igual 0.45 e tolerância de 23^{o}, pg. 192.

Figura 11.18: Gráfico simplificado mostrando as estimativas com a propriedade de "*conditional unbiasedness",* onde para qualquer alcance da estimativa os valores positivos e negativos funcionam como uma balança e o erro médio tem valor de zero, pg. 194.

Figura 11.19: Os histogramas das letras "A", "B" e "C" ilustram a performance de um modelo tendo como base os parâmetros calculados pela função *variofit* (mínimo dos quadrados), pg. 195.

Figura 11.20: Mapa de krigagem para a variável vazão. As cores mais quentes indicam a predição nos locais com as vazões mais altas enquanto que as cores mais frias correspondem aos valores mais baixos na estimativa. Os pontos verdes representam pelo menos 495 poços tubulares no município de Curitiba, pg. 197.

Figura 11.21: Lineamentos de relevo sobrepostos ao mapa de krigagem para a variável vazão. As cores mais quentes indicam os locais com as vazões mais altas enquanto que as cores mais frias correspondem aos valores mais baixos na estimativa. Os pontos verdes representam pelo menos 495 poços tubulares no município de Curitiba, pg. 198.

Figura 11.22: Mapa de krigagem para o erro padrão na estimativa da variável vazão. As cores mais quentes indicam a predição nos locais com as vazões mais altas enquanto que as cores mais frias correspondem aos valores mais baixos na estimativa. Os pontos verdes representam pelo menos 495 poços tubulares no município de Curitiba, pg. 200.

LISTA DE FOTOS

FOTOS DO CAPÍTULO 5:

Foto 5.1: Dique deslocado por falha normal de rejeito decimétrico, pg. 38.
Foto 5.2: Dique espesso de aproximadamente 18 m de largura cortando as rochas do embasamento pg. 38.
Foto 5.3: Depósito de caliche depositado em meio as outras seqüências sedimentares da Formação pg. 39.
Foto 5.4: Nível apresentando processo intenso de laterização formando concentrações de ferro (indicadas pela seta azul) pg. 40.
Foto 5.5: Nível contendo seixos e clastos desde 1 cm até 30 cm de largura (cascalheira) pg. 41.
Foto 5.6: Nível melhor selecionado contendo seixos e clastos com até 15 cm de largura e pouca argila em meio a matriz pg. 41.

FOTOS DO CAPÍTULO 08

Prancha 8.1 (pg. 88)**:**

Foto 01: Padrão conjugado (em "X") de fraturas oblíquas em rochas do embasamento. O plano indicado em amarelo desloca dique de diabásio.
Foto 02: Planos de falhas transcorrentes se cruzando. A direção N-S (movimento horário) corta direção N30E (anti-horária). As setas indicam porções da rocha onde ocorre ultracataclasito.

Foto 03: Planos de fratura oblíquos (N75E/44NW), segundo os quais o cisalhamento rúptil é intenso.
Foto 04: Falha inversa (N10W/52NE) cortando os sedimentos da Formação Guabirotuba.
Foto 05: Pequenas dobras do tipo *shear folds* indicando cisalhamento rúptil-dúctil.
Foto 06: Sistema de fraturas onde também foi medido falha transcorrente no plano N18W/76NE.

Prancha 8.2 (pg. 89)**:**

Foto 07: Aspecto de espelho de falha (direção de linhas em azul indicadas pelas setas em vermelho) gerado por sistema de falha transcorrente com orientação N3W/70NE e movimentação anti-horária. A movimentação cinemática foi verificada através de estrias e degraus no azimute N354/10.
Foto 08: Os planos correspondentes ao sistema transcorrente neste local são abertos, lisos havendo percolação de água.

Prancha 8.3 (pg. 90)**:**

Foto 09 e 10: Sistema de falhas transcorrentes onde a movimentação cinemática foi indicada pelo deslocamento do bandamento gnáissico. Ambas as direções apresentam movimentação anti-horária.
Foto 11 e 12: Mais um detalhe deste sistema transcorrente cortando o bandamento gnáissico. Na foto 11 é indicado o rejeito decimétrico da falha.

Prancha 8.4 (pg. 91)**:**

Foto 13: Estruturas subhorizontais de grande porte (favoráveis para água subterrânea).
Foto 14: Aspecto de sistema de fraturas e falhas transcorrentes (anti-horária) nos planos N36/15E e N31E/76SE. O cisalhamento nesta direção é muito intenso, as fraturas são abertas.

Foto 15: As setas em amarelo indicam os planos de fratura de direção NE por onde ocorre percolação de água.
Foto 16: Grande zona de cisalhamento causando intenso cataclasamento e cominuição das rochas.

Prancha 8.5 (pg. 92)**:**

Foto 17: A seta em amarelo indica plano de falha transcorrente N25W/85NE muito marcante, estrias e degraus no azimute N25/14. Entre estes planos foi observada percolação de água.
Foto 18: Aspecto de estruturas subhorizontais de grande porte, parecem ser de alívio (atectônicas).
Foto 19: Sistema de fraturas formando padrão em "X" (conjugado), os planos são abertos e favoráveis para água.

Prancha 8.6 (pg. 93)**:**

Foto 20: Zona de cisalhamento rúptil com formação de feições sigmoidais.
Foto 21 e 22: Zona de cisalhamento rúptil apresentando planos bem espaçados nesta direção.
Foto 23: A seta em amarelo indica estruturas subhorizontais de grande porte, provavelmente atectônicas. A rocha no interior destes planos se apresenta bastante cominuida.
Foto 24: Aspecto de sistema de fraturas oblíquas muito marcante no afloramento, nos quais foi observado bastante percolação de água.

Prancha 8.7 (pg. 94)**:**

Foto 25: Estrutura mais antiga representada por uma grande falha normal de atitude N53E/75NW (N50/80) com plano retilíneo onde observa-se ultramilonitização e estiramento dos minerais na rocha.
Foto 26: Grande faixa de cisalhamento rúptil cataclasando intensamente a rocha, parece formar estrutura em flor.

Foto 27: As setas em vermelho indicam sistemas de fraturas muito marcantes sendo a maioria abertas (parecem fazer padrão conjugado).
Foto 28: Grande plano de falha com orientação N80E/55SE.

Prancha 8.8 (pg. 95)**:**

Foto 29: Grande plano de falha em N88W/57SW, aberto e com circulação de água.
Foto 30: Falha transcorrente N08W/89NE com movimentação cinemática indicada por estrias e degraus no azimute N356/03, parece ser anti-horária.
Foto 31: Aspecto geral da pedreira Maringá.

Prancha 8.9 (pg. 96)**:**

Foto 32 e 33: A primeira foto mostra o aspecto geral dos planos estruturais onde foi medido falha transcorrente em N08E/69NE e estrias e degraus em N189/10. Observou-se percolação de água entre os planos (abertos). Na foto 33 é mostrado um detalhe do plano da falha.
Foto 34 e 35: Grande plano de falhas (N80E/52SE), parece ter movimentação inversa. Na foto 35 (detalhe) observa-se aspecto dos planos retilíneos, lisos e abertos.

LISTA DE ABREVIATURAS

AIC - *Akaike Information Criteria*

BIC - *Bayesian Information Criteria*

COMEC - Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba

EA - Entrada d´água

IPPUC - Instituto de Planejamento Urbano de Curitiba

Log - Logaritmo

MDR - Modelo Digital de Relevo

Max. Ver. - Máxima Verossimilhança

NE - Nível estático

ND - Nível dinâmico

p.ex - por exemplo

pg. - página

Q - Vazão

SIG - Sistema de Informação Geográfica

RMC - Região Metropolitana de Curitiba

RESUMO

A área de estudo abrange o município de Curitiba (PR) e parte dos municípios circunvizinhos englobando geologicamente o embasamento da Bacia Sedimentar de Curitiba (Complexo Atuba).

O objetivo central desta pesquisa é apontar parâmetros que possam indicar a favorabilidade na exploração de água subterrânea no aqüífero fraturado da bacia caracterizado pelo embasamento. Para tanto foram utilizadas técnicas de análise estrutural tendo por base dados da tectônica e da morfotectônica local. Como ferramentas de modelagem foram aplicadas a estatística clássica, a geoestatística e Sistemas de Informações Geográficas (SIG's).

Estudos anteriores realizados por outros pesquisadores indicam que o aqüífero fraturado em questão é condicionado por domínios estruturais que integram grandes sistemas estruturais regionais, estudados através da análise da deformação rúptil, que engloba a definição dos mecanismos estruturais cinemáticos e dinâmicos da trama de fraturas da região de Curitiba e arredores. Neste sentido foi dada ênfase à análise estrutural dos diferentes conjuntos e famílias de fraturas encontradas principalmente em rochas do embasamento.

As observações em campo indicam a existência de padrões estruturais aos quais estão associados sistemas de cisalhamento rúpteis abertos que servem de condutos preferenciais para a circulação da água subterrânea. As informações obtidas foram organizadas dentro de banco de dados georeferenciados de forma a serem tratadas e analisadas adequadamente pela confecção de diagramas de rosetas e projeções estereográficas através de *softwares* apropriados. As descontinuidades por onde há maior fluxo da água subterrânea e conseqüentemente indicam as áreas de maior potencial no aqüífero são aquelas de direção N-S, NE-SW e NW-SE, sendo este potencial ainda maior na conexão destas estruturas.

Paralelamente ao uso do SIG, a criação de Modelos Digitais de Relevo (MDR´s) permitiu investigar feições geomorfológicas na área de estudo, com ênfase no traçado dos lineamentos estruturais e o traçado automático da rede de drenagens, utilizando e adaptando funções avançadas do *software* ArcView GIS 3.2®. A identificação e reclassificação dos traços de fraturas são importantes para definir as propriedades e características que possibilitam a circulação de água subterrânea.

Além disso, foi atualizado e reorganizado o banco de dados hidrogeológicos contendo informações referentes a 1297 poços tubulares profundos no município de Curitiba e arredores, perfurados entre o período de 1950 até o ano de 2001. Posteriormente, com a modelagem geoestatística buscou-se encontrar um modelo que melhor se ajustasse aos valores de vazões de 459 casos para então aplicar o método convencional da krigagem, resultando em importantes referenciais nas análises integradas na pesquisa.

Finalmente, com o SIG, foi possível realizar o cruzamento das análises estruturais e análises espaciais, contendo a localização dos poços tubulares profundos, resultando em informações preliminares que apontam uma relação entre locais onde há altas vazões e grandes alinhamentos estruturais de direção N-S, o que indica que estas estruturas geológicas servem como condutos para o fluxo de água subterrânea.

ABSTRACT

The study focused on the Atuba Complex, basement of Curitiba Sedimentary Basin, located at the city of Curitiba (PR) and partially the neighboring cities.

The main objective is to point out parameters which can be indicative of the most favorable characteristics for the exploration of groundwater in the basement fractured aquifer. The methodology included structural analysis, based on local tectonic and morphotectonic data. Geostatistical Methods and functions of Geographic Information Systems (GIS) were applied as modeling tools.

Previous studies indicated that the basement fractured aquifer is conditioned by structural domains which are part of the greatest regional structural systems. The analysis of the brittle deformation in these systems included the definition of cinematic and dynamic mechanisms, responsible for the presence of fractured aquifer in Curitiba and neighborhood. As a result, the emphasis of the study was the structural analysis of different fractures sets and families, observed mainly in basement rocks.

The field data indicated the existence of structural patterns associated to open brittle shear systems which are preferable paths for the circulation of groundwater. These data were organized in a spatial database that provided a readily data access for the subsequent structural analysis with appropriate software. Especially elaboration of rose and stereographic diagrams were used to evaluate and interpret the recorded data. The result shows, among others, that the discontinuities N-S, N20-30E/SW and N10-20W/SE conduct the highest flow of water and consequently represent the highest potential areas of the aquifer. The aquifer potential is even higher at the connection of these structures.

The parallel generated raster based Digital Terrain Model (DTM) was set in to investigate the morphologic nature of the study area and particularly to trace

structural lineaments and drainage automatically using advanced and adapted functions of ArcView GIS 3.2®. This spatial identification of relevant lineaments and their reclassification as fracture traces are basically for the definition of proprieties related to the groundwater circulation.

Within the scope of the study, the hydrogeological data base were rebuilt and updated, actually including information of 1297 deep wells of Curitiba and neighborhood, which were drilled between the years of 1950 and 2001. A geostatistic model of the flow rate of 459 wells was developed to examine the applicability of conventional geostatistical methods like kriging as an important reference for the integrated analysis in this research.

Finally, within the GIS, it was possible to intersect the results of the structural and spatial analysis with wells locations and consequently to find out the preliminary relation between the highest flow rates and great N-S structural alignments. These geological structures can be considered as paths for groundwater circulation.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Nesta dissertação foi desenvolvido um trabalho de Geologia Exploratória aplicada à exploração de água subterrânea. Como já mencionado anteriormente na literatura, a água subterrânea que circula no embasamento da Bacia de Curitiba é controlada pelas estruturas que caracterizam um aqüífero fraturado ou fissural, geradas pelos processos tectônicos que moldaram a bacia. Dessa forma, a análise da tectônica rúptil da região apresenta grande significado e tem por objetivo caracterizar o arcabouço geológico-estrutural dos padrões de fraturas, ou seja, das falhas e/ou juntas (diáclases) que a afetam. O estudo das fraturas geralmente revela padrões sistemáticos, cuja causa é a atuação de regimes tectônicos em escala regional.

Além da caracterização da trama estrutural espacial, através do modelo de RIEDEL (1929), geralmente é possível a determinação de paleotensões no maciço analisado, posicionando-se os eixos de tensões principais que ali atuaram em determinadas épocas geológicas. Esses eixos são revelados através do emprego de técnicas específicas, como as de ARTHAUD (1969) e ANGELIER e MECHLER (1977) que utilizam a posição espacial de elementos geológicos tais como planos de falhas e estrias de atrito destas estruturas.

As análises da tectônica rúptil são melhor realizadas em rochas cristalinas, de natureza ígnea ou metamórfica, de alto ou médio grau, em função das suas características geológicas. Os melhores locais para o levantamento da determinação dos padrões de fratura são as pedreiras, já que estas é que melhor apresentam tais estruturas em grandes áreas de exposição, facilitando a observação das relações geométricas entre as diversas famílias de fraturas que ali ocorrem. No embasamento da Bacia Sedimentar de Curitiba, unidade aqui enfocada, as estruturas rúpteis possuem dimensões desde milimétricas até quilométricas.

Os diferentes padrões de fraturas, por sua vez, podem controlar variáveis geomorfológicas e geológicas, tais como o modelado da paisagem, padrão da rede

de drenagem local, posicionamento estratigráficos e, ainda, influenciar na definição de áreas de riscos geotécnicos bem como no controle de fluxo da água subterrânea. Neste último caso a boa caracterização estrutural pode determinar aquelas descontinuidades por onde há maior fluxo da água e conseqüentemente apontar áreas favoráveis à sua exploração.

Como já mencionado em trabalho regional de investigação das características tectônicas (SALAMUNI, 1998) há necessidade de se realizar um trabalho de investigação estrutural em escala de detalhe e/ou semidetalhe, tanto no que se refere ao contexto descritivo quanto ao que se refere à interpretação da gênese dessas estruturas. Tal investigação, associada aos dados hidrogeológicos referentes a poços tubulares profundos dentro do município e sistemas georeferenciados de informações (SIGs), possibilita a geração de modelos de favorabilidade hidrogeológica.

1.2 Trabalhos existentes

No que se refere às características descritivas das entidades geológicas, diversas pesquisas já foram realizadas na área de interesse, contribuindo para um grau satisfatório de conhecimentos neste âmbito.

Há, no entanto, uma lacuna no estudo da geologia local, no que se refere à caracterização do zoneamento hidrogeológico do município, tendo por base fatores tectônicos determinantes de descontinuidades estruturais, em escala passível de ser utilizada pelos planejadores urbanos.

Trabalhos existentes mais específicos como o de NOGUEIRA FILHO (1997), e em certo sentido de SALAMUNI (1981), envolvendo a geologia estrutural e suas relações com hidrogeologia são poucos e muitos resultados ainda são esperados.

1.3 Localização da área e vias de acesso

A área de estudo engloba a cidade de Curitiba (PR) compreendida entre as coordenadas geográficas 49°07' e 49°24'W e 25°25' e 25°40'S (Figura 1.1). Geologicamente a região abrange a Bacia Sedimentar de Curitiba localizada na porção centro-sul do Primeiro Planalto Paranaense.

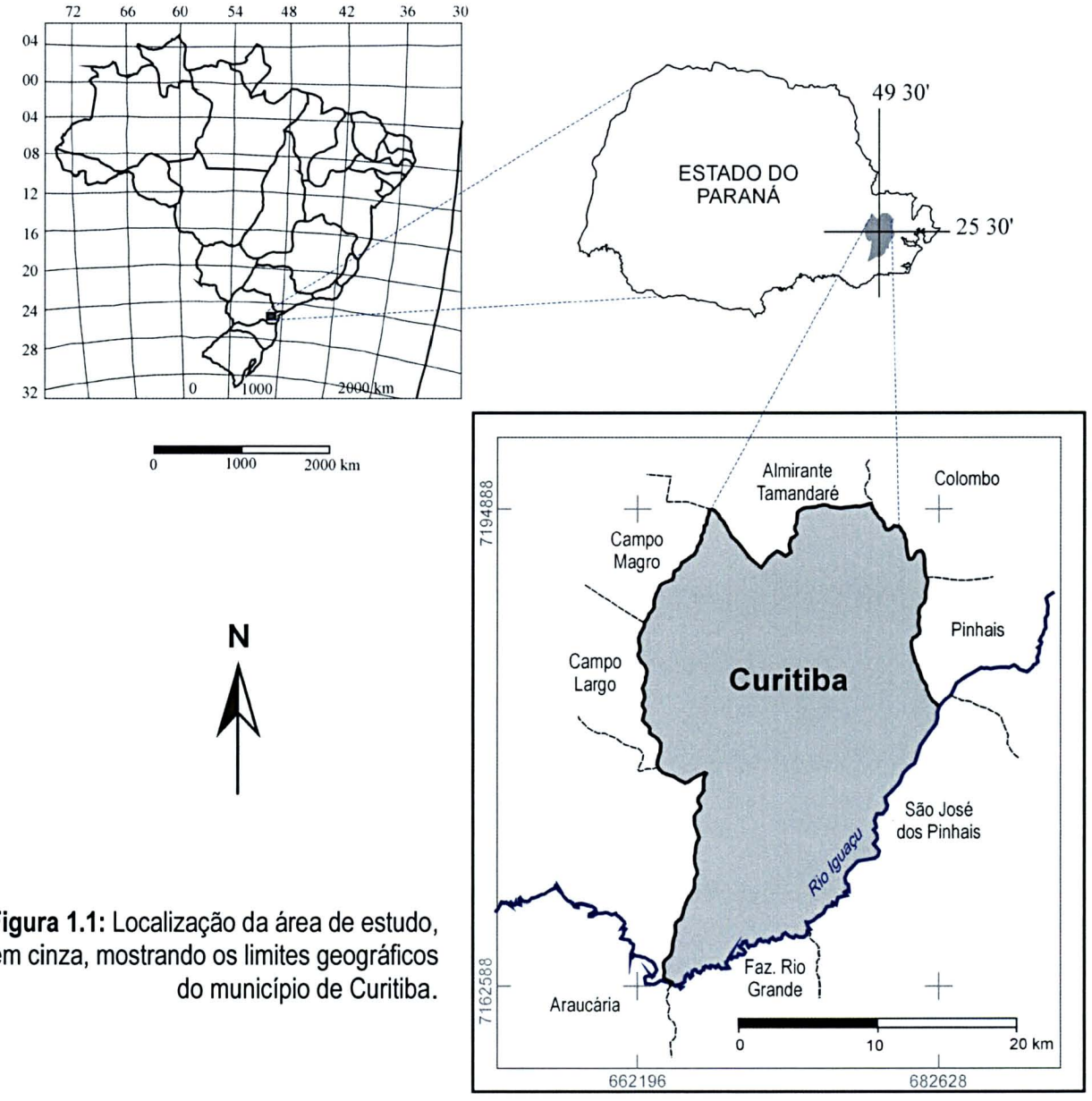
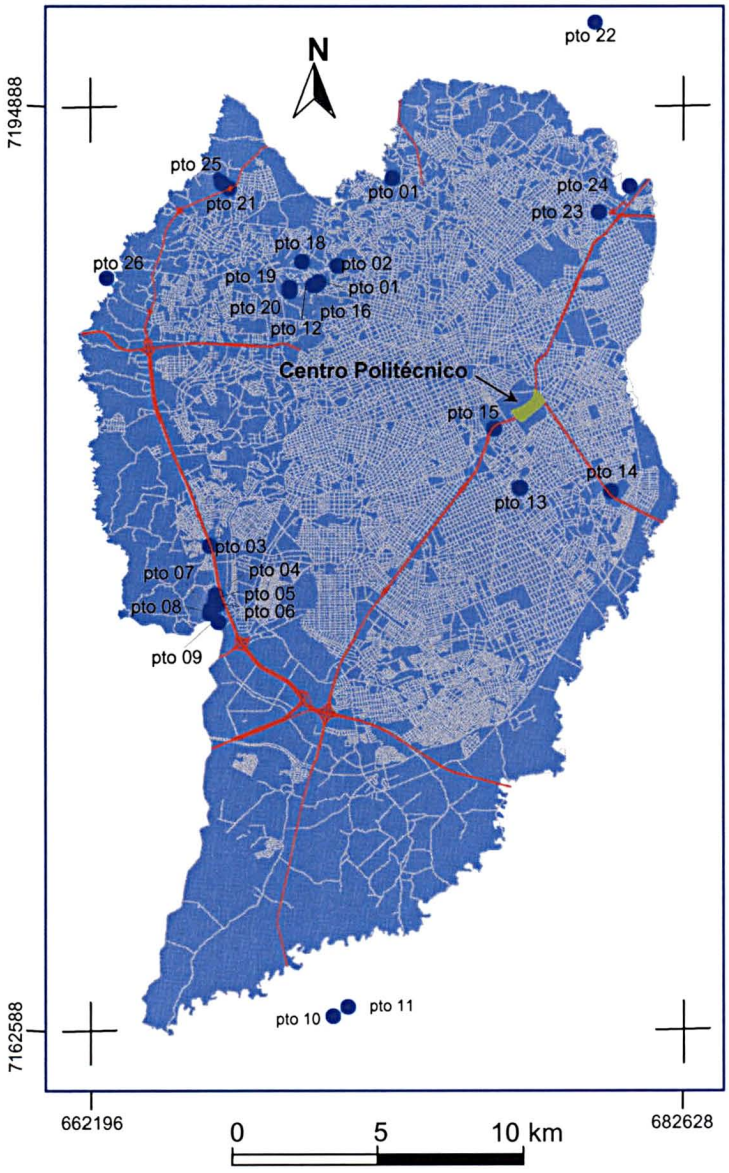


Figura 1.1: Localização da área de estudo, em cinza, mostrando os limites geográficos do município de Curitiba.

É preciso salientar que dados geológicos, estruturais e hidrogeológicos são, muitas vezes, difíceis de serem coletados nas áreas urbanas, principalmente nas regiões mais centrais dos municípios. Com a urbanização, significativas áreas superficiais encontram-se encobertas descaracterizando muitos afloramentos. Nos locais onde os processos de urbanização ainda não estão tão adiantados ou onde ocorrem obras de engenharia como edificações, cortes de estradas e loteamentos, e ainda em margens de rios e drenagens são verificadas boas exposições geológicas (SALAMUNI, 1998).



Escala 1:20.000

A área conta com uma quantidade satisfatória de vias de acesso (Figura 1.2), sendo as estradas federais e estaduais as principais vias que levam às boas exposições rochosas. Igualmente as pedreiras em vários locais, principalmente na região norte, oferecem bons afloramentos.

Figura 1.2: Os pontos representam os afloramentos visitados na área de estudo (polígono em azul). Em vermelho podem ser observadas as principais rodovias que cruzam a cidade e em cinza é mostrado o sistema viário do município. Como ponto de referência foi plotado (em verde claro) a área referente ao terreno do Centro Politécnico (UFPR).

1.4 Articulação das cartas topográficas do Município de Curitiba e mapa de arruamentos

Para este trabalho foram adquiridos da Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba - COMEC as cartas topográficas digitalizadas através do programa AUTOCAD v.14® na escala 1:20.000, de números "A101, A102, A104, A105, A136 e A139", referentes à área da pesquisa (Figura 1.3). Do Instituto de Planejamento Urbano de Curitiba - IPPUC, foi adquirido o mapa de arruamentos da cidade Curitiba (Curitiba Digital, Mapa e Lei de Zoneamento - 2001), contendo arquivos nos formatos ".dxf", ".dwg" e ".shx" (*shapefile*). O CD-ROM "Curitiba Digital" está sob a guarda da biblioteca do Setor de Tecnologia do Centro Politécnico (UFPR) para consulta de outros usuários.

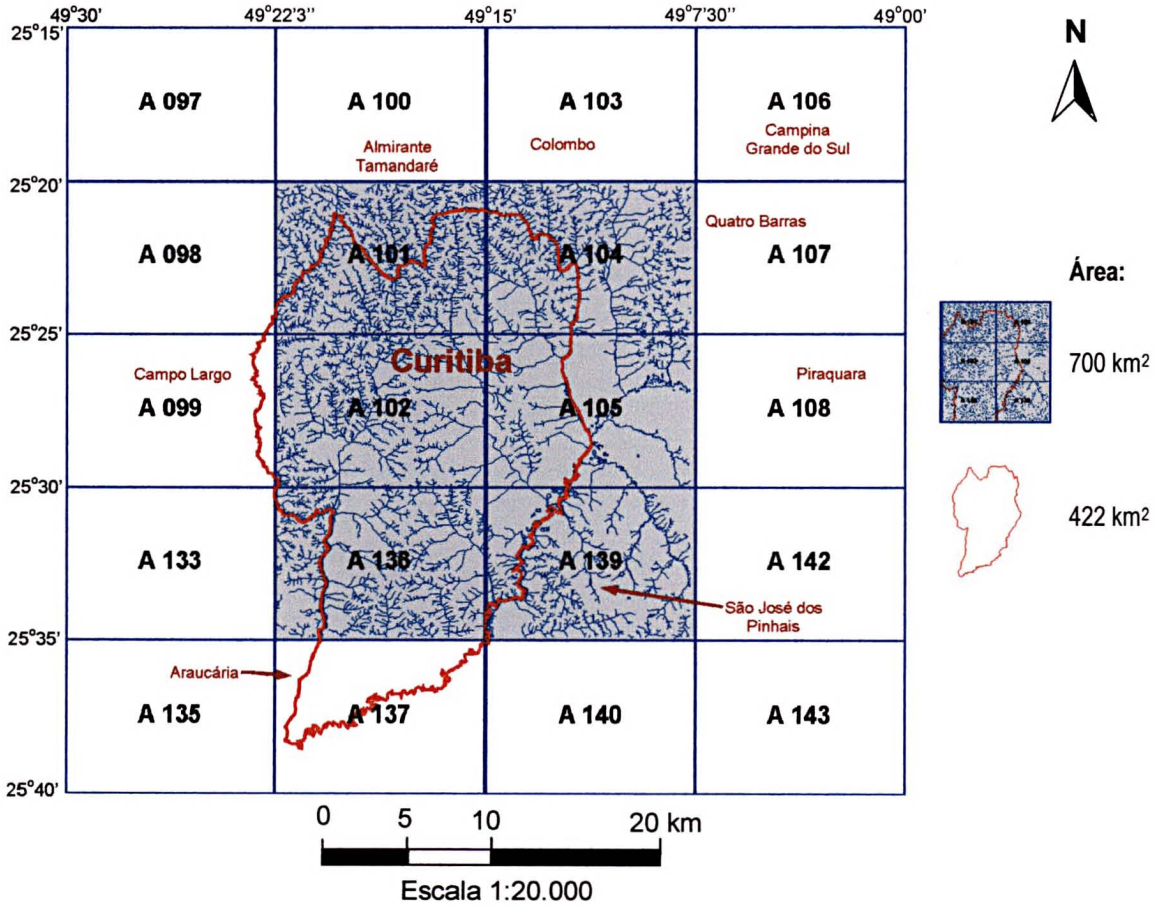


Figura 1.3: Mosaico ilustrando a articulação das cartas topográficas (em cinza), na escala 1:20.000 adquiridas da COMEC, que incorporam a área de estudo. Como pontos de referência foram acrescentados em vermelho o limite do município de Curitiba e em azul as principais drenagens.

2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

A importância do estudo da Bacia de Curitiba e seu embasamento apresenta duas vertentes de aplicação: a primeira refere-se ao desenvolvimento do conhecimento que reflete, em última instância, a compatibilização de modelos hidrogeológicos e modelos tectônicos; e a segunda no conhecimento da geologia aplicada a trabalhos de planejamento no uso e ocupação do solo em função do mapeamento de áreas de maior favorabilidade à exploração de água subterrânea e, portanto, de interesse para a comunidade.

Dessa maneira o objetivo central desta pesquisa é apontar parâmetros que possam indicar a favorabilidade na exploração de água subterrânea no aqüífero fraturado da bacia, caracterizado pelo embasamento. Para tanto foram utilizadas técnicas de análise estrutural tendo por base dados da tectônica e da morfotectônica local. Como ferramentas de modelagem foram escolhidas a Geoestatística e Sistemas de Informações Geográficas (SIG's).

De forma mais detalhada os seguintes objetivos e metas a serem seguidos neste trabalho são listados abaixo:

2.1 Objetivo geral

a) Correlacionar, detalhar e aprofundar o estudo do arcabouço estrutural da Bacia de Curitiba e seu embasamento e da hidrogeologia do aqüífero fissural dentro do município de Curitiba em escala 1:25.000, com uso de novos dados e daqueles já existentes;

2.2 Objetivos específicos

a) Identificar planos de descontinuidades com o objetivo da caracterizar as estruturas propícias à ocorrência de água subterrânea utilizando para tanto a análise morfoestrutural;

b) Reunir as informações a respeito dos poços tubulares profundos do município de Curitiba e arredores gerando um banco de dados hidrogeológicos atualizado;
c) Criar sistemas de informações lito-estruturais e hidrogeológicas de forma automática com auxílio da modelagem digital de relevo (MDR);
d) Compreender o comportamento das variáveis hidrogeológicas do aqüífero fraturado em questão, utilizando a análise estatística clássica e a modelagem geoestatística;

Os objetivos aqui definidos têm por finalidade gerar produtos, tais como cartas estruturais e análises de SIG do município de Curitiba e arredores, para serem utilizados por profissionais que atuam no mercado de água subterrânea da região.

3 MÉTODOS E MATERIAIS DE TRABALHO

3.1 Considerações gerais

Os métodos analíticos que foram empregados neste trabalho envolvem procedimentos usuais para estudos da natureza que se pretende, tais como Análise Estrutural e a Geoestatística acrescidos de métodos computacionais de automação para tratamento de dados e imagens obtidos com o uso da ferramenta de SIG (Sistema de Informações Geográficas).

Nesta pesquisa os métodos adotados para a solução dos problemas geológicos, são ferramentas de análise que normalmente não são empregadas em conjunto na geologia, no entanto, o uso integrado destas metodologias apresentou bons resultados na obtenção dos resultados finais.

O fluxograma da figura 3.1 mostra a aplicação dos métodos de análise adotados, o processamento das informações e os resultados esperados. Na seqüência é feita uma explanação ao leitor sobre cada um destes métodos, porém uma discussão mais detalhada a respeito dos mesmos se encontra no corpo do trabalho de acordo com as análises realizadas.

O desenvolvimento do trabalho é mostrado, resumidamente, através do fluxograma da figura 3.2 e a explicação mais completa de cada etapa realizada, é apresentada no decorrer deste capítulo.

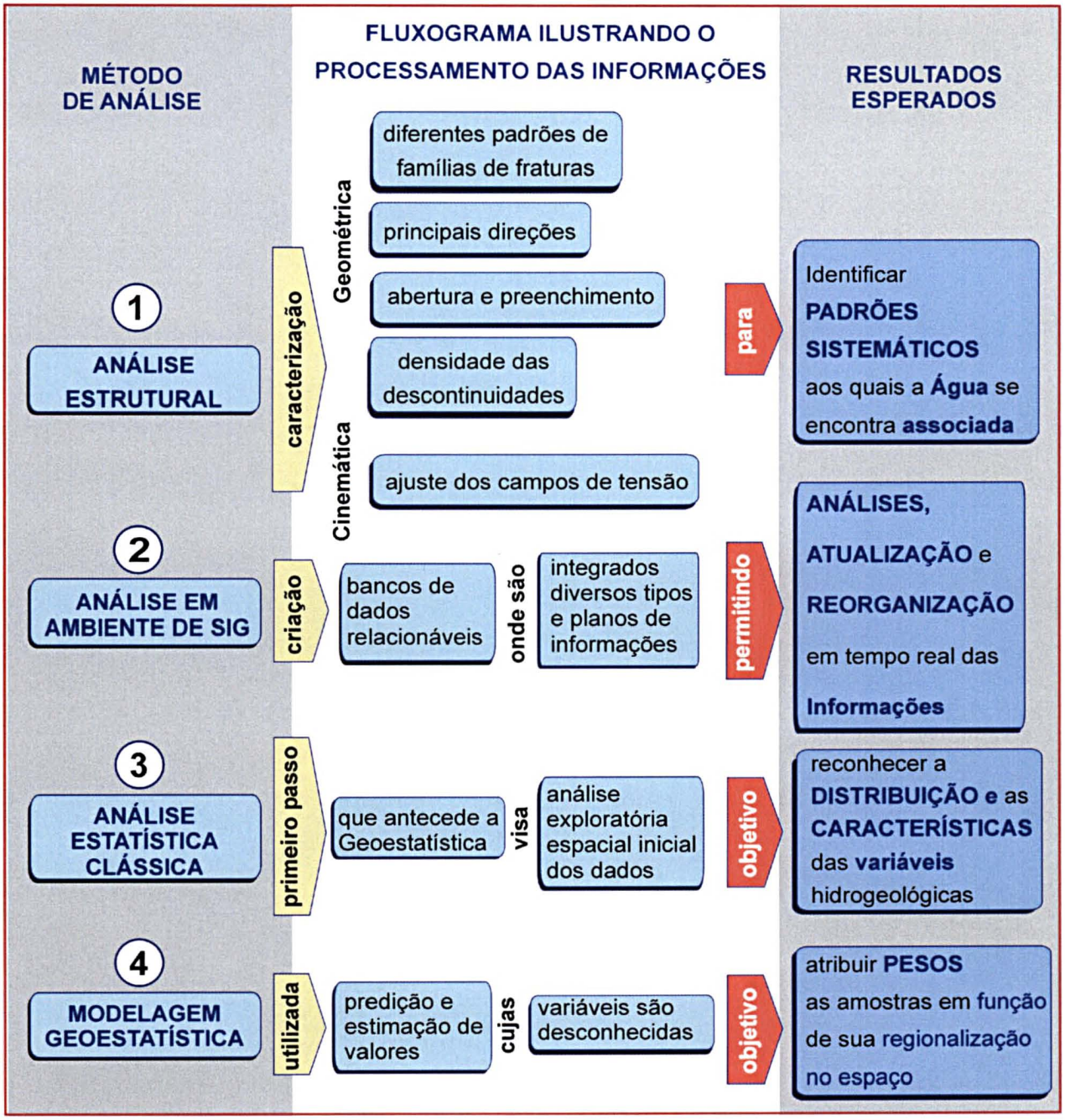


Figura 3.1: Fluxograma ilustrando os métodos de análise adotados, o processamento das informações e os resultados esperados.

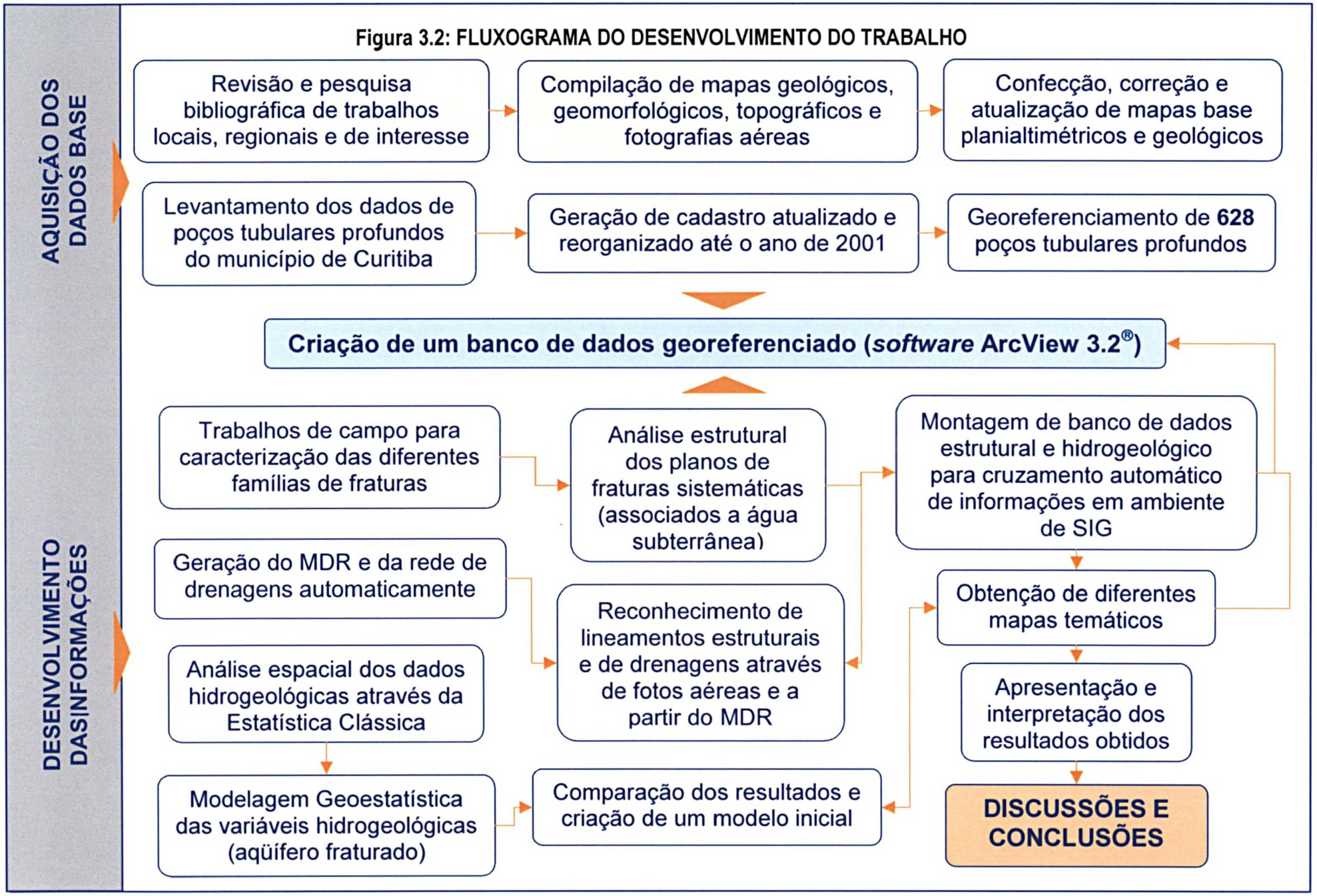


Figura 3.2: FLUXOGRAMA DO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

3.1.1 Análise estrutural

As análises estruturais e morfotectônicas são métodos mais empregados e reconhecidos em geologia. No presente caso, as análises apresentam duas conotações:

(a) caracterização geométrica dos diferentes padrões de famílias de fraturas favoráveis à circulação da água subterrânea, suas principais direções, densidade das descontinuidades, abertura e preenchimento das mesmas.

(b) solução dos campos de tensão evidenciados através da cinemática envolvida nos planos sistemáticos de fraturas sistemáticas aos quais a água se encontra associada.

Partindo do pressuposto que os alinhamentos estruturais se comportam como condutos favoráveis à percolação e acumulação de água subterrânea, ou então quando preenchidos como barreiras, impedindo a circulação das mesmas, a análise rúptil em rochas do embasamento é considerada nesta pesquisa como método fundamental para auxiliar a exploração de água subterrânea. Os resultados obtidos servem como a principal base para as demais interpretações em geral na área estudada.

O potencial dos sistemas aqüíferos cristalinos depende das condições de armazenamento sendo em geral mais promissor nas zonas onde o comportamento rúptil foi mais intenso. A quantidade de água armazenada é condicionada pelo índice de fraturamento, pelo grau de abertura das fendas, pelas interconexões das fraturas e pela ligação do sistema de fissuramento das rochas com as zonas de recarga em superfície.

A partir de levantamentos de campo foram realizados estudos tectônicos e morfotectônicos através de observações e da aplicação de critérios analíticos geológico-estruturais para efetuar a caracterização dos diferentes padrões das famílias de fraturas existentes e tipos litológicos associados em pedreiras, afloramentos, cortes de estrada, outras obras civis e em fundos de drenagem localizados dentro da cidade Curitiba e arredores. O mapa de pontos referente aos afloramentos visitados na área pode ser observado na figura 1.2 do Capítulo 01.

Estruturas tectônicas e feições geomorfológicas de interesse foram fotografadas ou transferidas para o banco de dados por meio de croquis

esquematizados e ainda desenhos feitos diretamente sobre o afloramento (quando na horizontal) em folhas de transparências obtendo-se feições estruturais na escala 1:1. Para coleta de atitudes foi utilizada a bússola do tipo Brunton.

Os trabalhos de campo resultaram em 1124 medidas de planos de fraturas e/ou falhas. Estes dados foram organizados em tabelas e na sequência da pesquisa as direções destas juntas foram analisadas com auxílio de diagramas e estereogramas elaborados através do *software* STEREONETT v. 2.4, juntamente com as observações de campo e análises de SIG para identificação de zonas afetadas por comportamento rúptil.

Para determinar as direções principais de movimento dos planos foi escolhido o método de TURNER (1953) e para medir os eixos principais de esforços foram adotados os métodos propostos por ANGELIER e MECHLER (1977) e ANGELIER (1979), também chamado de "Método dos Diedros Retos", onde são consideradas as medidas em campo dos planos de falhas mesoscópicas e o respectivo sentido de movimento. Segundo esta análise, as falhas são classificadas como normais ou inversas, de acordo com a movimentação ao longo da componente vertical do movimento. Mesmo as falhas com componente horizontal de movimentação predominante (rejeito direcional) são consideradas como normais ou inversas. Os dois métodos foram aplicados automaticamente utilizando o software STEREONETT v.2.4.

3.1.2 Análise através de Sistema de Informação Geográfica (SIG)

Atualmente observa-se cada vez mais a tendência nos programas exploratórios, da sistematização das informações utilizando bancos de dados georeferenciados. Sendo assim, a geração de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) apresenta um potencial extremamente valioso no gerenciamento de recursos naturais, através da integração e processamento de informações úteis não somente para manipulação técnica dos dados, mas também para comunicação mais fácil com o usuário da informação. Por esta razão, paralelamente a todas as etapas desta pesquisa, o SIG está presente permitindo que, através da criação de bancos de dados relacionais e georeferenciados, sejam integrados diversos tipos e níveis de

informações (p.ex. mapas, tabelas, imagens, textos), possibilitando que as mesmas sejam constantemente atualizadas e reorganizadas em tempo real.

A exemplo disto, foram incorporados dados e informações a respeito de sondagens para poços tubulares profundos, dados estruturais coletados em campo, lineamentos e drenagens traçados em fotografias aéreas, mapa geológico e mapas planialtimétricos básicos. Foi criado ainda, com auxílio do *software* SURFER v. 7® o Modelo Digital de Relevo (MDR) a partir da base planialtimétrica. Posteriormente o MDR foi exportado para o ARCVIEW v.3.2®, *software* utilizado para a montagem do SIG. O MDR propicia o traçado das drenagens de forma automática e o cruzamento deste conjunto de informações com as drenagens traçadas originalmente em fotos aéreas, incorporadas digitalmente ao banco de dados. Igualmente o MDR foi utilizado para originar um terceiro tema melhorado e mais detalhado. A tecnologia do SIG torna muito mais rápida a identificação e reclassificação dos traços de fratura de acordo com seu comprimento, orientação, densidade e grau de conectividade podendo facilitar o reconhecimento das propriedades e características que permitem a circulação da água subterrânea nas descontinuidades estruturais. As entidades geológicas apresentam atributos descontínuos, o que ocasiona dificuldades para estes serem definidos espacialmente por funções matemáticas. O cruzamento automático de mapas digitais que contenham dados geológicos, dados estruturais, hidrogeológicos, traçado de lineamentos e grau de conectividade possibilita representação de variáveis e parâmetros que interagem no funcionamento dos sistemas estruturais dos aqüíferos. A ferramenta do SIG permite não só a criação de diferentes mapas temáticos mas, principalmente, otimiza de forma mais eficiente as etapas dos outros métodos de análise empregados.

3.1.3 Análise através da Modelagem Geoestatística

A ferramenta da geoestatística é utilizada para a predição e estimativa de valores cujas variáveis são desconhecidas, com a possibilidade de atribuição de pesos às diferentes amostras em função de sua regionalização no espaço (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989). A distribuição espacial dos dados foi utilizada como critério básico para o início das análises e integração dos dados. A familiarização dos

próprios dados espaciais e o reconhecimento de padrões de regularidades são fatores importantes. Neste caso, em uma primeira etapa é necessária a utilização da estatística clássica no início da análise exploratória local para auxiliar a visualizar a distribuição dos dados e suas estruturas espaciais (KITANIDIS, 1997).

Na análise geoestatística podem ser tomadas diferentes estratégias para abordar o mesmo problema. Como metodologia decidiu-se adotar a "modelagem geoestatística" utilizando o *software* geoR v.1.3 -10 (programa gratuito[1] e de código aberto para análise geoestatística), no qual é possível testar e ajustar as análises no decorrer da estimativa, possibilitando que o pesquisador possa confirmar o conhecimento "a priori" e também reavaliar ou mesmo abortar a proposta inicial, dada à inconsistência dos dados.

A "modelagem geoestatística" é uma forma de análise onde o modelo liga (conecta) aquilo que o pesquisador tem e aquilo que ele quer tendo a vantagem sobre a análise geoestatística clássica de que certas análises, a exemplo da "Máximo Verossimilhança" e "Inferência Baeysiana", garantem que a veracidade do resultado final seja maior. Ao contrário do geoR, os *softwares* encontrados, normalmente no mercado, não oferecem a possibilidade de realizar modelagem geoestatística. Um segunda razão, talvez de cunho mais filosófico para utilizar este *software,* é o fato do geoR ser gratuito e de código aberto e todos os algoritmos internos do programa podem ser verificados e reavaliados.

A simulação de modelos oferece mais respostas no estágio inicial que antecede o processo da krigagem, principalmente quando se tem uma distribuição bastante assimétrica de dados, a exemplo do que ocorre com a variável vazão nos poços tubulares na cidade de Curitiba. Somente após ter sido investigado, através de simulações, o comportamento de certos parâmetros que compõem um modelo e o grau de incerteza na estimativa, é então tomada a decisão de se aplicar ou não a krigagem.

O primeiro passo a ser considerado na modelagem é entendimento do modelo. A krigagem por si só dá apenas a média e a variância e essa representação é feita através de mapas. A krigagem faz a chamada predição *"plug in"*, onde tudo é 100%

---

geoR[1] Maiores informações sobre o geoR podem ser encontrados no *site* da Internet http://www.est.ufpr.br/~paulojus/geoR.

de certeza. Essa predição corresponde a uma estimativa dado um conjunto de valores lidos através dos parâmetros de um único variograma, porém a estimatva não corresponde totalmente com a realidade. Um exemplo desse tipo de predição é como fazer uma pesquisa do tipo "ibope" com 3000 pessoas, na verdade a população corresponde a um número muito maior de pessoas, mas usa-se a estimativa como se fosse o valor real.

A dificuldade de se realizar uma predição em um aqüífero fraturado é ainda maior dado à natureza do fenômeno onde a fratura é que dá a "porosidade" da rocha e a continuidade lateral e vertical do aqüífero é bastante irregular. A água circula onde há a existência de fraturas abertas, situação em geral muito mais complexa do que quando se trabalha com um aqüífero poroso em rocha sedimentar. Em um aqüífero fraturado a variável vazão não tem média constante, e a uma distância de apenas alguns metros pode ser encontrados lado a lado um poço com vazão nula enquanto o outro é considerado bastante produtivo com vazão de dezenas de m^3/h (NOGUEIRA, 1997).

Há ainda de ser ressalvar a tridimensionalidade dos dados hidrogeológicos devido à ocorrência de diferentes horizontes em profundidade. No momento de se realizar a krigagem deve haver a preocupação com esse tipo de fenômeno. A krigagem simples e a ordinária mostram a interpolação de apenas uma única variável através de um mapa 2D. Na modelagem feita através do geoR é possível incluir co-variáveis durante a krigagem e ainda verificar se o uso desta co-variável é importante e realmente vai influenciar no resultado final.

Na análise geoestatística clássica é usada a predição "*plug in*" e os valores encontrados são geralmente superestimados, enquanto que nas modelagens realizadas utilizando o *software* geoR é possível aplicar a teoria da "Máximo Verossimilhança" ou a "inferência Baysiana".

Nesta pesquisa as análises seguiram o princípio da "Máximo Verossimilhança" onde é encontrado o valor de θ que melhor representa a plausibilidade nos valores dos parâmetros do modelo (θ corresponde ao valor de todos os parâmetros do modelo que tornam os dados observados mais prováveis). O termo de "Máximo Verossimilhança" foi utilizado pela primeira vez por FISHER (1922).

3.2 Aquisição dos dados base pertinentes à área de pesquisa

A compilação dos dados e informações de interesse foi feita da seguinte forma:

a) Revisão bibliográfica dos principais trabalhos de cunho local e regional relacionados à geologia;
b) Pesquisa bibliográfica sobre tectônica rúptil, sobre a deformação do Complexo Atuba (leste do Paraná) ocorrida no Proterozóico Superior e sobre o controle estrutural de aqüíferos fraturados com ênfase na análise de fraturas. Realizou-se ainda a revisão de trabalhos de temas específicos tais como geologia estrutural, morfotectônica, geomorfologia, geoprocessamento, estatística, geoestatística e hidrogeologia;
c) Compilação de mapas geológicos, geomorfológicos, topográficos, fotografias aéreas, mapas de solos, de vegetação e imagens de satélite referentes à área de estudo;
d) Coleta de dados lito-estruturais, geomorfológicos, geoambientais e hidrogeológicos, perfis geofísicos, perfis construtivos e de sondagem para água subterrânea e testes de aqüífero. A aquisição destes dados e informações foi realizada em órgãos públicos, empresas privadas e universidades;

3.3 Desenvolvimento das informações base

As etapas abaixo descrevem a seqüência de trabalhos formulada para esta pesquisa:

a) Atualização e formulação de bancos de dados de perfis e informações de sondagens para água subterrânea, de dados lito-estruturais e geoambientais disponíveis na Bacia de Curitiba, com ênfase ao município de Curitiba;
b) Reconhecimento de lineamentos estruturais e geomorfológicos através de fotos aéreas nas escalas 1:20.000 utilizando o método de SOARES e FIORI (1976) e modelos digitais de relevo (MDR) para análise estrutural de diferentes conjuntos e/ou famílias de fraturas, de zonas com alta concentração de deformação e da morfoestrutura da bacia de Curitiba e arredores;

c) Confecção e atualização de mapas base planialtimétricos básicos, geológicos básicos e hidrogeológicos. Nas etapas iniciais desta dissertação os mapas base planialtimétricos incorporando o município de Curitiba, adquiridos através da COMEC (Coordenadoria da Região Metropolitana de Curitiba), foram corrigidos e dados complementares foram acrescentados através dos *softwares* AUTOCAD v. 2000® e ARCVIEW v.3.2®. A articulação destas cartas topográficas pode ser observada na figura 1.3;
d) Trabalhos de campo para caracterização das diferentes famílias de fraturas;
e) Utilização de programas automáticos (*softwares*) aplicáveis em geologia que auxiliam o trabalho gráfico de compilação, manuseio e análise de dados para:
    - Digitalização e aperfeiçoamento de mapas geológicos e geomorfológicos da superfície e do embasamento, em escala de semidetalhe através de programas automáticos, para servirem de base no trabalho de sobreposição e cruzamentos de informações, também de forma automática;
    - Montagem de banco de dados estruturais e hidrogeológicos para cruzamento automático de informações e criação de MDRs e modelos de SIG;
    - Criação de drenagens e de lineamentos com auxílio de MDRs para análises do relevo;
    - Modelagem Geoestatística;
f) Comparação dos resultados e criação de um modelo inicial;
g) Obtenção de diferentes mapas temáticos;
h) Apresentação e interpretação dos resultados obtidos;
i) Conclusões e discussões;

3.4 Equipamentos, materiais e instrumentos utilizados

Os seguintes materiais, equipamentos e instrumentos foram utilizados para o desenvolvimento deste trabalho:

- Veículo de campo;
- Materiais de campo individual e materiais de escritório;
- Bússola de geólogo tipo Brunton;
- GPS de mão do tipo Garmin Etrex, 12 Chanel;
- Fotografias aéreas nas escalas 1:70.000 e 1:25.000;
- Mapas planialtimétricos digitais;
- Estereoscópios de espelho *Wild* e de bolso;
- Iomega *Zip-Drive;*
- Scanner de mesa;
- Microcomputador PC-Pentium 500 (ou similar), AMD-K6™ 3D *processor*, 250 MB RAM e PC-Pentium 4, 1GB RAM, 1,8 MHz velocidade de processamento;
- Impressora HP, jato de tinta, colorida;
- Impressora HP, LaserJet 4l, preto e branco;
- Impressora e copiadora Xerox, DocuPress v.2.3;
- Plotter jato de tinta do tipo HP 7500;

3.5 Recursos operacionais

Foram utilizados os seguintes recursos computacionais:

Operações realizadas	***Softwares* utilizados**
Digitalização e vetorização dos dados	AUTOCAD v. 2000®
Criação do banco de dados georeferenciado	ARCVIEW v. 3.2® e módulos: • SPATIAL ANALIST v.1.1 • 3D ANALIST • ARCPRESS; MICROSOFT ACCESS v. 2000 ®
Entrada dos dados de campo	EXCELL v. 2000®
Cadastro de poços tubulares profundos	EXCELL v. 2000® ARCVIEW v. 3.2®

Análise estrutural	STEREONETT v. 2.4 (gratuito)
Análise estatística	STATISTICA v. 6®
Análise geoestatística	geoR v. 1.6.1 (gratuito)
Interpolação e criação do modelo digital de elevação (MDR)	SURFER v. 7 e v. 8® ARCVIEW v. 3.2®
Criação de ilustrações e demais trabalhos gráficos	CorelDRAW v. 9® Corel PHOTO-PAINT v. 9® Adobe PHOTOSHOP v. 6® FREEHAND v. 8®
Digitação de textos	MICROSOFT WORD v. 2000®
Criação de fluxogramas e apresentações	POWERPOINT v. 2000®

4 CONTEXTO GEOLÓGICO GERAL

4.1 Aspectos regionais

O Complexo Atuba (SIGA JR et al., 1995) e, em menor parte, o Complexo Setuva, representam o embasamento da Bacia de Curitiba.

Os migmatitos e gnaisses são as principais litologias que compõem o embasamento, constituído por rochas cristalinas do Proterozóico Inferior. Ocorrem ainda paragnaisses, quartzitos de granulação variada, quartzo xistos, micaxistos, anfibolitos, gnaisses-granitos e ainda granulitos (BIGARELLA e SALAMUNI, 1959; FUCK et al. 1967; BATOLA JR et al., 1981).

BASEI et al. (1992) descrevem o embasamento como sendo formado por gnaisses bandados diferenciados, migmatizados e petrologicamente separados em dois grupos: (a) gnaisses bandados apresentando leucossoma com composição tonalito-granodiorítica e melanossoma rico em biotita-anfibólio e (b) gnaisses graníticos bandados contendo pouca biotita.

SALAMUNI (1998) detalhou os tipos litológicos presentes no embasamento citando também: (a) metabasitos anfibolitos e metaultrabasitos; (b) corpos gnáissicos-graníticos; (c) subordinadamente xistos, quartzitos finos e supostos paragnaisses com quartzo-feldspatos diferenciados; (d) migmatitos indiferenciados e (e) corpos graníticos anatéticos, bem como granitos alcalinos a sub-alcalinos da Serra do Mar, entremeados por xistos, gnaisses e granulitos (Figura 4.1). Os metabasitos são representados principalmente por anfibolitos migmatizados. Em meio a estas porções básicas é freqüente ocorrerem lentes métricas a decimétricas de metaultrabasitos, também migmatizados. No embasamento ainda são encontrados remobilizações róseas, quartzo-feldspáticas e pegmatitos de natureza discordante e corpos graníticos maiores anatéticos.

Dois são os maciços graníticos observados na : (a) Granito Guajuvira situado à oeste da bacia de possível idade paleoproterozóica, bastante deformado e (b) Granito Anhangava de idade neoproterozóica, localizado a leste da bacia e apontado

por SALAMUNI (*op. cit.*) como sendo uma das prováveis áreas-fonte de preenchimento da Bacia de Curitiba.

Em termos metamórficos, as rochas do embasamento apresentam paragênese de grau metamórfico médio a alto (fácies anfibolito), com cristalização de granada, hornblenda e biotita. A presença de recristalização de muscovita, biotita derivada de horneblenda e quartzo de segunda geração seriam indicativos de uma história de retrametamorfismo até a fácies xisto-verde, zona da biotita, e/ou até mesmo zona da clorita (BASEI et al, *op.cit* ; SALAMUNI, *op.cit*)

Completando o conjunto litológico que forma o embasamento da bacia, são observados diques de diabásio ou de rocha básica mapeados principalmente a noroeste e a sudeste da área de ocorrência principal de sedimentos.

Segundo MARINI et al. (1970), estas rochas intrusivas básicas têm idade jurássica a cretácea, e ocorrem como um denso enxame de diques de rochas básicas e intermediárias, dominantemente diques de gabros e ainda mircrogabros ou microdiorito, com direção principal NW-SE.

Os diques ocorrem numa faixa de 70 km de largura aproximadamente, desde a região dos vales Ivaí e Iapó à região de Guaratuba-Paranaguá, no litoral paranaense apresentando espessuras entre 20-40 m podendo, no entanto, atingir até 600 m. Ainda de acordo com MARINI et al. (*op. cit.*), os diques cretáceos por serem rochas constituídas de minerais instáveis nas condições ambientais atuais, sofrem uma rápida decomposição, distinguindo-se das encaixantes pela sua típica forma esferoidal de alteração. Estas rochas se comportam como injeções magmáticas alojadas em linhas de fraturas e falhas relacionadas geneticamente ao arco de Ponta Grossa.

Segundo ALMEIDA (1967) o desenvolvimento do Arco de Ponta Grossa ocorreu durante a reativação Wealdeniana, no Mesozóico. Esta reativação surgiu sob a forma de atividades tectono-magmáticas, onde sistemas de falhas e fraturas serviram de conduto às lavas básicas da Formação Serra Geral, de direção predominante NW.

Por se tratarem de zonas de fraqueza, os diques podem constituir pequenos vales de direção NW-SE e ainda podem estar reativados em tempos recentes.

Com relação aos sedimentos da Bacia de Curitiba, a Formação Guabirotuba é a litologia predominante seguida da Formação Tinguis e dos depósitos aluvionares recentes.

Os sedimentos da Formação Guabirotuba ocorrem em uma área de cerca de 3.000 km^2 e apresentam colocarão cinza-esverdeada, tendo em média espessura de aproximadamente 60 m. As porções de maior profundidade localizam-se geralmente no centro e centro-sudoeste da bacia.

Para BIGARELLA et al. (1961) e BIGARELLA e SALAMUNI (1962), leques aluviais e depósitos fluviais são a sedimentação típica desta formação. Segundo estes autores, na Bacia de Curitiba ocorrem duas formações sedimentares distintas, (a) a mais antiga correspondente aos argilitos e arcóseos da Formação Guabirotuba de idade controvertida (Plio-Pleistocênica), e (b) a mais recente caracterizada pelos depósitos de planícies de inundação e baixos terraços do Holoceno.

Na bacia os pacotes argilosos predominam em toda a área, e são representados por argilas montmoriloníticas intercaladas com argilitos ± arenosos. Esta intercalação é dada por níveis centimétricos a métricos (até 3 m). Observam-se ainda pequenos horizontes de caliches ou evaporitos calcários de granulometria muito fina (submilimétrica), anteriormente interpretados como margas por BIGARELLA e SALAMUNI (1959). Em meio a estas camadas, verificam-se lentes de arcóseos de colorarão esbranquiçada a rosada contendo espessuras variadas, chegando até 20 metros na base da unidade contendo estratificações cruzadas acanaladas de pequeno a médio porte. Todas estas litologias foram descritas como materiais inconsolidados ou pouco consolidados, endurecidos por soluções de carbonato de cálcio.

COUTINHO (1986) e SPITZNER (1953) descrevem nos sedimentos da bacia a presença de lantanita e outras terras raras. BECKER (*op. cit.*) ratifica as menções dos autores acima citados sobre a presença das terras raras e sugere que estas soluções poderiam ser provenientes de corpos graníticos encontrados a leste e nordeste da bacia ou ainda a norte a noroeste da área, estando estes corpos intrudidos tanto no Complexo Setuva quanto no Grupo Açungui. TRESCASES et al. (1986) atribui a presença destas terras raras a uma história poligenética, que inclui laterização e formação de calcretes. Ainda de acordo com estes autores, podem ser

observados níveis lateríticos truncados o que sugere que o intemperismo contemporâneo não deve ter causado estas crostas em uma única fase.

BECKER (1982) redefiniu e subdividiu a Formação Guabirotuba, sugerindo o nome de Formação Tinguis para a porção superior deste pacote sedimentar.

Para esta autora a Formação Tinguis é formada pelo próprio retrabalhamento, em clima semi-árido dos sedimentos arenosos, arcoseanos e síltico-argilosos da Formação Guabirotuba. Estas coberturas colúvio-aluvionares são representadas por depósitos de sedimentos inconsolidados que compõem as planícies de inundação e os baixos terraços, marginais às várzeas holocênicas.

Também segundo BIGARELLA e SALAMUNI (1962), estas coberturas colúvio-aluvionares já haviam sido descritas como sendo pós-Guabirotuba e subjacentes aos depósitos aluvionares, predominado seixos subangulosos e subarredondados formando camadas de espessura variável desde centímetros até mais de um metro. A Formação Tinguis ainda apresenta estratificação incipiente, podendo este depósito estar recoberto por sedimentos arenosos de coloração esbranquiçada a castanha, contendo seixos esparsos em sua matriz.

Ainda segundo BECKER (*op. cit*), ocorre uma outra unidade sedimentar de idade holocênica, denominada pela autora de Formação Boqueirão, caracterizada por areias e cascalhos, distinta dos depósitos mais recentes de várzea tendo sido depositada durante o Pleistoceno Superior em amplos vales com canais anastomosados.

COIMBRA et al. (1996) descrevem uma terceira unidade sedimentar composta por areias e argilas de cores avermelhadas a esbranquiçadas apresentando estratificação plano-paralela granodecrescente, contendo marcas de raízes tendo com base para estas descrições testemunhos isolados em posição de topo em colinas na área da bacia. Para estes autores a denominação dada para esta seqüência sedimentar é de Formação Piraquara, na qual as argilas foram depositadas em planícies de inundação intercaladas com areias de rompimentos de diques marginais correspondentes a sistemas fluviais meandrantes.

A diferença entre esta unidade e da Formação Tinguis, é que a Formação Piraquara é resultado de deposição fluvial enquanto que a Tinguis deriva do retrabalhamento da própria Formação Guabirotuba.

SALAMUNI (1998) aponta em seu trabalho um problema formal de acordo com o código estratigráfico ao se denominar estas seqüências sedimentares de formações, já que não existe registro consistente para tanto. Para o autor a "Formação Tinguis" seria, possivelmente, a única que realmente apresenta características suficientes para esta designação.

Quando aos depósitos holocênicos da Bacia, BIGARELLA e SALAMUNI (1962) classificam estas formações como de idade holocênica, de granulometria variada, sendo rara a presença de seixos, predominando sedimentos arenosos. LOPES (1966) descreve nestes depósitos, intercalações com camadas mais argilosas de elevado teor orgânico e de coloração negra, sucedidas por argilas sílticas e síltico-argilosas, esbranquiçadas, apresentando em geral estratificação plano paralela e localizadamente, estratificação cruzada.

SALAMUNI (1998) aponta que 20% da superfície da bacia é correspondente aos depósitos aluvionares, ocupando 490 km^2 da área e constituindo um importante componente litológico a ser considerado. O autor ainda acrescenta que a ocorrência do mesmo se dá em planícies aluvionares das inúmeras drenagens secundárias, preenchendo a planície de inundação do rio Iguaçu e seus arredores. As estratificações observadas no pacote sedimentar são as plano paralela e cruzadas, intermeadas por lentes e/ou camadas de argila orgânica de cor escura podendo ser de origem turfácea.

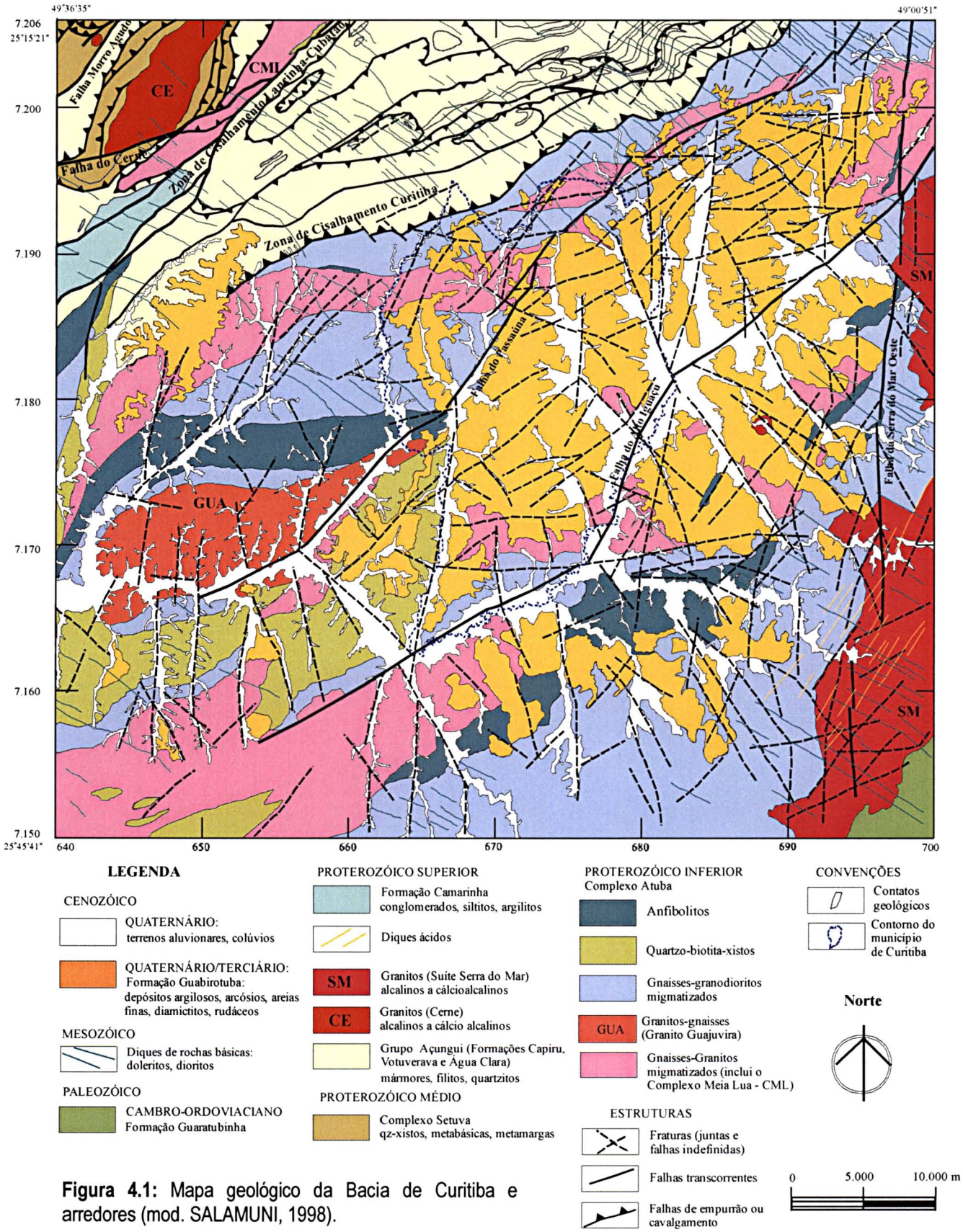


Figura 4.1: Mapa geológico da Bacia de Curitiba e arredores (mod. SALAMUNI, 1998).

4.2 Aspectos estruturais

De acordo com FUCK et al. (1967), os migmatitos e as rochas metamórficas associadas do embasamento geralmente apresentam planos verticalizados e estão orientados segundo ENE, podendo variar entre N10E e EW e ainda N20W a N40W. As observações feitas em campo sobre as características destes planos indicam que os mesmos provavelmente foram originados através de cisalhamento simples dúctil a dúctil-rúptil.

SIGA JR. et al. (1995) aponta como sendo a estruturação predominante no embasamento de Curitiba, uma foliação Sn de características dúcteis nos leucogranitos, gnaisses granulíticos e gnaisses bandados migmatizados. Segundo o autor estes planos de mergulhos geralmente altos, ora orientados para NW ora para SE, correspondem a uma foliação de transposição originada por cisalhamento dúctil. Ainda pode ser encontrada uma superfície anterior (Sn-1) pouco preservada sobre as rochas e com mergulho de baixo ângulo em relação à Sn.

SALAMUNI (1998) descreve o embasamento de Curitiba como sendo constituído por metamorfitos evidenciando característica marcante dada por uma superfície Sn, penetrativa, normalmente orientada para NE-SW, com mergulhos maiores do que 45° para NW. Posteriormente, eventos transcorrentes foram os prováveis responsáveis pela superimposição de uma deformação mais rúptil a dúctil-rúptil, orientada subparalelamente à superfície Sn. A interseção entre os planos destas duas foliações (Sn-1 e Sn) gera lineações na rocha e também estiramento mineral posicionado em baixo ângulo de mergulho, o que indica uma tectônica de cisalhamento com componente lateral ou direcional.

SIGA JR et al. (1995) denomina estas associações como um bloco tectônico que constituiria parte do Domínio Curitiba, estando limitado a norte pelas seqüências proterozóicas do Complexo Setuva e Grupo Açungui. Falhas de empurrão, provavelmente reativadas parcialmente por movimentos direcionais, fazem a articulação tectônica entre os blocos.

Segundo pesquisas de diferentes autores a respeito de reativações tectônicas, diques de diabásio deslocados por lineamentos sugerem que todo o sistema transcorrente regional deve ter sofrido movimentações posteriores ao Proterozóico.

Os estudos realizados sobre tectônica recente apontam a sua influência no modelado da paisagem atual da bacia, em sua estruturação, no controle da rede de drenagens e no atual processo de dissecação da mesma.

De acordo com esta configuração regional, a estruturação geológica influencia os aqüíferos da região, já que a circulação da água se faz ao longo das maiores descontinuidades, principalmente aquelas de direção NE-SW e NW-SE e mais efetivamente no cruzamento de ambas.

4.3 Origem e tectônica da bacia e do embasamento

A origem da Bacia de Curitiba é bem controvertida. SIEMIRADZKI (1898) atribui uma origem tectônica à mesma. CARVALHO (1934), OLIVEIRA e LEONARDOS (1943) associam a existência da bacia ao acúmulo de aluviões antigos do rio Iguaçu. MAACK (1947) defende a origem fluvio-lacustre dos sedimentos. BIGARELLA e SALAMUNI (1957) corroboram com a idéia de MAACK (*op. cit.*) sobre uma origem flúvio-lacustre para os sedimentos da bacia sob clima árido a semi-árido, tendo como base à ocorrência de margas (ou caliches) em meio aos argilitos.

BIGARELLA e SALAMUNI (1962) consideram que o elevado teor de clásticos finos, derivados da decomposição química das rochas cristalinas e das partes altas em torno do vales, serve como indicativo favorável para descrever como ocorreu o tipo de sedimentação da Formação Guabirotuba. Esta deposição e transporte teriam sido provenientes de ambiente semi-árido, ainda que a geração destes sedimentos tenha sido em clima-úmido. Neste trabalho os autores dão menor importância às causas tectônicas que influenciaram na gênese da bacia, mas não descartam a possibilidade de pequenos falhamentos terem causado represamento de algumas drenagens e assim terem contribuído no preenchimento da calha da bacia.

Quanto à idade da bacia, AZEVEDO (1981) descreve a ocorrência de esporos e pólens associados, sendo estes decorrentes, provavelmente, de uma nova mudança climática ocorrida no Pleistoceno. Segundo este autor, o conteúdo fossílifero representado principalmente de Thecamoebianos e Organófitas indica idade entre o período do Pleistoceno ao Holoceno na porção superior da cobertura

sedimentar. Considerando-se o contexto geotectônico geral provável durante a formação da calha da bacia com o início da deposição e a análise de palinofósseis encontrados em argilas da Formação Guabirotuba, SALAMUNI (1998) atribui idade já no Paleógeno, entre Oligoceno e Mioceno, para estes sedimentos.

Já as rochas do embasamento são consideradas como de idade proterozóica inferior segundo MELO et al. (1980); BASEI et al. (1992) e SIGA JR et al. (1995).

FORTIN (1989) descreve duas estruturas rúpteis regionais importantes limitando a Bacia de Curitiba a norte com um falhamento de direção NE-SW e outro a leste, com direção N-S.

A presença da terra rara lanthanita (Nd), em meio a ocorrências de caliche não só nos sedimentos da Bacia de Curitiba, assim como nas bacias de Taubaté e Resende serve para possivelmente correlacionar estas bacias, já que a lanthanita é um elemento raro de ser encontrado.

SALAMUNI (1998) aprofunda os estudos sobre a tectônica da Bacia sedimentar de Curitiba contribuindo para a melhor compreensão da evolução dos processos geológicos atuantes sobre a mesma. Neste trabalho, de consulta indispensável, uma das principais conclusões do autor é que além das influências paleoclimáticas já citadas por outros pesquisadores, "a Bacia Sedimentar de Curitiba teve a sua evolução geológica controlada por processos tectônicos. Esta evolução foi responsável tanto pelo arcabouço estrutural da bacia como pelo controle da sedimentação, evidentemente de forma associada aos fenômenos climáticos e erosivos então vigentes".

4.4 Evolução tectônica do embasamento da Bacia de Curitiba e sua relação com água subterrânea

Para que as informações referentes à água subterrânea sejam melhor interpretadas é necessária a compreensão da estruturação e da evolução tectônica no embasamento e também nos sedimentos que preenchem a Bacia de Curitiba.

Observa-se no embasamento da bacia alinhamentos estruturais marcantes que fazem parte de grandes sistemas transcorrentes regionais, de direção principal N30-60E, paralelos aos contatos tectônicos das grandes unidades geológicas da

área em estudo. Assim como a Bacia de Curitiba, outras bacias como as de São Paulo, Taubaté e Resende, encontram-se ajustadas à geometria de grandes domínios estruturais no sul e sudeste do Brasil decorrentes de eventos tectônicos sucessivos, desenvolvidos desde o Proterozóico.

A partir do Jurássico Superior teve inicio um evento tectônico na região, denominado de Reativação Wealdeniana, de direção preferencial NW-SE contrária as estruturas anteriores (ALMEIDA 1967 e 1969). Neste evento ocorreram duas fases de magmatismo: a primeira fase desenvolveu-se entre o Jurássico superior e o Cretáceo inferior e foi de caráter básico e intermediário sendo responsável por inúmeros diques e *sills*, e a segunda seguiu a primeira, desenvolvendo-se até o Terciário e com caráter alcalino representado por diques e pelos maciços da Ilha Bela, Itatiaia e Passa Quatro.

Para MACEDO (1990) este evento, configurado principalmente por intrusões básicas, representa a paralisação de um processo de rifteamento que se iniciava na região.

No período do Terciário com a reativação ao longo das falhas transcorrentes na "Faixa de Cisalhamento do Ribeira", surgiram a bacias sedimentares em estilo "*pull-apart*", dentre elas a de Curitiba (Figura 4.2).

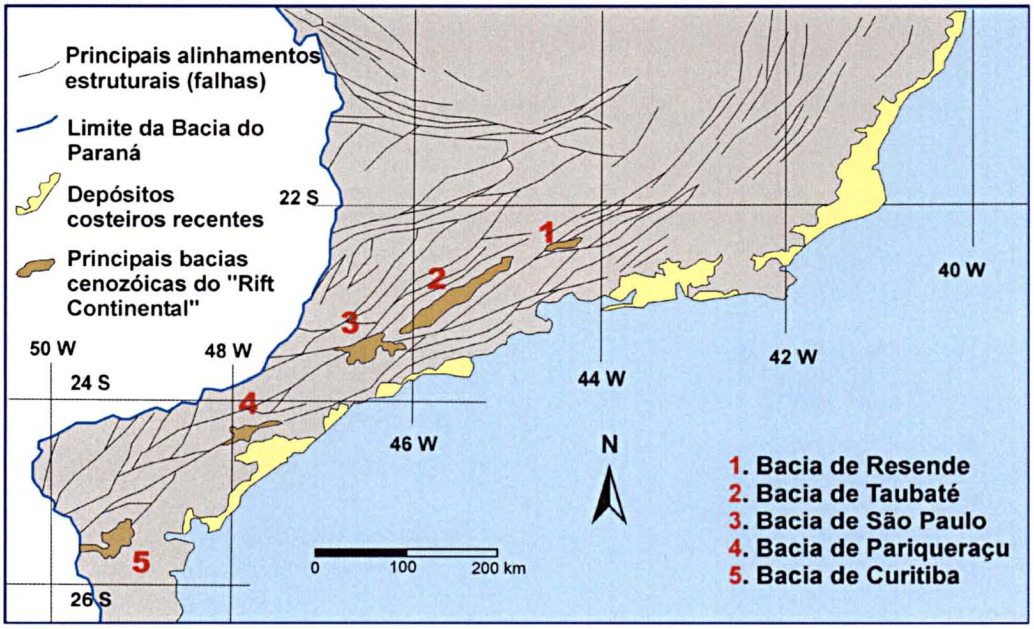


Figura 4.2: Mapa de localização das principais bacias tafrogênicas do sudeste e sul do Brasil, relacionadas ao "Rift da Serra do Mar" (Mod. SCHOBBENHAUS et al., 1984 e SALAMUNI, 1998).

Ainda dentro deste contexto RICCOMINI et al (1989), reforça a idéia de que parte da evolução tectônica da Bacia de Curitiba foi controlada por um evento chamado de "Rift continental do Sudeste brasileiro".

Dentro deste contexto SALAMUNI (1998) constata a existência de falhas e juntas refletindo episódios tectônicos superpostos. Ocorrem duas gerações de descontinuidades sendo (a) correspondente aos primeiro episódios ligados a estruturas muito antigas do pré-cambriano, Reativação Wealdeniana e ao processo tafrogenético de rifte no Mesozóico e (b) regime tectônico gerado no Cenozóico:

a) lineamentos rúpteis-dúcteis de orientação NE-SW e ENE-WSW, impressas no embasamento no pré-cambriano, e lineamentos rúpteis de direção NW-SE, originados com a separação entre as placas Sul-americana e Africana, herdados da tectônica mesozóica durante a Reativação Wealdeniana e ao arqueamento de Ponta Grossa;

b) falhas normais e transcorrentes de direção NE-SW que afetam tanto o embasamento quanto os sedimentos da Formação Guabirotuba.

Neste mesmo trabalho SALAMUNI (*op. cit.*) menciona que a abertura da cadeia Meso-Atlântica denota regime tectônico predominantemente extensional no Mesozóico médio até o Terciário inferior tendo eixo de distensão ($\sigma 3$) orientado na horizontal aproximadamente a E-W e eixo de tensão máxima ($\sigma 1$) na vertical, em escala continental, de acordo com a interpretação de diferentes autores.

A tensão máxima ($\sigma 1$), inicialmente na vertical, foi a responsável pela acentuada geração de falhas normais até ter ocorrido uma mudança de posição dos tensores. O tensor mínimo ($\sigma 3$) passou a se posicionar na vertical e o vetor de tensão máxima ($\sigma 1$) passou para a horizontal, em resposta à ação de forças contrárias vindas da reação das placas Nazca e Cocos, que começaram a atuar contra o movimento de separação entra as placas Sul-americana e a Africana. A partir desta época a fuga ou alívio de tensões se procedeu através de falhamentos transcorrentes e inversos.

Na interpretação de SALAMUNI (*op. cit.*) a cinemática compatível com um regime tectônico transcorrente derivado de cisalhamento dextral é representada por alinhamentos estruturais de direção NE-SW e ENE-WSW, que marcaram o embasamento, ao sofrerem reativação nos processos de ruptura e separação

continental durante o Mesozóico funcionam como planos transcorrentes e correspondem a planos **R** de cisalhamento do modelo de RIEDEL enquanto que os alinhamentos NW-SE representariam o **R'** cisalhamento conjugado de RIEDEL ou cisalhamento antitético de WILCOX et al. (1973). Os alinhamentos E-W corresponderiam às fraturas de distensão e os planos de cisalhamento **Y** seriam alinhamentos paralelos aos planos de cisalhamento teoricamente encontrados na bacia.

4.5 Geomorfologia

4.5.1 Considerações gerais

A importância da Geomorfologia reside na compreensão das formas de relevo já que o esculturamento da paisagem atual também está ligado a processos de erosão e sedimentação que afetam não só o relevo, mas também o comportamento da água subterrânea.

Por sua vez, os diferentes padrões de fraturas podem controlar variáveis geomorfológicas e geológicas, tais como o modelado da paisagem, a rede de drenagem local, a estratigrafia, a definição de áreas de riscos geotécnicos e o controle de fluxo da água subterrânea. Neste último caso, a boa caracterização estrutural pode determinar aquelas descontinuidades por onde há fluxo da água subterrânea e conseqüentemente apontar áreas favoráveis à sua exploração.

MAACK (1981) definiu no Estado do Paraná cinco zonas geomorfológicas principais, nas quais os movimentos epirogenéticos e tectônicos, assim como as alterações climáticas e os sistemas hidrográficos foram considerados como sendo responsáveis pela modelagem geomorfológica atual do relevo. Esta divisão corresponde a seguinte sequência:

1) Zona Litorânea
2) Serra do Mar
3) Primeiro Planalto (Planalto de Curitiba)
4) Segundo Planalto (Planalto de Ponta Grossa)
5) Terceiro Planalto (Planalto de Guarapuava)

A cidade de Curitiba e região metropolitana (RMC) ocupam parte do primeiro planalto paranaense ou Planalto de Curitiba, sendo a leste lateralmente limitada pelas escarpas da Serra do Mar e a oeste, pelo segundo planalto paranaense.

A maioria dos primeiros trabalhos sobre geomorfologia considera somente os aspectos climáticos como responsáveis pela modelagem da paisagem como foi o caso do primeiro estudo feito por AB'SABER e BIGARELLA (1961), que sistematizaram a compartimentação geomorfológica e paisagística do Estado do Paraná. A região do Primeiro Planalto Paranaense foi dividida em quatro superfícies aplainadas de relevo correspondentes a: 1) superfície fóssil Pré-Devoniana; 2) superfície do Purunã; 3) Superfície do Alto Iguaçu e 4) Superfície de Curitiba. Para estes autores estas superfícies demarcam eventos erosivos atuantes desde o Cretáceo Superior não havendo influência de processos tectônicos.

No trabalho de BIGARELLA et al. (1965), os autores continuam dando especial ênfase ao controle morfoclimático sobre o relevo da Bacia de Curitiba devido à alternância de climas úmidos e secos. Os autores ainda utilizaram os termos Pd e P, respectivamente, superfície pediplanizada e superfícies pedimentares.

NOGUEIRA (1997), em reconhecimento ao trabalho de BIGARELLA et al. (*op. cit.*), enfatiza a importância da evolução geomorfológica na área de estudo, principalmente, no que diz respeito ao fluxo de águas subterrâneas, mas acrescenta que o grau de fraturamento das rochas é também um fator decisivo no controle do aquífero fraturado do embasamento. De acordo com o autor "a medida em que a superfície Pd3 foi construída e a superfície Pd2 foi sendo erodida (AB'SABER e BIGARELLA, *op. cit.*), as rochas cársticas do Grupo Açungui, Setuva e pré-Setuva (...) foram sendo expostas (...) intensificando o fenômeno de carstificação". O fato de haver formação de reservatórios de água subterrânea em rochas cársticas situadas a norte de Curitiba em cotas mais altas, acaba favorecendo a circulação de água subterrânea a jusante, por meio da conexão de fraturas em rochas do embasamento e fraturas em diques básicos.

CANALI et al. (1981b) descrevem o primeiro planalto como sendo uma ampla superfície de erosão (superfície do Alto Iguaçu, ALMEIDA, 1952), esculpida sobre um antigo tronco de dobras (MAACK, 1947), o que gera morfologia diferenciada entre as porções setentrional e meridional da região. Os autores ainda caracterizam

as drenagens da Bacia de Curitiba como tendo padrão dentrítico, ainda que os principais coletores do rio Iguaçu apresentem padrão sub-paralelos de direção em torno de N-S.

A norte de Curitiba (Grupo Açungui), a porção setentrional apresenta relevo bastante acidentado, caracterizado por espigões e vales alongados que acompanham as direções das camadas ou de intrusões básicas, constituindo um relevo semelhante ao apalacheano (SALAMUNI, 1958). A porção meridional caracterizada pelo embasamento e pelos sedimentos da bacia origina uma paisagem mais suave em relação à parte setentrional. As colinas são mais arredondadas e a topografia é mais ondulada e cortada pelo rio Iguaçu e seus afluentes.

AB'SABER (1966), em um estudo mais detalhado, acrescenta que o planalto colinoso de Curitiba apresenta altitudes variáveis entre 880 e 930 m, contendo amplas planícies de inundação, que se estendem por mais de 800 km^2 formando calhas aluviais.

Para HASUI (1990), toda a morfogênese do território brasileiro é resultado de processos tectônicos que marcaram abertura do Atlântico e envolveram soerguimentos, horstes e grábens gerados por falhas e domos.

SALAMUNI (1998) em seus estudos demonstra as influências da estruturação tectônica nos aspectos geomorfológicos da Bacia de Curitiba que permitem reconhecer ou interpretar uma evolução morfotectônica da área. No trabalho deste autor são delimitados pelo menos cinco domínios geomorfológicos, correspondentes a zonas homólogas ou áreas que possuem as mesmas características morfológicas.

Estes sistemas de relevo são representados por:

I) Sistema de planície ou terrenos aluvionares;

II) Sistema de colinas (unidades de topo alongado);

III) Sistema de colinas (unidade de topo plano);

IV) Sistema de montanha;

V) Sistema de morros;

No atual estudo, a área pesquisada esta inserida dentro dos domínios I, II e III. Na figura 4.3 o contorno em azul claro mostra os limites do município de Curitiba e os sistemas geomorfológicos citados.

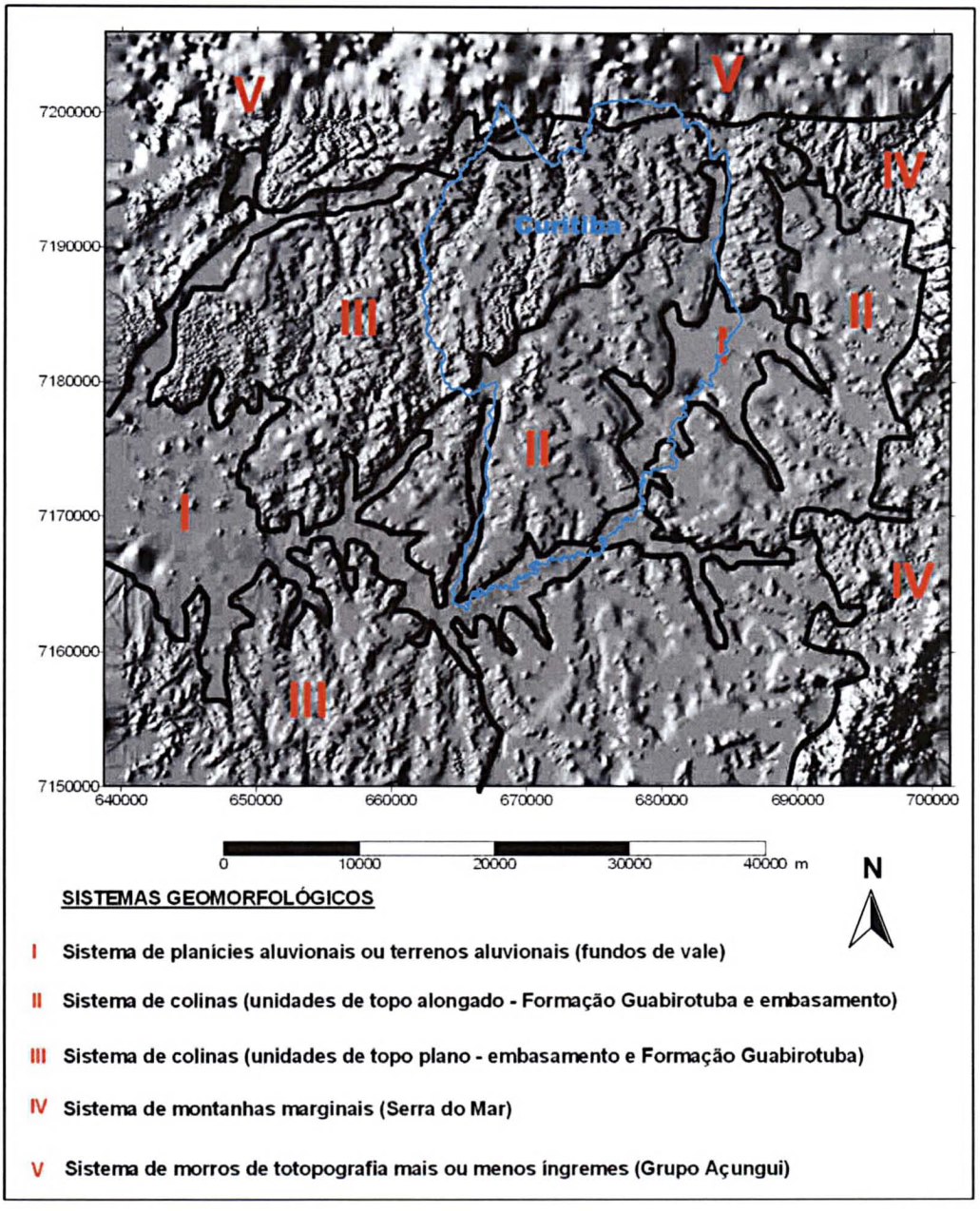


Figura 4.3: Sistemas geomorfológicos interpretados a partir de imagem digital gerada através de dados planialtimétricos de cartas na escala 1:50.000 da região de Curitiba. O contorno em azul mostra os limites da cidade (mod. de SALAMUNI, 1998).

5 CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO

5.1 Tipos litológicos observados no município de Curitiba

Na área de estudo, as rochas cristalinas aflorantes do embasamento são representadas principalmente por migmatitos indiferenciados e corpos gnaissicos-graníticos. Na porção noroeste são observados metassedimentos justapostos sobre estas rochas cristalinas por meio de falhas. Cortando estas litologias na direção NW-SE, observam-se diques de diabásio formados por corpos intrusivos de rochas básicas. Sobrepostos a estes conjuntos ocorrem os sedimentos da Formação Guabirotuba e da Formação Tinguis e os depósitos aluvionares recentes, recobrindo as camadas sedimentares e as rochas do embasamento de forma descontínua.

5.1.1 Embasamento

Os gnaisses-granitos encontrados no embasamento da bacia derivam não só de corpos graníticos em geral, mas também de rochas de composição granodiorítica. Freqüentemente no mesmo afloramento é possível verificar mais de um tipo litológico associado. Nas porções mais graníticas da rocha é comum ocorrer pegmatização com cristais de quartzo e feldspato bem desenvolvidos que chegam a atingir até 15 cm de largura. Também são observadas injeções róseas quartzo-feldspáticas, provavelmente de origem posterior à formação da rocha, indicando fase de migmatização. Minerais porfiróides como quartzo e feldspatos podem ser encontrados estirados e rotacionados algumas vezes apresentando sombras de pressão. Nas porções mais gnáissicas do embasamento, o bandamento pode se apresentar bem desenvolvido havendo nas bandas de composição mais máfica, cristais de hornblenda que atingem até 3 cm de comprimento em direção ao seu eixo maior. Nas bandas mais claras (leucocráticas), a matriz é rica em quartzo e feldspato potássico. Este bandamento gnáissico ora se apresenta bem evidenciado, contendo bandas largas de 30 cm a 1,5 m de espessura, ora apresenta bandamento composicional milimétrico a centimétrico. No ponto 12 o bandamento gnáissico é

muito bem desenvolvido na rocha gnáissica migmatizada. Verificam-se porções graníticas (muito feldspato potássico) injetadas em meio à rocha sugerindo ter ocorrido quase fusão (anatexia).

Nos migmatitos presentes no embasamento descritos por SALAMUNI (1998) as faixas leucocráticas são paralelas às faixas melanocráticas, indicando intensa remobilização fluidal onde geralmente o bandamento composicional é paralelo à foliação Sn de direção NE-SW ou ENE-WSW.

Em geral a textura da rocha pode variar desde bem porfirítica, como no caso das porções graníticas e mais pegmatíticas, até textura muito fina como geralmente acontece nos gnaisses de composição granodiurítica.

No ponto 24 (Pedreira do Atuba) é freqüente a presença de porções da rocha migmatizadas aonde se observam minerais rotacionados, que formam sombra de pressão, indicando regime mais dúctil durante a deformação. Nas porções mais graníticas verificam-se injeções de quartzo e a formação de sigmóides. O epidoto é freqüentemente observado entre os planos de fratura.

No ponto 26, além da mineralogia esperada, foi verificada a presença de sulfetos (possivelmente pirita) de proporções milimétricas, formas quadradas e coloração acobreada pontilhando toda a rocha. No ponto 23 foi observado um pouco de clorita entre os planos indicando temperatura um pouco maior durante a deformação.

Calcita e epidoto também foram observados preenchendo alguns planos de fraturas na maioria dos afloramentos visitados do município.

De acordo com uma verificação feita em descrições de perfis de sondagens para poços tubulares profundos e sondagens de solos, foram encontradas cotas superiores do embasamento a profundidades de até 77 m, estando estas rochas recobertas pela Formação Guabirotuba. A norte da Curitiba, a exemplo da região de Santa Felicidade, parques Tanguá (ponto 01) e Tingui (ponto 02) e ainda pedreira Paulo Leminsky (ponto 23), pedreira Pussoli (ponto 25), pedreira Maringá (ponto 26) entre outros locais, são verificados os pontos aonde o embasamento aflora mais próximo à superfície. Em algumas localidades a sudoeste da cidade (ponto 07) pode ser verificado o contato do embasamento com os sedimentos da bacia. Na base deste contato observou-se nível rudáceo de até 20 cm de espessura e ainda forte processo de laterização afetando principalmente o topo das rochas do

embasamento, encontrando-se crostas lateríticas de até 1 cm de espessura. Levantamentos gravimétricos no município de Curitiba realizados por GEMAEL e DOUBEK (1975), através de 800 estações gravimétricas, em uma área de 432 km^2, apontam as porções leste e central como sendo as de maior espessura dos sedimentos. No trabalho de SALAMUNI (*op. cit.*), foram executados perfis de caminhamento de direção ENE-WSW, secionando algumas destas anomalias gravimétricas interpretadas como descontinuidades estruturais inseridas no embasamento e a conclusão do autor também corrobora com as indicações produzidas no mapa gravimétrico.

Em certos locais da Bacia, é comum verificar que o intemperismo químico atuando sobre as rochas aflorantes do Complexo Atuba é bastante adiantado, originando um manto de alteração de espessura superior a 10 m, o que muitas vezes dificulta a diferenciação entre o regolito e os sedimentos pertencentes à Bacia (CANALI, 1981a). As rochas do embasamento, principalmente as de composição gnáissico granítica, se desagregam formando um regolito arenoso e, neste caso, é necessário um cuidado maior para não serem confundidos os depósitos arcoseanos da Formação Guabirotuba com o manto alterado do embasamento, abundante em grãos de quartzo e feldspatos.

5.1.2 Rochas metassedimentares

Estas rochas são verificadas apenas a noroeste da área, no bairro da Lamenha Pequena. Estes metassedimentos fazem parte da Formação Capiru, do Grupo Açungui, do Proterozóico Superior. Segundo MARINI (1970), as rochas da Formação Capiru correspondem a metassedimentos epimetamórficos onde camadas de dolomitos (litologia típica dominante na parte inferior da unidade), filitos, metarritmitos e, subordinadamente, mármores calcíticos e quartzitos se apresentam interdigitados por falhas de empurrão e/ou cavalgamento constituindo uma característica marcante nessa unidade.

Através de zonas de falhas de empurrão, estas rochas estão sobre o embasamento cristalino.

5.1.3 Intrusivas Básicas (diques)

Na área de estudo alguns foram os locais observados com ocorrência de diques em meio ao embasamento. No ponto 01 (Pedreira Tanguá), é possível observar um dique deslocado por falha normal decimétrica (Foto 5.1).

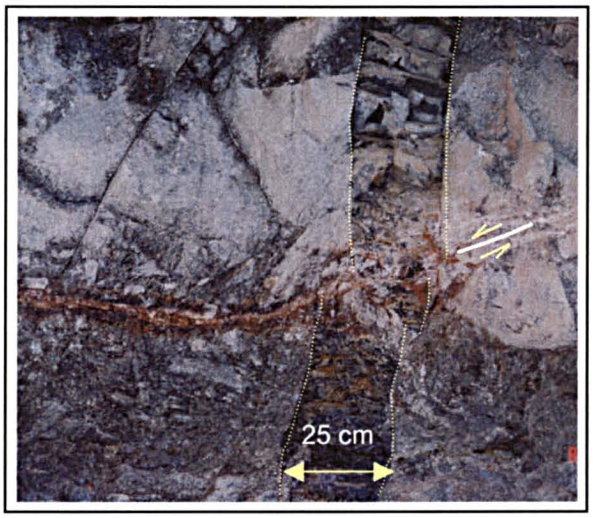
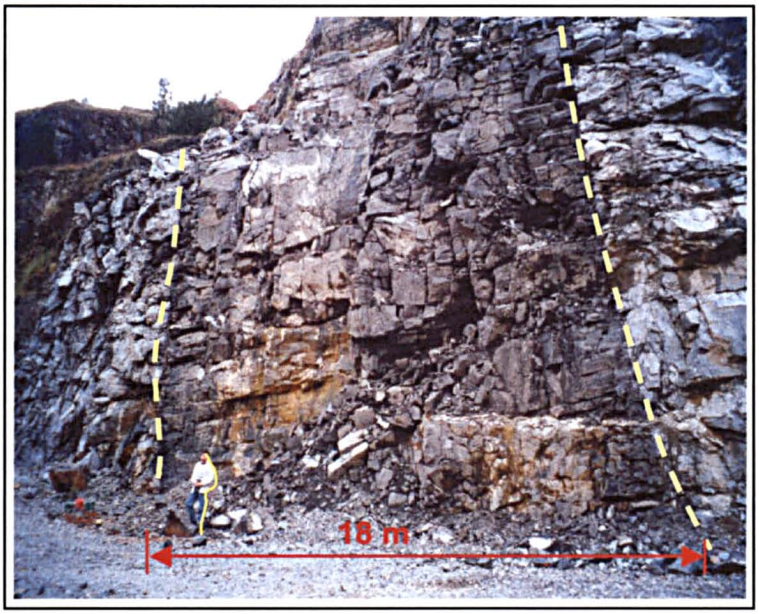


Foto 5.1: Dique deslocado por falha normal de rejeito decimétrico (ponto 01, pedreira Tanguá).

Este fato serve como um forte indicativo de tectônica mais recente nas rochas da região o que corrobora com os estudo de SALAMUNI (1998). A atitude do dique é N30W/90 e a atitude do plano que parece deslocar o dique é de N57W/9NE.

Nas imediações do Parque São Lourenço (ponto 27) foi verificada a presença de dique de microgabro onde as rochas de coloração ocre se encontram bastante alteradas intempericamente, apresentando decomposição esferoidal bem evidenciada.

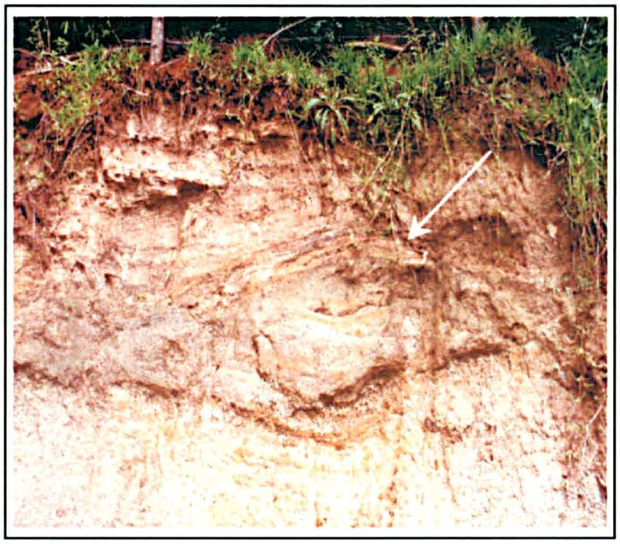


No ponto 26 (Pedreira Maringá, Foto 5.2) um espesso dique de aproximadamente 18 m de largura também pode ser observado cortando as rochas do embasamento.

Foto 5.2: Dique espesso de aproximadamente 18 m de largura cortando as rochas do embasamento (Pedreira Maringá, ponto 26).

5.1.4 Formação Guabirotuba

Na área de pesquisa os bancos carbonáticos representados pelos depósitos de caliches, são situados entre as porções mais argilosas da seqüência sedimentar, podendo apresentar estrutura plana paralela como o observado no ponto 13.



Neste afloramento estes depósitos de coloração cinza-claro a creme apresentam ora continuidade lateral, de forma tabular, ou então, ocorrem como lentes anastomosadas em meio as outras seqüências sedimentares (Foto 5.3).

Foto 5.3: Depósito de caliche depositado em meio as outras seqüências sedimentares da Formação Guabirotuba.

De acordo com COIMBRA et al. (1985) foi descrita a primeira ocorrência mundial de lanthanita-(Nd) nestes calcários.

Nos níveis arcoseanos os grãos têm forma subangulosa a subarredondados, formando camadas de granulometria grosseira contendo clastos e grãos de quartzo e feldspato em abundância em meio a matriz pouco consolidada. De acordo com BECKER (1982) as areias arcoseanas contém entre 20 a 40% de feldspatos. O tamanho destes clastos é variado, desde submilimétrico até centimétricos.

Subordinadamente foram observados ainda níveis que podem ser considerados como cascalho fino (0,3 mm a 1,5 cm de comprimento em direção ao seu eixo maior).

Em alguns afloramentos foi observado granodecrescência ascendente (*up ward*) nos termos mais grossos (ponto 13). Camadas bem arenosas vão afinando para o topo e então se alternam com camadas mais síltico argilosas. As camadas mais finas tendem a ser mais selecionadas do que os arenitos mais grossos. Estes arcóseos e areias arcoseanas têm coloração desde cinza muito claro até tons mais ferruginosos a avermelhados no caso da rocha se apresentar mais alterada. No ponto 14 estão presentes, em meio às camadas mais arenosas, estruturas cruzadas

levemente acanaladas na base e estrutura do tipo granocrescente entre estas estruturas cruzadas.



É comum a presença de crostas lateríticas e a plintificação ou mosqueamento nos processos iniciais de alteração nestes sedimentos, ocorrendo principalmente nos estratos mais argilosos, mas também nos arenosos, porém não tão bem evidenciados. Estas concentrações de ferro chegam a formar níveis de até 30 cm de espessura (ponto 01, Foto 5.4).

Foto 5.4: Nível apresentando processo intenso de laterização formando concentrações de ferro (indicadas pela seta branca).

No afloramento do ponto 01, nas camadas mais argilosas, é freqüente observar-se estratificações plano paralelas e nas camadas mais sílticas é comum ocorrer o pastilhamento dos sedimentos. No ponto 03 foi verificada uma camada com 1 m de espessura contendo quase que exclusivamente argila de cor esverdeada e alta plasticidade chegando a apresentar até mesmo estrias de deslizamento muito finas entre os níveis depositados. A argila causa facilmente estas estrias devido à sua plasticidade. No ponto 11, nos níveis mais argilosos, parece haver em meio a este sedimento, pedaços de material orgânico (proporções milimétricas) distribuídos aleatoriamente em meio ao pacote. Uma interpretação possível é de que esta seqüência sedimentar seja uma deposição mais jovem que a própria Formação Guabirotuba, ou então poderia ser apenas microfraturas preenchidas com argila.

A freqüente alternância entre camadas mais finas com camadas de granulometria mais grossa indica muita variação de energia durante a deposição. Ocorrem ainda estruturas de carga (ponto 14) e leitos rudáceos contendo quartzo, feldspatos, clastos e ainda pedaços de rocha granítica, quartzitos, migmatitos e gabros, indicando alta energia de deposição e sugerindo que a provável fonte destes materiais venha a ser a dos granitos e rochas associadas da Serra do Mar, como já

havia atestado SALAMUNI (1998). No trabalho deste autor foi feita uma descrição e discussão detalhada dos sedimentos da Bacia de Curitiba.

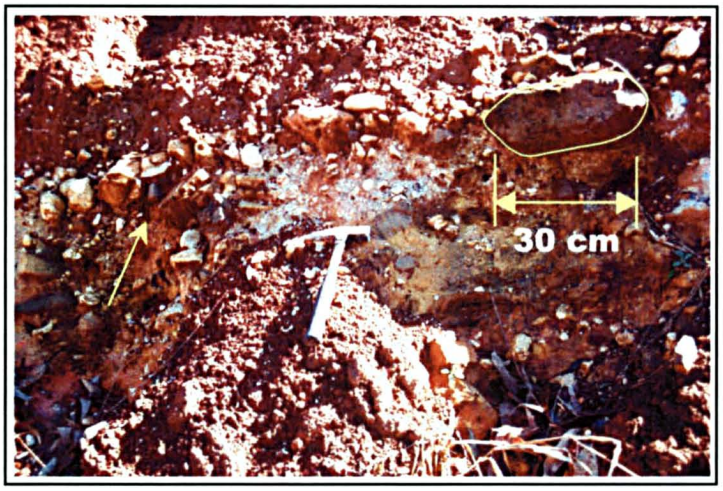


Foto 5.5: Nível contendo seixos e clastos desde 1 cm até 30 cm de largura (cascalheira).

A granulometria nestes depósitos é bem variada, caracterizando uma matriz heterogênea, portando clastos desde 1 cm até seixos de 30 cm, a exemplo do ponto 21 (Foto 5.5). Neste afloramento observa-se um nível rudáceo apresentando cascalheira de mais ou menos 2 metros de espessura sobreposto ao embasamento cristalino.

Os seixos encontrados são originados de quartzitos, quartzo e muito material retrabalhado do embasamento. Esta heterogeneidade na matriz síltico arenosa, com porções mais argilosas contendo seixos e clastos angulosos a subangulosos, sugere deposição por fluxo de massa.

O depósito apresenta cor avermelhada originada, provavelmente, devido à alteração e laterização dos níveis sedimentares. Nas camadas menos alteradas é possível verificar a cor natural em tons mais acinzentados da matriz síltico argilosa.

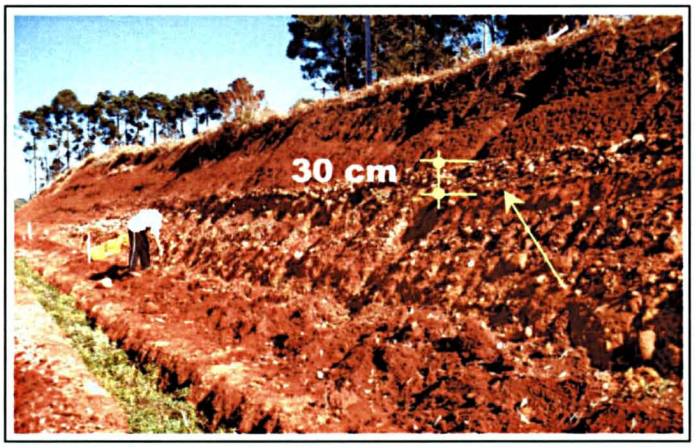


Foto 5.6: Nível melhor selecionado contendo seixos e clastos com até 15 cm de largura e pouca argila em meio a matriz.

Quase no topo desta sequência (ponto 21, Foto 5.6) ocorre estrutura do tipo *debris flow,* havendo um nível melhor selecionado. Esta mudança na deposição poderia ser interpretada como um hiato qualquer onde parou de depositar preferencialmente por fluxo de massa.

O nível a seguir depositado, apresenta pouca argila em meio a matriz e uma maior ordenação entre os clastos. Esta camada forma um nível de 30 cm de espessura.

Posteriormente, parece ter ocorrido um novo ciclo sedimentar (fluxo de massa), no entanto, verifica-se pela diminuição no tamanho dos seixos e cascalhos, que a energia durante a deposição foi menor. A orientação observada entre os seixos e clastos foi maior, ocorrendo em níveis preferenciais.

5.1.5 Depósitos aluvionares

Os depósitos aluvionares da área são caracterizados por uma cobertura superficial, na maioria das vezes, de origem fluvial e também coluvionar, sedimentados por rios meandrantes e por extensas inundações nas várzeas formando pequenos terraços ou planícies de inundação ao longo do leito de rios. CANALI (1981b) menciona que as camadas destes depósitos não excedem 15 m de espessura.

5.2 Aqüíferos no município de Curitiba e região metropolitana

Na área de estudo os sistemas de aqüíferos existentes são três sendo estes representados pelas rochas do embasamento (Complexo Atuba), depósitos aluvionares recentes e eventualmente lentes arcoseanas da Formação Guabirotuba. Dentre os sistemas aqüíferos acima citados, os principais são aqueles hospedados em fraturas e juntas que estruturam as rochas do embasamento.

O aqüífero do embasamento é formado pelas rochas fraturadas do Complexo Atuba, característico de aqüíferos fissurais onde a circulação das águas se faz através de descontinuidades estruturais.

O presente trabalho é desenvolvido exclusivamente através dos dados hidrogeológicos do aqüífero fissural representado pelo embasamento da Bacia de Curitiba. Os sedimentos sobrepostos, desta bacia, principalmente da Formação Guabirotuba, são considerados como aquitardos, com pouquíssima expressão, do

ponto de vista de volume de vazão, mesmo as lentes areno-siltosas ali encontradas (SALAMUNI, 1998). Portanto, tendo em vista a caracterização dos sedimentos da Bacia de Curitiba feita por este autor, seria mais conveniente não utilizar a denominação de aqüífero para a Formação Guabirotuba, como tem sido informalmente apresentada na literatura, já que a mesma é composta predominantemente por argilas.

Para ROSA FILHO et al. (1998), as águas presentes nos migmatitos e gnaisses do Complexo Atuba são apropriadas para consumo humano, sendo classificadas como bicarbonatadas cálcio-magnesianas, contendo teores de sólidos totais dissolvidos entre 100 mg/l e 150 mg/l, pH entre 6,5 e 7 e dureza inferior a 100 mg/l de $CaCO^3$.

Nos aqüíferos aluvionares, as camadas de areias e cascalhos que preenchem a calha do rio Iguaçu, são os sedimentos que mais merecem destaque sendo favoráveis no armazenamento de águas subterrâneas.

Na região metropolitana de Curitiba, SALAMUNI (1981) fez a tentativa de subdividir a área em zonas correspondentes a faixas de vazões médias, adotando como critério básico o condicionamento geológico e o número de sondagens. O autor aponta, na região correspondente ao município de Curitiba, valores de vazões médias na faixa de 2 a 5 m^3/h e em segundo plano entre 3 a 8 m^3/h. O zoneamento dos aqüíferos foi realizado em função das litologias e estrutura das diferentes formações. Já com relação às vazões obtidas especificamente na cidade de Curitiba, SALAMUNI (1998) aponta algumas regiões aonde foram observados poços perfurados no embasamento com alta produtividade ou vazão específica. Estas ocorrências pontuais foram verificadas próximas a alinhamentos estruturais, na porção norte do município (região do Bairro de Santa Cândida), região sul e sudeste (Bairro da Cidade Industrial), região oeste (Bairro Seminário, próximo ao rio Barigui) e porção central. O autor ainda comenta o fato de que, em função da maior espessura dos sedimentos e do menor grau de fraturamento das rochas do embasamento em relação às bordas da bacia, é de se esperar que menores vazões sejam encontradas na porção central da Bacia de Curitiba. Porém ocorre uma série de exceções, tendo sido verificados poços com vazão atingindo até 35 m^3/h no centro da cidade. Alguns outros exemplos de poços produtivos podem ser vistos na tabela da figura 5.1.

ID	Proprietário	Data	Profundidade	Vazão
852	ARAMIS CHAIN	1998	252,00	4,50
902	HOTEL MABU LTDA.	1900	390,00	4,66
418	HOTEL SAN MARTIN	1975	204,00	4,80
1264	CEFET (POCO 01)	1995	183,00	4,80
187	COND. ED. ALBERTO KLASS	1990	100,00	5,00
411	HOTEL CARAVELLE-B.P.TURISMO	1971	202,00	5,00
416	HOTEL LANCASTER (A.N.PAULA)	1970	66,00	5,00
702	TOKUHO OZIMA (HOTEL NIKKO)	1987	90,00	5,00
929	SR. DORVILIO MAFFEIZ	2000	100,00	5,00
897	SHOPPING CURITIBA (POCO 02)	1993	100,00	6,54
399	HOSPITAL PINHEIROS LTDA	1969	60,00	6,60
1116	HOTEL MARCASSA (322-0505)	1997	93,00	6,60
111	COND. ED. FORTI MARTINS	1988	80,00	7,00
701	TIVOLI HOTEL	1992	120,00	9,00
968	COND. ED. FERNANDES DE LIMA	2000	141,00	9,12
867	CEFET (POCO 02)	2000	138,00	10,70
419	HOTEL SAVOY LTDA	1992	100,00	11,31
275	ELO EMPREENDIMENTOS LTDA. (HOTEIS EI	1989	250,00	12,00
409	HOTEL BOURBON (HOTEL.IGUACU)	1970	100,00	12,00
420	HOSPITAL DAS CLINICAS (POCO 02)	1992	110,00	12,38
388	HOSPITAL DAS CLINICAS (POCO 01)	1983	130,00	14,40
1055	SENTINELA VIGILANCIAS S/C LTDA	1990	100,00	14,67
161	COOP. CENTRAL DE ALIMENTOS DO PARAI	1983	120,00	15,20
150	CIRCULO MILITAR DO PARANA	1977	127,00	18,00
1016	HOTEL PARANA SUITE	1998	150,00	19,00
904	MOTEL PALACEMAR LTDA	2000	90,00	19,80

Figura 5.1: Exemplos de poços perfurados no centro da cidade com valores de vazões acima de $5m^3/h$.

Para dar uma visão mais ampla na área de estudo da distribuição dos poços em geral e daqueles mais produtivos, foram escolhidos três intervalos de altas vazões representados na Figura 5.2 por pontos plotados sobre o MDR. Os contornos em azul e vermelho mostram os limites equivalentes a divisão regional estabelecida pelo IPPUC (2001), pela qual a cidade é subdividida em oito setores: Santa Felicidade, Matriz, Boqueirão, Pinheirinho, Boa Vista, Bairro Alto, Portão e Cajuru.

Na figura 5.2 os pontos correspondentes aos poços tubulares profundos representam somente os poços relacionados ao aqüífero fraturado do embasamento da Bacia de Curitiba. Os dados referentes a Formação Guabirotuba e aos depósitos aluvionares não são tratados nesta pesquisa.

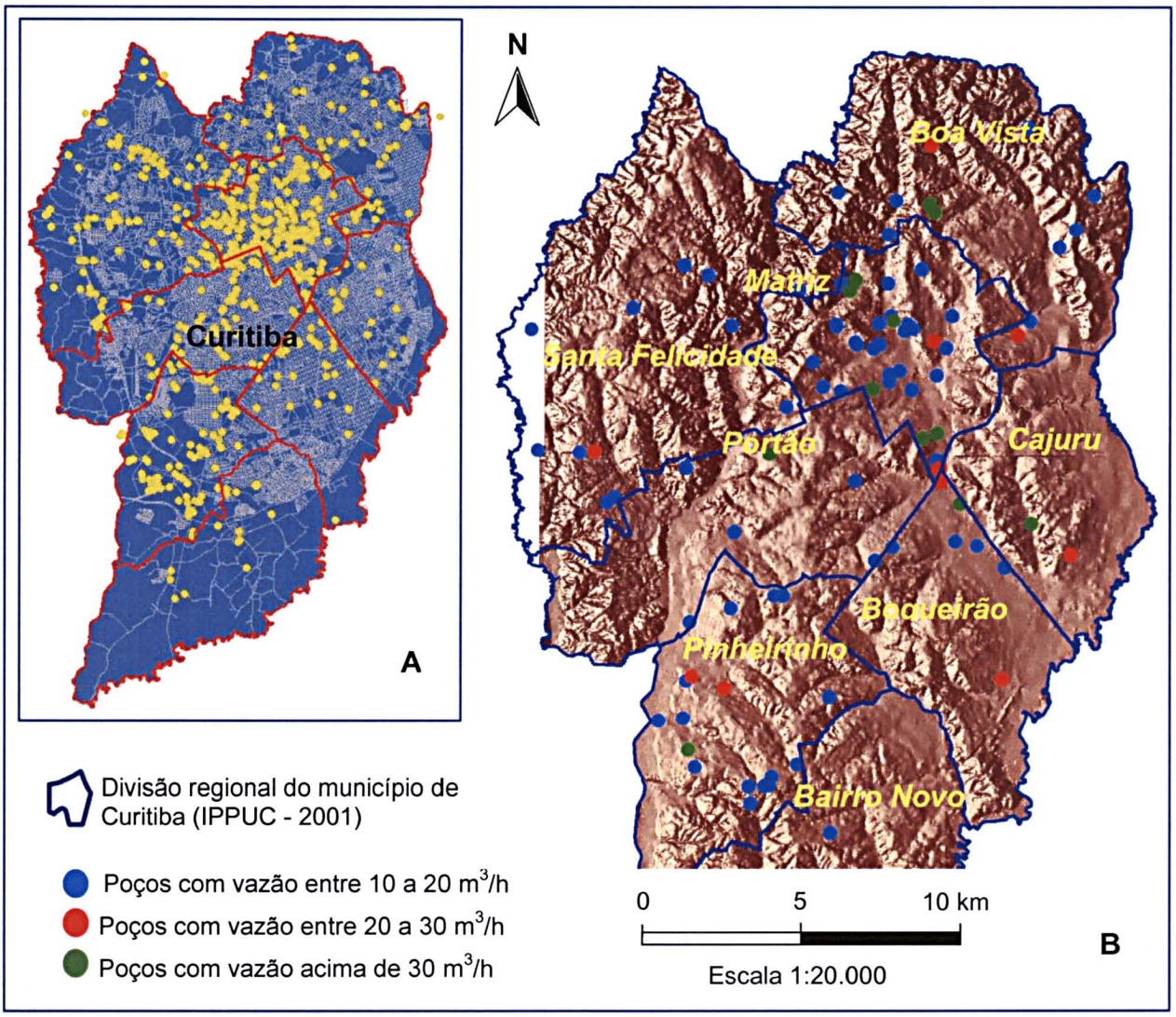


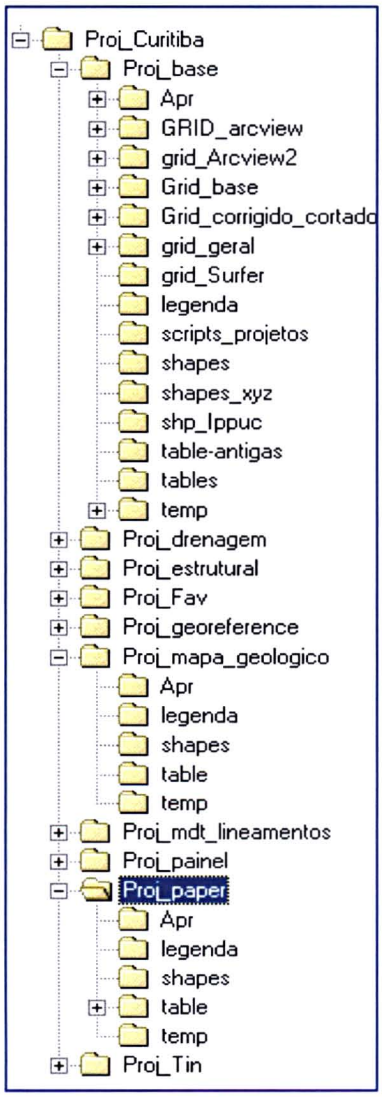
Figura 5.2: No quadro **"A"** é mostrado em amarelo a distribuição geral dos poços tubulares na área de estudo; em cinza são verificados os trechos viários que cortam a cidade. O quadro **"B"** é um detalhe maior onde foram sobrepostos ao MDR os pontos correspondentes aos poços que contém as maiores vazões obtidas dentro do município de Curitiba, totalizando 100 casos; em azul escuro foi plotado a divisão regional da área de acordo com IPPUC (*op.cit.*).

6 DESENVOLVIMENTO DAS INFORMAÇÕES BASE

6.1 Base de dados em ambiente de SIG (Sistema de Informações Geográficas)

O objetivo neste capítulo é esclarecer como foi feita a organização do banco de dados facilitando o acesso às informações base nele contidas.

A base de dados em meio digital reúne informações de campo, consultas bibliográficas, mapas cartográficos, dados geológicos, hidrogeológicos, estruturais, geoestatísticos e morfogeológicos, organizados dentro do ambiente de SIG através do *software* gerenciador ARCVIEW v. 3.2®, no qual cada tema abordado foi salvo dentro de pastas chamadas de projetos conforme ilustra a figura 6.1.



A organização da estrutura base do banco é feita de acordo com um critério próprio, segundo cada pesquisador.

Para facilitar o acesso do usuário a um determinado assunto contido no SIG, os diferentes projetos foram nomeados, nesta pesquisa, de acordo com o tipo de análise realizada evitando o superadensamento dos diferentes níveis de informações em uma única pasta. Durante as análises, freqüentemente são criados, de forma automática, inúmeros arquivos temporários e os mesmos quando não renomeados, ou não armazenados de forma conveniente, podem ser perdidos ou confundidos com outros arquivos.

Figura 6.1: Estrutura base do banco de dados criado nesta dissertação.

No banco de dados cada projeto contém o seguinte conjunto de informações:

- **"Proj_base":** informações base, tabelas com dados hidrogeológicos, molduras, contornos base e *grids* base referentes ao modelo digital de relevo;
- **"Proj_drenagem":** traçado da rede hidrográfica;
- **"Proj_estrutural":** análises estruturais, mapas morfoestruturais, zonas homólogas e cruzamento de SIGs com os dados obtidos em campo;
- **"Proj_Fav":** análises referentes ao método de favorabilidade;
- **"Proj_georeference":** imagens e cartas georeferenciadas;
- **"Proj_mapa_geológico":** litologias da área organizadas na forma de *shape files* (formato gerado pelo *software* ARCVIEW v. 3.2® para as variáveis vetorizadas);
- **"Proj_mdt_lineamentos":** traçados referentes aos lineamentos de relevo tendo como base o MDR e os alinhamentos de drenagens;
- **"Proj_painel":** análises referentes a temas para painéis de congressos e demais apresentações em público;
- **"Proj_paper":** temas referentes a artigos e publicações;
- **"Proj_tin":** mapa de declividades e demais análises que envolvam índices de declividade de terreno;
- **Proj_geoestatística:** temas referentes à modelagem geoestatística;

Seguindo adiante nesta organização, dentro de cada projeto foram criadas sub-pastas contendo separadamente as informações de acordo com o seu formato, ou seja:

- **Apr:** nome do projeto que contém as análises realizadas (o arquivo é salvo pelo *software* ARCVIEW v. 3.2® no formato ".apr");
- ***grids*:** arquivos do tipo matricial de *pixels*, salvos no formato ".grd";
- **legendas:** arquivos de legendas (formato ".avl");
- ***scripts*:** como o próprio nome diz, pasta que contém os *scripts* utilizados (formato ".ave");
- ***shapes*:** arquivos no formato *shape file*;
- **tabelas:** arquivos no formato ".dbf";

- **temp:** pasta para arquivos temporários;

A maneira como as informações foram estruturadas neste banco de dados, foi função da grande quantidade de arquivos gerados em diferentes formatos, possibilitando que a subdivisão em projetos e pastas distintas tornasse muito mais rápido e lógico o acesso às informações, facilitando as análises e evitando a confusão dos temas.

6.2 Aquisição e estrutura dos dados base

Os dados são continuamente alimentados, corrigidos e revisados havendo uma constante manutenção dos diferentes níveis de informações, à medida que outras bases são implantadas e outros projetos são criados.

A criação do banco de dados em ambiente de SIG a partir da aquisição dos dados, possibilitou que uma variada gama de informações fossem armazenadas, obtidas de atividades descritas abaixo:

- Levantamento em empresas privadas de sondagem para água subterrânea, dos perfis e dados sobre os poços tubulares profundos do município de Curitiba para gerar um cadastro atualizado destas informações até o ano de 2001. Este cadastro foi montado em meio digital e pode ser lido com facilidade por meio de planilhas automáticas em formato "xls" facilitando a consulta do usuário;
- Trabalhos de campo para localizar as coordenadas dos poços tubulares profundos com ajuda de GPS de mão, do tipo Garmin Etrex (12 Chanel), com erro de aproximação entre quatro e vinte metros. No total foram georeferenciados neste trabalho 628 poços tubulares sendo necessários em torno de quarenta e cinco dias de trabalhos de campo;
- Correção e digitalização de curvas de níveis e pontos cotados inexistentes ou contendo erros e distorções nas bases planoaltimétricas adquiridas da COMEC, em escala 1:10.000, referente a área de estudo. O *software* utilizado foi o AUTOCAD v. 2000®;

- Visitas a afloramentos, cortes de estrada e pedreiras para caracterizar e medir planos de fraturas e falhas discriminando os padrões das famílias existentes, geologia e circulação de água relacionada às estruturas. Estas informações foram adicionadas a planilhas em formato "xls" e depois incorporadas ao banco de dados georeferenciado (SIG);
- Análise estrutural das informações obtidas em campo, através de diagramas de rosetas obtidos por meio do *software* de análise estrutural STEREONETT 2.4®;
- Digitalização em AUTOCAD v.2000® das direções médias das falhas e fraturas tendo como base (imagem *raster*) os diagramas de rosetas criados no STEREONETT 2.4;
- Análise estatística e geoestatística utilizando os *softwares* STATISTICA v.6® e geoR v. 1.10-2 (*software* gratuito).
- Criação de figuras e ilustrações com auxilio dos *softwares*, Adobe PHOTOSHOP v. 6®, FREEHAND v.8®, CorelDRAW v. 9® e CorelPHOTO-PAINT v. 9®;

6.3 Cadastro de poços tubulares profundos

Os dados coletados referentes às sondagens para água subterrânea totalizam 1297 poços tubulares profundos, sendo que deste universo 770 dados referem-se a poços perfurados entre os anos de 1950 e 1990, informações estas anteriormente adquiridas pelos professores Riad Salamuni e Eduardo Salamuni, constantes do arquivo pessoal de ambos.

Tendo a colaboração da maioria das empresas privadas de sondagens para consulta de informações, foi feita a atualização deste cadastro a partir dos anos 1990 até 2001 ampliando este universo para 1297 poços tubulares profundos perfurados no município de Curitiba e arredores.

Diretamente dentro dos limites do município de Curitiba constam, neste cadastro, 867 poços considerando-se ainda a existência de pelo menos mais 200 poços, cujos registros não se obteve acesso.

Um fato alarmante observado durante as etapas iniciais dos trabalhos de campo, após o georeferenciamento dos poços tubulares, foi o adensamento de sondagens em diversas áreas da cidade de Curitiba, principalmente no centro e bairros adjacentes. Várias foram as reclamações de proprietários de poços, principalmente em condomínios, quanto à nítida diminuição da vazão após a construção de outros poços nas vizinhanças, apesar de se observar que a falta de manutenção dos poços tubulares também é responsável para a perda de qualidade do funcionamento dos mesmos. É muito provável que estejam ocorrendo interferências devido à proximidade e adensamento entre os poços de captação da água subterrânea no aqüífero fraturado. Na região do Bairro Cidade Industrial, a maioria das sondagens é realizada em terrenos de grandes empresas e indústrias e, com a crescente demanda na exploração de água subterrânea, também foi constatada a diminuição na produtividade de vários poços devido à proximidade daqueles construídos nas vizinhanças já pré-existentes.

Como não há um controle quanto ao posicionamento dos poços perfurados na região abordada, quando não são consideradas as limitações físicas do aqüífero, pode ocorrer a sobrexplotação do mesmo, fato este já citado por NOGUEIRA (1997). Com o rápido crescimento demográfico e a pressão ainda maior dada pela demanda contínua no consumo de água, o problema de super explotação localizada mostrou claramente ter alcançado proporções ainda maiores, existindo relatos de poços que foram desativados por se apresentarem improdutivos, após algum tempo de uso normal.

6.4 Ambiente de SIG e poços tubulares profundos

No ambiente de SIG, cada arquivo referente a um poço tubular profundo tem seu georeferenciamento relacionado a uma tabela de atributos e ao cadastro atualizado até março de 2001 (Figura 6.2). Assim qualquer combinação contendo informações sobre vazão, profundidade, geologia, perfis construtivos e demais características hidrogeológicas, de qualquer um dos poços, pode ser visualizada em um contexto espacial em relação ao outro.

Em campo, foram obtidas as coordenadas geográficas “x” e “y” de cada poço tubular profundo com auxílio de GPS de mão. Para obter a cota do terreno foram plotados em computador sobre o MDR, os pontos contendo as coordenadas “x” e “y”. A partir da interpolação deste plano de informações com o modelo digital de relevo foram subtraídos os valores referentes à variável “Z” (cota) dos poços.

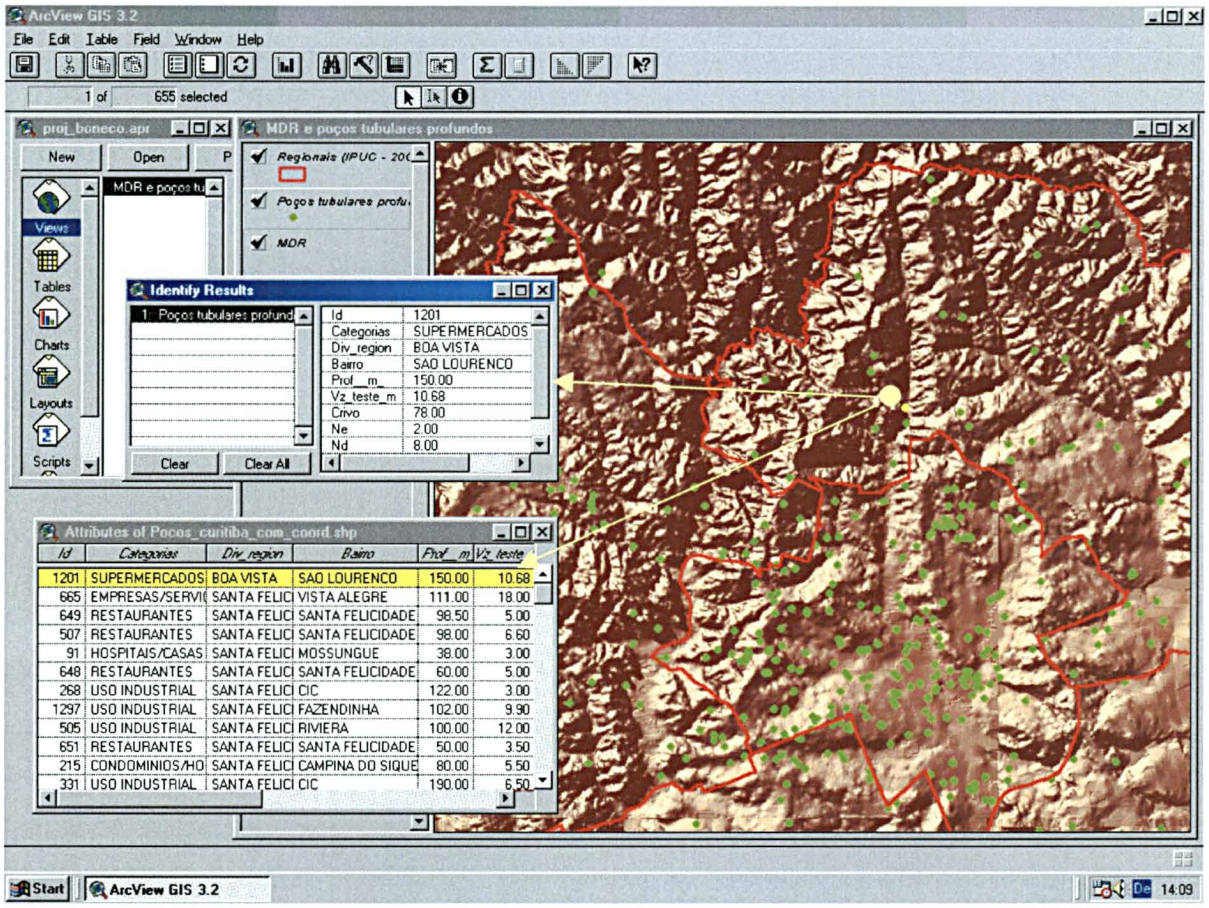


Figura 6.2: Quadro mostrando exemplo dos poços tubulares profundos em ambiente de SIG e sua ligação com uma tabela de atributos contendo informações hidrogeológicas e geológicas diversas.

7 ANÁLISE MORFOMÉTRICA/MORFOESTRUTURAL DAS DRENAGENS

Na área de estudo, as drenagens de maior extensão que cortam a região são representadas pela drenagem principal do alto Rio Iguaçu e seus afluentes maiores, o rio Barigui, o rio Belém e o rio Atuba.

Por sua vez os tributários do alto Rio Iguaçu são formados por uma série de drenagens secundárias, atingindo em alguns casos até a 3ª ordem, configurando sub-bacias e micro-bacias que contém características diferenciadas de acordo com a geologia e trama estrutural local.

No trabalho de SALAMUNI (1998) foi feita a análise das drenagens até o nível das sub-bacias pertencentes à drenagem principal do alto Rio Iguaçu. Na atual pesquisa as observações foram realizadas até o nível das micro-bacias de terceira e quarta ordens. O objetivo de chegar a este nível de detalhamento é o de facilitar na compreensão dos padrões estruturais existentes que configuram o aquífero fraturado, já que sob micro-bacias ocorre um forte controle tectônico, justificando o uso da análise morfoestrutural na investigação da rede de drenagens local.

Na fase inicial destas análises foi utilizado como base o mapa de drenagens gerado no trabalho de SALAMUNI (1998) contendo os principais canais pluviais e fluviais da rede hidrográfica da bacia de Curitiba. Estes canais foram restituídos através de fotointerpretação pelo próprio autor e, posteriormente transferidos para meio digital. Com estas drenagens incorporadas ao ambiente de SIG, foram acrescentados outros canais e corrigidos segmentos que apresentavam problemas. Além disso, a partir do próprio MDR foram geradas automaticamente drenagens através de procedimentos de rotina computacional existentes no programa ARCVIEW v.3.2® (Figura 7.1).

Esta interpolação apresentou algumas limitações ocorrendo alguns problemas nas áreas mais planas (Figura 7.2), principalmente na litologia correspondente aos depósitos aluvionares, na qual existe pouca ou nenhuma informação de altimetria. Neste caso o interpolador assume direção arbitrária para este trecho correspondente da drenagem, não condizendo muitas vezes com a realidade do canal de escoamento.

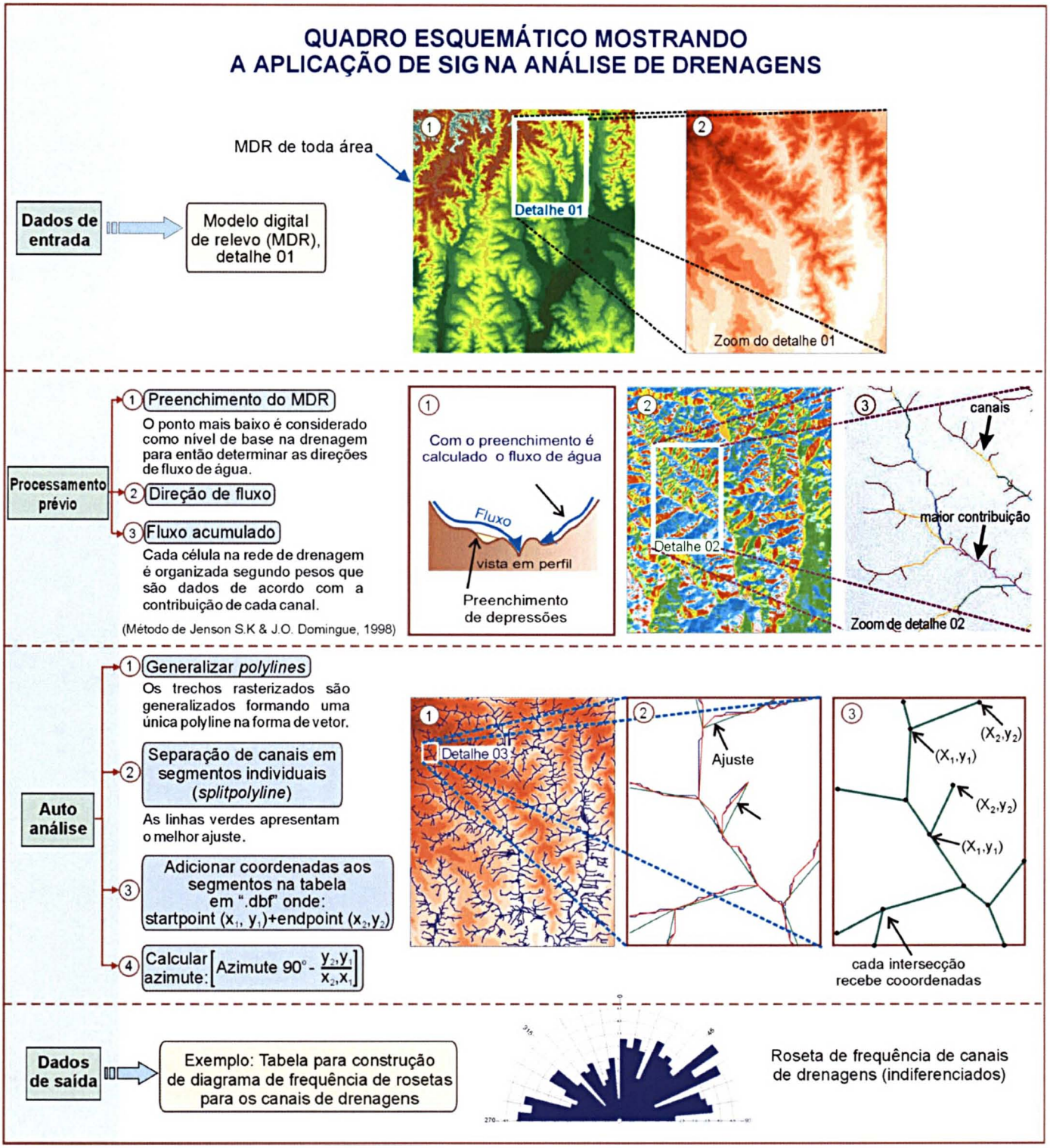


Figura 7.1: Quadro ilustrando a seqüência (rotina computacional) seguida dentro do *software* ARCVIEW 3.2® para gerar as drenagens automáticas a partir do MDR.

Mesmo métodos sofisticados apresentam limitações ao determinar a direção de drenagens em áreas mais planas, dessa forma os trechos que apresentaram muitos problemas não foram considerados nestas análises. No entanto, em geral, o resultado final na geração automática destas drenagens satisfez aos propósitos deste trabalho, servindo como base juntamente com as drenagens fotointerpretadas, para o traçado mais detalhado da rede hidrográfica local.

Os três níveis ou planos de informações (drenagens geradas a partir de fotointerpretação, drenagens geradas automaticamente por procedimentos computacionais e drenagens originadas pelo cruzamento dos dois níveis anteriores) podem ser visualizados na figura 7.2.

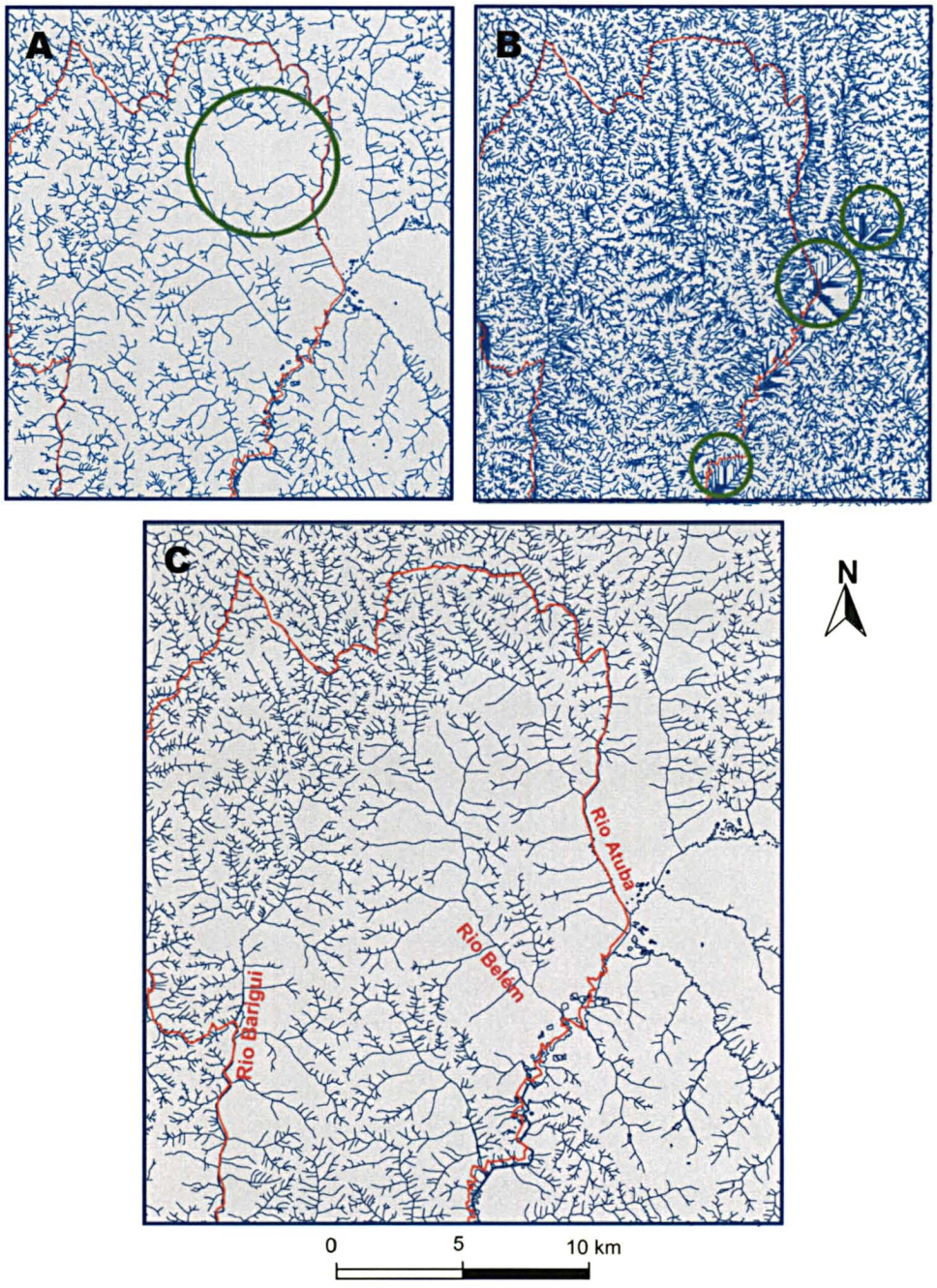


Figura 7.2: (a) Mapa de drenagens gerado no trabalho de SALAMUNI (1998), (b) mapa de drenagens gerado automaticamente a partir do MDR e (c) mapa de drenagens gerado pelo cruzamento dos dois planos de informação anteriores citados. Em vermelho foi delimitado o contorno da cidade de Curitiba, enquanto que os círculos em verde mostram exemplos de problemas ocorridos em "A" e "B", durante o traçado das drenagens.

Com relação às microbacias seis propriedades foram analisadas neste trabalho e as discussões principais são apresentadas a seguir:

1. **densidade de textura das drenagens:** Esta propriedade varia nitidamente de acordo com a litologia presente. Sobre o embasamento a densidade de textura das drenagens é muito maior do que em relação aos sedimentos da bacia que, por sua vez, também apresentam diferenças evidentes. Conforme a variabilidade do substrato geológico e intensidade dos processos de esculturação do relevo, as áreas que contém mais material argiloso, como geralmente ocorre na Formação Guabirotuba, vão ter porosidade menor, diferente de um terreno onde ocorrem sedimentos mais arenosos. Exemplo disso são os depósitos aluvionares holocênicos, onde os canais são normalmente mais aprofundados no relevo e mais longos. Num terreno menos poroso a densidade da rede de drenagens vai ser maior e os canais geralmente vão ser mais curtos, devido ao fato da água ter menos poder de infiltração que em terrenos mais porosos. Dessa forma esta propriedade se apresenta bastante útil para indicar mudanças de litologia.

2. **Sinuosidade dos elementos texturais de drenagens:** de acordo com esta propriedade os canais podem ser classificados visualmente em: dominantemente curvos; dominantemente retilíneos ou mistos. Os elementos retilíneos são considerados lineações de drenagem, sendo que a disposição em linha reta das lineações de drenagem constitui um alinhamento de drenagem. Na área em questão a sinuosidade das drenagens foi considerada dominantemente retilínea sendo que a partir do prolongamento do traçado dos segmentos de canais a distâncias maiores, deste nível de informações sobre o modelo digital de relevo (MDR), foram reconhecidos diversos alinhamentos estruturais configurando padrões bem marcantes e repetitivos.

3. **Angularidade:** diz respeito ao ângulo de confluência dos elementos de drenagem. Pode-se classificar zonas homólogas de drenagem em função desta propriedade:
    - angularidade baixa : ângulos agudos <60°
    - angularidade média : ângulos retos >60° e <120°

- angularidade alta : ângulos >120°

Em termos gerais as drenagens apresentam angularidade média, formando freqüentemente 90° de confluência entre os canais caracterizando padrão de drenagem do tipo treliça.

4. **Tropia:** é a propriedade dos elementos de drenagem se desenvolverem segundo uma direção preferencial. Em relação a esta propriedade, pode-se considerar a estrutura da drenagem tendo em vista a presença de uma ou mais direções de linhas de canais francamente dominantes.

   A tropia pode ser:

   - unidirecional
   - bidirecional
   - tridirecional
   - multidirecional (isótropa): estruturado ou não estruturado

A tropia observada nos canais das principais drenagens da Bacia de Curitiba foi a multidirecional estruturada, os canais se orientam em grande parte influenciados pela direção dos alinhamentos estruturais mesmo nos sedimentos da bacia.

5. **Assimetria:** a assimetria da rede de drenagem é caracterizada pela presença de elementos com tamanho ou estrutura sistematicamente diferentes, de um lado e de outro nas drenagens. A assimetria fraca é caracterizada apenas por diferenças no tamanho dos elementos e a forte se caracteriza por tamanhos e formas diferentes.

No trabalho de SALAMUNI (1998) a assimetria de drenagens foi determinada para os tributários principais do alto rio Iguaçu na Bacia de Curitiba. De acordo com as análises deste autor, os rios Barigui e Atuba que atravessam a área da atual pesquisa (Figura 7.2) mostram assimetria forte estando bastante afetados por tectônica, enquanto que o rio Belém apresenta assimetria mediana revelando atividade tectônica média no local.

6. **Lineações de drenagem:** na área de estudo são verificados elementos de drenagem fortemente estruturados de forma retilínea e secundariamente em arco.

A primeira vista o padrão regional observado nas drenagens primárias e secundárias que constituem o rio Iguaçu foi o sub-dendrítico como já descrito anteriormente por outros autores. No entanto, a partir de um exame cuidadoso é possível identificar que os segmentos de 2° e 3° ordens se apresentam orientados em ângulos retos segundo lineamentos de relevo configurando um padrão de treliça as mesmas. Por vezes estes segmentos de canais associam-se a longas distâncias permitindo identificar lineamentos estruturais antes mascarados como geralmente ocorre nos locais onde estão depositados os sedimentos da bacia sobre o embasamento.

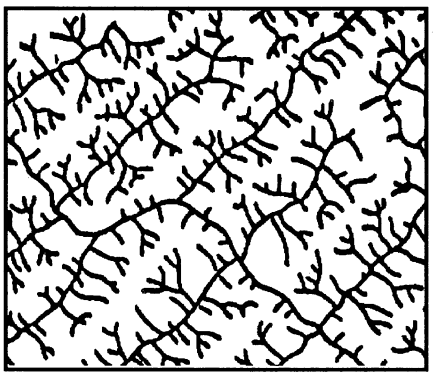


Figura 7.3: Padrão de drenagem em treliça.

Seguindo o sistema classificatório de CRISTOFOLETTI (1980) o padrão de treliça (Figura 7.3), geralmente observado em estruturas sedimentares homoclinais assim como em estruturas falhadas e nas cristas de anticlinais, é caracterizado por rios principais conseqüentes, correndo paralelamente, recebendo afluentes subseqüentes que fluem em direção transversal aos primeiros.

O padrão sub-dendrítico descrito por outros autores para os sedimentos no interior da bacia, onde ocorre a Formação Guabirotuba e os depósitos holocênicos, pode também mostrar um controle secundário, sendo geralmente estruturado.

Localizadamente foram verificados padrões anelares de drenagem podendo ser um indicativo, segundo a classificação de CRISTOFOLETTI (*op. cit.*), da existência de áreas dômicas profundamente entalhadas em estruturas com camadas mais duras e frágeis. Nesta situação a drenagem acomoda-se em afloramentos das rochas menos resistentes, originando cursos subseqüentes, recebendo tributários obsequentes e resequentes.

Tanto o comprimento e a densidade dos canais quanto às formas das vertentes estão relacionadas a um forte controle litológico-estrutural presente na

área. Devido a este fato cada litologia, como a exemplo dos sedimentos da Formação Guabirotuba, rochas do embasamento e depósitos holocênicos, vai gerar um padrão específico sendo este padrão constatado claramente em fotos aéreas e no Modelo Digital de Relevo (MDR).

Várias são as características morfométricas ou morfoestruturais que podem ser observadas servindo como indicativos de alguma deformação tectônica. Na atual pesquisa as anomalias de drenagem servem como grandes referenciais revelando a existência de falhas mascaradas ou pobremente expostas, estruturas estas que devem ser de especial importância na pesquisa para exploração de água subterrânea.

Partindo das seis propriedades anteriormente citadas, foram delimitadas as zonas homólogas na área de estudo ilustradas nas figuras 7.4 e 7.5. Estas zonas homólogas delimitam áreas com características geomorfológicas semelhantes, os padrões de drenagens no interior destes limites são bem distintos das áreas vizinhas, mostrando haver um controle litológico e estrutural forte, refletindo claramente na morfologia do relevo. Nas áreas correspondentes ao embasamento (Figura 7.5) o terreno é colinoso e com densa rede fluvial formando padrão de treliça, o que indica um controle tectônico gerado por falhas e fraturas. Mesmo na porção central da área onde a litologia dominante é a da Formação Guabirotuba e dos aluviões, os vales maiores que cortam estas litologias se apresentam sistematicamente orientados denotando indício de influência tectônica. As drenagens, tanto do embasamento quanto da bacia, parecem estar encaixadas em fraturas maiores ou mesmo aproveitando estruturas rúpteis reativadas. Na figura 7.5 (B) foram sobrepostos sobre o mapa geológico, as zonas homólogas (em vermelho) e em preto, os principais traços de fraturas e falhas que cortam a região (segundo o trabalho de SALAMUNI, 1998).

Tendo em vista o controle estrutural exercido sobre o relevo e as drenagens da área, na seqüência deste trabalho, foram traçados os lineamentos de relevo com base no modelo digital de relevo (MDR) e as lineações de drenagens a partir da rede hidrográfica local.

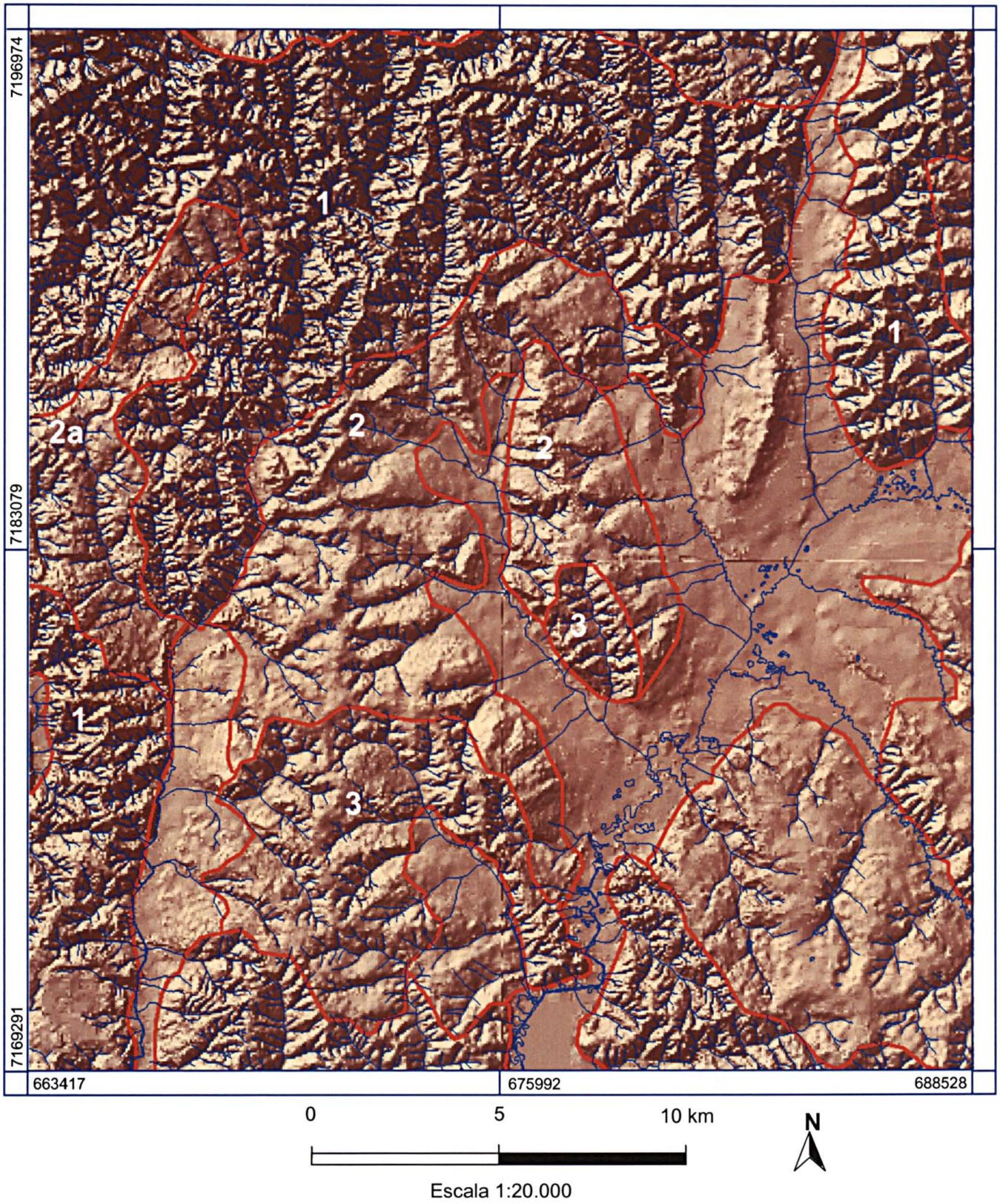


Figura 7.4: Em vermelho foram delimitadas as zonas homólogas sobre o (MDR) e em azul as drenagens da região. Os números indicam respectivamente as áreas com: (1) padrão de treliça, (2a) padrão sub-dendrítico (menor densidade de drenagem), (2b) padrão sub-dendrítico (maior densidade de drenagem) e (3) padrão retangular.

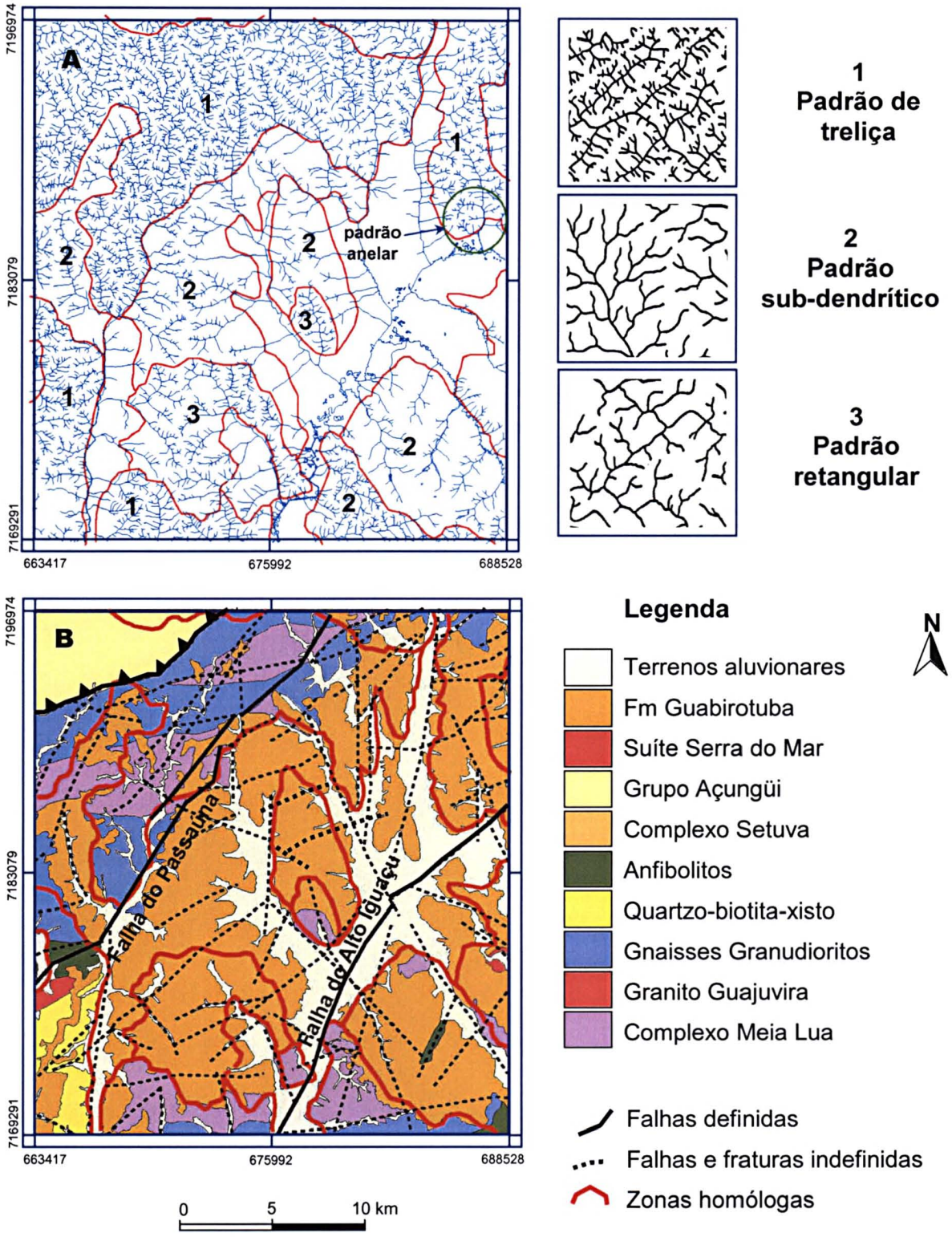


Figura 7.5: No quadro "A" pode ser observado o limite das zonas homólogas (em vermelho) delimitando as drenagens (em azul). Os números representam o tipo de padrão de drenagem de acordo com a referência ao lado. O círculo em verde delimita parte de uma drenagem que apresenta padrão anelar. No quadro "B" pode ser observado os contornos das zonas homólogas sobre as litologias da área.

8 ANÁLISE ESTRUTURAL DAS ROCHAS DO EMBASAMENTO DA BACIA DE CURITIBA

8.1 Generalidades

Na área em estudo as estruturas correspondem às falhas de caráter transcorrente que na sua maioria já existiam no Proterozóico e depois foram reativadas em um primeiro momento no Terciário como normais, e em um segundo momento, como falhas transpressionais/transtensionais.

Seguindo essa premissa as falhas normais e de rejeito direcional (transcorrentes) são associadas a um caráter tipicamente distensivo enquanto que as inversas refletiriam esforços mais compressivos. Existe ainda um fator complicador observado em campo, que é a reativação das estruturas mais antigas o que causa uma certa dificuldade na análise das mesmas.

8.2 Análises estruturais rúpteis

8.2.1 Caracterização dos dados estruturais em cada ponto

A análise das diferentes famílias de falhas e fraturas observadas em campo foi feita individualmente para cada ponto de afloramento no embasamento, sendo ilustrados seus respectivos diagramas através do programa STEREONETT v. 2.4. Posteriormente foram discutidos os padrões em geral observados e suas relações com a água subterrânea.

Os pontos 3, 7, 9, 10, 11, 13, 14 e 15 correspondem a afloramentos dos sedimentos da Bacia e portanto não foram analisados adiante.

Os dados, coletados em campo, dos diferentes planos das famílias de fraturas observadas em cada ponto de afloramento visitado, foram ilustrados através da representação de quatro tipos de diagramas mostrados nas figuras 8.1 até 8.24: **(a)** rosetas de freqüências caracterizando as direções das fraturas e/ou falhas; **(b)**

representação ciclográfica de planos; **(c)** isolinhas de pólos obtidos a partir de "b" e **(d)** planos médios de fraturas e/ou falhas obtidos através dos pólos máximos dos planos.

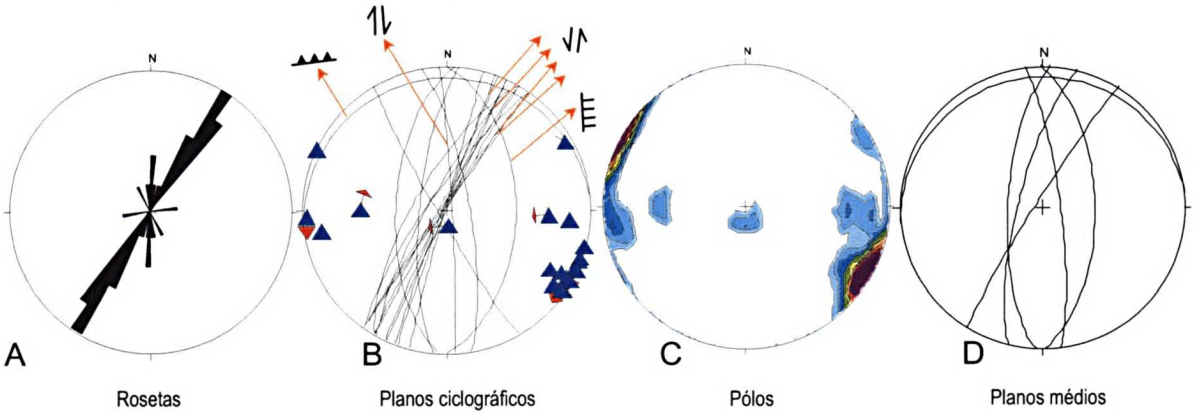
Os triângulos em azul (▲) representam os planos de falhas observadas em campo e em vermelho (▼) foram plotados os sentidos de movimentos somente das falhas transcorrentes, evitando uma sobreposição muito grande de dados em um mesmo diagrama.

Já a tipologia das falhas direcionais e demais estruturas é representada pelos símbolos:

(falhas transcorrentes), (falhas normais) e (falhas inversas)

Ponto 01

Falhas (número de medidas: 21)



Fraturas (número de medidas: 22)

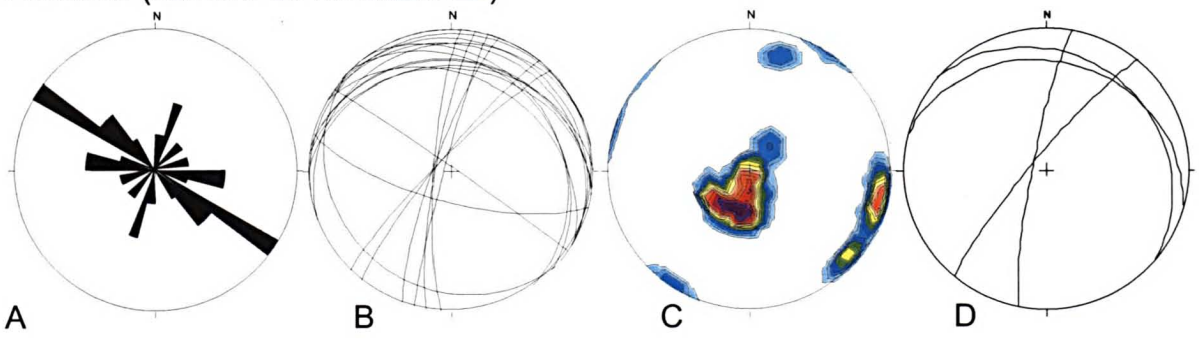


Figura 8.1: Diagramas estruturais para o ponto 01 (pedreira desativada do parque Tanguá).

Na seqüência após a caracterização estrutural do último ponto de afloramento visitado na área, podem ser observadas as feições estruturais e geológicas consideradas como as mais significativas, representadas através das fotos nas pranchas de 8.1 até 8.9 (pg. 88 até 96) e pelas figuras feitas em folhas de transparência (em planta) e depois digitalizadas. Cada uma destas fotos e figuras é mencionada em sequência no texto a seguir.

No ponto 01, afloramento localizado na pedreira Tanguá, foram observados planos de fraturas diversos e grandes zonas de cisalhamento rúptil, constituídos na sua maioria por falhas transcorrentes, cuja principal característica foi gerar forte cataclasamento e cominuição das rochas do embasamento, principalmente, na direção **N-S** e **N30E**. A cinemática destas falhas transcorrentes foi indicada por degraus e estrias subhorizontais entre 4 e 18° de mergulho.

Observando os diagramas obtidos ocorre nitidamente nas falhas, uma concentração principal com intervalo entre **N21-35E** e mergulhos subverticais de **80 a 89°** noroeste, e uma moda secundária representada pelo sistema **N-S/70NW,** ambas parecem ser componentes de um mesmo sistema. Um plano de falha normal foi medido com orientação de **N84E/9NW** e outro com direção **N3E/61NW** (estria N260/60).

A relação entre a direção N-S, a moda N21-35E e demais estruturas pode ser visualizada na foto 02 (Prancha 8.1, pg 88) e nos croquis desenhados, em folhas de transparências, diretamente sobre as feições estruturais observadas (em planta) nas rochas do afloramento (Figura 8.2, 8.3 e 8.4, páginas 65, 66 e 67). De acordo com estas estruturas, a direção N20-30E parece ter movimentação anti-horária se for considerado: (a) formato do sigmóide formado entre estes planos e (b) deslocamento de alguns planos de fraturas (Figura 8.2, pg. 65). Próximo ao local onde foram feitos os croquis, foi medida a atitude de um plano vertical de falha de direção N21E/88NW com movimentação anti-horária dada pelas estrias e degraus de orientação N30/4

Nas fraturas existe uma dispersão maior, no entanto, ainda assim podem ser verificadas três concentrações máximas: N50W/20NE, N11E/82NW e N75E/8NW. Nos planos subhorizontalizados de direção tendendo para E-W, foi constatado a presença de água circulando entre as fraturas. Estas estruturas parecem ser cortadas pelos sistemas N-S e NE, indicando que os planos subhorizontalizados são

anteriores ou então de que estas famílias mais verticalizados de direção N-S e N30E podem ter sido reativadas.

Verificou-se que estruturas subverticalizadas de orientação em torno de N-S apresentam os planos preenchidos com material de coloração escura, provavelmente de composição máfica além de calcopirita e quartzo, porém o cisalhamento observado nesta direção é muito intenso resultando em planos abertos.

Outro fato importante a ser mencionado diz respeito a um dique de diabásio deslocado (Capítulo 05, pg. 38, Foto 5.1) por um plano subhorizontalizado e de orientação N57W/9NE (Prancha 8.1, pg 88, Foto 01). Essa relação é indicativa de tectônica mais recente (Neógeno) atuando sobre estas rochas.

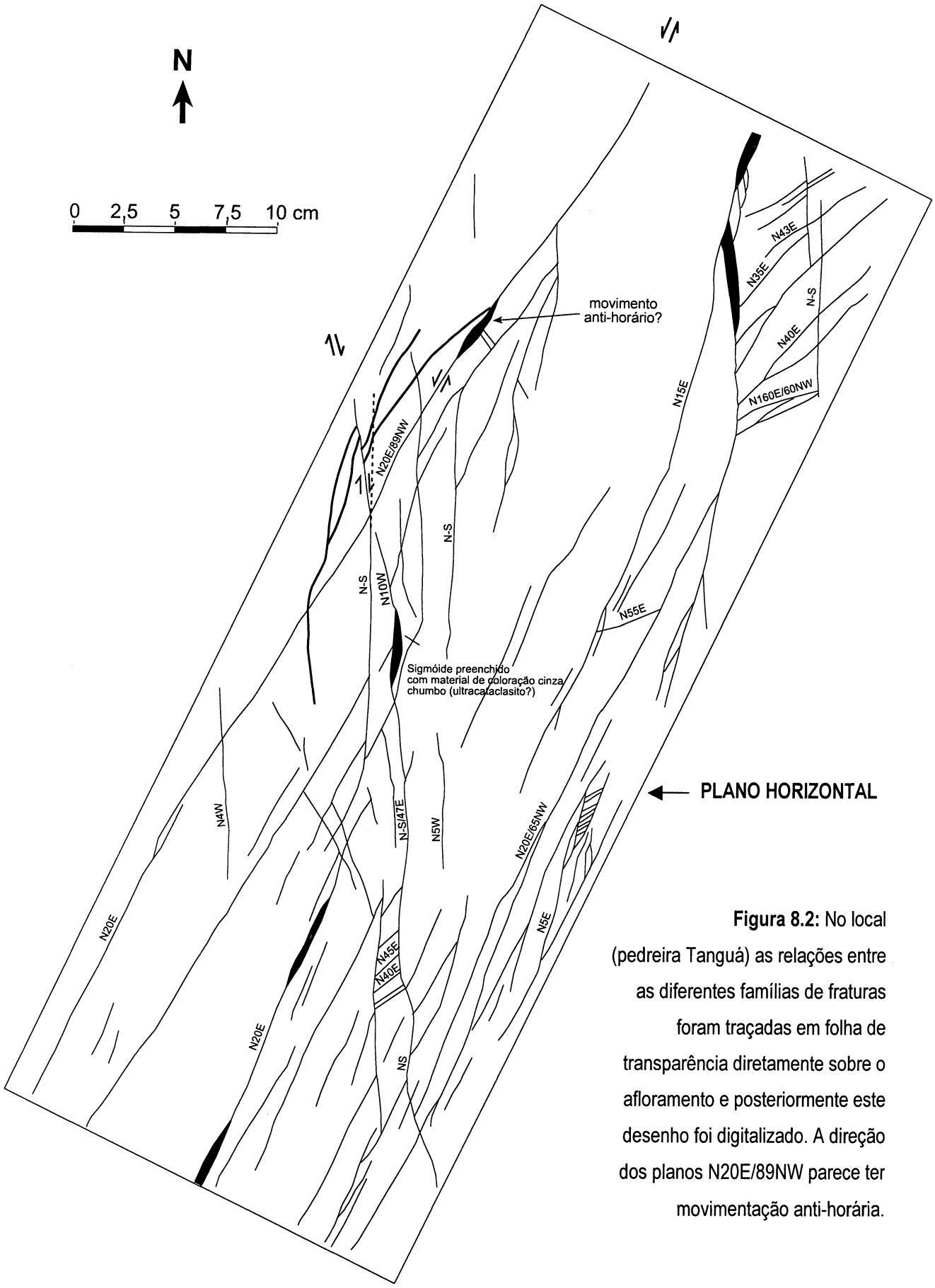


Figura 8.2: No local (pedreira Tanguá) as relações entre as diferentes famílias de fraturas foram traçadas em folha de transparência diretamente sobre o afloramento e posteriormente este desenho foi digitalizado. A direção dos planos N20E/89NW parece ter movimentação anti-horária.

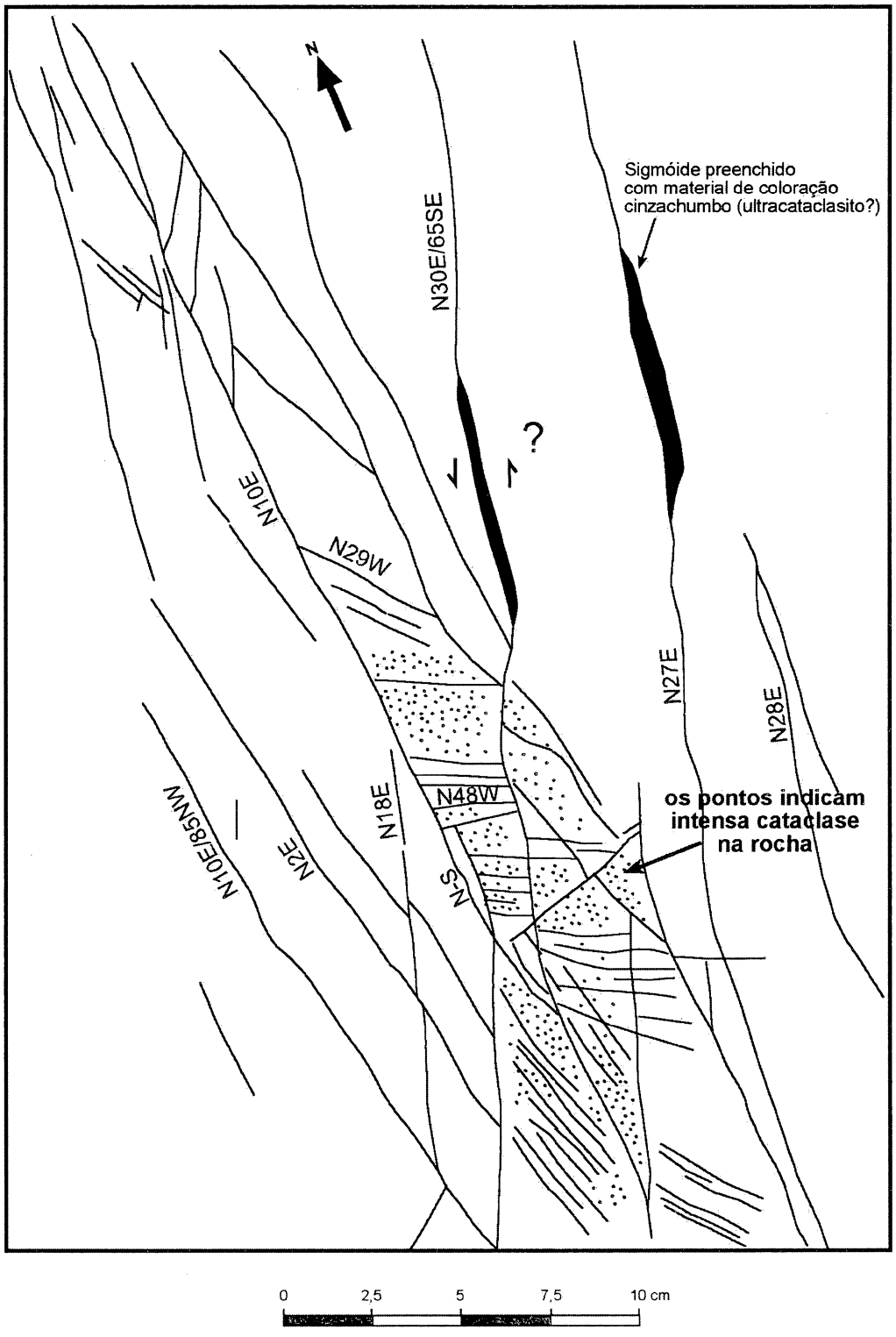


Figura 8.3: Detalhe 2 mostrando desenho feito em folha de transparência diretamente sobre as rochas do afloramento (pedreira Tanguá). A rocha apresenta faixas bem cataclasadas, com cominuição mineral. As direções N-S e N10-30E são as mais marcantes

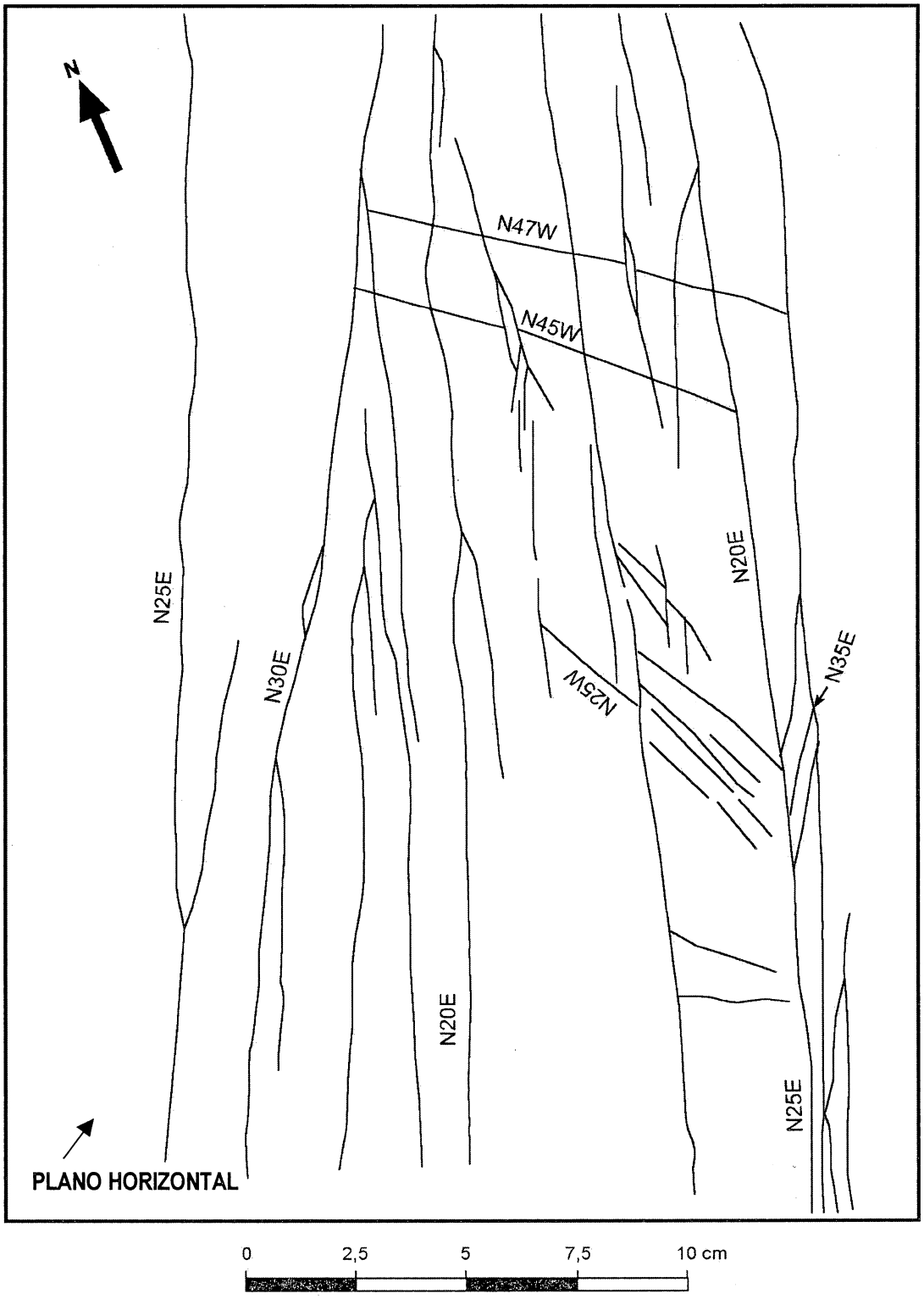
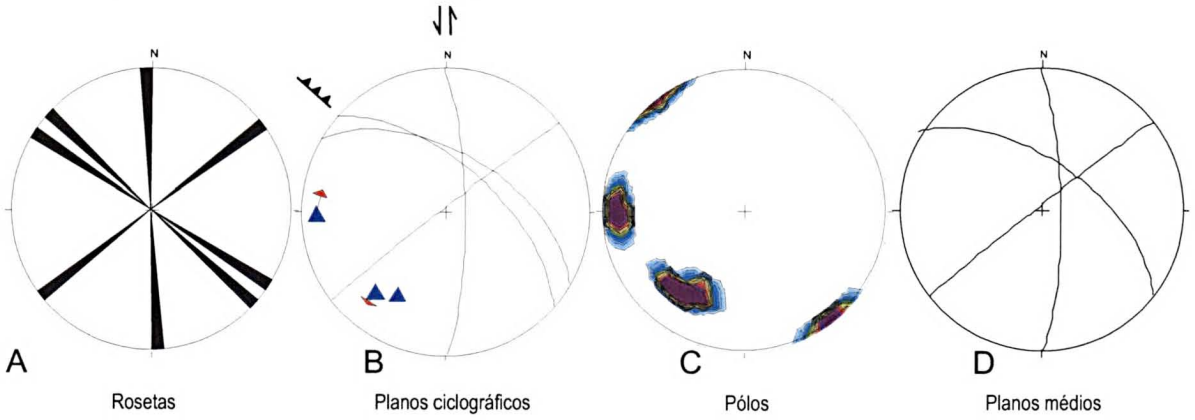


Figura 8.4: Detalhe 3 mostrando desenho feito em folha de transparência diretamente sobre as rochas do afloramento (pedreira Tanguá). A direção N20-35E é a mais marcante.

Ponto 02

Falhas (número de medidas: 04)



Fraturas (número de medidas: 25)

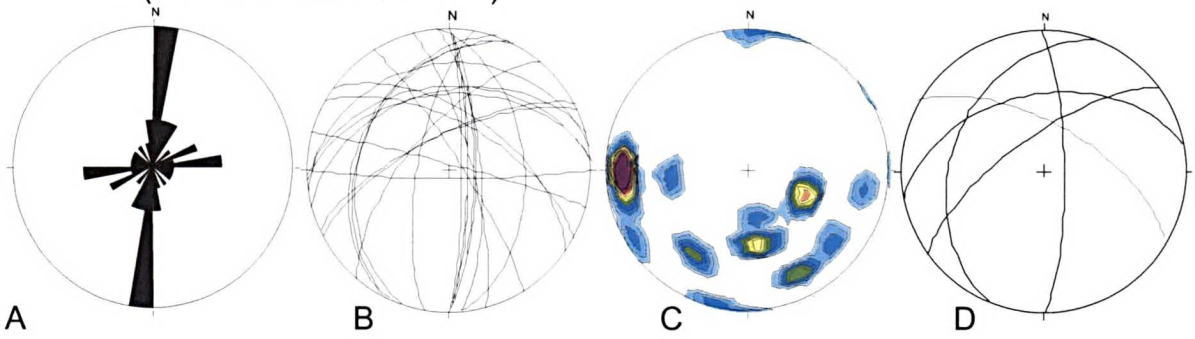


Figura 8.5: Diagramas estruturais para o ponto 02 (afloramento nas imediações do parque Tingui).

No afloramento foi medido um plano de falha transcorrente bem evidenciado com orientação **N-S/78NE**.

Nas fraturas além de um sistema principal N-S, marcante, ocorrem outras três concentrações secundárias mostradas através dos máximos principais dos pólos dos planos das fraturas: **N22E/35NW, N54E/70NW, N75W/87NE e N79E/45NW** sendo que segundo os dois últimos planos o cisalhamento rúptil é muito intenso (Prancha 8.1, pg 88, Foto 03). Os planos de direção **N75W/87NE** aparentemente cortam todas as outras famílias de fraturas e/ou falhas existentes.

Com relação àoutra característica marcante neste local, verificou-se que a foliação gnáissica parece é paralela aos planos N-S, ocorrendo estiramento mineral segundo esta foliação (quartzo).

Também foi medida a atitude de uma falha reversa (N49W/63NE).

Ponto 04

Falha (número de medidas: 01 falha, 01 fratura)

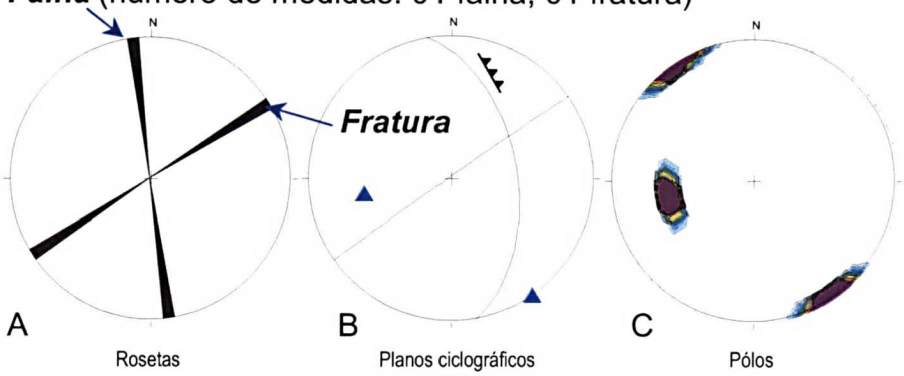


Figura 8.6: Diagramas estruturais para o ponto 04 (afloramento na beira da estrada, CIC).

Neste local foi observado contato entre a formação Guabirotuba e o embasamento. Na Formação Guabirotuba foi verificada falha inversa (já documentada por SALAMUNI, 1998) com atitude N10W/52NE (Prancha 8.1, Foto 04, pg. 88). Sobre o embasamento foi medido plano estrutural marcante N55E/85NW paralelo a foliação, na qual ocorre quartzo bipiramidal bem formado e facetado, provavelmente, produto de falha.

Ponto 05

Falhas (número de medidas: 06)

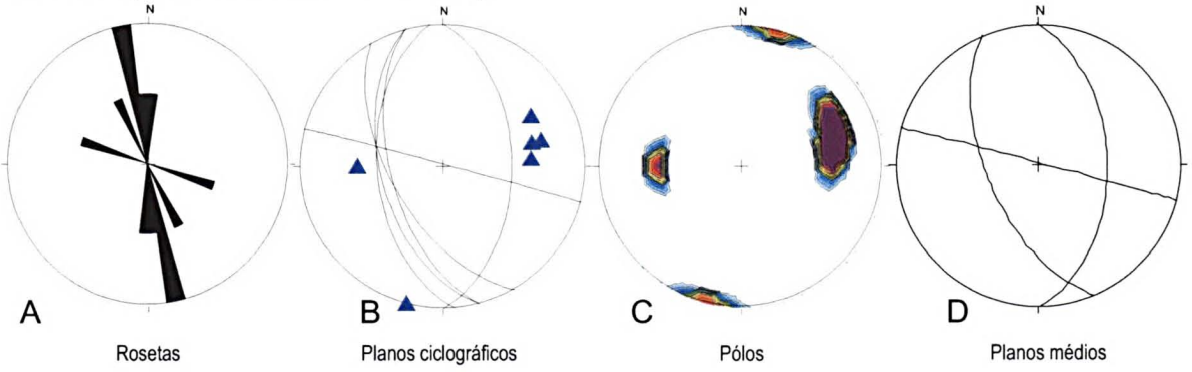
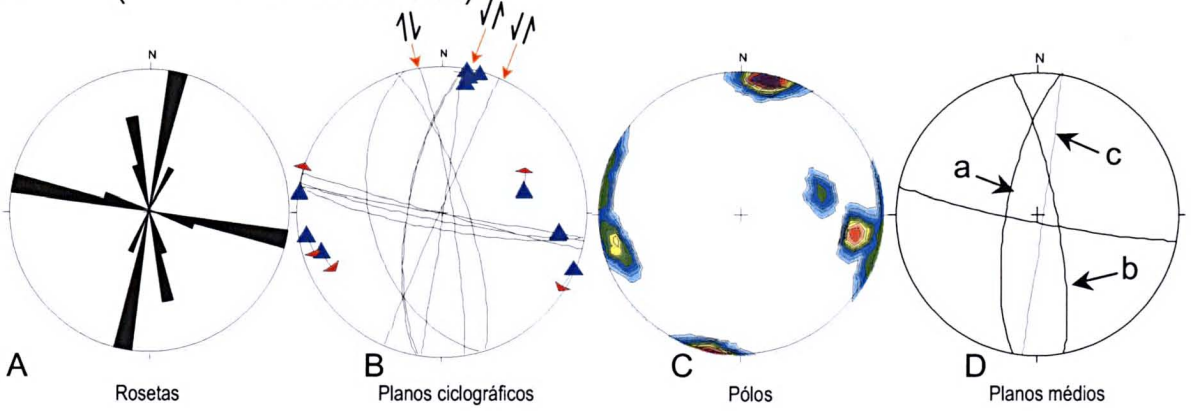


Figura 8.7: Diagramas estruturais para o ponto 05 (afloramento na beira da estrada, CIC).

A principal estrutura verificada neste afloramento foi caracterizada como falha (possivelmente uma estrutura em flor) com valores variando desde N-S até N25W e mergulho em torno de 55° para sudoeste.

Ponto 06

Falhas (número de medidas: 11)



Fraturas (número de medidas: 55)

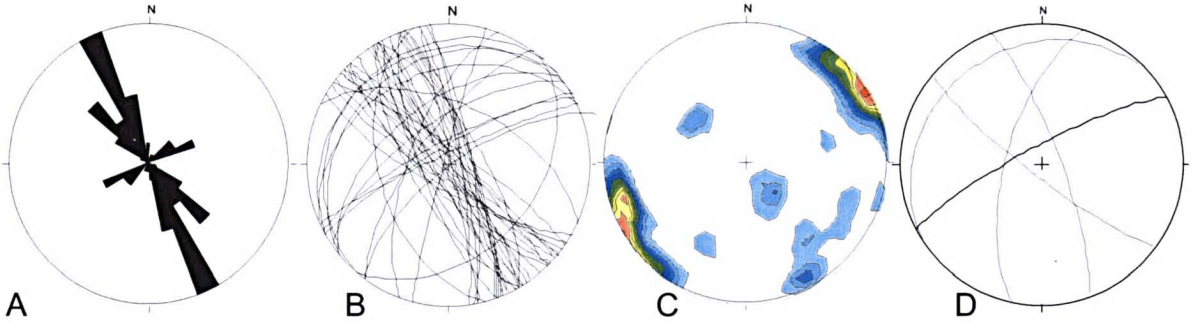


Figura 8.8: Diagramas estruturais para o ponto 06 (afloramento na beira da estrada, CIC).

As rochas neste afloramento apresentam cisalhamento rúptil muito intenso podendo ser representado por quatro modas nas fraturas: **N37W/85NE, N20E/76NW, N50E/27NW e N57E/66NW** e ainda dois planos muito marcantes de falhas transcorrentes com direção e mergulho: "a" **N18W/76NE** (Prancha 8.1, Foto 06, pg. 88), "b" **N23E/89NW** (anti-horário) e "c" **N08E/89SE** (parece ser movimento anti-horário).

Observou-se muitos veios de quartzo preenchendo fraturas que cortam a foliação de direção principal N60E/60NW. A maioria dos planos N18W são bem espaçados (2 cm) e outros estão preenchidos com quartzo e epidoto, porém também são geralmente abertos. Na direção das fraturas com orientação N57E/66NW ocorre lenticularização e formação de sigmóides em meio aos planos paralelos a foliação. A presença de pequenas dobras (*shear folds*), segundo estas direções, indica zona de cisalhamento com caráter mais dúctil (Prancha 8.1, Foto 05, pg. 88). Estes planos parecem ser crenulados e cortados por fraturas de direção N50E e mergulhos mais subhorizontalizados.

FIORI (1990) menciona que *shear zones* representam zonas de deformação mais intensa onde geralmente ocorre a expulsão de minerais mais suceptíveis à solubilização por pressão, a exemplo do quartzo e feldspato (este último em menor proporção).

No afloramento também foi verificada a existência de uma grande zona de cisalhamento caracterizada por uma falha com aspecto de estrutura em flor (direção principal de N80W/85SW). Esta estrutura rúptil-dúctil tem os planos bem rugosos e ondulados e causa forte cominuição e cataclasamento na rocha, aparentemente cortando todas as outras famílias de fraturas.

Ponto 08

Falhas (número de medidas: 01)

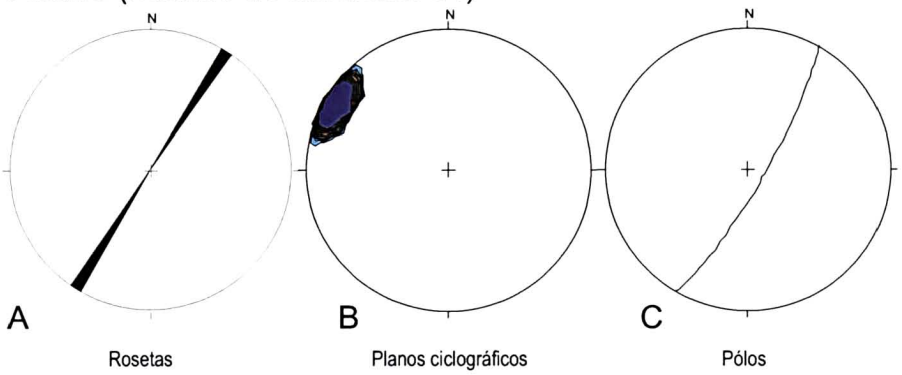


Figura 8.9: Diagramas estruturais para o ponto 08 (afloramento na beira da estrada, CIC).

Segundo a direção **N30E/80SE** foi medida uma marcante estrutura (falha transcorrente) na qual ocorre, de acordo com este plano, intensa recristalização de quartzo e presença de argila. Em uma faixa em torno de dois metros de largura, seguindo a direção da falha transcorrente, foram encontrados blocos de quartzo facetado (cor cinza escuro) de até 40 cm de largura.

Ponto 10

Falhas (número de medidas: 02)

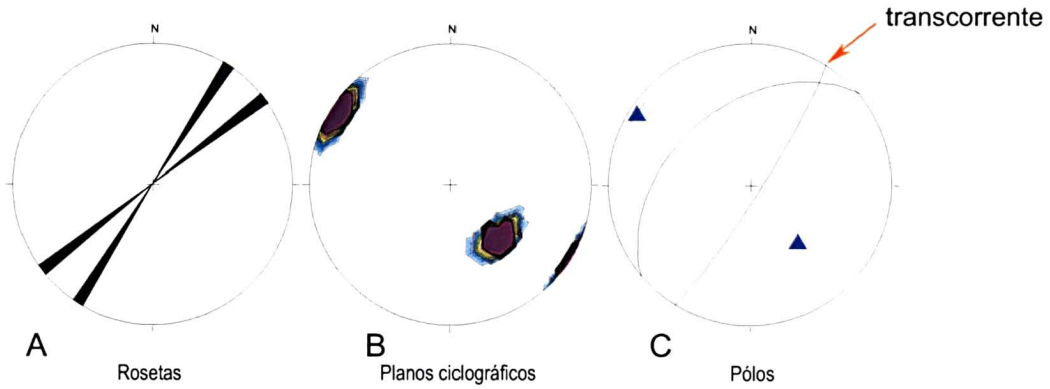
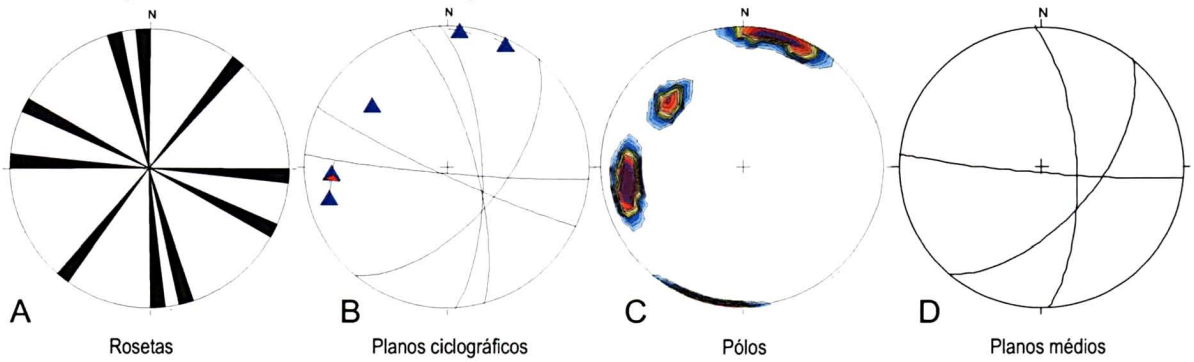


Figura 8.10: Diagramas estruturais para o ponto 10 (limite sul de Curitiba como município Fazenda do Rio Grande).

Provável plano de falha transcorrente **N32E/84SE** (rocha muito alterada, porção de composição mais básica) com cinemática indicada pela estria de direção N32 e degrau com mergulho de 5°. Um plano de fratura foi medido com atitude de **N50E/43NW.**

Ponto 12

Falhas (número de medidas: 05)



Fraturas (número de medidas: 58)

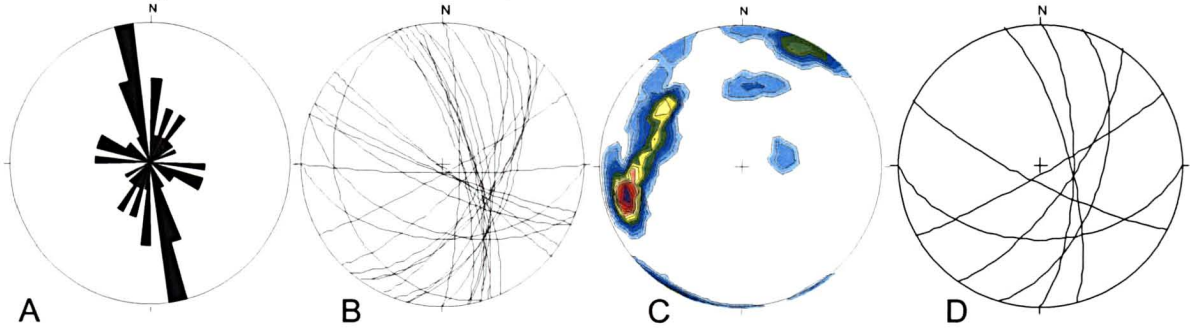


Figura 8.11: Diagramas estruturais para o ponto 12 (pedreira Transemrra, bairro Cascatinha).

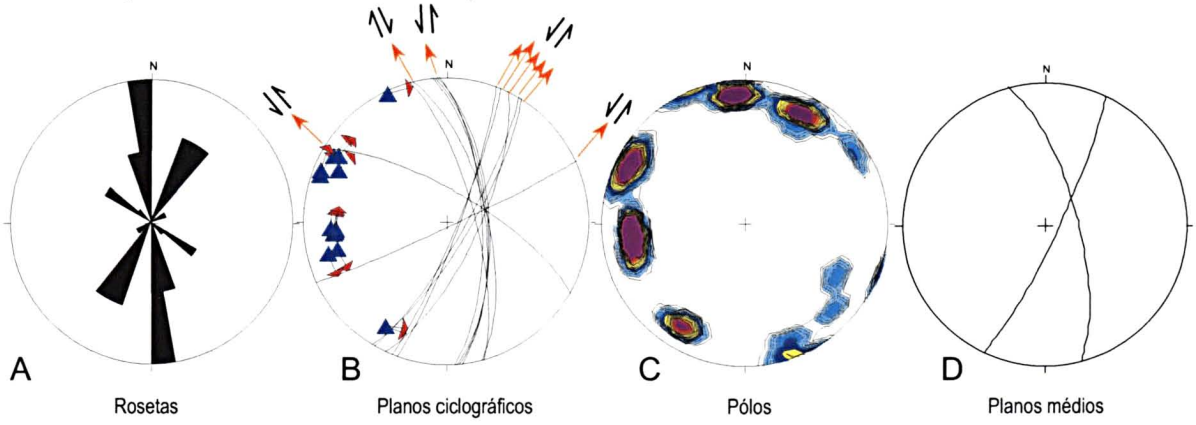
Em relação aos dados das falhas (transcorrentes) observadas, as medidas se distribuem preferencialmente segundo os seguintes intervalos: “a” **N3-15W** (mergulhos em torno de **70°** para nordeste), “b” **N17-35E** (mergulhos em torno de **69°** para sudeste). Secundariamente ocorrem três modas nas fraturas: “c” **N63W/80SW**, “d” E-W: **N85W/86SW** e “e” representado pela direção **N35W/42NE**. Estes últimos (planos mais subhorizontalizados e favoráveis àcirculação de água) parecem ser anteriores, pois são cortados pelas outras estruturas, principalmente por “d” (EW).

Os planos “a” são levemente sinuosos, apresentam preenchimento (ultracataclasito), no entanto são abertos, tendo espaçamento milimétrico até cerca de 10 cm e presença de água circulando entre as fraturas. As estruturas “b” parecem ser mais rúpteis que “a” e também mais abertas e favoráveis para água, aparentemente cortando os sistemas anteriores. Estes planos não apresentam material de preenchimento, são mais irregulares, sinuosos e segundo esta direção observou-se intenso cataclasamento na rocha.

No afloramento a foliação apresenta-se bem evidente e com orientação principal a N75E/80SE. Ocorre um bandamento gnáissico marcante com alternância de faixas milimétricas a centimétricas e desenvolvimento de porções mais graníticas (injeções posteriores em meio àrocha) com muito feldsp ato potássico.

Ponto 16

Falhas (número de medidas: 14)



Fraturas (número de medidas: 51)

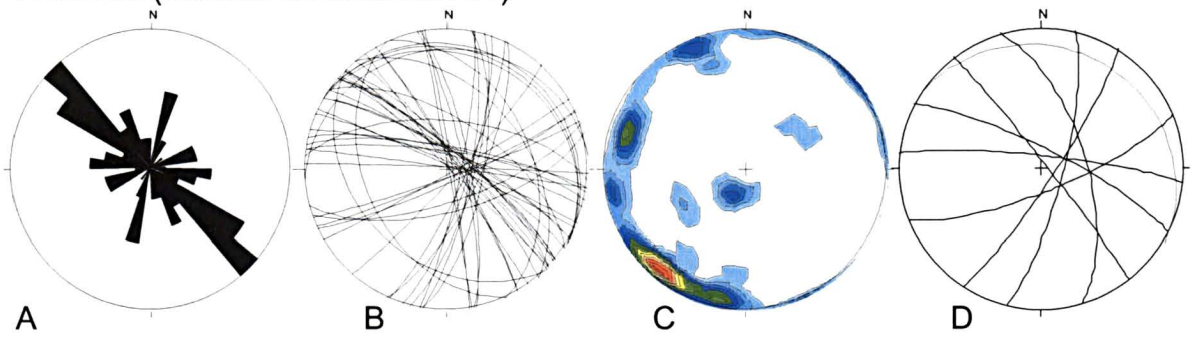


Figura 8.12: Diagramas estruturais para o ponto 16 (pedreira Transemrra, bairro Cascatinha).

Segundo o diagrama de rosetas das falhas podem ser verificadas duas concentrações máximas de orientação: "a" **N3W/70NE** com movimentação anti-horária formando espelho de falha bem evidenciado (Prancha 8.2, Fotos 07 e 08, pg. 89), plano aberto e aparentemente bem favorável para água; e "b" **N22E/84SE** também anti-horário e com presença de água circulando entre os planos.

Nas fraturas ocorre uma variação maior sendo agrupados os cinco intervalos mais representativos. O sistema que mais se destaca é o de **N35-50W** com mergulhos subverticais (fraturas fechadas), seguidos dos intervalos N15W/73NE (planos verticalizados mais abertos que a N30W), N10-20E/75SE, N60-70E/85SE (fraturas fechadas com preenchimento de calcita) e N55W/16NE sendo esta direção a moda que representa planos subhorizontalizados associados àcirculação de água e que, aparentemente, são cortados pelas demais estruturas.

Ponto 17

Falhas e fraturas (número de medidas: 17)

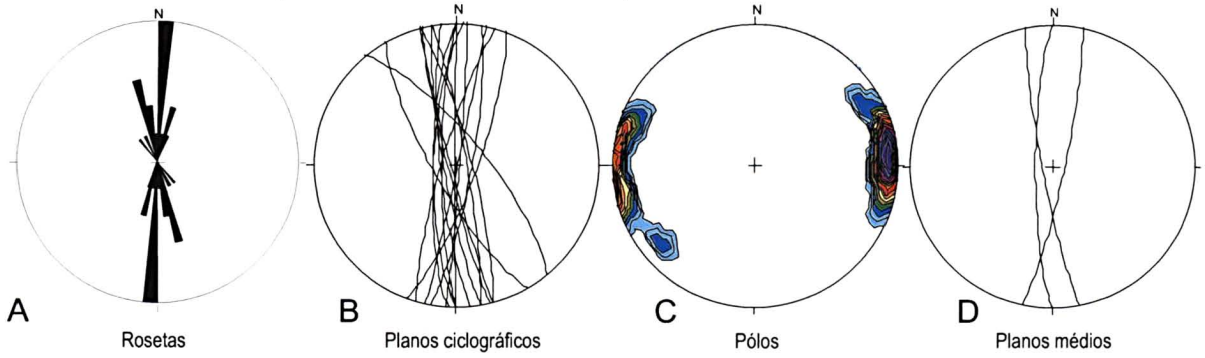


Figura 8.13: Diagramas estruturais para o ponto 17 (afloramento próximo a fábrica de papel Trombini S.A., bairro Cascatinha).

As estruturas que mais se destacam neste local são as de direção **N-S** e mergulhos subverticais. Segundo estes planos observou-se intenso cisalhamento rúptil, cataclasando e causando forte cominuição na rocha. Embora tenha material preenchendo estas falhas, as estruturas N-S apresentam os planos pouco sinuosos e mais abertos do que as outras famílias de juntas observadas.

Ponto 18

Fraturas (número de medidas: 18)

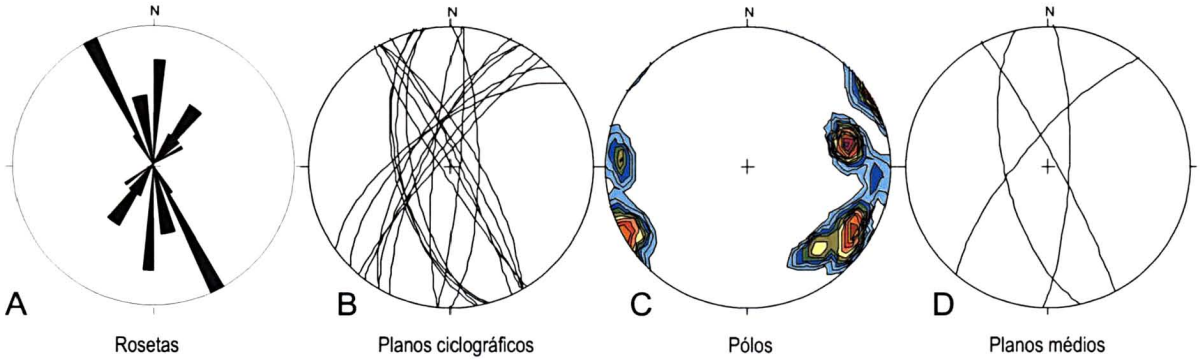


Figura 8.14: Diagramas estruturais para o ponto 18 (bairro Santa Felicidade).

No ponto 18 as rochas do embasamento se apresentam muito intemperizadas e fazem contato com a formação Guabirotuba. Embora os planos estejam bastante alterados é possível verificar nas famílias presentes, um *trend* principal de direção

N28W/85NE, seguido de **N-S-78SE** e **N40E/75NW**. Os sistemas N30W, NS e N30E parecem formar padrão em "X" (fraturas conjugadas).

Ponto 19

Falhas e fraturas (número de medidas: 16)

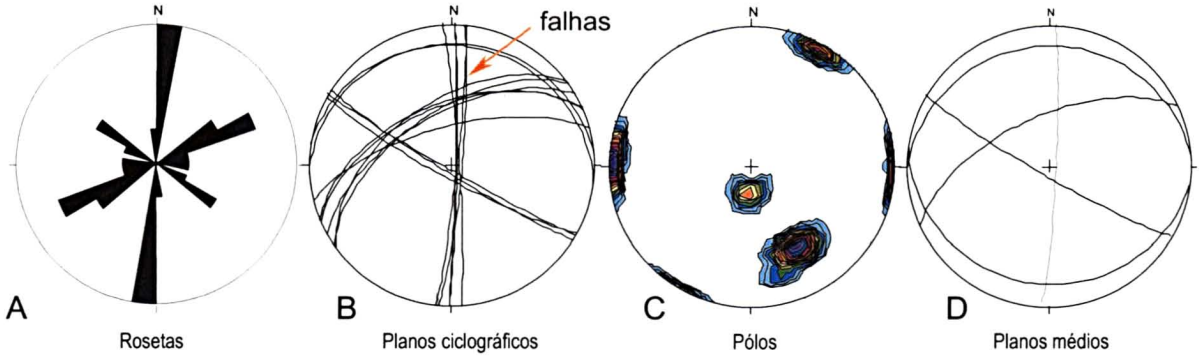


Figura 8.15: Diagramas estruturais para o ponto 18 (afloramento em frente ao Restaurante Cascatinha, bairro Santa Felicidade).

No ponto 19, as fraturas **N-S/88SE** são a principal direção caracterizada por intenso cisalhamento rúptil. Também destacam-se as modas **N65E/61NW** (planos fechados), **N60W/84SW** e secundariamente **N82W/17SW** (planos subhorizontalizados).

Mais uma vez foi observado que os planos estruturais de direção N-S apresentam material de preenchimento em meio à falhas, porém o cataclasamento nesta direção é bastante intenso abrindo estas estruturas que parecem cortar as fraturas com orientação N65E. No afloramento a foliação apresenta atitude de N78W/85NE.

Ponto 20

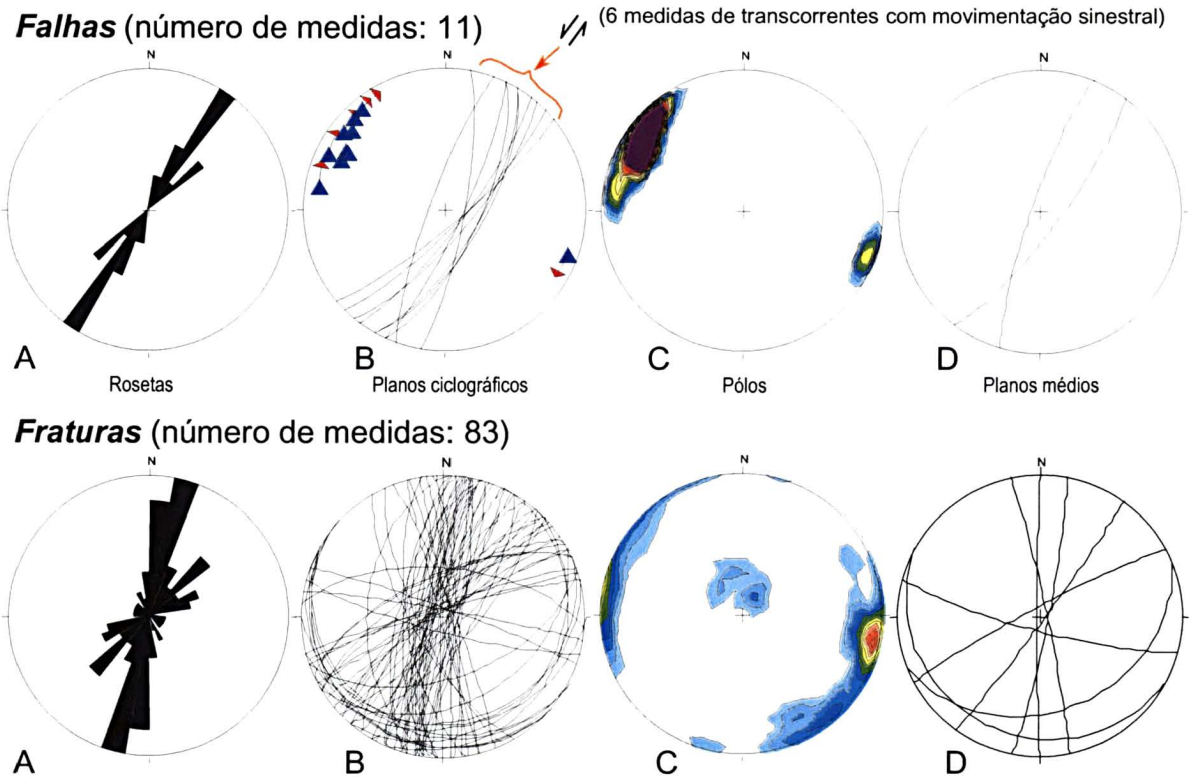


Figura 8.16: Diagramas estruturais para o ponto 20 (afloramento atrás do restaurante Cascatinha, bairro Santa Felicidade).

Grande zona de cisalhamento rúptil (presença de falhas transcorrentes) sendo representada pelo intervalo **N1-15E** e mergulhos em torno de **80°** para sudeste (movimentação anti-horária). O plano de falha com orientação N32E/75SE também causa intenso cataclasamento na rocha. As direções das estruturas N-S tem preenchimento (ultracataclasito) entre os planos, porém os mesmos são abertos.

Um outro sistema foi verificado como sendo favorável para água e apresenta orientação N55W/18SW (novamente estes planos NW apresentando mergulhos subhorizontalizados, são associados a água e parecem ser cortados pelas outras famílias de fraturas).

Este afloramento é de extrema importância, sendo considerado um dos pontos “chaves” na área. No local foi possível fotografar e desenhar em folhas de transparências, diretamente sobre a rocha (no plano horizontal), as relações entre sistemas de fraturas e falhas de direção N-S e NE que ali apresentam nitidamente movimentação anti-horária. Esta cinemática é indicada pelo deslocamento do

bandamento gnáissico e pode ser observada na Prancha 8.3 (Fotos 09 até 12, pg. 66) e Figuras 8.17 e 8.18 (pg. 78 e 79). As estruturas N-S e N20-30E parecem fazer parte de um mesmo sistema de fraturas conjugadas.

Também foram observadas fraturas de direção predominante N52W e mergulhos verticalizados em torno de 70NE contendo porções pegmatóides e grande desenvolvimento de feldspato e quartzo (cristais de até 15 cm de comprimento) segundo estes planos.

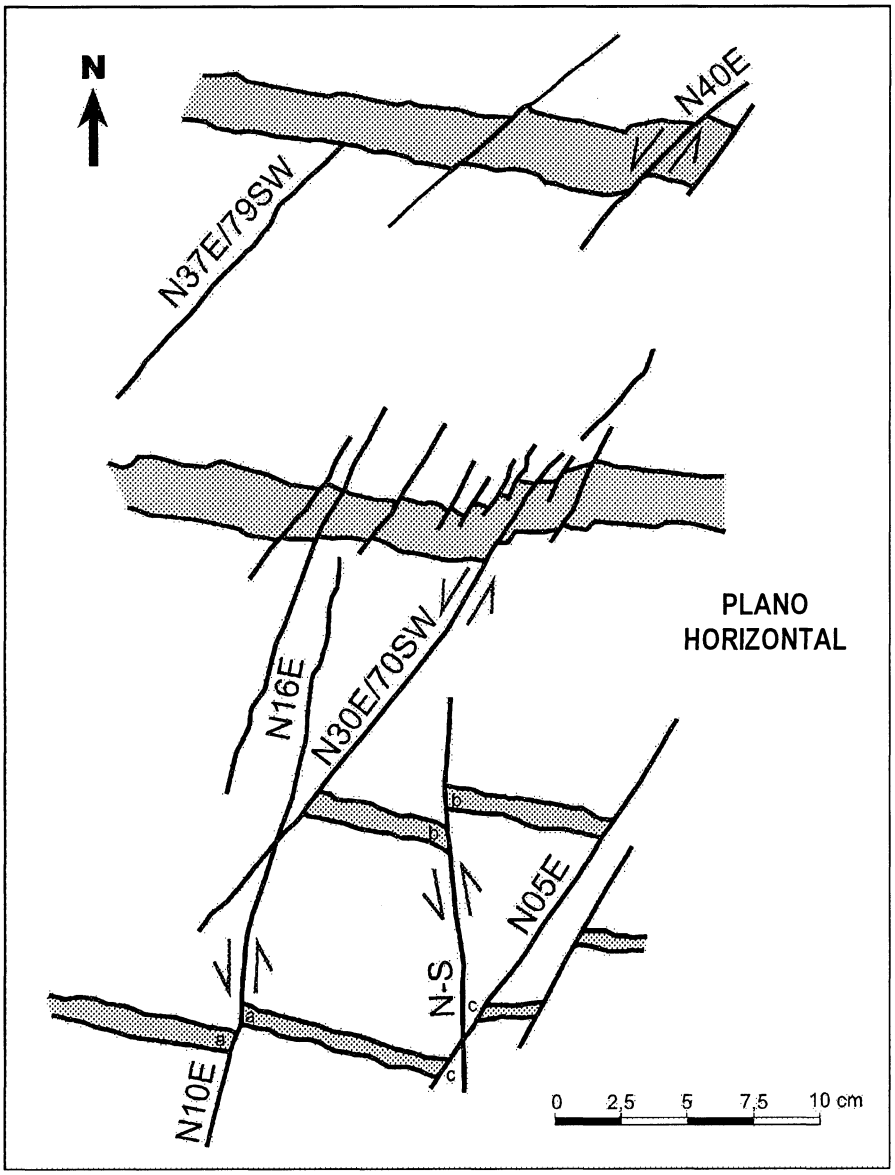


Figura 8.17: Detalhe mostrando desenho feito em folha de transparência diretamente sobre as rochas do afloramento (atrás do restaurante Cascatinha). Pelo deslocamento do bandamento gnáissico é indicado cinemática com movimentação anti-horária tanto para as direções dos planos das falhas N-S quanto para as direções N30-40E.

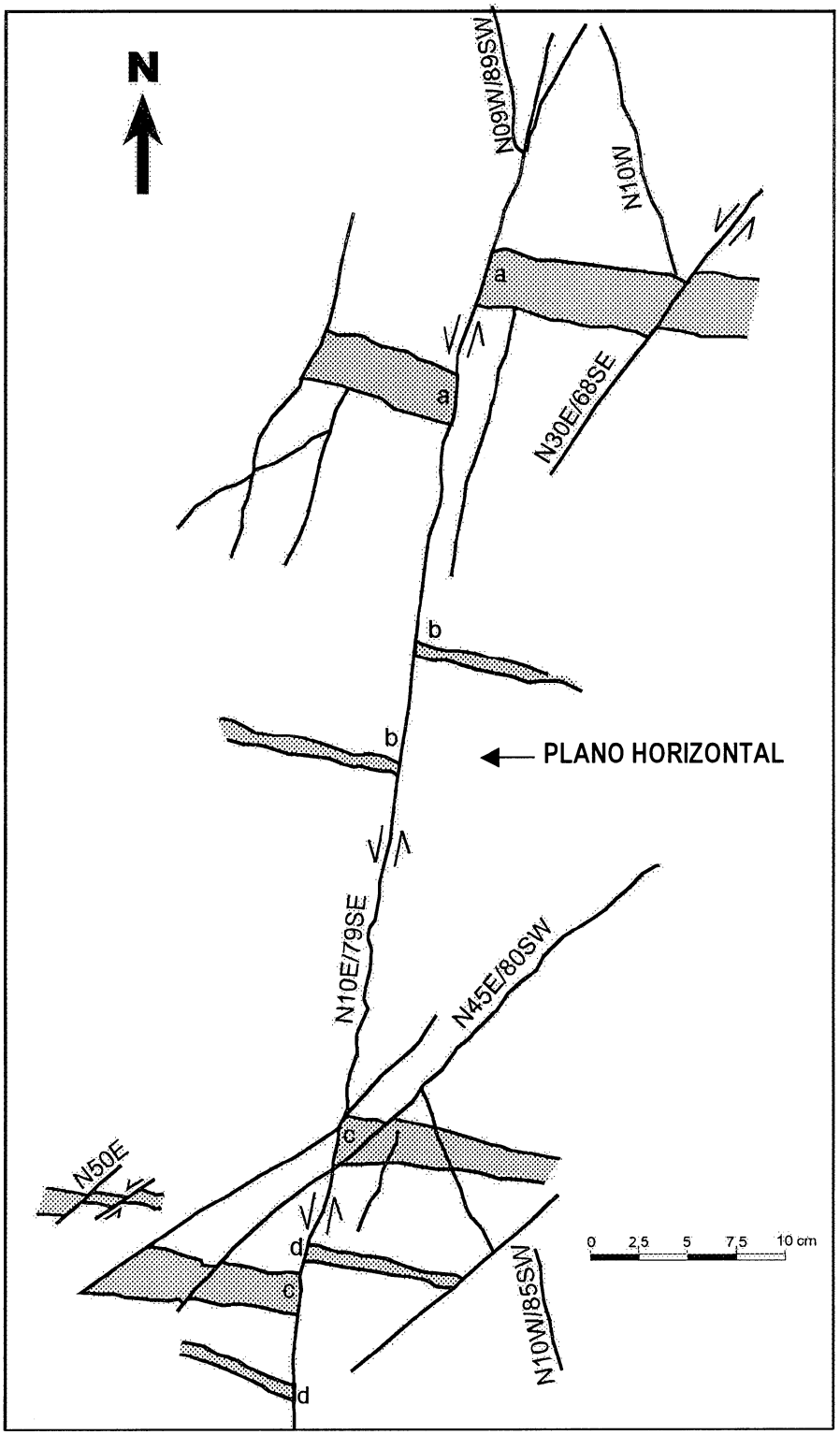
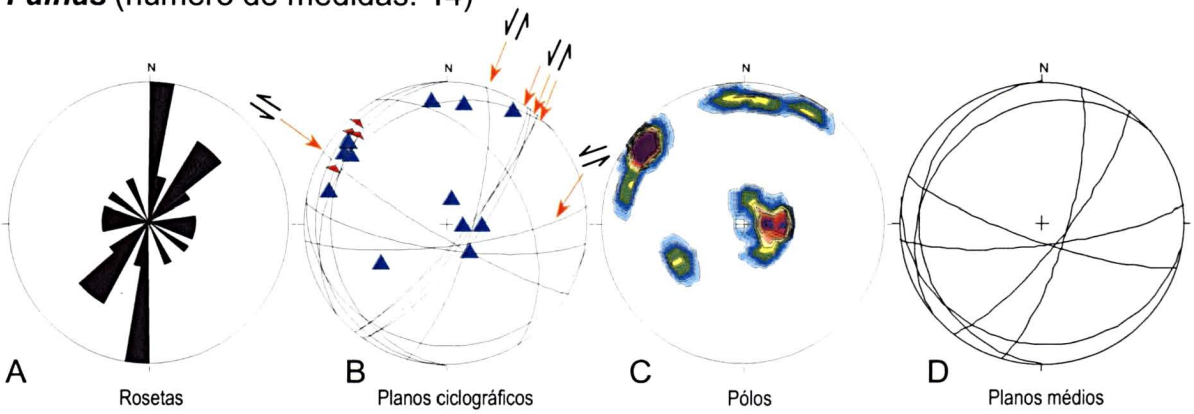


Figura 8.18: Assim como na figura 8.3 este detalhe mostra desenho feito em folha de transparência (em planta) diretamente sobre as rochas do afloramento (atrás do restaurante Cascatinha). O deslocamento do bandamento gnáissico indica cinemática com movimentação anti-horária para as direções dos planos de falhas transcorrentes N-S e direções N30-40E.

Ponto 22

Falhas (número de medidas: 14)



Fraturas (número de medidas: 154)

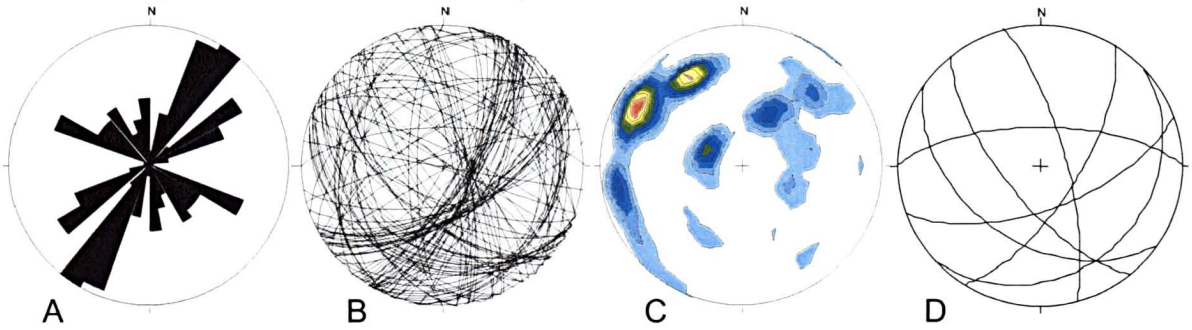


Figura 8.19: Diagramas estruturais para o ponto 22 (pedreira Roça Grande, limite norte com município de Colombo).

Neste afloramento as estruturas de maior destaque e favoráveis para água são fraturas subhorizontais de grande porte (Prancha 8.4, Foto 13, pg. 91), planos de falhas transcorrentes de direção **N-S** com mergulhos de **15**^{o} para sudoeste (com ultracataclasito como preenchimento, porém as juntas são abertas o que sugere ter ocorrido a reativação destas estruturas) e ainda fraturas e falhas com orientação predominante de **N31E/76SE** (Prancha 8.4, Foto 14, pg. 91).

Uma terceira e quarta direção de falhas foram medidas com orientação de **N75W/86SW** (transcorrente, fechada) e planos mais subhorizontais a **N80W/15SW** (abertos e favoráveis a circulação de água).

As fraturas apresentam uma dispersão maior ressaltando-se as seguintes concentrações: **N1-12W** (planos verticalizados e abertos), **N10-30E, N60E** (fraturas verticalizadas e também abertas com presença de água, parecem ser conjugadas

com as estruturas de direção N30E), **N38W** (mergulhos subverticalizados) e **N63W/35SW** (planos subhorizontalizados favoráveis a circulação de água).

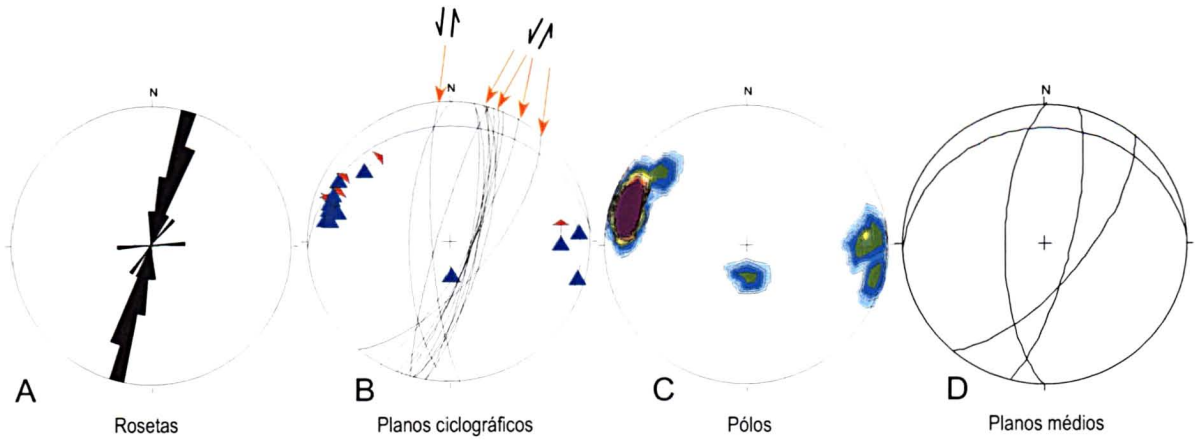
Uma grande zona de cisalhamento rúptil caracterizada por mergulhos subhorizontais em média de 20° e direção em torno de N50E merece ser mencionada por apresentar em uma faixa de 2 m a rocha completamente cataclasada e cominuida gerando caulinização (ocorre muito feldspato e quarzto nestes planos) e muita percolação de água. Essa faixa (prancha 8.4, foto 16, pg. 91) parece cortar todas as outras estruturas do afloramento.

Um fato importante diz respeito à fraturas sistemáticas que parecem ser da mesma fase formando 30° entre si. As componentes que fazem parte deste sistema são as de direção N-S e N35E. Ambas as famílias são muito semelhantes entre si, planares (ocorre um pouco de carbonato como preenchimento) e com mergulhos subverticais. Estas fraturas coincidem, freqüentemente, com medidas de falhas transcorrentes com cinemática indicada por estrias e degraus mostrando movimentação anti-horária em ambas as direções. Estas estruturas cataclasam intensamente a rocha vertendo muita água entre estes planos, dos quais aparentemente os de orientação NE (Prancha 8.4, Foto 15, pg. 91) parecem ser mais abertos que as fraturas de direção N-S.

No afloramento a foliação segue preferencialmente a direção N67W/78NE.

Ponto 23

Falhas (número de medidas: 14)



Fraturas (número de medidas: 43)

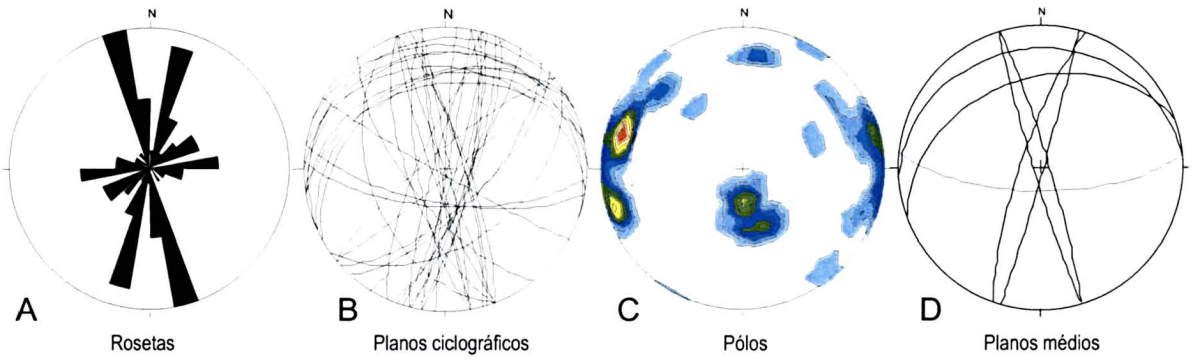


Figura 8.20: Diagramas estruturais para o ponto 23 (pedreira Paulo Leminsky, bairro Tingui).

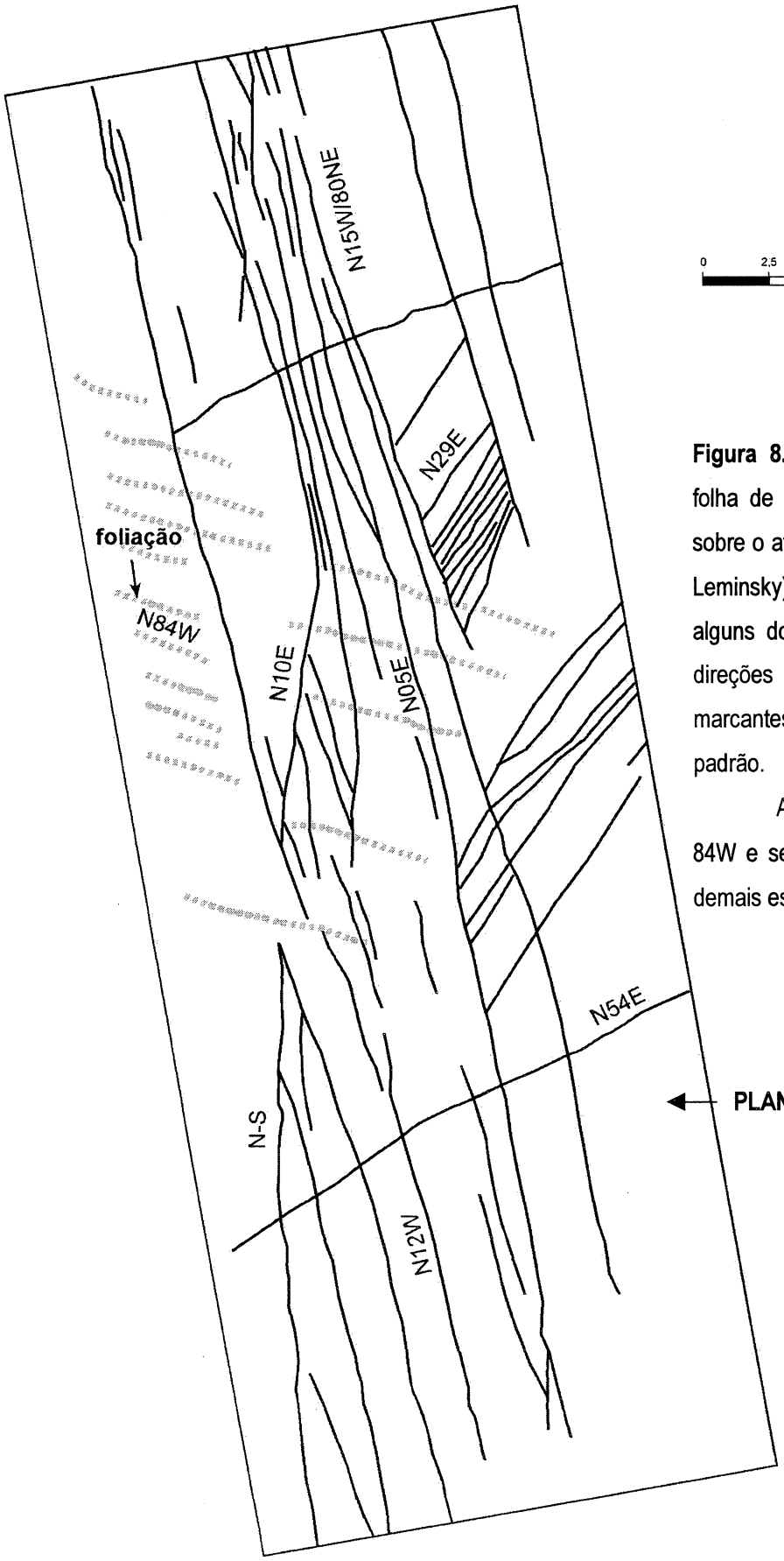
Dos planos verificados como sendo aparentemente mais favoráveis para água destacam-se os relativos aos de falhas transcorrentes compreendidas no intervalo entre **N10-20E/75SE** com movimentação anti-horária indicada por degraus e estrias de atrito. Nas famílias das fraturas podem ser agrupadas três modas principais: **N16E/88SE, N17W/86SW** (abertas e parecem fazer padrão conjugado) e **N70E/38NW**.

Na direção das estruturas N17W/86SW, algumas vezes foi observado calcita e ultracataclasito preenchendo os planos. Nas falhas N-S e N16E também ocorre material (ultracataclasito) entre os planos, no entanto, circula muita água por entre estas estruturas as quais, mesmo estando preenchidas, são na sua grande maioria abertas o que pode ser um indicativo de ter ocorrido reativação tectônica segundo estas direções.

Algumas estruturas são caracterizadas por cisalhamento mais rúptil/dúctil e parecem ser antigas falhas transcorrentes (Pré-Cambriano). Em meio a estes planos foi verificado a presença de clorita o que sugere ter ocorrido temperatura durante o metamorfismo. Injeções graníticas indicam fases de migmatização, outras porções da rocha são de composição mais diorítica.

O desenho da Figura 8.21 (pg. 83) mostra um detalhe traçado em folha de transparência diretamente sobre as rochas do afloramento (pedreira Paulo Leminsky), das relações entre alguns dos planos de fraturas observados no afloramento na horizontal (em planta). As direções N-S e N05-30E são bem marcantes e parecem configurar um padrão sistemático e repetitivo entre si.

A foliação tem direção N84W e se apresenta cortada pelas demais estruturas.



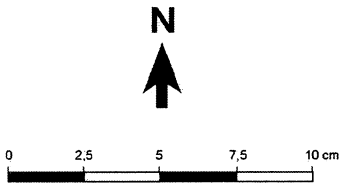


Figura 8.21: O desenho feito em folha de transparência diretamente sobre o afloramento (pedreira Paulo Leminsky), mostra as relações entre alguns dos planos de fraturas. As direções N-S e N05-30E são bem marcantes e parecem configurar um padrão.

A foliação tem direção N-84W e se apresenta cortada pelas demais estruturas.

Ponto 24

Fraturas (número de medidas: 18)

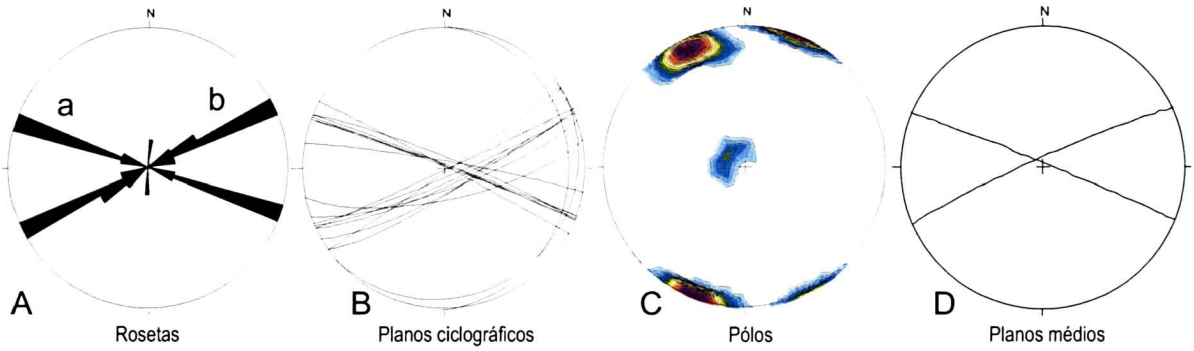


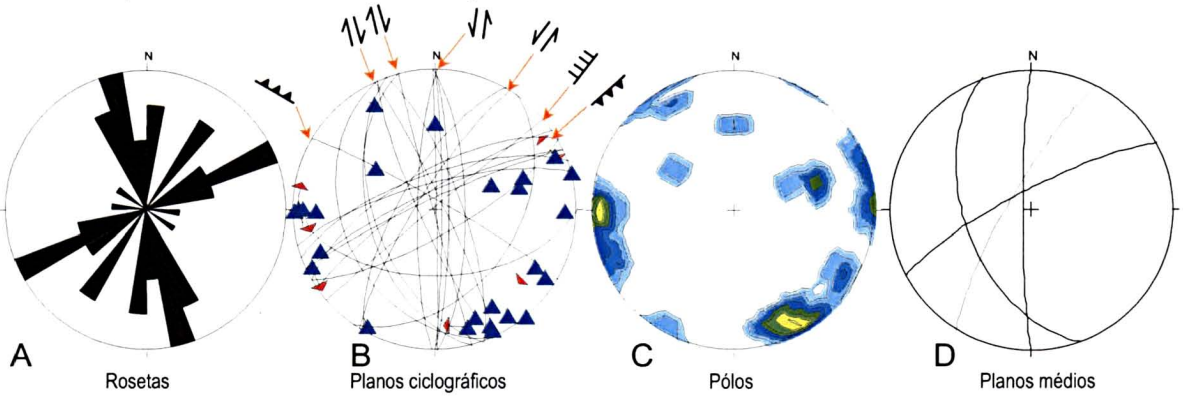
Figura 8.22: Diagramas estruturais para o ponto 24 (pedreira do Atuba, bairro do Atuba).

Os sistemas "a" N68W/88NE e "b" N66E/85NW são as concentrações de maior destaque neste afloramento. Os planos "b" são menos rugosos, mais ou menos abertos e com presença de água, entretanto, percola mais água nos planos "a" do que em "b". Nas estruturas N68W a rugosidade é maior, porém o cisalhamento rúptil é muito mais forte nesta direção.

No afloramento foi observado bandamento gnáissico marcante e porções graníticas com injeções de quartzo e feldspato. Nestas porções foi verificada a presença de sigmóides e de cristais de feldspato rotacionados formando sombra de pressão, indicando regime tectônico de caráter mais dúctil. Além disso, em meio a foliação de direção N51E/49NW e de alguns planos de fraturas foi encontrado epidoto.

Ponto 25

Falhas (número de medidas: 25)



Fraturas (número de medidas: 259)

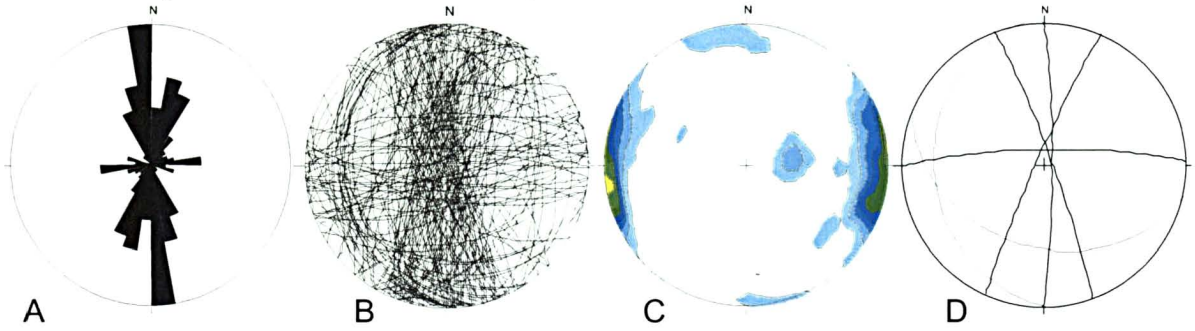


Figura 8.23: Diagramas estruturais para o ponto 25 (pedreira Pussoli, bairro Butiatuvinha).

As rochas deste afloramento se apresentam intensamente tectonizadas (cisalhamento rúptil), em geral os planos médios subverticalizados N25W (Prancha 8.5, Foto 17, pg. 92), N-S e N30E (Prancha 8.5, Foto 19, pg. 92) tanto das falhas quanto das fraturas são muito marcantes, abertos e favoráveis àcirculação de água.

Nas falhas as principais modas foram **N-S/85W, N62E/79NW e N20W/51NE**. Nas fraturas foi obtido um grande número de concentrações, porém ainda assim é possível distinguir através do diagrama de isolinhas dos pólos um padrão representado pelos seguintes planos em ordem de importância: **N15W/85NE, N-S/90, N25E/86NW e E-W/82N**.

Em meio as estruturas subverticalizadas de direção N-S e N15W, foram observadas porções mais graníticas em meio a rocha e ainda ultracataclasito, quartzo estirado e epidoto preenchendo as fraturas, no entanto, os planos são na sua grande maioria abertos.

Na direção de N80W/65NE e N70E/80SE foi medido uma grande estrutura (possível estrutura em flor) que causa cisalhamento rúptil e cataclasamento muito forte na rocha (Prancha 8.7, Foto 26, pg. 94).

Estruturas de grande porte subhorizontalizadas, possivelmente atectônicas também devem ser mencionadas como sendo favoráveis a circulação de água subterrânea (Prancha 8.5, Foto 18, pg. 92 e Prancha 8.6, Foto 23, pg. 93). Estes planos parecem ser de alívio, são espaçados e muitas vezes não apresentam uma grande continuidade lateral. Outras fraturas oblíquas e de mergulhos com ângulos baixos a médios, porém de origem tectônica, também parecem ser favoráveis para água no afloramento (Prancha 8.6, Foto 24, pg. 93). A moda principal encontrada é N8W/32SW.

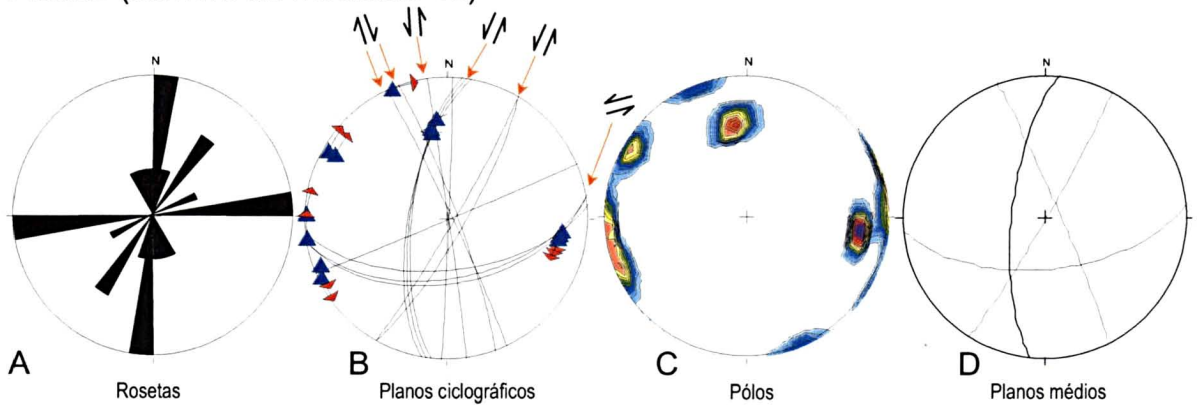
Os planos subverticalizados N-S e N20W parecem formar padrão conjugado em forma de "X" (Prancha 8.5, Foto 19, pg. 92) assim como entre as direções N-S e N30E. No afloramento outras duas zonas de cisalhamento rúptil muito marcantes foram observadas e merecem destaque. Na primeira, a rocha se apresenta intensamente cataclasada e com feições sigmoidais (Prancha 8.6, Foto 20, pg. 93). Na segunda zona de cisalhamento os planos são bastante abertos e a rocha no interior desta faixa se apresenta cominuida. As direções que representam estas duas zonas de cisalhamento podem ser observadas em suas respectivas fotos.

No afloramento também foram observadas estruturas mais antigas (Pré-Cambriano), provavelmente pertencentes à primeira fase tectônica, tendo como exemplo uma grande falha normal de atitude N53E/75NW (estria de atitude N50/80) formando plano aparentemente fechado, retilíneo, gerando ultramilonitização e ainda estiramento mineral (Prancha 8.7, Foto 25, pg. 94).

Três falhas inversas foram medidas no local: N35E/42SE, N60E/75SE, N60W/85NE.

Ponto 26

Falhas (número de medidas: 13)



Fraturas (número de medidas: 94)

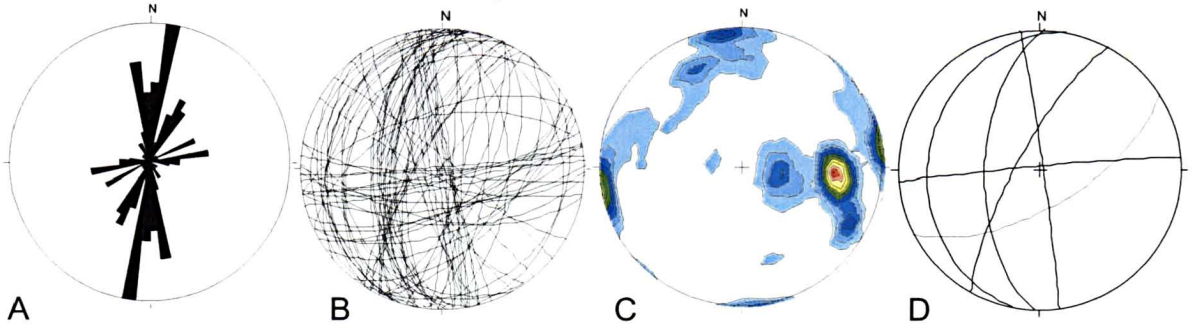


Figura 8.24: Diagramas estruturais para o ponto 26 (pedreira Maringá, limite entre o município de Campo Largo e os bairros de Butiatuvinha e Orleans).

No ponto 26 (Prancha 8.8, Foto 31, pg. 95) o cisalhamento rúptil atuando sobre as rochas também se apresenta muito intenso. De acordo com as direções médias obtidas em diagramas de isolinhas dos pólos das falhas (a) e fraturas (b) ocorrem as seguintes modas: (a) **N82E/68NW, N30E/85NW** e **N6E/71NW;** em (b) **N2E/58NW, N8W/88NE, N85E/88NW e N11E/22NW**.

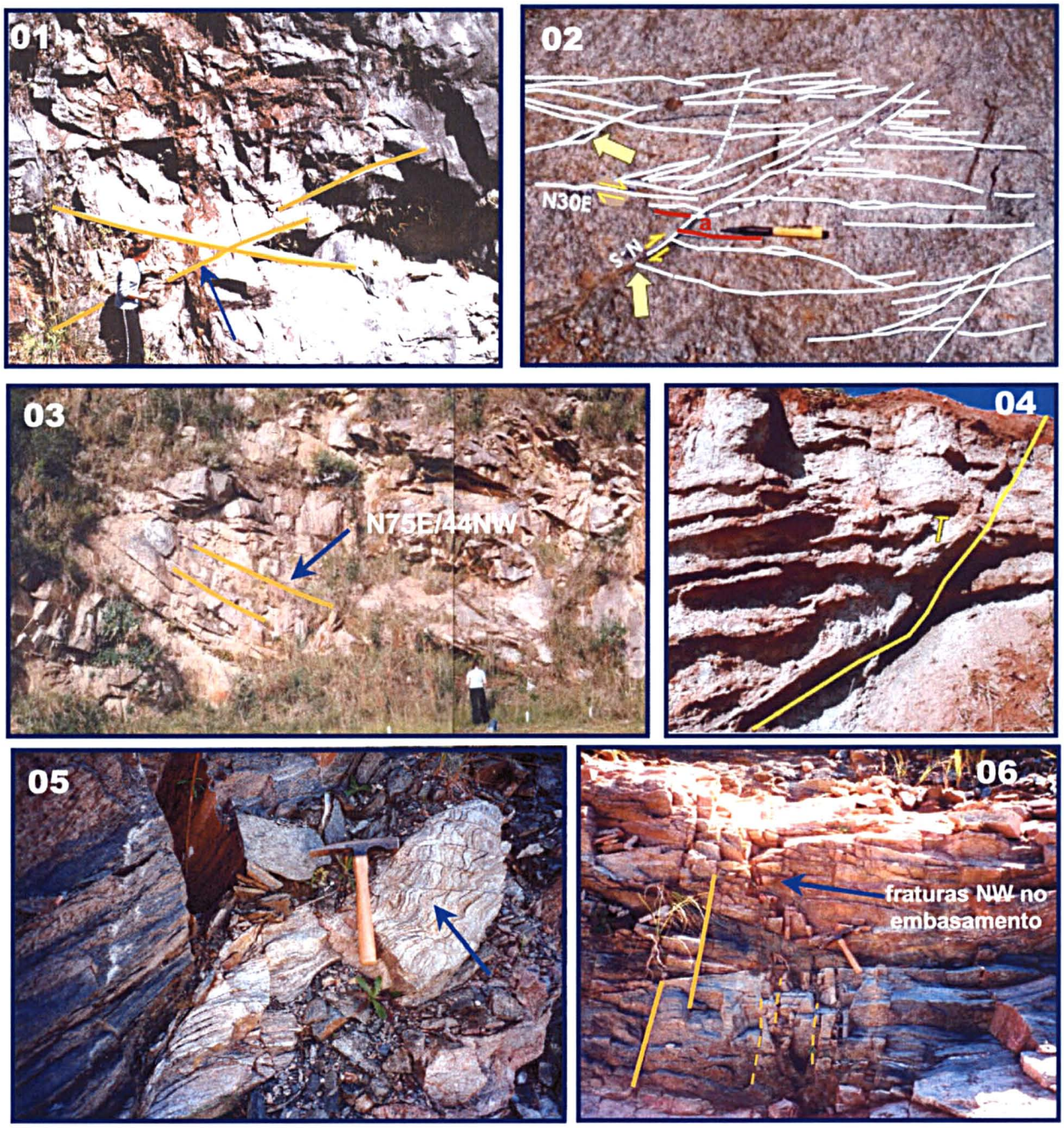
Os planos N-S (Prancha 8.9, Fotos 32 e 33, pg. 96) e E-W (Prancha 8.8, Foto 29, pg. 95) foram os que mais se destacaram em relação à circulação de água, no entanto, no geral em todas as direções médias foi observada percolação de água. Por todo afloramento foram observadas grandes estruturas tais como a da Prancha 8.7 (Foto 28, pg. 94) com direção e mergulho N80E/55SE.

Entre os sistemas N30E/77SW e N50E/30NW parece haver a formação de padrão conjugado (Prancha 8.7, Foto 27, pg. 94).

No afloramento foram medidas falhas transcorrentes (anti-horárias) com atitude N08W/89NE e movimentação cinemática indicada por estrias e degraus no azimute N356/03 (Prancha 8.8, Foto 30, pg. 95).

Na Prancha 8.9, as Fotos 34 e 35 (pg. 96) ilustram outro padrão de falhas encontrado no local além das transcorrentes. Estas estruturas parecem ter movimentação inversa (N80E/52SE) e também uma componente oblíqua de deslocamento.

Assim como nos outros afloramentos, nas direções dos planos N-S, NNW, e NNE as fraturas são na sua grande maioria abertas, mas freqüentemente ocorre material de preenchimento em meio a estas estruturas cataclásticas, em geral ultracataclasito. Porções pegmatíticas com desenvolvimento de cristais de anfibólios com até 4cm de comprimento também foram observadas na rocha.



Prancha 8.1:

Foto 01: Padrão conjugado (em "X") de fraturas oblíquas em rochas do embasamento. O plano indicado em amarelo desloca dique de diabásio.

Foto 02: Planos de falhas transcorrentes se cruzando. A direção N-S (movimento horário) corta direção N30E (anti-horária). As setas indicam porções da rocha onde ocorre ultracataclasito.

Foto 03: Planos de fratura oblíquos (N75E/44NW), segundo os quais o cisalhamento rúptil é intenso.

Foto 04: Falha inversa (N10W/52NE) cortando os sedimentos da Formação Guabirotuba.

Foto 05: Pequenas dobras do tipo *shear folds* indicando cisalhamento rúptil-dúctil.

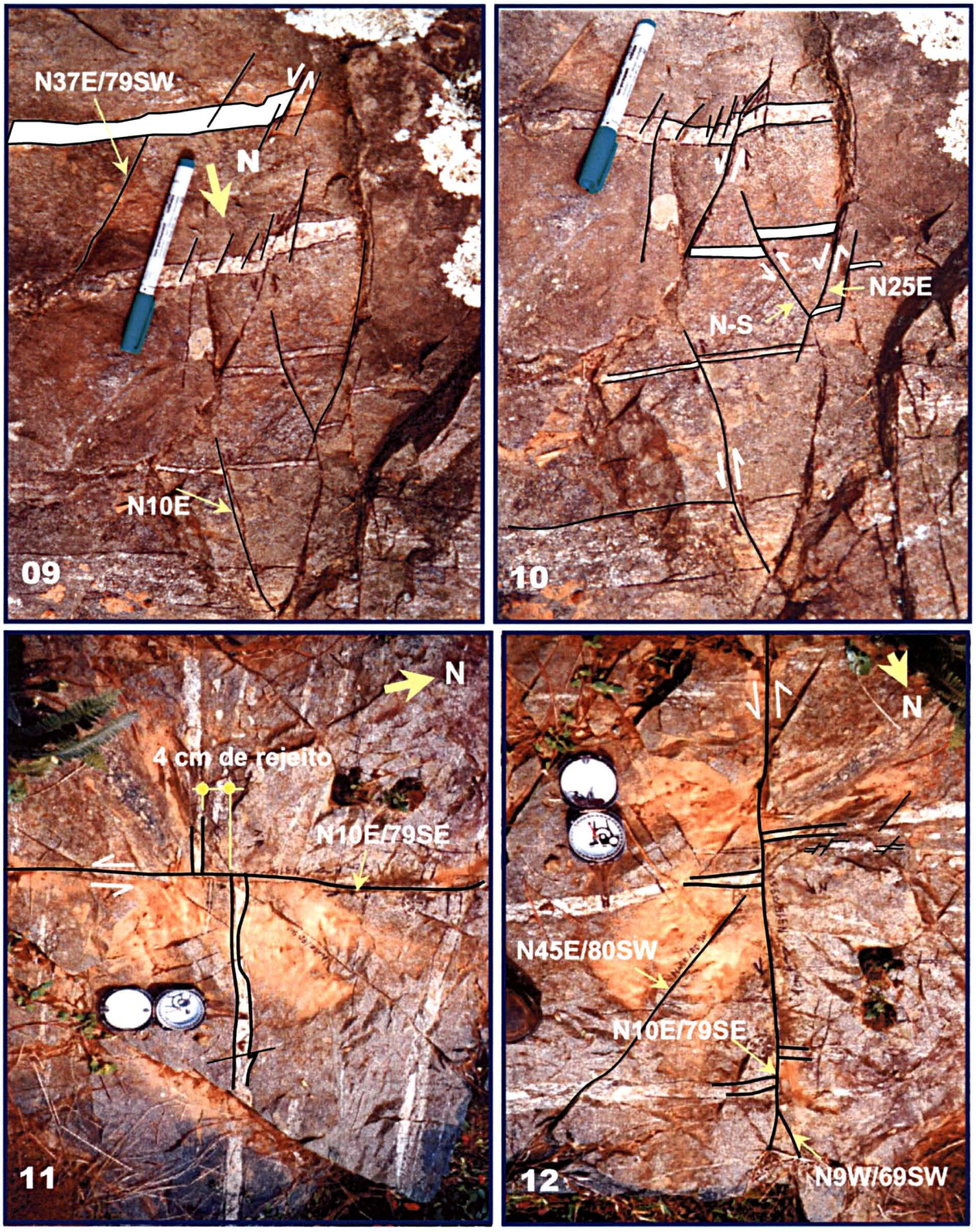
Foto 06: Sistema de fraturas onde também foi medido falha transcorrente no plano N18W/76NE.



Prancha 8.2:

Foto 07: Aspecto de espelho de falha (direção de linhas em preto indicadas pelas setas em amarelo) gerado por sistema de falha transcorrente com orientação N3W/70NE e movimentação anti-horária. A movimentação cinemática foi verificada através de estrias e degraus no azimute N357/10.

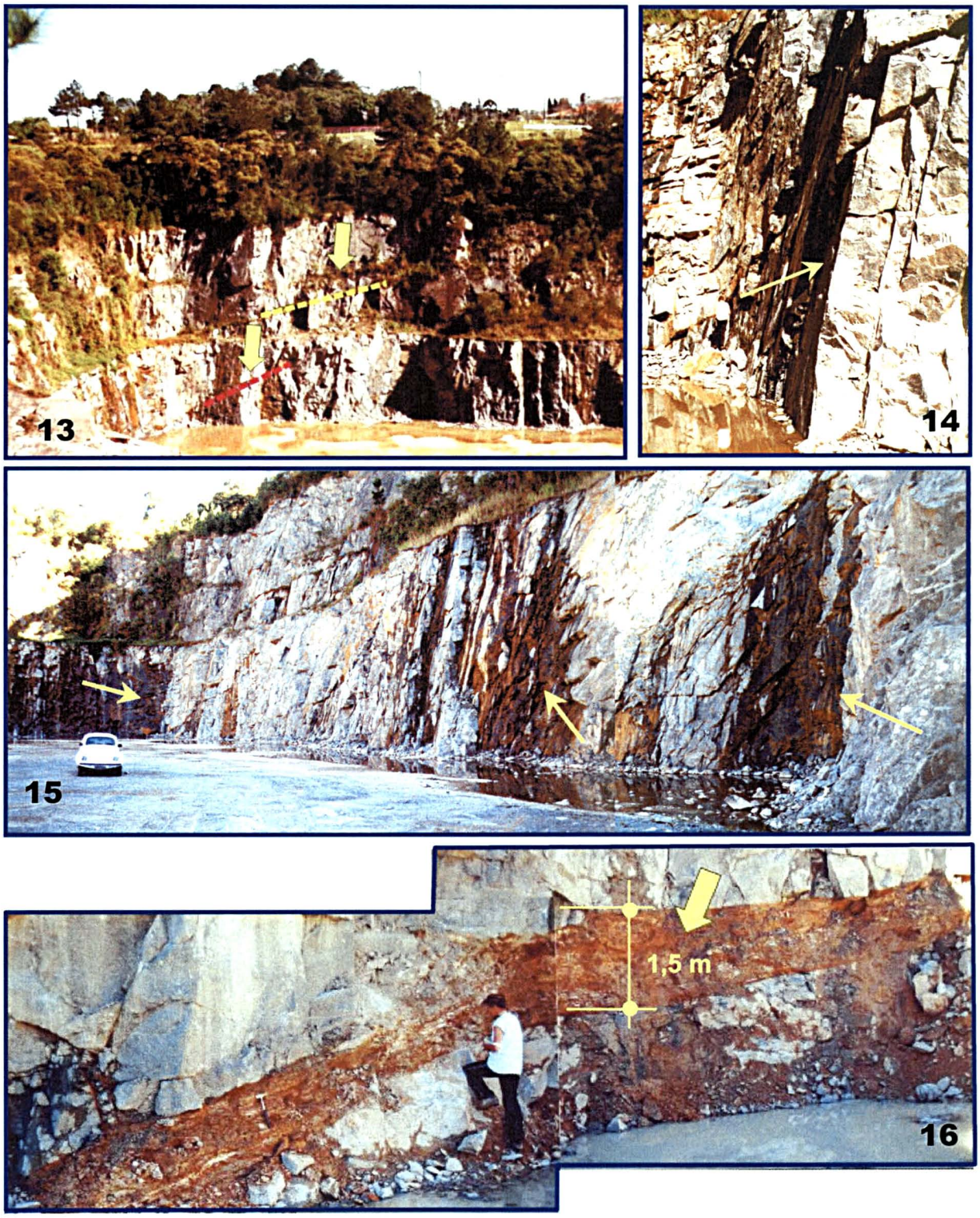
Foto 08: Os planos correspondentes ao sistema transcorrente neste local são abertos e lisos havendo percolação de água.



Prancha 8.3:

Foto 09 e 10: Sistema de falhas transcorrentes onde a movimentação cinemática foi indicada pelo deslocamento do bandamento gnáissico. Ambas as direções apresentam movimentação anti-horária.

Foto 11 e 12: Mais um detalhe deste sistema transcorrente cortando o bandamento gnáissico. Na foto 11 é indicado o rejeito decimétrico da falha.

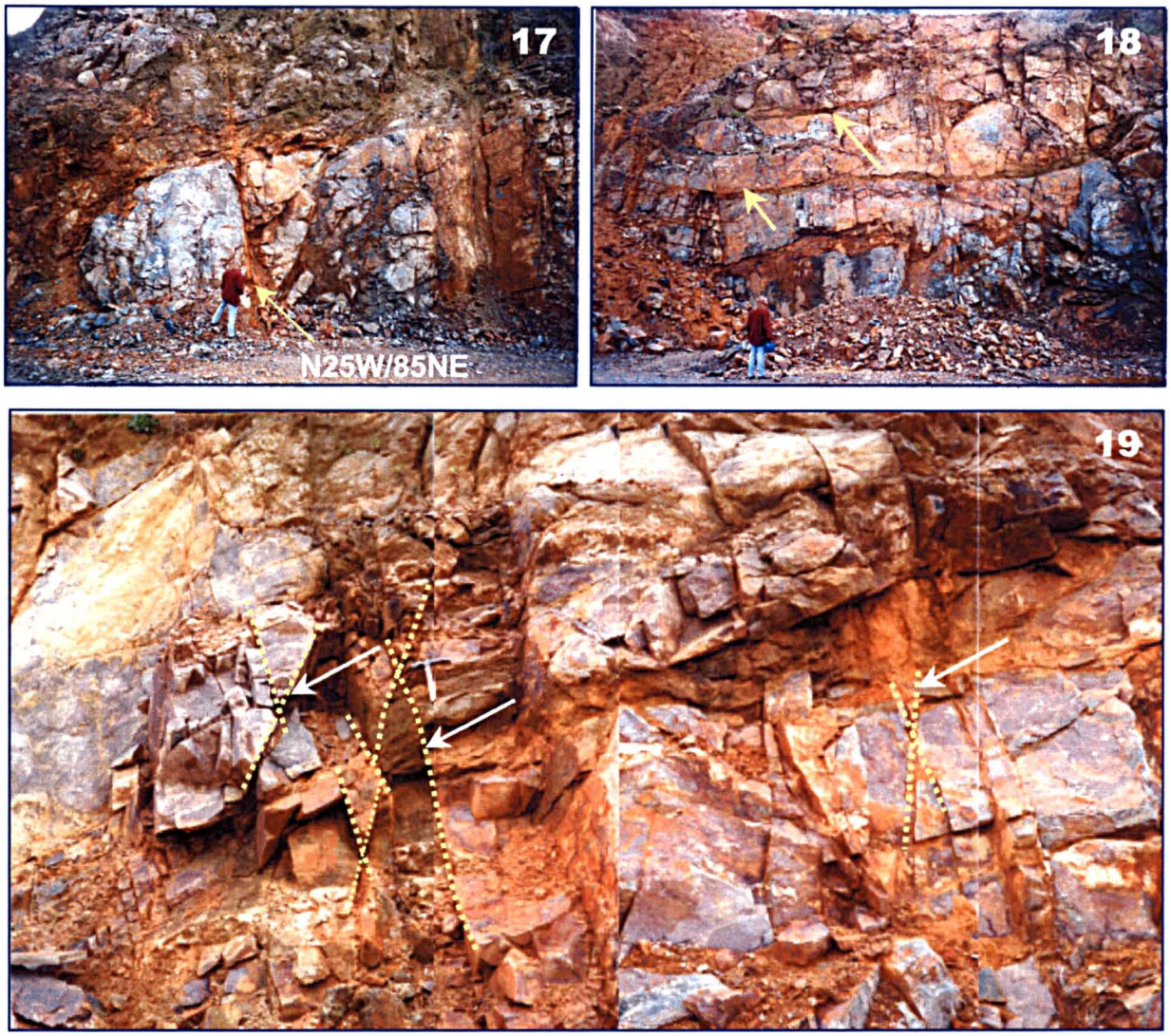


Prancha 8.4:
Foto 13: Estruturas subhorizontais de grande porte (favoráveis para água subterrânea).

Foto 14: Aspecto de sistema de fraturas e falhas transcorrentes (anti-horária) nos planos N36/15E e N31E/76SE. O cisalhamento nesta direção é muito intenso, as fraturas são abertas.

Foto 15: As setas em amarelo indicam os planos de fratura de direção NE por onde ocorre percolação de água.

Foto 16: Grande zona de cisalhamento causando intenso cataclasamento e cominuição das rochas.

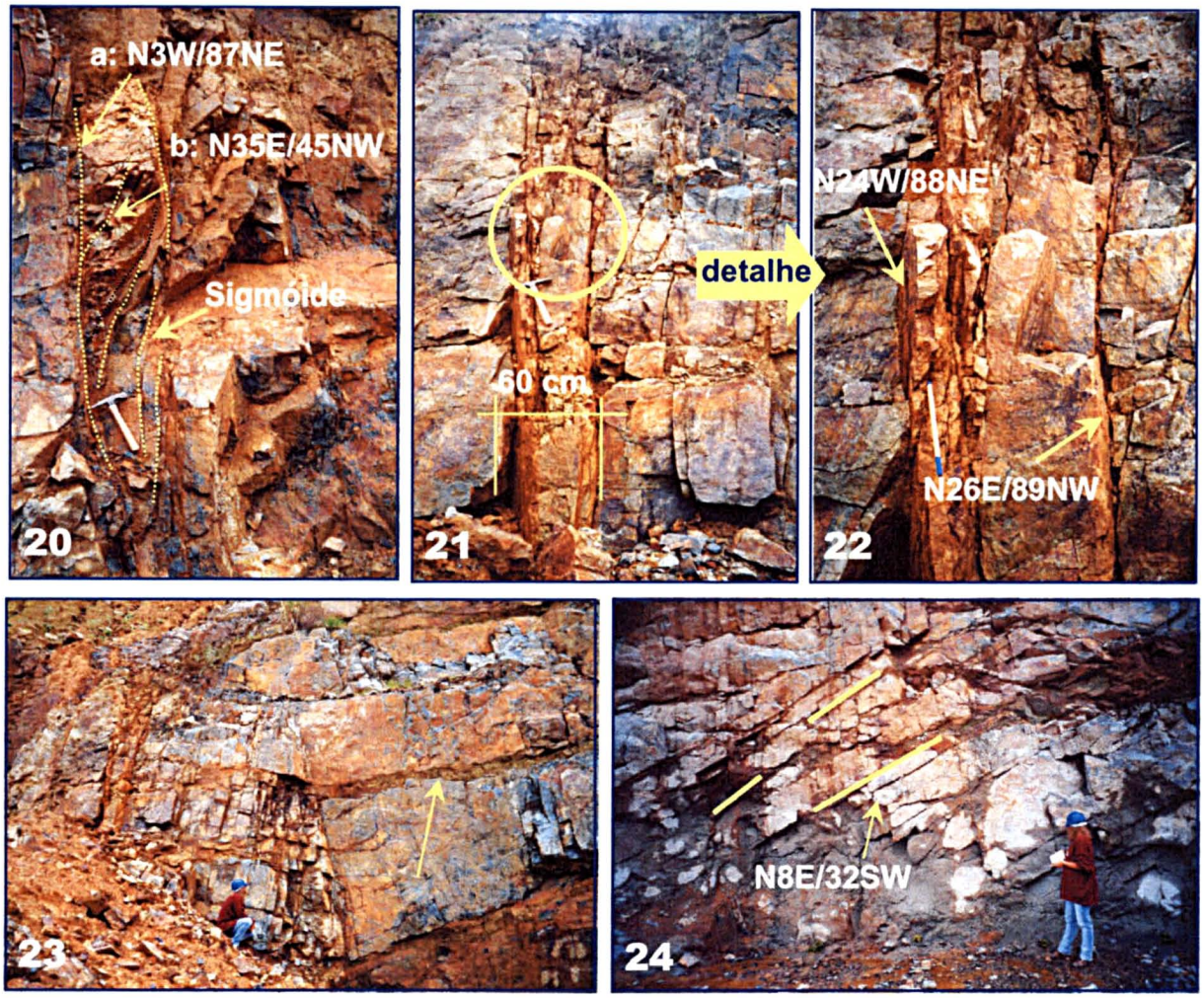


Prancha 8.5:

Foto 17: A seta em amarelo indica plano de falha transcorrente N25W/85NE muito marcante, estrias e degraus no azimute N25/14. Entre estes planos foi observada percolação de água.

Foto 18: Aspecto de estruturas subhorizontais de grande porte, parecem ser de alívio (atectônicas).

Foto 19: Sistema de fraturas formando padrão em "X" (conjugado), os planos são abertos e favoráveis para água.



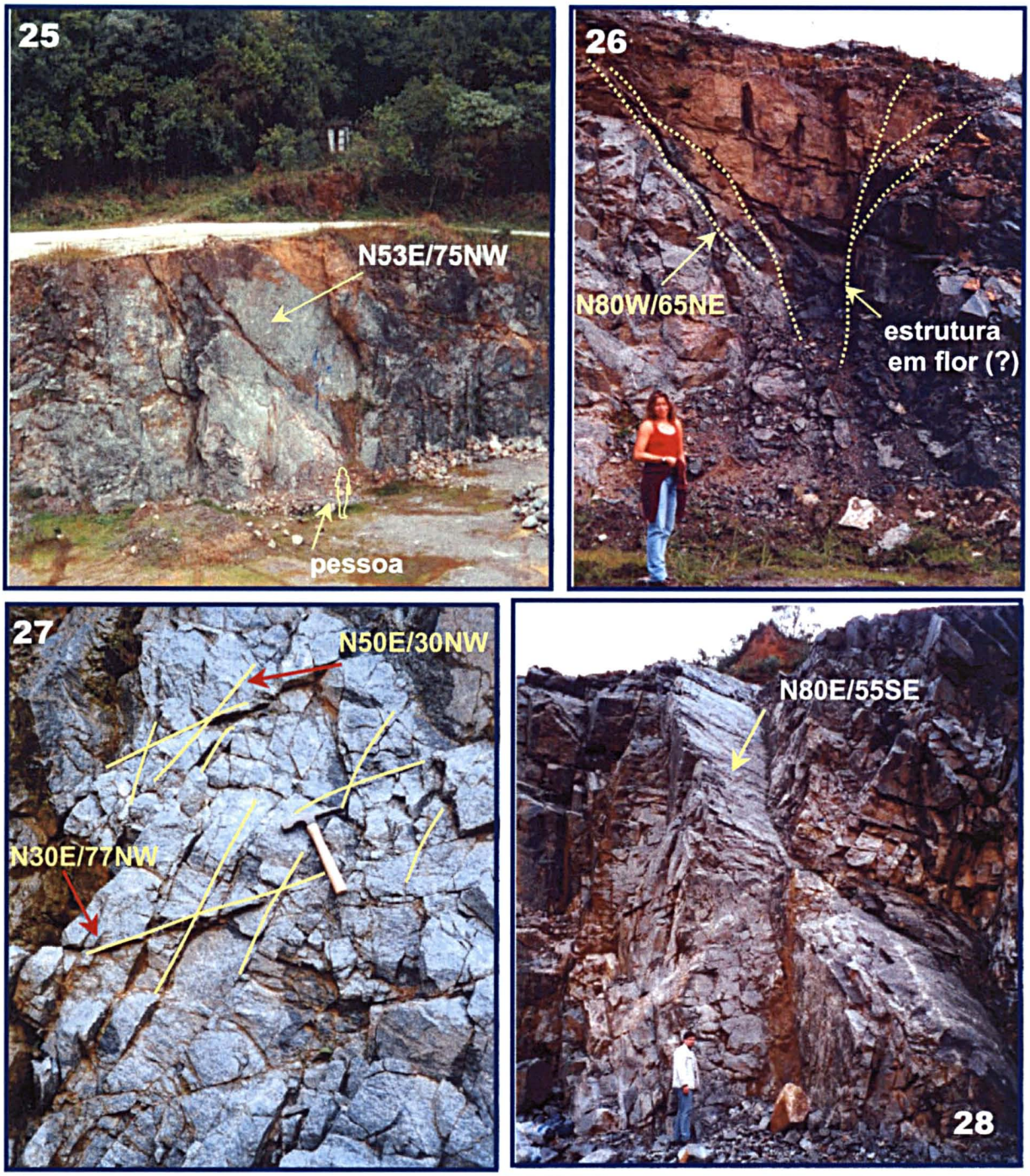
Prancha 8.6:

Foto 20: Zona de cisalhamento rúptil com formação de feições sigmoidais.

Foto 21 e 22: Zona de cisalhamento rúptil apresentando planos bem espaçados nesta direção.

Foto 23: A seta em amarelo indica estruturas subhorizontais de grande porte, provavelmente atectônicas. A rocha no interior destes planos se apresenta bastante cominuida.

Foto 24: Aspecto de sistema de fraturas oblíquas muito marcante no afloramento, nos quais foi observado bastante percolação de água.



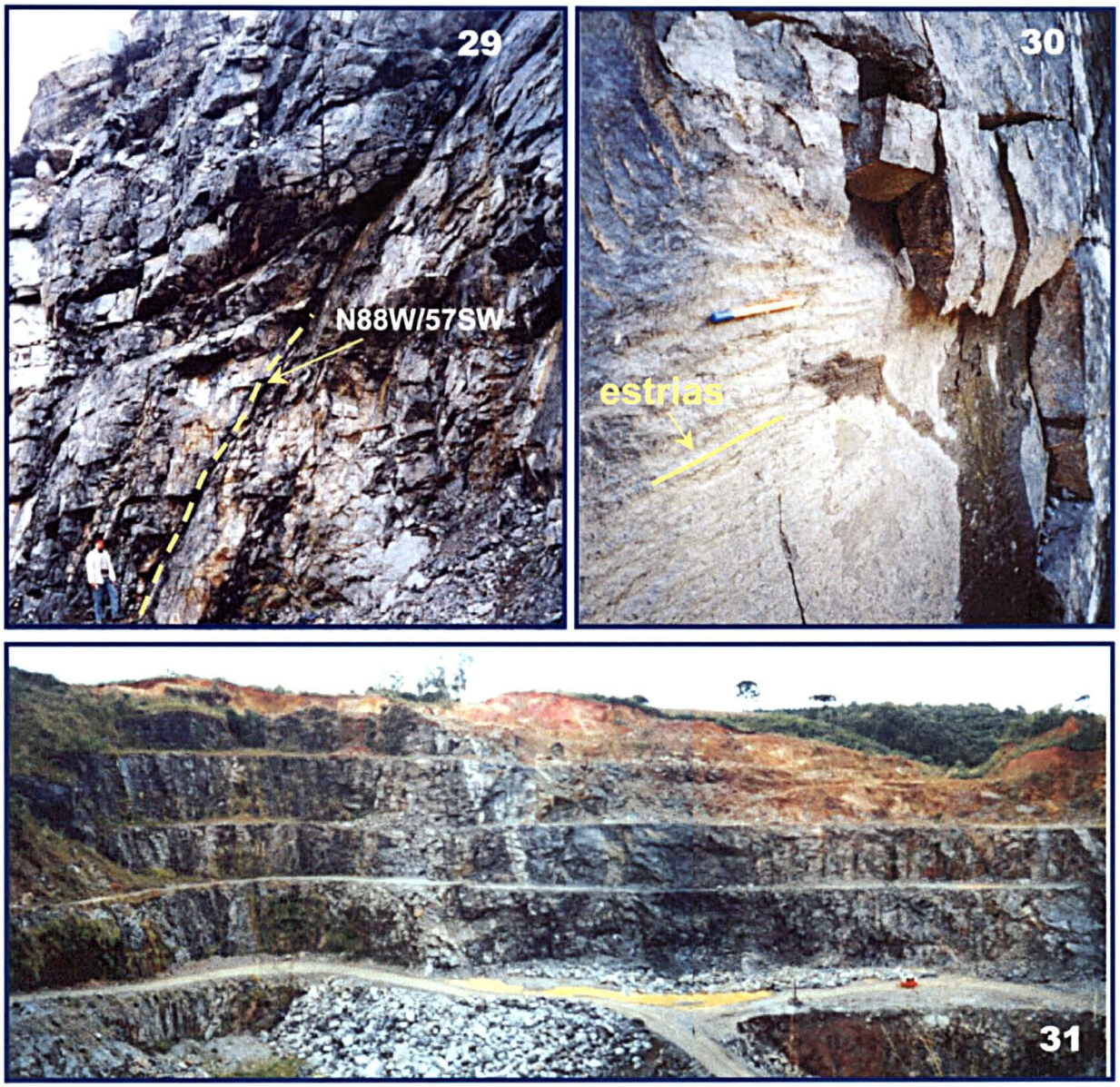
Prancha 8.7:

Foto 25: Estrutura mais antiga representada por uma grande falha normal de atitude N53E/75NW (N50/80) com plano retilíneo onde observa-se ultramilonitização e estiramento dos minerais na rocha.

Foto 26: Grande faixa de cisalhamento rúptil cataclasando intensamente a rocha, parece formar estrutura em flor.

Foto 27: As setas em vermelho indicam sistemas de fraturas muito marcantes sendo a maioria abertas (parecem fazer padrão conjugado).

Foto 28: Grande plano de falha com orientação N80E/55SE.

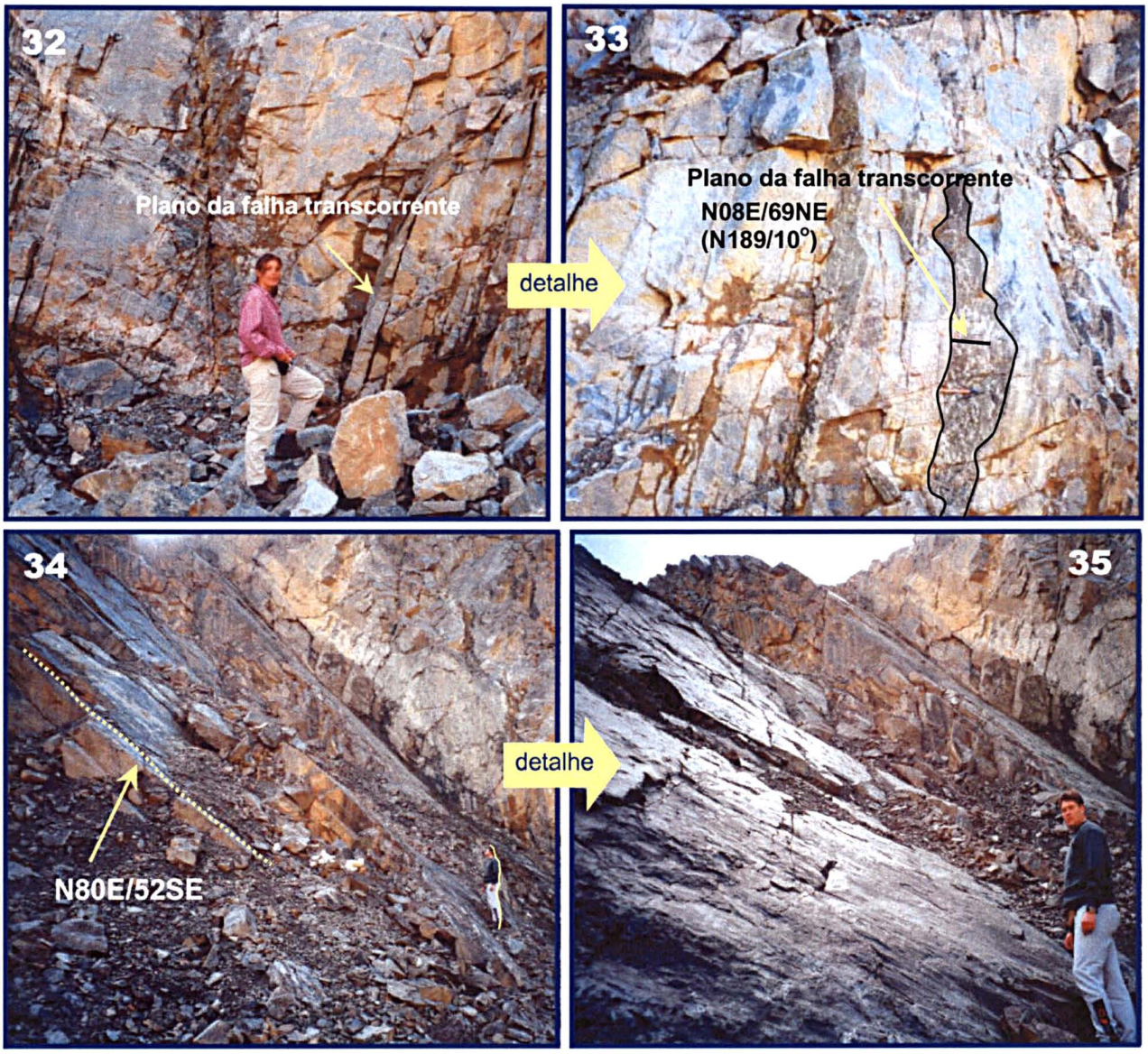


Prancha 8.8:

Foto 29: Grande plano de falha em N88W/57SW, aberto e com circulação de água.

Foto 30: Falha transcorrente N08W/89NE com movimentação cinemática indicada por estrias e degraus no azimute N356/03, parece ser anti-horária.

Foto 31: Aspecto geral da pedreira Maringá.



Prancha 8.9:

Foto 32 e 33: A primeira foto mostra o aspecto geral dos planos de direção onde foi medido falha transcorrente em N08E/69NE e estrias e degraus em N189/10. Observou-se percolação de água entre os planos (abertos). Na foto 33 é mostrado um detalhe do plano da falha.

Foto 34 e 35: Grande plano de falhas (N80E/52SE), parece ter movimentação inversa. Na foto 35 (detalhe) observa-se aspecto dos planos retilíneos, lisos e abertos.

8.2.2 Análise em conjunto das famílias de fraturas existentes

Fazendo uma análjse em conjunto dos dados obtidos na área de estudo, os locais que estão claramente tectonizados são os pontos: 01 (pedreira Tanguá), 06 (corte de estrada no CIC),12 (pedreira Transemra), 16 (pedreira Transemra), 20 (afloramento em fundo de drenagem atrás do restaurante Cascatinha), 22 (pedreira Roça Grande), 23 (pedreira Paulo Leminsky), 25 (pedreira Pussoli) e 26 (pedreira Maringá).

Como existe uma superposição de pelo menos dois eventos tectônicos sobre as rochas do embasamento não é simples estabelecer quais das estruturas presentes são relativas a uma mesma fase. Um exemplo desta situação pode ser observado no diagrama de rosetas do ponto 22 (pg. 80), neste local há uma certa dificuldade em indicar os valores médios mais representativos das fraturas já que, certamente, ocorre mais de uma fase de geração destas estruturas. As modas obtidas neste afloramento foram as que mais diferenciaram do padrão geral.

Considerando a dificuldade em estabelecer as relações cronológicas existentes, embora todos os padrões das estruturas nos diferentes afloramentos da área tenham sido observados e suas atitudes tenham sido medidas para gerar os diagramas anteriormente ilustrados, o principal critério adotado para a análise estrutural foi o de caracterizar geometricamente, principalmente, quais dessas estruturas foram as mais representativas e quais destas falhas e fraturas geram um padrão sistemático, sendo as mais favoráveis para água subterrânea. De acordo com a trama espacial, direções estruturais específicas, como as chamadas fraturas em "T", vão ser geralmente mais abertas e favoráveis para água, sendo portanto objeto de interesse nessa pesquisa.

Embora ocorram diferentes modas, de todas as estruturas observadas em campo, nos diagramas de roseta e planos médios dos pólos máximos de falhas e fraturas, a direção N-S está praticamente presente em todos os afloramentos. Freqüentemente, estão associadas nesta direção grandes zonas de cisalhamento rúptil decorrente da atuação de falhas transcorrentes. Falhas normais e inversas ocorrem de forma secundária na área. Outra característica importante é o fato dos planos N-S apresentarem em geral preenchimento (ultracataclasito), porém o cisalhamento e cataclasamento nesta direção é muito intenso abrindo a maioria dos

planos e favorecendo a circulação de água subterrânea. Na verdade, existe uma certa variação nas medidas N-S sendo aqui considerados os planos subverticalizados compreendidos no intervalo entre N10W a N10E como do mesmo sistema, já que as características dessas fraturas são muito similares.

Além das estruturas N-S foram verificados outros sistemas que frequentemente estão presentes na área, sendo estes: falhas transcorrentes e planos de fratura de direção N20-35E e mergulhos subverticalizados; sistema de fraturas no intervalo de N20-30W; estruturas de direção E-W muito marcantes, principalmente a norte do município; e secundariamente uma moda em torno de N65E.

De acordo com as análises realizadas, os planos abertos que mais se mostraram favoráveis para exploração de água subterrânea são os de direções N-S e N25-35E apresentando mergulhos subverticais, geralmente associados a falhas transcorrentes.

Estruturas subhorizontais, configurando grandes planos de fraturas, também devem ser mencionadas como favoráveis à circulação de água subterrânea. Estes planos são de dois tipos: os primeiros apresentam grande espaçamento entre si, são sinuosos e tem pouca continuidade lateral o que gera dúvida se realmente são decorrentes de tectônica (a exemplo dos planos desta família encontrados no ponto 01), ou então estes planos configuram outro sistema muito marcante, são bem repetitivos, penetrativos e por isso caracterizados como de origem tectônica com orientação principal em torno de N8E/32NW (ponto 25, prancha 8.6, foto 24, pg. 93).

De acordo com esta configuração espacial as estruturas subverticais N-S e NE servem como condutos para circulação de água e as subhorizontais como armazenadoras.

8.3 Análise dos campos de tensão

8.3.1 Aspectos iniciais

A determinação do campo de tensões nas rochas do embasamento e sedimentos da Bacia de Curitiba é de grande importância nos estudos hidrogeológicos. Como verificado na análise estrutural, a configuração e arranjo

geométrico dos planos estruturais, determina direções específicas onde as falhas e fraturas mais abertas são favoráveis à circulação de fluídos, ao contrário de outros planos que tendem a ser mais fechados.

Neste item o objetivo principal é fazer uma correlação espacial das estruturas sistemáticas nas rochas do embasamento aqui estudadas, mostrando através da aplicação do modelo de RIEDEL (1929), os ajustes dos planos estruturais que se mostram, de acordo com os esforços tectônicos principais verificados na área, favoráveis a ocorrência de água subterrânea.

8.3.2 Considerações teóricas e sínteses gerais

ROSTIROLLA (2001) relembra o fato já mencionado por ANDERSON (1942), onde o autor descreve que as falhas e fraturas não ocorrem na natureza de forma randômica, mas sim, segundo uma geometria espacial padronizada onde as orientações destas estruturas podem ser associadas às tensões principais de acordo com a classificação em falhas reversas, normais ou transcorrentes. Da mesma forma BURBANK e ANDERSON (2001) utilizando experimentos de laboratório e estudos de campo, afirmam ocorrer uma previsibilidade na geometria das estruturas que formam as rochas superficiais, drenagens e depósitos de aluviões em resposta ao campo de tensões existente.

De forma resumida pode-se dizer que o campo de tensões gerado por forças tectônicas pode ser decomposto por três componentes de tensões definidos como $\sigma1>\sigma2>\sigma3$ (ALLEN e ALLEN, 1990). Em três dimensões, as tensões são caracterizadas matematicamente e graficamente por um elipsóide de tensões em modelos de cisalhamento rúptil tais como no modelo cisalhamento de RIEDEL (*op. cit.*).

Em termos gerais, são mencionadas algumas considerações a respeito dos estudos até então realizados, envolvendo a caracterização das tensões principais presentes no continente sul-americano.

No trabalho de SALAMUNI (1998) é feita uma ampla discussão sobre a tectônica cenozóica e neotectônica da plataforma brasileira servindo como grande referencial a geologia aplicada à exploração de recursos hídricos e geotecnia, na

região de Curitiba e arredores. Tendo como base a pesquisa deste autor, são resumidos aqui alguns aspectos de importância no atual estudo.

Dados de observações geológicas de *breakouts* de poços produtores de óleo e soluções de mecanismos focais de terremotos foram utilizados por ZOBACK (1992) para gerar um mapa de tensões atuais na Placa Sulamericana. Esta autora conclui a existência de regimes compressivos representados por empurrões e transcorrências nas porções interiores das placas tendo $\sigma 1$ na posição horizontal enquanto que nos regimes extensionais o $\sigma 1$ é vertical e representado por falhas normais (áreas topograficamente elevadas).

De acordo com um estudo de ASSUMPÇÃO (1992) e STEFANICK e JURDY (1992) além de ocorrer tensão compressional E-W na quase totalidade da placa sul-americana, também são mencionadas tensões N-S na região central amazônica e nordeste brasileiro.

HASUI e COSTA (1996) afirmam que as grandes descontinuidades crustais de direção NW e NE são coincidentes com lineamentos pré-cambrianos, podendo estes, por sua vez, estarem reativados com movimentos recentes. Os autores chamam ainda a atenção para a existência de uma relação entre a sismicidade atual e a compartimentação do território brasileiro em blocos. Segundo a direção NW ocorrem os esforços compressivos atuais e segundo NE os distensivos.

Como a Bacia de Curitiba e outras bacias como as de São Paulo, Taubaté e Resende, encontram-se ajustadas à geometria de grandes domínios estruturais que definem a "Faixa de Cisalhamento do Ribeira", é importante mencionar que embora a movimentação principal ao longo das Falhas da Lancinha e de Morro Agudo seja lateral direita, FIORI (1990) admite ter havido uma reativação anti-horária ao longo da Lancinha. Este fato foi deduzido pela inflexão de dois diques na área onde foi feito o estudo, o que sugere que esta reativação aconteceu a partir do Mesozóico em diante.

Especificamente com relação a área da Bacia de Curitiba, SALAMUNI (*op. cit.*) faz importantes interpretações morfotectônicas a partir da caracterização das lineações de drenagem considerando que as mesmas representam alinhamentos de fraturas, e por esta razão são geneticamente ligadas à atividade tectônica.

Na pesquisa deste autor, ao serem analisadas as rosetas de frequências das drenagens de primeira ordem, consideradas como sendo as mais recentes, foram

encontradas quatro direções preferenciais: **NE-SW, NW-SE, E-W** e **N-S**, tendo maior destaque esta última família.

Sobrepondo o modelo de RIEDEL os melhores ajustes possíveis são descritos como sendo:

a) binário NE-SW sinistral, onde as direções das lineações NE-SW coincide com os cisalhamentos R (de RIEDEL), Y e P, e as lineações de drenagem NW-SE correspondem aos cisalhamentos R'. Nesta situação a direção N-S coincidiria com as chamadas fraturas de partição (T), sendo estas as de maior interesse em termos hidrogeológicos (Figura 8.25, letra A);

b) binário NW-SE dextral, onde as direções NW-SE das lineações de drenagens coincidiriam com os planos de cisalhamento R, Y e P, e as direções de lineações NE-SW corresponderiam ao cisalhamento conjugado de RIEDEL (R') tendo as direções N-S com as fraturas de partição (T) (Figura 8.25, letra B).

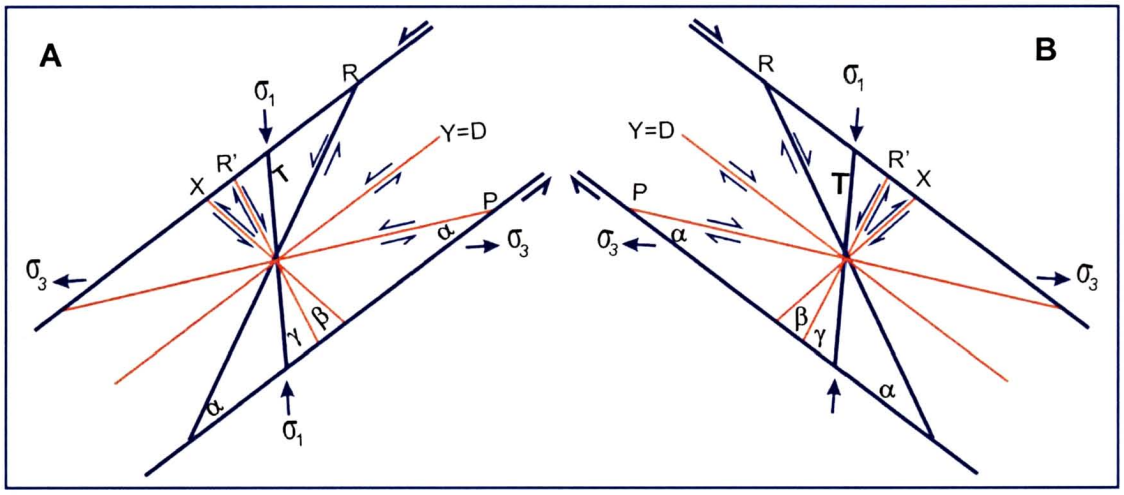


Figura 8.25 (letras "A" e "B"): Possíveis ajustes dos campos de tensão na Bacia de Curitiba, tendo como base a análise das drenagens de primeira ordem, portanto as mais recentes (segundo SALAMUNI, *op.cit*).

Na continuidade desta análise SALAMUNI (*op. cit*) comenta que estes padrões estruturais e cinemáticos só poderiam ser considerados como válidos, se a análise estrutural dos fraturamentos confirmasse tais resultados.

Seguindo esta premissa no próximo item são apresentados os resultados da análise estrutural utilizando os indicadores cinemáticos das falhas e feições de deslocamento (sigmóides, bandamento), para definir espacialmente, de forma aproximada, os campos de tensões presentes no local.

8.4 Diagramas estruturais obtidos com a solução dos tensores

Através dos levantamentos de campo, foram construídos diagramas estruturais via programa STEREONETT v 2.4, das falhas e fraturas observadas nas rochas do embasamento da Bacia de Curitiba, definindo espacialmente os prováveis campos de tensão na área pesquisada, através dos métodos de TURNER (1957) e ANGELIER e MECHLER (1977) que utilizam os indicadores cinemáticos de falhamentos como base para as análises.

Conforme visto na análise realizada anteriormente, no item 8.2, as estruturas sistemáticas estudadas podem ser agrupadas, preferencialmente, nos seguintes intervalos: direções N-S, N15-25W e N20-30E. Na área as fraturas mais abertas também foram observadas principalmente nestas direções. Estas famílias parecem estar correlacionadas entre si, fazendo parte de um mesmo sistema.

As características destes planos e relações geométricas dos indicadores cinemáticos sugerem, à primeira vista, uma direção generalizada de tensão $\sigma 1$ a N-S.

Deve-se ressaltar a complexidade estrutural da área onde mais de um evento tectônico está presente. Por este motivo para os cálculos dos campos de tensões foram utilizadas informações referentes aos planos sistemáticos das falhas transcorrentes associadas a circulação de água subterrânea. Estes planos parecem ter sido reativados em épocas mais recentes (falhas de direção N-S preenchidas com ultracataclasito, porém abertas), provavelmente a partir do Cenozóico (Neógeno), portanto, a solução dos campos de tensão apresentada nesta pesquisa, está relacionada somente a estes sistemas transcorrentes. No entanto, deve-se ter em mente que além da solução dos campos de tensão aqui apresentada, também ocorrem outros ajustes possíveis, a exemplo de um tensor inicial $\sigma 1$ direcionado para E-W, porém os mesmos são relacionados a outras épocas geológicas e configuram um arranjo geométrico distinto dos planos de falhas e fraturas observados como favoráveis a circulação de água subterrânea na área de estudo.

Aqueles planos que apresentaram características muito discordantes dos padrões gerais estudados, causando confusão nos resultados das análises, foram deixados de lado. A cada inserção de uma variável (no caso medida de falha com sua respectiva indicação cinemática), foi observado o resultado gerado nos gráficos

produzidos, utilizando o procedimento chamado na estatística de *step up* (verificação de ponto a ponto). Ao mesmo tempo foi feito um controle cuidadoso com as informações da caderneta de campo e da análise estrutural.

Na sequência são apresentadas as figuras 8.26 até 8.35 com os diagramas obtidos no programa STEREONETT v. 2.4 indicando os campos de tensões presentes na região favoráveis à circulação de água subterrânea. As letras A, B e C representam:

(A) Isolinhas dos pólos (tons de cinza) mostrando a determinação dos campos de tensão utilizando o método dos diedros retos. No diagrama foram sobrepostos os símbolos de losango em lilás para (σ1) e retângulos de cor verde e laranja para (σ2 e σ3) indicando os tensores determinados pelo método de TURNER (1953). Os triângulos em azul representam os planos das falhas e os triângulos em vermelho a indicação cinemática. Essa combinação possibilita comparar as análises em conjunto;

(B Planos médios das falhas transcorrentes que contém os indicadores cinemáticos para a definição dos campos de tensão calculados pelo método de TURNER (*op.cit*);

Ponto 01 (5 medidas com indicadores cinemáticos)

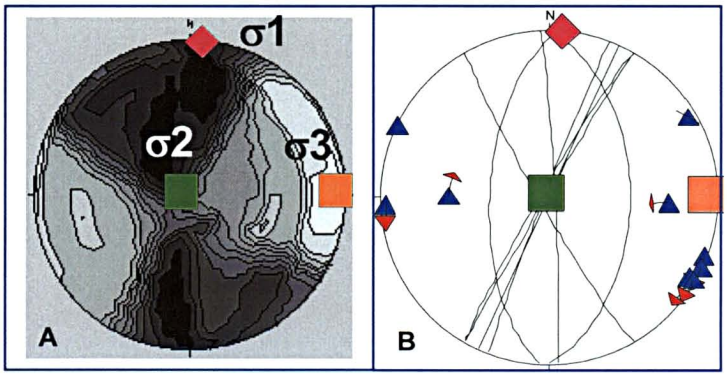


Figura 8.26: Determinação dos campos de tensão para o ponto 01.

Ponto 06 (4 medidas com indicadores cinemáticos)

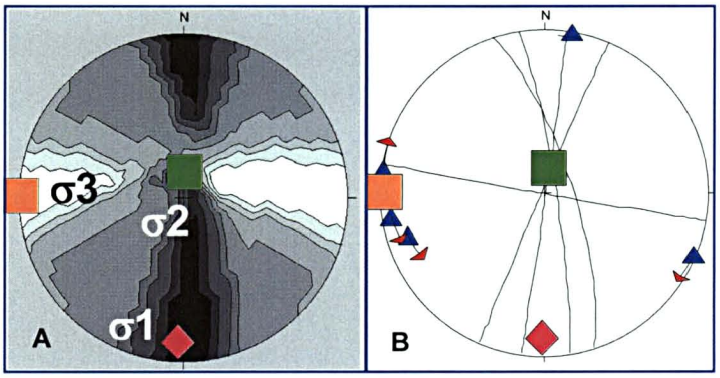


Figura 8.27: Determinação dos campos de tensão para o ponto 06.

Ponto 12 e 16 (14 medidas com indicadores cinemáticos)

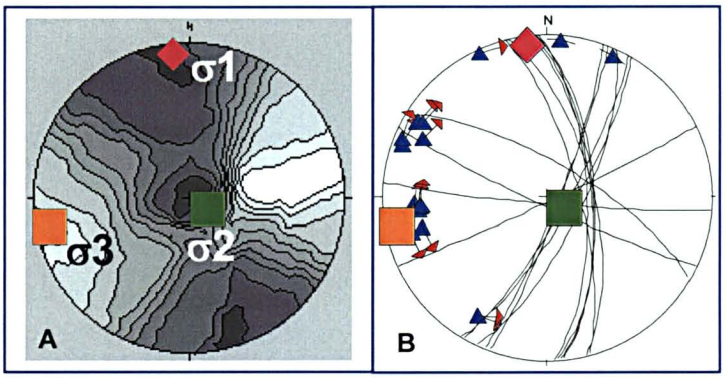


Figura 8.28: Determinação dos campos de tensão para os pontos 12 e 16.

Ponto 20 (6 medidas com indicadores cinemáticos)

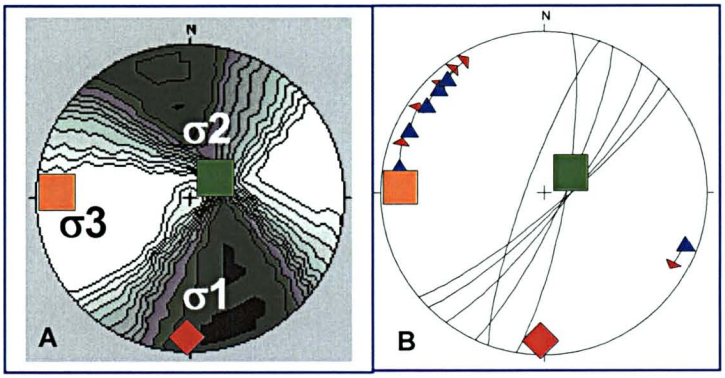


Figura 8.29: Determinação dos campos de tensão para o ponto 20.

Ponto 22 (4 medidas com indicadores cinemáticos)

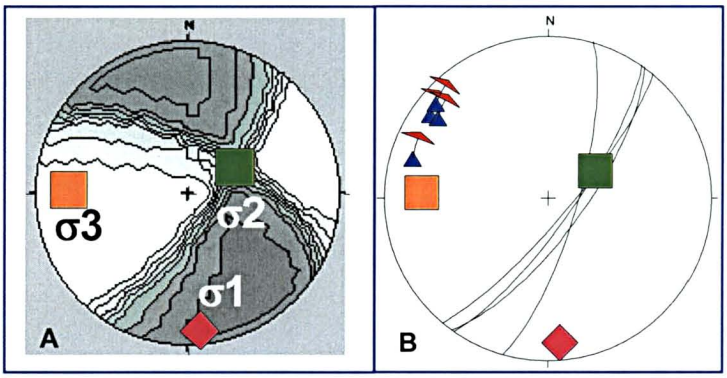


Figura 8.30: Determinação dos campos de tensão para o ponto 22.

Ponto 23 (6 medidas com indicadores cinemáticos)

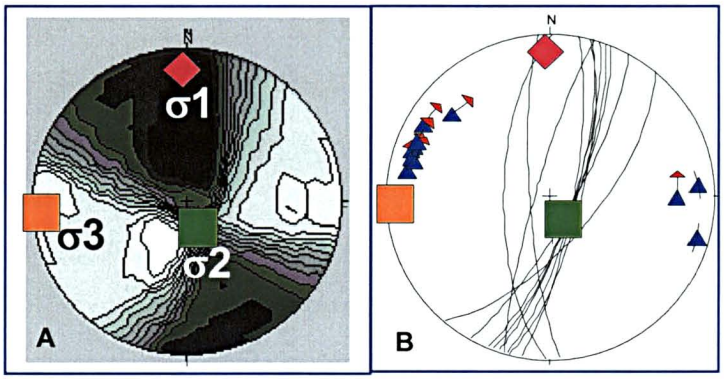


Figura 8.31: Determinação dos campos de tensão para o ponto 23.

Ponto 25 (6 medidas com indicadores cinemáticos)

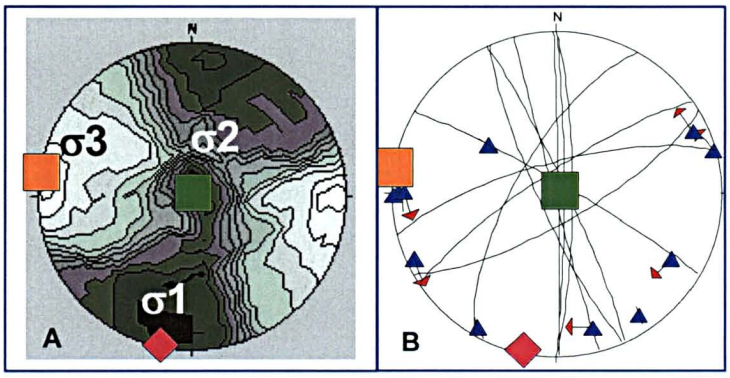


Figura 8.32: Determinação dos campos de tensão para o ponto 25.

Ponto 26 (9 medidas com e indicadores cinemáticos)

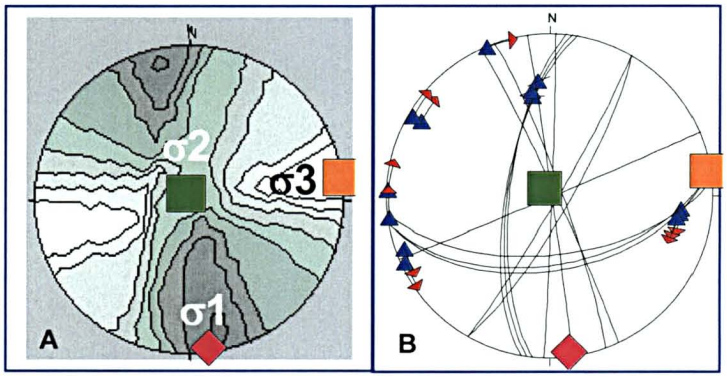


Figura 8.33: Determinação dos campos de tensão para o ponto 26.

Ponto 6, 12, 16 e 20 (26 medidas com indicadores cinemáticos)

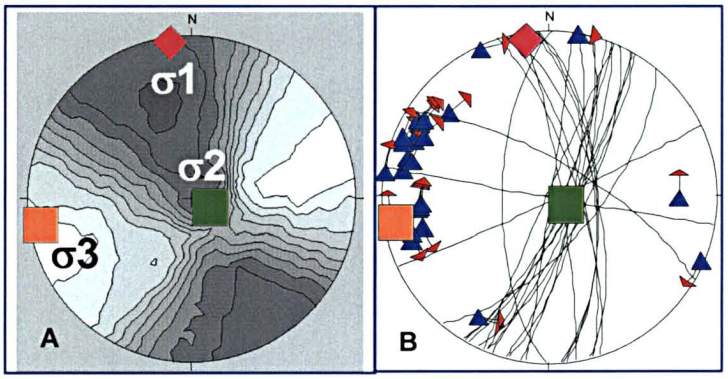


Figura 8.34: Determinação dos campos de tensão para os pontos 06, 12, 16 e 20.

Os dados estruturais dos planos de falhas transcorrentes em geral mostram uma similaridade, principalmente aplicando o método dos diedros retos. Já os resultados obtidos diretamente com o *software* STEREONETT 2.41, aplicando o método de TURNER (*op.cit*), mostraram um certo desvio entre os eixos de σ1 e σ3, que deveriam ser ortogonais entre si, no entanto, em alguns dos diagramas o ângulo entre ambos os eixos é um pouco menor que 90°.

Existe uma tendência na geometria entre os planos das estruturas sistemáticas na área, o que faz supor uma relação genética entre estas falhas subverticalizadas de direções N-S, N15-25W e N20-30E, podendo associá-las ao modelo de RIEDEL (*op. cit*).

De acordo com estes resultados e levando sempre em consideração as observações em campo, o ajuste que melhor se adapta ao modelo de RIEDEL (*op. cit*), indica a orientação de N-S para o vetor de máxima tensão (σ1), E-W para o

vetor de mínima tensão (σ**3)** e direção vertical para vetor de média tensão (σ**2).** Ocorrem algumas variações que sugerem o posicionamento do σ1 talvez um pouco mais para a direção N15W. Esta interpretação considera um binário NE-SW com movimentação sinistral, onde as direções dos planos N20-30E (mergulhos subverticalizados) corresponderiam aos cisalhamentos R (de RIEDEL), a direção N-S ou N10W coincidiria com as chamadas fraturas de partição (T) e os planos N20-30W equivaleria aos cisalhamentos R'.

Segundo este ajuste, essa interpretação coincide com uma das possibilidades indicada no trabalho de SALAMUNI (1998) para o posicionamento do campo de tensões tendo como base a análise de drenagens de primeira ordem, ou seja, as mais recentes da Bacia de Curitiba onde o σ1 está posicionado a N-S e as fraturas N25-30E são coincidentes com o plano R (de RIEDEL).

A interpretação da cinemática das estruturas favoráveis à circulação de água subterrânea na área não é simples. No entanto, visto a coerência dada pelos indicadores cinemáticos das falhas e características geométricas dos planos associados à água, não pareceria plausível, por outro lado, considerar outros ajustes como, por exemplo, tendo eixo σ1 posicionado a E-W para as estruturas sistemáticas de interesse neste estudo. Da mesma forma, considerar um binário dextral com eixo σ1 a N-S e direção NW para o plano R de RIEDEL, implicaria em estruturas mais fechadas a N20-30E, quando na verdade esta direção foi observada como sendo bastante favorável a circulação de água.

Para dar uma visão geral dos campos de tensões, calculados para cada ponto de afloramento (associados à circulação de água subterrânea), foram sobrepostos sobre o MDR da área, na figura 8.36, os diagramas contendo as isolinhas (tons de cinza) dos pólos com a determinação dos campos de tensão utilizando o método dos diedros retos. Neste mesmo diagrama foram incluídos os tensores calculados pelo método de TURNER, e ainda como referência foi incluído sobre o MDR, o modelo de cisalhamento rúptil de RIEDEL na posição mais provável dos esforços tectônicos considerados como favoráveis à água subterrânea, obtidos de acordo com o resultado das análises estruturais. Esse cruzamento permite uma observação em conjunto da morfologia do terreno juntamente com as informações obtidas com a solução dos campos de tensores.

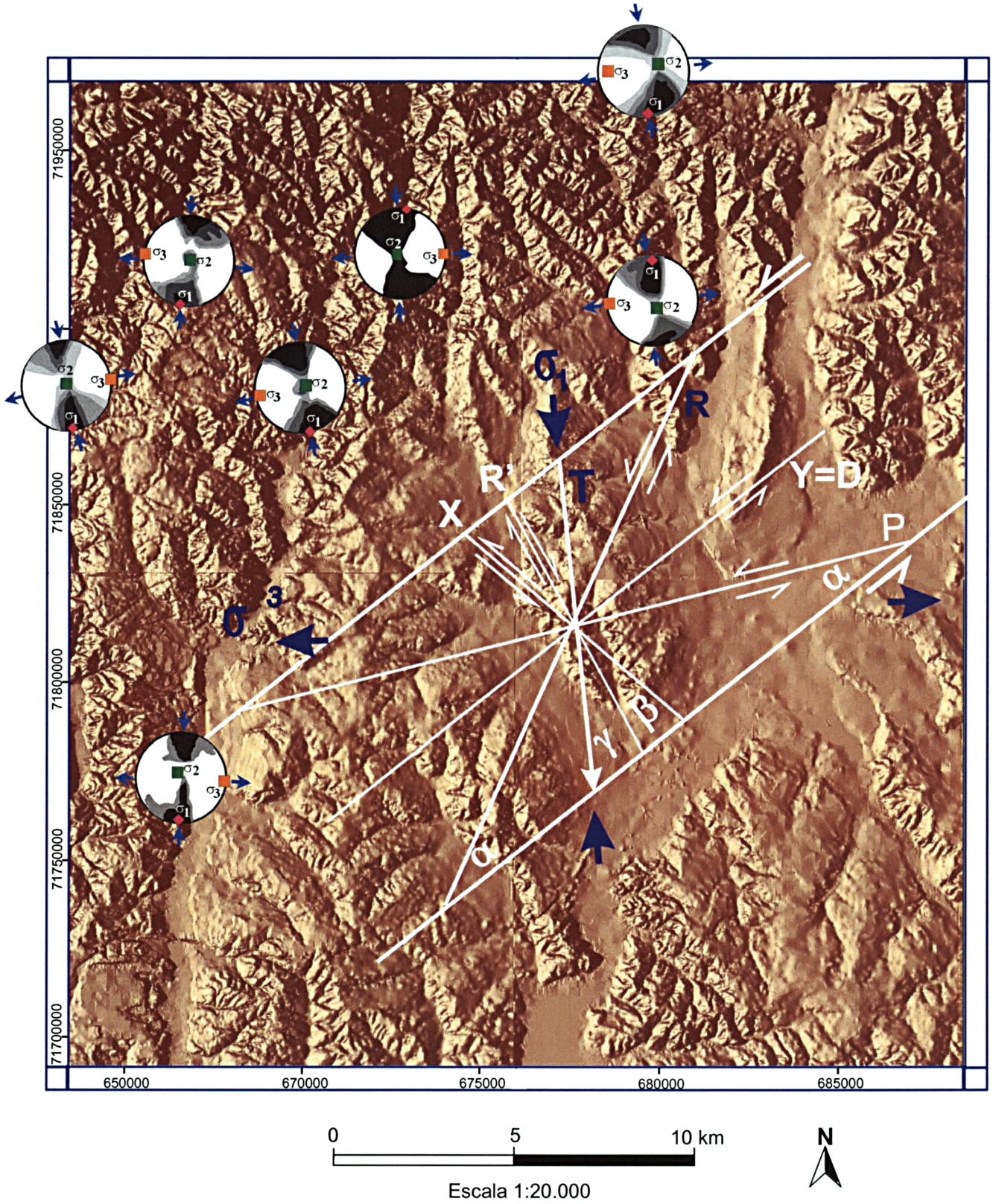


Figura 8.35: Visão geral do campos de tensões calculados para cada ponto de afloramento, sobrepostos sobre o MDR da área. Os diagramas contendo as isolinhas mostram a determinação dos esforços tectônicos utilizando o método dos diedros retos, enquanto que os símbolos coloridos indicam os tensores calculados pelo método de TURNER (1953). As setas em azul relacionam as direções de máxima e mínima compressão.

9 CRUZAMENTO DOS DADOS E ANÁLISE EM AMBIENTE DE SIG

9.1 Modelo Digital de Relevo (MDR)

O MDR é uma poderosa ferramenta computacional que permite não só a visualização do relevo tridimensionalmente, mas também uma série de outras investigações geológicas. A partir do modelo topográfico semi-realístico foram possíveis realizar análises estruturais através do traçado minucioso de drenagens e lineamentos de relevo que, posteriormente, foram comparados com os padrões estruturais observados diretamente em campo resultando em interpretações de grande importância que serão discutidos adiante.

A base planialtimétrica da área foi digitalizada no *software* AUTOCAD v. 2000® na escala 1:10.000 com distância de 5 m entre cada curva de linha. No passo seguinte as curvas e pontos cotados foram transformados em formato ASCII XYZ (*.dat) e depois, através do *software* SURFER v. 8®, foi gerado o modelo digital de elevação pelo método de interpolação de "Krigagem" utilizando uma malha regular *(grid)* com células espaçadas em 10 x 10 m. Este *software* apresenta maior versatibilidade para interpolar dados, tais como a geração do MDR, porém apresenta uma série de limitações em alguns tipos de análises. Por esta razão os arquivos foram convertidos para um formato aceito pelo ARCVIEW v. 3.2® onde então os dados foram melhor trabalhados.

Devido à grande quantidade de pontos a serem interpolados para a construção do MDR (total de 7.162.185 pontos), além do tempo de processamento ser longo o sistema operacional requerido deveria ser robusto, caso todos os pontos fossem processados de uma só vez. Portanto, para facilitar as operações computacionais, a base planialtimétrica no formato ".dwg" foi segmentada em quatro partes. A partir de cada um destes retângulos (contendo as curvas de níveis) foi gerado separadamente um modelo digital de elevação via SURFER v.8®. Essa operação mostrou-se mais rápida e eficaz apresentando maior definição do relevo. Ao serem transferidos para o *software* ARCVIEW v 3.2® os MDR's foram reunidos resultando em um único *grid*. A desvantagem desta operação foi que nas junções

dos *grids* ocorreram algumas imperfeições, que foram assumidas como de pouca importância, não interferindo nas análises em geral. A figura 9.1 mostra a seqüência dos procedimentos seguidos até a geração do *grid* final.

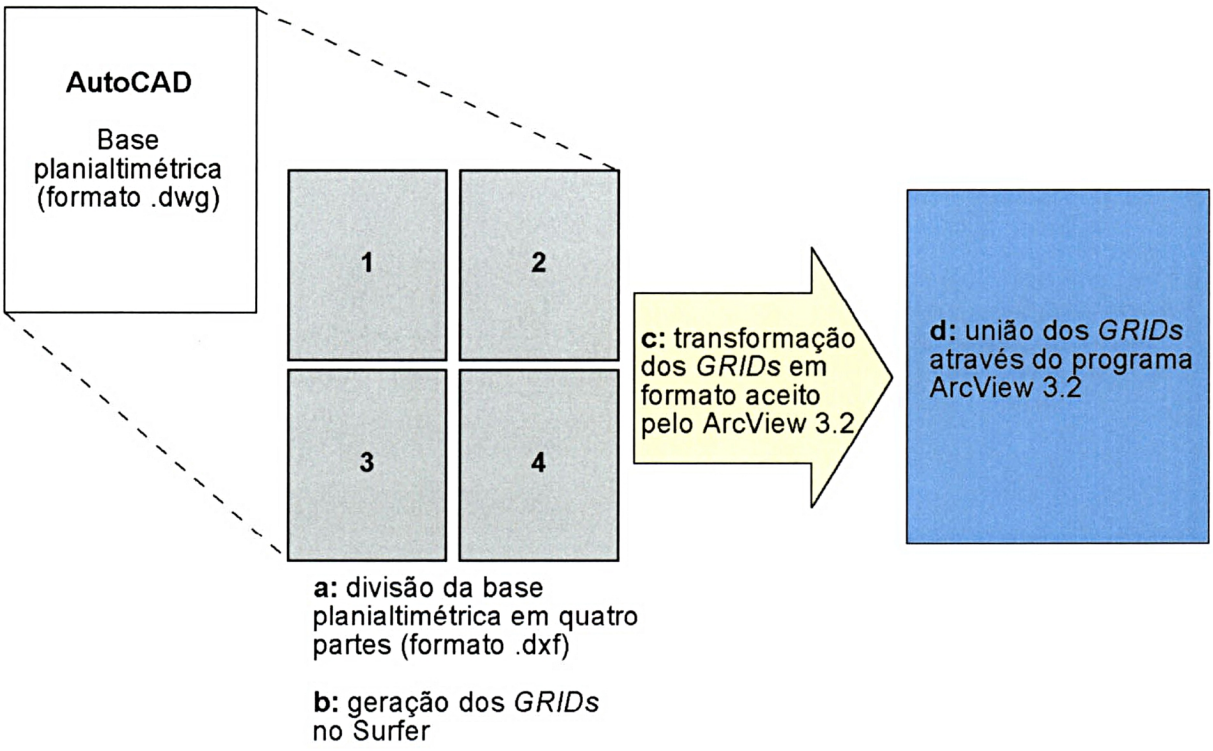
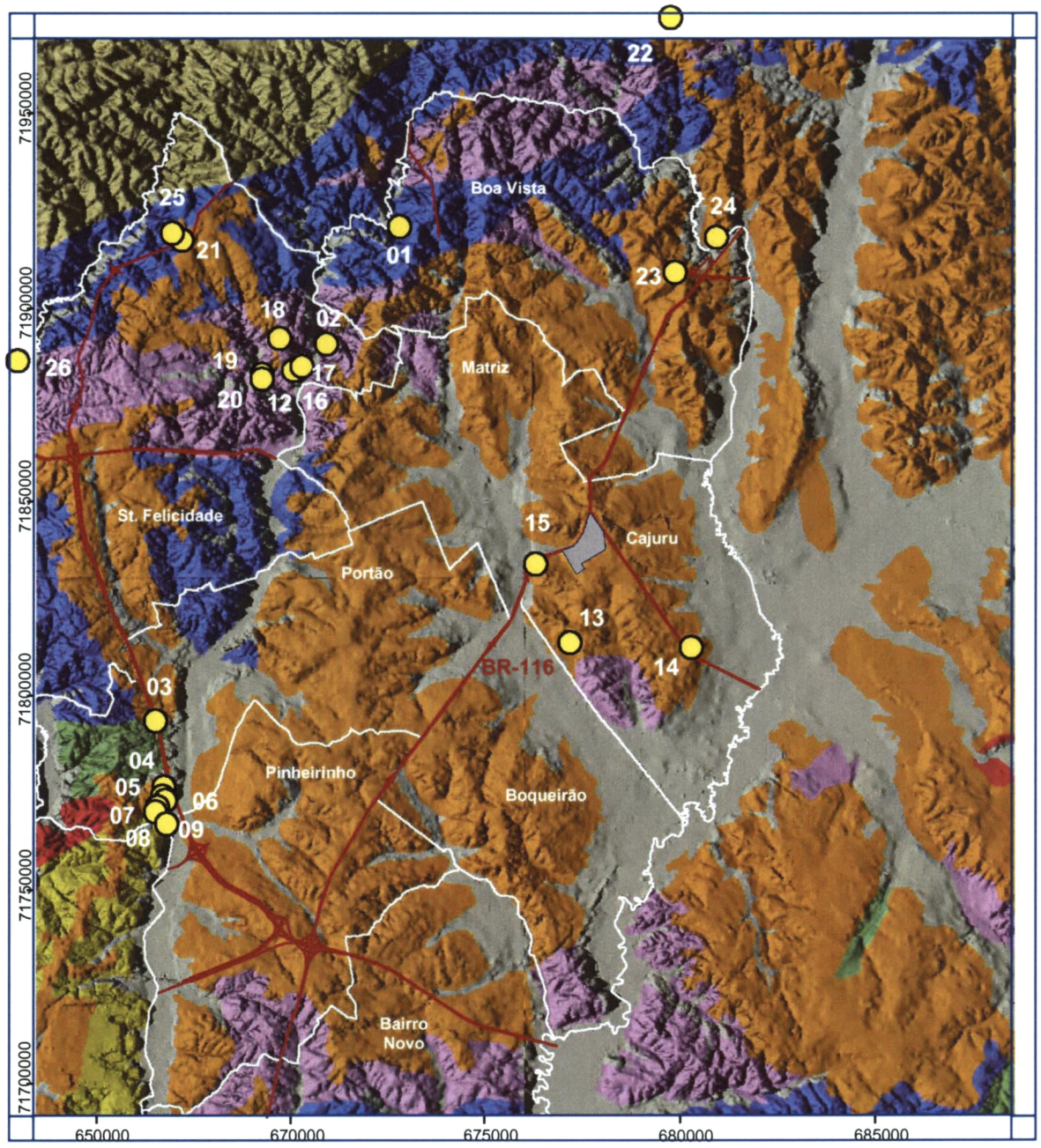


Figura 9.1: A seqüência "a, b e c" mostra as etapas seguidas até a geração do *grid* final.

Como o *grid* nada mais é do que uma visão simulada do relevo, é necessário que se apresente confiável para as análises realizadas tendo o mesmo como base.

O método da krigagem, utilizado para a construção do MDR, é um procedimento geoestatístico que interpola os dados a partir de uma média ponderada, fornecendo estimativas não tendenciosas e com variância mínima (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989). A desvantagem deste método é que nas áreas onde existem poucas informações, como acontece nas partes mais planas da Bacia de Curitiba, ocorrem erros na interpolação. Como na maior parte da área existe uma grande quantidade de pontos, no geral o resultado final do *grid* se apresentou bastante satisfatório atendendo as necessidades previstas.

Além de sobrepor linhas sobre o MDR também é possível sobrepor polígonos cheios, representando litologias ou outras feições de interesse, como no caso da figura 9.2. Nesta imagem foi combinado: o mapa geológico, o mapa com as divisões regionais, além dos principais trechos de rodovias e pontos de afloramentos. Já na figura 9.3 foram mostradas as divisões administrativas que limitam os bairros e municípios arredores da cidade de Curitiba, sobre o mapa geológico da área facilitando a localização do leitor.



Legenda

Mapa geológico sobreposto ao MDR

- *Terrenos aluvionares, colúvios*
- *Fm Guabirotuba - depósitos argilosos, arcóseos, areias finas, diamictitos, rudáceos*
- *Fm Guaratubinha*
- *Fm Camarinha - conglomerados, siltitos, argilitos*
- *Suíte Serra do mar - granitos alcalinos a cálcio alcalinos*
- *Granito Cerne - granitos alcalinos a cálcio alcalinos*
- *Grupo Acungui - mármores, filitos, quartzitos (Fm Capiru, Votuverava e Água Clara)*
- *Complexo Setuva - qz-xistos, metabásicas, metamargas*
- *Anfibolitos*
- *Quartzo-biotita-xistos*
- *Gnaisses Granudioritos migmatizado*
- *Granito Guajuvira - Granitos-gnaisses*
- *Complexo Meia Lua - Gnaisses Granitos migmatizados*

- *Principais rodovias*
- *Divisão regional (IPPUC, 2001)*
- *Pontos de afloramentos*

Figura 9.2: Mapa geológico, pontos de afloramentos e divisão regional (IPPUC) sobrepostos ao MDR gerado com o *software* ARCVIEW 3.2®.

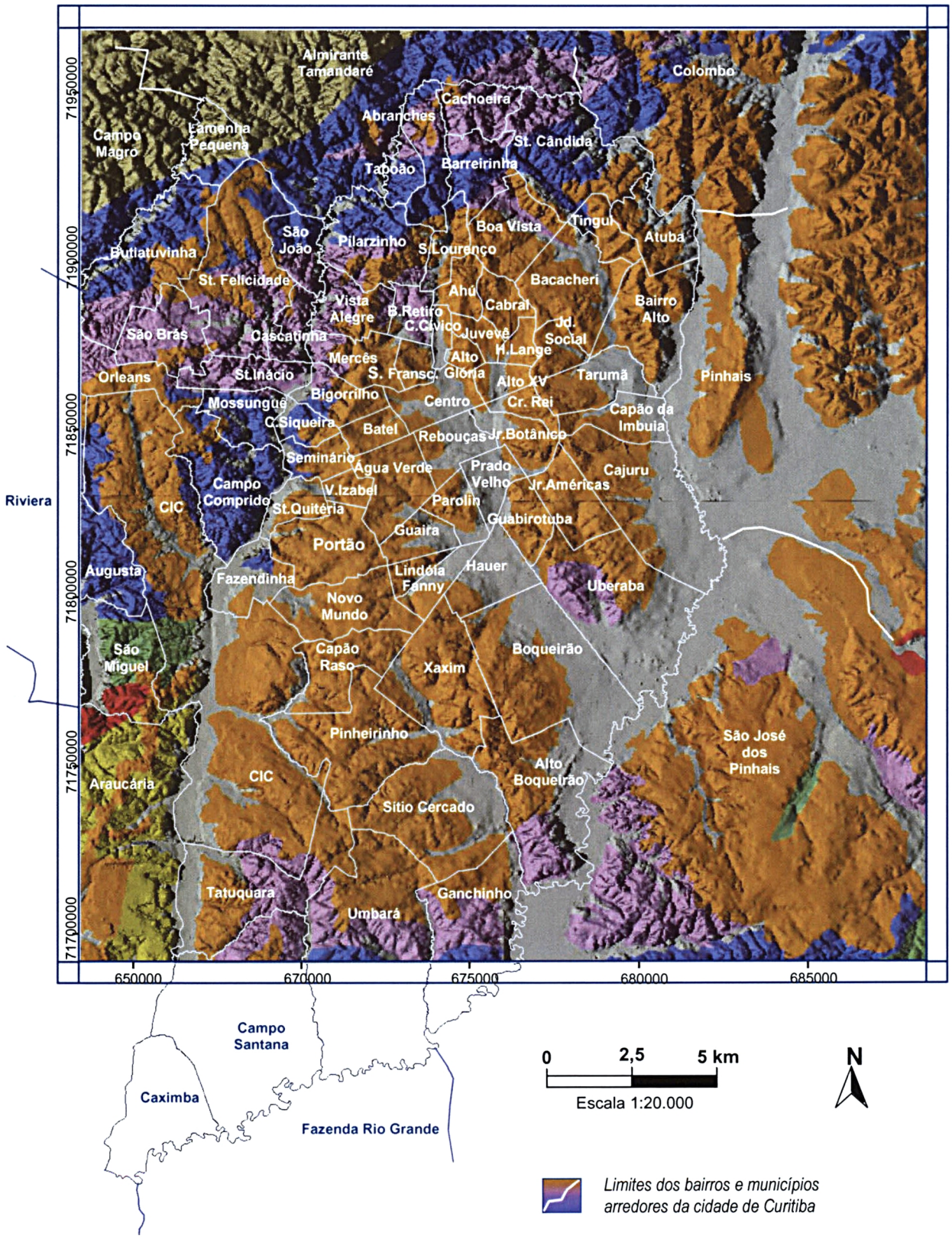


Figura 9.3: Mapa geológico e divisão administrativa da área (em branco) sobrepostos ao modelo digital de relevo (MDR) gerado com o *software* ARCVIEW 3.2®.

9.2 Confiabilidade no traçado de lineamentos de relevo a partir de um modelo simulado

Tradicionalmente traços de fraturas e lineamentos são mapeados apenas através da interpretação de fotografias aéreas. Nesta pesquisa, os lineamentos de relevo foram traçados através da interpretação das feições observadas no Modelo Digital de Relevo (MDR) e através das anomalias e alinhamentos das drenagens presentes na área como forma de complementação na interpretação estrutural presente.

A confiabilidade de uma interpretação feita a partir de um MDR depende da qualidade dos dados base utilizados para realizar a interpolação do modelo e também da escolha do tipo de interpolador. Sobre este tema existem diversos trabalhos publicados como o de KOZCIAK et al. (2001).

O fato é que com auxílio de imagens digitais que simulam em 3D o relevo (MDR's), mudando-se a direção da iluminação, a posição do observador e o fator de exagero vertical, mesmo pequenas variações na morfologia do terreno são realçadas, as quais eventualmente podem ser bastante expressivas no padrão estrutural geral e que, no entanto, poderiam passar despercebidas em uma interpretação clássica (ROSS et al. 1993). O modelo digital muitas vezes revela contornos indefinidos à própria luz natural, podendo ser visualizado de forma mais nítida que em fotografias aéreas, a estruturação e morfologia do relevo.

Devido à intensa urbanização da cidade muitas feições são mascaradas criando outro problema, caso fossem utilizadas somente as fotografias aéreas existentes na área. Por estas razões o critério adotado foi o de aproveitar os recursos oferecidos por ambas as formas de interpretação. No ponto onde o MDR apresenta limitações são consultadas as fotos aéreas e cartas topográficas. As feições estruturais em campo devem ser confrontadas com aquelas traçadas a partir do MDR, havendo uma constante averiguação nas interpretações como é demonstrado no decorrer deste capítulo.

Nem todos os lineamentos de relevo observados em um MDR condizem 100% com alinhamentos estruturais. Feições de relevo mapeadas como lineamentos estruturais podem ser, na verdade, grandes escarpas de erosão esculpidas sobre determinadas unidades litológicas. Entretanto, a tectônica tem papel decisivo no

esculturamento do relevo, e geralmente uma grande escarpa está associada a uma falha (EDUARDO SALAMUNI, comunicação pessoal).

Outro fato a ser considerado é que na cidade ocorreram diversas obras de engenharia que modificaram as feições morfológicas naturais do relevo para construção de estradas de rodagem, aplainamento de morros e ainda canalização de rios entre outros exemplos, gerando feições que as vezes são facilmente confundidos com alinhamentos estruturais. Dessa forma o controle feito em fotografias aéreas, cartas topográficas e, principalmente, em campo, é essencial para a confiabilidade das interpretações. É necessário observar se os traços apresentam um padrão sistemático (de origem tectônica ou morfoestrutural) ou são decorrentes de obras de engenharia ou ainda aleatórios.

9.3 Critérios observados no traçado de lineamentos a partir de drenagens

No trabalho de SALAMUNI (1998) o autor discute amplamente o significado e as características das anomalias de drenagens verificadas na área, dando grande destaque a provável influência neotectônica, sendo esta responsável pelas mudanças observadas na morfologia das planícies aluvionares e na implantação de canais secundários nas drenagens principais geradas em processos anteriores.

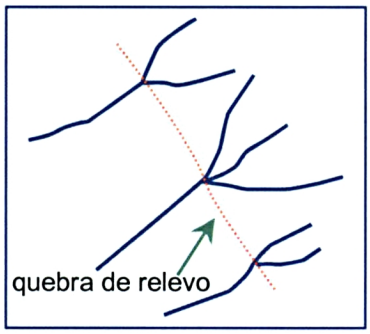


Figura 9.4: Anomalia em "V" ou em candelabro.

Na atual pesquisa, o estudo da neotectônica também é de grande importância em termos hidrogeológicos, e a anomalia de maior interesse como guia no traçado de lineamentos de drenagens é a em forma de candelabro ou "V" das drenagens de segunda e terceira ordens (Figura 9.4). Para SALAMUNI (*op. cit.*) tais anomalias representam importantes quebras de relevo que delimitam alinhamentos estruturais recentes em escarpamentos mais antigos.

Este autor também menciona o fato de que apesar da Bacia de Curitiba ser uma entidade relativamente plana, através da análise hipsométrica, fato também confirmado neste trabalho, é revelada a existência de blocos altos e baixos

decorrentes de alinhamentos estruturais ligados a escarpas de falhas, nos quais se encaixam as linhas das drenagens de maior porte.

Outra característica importante levada em consideração nesta análise foi quanto aos ângulos retos dos segmentos de primeira, segunda e terceira ordem das microbacias orientando-se, provavelmente, segundo os esforços tectônicos regionais. Com o prolongamento destes canais a distâncias mais longas, seguindo a mesma orientação inicial, foram traçadas várias lineações de drenagem. Neste traçado deve ser tomado um certo cuidado quanto à continuidade ou não dos alinhamentos respeitando as interrupções naturais quando se deseja posteriormente realizar um estudo de conectividade de fraturas. Estas interrupções podem significar barreiras dificultando a circulação da água subterrânea. Neste caso os lineamentos positivos obtidos a partir do MDR servem como referencial para este tipo de estudo.

9.4 Análise de conectividade de fraturas

No embasamento cristalino a percolação da água se faz principalmente através das descontinuidades representadas pelas diferentes famílias de juntas existentes, sendo denominada de permeabilidade secundária.

A maior percolação e armazenamento de água é dada de acordo com o grau de conectividade originada pelas intercessões dos cruzamentos dos planos de juntas considerados como favoráveis à exploração de água subterrânea. Por isso o estudo da conectividade de fraturas é outro tipo de parâmetro de grande importância neste tipo de pesquisa, porém um dos mais difíceis de serem determinados, exigindo tempo considerável para sua realização.

Em virtude desta análise requerer um prazo mais extenso do que aquele reservado para a execução desta dissertação, embora o método seja de extrema importância, o mesmo é apenas mencionado rapidamente, devendo ser aplicado com a continuidade no desenvolvimento deste tema na área.

Para efetuar esta análise pode ser utilizada a metodologia proposta por ZHANG et al. (1992). Entretanto, como descrito por FIORI (2001), este método por si só apresenta algumas limitações e uma série de razões (parâmetros) devem ser considerados adicionalmente. Paralelamente, as feições estruturais avaliadas em

um estudo de conectividade devem ser classificadas em famílias com base em seu comprimento e orientação e em níveis distintos de informações georeferenciadas facilitando as análises estruturais posteriores.

9.5 Lineamentos de relevo traçados a partir do MDR

Na pesquisa de SALAMUNI (1998) os lineamentos de relevo e traços de fratura, referentes à Bacia de Curitiba e arredores, foram obtidos em fotoanálise de fotografias aéreas na escala 1:50.000 e depois transferidos para um mapa base com auxílio do *Sketch-Master*. Posteriormente, foi feita a digitalização deste mapa base no formato ".dxf". Na atual pesquisa, após integração destes dados ao SIG (Sistema de Informações Georeferenciado), foram detectados problemas quanto ao posicionando destes lineamentos atribuídos possivelmente a distorções ocorridas na transferência e digitalização destes dados para meio digital. Por esta razão, em primeiro lugar foram corrigidas estas distorções através de novo georefenciamento.

O próximo passo foi o cruzamento deste nível de informações, gerados através de fotointerpretação, sobre o MDR com o objetivo de servir como referencial para as próximas análises em tela de computador. Utilizando o recurso da iluminação em diferentes quadrantes foram digitalizados em tela de computador de forma bastante minuciosa os lineamentos de relevo positivos e negativos existentes na área de pesquisa.

As figuras 9.5 até 9.9 ilustram o traçado destes lineamentos sobre o MDR separando-os segundo suas orientações preferenciais (NS, NE, NW e EW), de acordo com a iluminação no quadrante que mais favorece tais observações.

Com o cruzamento destes lineamentos com as estruturas verificadas em campo, foi possível confirmar que muitas das orientações dos traços sobre o modelo digital de relevo coincidem com falhas e planos médios de fraturas mapeados em afloramentos. O cruzamento destes dois níveis de informações (lineamentos traçados em tela de computador e lineamentos observados em campo) é mostrado no decorrer deste capítulo.

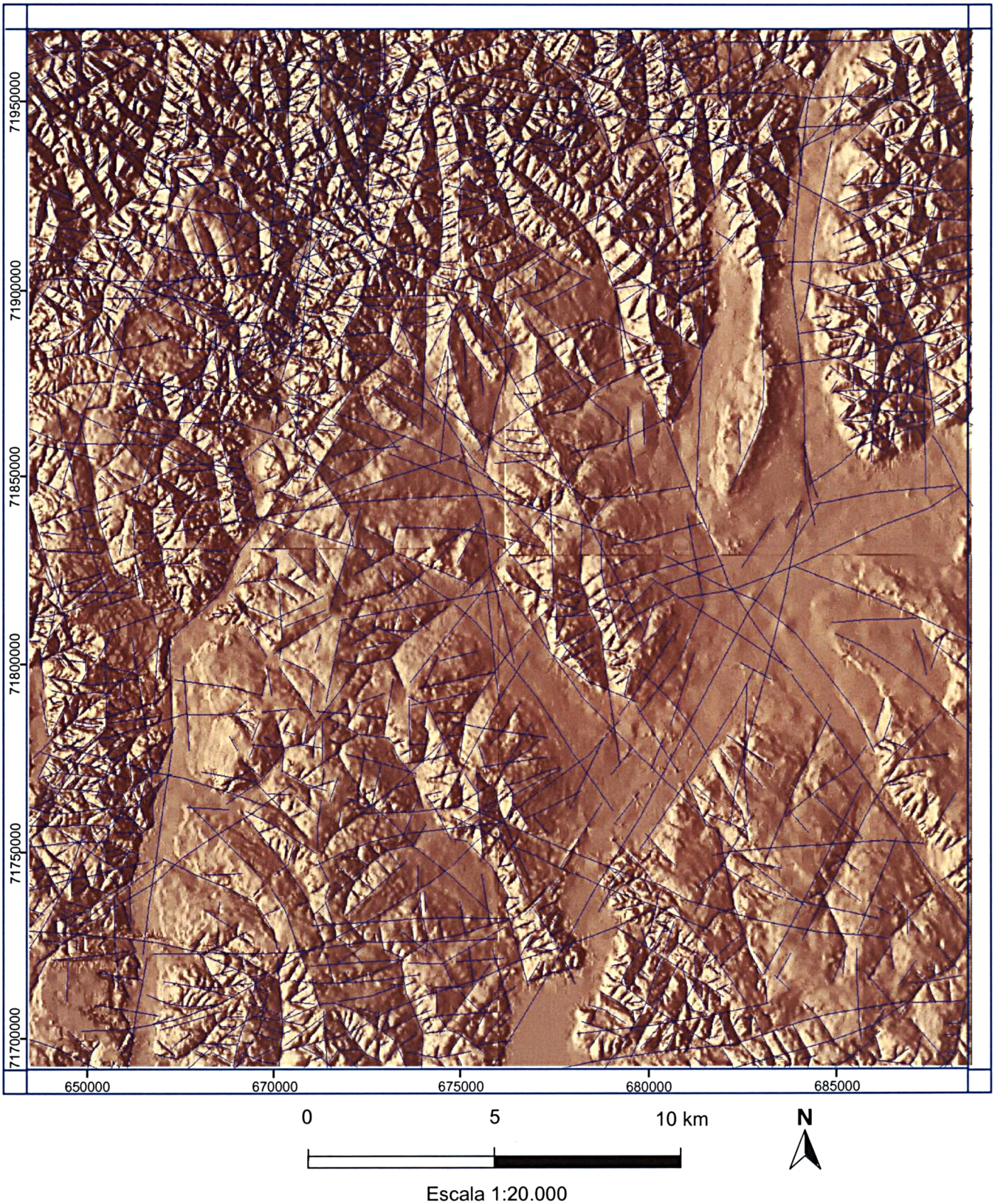


Figura 9.5: Traçado de todos os lineamentos de relevo positivos e negativos (em azul) a partir do MDR (iluminação no azimute 270 e cinco vezes de exagero vertical), tendo como base além do MDR, o mapa de lineamentos elaborado por SALAMUNI (1998) onde constam falhas e fraturas observadas em fotos aéreas e em campo.

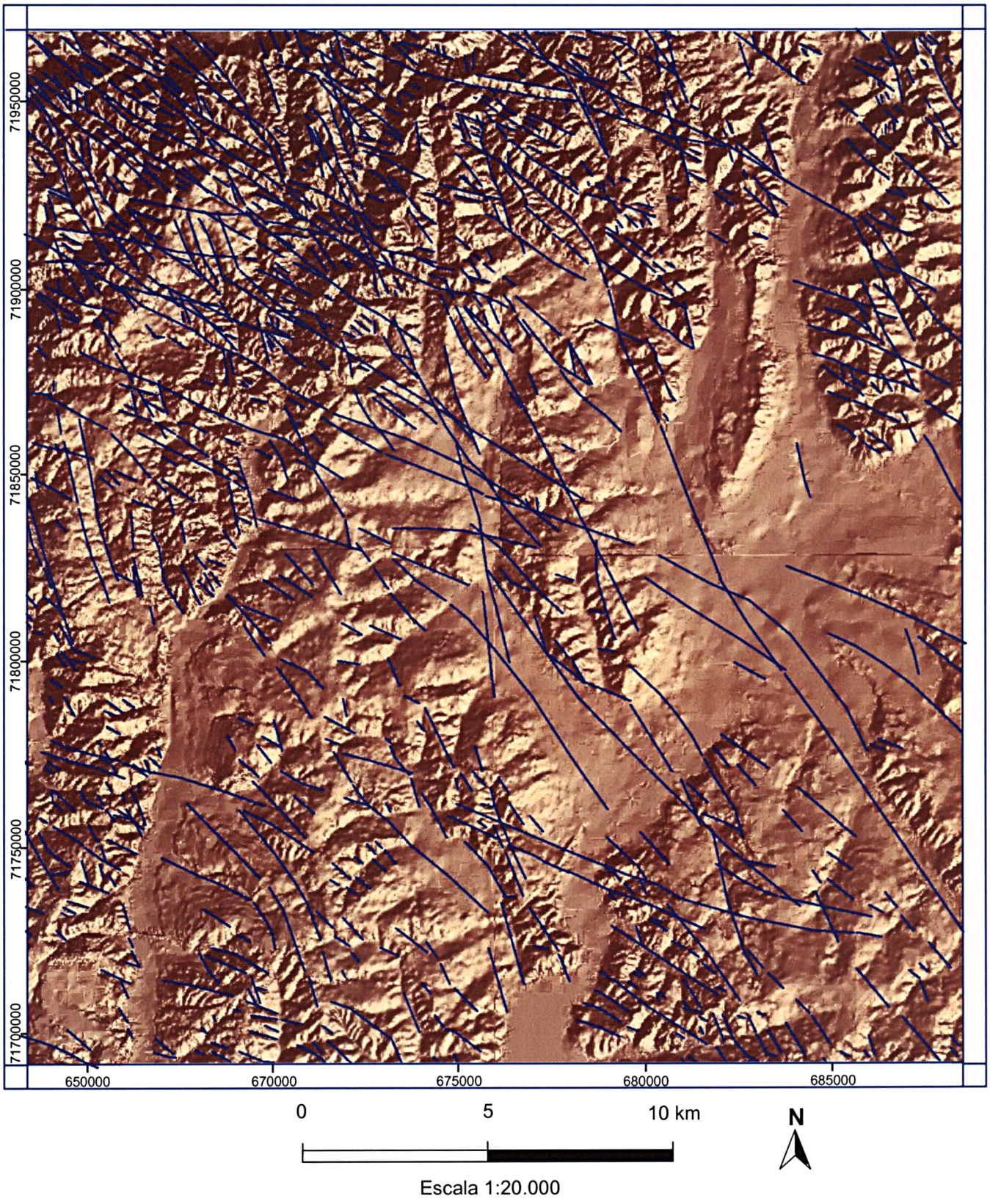


Figura 9.6: Traçado sobre o MDR de lineamentos de relevo (em azul) nos altos e baixos topográficos de orientação N-W, utilizando iluminação no azimute 135 e exagero vertical de 10 vezes.

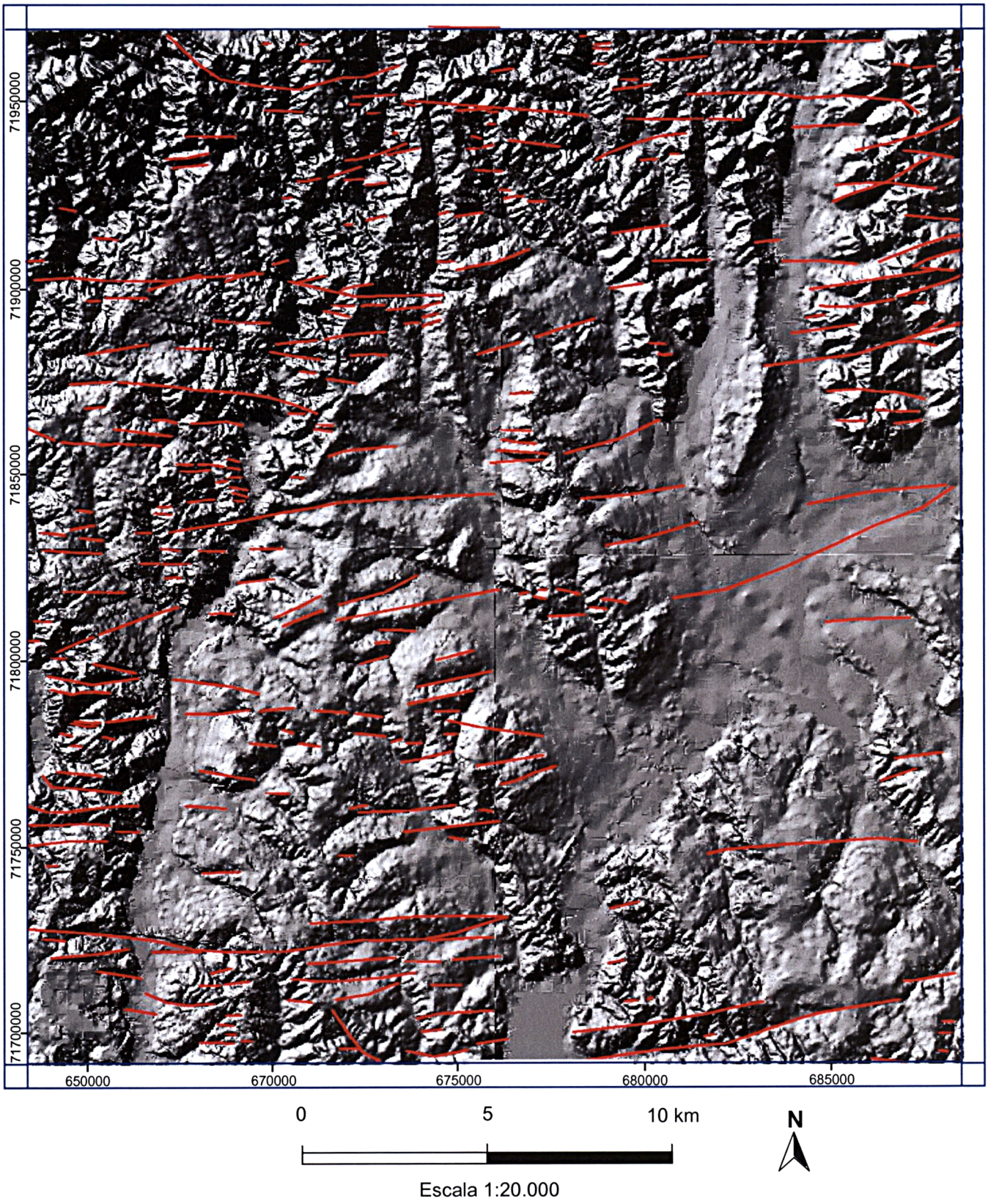


Figura 9.7: Os traços em vermelho representam os lineamentos de relevo de orientação E-W determinados sobre MDR a partir de altos e baixos topográficos (iluminação no azimute 315 e 10 vezes de exagero vertical).

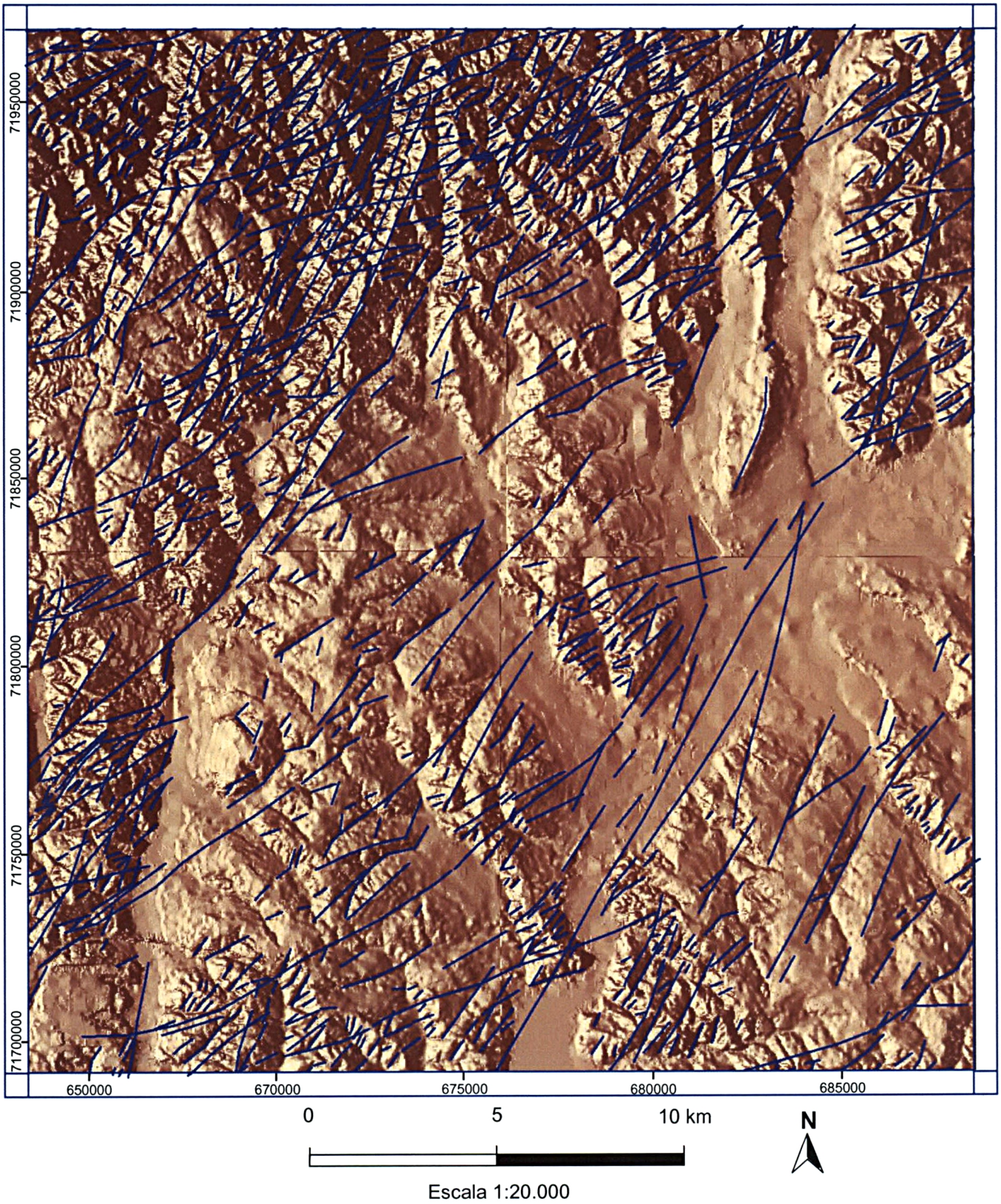


Figura 9.8: Traçado de lineamentos de relevo (em azul) de orientação NE sobre o MDR tendo como base os altos e baixos topográficos (iluminação no azimute 270 e 10 vezes de exagero vertical).

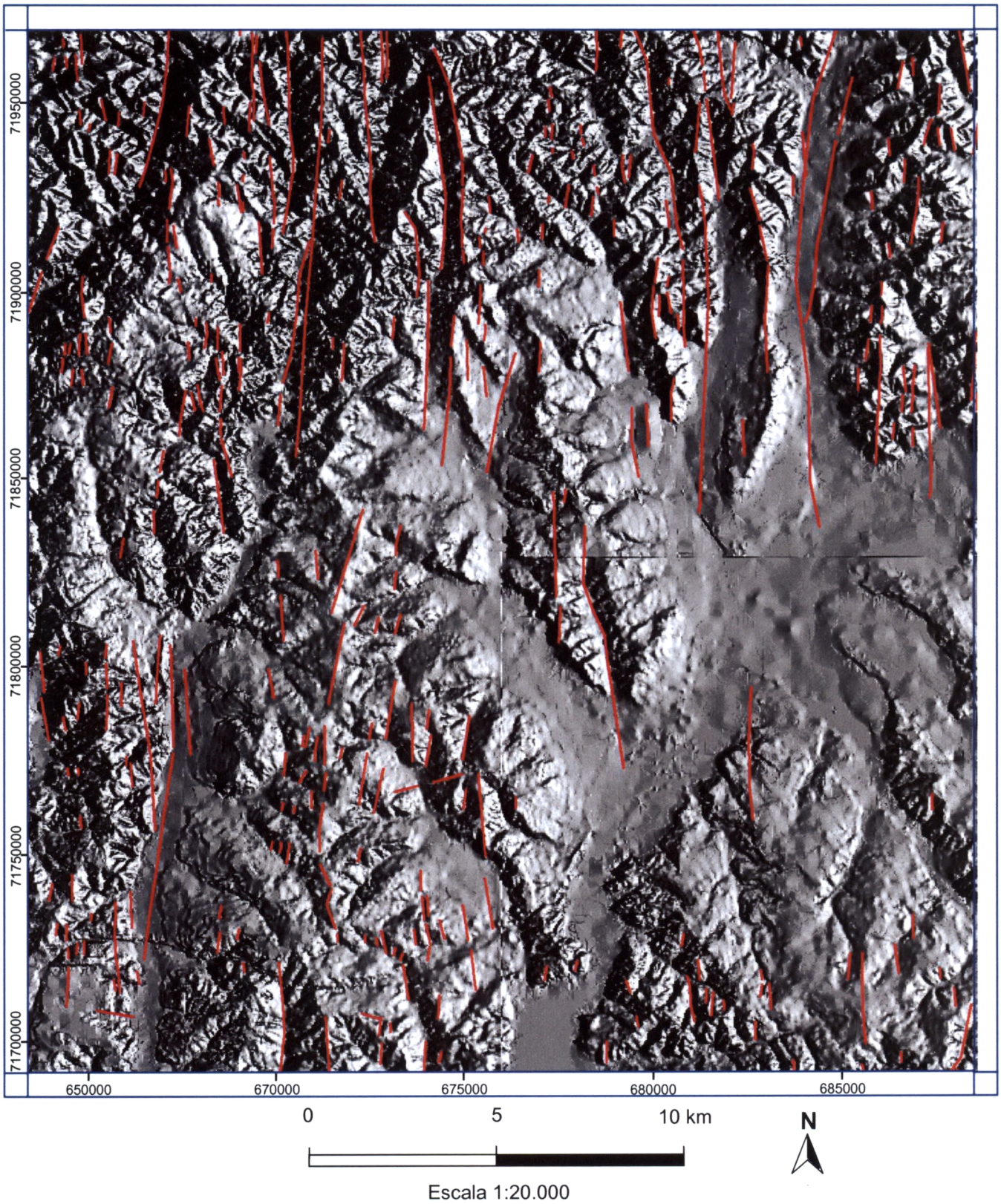


Figura 9.9: A partir de altos e baixos topográficos foram traçados os lineamentos de relevo (em vermelho) de orientação N-S sobre o MDR (iluminação no azimute 90 e 10 vezes de exagero vertical).

9.6 Lineamentos traçados a partir de anomalias e alinhamentos de drenagens

Além do traçado de alinhamentos estruturais em tela de computador, tendo como base o MDR, também foram traçados lineamentos de drenagens em distintos níveis de informações, de acordo com as orientações predominantes. Estas lineações coincidem com anomalias e alinhamentos de drenagens que cruzam tanto o embasamento quanto os sedimentos da Bacia de Curitiba. O que pode ser constatado é que boa parte dos lineamentos presentes coincidem com drenagens indicando que as mesmas estão fortemente controladas tectonicamente, formando grandes vales alinhados segundo direções preferenciais. Como referência na organização destes elementos fisiográficos foram utilizados além das anomalias de drenagens e das orientações sistemática dos canais, o MDR da área e também um mapa de lineações de drenagem elaborado no trabalho de SALAMUNI (1998).

Os resultados encontrados nesta etapa de trabalho são ilustrados nas próximas páginas a partir das figuras 9.10 até 9.13.

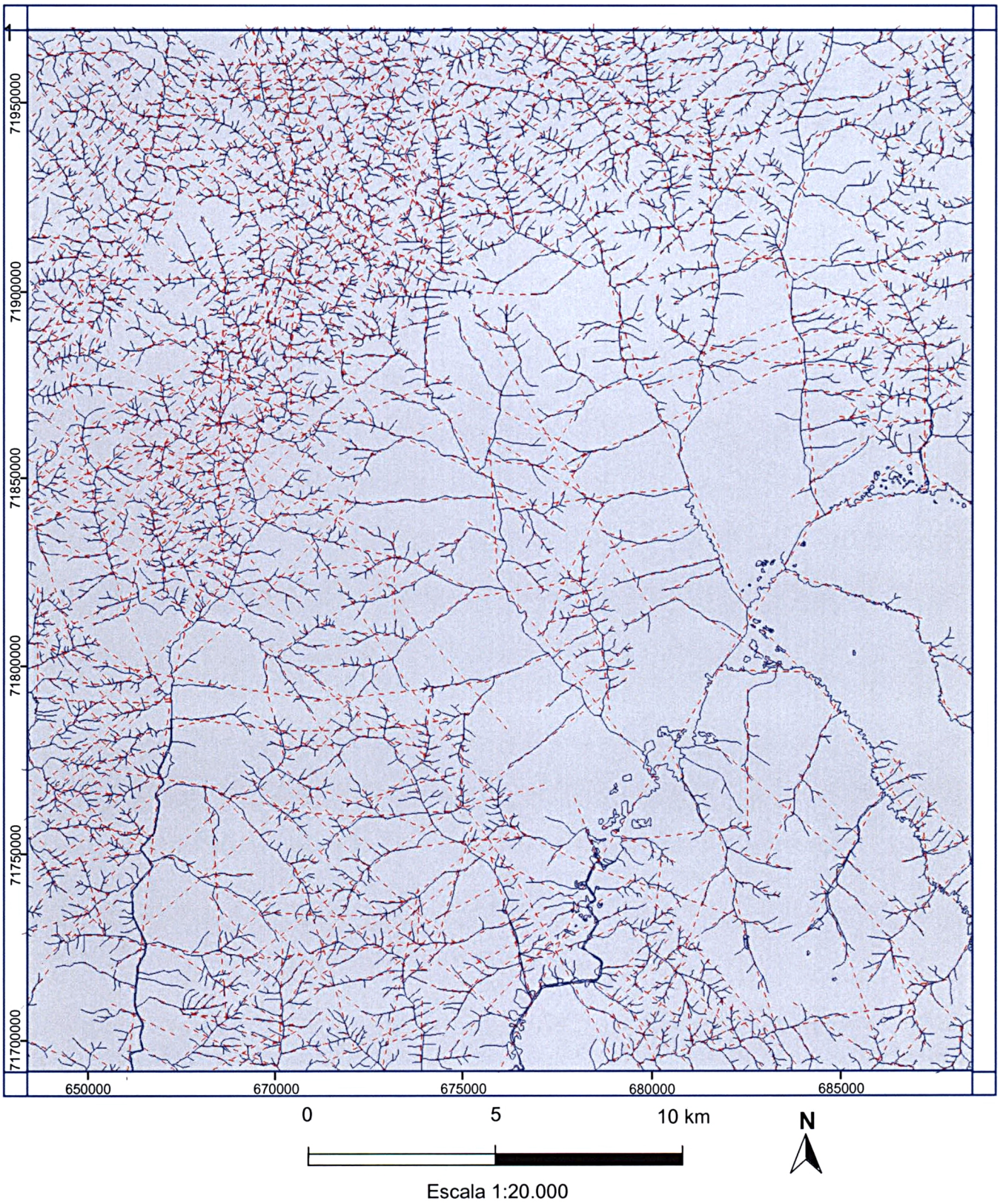


Figura 9.10: Nesta figura é mostrado o traçado de todos os lineamentos estruturais (em vermelho) a partir das lineações de drenagens. Como referência foi utilizado também o MDR da área e o mapa de lineações de drenagem elaborado por SALAMUNI (1998).

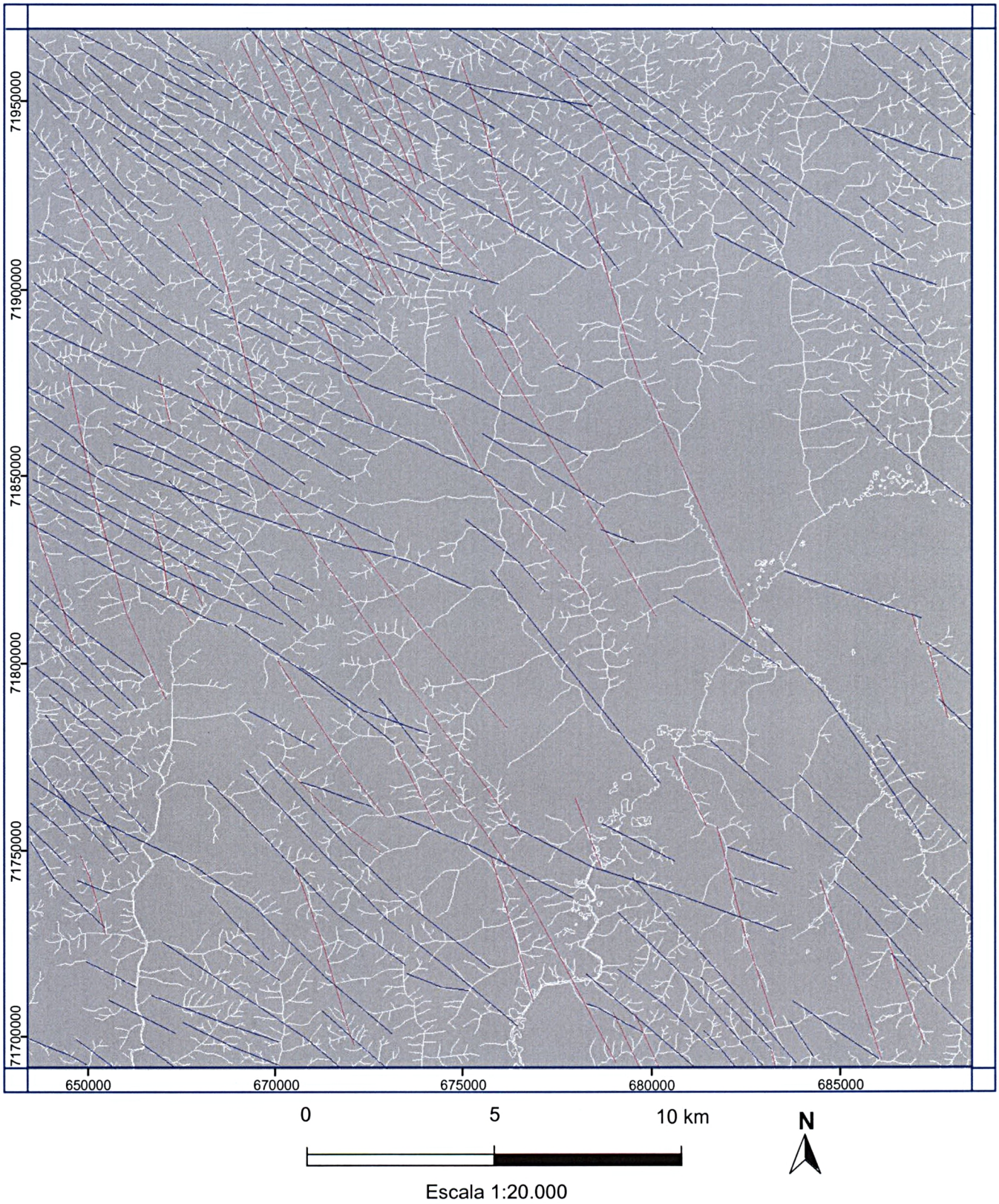


Figura 9.11: Na direção NW as lineações de drenagens parecem estar fortemente desenvolvidas segundo uma orientação em torno de N45W (em azul) mesmo sobre a área central correspondente aos sedimentos da bacia. Um segundo padrão de lineações (em vermelho), também muito marcante, parece obedecer a direção de N20-25W.

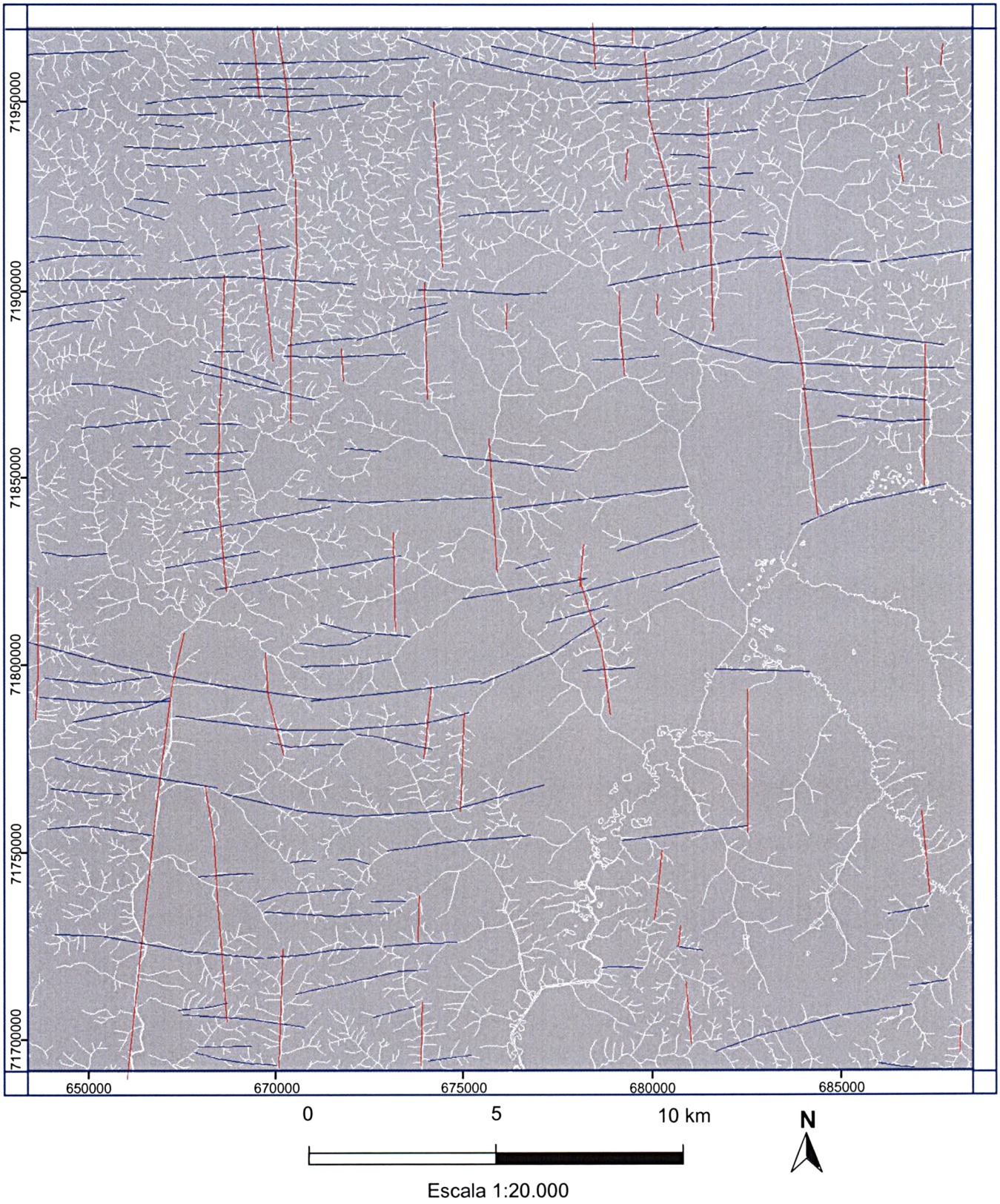


Figura 9.12: As lineações de relevo de direção em torno de EW foram traçados em azul e os de direção próxima a N-S, em vermelho. Na figura estão ilustrados somente as lineações mais representativas.

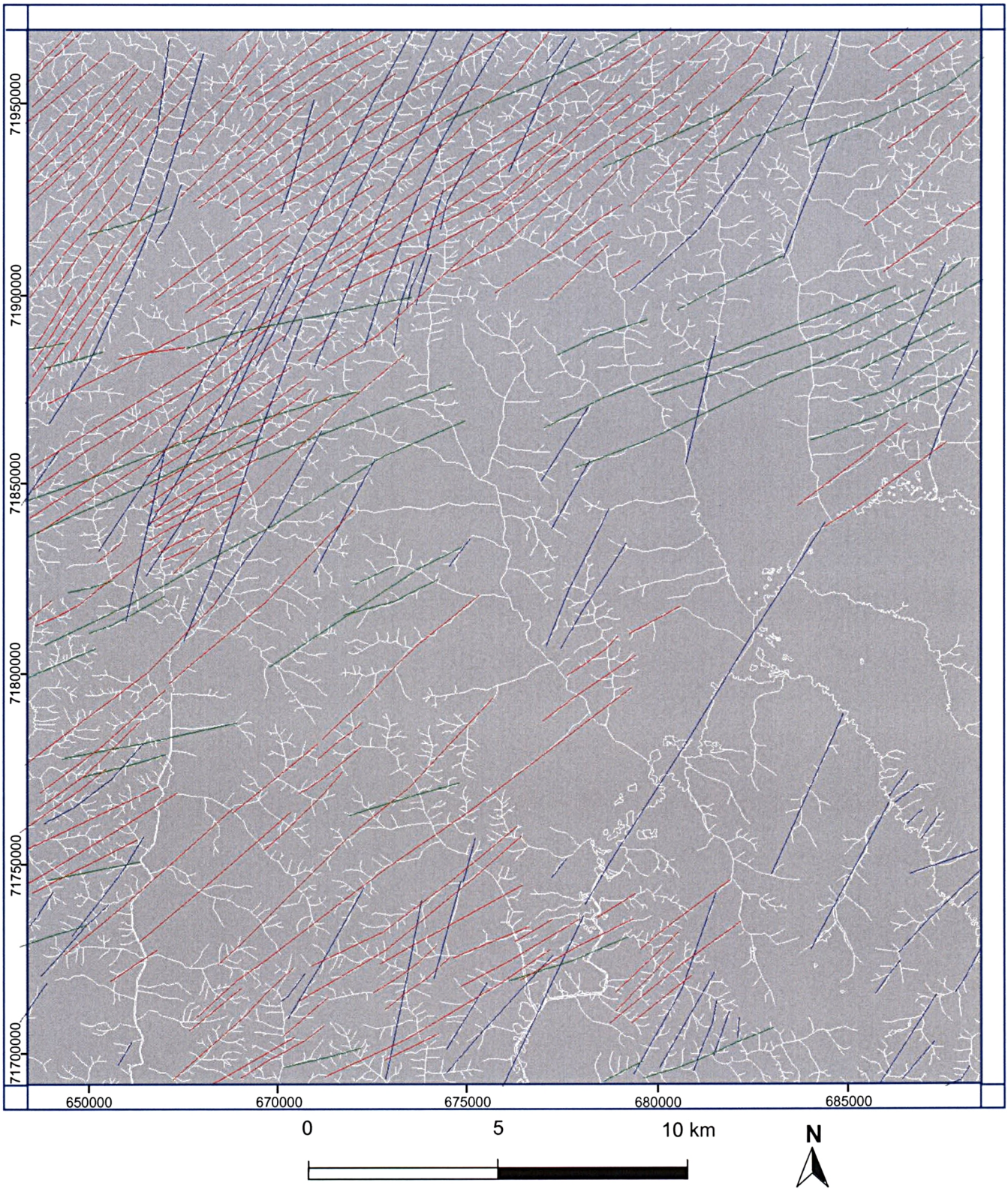
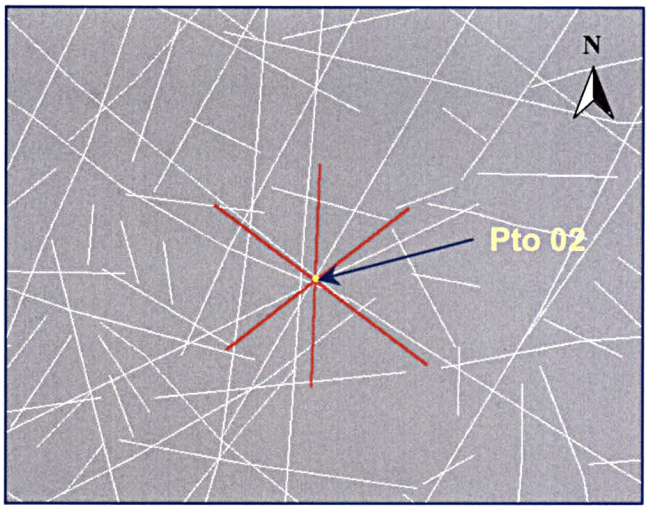


Figura 9.13: Na figura acima: em azul foram traçados as lineações de drenagem de direções em torno de N20E; em vermelho foram representados, as lineações, no intervalo de N45-50E; e em verde um terceiro padrão que se aproxima mais da direção N65E.

9.7 Cruzamento dos dados estruturais obtidos em campo com os lineamentos do MDR e lineações de drenagens

A fase seguinte foi à integração de informações cruzando o nível contendo as direções de lineamentos traçados a partir do MDR e das anomalias de drenagens, com os planos de informações contendo as fraturas e falhas observadas em campo. O que foi constatado é que a grande maioria das direções principais de lineamentos observados em campo, também estão bem evidenciados pelos padrões de lineamentos traçados através do modelo digital e das drenagens. Além de gerar uma maior confiabilidade nas interpretações feitas a partir destas análises de SIG e em campo, é possível estender em superfície as informações estruturais obtidas em campo para outras partes da área em função dos padrões dos alinhamentos traçados por via digital, respeitando é claro, as limitações da análise que considera somente o plano 2D.

Para fazer o cruzamento dos dados de campo com os lineamentos traçados de forma automática, foram digitalizadas através do *software* AUTOCAD v. 2000®, as direções médias das falhas e fraturas obtidas com os diagramas de rosetas, gerados através do *software* STEREONETT v. 2.4, na análise estrutural dos dados de campo. Feita a digitalização, estes planos foram transferidos para o SIG, referente às analises estruturais, onde foi feito o cruzamento deste nível de informações com os lineamentos traçados a partir de drenagens e do MDR. De acordo com o padrão observado, a maioria das drenagens sugere obedecer a um processo de ajuste tectônico controlado pela geometria das falhas e fraturas, que afetam os litotipos existentes na bacia. A figura 9.14 mostra em um detalhe da área, um exemplo de falhas medidas em campo (afloramento do ponto 02) onde os seus respectivos planos médios são coincidentes com aqueles lineamentos obtidos a partir da análise de SIG, tendo como base o modelo digital. Mais uma vez é destacado a importância nesta análise ao fato de que a partir do momento em que são reconhecidas as características de uma ou mais estruturas em campo, estas informações podem ser associadas aos padrões também encontrados nas análises de SIG ajudando, por exemplo, na compreensão da compartimentação tectônica da área e auxiliando em análises de conectividade de fraturas.



0 1 2 km

Escala 1:20.000

Figura 9.14: Em vermelho foram digitalizados as direções médias dos planos das falhas observados em campo no ponto 02 (afloramento nos arredores do Parque Tingui). As linhas em branco representam os lineamentos traçados a partir do MDR. Verifica-se que as direções das falhas coincidem com padrões dos lineamentos maiores traçados sobre o MDR.

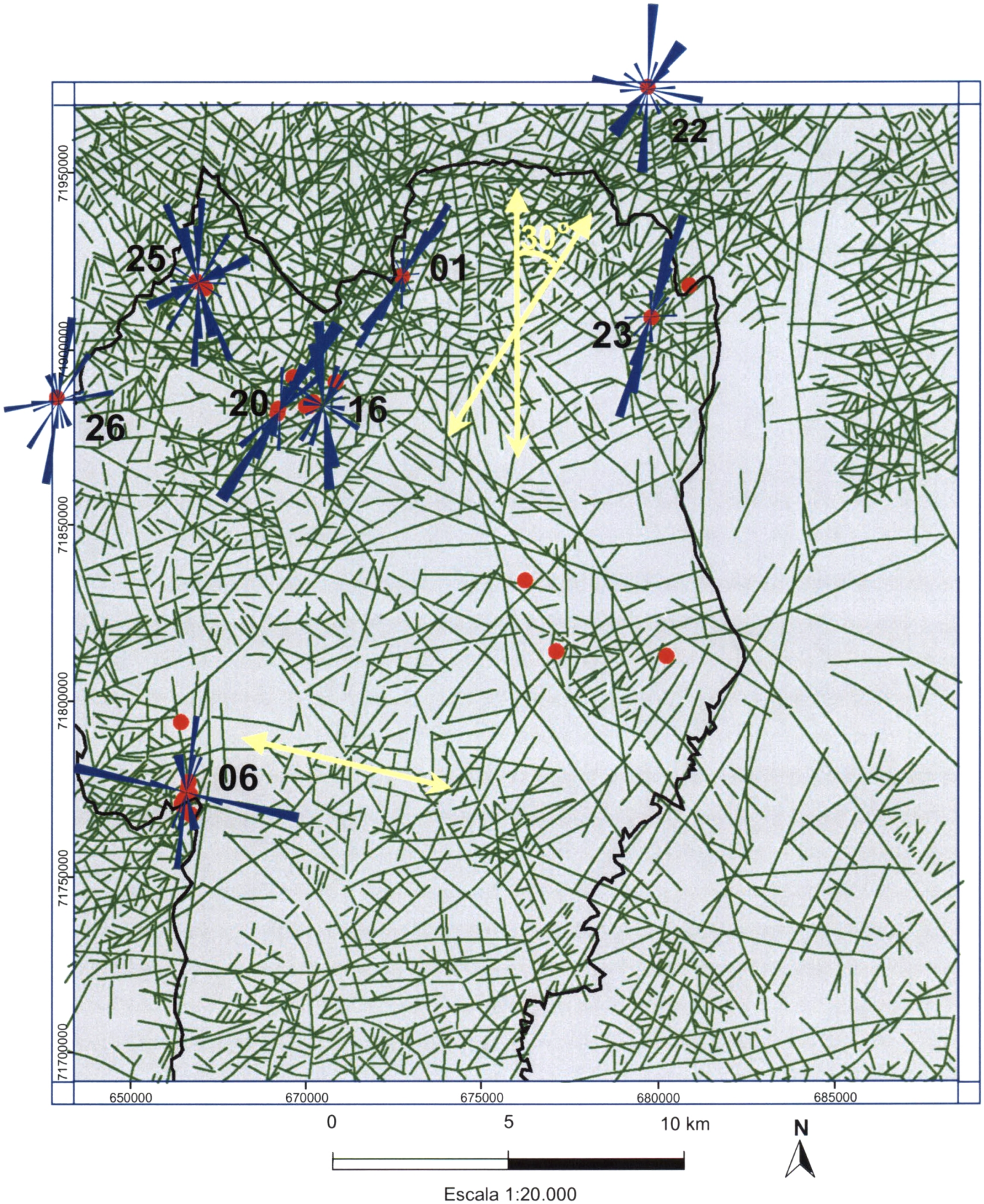
O que se busca neste tipo de análise é reconhecer os padrões estruturais presentes, possibilitando estimar padrões mais abrangentes.

Nas figuras 9.15 e 9.16 foram sobrepostas as rosetas de freqüências, obtidas com o programa STEREONETT v. 2.46, mostrando as direções das falhas (cor azul) e fraturas (em vermelho) observadas em campo nos pontos efetivamente tectonizados, sobre os lineamentos traçados em tela de computador (cor verde) a partir do MDR.

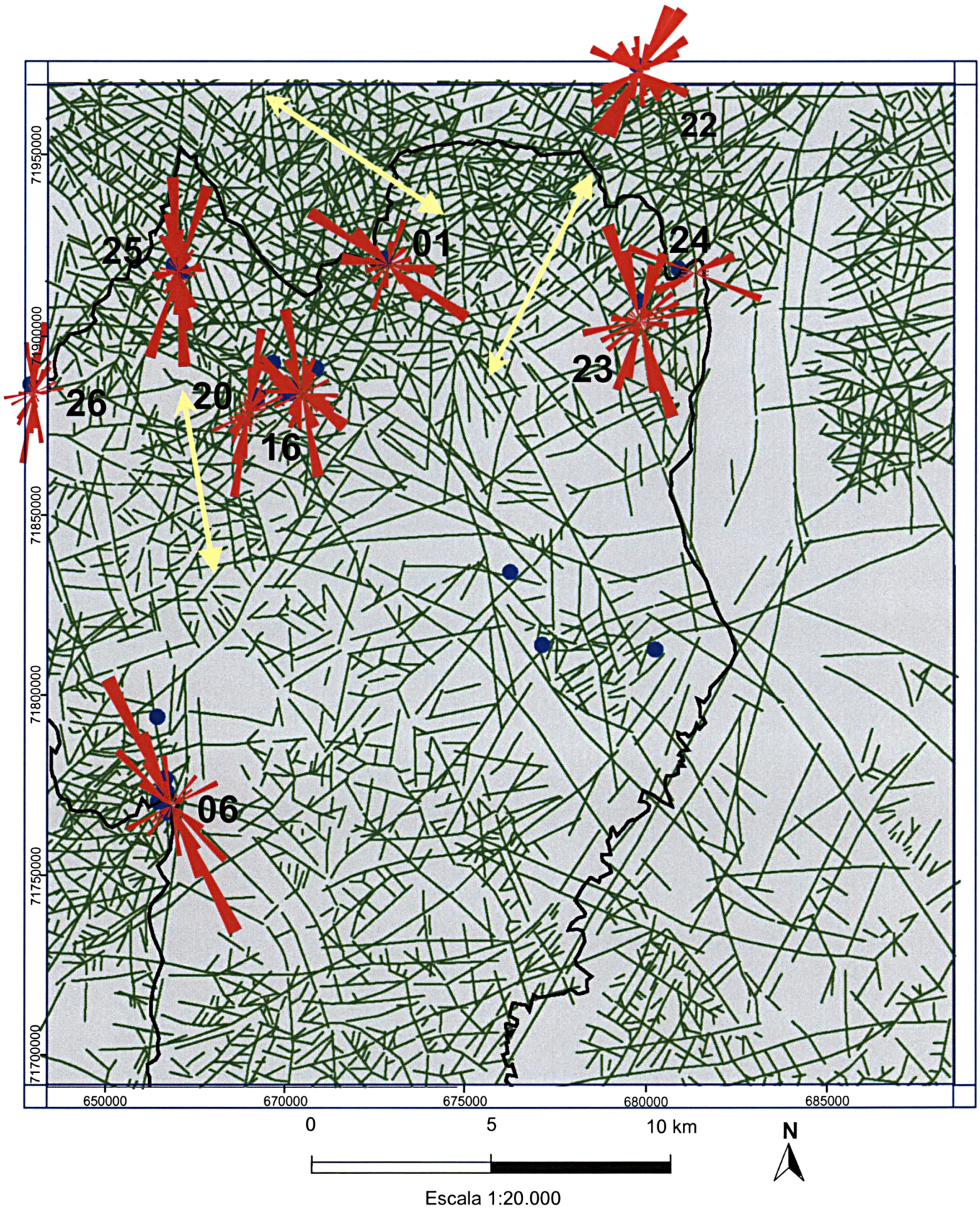
Embora haja uma densidade muito grande de alinhamentos traçados por via digital a partir do MDR, verifica-se uma organização preferencial em direções específicas também coincidentes com as rosetas de freqüências obtidas nas análises estruturais dos dados de campo. Com o objetivo de destacar as orientações mais proeminentes dos alinhamentos, foram desenhados em amarelos os planos indicando estas direções.

Ao norte da área as estruturas em torno das direções N-S e N30E parecem ser as que mais se repetem segundo ambos os níveis de informações. Uma terceira direção (N55-65W) também está presente, e mesmo menos visível nas rosetas mas bem confeccionada no SIG.

Mais ao sul da área (ponto 6, CIC) a direção estrutural que mais sugere se destacar é a em torno de N75W.



Figuras 9.15: Sobreposição das rosetas de freqüências (em azul) obtidas com o programa STEREONETT v. 2.46 mostrando o cruzamento das direções das falhas medidas em campo nos pontos efetivamente tectonizados, sobre os lineamentos (em verde) traçados a partir do MDR. Em amarelo são indicadas as direções que mais de destacam nas rosetas.



Figuras 9.16: Sobreposição das rosetas de freqüências (em vermelho) obtidas com o programa STEREONETT v. 2.46 mostrando o cruzamento das direções das fraturas, observadas em campo nos pontos efetivamente tectonizados, sobre os lineamentos (em verde) traçados a partir do MDR. Em amarelo são indicadas as direções que parecem mais se destacar nas rosetas.

Já nas figuras 9.17 até 9.22 o cruzamento dos planos médios, de falhas e de fraturas determinadas em campo, com os lineamentos traçados sobre o MDR foi realizado de acordo com direções específicas em ambos os níveis de informações com objetivo de filtrar as interferências causadas quando se comparam todos os traçados em um único nível de informação. Ao serem separados os lineamentos em níveis distintos são destacados com maior clareza, famílias de fraturas existentes de acordo com direções principais.

Nestes cruzamentos foi inserida sobre as imagens a representação dos esforços tectônicos principais ou mais prováveis presentes na área, compatíveis com o modelo de RIEDEL, tendo como base a cinemática dos planos sistemáticos de falhas transcorrentes que controlam a circulação de água subterrânea, analisados no Capítulo 08. Deve se considerar que esta análise de SIG é realizada em um "plano 2D", portanto, o cruzamento de informações na figura 9.17 é uma aproximação onde a direção em torno de N20-30E dos alinhamentos traçados sobre o MDR, corresponderia ao plano R de RIEDEL.

A mesma análise foi realizada para os planos médios de falhas de direção N-S, e também com a direção EW, sobre os alinhamentos de relevo traçados no MDR na figura 9.18 e para as estruturas de direção NW na figura 9.19. Assim como os planos médios das falhas, os planos médios das fraturas também foram sobrepostos aos alinhamentos traçados no MDR com o objetivo de verificar os padrões em comum entre ambos os níveis de informações nas figuras 9.19, 9.20, 9.21 e 9.22.

Outras três imagens são apresentadas contendo o cruzamento de lineamentos traçados a partir de anomalias de drenagens (em branco) com os planos médios de falhas (em vermelho) e fraturas (em azul) separados segundo as direções: N15-20W e N15-25E (Figura 9.23); N-S e EW (Figura 9.24); NW (Figura 9.25).

De acordo com a configuração espacial destas famílias de falhas e fraturas (observadas em campo) e lineamentos obtidos através de anomalias de drenagens juntamente com o MDR, o ajuste do modelo de RIEDEL sugere $\sigma\mathbf{1}$ posicionado a N15-20W e os planos R de RIEDEL direcionados a N15-20E.

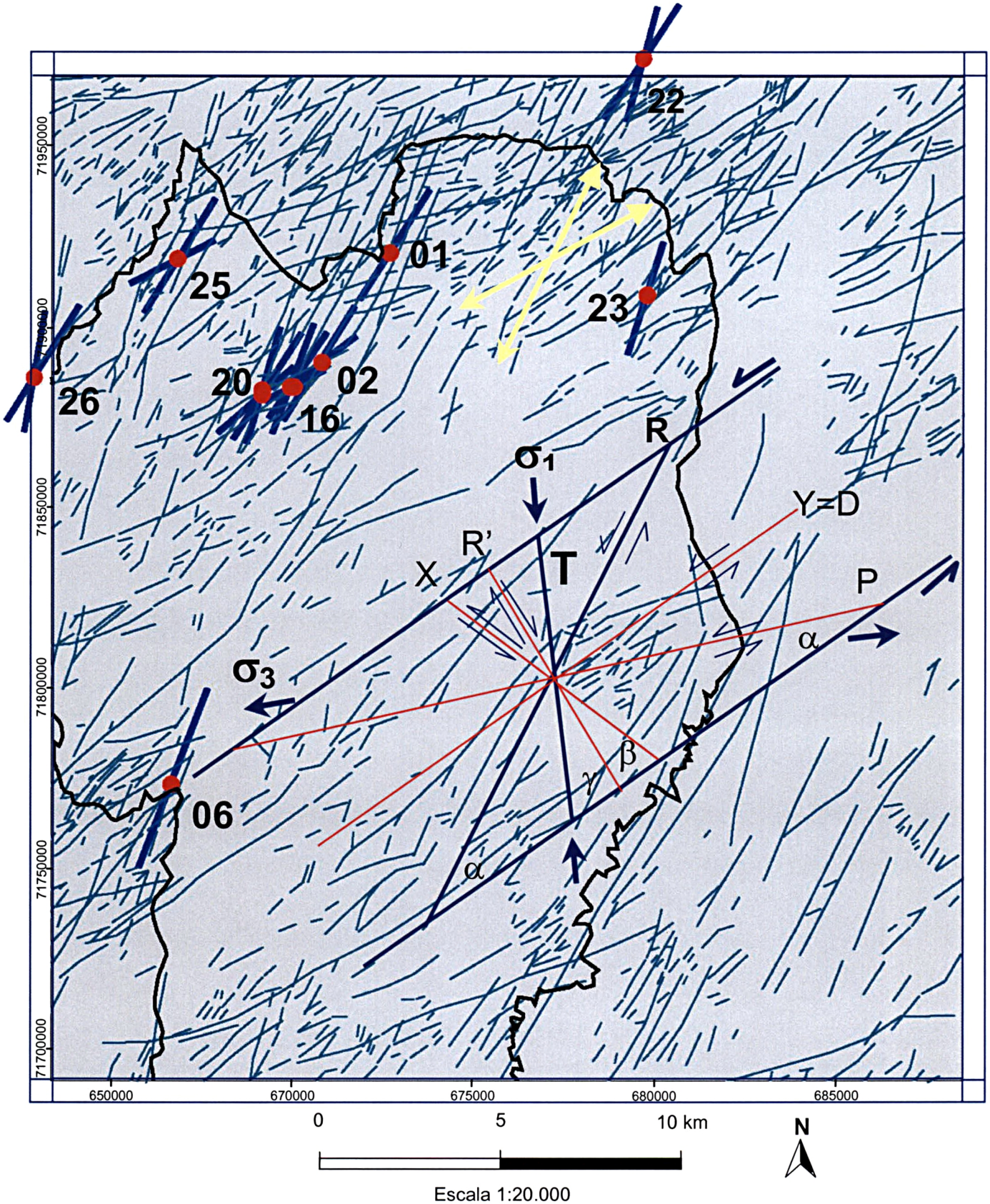


Figura 9.17: Cruzamento dos planos médios das falhas de direção NE (em azul escuro) observadas em campo, com os lineamentos do MDR (em azul claro). O modelo de RIEDEL representa a posição que parece ser mais compatível com os esforços tectônicos principais atuantes na área. Em amarelo são indicadas nas setas as direções que parecem mais se destacar nas rosetas.

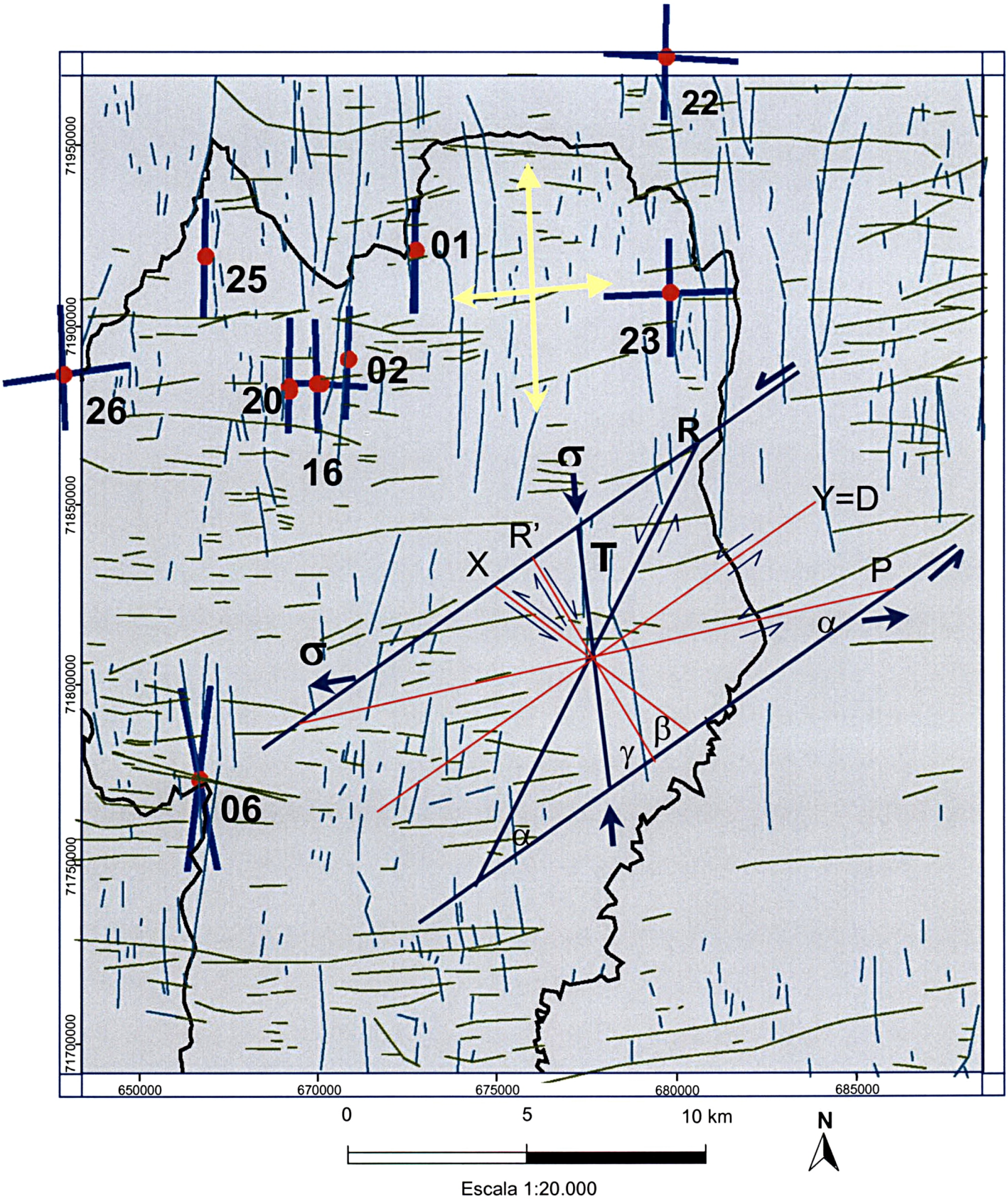


Figura 9.18: Cruzamento dos planos médios das falhas de direção N-S e EW (em azul escuro) observadas em campo, com os lineamentos do MDR (em verde e azul claro). O modelo de RIEDEL representa a posição que parece ser mais compatível com os esforços tectônicos principais atuantes na área. Em amarelo são indicadas nas setas as direções que parecem mais se destacar nas rosetas.

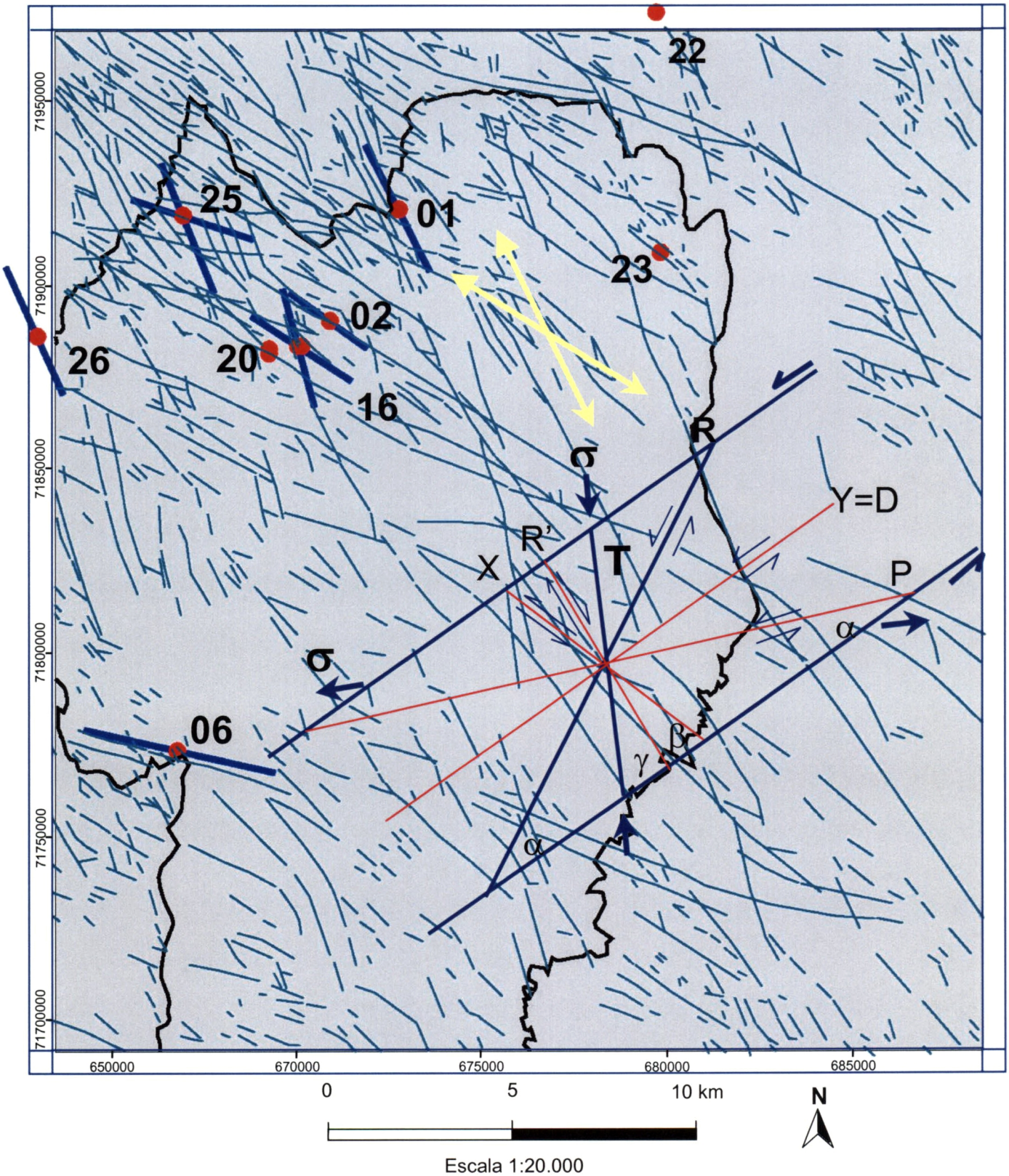


Figura 9.19: Cruzamento dos planos médios das falhas de direção NW (em azul escuro) observadas em campo, com os lineamentos do MDR (em azul claro). O modelo de RIEDEL representa a posição que parece ser mais compatível com os esforços tectônicos principais atuantes na área. Em amarelo são indicadas nas setas as direções que parecem mais se destacar nas rosetas.

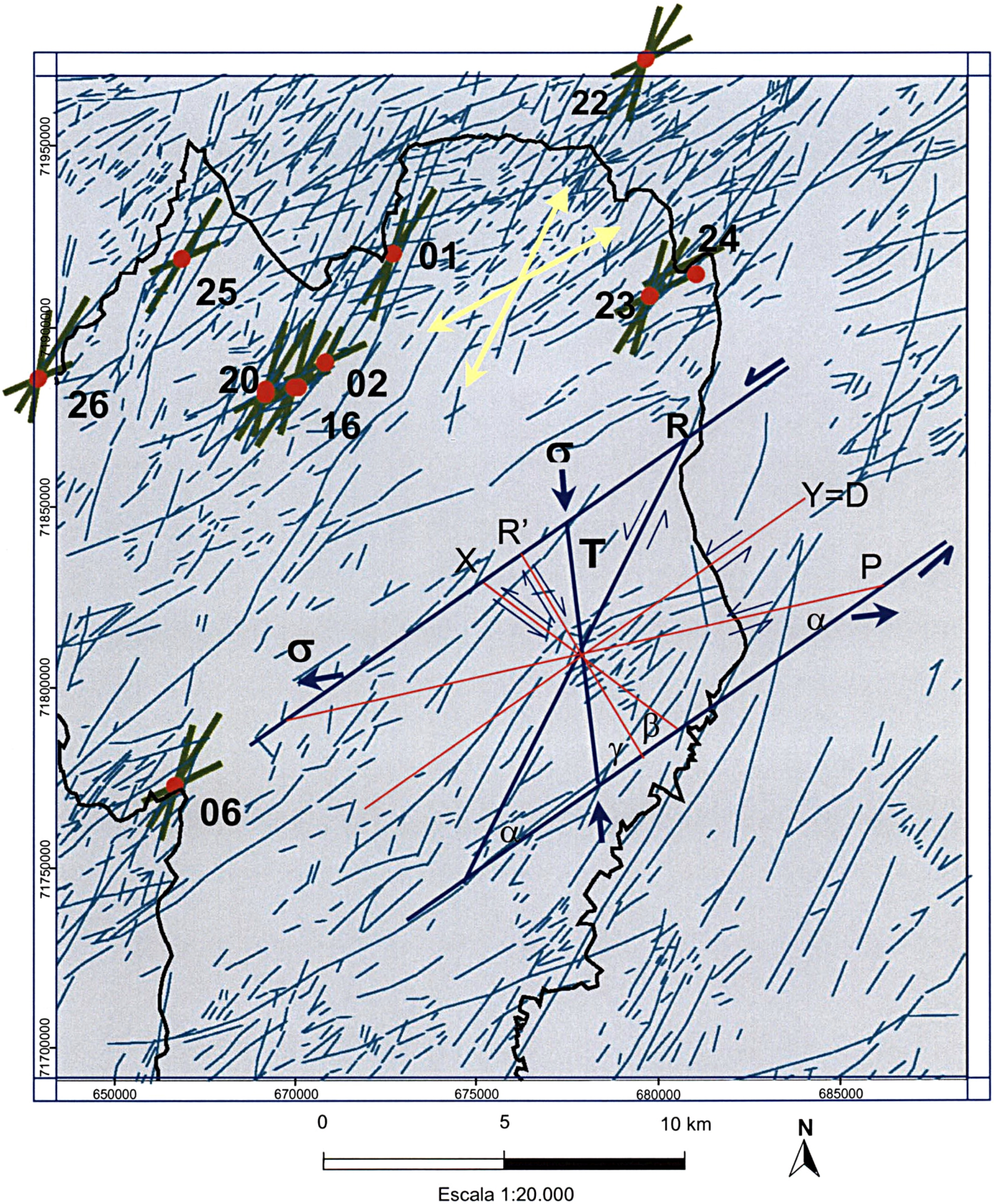


Figura 9.20: Cruzamento dos planos médios das fraturas de direção NE (em verde) observadas em campo, com os lineamentos do MDR (em azul). O modelo de RIEDEL representa a posição que parece ser mais compatível com os esforços tectônicos principais atuantes na área. Em amarelo são indicadas nas setas as direções que parecem mais se destacar nas rosetas.

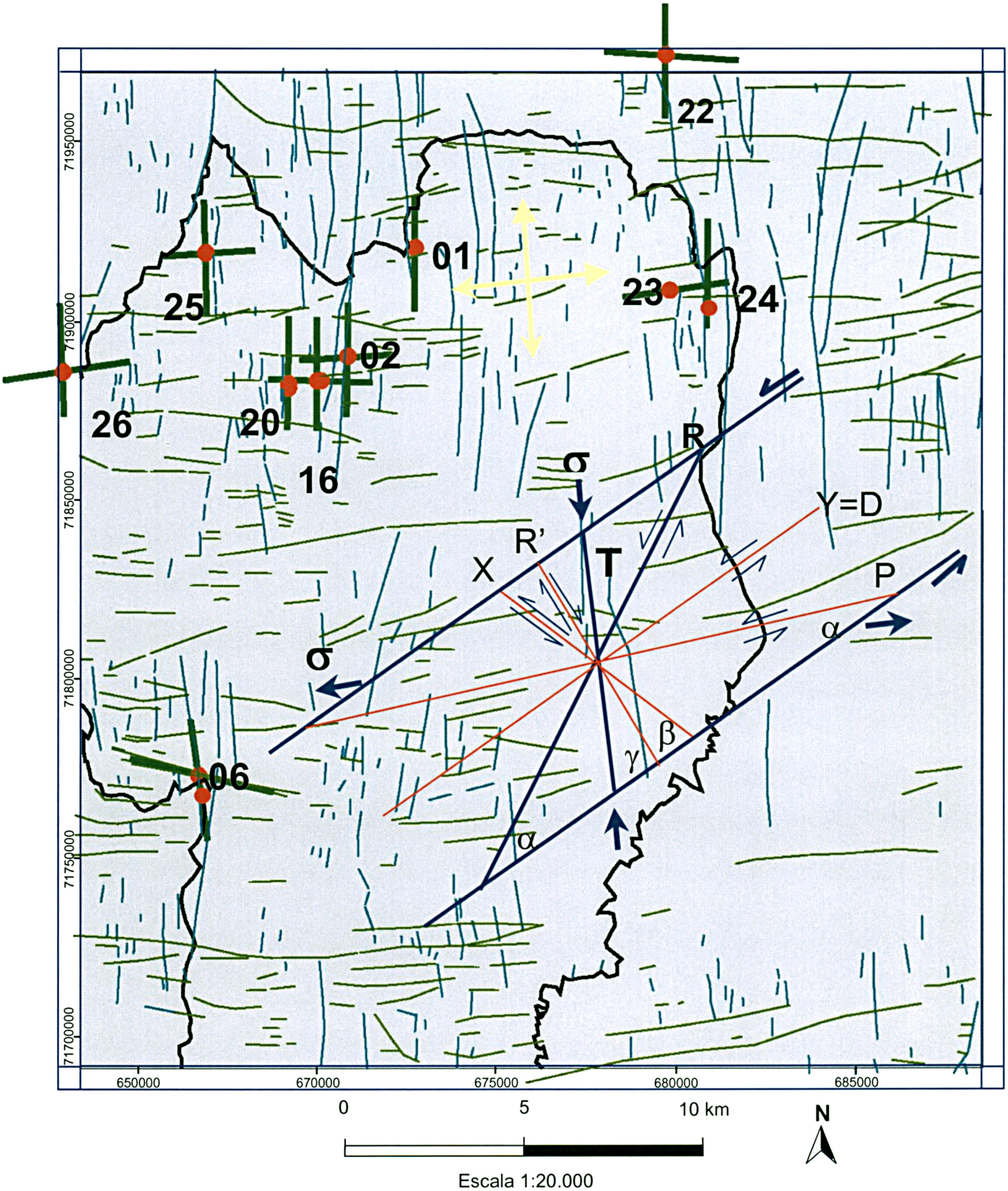


Figura 9.21: Cruzamento dos planos médios das falhas de direção N-S e EW (traços mais espessos de cor verde) observados em campo, com os lineamentos do MDR (traços mais finos em verde e em azul claro). O modelo de RIEDEL representa a posição que parece ser mais compatível com os esforços tectônicos principais atuantes na área. Em amarelo são indicadas nas setas as direções que parecem mais se destacar nas rosetas.

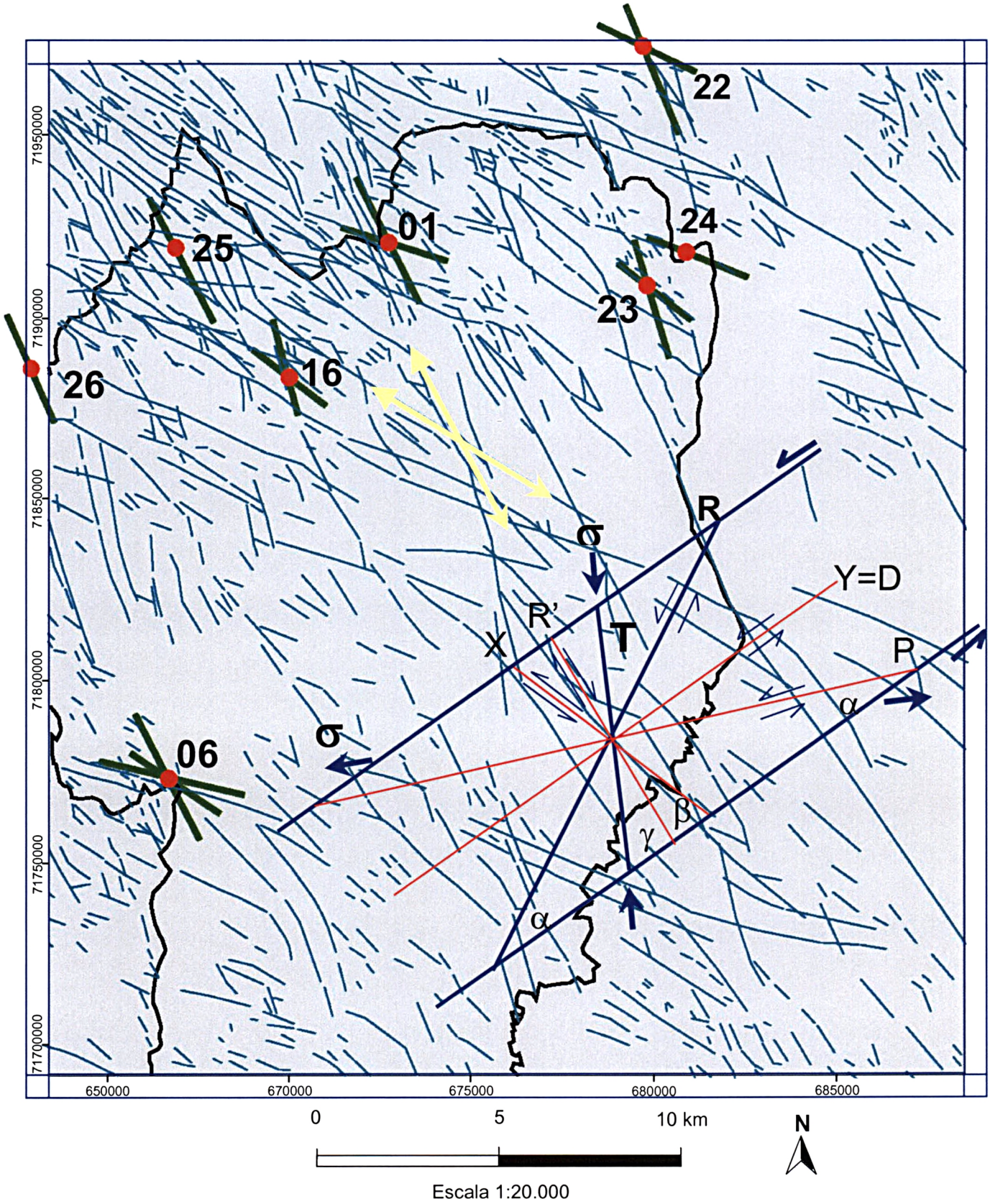


Figura 9.22: Cruzamento dos planos médios das falhas de direção NW (em verde) observadas em campo, com os lineamentos do MDR (em azul). O modelo de RIEDEL representa a posição que parece ser mais compatível com os esforços tectônicos principais atuantes na área. Em amarelo são indicadas nas setas as direções que parecem mais se destacar nas rosetas.

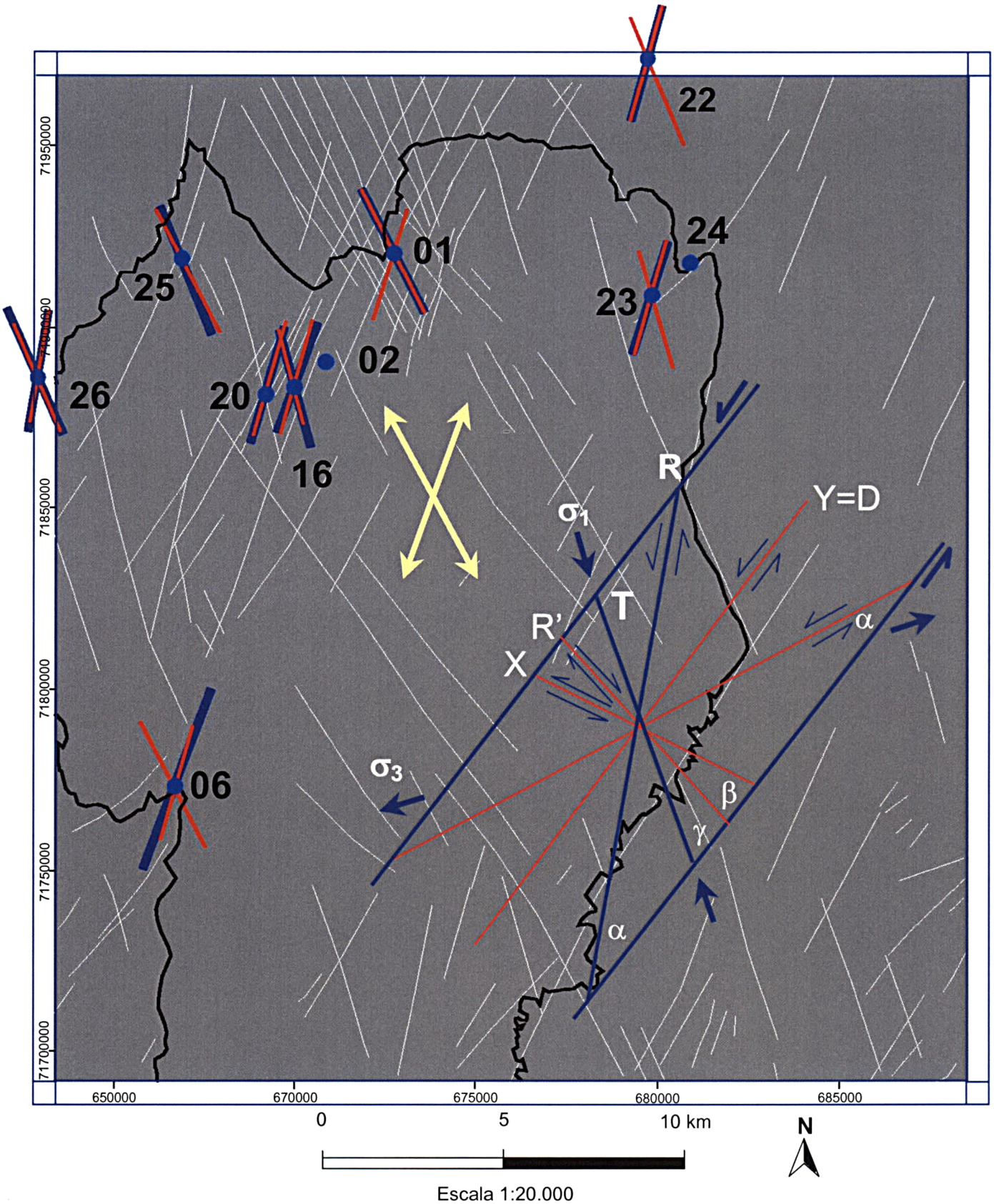


Figura 9.23: Cruzamento dos planos médios observados em campo de falhas (em vermelho) e fraturas (em azul) de direção N15-20W e N15-25E com as lineações de drenagens (em branco). O modelo de RIEDEL representa a posição que parece ser mais compatível com os esforços tectônicos principais atuantes na área. Em amarelo são indicadas nas setas as direções que parecem mais se destacar nas rosetas.

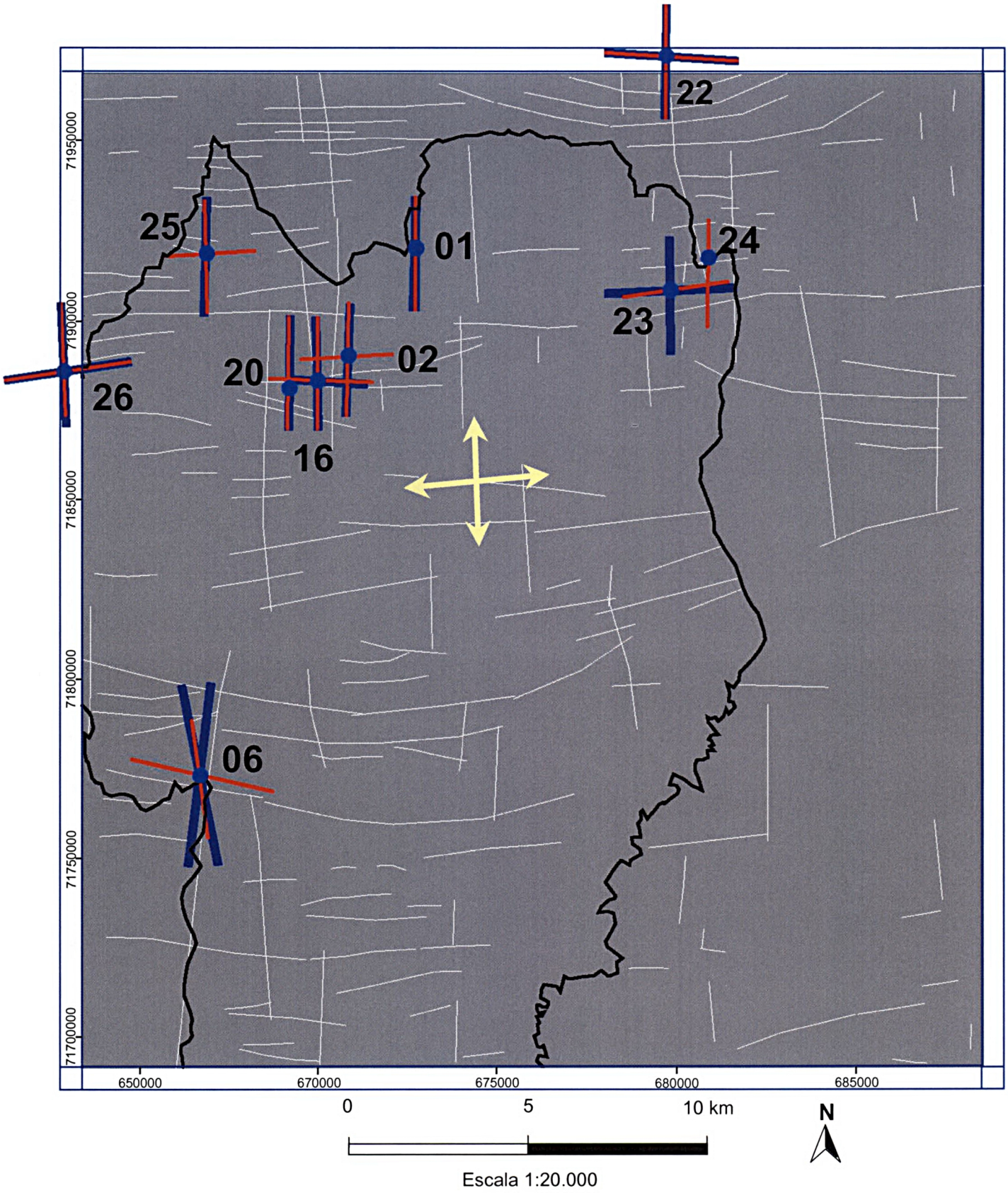


Figura 9.24: Cruzamento dos planos médios observados em campo de falhas (em vermelho) e fraturas (em azul) de direção N-S e EW com as lineações de drenagens (em branco). Em amarelo são indicadas nas setas as direções que parecem mais se destacar nas rosetas.

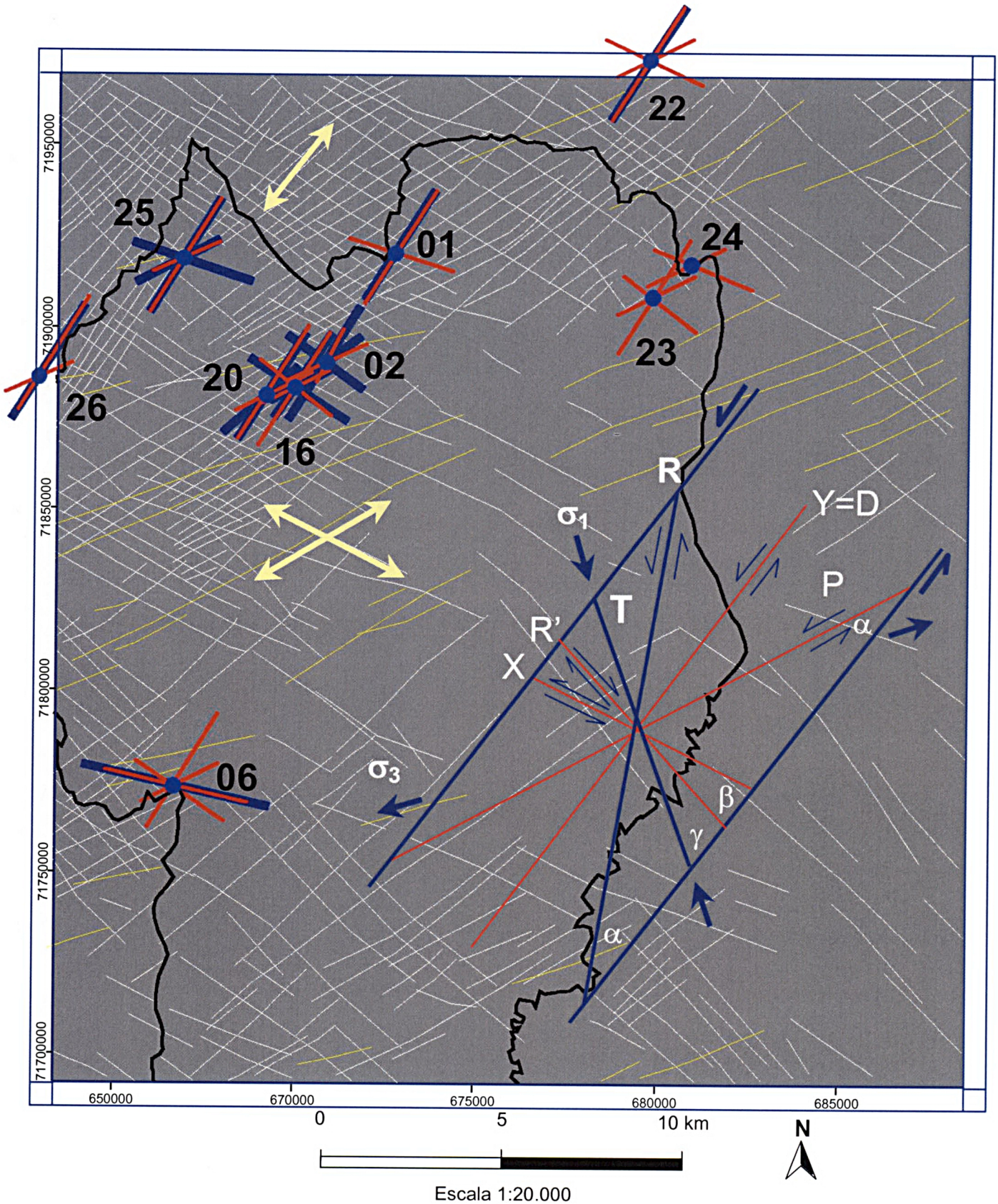


Figura 9.25: Cruzamento dos planos médios observados em campo de falhas (em vermelho) e fraturas (em azul) de direção NW e NE com as lineações de drenagens (em branco). O modelo de RIEDEL representa a posição que parece ser mais compatível com os esforços tectônicos principais atuantes na área. Em amarelo são indicadas nas setas as direções que parecem mais se destacar nas rosetas.

9.8 Considerações gerais

Neste trabalho considerou-se os lineamentos de relevo negativos como concentrações de fraturas que podem se comportar como condutos para transporte e/ou armazenagem de água subterrânea. Os lineamentos positivos, pelo contrário, são associados a prováveis barreiras dentro do aquífero fraturado, sendo necessário cuidado ao realizar análises que envolvam conectividade de fraturas.

Independente do lineamento ser negativo ou positivo a representação através de traços destas feições de relevo, só considera o plano bidimensional e não leva em conta as características das estruturas em um terceiro plano.

Uma outra questão a ser considerada em estudos hidrogeológicos em rochas cristalinas, diz respeito ao comportamento hidráulico dos fluídos no interior das falhas. Os deslizamentos em fraturas cisalhantes e movimento ao longo de uma falha, pode resultar em zonas brechadas com alta condutibilidade hidráulica e zonas de *gouge* que se comportam como barreiras, impedindo a circulação de fluídos. Uma falha pode apresentar características de uma destas zonas ou ambas, tendo comportamento diferenciado em diferentes porções de uma mesma estrutura ROSTIROLLA (2001).

A mudança no estado de tensões também pode modificar de forma significativa as características de uma falha. Nas rochas do embasamento da Bacia de Curitiba, as fraturas que poderiam apresentar preenchimento, em um primeiro momento, como ocorre frequentemente na direção dos planos dos lineamentos N-S, podem ter sido reativadas o que explicaria o fato destas estruturas apresentarem-se, no geral, como abertas e favoráveis à circulação de água subterrânea (EDUARDO SALAMUNI, comunicação pessoal).

O fluxo da água subterrânea em rochas cristalinas também depende muito da rugosidade dos planos das fraturas e falhas que configuram o aquífero fraturado. A rugosidade vai ter grande influência na forma dos espaços, abertura, densidade e quantidade de fraturas, condicionando o fluxo em uma direção preferencial às direções das imperfeições do plano (ROSTIROLLA, *op. cit*). Ainda neste contexto, os cruzamentos entre os planos gerando a conectividade entre as estruturas, torna-se um outro fator a influenciar em grande parte o fluxo e acumulação de fluídos entre as fraturas.

Os tipos litológicos das rochas representam um critério adicional a exercer controle nas propriedades hidráulicas das zonas de falhas. Na área em estudo, frequentemente em um mesmo afloramento, as rochas do embasamento apresentam mais de uma fácies litológica. De forma geral, porções da rocha foram observadas com composição mais diorítica e textura mais fina (milimétrica) e outras vezes de composição mais granítica (com textura mais grossa) e ainda porções pegmatíticas. O indicado em uma pesquisa de exploração de água subterrânea em aqüífero fraturado é a individualização da fácies que ocorrem nas rochas do embasamento, porém a variação na região estudada é bastante grande e devido a escala de trabalho e a dificuldade em se encontrar afloramentos suficientes que representem toda a área, esta análise não foi levada adiante. Como um referencial em um terceiro plano, os perfis geológicos dos poços tubulares profundos perfurados em Curitiba podem ser utilizados futuramente com a continuidade no desenvolvimento desta pesquisa.

10 ANÁLISE ESTATÍSTICA

10.1 Introdução

Os trabalhos de sistematização das informações relativas a poços tubulares profundos no município de Curitiba, foram realizados com o intuito de se proceder as análises espaciais dos mesmos.

A análise estatística clássica dos dados mostra um primeiro passo do reconhecimento da possibilidade ou não de haver interdependência entre os dados.

A geoestatística, empregada no capítulo seguinte, necessita da análise inicial através da estatística clássica, visto que há necessidade do entendimento de questões inerentes à distribuição espacial dos dados. A estatística clássica foi usada como auxiliar para a própria análise exploratória que se procedeu como os dados hidrogeológicos do aqüífero fraturado e até então, não foi feito nenhum trabalho envolvendo esta questão na área.

A região analisada é dominada pelo aqüífero fissural do embasamento da Bacia de Curitiba, representado pelo Complexo Atuba (SIGA JR. et al, 1995) e, portanto, sujeito ao controle estrutural da deformação rúptil, que por definição é heterogênea. Tal característica, somada ao fato de que poços tubulares sempre estão concentrados onde há maior fomento da atividade sócio-econômica e também ao fato de que a tecnologia de sondagem evoluiu, possibilitando que se atinjam profundidades maiores em menos tempo, condicionaram a discrepância e a heterogeneidade dos dados utilizados neste trabalho. Tal discrepância é aqui analisada, com o intuito de se obter padrões hidrogeológicos representados pelos dados existentes.

10.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é fazer uma análise estatística exploratória visando reconhecer espacialmente a distribuição e as características das variáveis

relacionadas aos poços tubulares profundos da cidade de Curitiba. Não é intenção neste capítulo de realizar uma análise hidrogeológica dos dados, mas sim de um primeiro reconhecimento dos dados hidrogeológicos, em uma fase que antecede a análise geoestatística, realizada na seqüência deste trabalho.

A análise exploratória espacial inicial dos dados, abordada aqui, objetivou a melhoria da pesquisa em função do registro sistemático e ordenado das informações e pela representação gráfica que resume os resultados obtidos.

Outro aspecto importante abordado foi o de classificar os dados em variáveis qualitativas (nominal ou ordinária) ou quantitativas (contínuas ou discretas). Esse é um dos primeiros passos a serem seguidos em qualquer trabalho de análise e integração de informações. Por exemplo, na construção atual de estratégias de exploração de um bem mineral a lógica matemática, onde é utilizada a variável quantitativa, tem sido cada vez mais integrada à pesquisa qualitativa (ROSTIROLLA et al, 1996 e ROSTIROLLA, 1997). A análise qualitativa está relacionada, principalmente, com o conhecimento geológico a respeito do sistema controlador da ocorrência do minério (no caso do presente trabalho a água), sendo este fator considerado como mais importante na exploração. Os dados quantitativos representam os valores numéricos das variáveis, mas a interpretação destes resultados depende do conhecimento em si do fenômeno presente.

A utilização da estatística clássica neste trabalho segue a conceituação de LANDIM (1998) e tem como pressuposto:

a) a familiarização dos próprios dados;

b) a detecção dos padrões de irregularidades, ou seja, as discrepâncias existentes;

c) a identificação da estrutura dos dados originais, presença de tendências ou agrupamentos;

Para se atingir o conhecimento pleno dos dados e o exposto anteriormente, a planilha de dados foi integrada ao banco de dados, utilizando-se o *software* ARCVIEW v. 3.2®, que também pode ser normalmente visualizada pelo usuário através de outros *software*s que aceitem o formato "dbf", a exemplo do EXCELL v. 2000®.

Por uma questão de conveniência optou-se por trabalhar estatisticamente com os valores originais dos dados no *software* STATISTICA v. 5.0®, pois o mesmo ilustra de forma mais interativa ao leitor as características básicas das variáveis.

Por princípio o conhecimento da área de estudo é fundamental para que seja possível estabelecer uma relação entre a distribuição espacial das informações e as direções de maior e menor covariância dos dados (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989). Mesmo considerando que a seleção dos dados de modo relativamente arbitrário talvez subestime a quantidade de informações é certo que a mesma conduz a erros menores.

10.3 Estrutura e análise dos dados

Para realizar as análises exploratórias foram selecionados 864 poços de um total de 1297 poços referentes à área de interesse (município de Curitiba). A quantidade de poços listados no banco de dados montado através do *software* ARCVIEW 3.2®, não corresponde ao total de casos de sondagem em razão não recuperação de dados de poços existentes. Entretanto, o número de poços foi considerado suficiente para a caracterização do seu comportamento hidrogeológico através da análise espacial utilizando-se a Estatística Clássica.

De acordo com os dados analisados (864 casos), o total potencial da vazão dos poços tubulares profundos de Curitiba é de 1,21 m^3/s (4367,5 m^3/h). Esse valor corresponde a cerca de 15% do potencial de demanda de água apenas no município o que evidencia a importância do aqüífero fissural para exploração de água subterrânea.

As informações a respeito dos dados hidrogeológicos foram organizadas em informações qualitativas (para uma rápida identificação da variável) e informações quantitativas listadas abaixo:

Variável	**Tipo**
• ID (código de identificação): variável	qualitativa ordinal
• Proprietário	qualitativa nominal
• Endereço	qualitativa nominal
• Bairro	qualitativa nominal

• Cidade	qualitativa nominal
• Ano	qualitativa ordinal
• Categoria (uso industrial, clube, etc).	qualitativa nominal
• Divisão regional (de acordo IPPUC - 2000)	qualitativa ordinal
• Companhia de sondagem	qualitativa ordinal
• Tipo de bomba utilizada	qualitativa nominal
• Aqüífero	qualitativa nominal
• Profundidade	quantitativa contínua
• Vazão (m^3/h)	quantitativa contínua
• Crivo (m)	quantitativa contínua
• Nível estático (m)	quantitativa contínua
• Nível dinâmico (m)	quantitativa contínua
• Entrada d'água (m)	quantitativa contínua
• Revestimentos (m)	quantitativa contínua
• Solo (entre x e x metros)	quantitativa contínua
• Fm Guabirotuba (entre x e x metros)	quantitativa contínua
• Rocha alterada (entre x e x metros)	quantitativa contínua
• Rocha Inalterada (entre x e x metros)	quantitativa contínua
• Tipo de análise da água	qualitativa nominal
• Localização (foi localizado ou não)	qualitativa ordinal
• Capacidade específica	quantitativa contínua
• Cota superior	quantitativa contínua
• Cota do embasamento	quantitativa contínua
• Coordenadas em UTM (X,Y)	quantitativa contínua
• Carta topográfica	qualitativa ordinal
• Foto aérea (número)	qualitativa nominal
• Observações	qualitativa nominal

Quadro 01: Planilha referente aos dados hidrogeológicos dos poços tubulares de Curitiba.

No *software* STATISTICA v.5® as variáveis selecionadas para os testes iniciais foram:

1. **Categoria:** refere-se ao tipo de uso, se domiciliar, industrial, hospitalar ou associativo ou outros;
2. **Vazão:** quantidade do volume médio extraído dos poços tubulares profundos através de bombeamento sistemático;

3. **Profundidade:** indica a metragem da perfuração do poço tubular profundo a partir da superfície do terreno;
4. **Data:** refere-se ao ano em que o poço foi construído;
5. **Nível dinâmico:** profundidade do nível de água pós-bombeamento;
6. **Nível estático:** profundidade do nível de água no poço em estado de pré-bombeamento;
7. **Entradas d'água:** correspondem aos pontos de contribuição de água subterrânea dentro do poço tubular profundo;
8. **Divisão regional:** de acordo com o Instituto de Planejamento Urbano de Curitiba - IPPUC (2001) o município de Curitiba foi dividido em oito setores regionais: Boqueirão, Portão, Pinheirinho, Matriz, Santa Felicidade, Bairro Novo, Boa Vista e Cajuru.

Foram realizados oito diferentes testes estatísticos para a determinação da correlação entre as variáveis, com o objetivo de dar um panorama geral da utilização subterrânea no município de Curitiba.

Dos 864 casos analisados, até o ano de 1980 foram perfurados 263 poços tubulares profundos e de 1980 até 2001 foram feitas mais 601 sondagens o que demonstra o aumento substancial, nos últimos 20 anos, na exploração de água subterrânea no aqüífero fraturado da Bacia de Curitiba.

10.3.1 Variável Categoria (tipos de usos)

A distribuição do uso dos poços tubulares profundos varia basicamente de região para região no município, dependendo de sua vocação urbana. No centro e bairros mais próximos, o principal uso é dado pelos condomínios e empresas privadas correspondendo a 21,9 % do total. Na periferia e regiões mais afastadas predomina o uso industrial (também 21,9 %). Essa distribuição pode ser melhor observada na figura 10.1, que mostra o gráfico de setores em círculos dos usos mencionados.

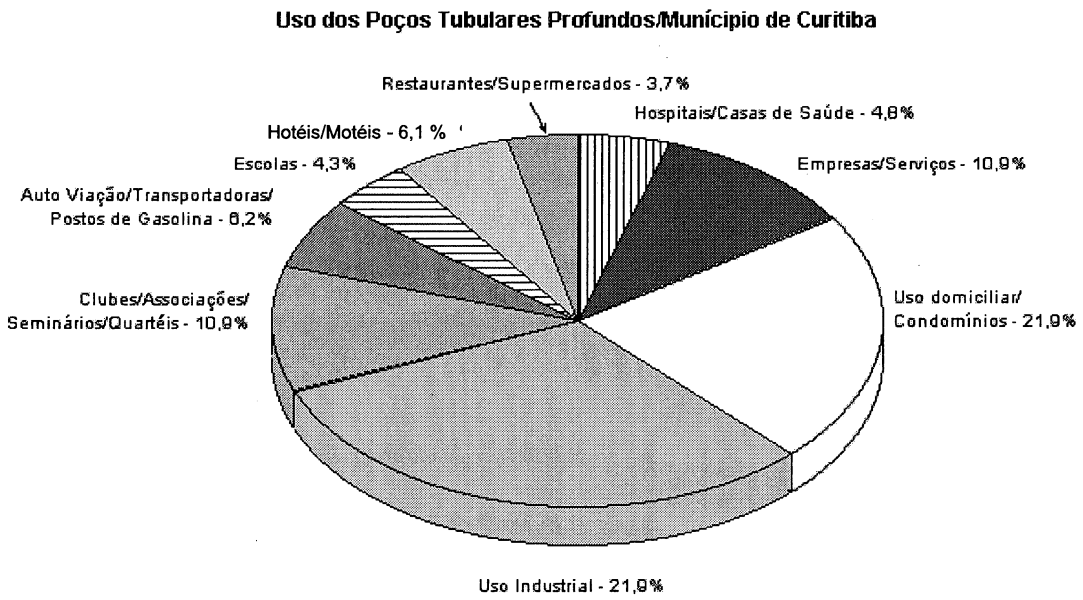


Figura 10.1: Gráfico de setores em círculos mostrando a distribuição de uso dos poços tubulares profundos na cidade de Curitiba.

No gráfico trivariante da figura 10.2, observa-se o cruzamento da variável referente ao tipo de uso em relação a um intervalo de tempo definido (em anos).

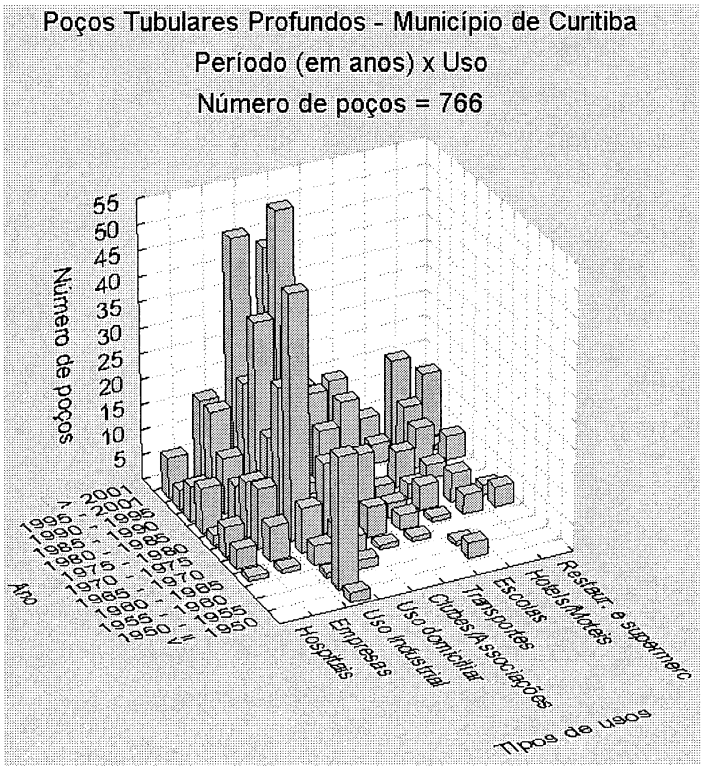


Figura 10.2: Gráfico trivariante mostrando a relação entre o uso e número de poços em um intervalo de tempo definido.

Inicialmente o que pode ser constatado é que até 1975 os principais usuários para poços tubulares profundos foram as indústrias, ocorrendo um grande pico na incidência de novas sondagens entre os anos de 1950 até 1955, havendo então uma fase de pouca demanda na construção de outros poços até 1975.

A partir desta data verifica-se um aumento crescente de novas sondagens até o ano de 2001. Os condomínios, seguidos do uso industrial e ainda algumas empresas privadas são os maiores usuários.

A figura 10.3 mostra através do histograma trivariante, o tipo de uso predominante em cada setor da cidade. O uso industrial no Pinheirinho e o uso domiciliar na Matriz são as classes que mais se destacam. A terceira classe de maior destaque é o uso industrial no setor de Santa Felicidade.

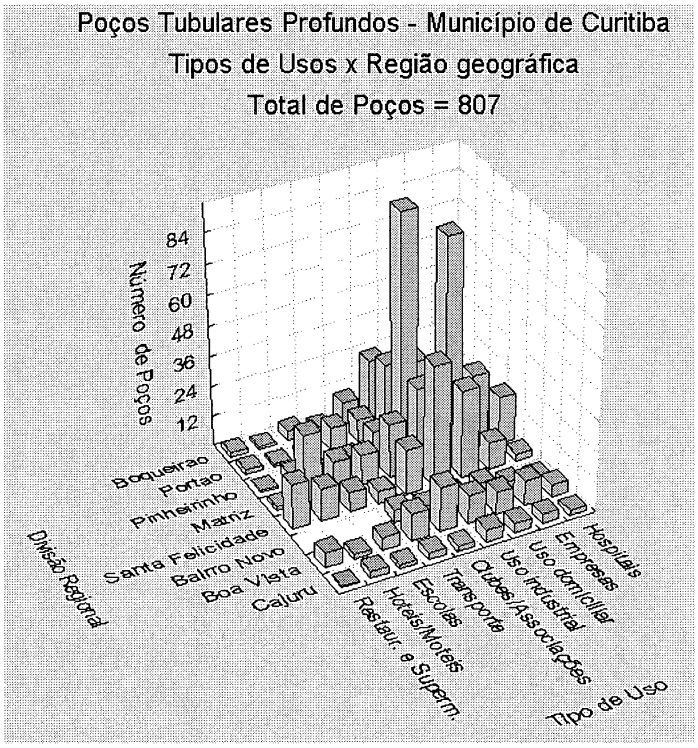


Figura 10.3: O gráfico trivariante ilustra os principais tipos de usos de poços tubulares de acordo com a divisão regional da área.

Na figura 10.4 é possível observar sobrepostos ao modelo digital de relevo da área (MDR), os poços tubulares profundos de Curitiba e a divisão regional criada pelo Instituto de Planejamento Urbano de Curitiba - IPPUC (2001), que divide o município de Curitiba em 8 setores regionais: Boqueirão, Portão, Pinheirinho, Matriz, Santa Felicidade, Bairro Novo, Boa Vista e Cajuru.

Observando a figura 10.4 verifica-se que o centro da cidade e arredores (Matriz), assim como nas áreas mais industrializadas a exemplo do CIC (Pinheirinho) são os locais onde ocorre o maior adensamento de poços tubulares profundos.

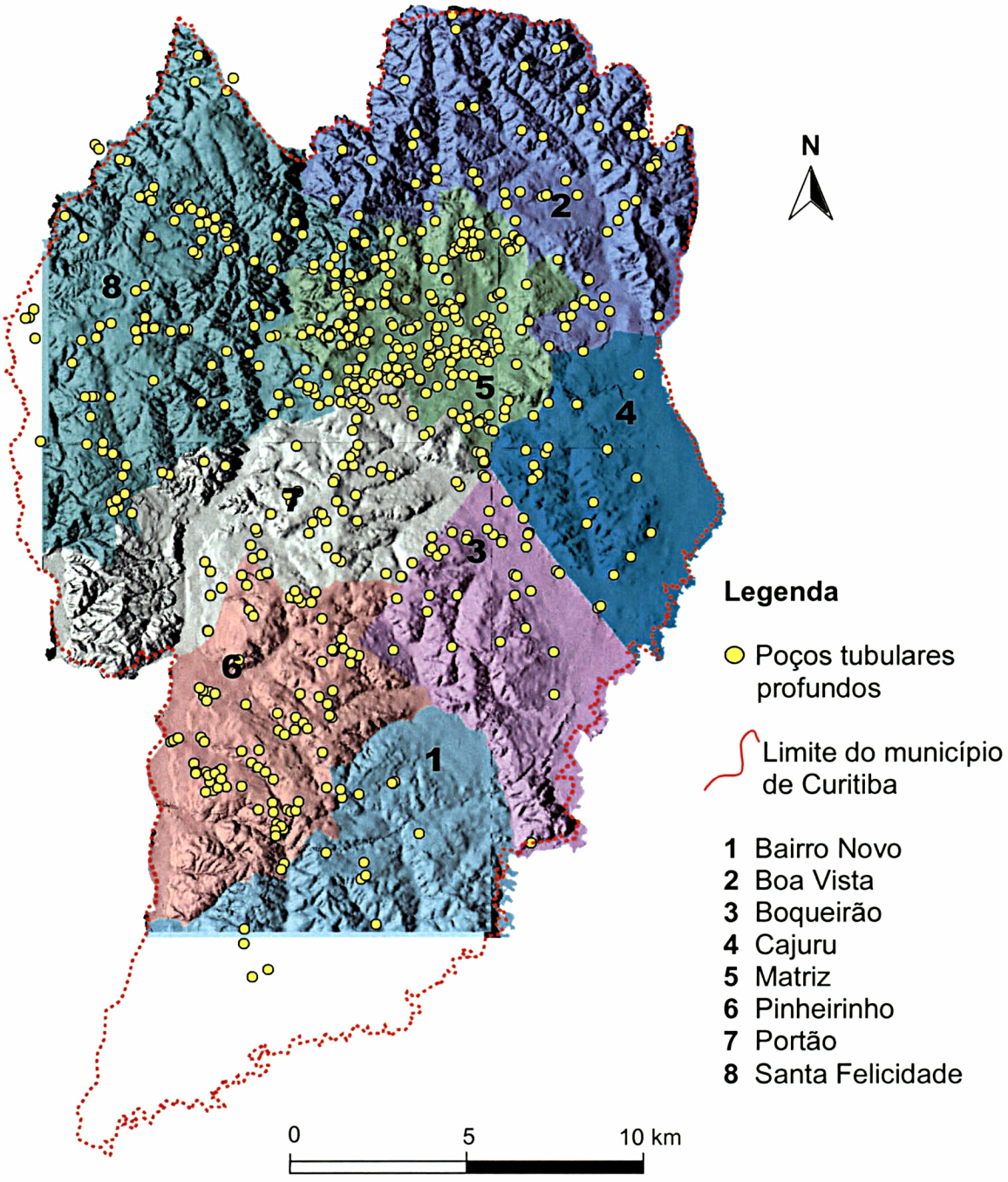


Figura 10.4: Divisão regional do município de Curitiba de acordo com IPPUC (2001). Os pontos amarelos representam pelo menos 700 poços tubulares na área.

10.3.2 Variável Vazão (m^3/h)

O teste *boxplot* da figura 10.5 mostra que a mediana da variável vazão no município de Curitiba é de 3,6 m^3/h. Observando o gráfico verifica-se que 50% dos casos estão entre 1,68 e 7,2 m^3/h. A mediana dá a idéia da tendência central dos dados quando existem valores discrepantes.

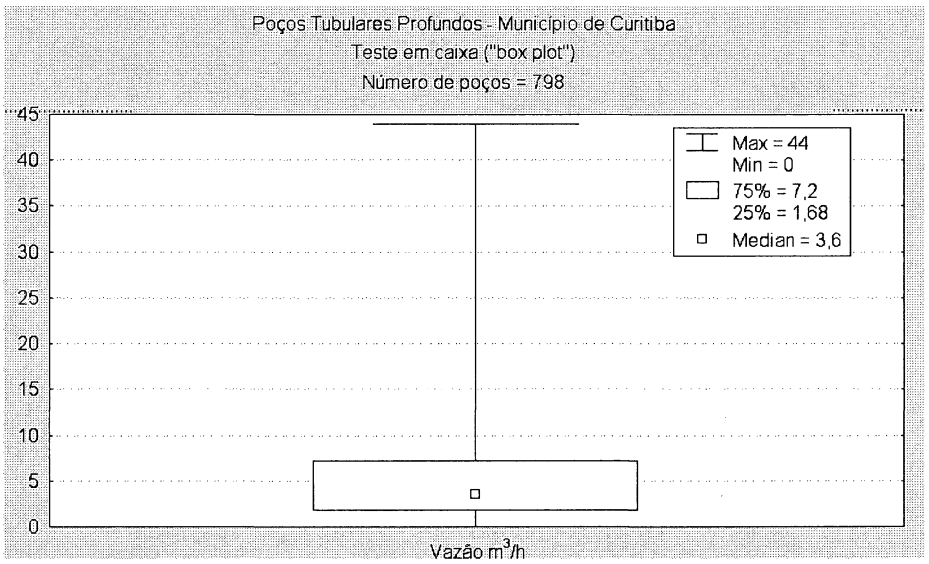


Figura 10.5: Gráfico *boxplot* para a variável vazão dos poços tubulares de Curitiba.

O comportamento da variável demonstra que ocorre uma variabilidade alta entre os valores de vazão nos poços tubulares de Curitiba. Existe uma grande quantidade de valores longe da média o que indica um alto coeficiente de curtose.

O teste bidimensional em barras da figura 10.6 cruza o número de poços com intervalos definidos de valores de vazão, mostrando a distribuição média desta variável dentro destas classes.

Verifica-se que a distribuição de valores de vazão dentro das classes é bastante assimétrica à direita mostrando que a variável tem distribuição leptocúrtica para os dados de vazão, ou seja, mais aguda e afilada em sua parte superior, diferente da normal ou gaussiana. A grande diferença de valores dos dados entre as classes também denota variabilidade nos dados. Geologicamente isto demonstra uma heterogeneidade do aqüífero.

De todos os casos existentes 18,5% das sondagens apresentam vazão menor ou igual a 1 m^3/h, 76,4% dos casos tem vazão entre 1 e 16 m^3/h e a partir de 16m^3/h a quantidade de poços existentes em cada classe não ultrapassa 5%.

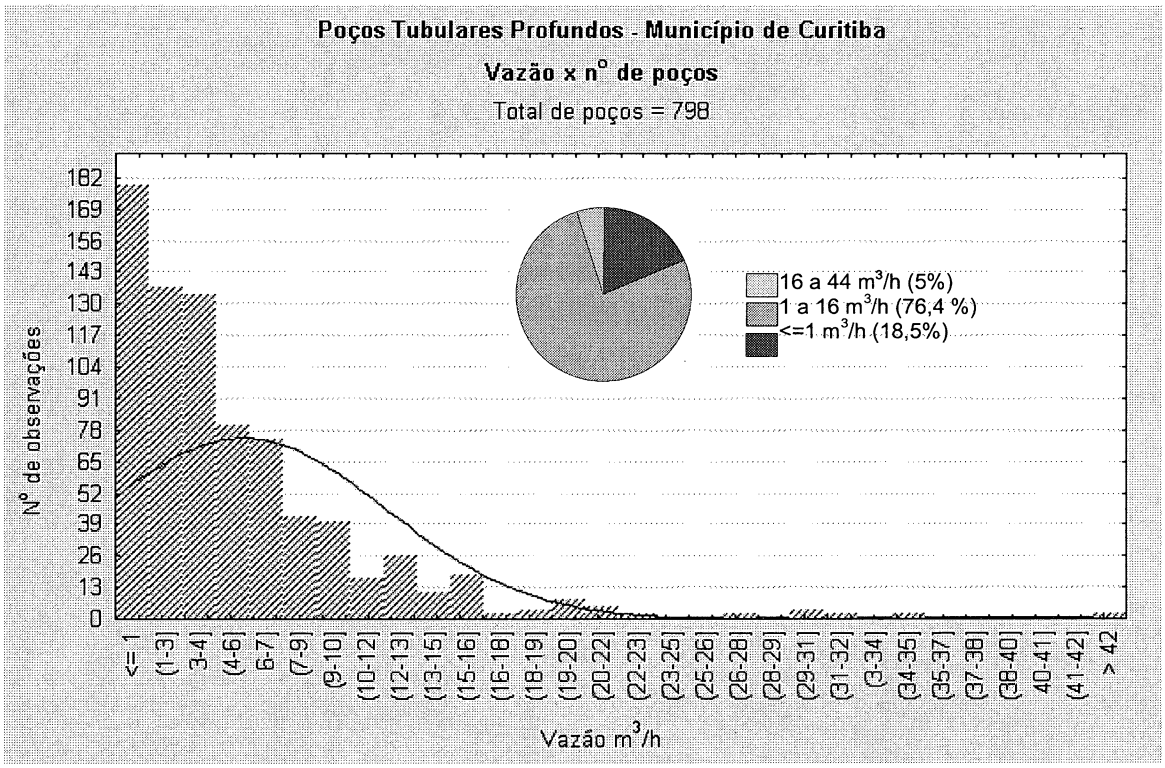


Figura 10.6: Histograma em barras dos valores originais ilustrando a média de vazão de acordo com intervalos definidos desta variável.

No gráfico do tipo em pizza são mostrados cinco intervalos em % contendo a variável vazão (figura 10.7). O intervalo de 32,7% corresponde ao maior intervalo na qual as vazões variam entre 2 a 5 m^3/h, enquanto que vazões com valores superiores a 20 m^3/h representam apenas 3,4% da média geral.

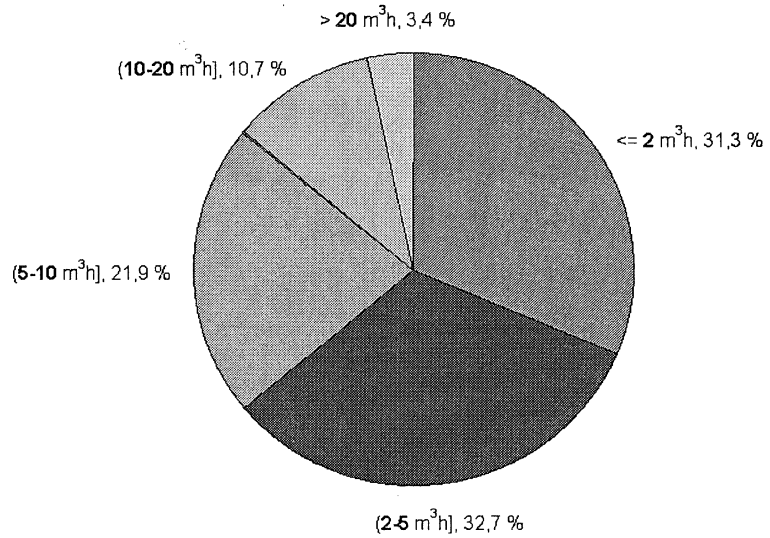


Figura 10.7: Gráfico do tipo em pizza mostrando em % cinco intervalos de classes com a variável vazão. Para o teste foram utilizados o total de 798 poços.

Para dar um panorama geral da produtividade dos poços tubulares profundos perfurados na cidade de Curitiba em relação aos planos estruturais, na figura 10.8 foi feito o cruzamento de pelo menos 700 poços tubulares de acordo com intervalos definidos de vazão versus o mapa de lineamentos de relevo da área.

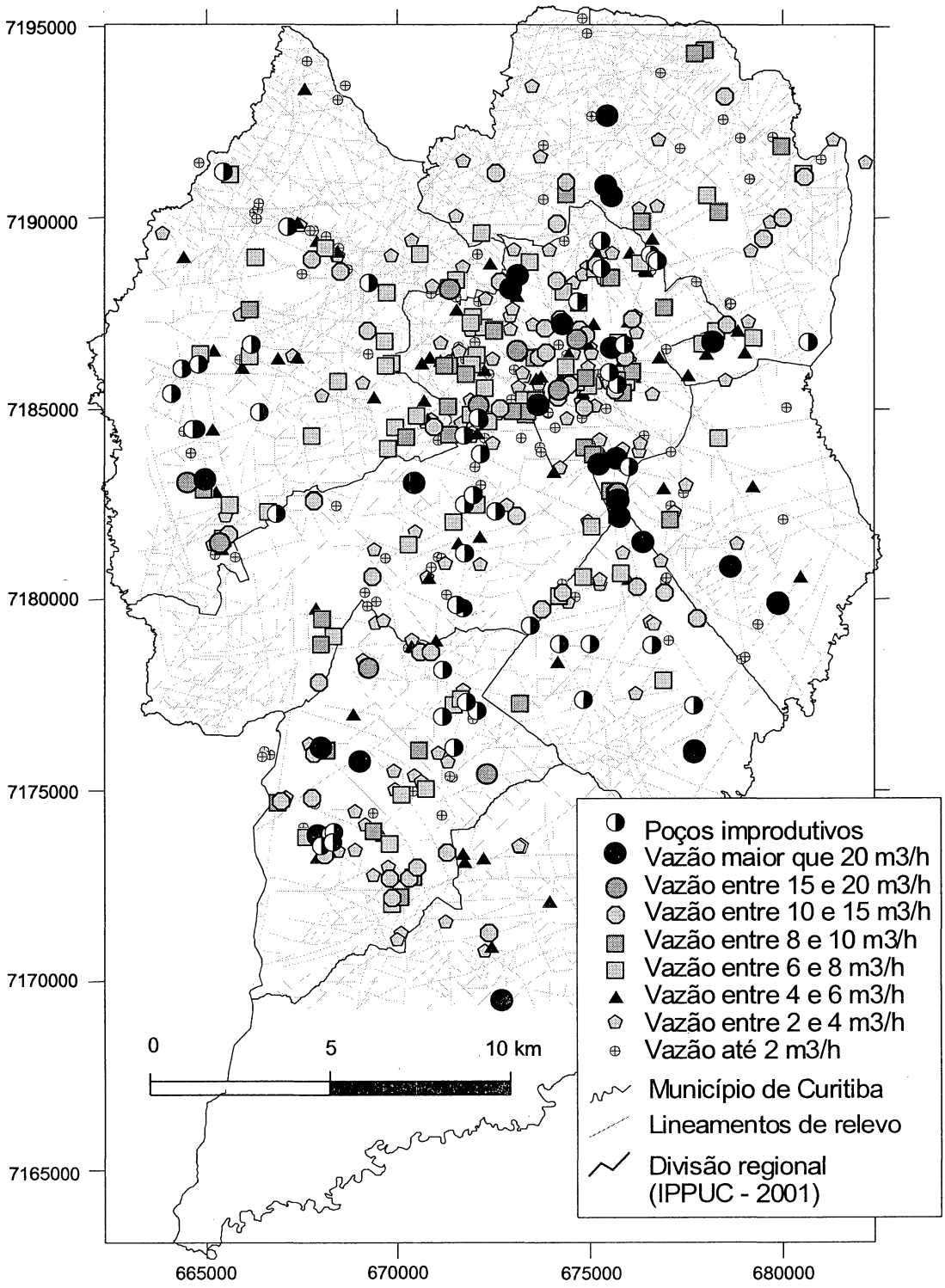


Figura 10.8: Cruzamento de pelo menos 700 poços tubulares profundos de Curitiba com o mapa de lineamentos de relevo da área.

10.3.3 Variável Profundidade (m)

A profundidade é uma variável quantitativa contínua que mede qual a metragem máxima até quantos metros foi a sondagem a partir da superfície. Para este estudo foram analisados 800 casos válidos. Com o teste em caixa (*boxplot*), ilustrado na figura 10.9, observa-se que a profundidade média dos poços está em torno de 112 m sendo que 50% dos casos estão compreendidos entre 88 a 150 m.

Dois casos extremos são apresentados por sondagens que chegaram aos 390 m, no centro e no CIC.

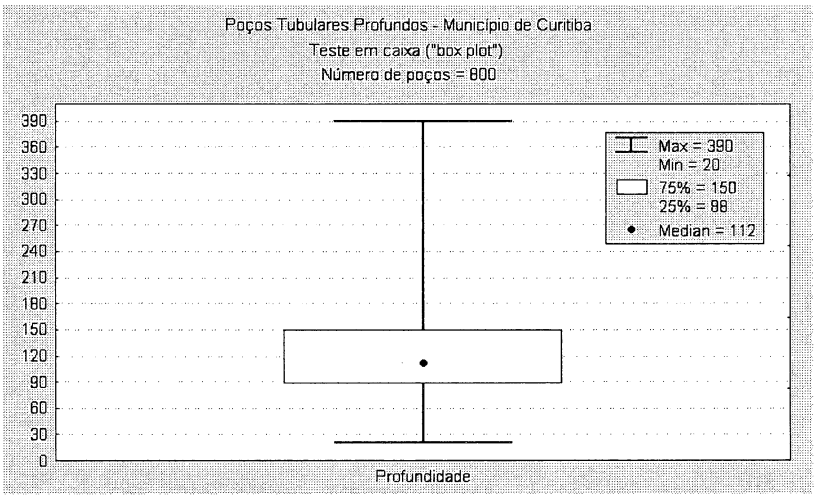


Figura 10.9: Teste em caixa (*boxplot*) ilustrando a profundidade média dos poços perfurados no município de Curitiba.

No segundo teste executado, o histograma em barras dá uma idéia geral do número de poços versus suas respectivas profundidades (figura 10.10).

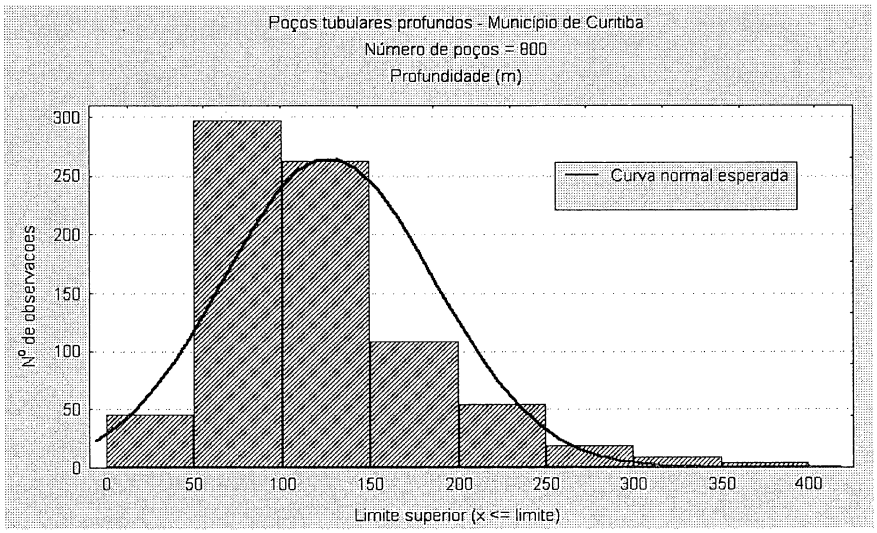


Figura 10.10: Histograma bidimensional ilustrando a distribuição dos poços tubulares de acordo com suas respectivas profundidades.

10.3.4 Variável data (ano)

No histograma bidimensional da figura 10.11 utilizando a variável data é possível visualizar a curva de crescimento de freqüência acumulada dos poços tubulares.

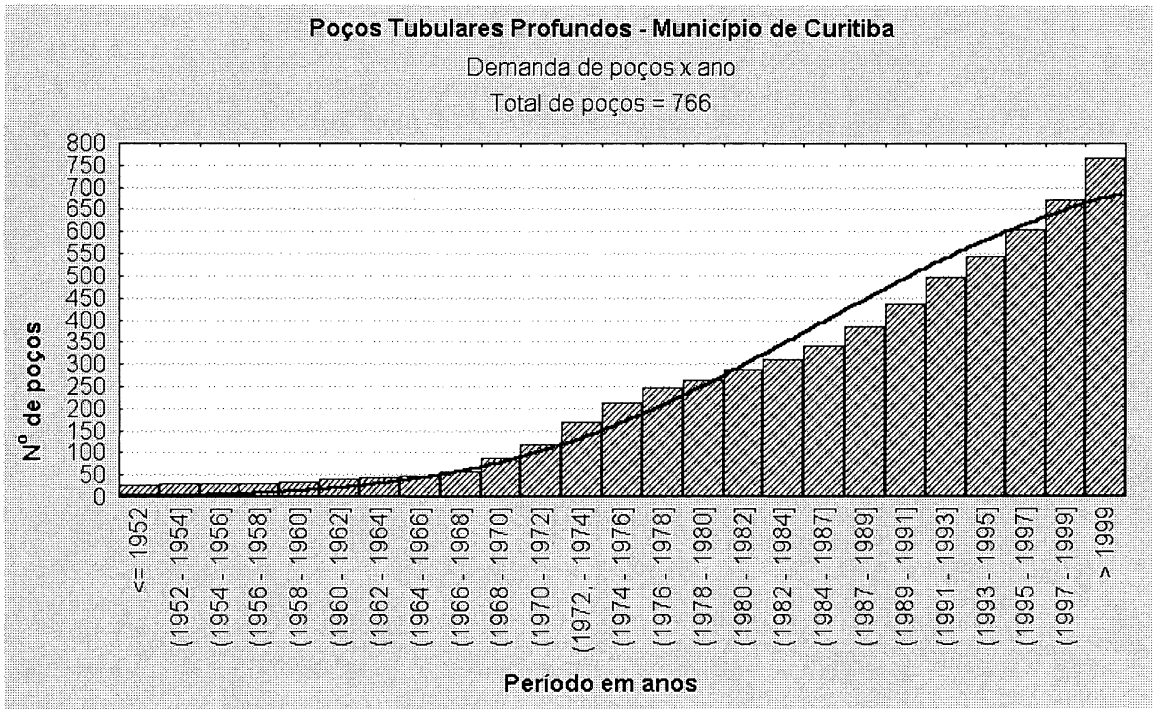


Figura 10.11: Histograma bidimensional mostrando a curva de crescimento de freqüência acumulada dos poços tubulares profundos perfurados na cidade de Curitiba entre os anos de 1950 até 2001.

Cada intervalo de classe em abcissa (horizontal) corresponde em ordenada à soma das freqüências dos intervalos de classe até o intervalo considerado. Foram analisados 776 casos válidos. Observa-se que de 1950 até 1968 (em um período de 18 anos), o crescimento foi bastante lento sendo verificados neste cadastro apenas 52 casos registrados. De 1970 até 1978 houve um nítido aumento na demanda para novos poços surgindo em um período de 8 anos mais de cento e cinquenta casos. Entre 1978 até 1987, houve um crescimento mais lento com registrado de apenas cinquenta novos casos. Porém de 1987 até 2001, ocorreu um aumento surpreendente no número de poços, chegando a 400 novos casos registrados nos últimos 14 anos.

A utilização de classes pode ser uma outra forma de observar o crescimento anual do número de poços como o apresentado no histograma da figura 10.12.

Através deste gráfico fica claro o aumento crescente ocorrido nos últimos anos. A demanda nas grandes cidades se dá devido ao crescimento acelerado das áreas urbanas, decréscimo de fontes de suprimentos e qualidade cada vez inferior das águas superficiais.

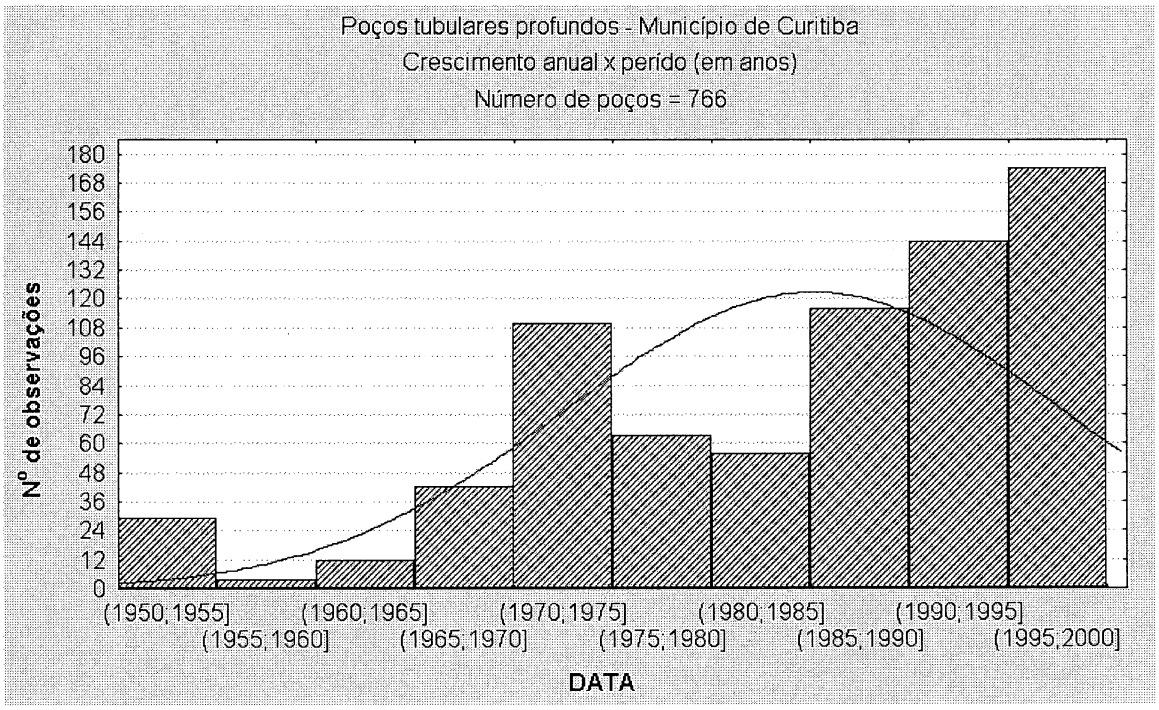


Figura 10.12: Histograma ilustrando a distribuição dos poços versus período (em anos).

10.3.5 Variáveis nível dinâmico (ND) e nível estático (NE)

O nível dinâmico é uma variável quantitativa contínua que mede a profundidade do nível da água em relação à superfície do terreno, após ocorrer o início da extração de água por bombeamento sistemático. Foram analisados 607 casos válidos.

No teste de caixa (*boxplot*) ilustrado na figura 10.13 verifica-se que a média do nível dinâmico se encontra em 58 m e 50% dos valores estão entre 38 e 78 m de profundidade.

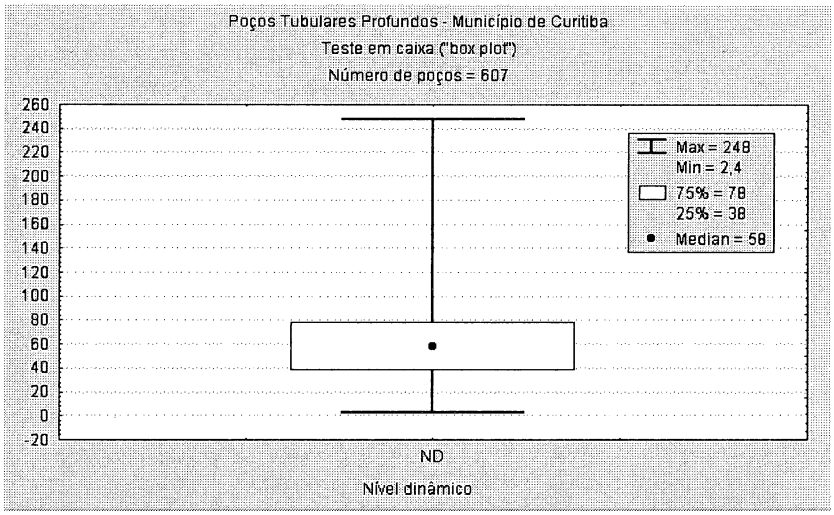


Figura 10.13: Teste em caixa ilustrando a profundidade média do nível dinâmico após ocorrer bombeamento sistemático do poço.

A variável nível estático (NE) é uma variável quantitativa contínua, que representa a profundidade original do nível da água a partir da superfície do terreno, no momento anterior ao bombeamento para extração de água, durante no mínimo 24 horas.

No teste em caixa (*boxplot*) mostrado ao lado (Figura 10.14), verifica-se que 50 % dos casos estão entre o intervalo de 5 e 24 m, com uma média em torno de 11 m de profundidade.

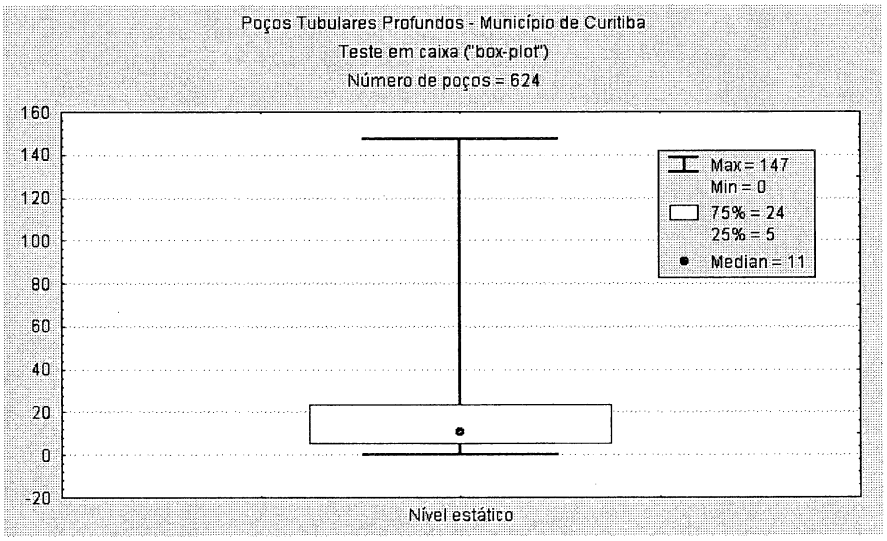


Figura 10.14: Teste em caixa (*boxplot*) ilustrando a profundidade média do nível estático. Para esta análise foram considerados 624 casos válidos.

A média do nível estático também pode ser visualizada através de histogramas em barras como o da figura 10.15.

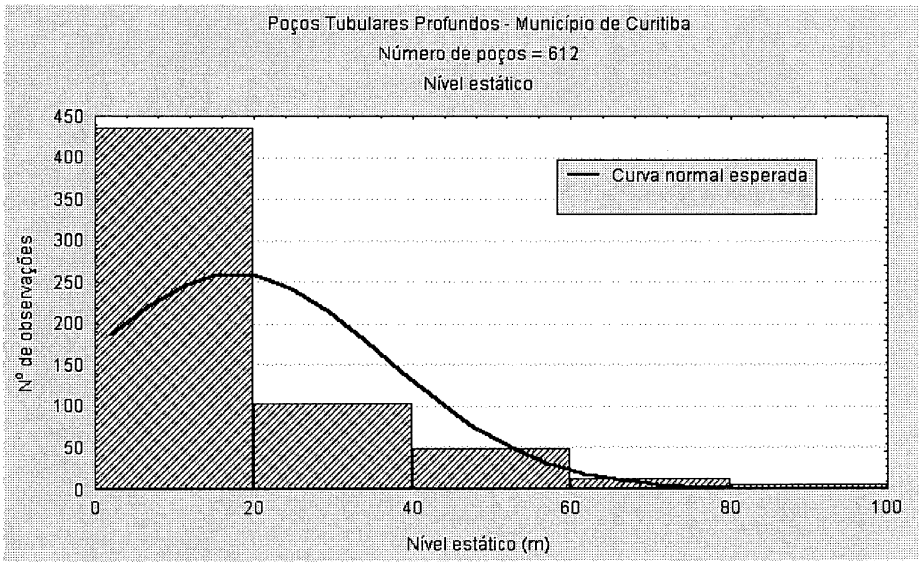


Figura 10.15: Histograma ilustrando a média do nível estático dos poços tubulares pré-bombeamento.

10.3.6 Variável entrada d'água (EA)

O teste em caixa (*boxplot*) da figura 10.16, ilustra a média geral de ocorrência da variável entrada d'água, em torno da profundidade de 84 m, onde 50% dos casos estão entre 60 e 115 m.

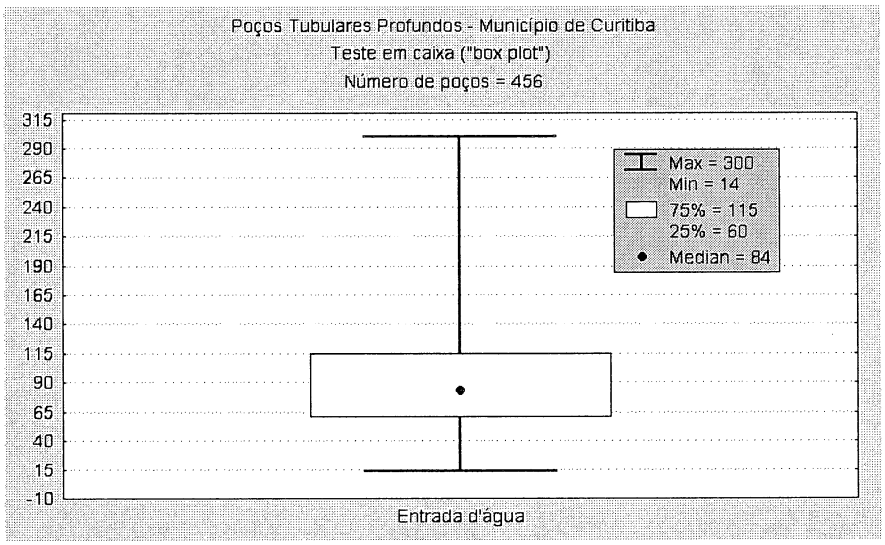


Figura 10.16: Teste em caixa ilustrando a média geral dos valores das entradas d'água (EA).

O histograma da figura 10.17 mostra que as entradas d'água apresentam distribuição do tipo lognormal, assim como o gráfico de probabilidade (Figura 10.18) onde a grande maioria dos pontos se ajusta sobre a curva usando este tipo de coeficiente.

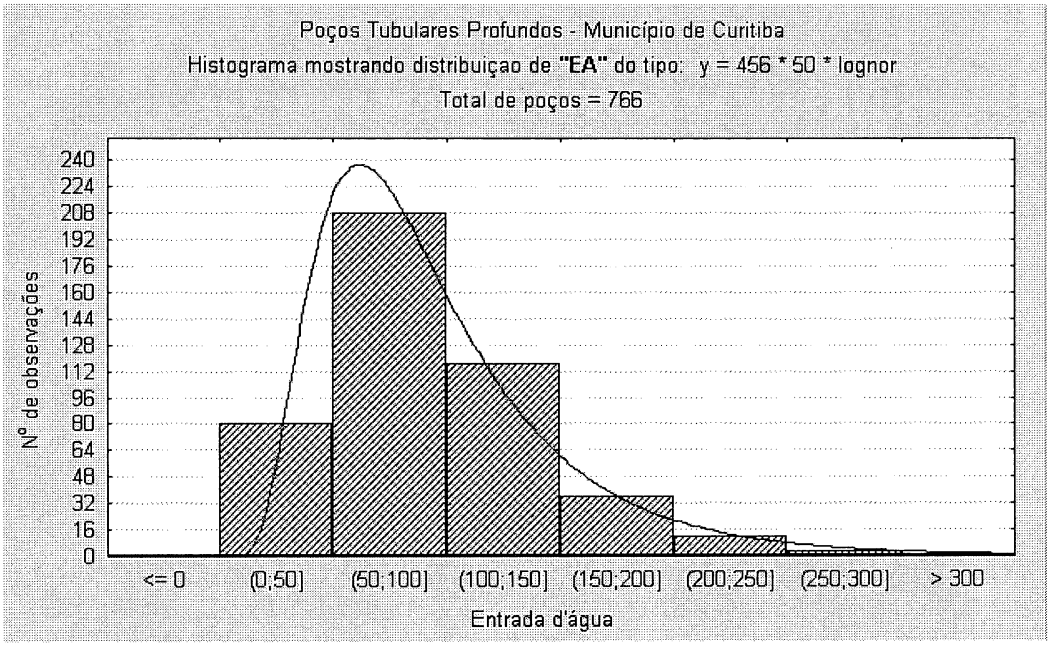


Figura 10.17: Histograma mostrando distribuição da variável entrada d'água do tipo lognormal.

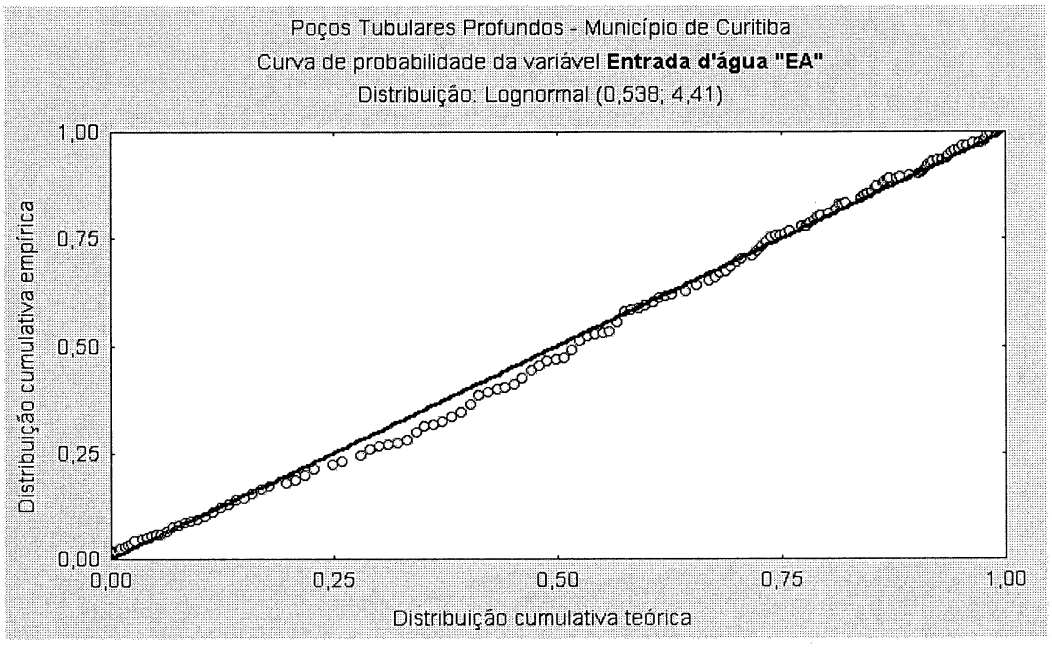


Figura 10.18: Gráfico de distribuição de probabilidade usando coeficiente do tipo lognormal para a variável "EA".

No gráfico do tipo *scatterplot* da figura 10.19 foram cruzadas as variáveis entrada d'água e profundidade com o objetivo de mostrar uma correlação positiva

evidenciada pela tendência crescente na maioria dos casos entre ambas. Em meio a essa nuvem, ocorrem alguns pontos (*outliers)* que fogem da tendência central, principalmente a partir de profundidades superiores a 225 m causando ruído nos dados.

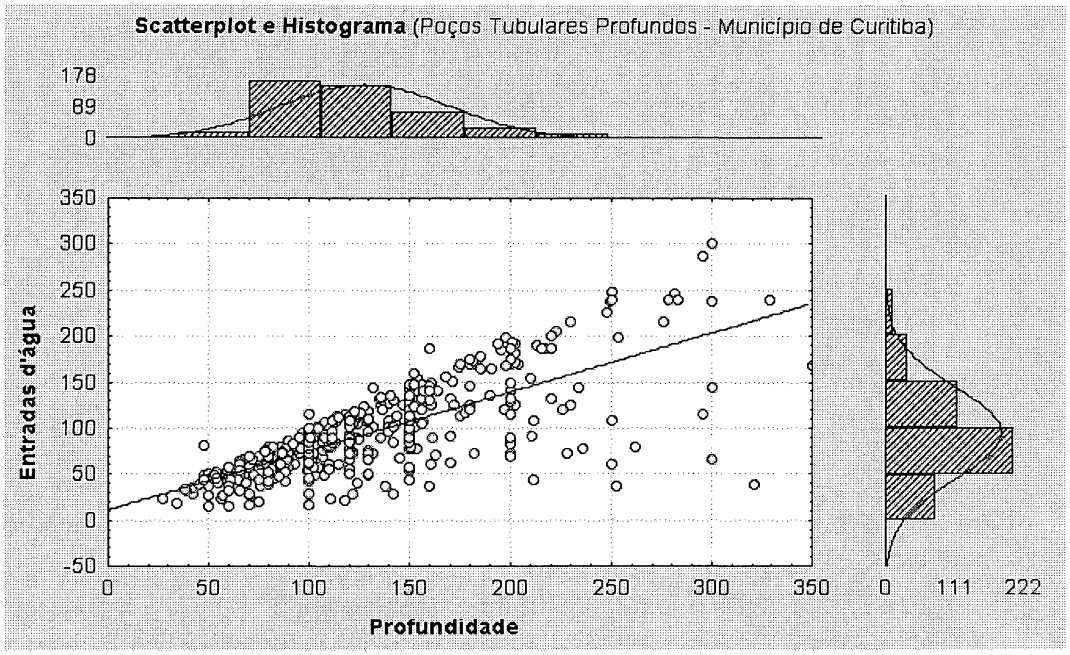


Figura 10.19: Gráfico do tipo *scatterplot* junto com histograma mostrando uma correlação positiva entre as variáveis entrada d'água e profundidade

Essa correlação positiva também pode ser verificada no gráfico do tipo *boxplot* (Figura 10.20) cruzando as duas variáveis. Nesta figura verifica-se que as médias nos valores das entradas d'água versus as profundidades não são estacionárias, mas sim, tendem a aumentar gradualmente até a profundidade em torno de 240 m. A partir deste valor não é possível diferenciar um padrão distinto.

A existência de correlação entre as variáveis entrada d'água e profundidade tem importância no fato de demonstrar que a contribuição de água subterrânea neste aqüífero fraturado não está limitada a um único horizonte em profundidade.

Cerca de 50% dos casos ocorrem até 84 m de profundidade, no entanto, de acordo com os resultados estatíticos, o comportamento da variável entrada d'água sugere que a água subterrânea neste aqüífero fissural, também está armazenada pelo menos até 220 m de profundidade. É necessário lembrar que a maior parte dos casos estudados (93%) correspondem até a profundidade de 220 m, portanto, a

ausência de informações não permite que sejam feitas maiores inferências abaixo deste horizonte.

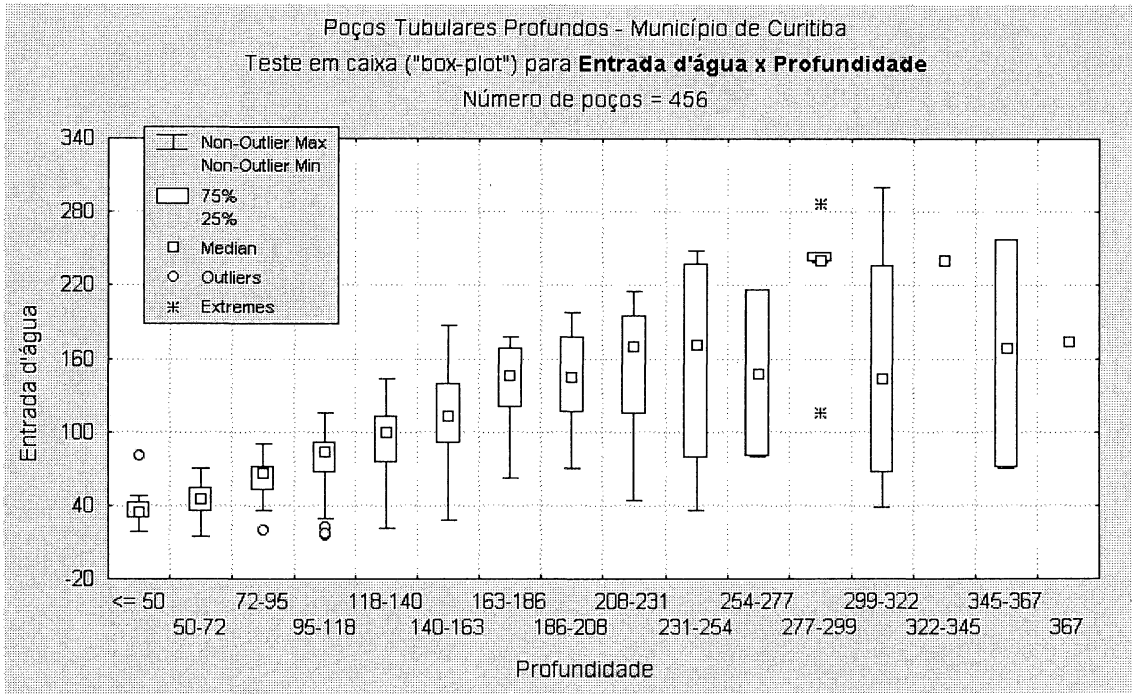


Figura 10.20: Médias dos valores das entradas d'água versus profundidades mostrando uma correlação positiva entre ambas as variáveis.

10.3.7 Variável divisão regional de Curitiba

Esta variável refere-se a divisão regional criada pelo IPPUC (2001) que delimita o município de Curitiba em oito setores administrativos.

É importante deixar claro que esta divisão é apenas política e administrativa e não tem relação com os limites físicos do aqüífero. Esta setorização foi utilizada arbitrariamente como referencial na análise estatística exploratória, principalmente nos testes *boxplot*, buscando visualizar as características e distribuição das variáveis hidrogeológicas, no sentido de auxiliar no planejamento e tomada de decisões quanto ao uso dos poços tubulares dentro de cada setor na cidade, segundo o quadro atual das informações. Já o quadro real das informações, que relaciona-se ao fenômeno em si que acontece no aqüífero fraturado, não é tratado aqui estatisticamente, mas sim, nas análises geoestatísticas do capítulo seguinte.

Na seqüência são apresentados separadamente os testes *boxplot* com as variáveis hidrogeológicas da área versus a divisão regional do município e posteriormente, em item a parte, é feita a discussão em conjunto dos dados.

No teste em caixa (*boxplot*) da figura 10.21, são mostradas as médias das vazões de acordo com a região em que os poços tubulares profundos foram perfurados. De uma forma geral, o valor médio verificado em todas as regiões é em torno de 4 m^3/h. Já o valor extremo é encontrado na subdivisão Matriz.

O símbolo em asterisco mostra os valores extremos, estes casos podem representar duas situações: (a) poços bastante favoráveis para exploração de água subterrânea em uma situação onde foi encontrado algum alinhamento estrutural ou cruzamento de planos estruturais abertos; (b) medidas falsas devido a erros durante a coleta da informação.

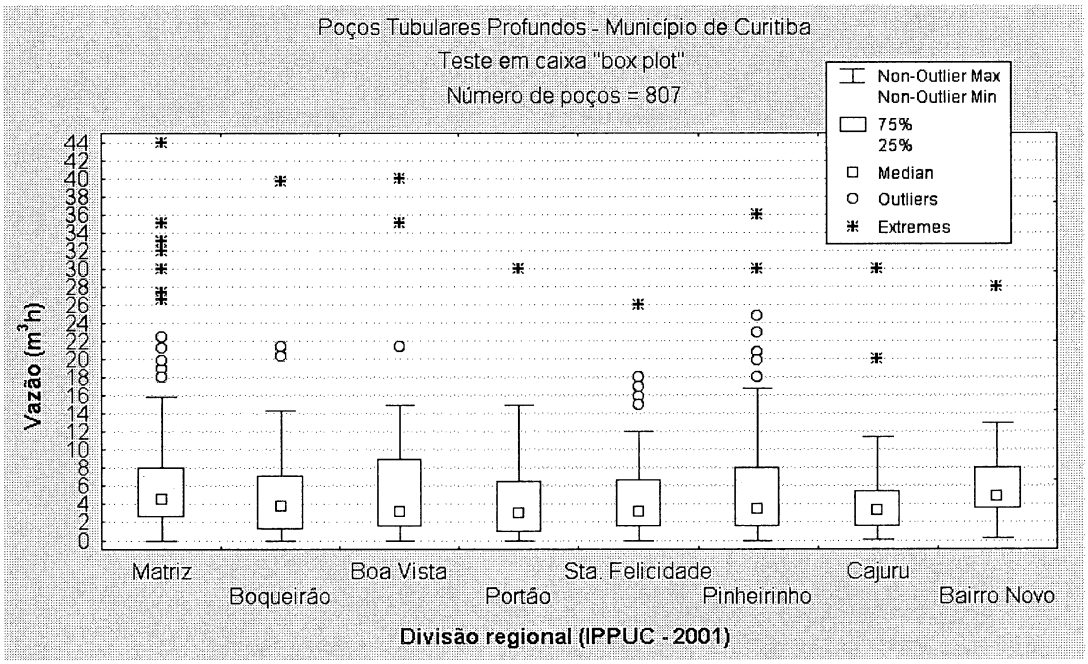


Figura 10.21: Teste em caixa (*boxplot*) mostrando as médias das vazões de acordo com as regiões em que os poços tubulares profundos foram perfurados na cidade.

No teste *boxplot* da figura 10.22 são mostradas as profundidades médias versus a divisão regional do município de Curitiba.

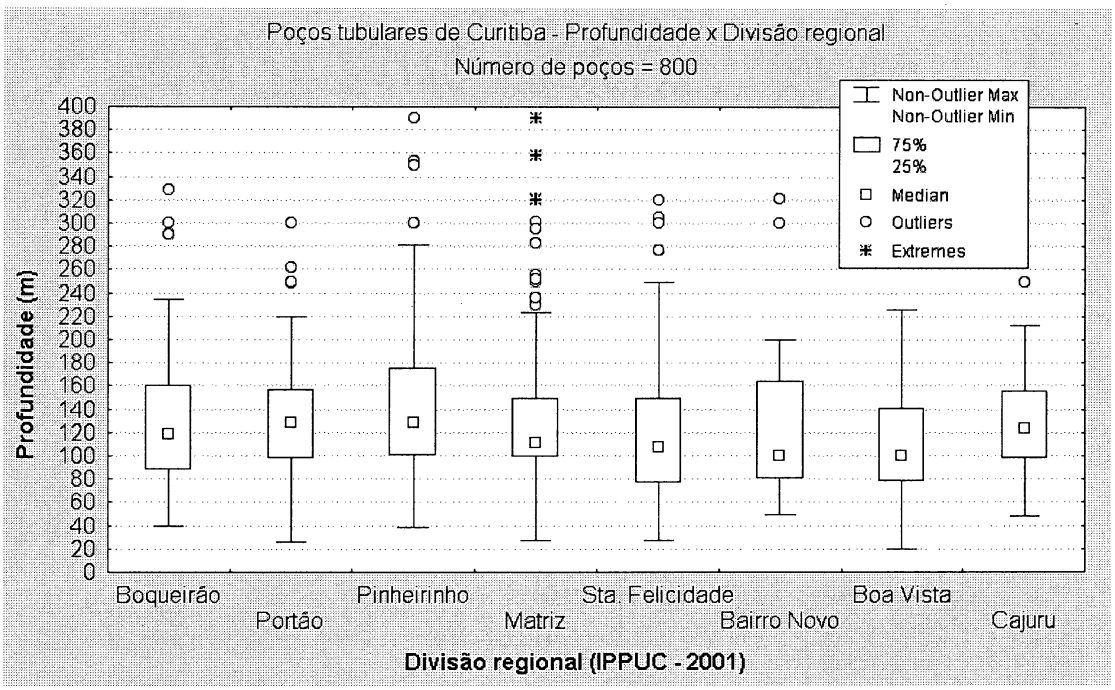


Figura 10.22: Teste para variável profundidade versus as divisões administrativas do município.

Nos histogramas *boxplot* das figuras 10.23 e 10.24 foi feito, respectivamente, o cruzamento das variáveis nível dinâmico e nível estático versus a divisão regional de Curitiba ilustrando como as variáveis analisadas se comportam em cada setor da cidade.

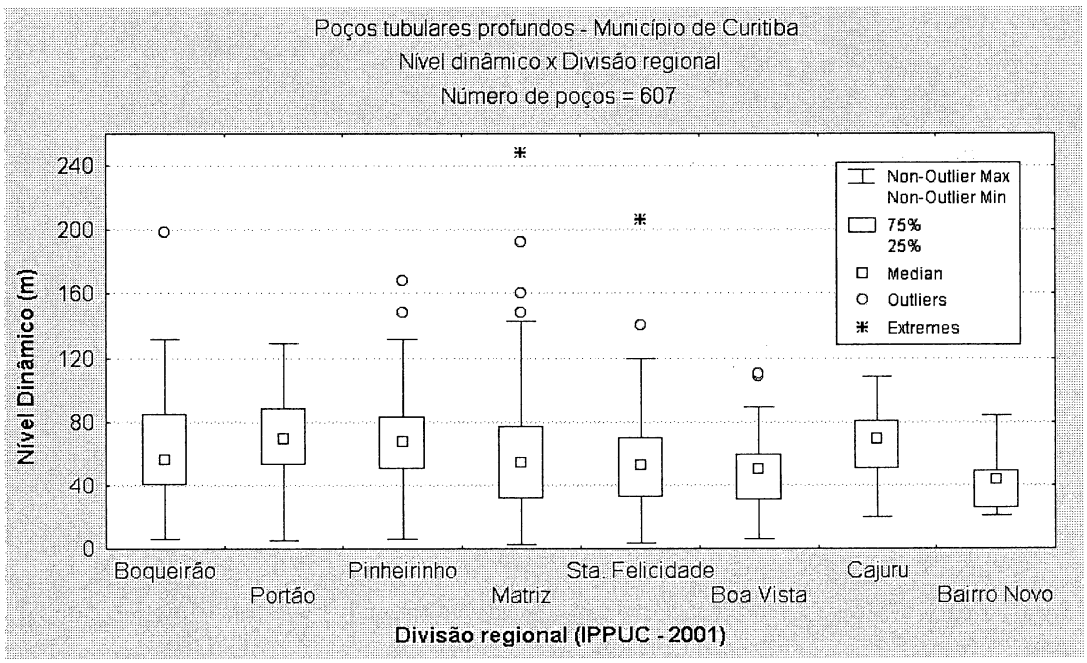


Figura 10.23: Teste boxplot para a variável hidrogeológica nível dinâmico versus a divisão regional do município.

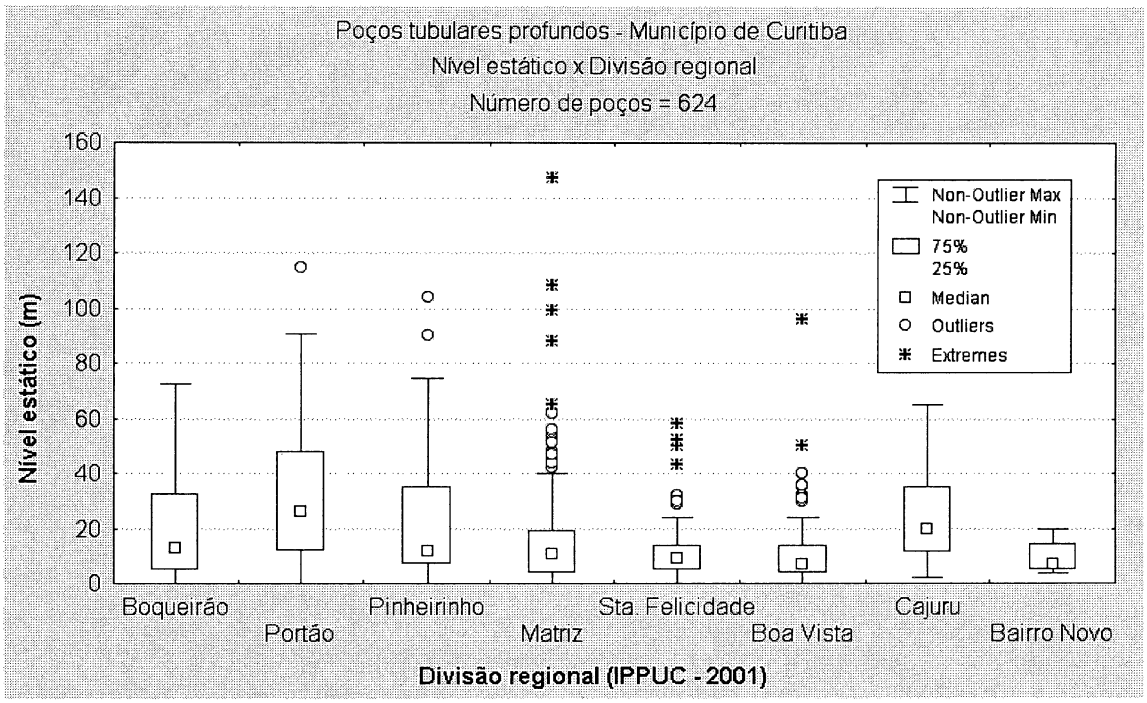


Figura 10.24: Teste boxplot para a variável hidrogeológica nível estático versus a divisão regional do município.

Os casos mais extremos, com profundidades atingindo em torno de 400 metros, ocorrem na região da Matriz e no Pinheirinho, enquanto que a média parece ficar em torno de 100 e 135 m.

Com relação ao nível dinâmico e estático, verifica-se que em ambos os casos ocorrem casos extremos, principalmente, na Matriz e em Santa Felicidade.

No gráfico *boxplot* da figura 10.25 é dada uma visão geral das entradas d'água nos diferentes setores da cidade de Curitiba. Assim, como na variável profundidade, os casos *outliers* e valores extremos das entradas d'água ocorrem na região do Pinheirinho e Matriz.

O intervalo de 50 a 110 m de profundidade limita as médias da variável entrada d'água dentro de todos os setores da cidade. A diferença entre as médias regionais é bastante expressiva o que denota a alta variabilidade do fenômeno devido, provavelmente, a estruturação tectônica do aqüífero fissural que configura o comportamento das variáveis analisadas.

Não deve ser esquecido que a divisão em setores do município é apenas administrativa, já que os limites destes setores não coincidem com os limites do aqüífero em si. No entanto os testes realizados anteriormente são de grande

importância no sentido de avaliar o quadro geral atual do comportamento das variáveis nas diferentes regiões da cidade.

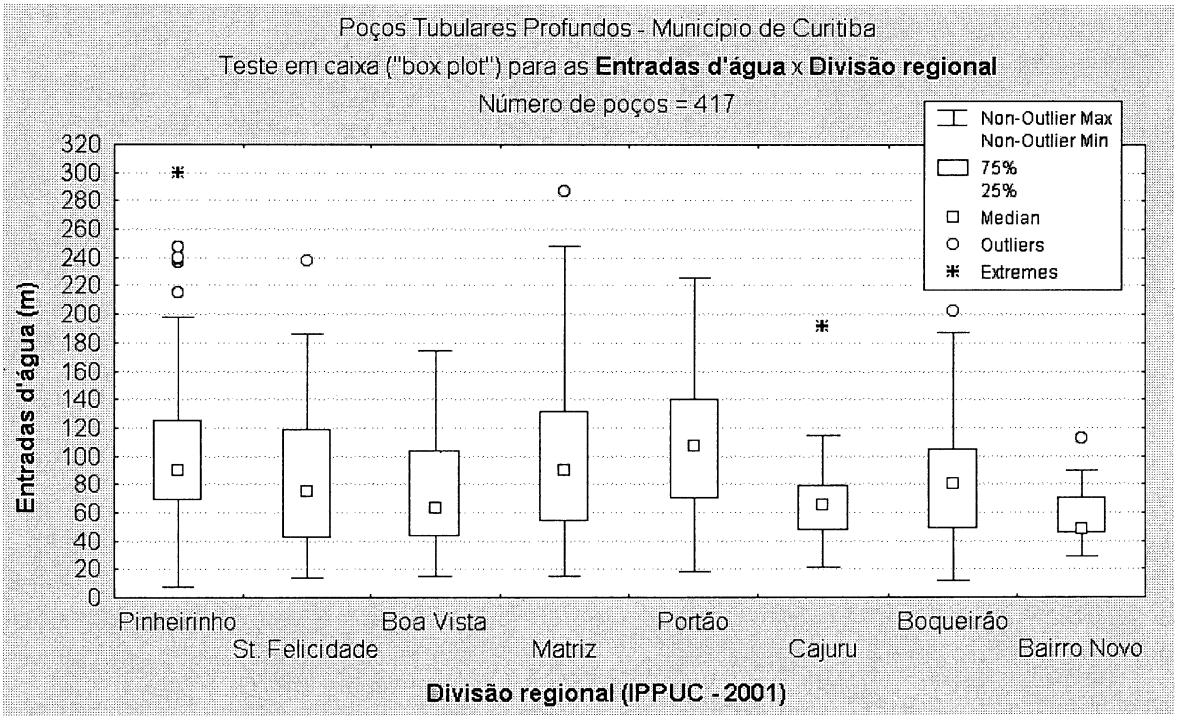


Figura 10.25: Gráfico do tipo *boxplot* cruzando a variável entrada d'água com as divisões regionais de Curitiba (IPPUC, *op.cit.*).

10.4 Discussão dos resultados

A análise estatística ajudou na familiarização dos dados hidrogeológicos e no reconhecimento dos padrões de irregularidades. Foi constatado grande variabilidade nos dados da variável vazão dos poços tubulares profundos que apresenta distribuição diferente da normal e presença de agrupamentos.

Embora a média potencial das vazões no município de Curitiba seja de 4 m^3/h, ocorrem diversas exceções. Dos 798 casos analisados o intervalo de 32,7% é o mais representativo correspondendo a vazões variando entre 2 a 5 m^3/h, o intervalo de 5 até 10 m^3/h equivale a 21,9 %, o intervalo de 10 até 15% corresponde a 10,7% enquanto que vazões com valores superiores a 20 m^3/h representam 3,4% da média geral.

A distribuição dos poços tubulares na cidade de Curitiba é bastante irregular, havendo as maiores concentrações de casos junto aos condomínios no centro da

cidade e bairros mais próximos, também em terrenos de restaurantes a exemplo dos que se situam ao longo da Av. Manoel Ribas e em áreas industriais como no bairro CIC.

Os dados referentes a variável período (em anos) indicaram um crescimento acentuado na demanda de novas sondagens a partir dos anos 80 e, principalmente, nos últimos 10 anos. Com a evolução na tecnologia que envolve as sondagens de poços tubulares profundos, são atingidas profundidades maiores em tempo mais curto.

A partir de 1985 o crescimento no número de novas sondagens de poços tem aumentado de forma vertiginosa. O intervalo entre o ano de 1995 até 2001 corresponde a 25% do total de poços existentes, o que demonstra uma demanda crescente no abastecimento através de água subterrânea na cidade.

A curva de crescimento de freqüência acumulada dos poços tubulares que representa o crescimento da demanda pelo uso dos poços tubulares a cada ano, está certamente influenciada pelo crescimento populacional da cidade e pelas dificuldades com o tratamento convencional das águas de superfície servidas na cidade.

Ao serem observados os padrões de irregularidades, principalmente dos dados relacionados à variável vazão e profundidade, os dados que se mostraram muito discrepantes em relação aos demais foram analisados caso a caso e quando necessário foram eliminados.

Com a análise exploratória estatística, não foram observadas tendências claras entre as variáveis analisadas. No entanto uma das observações de maior interesse é que o horizonte onde a água subterrânea circula no aqüífero fraturado, não se limita apenas a profundidades específicas, sugerindo que a variabilidade do fenômeno na área é bastante grande tanto lateral quanto verticalmente. De forma geral a média da profundidade dos poços está em torno de 112 m havendo. A profundidade de 220 m abrange 93% dos casos estudados, portanto, a falta de maiores informações abaixo deste horizonte impede que sejam feitas inferências e correlações mais profundas que este nível. Abaixo de 220 m são anotadas no banco de dados, o número de 61 casos chegando até o caso extremo de 390 m de profundidade, dos quais 23 % apresentam vazões entre 3 e 9 m^3/h e 11,5% entre 9 e 16 m^3/h, existindo

um caso excepcional de um poço com vazão atingindo 36 m^3/h a 300 m de profundidade.

Pode-se dizer que até o horizonte de 220 m de profundidade, limite até onde as informações são melhor conhecidas, os dados das variáveris hidrogeológicas refletem a realidade atual do aqüífero fissural.

Setorialmente existem diferenças claras, a exemplo da Matriz, onde a quantidade de de casos (poços tubulares) permite que as informações das variáveis hidrogeológicas neste local sejam muito mais representativas do que em áreas mais fastadas e menos industrializadas a exemplo do Bairro Novo. Isso não impede que esta situação se altere na medida que, futuramente, uma área passe a ser objeto alvo para novas sondagens, no entanto, o quadro atual das informações é o que está apresentado neste trabalho. Estas informações são históricas e servem para auxiliar no planejamento e manejo de utilização dos poços tubulares na cidade de Curitiba.

Situações onde ocorrem casos extremos nos valores de vazão no mesmo setor em contrapartida com valores baixos desta variável, refletem a heteregeneidade do aqüífero que está condicionado estruturalmente por uma tectônica rúptil. Valores extremos de vazão com máximos de 26 e 36 m^3/h e ainda casos excepcionais como de 44 m^3/h no centro da cidade chamaram bastante a atenção nos testes *boxplot*. Olhando estes valores pode-se concluir que os locais onde foram feitas as sondagens para estes poços tubulares, atingiram alinhamentos estruturais ou cruzamento de estruturas favoráveis à circulação de água subterrânea. O reconhecimento deste padrão espacial heterogêneo comprova que a homogeneização dos dados, necessariamente, tem que passar pela análise estrutural e geostatística das variáveis do aqüífero fissural.

Uma outra questão observada foi quanto ao rebaixamento do nível dinâmico, assim como a diminuição na produtividade de alguns poços tubulares, principalmente nos bairros do Alto Bigorrilho e Juvevê, que podem ser reflexo de um impacto ambiental maior. Neste caso sugere-se que sejam feitas novas investigações para acompanhar a diminuição e recuperação do nível dinâmico nos locais onde estão havendo estes problemas, comparando os resultados obtidos com dados históricos como os apresentados neste trabalho.

Depois de realizada a análise espacial exploratória dos dados hidrogeológicos é necessário o emprego da geoestatística, onde então são utilizadas técnicas que possibilitam compreender e mapear com melhor precisão as propriedades referentes aos fenômenos naturais.

11 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

11.1 Introdução

Tendo como base à sistematização das informações dos dados hidrogeológicos para a análise exploratória através da Estatística Clássica foram selecionadas as variáveis de interesse para se proceder o tratamento geoestatístico dos dados relativos aos poços tubulares profundos no município de Curitiba.

Esta pesquisa visa contribuir com o conhecimento de questões inerentes ao funcionamento do aqüífero fraturado aplicando a "modelagem geoestatística" através do *software* geoR (código aberto) para o tratamento dos dados da variável vazão no município de Curitiba. Com a modelagem geoestatística buscou-se compreender e mapear com melhor precisão as propriedades referentes à influência que o grau fraturamento e sua direção exercem como controladores da circulação da água subterrânea.

Neste capítulo foi feita uma detalhada discussão mostrando através de diferentes testes, os resultados obtidos com a modelagem da variável vazão, visando o reconhecimento dos padrões de interdependência e regionalização espacial do dado hidrogeológico analisado, dada a grande variabilidade no fenômeno que ocorre no aqüífero fraturado em questão.

11.1.1 Passos para a modelagem geoestatística

De forma resumida são apresentadas as principais etapas de uma modelagem geoestatística (PAULO JUSTINIANO, comunicação pessoal):

1) **DADOS** ⇒ Bom conjunto de dados;
2) **ANÁLISE EXPLORATÓRIA** ⇒ Verificar se o conjunto apresenta média ou tendência, reconhecendo os padrões espaciais das variáveis e eliminando os valores muito discrepantes;

3) **CANDIDATOS A MODELOS** ⇒ Decisão do modelo (Matern, Exponencial, Esférico, Gaussiano, *Wave*...);

4) **ESTIMATIVAS DOS PARÂMETROS** ⇒ Estimar os parâmetros principais do modelo;

5) **PREDIÇÃO** ⇒ Krigagem, o que acha da quantidade que quer predizer dado os parâmetros observados utilizando o princípio da "Máxima Verossimilhança";

A krigagem só deve ser realizada quando os quatro primeiros passos são satisfeitos. Para gerar a krigagem é necessário saber quais são os dados, quais são os pontos onde quer predizer, qual o modelo a ser ajustado e quais os parâmetros do mesmo. A estimativa dos parâmetros iniciais a serem utilizados no variograma não é uma tarefa direta, porém no *software* geoR utilizado existe a possibilidade de usar funções que verificam a plausibilidade dos parâmetros do modelo.

A questão é, como saber se o modelo gerado é bom para então aplicar a krigagem. Uma forma de verificar a veracidade do modelo é aplicando o processo da validação cruzada (*Cross Validation*). Nesta validação é feita uma comparação entre os modelos através de ajustes e verificações. As informações são então plotadas em gráficos cruzando os valores observados com os valores preditos, dessa forma é verificado se o modelo utilizado superestima ou subestima a predição. Essa validação serve como suporte na tomada da decisão sobre a seleção ou rejeição dos dados para gerar a krigagem.

11.1.2 Parâmetros de um semivariograma próximo do ideal

Não é intenção nesta pesquisa explicar passo a passo os fundamentos da geoestatística já que para isso existe bibliografia específica, a exemplo de ISAAKS e SRIVASTAVA (1989) e DEUTSCH e JOURNEL (1992). No entanto como está sendo aplicada a modelagem geoestatística é importante a familiarização com os parâmetros principais encontrados em um variograma. Neste item é mostrado um exemplo teórico e feita uma rápida recapitulação sobre os principais parâmetros de um variograma empírico que apresenta características próximas do ideal (Figura 11.1).

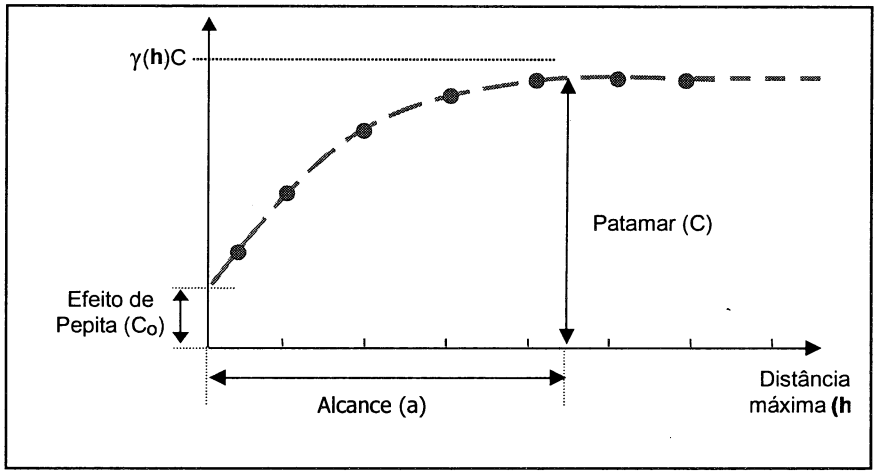


Figura 11.1: Variograma empírico com características próximas do ideal.

Observando a figura 11.1, conclui-se que:

1. É esperado que as diferenças entre os pontos descresça à medida que a distância h, que os separa, também descresça.
2. Medidas localizadas próximas entre si deverão ser mais parecidas que aquelas separadas por grandes distâncias.
3. O valor de γ(h) aumenta com a distância h, tendo valor igual a zero quando a distância máxima (h) é zero. Entretanto, na prática existe o chamado efeito de pepita (*nugget effect*) onde a medida que (h) tende para zero, γ(h) adquire um valor positivo denominado de Co. O efeito de pepita é uma descontinuidade do variograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. O valor de Co pode ser originado em parte por erros de medição ou devido a grande variabilidade em um escala menor do que aquela amostrada onde os dados não foram coletados a intervalos suficientemente pequenos para mostrar o comportamento espacial subjacente do fenômeno em estudo (LANDIM, 1998). Segundo DELHOMME (1976 e 1989) é impossível quantificar qual caso contribui mais para este efeito.
4. A medida que (h) aumenta, também aumenta γ(h) até atingir um valor máximo no qual ele se estabiliza. Esse valor máximo define o chamado patamar (*Sill*) e a partir deste valor os dados não apresentam mais correlação sendo independentes entre si.

5. A distância limite de dependência espacial na qual γ(h) atinge o patamar é denominado de alcance (*Range*) e recebe na literatura o símbolo de "a". Os pontos localizados a distâncias maiores que o alcance apresentam uma distribuição aleatória, e os pontos separados por distâncias menores que o alcance são correlacionadas entre si, podendo serem interpoladas para espaçamentos menores do que os amostrados.

Caso o variograma seja constante com o incremento de h, com valores sempre iguais ao patamar, então ocorre o chamado efeito de pepita puro, devido a ausência total de dependência espacial. Os dados adquirem distribuição aleatória devido ao alcance (a) ser menor do que o menor espaçamento entre estas amostras.

11.2 Leitura dos dados no formato "geodata" e verificação de tendências no aqüífero fraturado da bacia

Para efetuar os testes geoestatísticos na área de estudo, foram utilizados somente os poços referentes ao aqüífero fraturado do embasamento da Bacia de Curitiba, excluindo-se os dados relacionados a Fm. Guabirotuba, já que o contexto hidrogeológico das rochas do embasamento e dos sedimentos da Bacia, é diferente entre si. O objeto alvo nesta pesquisa é somente o aqüífero fraturado, mesmo porque à Fm Guabirotuba não é considerada como aqüífero (EDUARDO SALAMUNI, comunicação pessoal).

Também as fichas muito incompletas, ou com grande margem de dúvidas, foram deixadas de lado. As interpolações foram efetuadas com a variável vazão e os dados (em m^3/h), contidos em uma tabela em formato ".dbf", oram primeiramente convertidos para o formato ".dat" através do *software* SURFER v.8® e então interpolados com o *software* geoestatístico GeoR.

O primeiro passo foi realizar a análise exploratória da variável vazão dos poços tubulares perfurados na área de pesquisa. Esta verificação foi feita com os valores normais e com os valores transformados em logaritmo (Figura 11.2) já que a variável não apresenta distribuição do tipo normal (fato já constatado nos testes de

estatística clássica). A figura 11.2 mostra na sequência das letras "A, B, C e D" os passos iniciais efetuados, onde:

(A) representação da distribuição das ocorrências, ou seja, da variável vazão dentro da cidade de Curitiba (contorno em preto);
(B) e **(C)** dados originais e/ou transformados da variável versus as coordenadas Y e X, respectivamente;
(D) gráfico tridimensional do tipo *scatterplot3D* cruzando a vazões versus os eixos cartesianos X e Y;

Note que em (B) e (C) a verificação tem a função de detectar a presença de alguma tendência da variável vazão segundo as direções dos eixos X e Y. Da mesma forma, a função do gráfico *scatterplot3D* (D) é de mostrar o comportamento desta variável nos sistemas cartesianos, e a presença ou não de valores *outliers.*

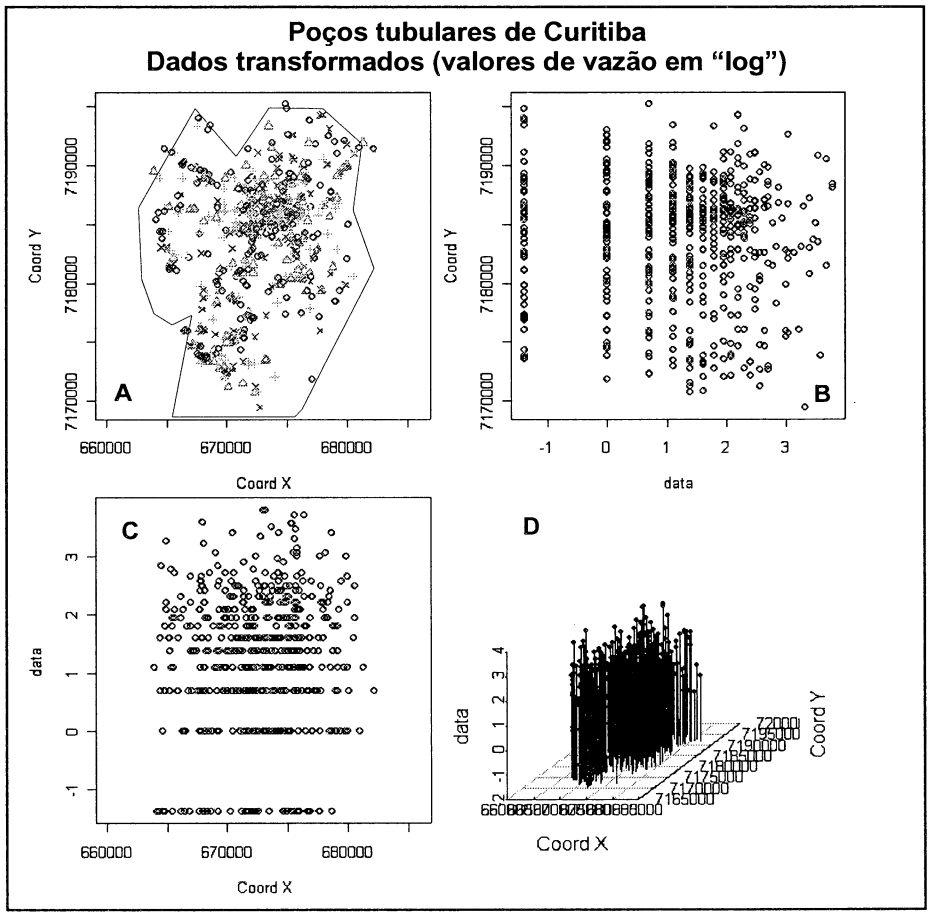


Figura 11.2 : (A) distribuição da variável vazão na cidade Curitiba; (B) e (C) comportamento da variável segundo as coordenadas X e Y; (D) gráfico do tipo *scatterplot3D.*

A variável foi analisada como os valores normais e com os dados transformados em seu logaritmo natural (Figura 11.2) não sendo, no entanto, encontradas evidências de tendência nos dados. Os pontos na nuvem de dispersão não descrevem um alinhamento ou padrão definido segundo X ou Y.

Ainda nesta análise inicial o geoR oferece a possibilidade de visualizar rapidamente, através de um sumário, as informações estatísticas básicas tais como média, mediana, coordenadas mínima e máxima das variáveis referentes aos dados de vazão e profundidade na cidade de Curitiba (Figura 11.3).

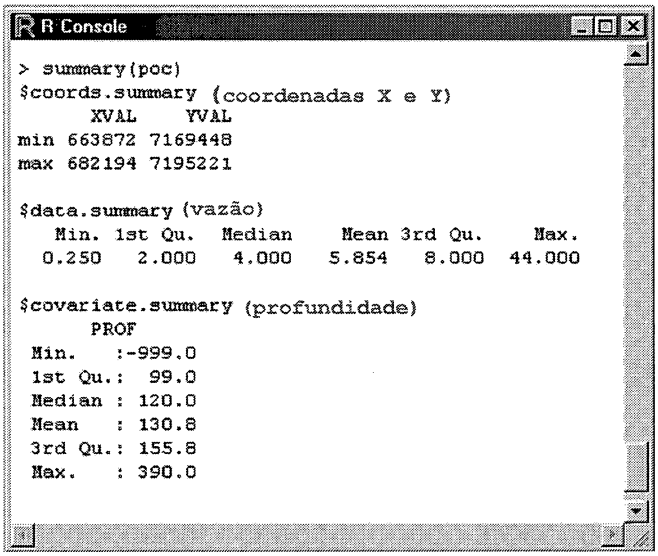


Figura 11.3: Sumário contendo informações estatísticas básicas a respeito das variáveis vazão e profundidade no município de Curitiba.

Se houver a presença de tendência nos dados, deve ser feita a regressão dos pontos através de uma curva de regressão e se trabalharia somente com os resíduos, caso contrário os dados tendem a ficar "viciados".

Deve ser lembrado que gráficos do tipo *scatterplot* nem sempre são suficientes para descrever com exatidão o comportamento de uma variável. Segundo NOGUEIRA (1997) a existência de uma bacia sedimentar (em Curitiba) poderia causar tendência às variáveis hidrogeológicas do aqüífero devido à deformação do substrato causado por uma subsidência. Entretanto, esses desvios da variável podem estar mascarados devido a diversas flutuações locais ou valores anômalos. Com essa preocupação foram feitas novas tentativas, selecionando a variável em apenas algumas regiões (*zoom*) ou mesmo eliminando diversos valores *outliers*, não havendo, porém, a identificação de tendência na área.

LANDIM (2001) indica que sejam verificados os padrões de variações utilizando o método de análise de superfície de tendência. Porém esse procedimento

não foi adotado, já que o fenômeno natural observado no município de Curitiba se enquadra em uma situação onde a aplicação do método, de acordo com o autor, sofre sérias restrições. No município de Curitiba os pontos correspondentes aos poços tubulares ocorrem em *clusters*, ou seja, agrupamentos. Além disso, a variabilidade local da variável vazão é grande e a superfície do terreno, que configura o embasamento da Bacia, é descontínua devido à grande quantidade de falhas cortando estas rochas.

11.2.1 Distribuição da variável vazão e valor do parâmetro de transformação (lambda)

Na Figura 11.4 os quadros "A, B, C e D" mostram os testes para verificar qual e a distribuição e o valor do parâmetro de transformação (lambda) da variável vazão.

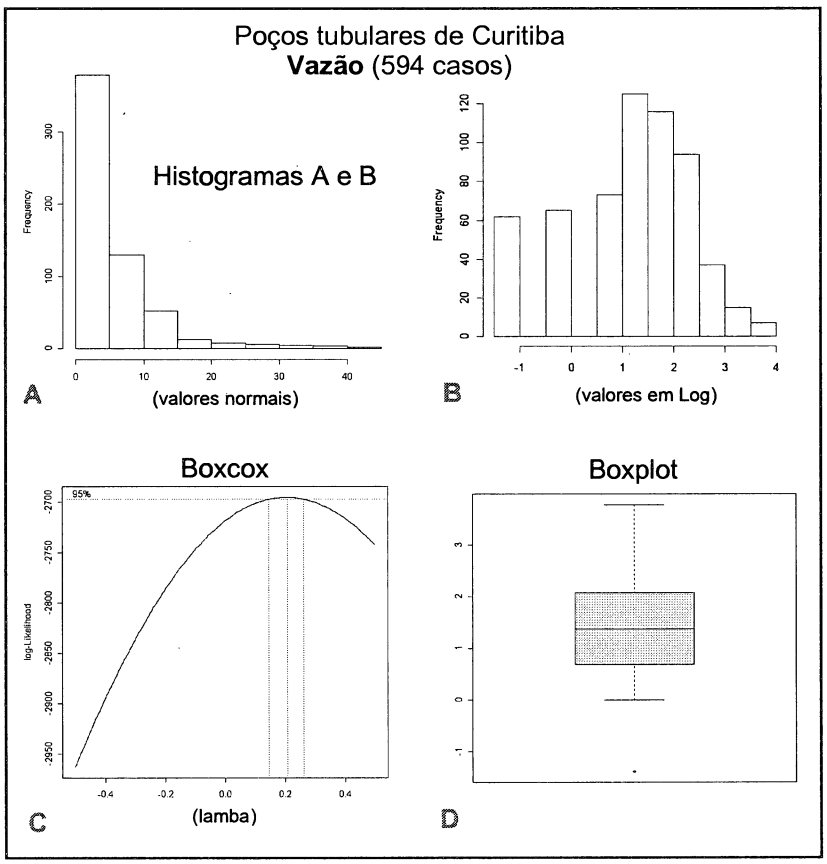


Figura 11.4: (A) histograma dos valores originais dos dados de vazão; (B) histograma dos valores transformados (Log); (C) teste *box-cox* para achar o valor de lambda (0,2); (D) gráfico *boxplot* indicando o valor médio da vazão em torno de 1,7 m^3/h (Log), ou 4,8 m^3/h (valor não transformado).

No quadro (A) o histograma da variável vazão apresenta distribuição muito assimétrica e diferente da esperada gaussiana ou normal. Assim sendo, em (B) foi feita a transformação dos dados na forma logarítmica, sendo considerada essa transformação a mais razoável para estes dados. Em (C) foi feito o teste estatístico do tipo *box-cox* para verificar qual o melhor valor do parâmetro das transformações, ou seja, o "lambda" a ser utilizado na modelagem geoestatística. O valor de lambda = 0.2 (tranf. logarítmica) foi o que pareceu ser adequado a variável vazão. Por último o teste *box-plot* (D) mostra a vazão média de 1,7 m^3/h, dado transformado em Log, ou 4,8 m^3/h (valores normais).

Observando o resultado dado pelo teste *boxplot* no item (D) nota-se um ponto muito isolado. Quando isso acontece, deve ser questionado o motivo deste valor tão baixo. O segundo questionamento é se o mesmo poderia ser excluído e se os resultados das análises se mostram muito afetados por este valor ou não. No caso desta pesquisa, o conjunto de dados foi analisado sem este valor (Figura 11.5, letra "A"). Refazendo o teste *boxcox* para determinar o parâmetro que melhor representa os dados, foi constatado que segundo este novo ajuste, o lambda de valor zero passou a ser o mais indicado (Figura 11.5, letra B)

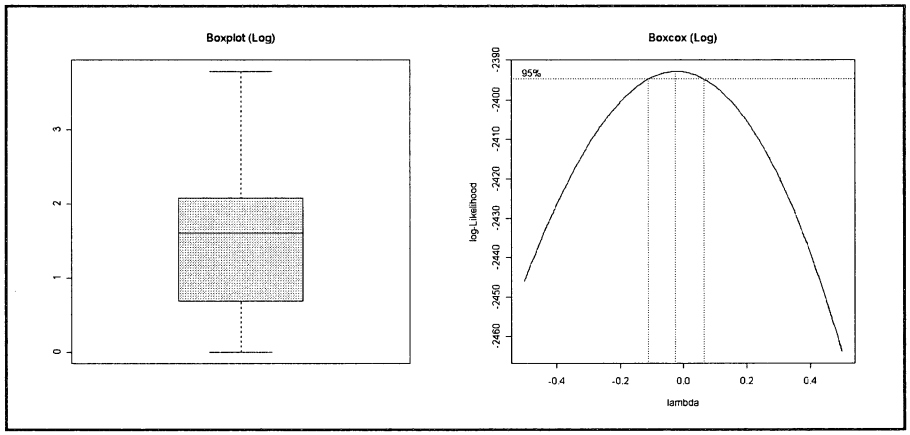


Figura 11.5 (A e B): (A) Representação do conjunto de dados da variável vazão sem o ponto anômalo no teste do tipo *boxplot;* (B) Teste boxcox para recalcular o parâmetro lambda.

11.2.2 Variograma empírico omnidirecional

Para evitar problemas numéricos nas análises geoestatíticas, optou-se por trabalhar com as unidades das coordenadas dos dados hidrogeológicos dos poços de Curitiba transformados em kilometros.

A primeira investigação variográfica dos dados na área foi feita utilizando o variograma omnidirecional onde a direção do vetor **h** não importa, já que a tolerância angular é igual a 90°. Como distância máxima (**h**) foi adotado inicialmente os valores de 10 km e 5 km (Figura 11.6 "A" e "B"), já que estes valores devem ser sempre menores ou iguais à metade da maior distância entre todos os pares, ou seja, 25,8 km (no caso de Curitiba).

Utilizando o parâmetro de transformação logarítmica lamdda zero, a resposta obtida nos variogramas ominidirecionais da figura 11.6 mostra que o alcance prático parece acontecer por volta de 2,5 km, por esta razão foram feitas novas tentativas com distâncias máximas de **h** menores. A distância de 3 km pareceu ser satisfatória, definindo de forma adequada a curva dos variogramas seguintes.

A segunda observação feita nos variogramas da figura 11.6 foi sobre a acentuada descontinuidade na origem, mostrando efeito de pepita alto *(nugget effect).*

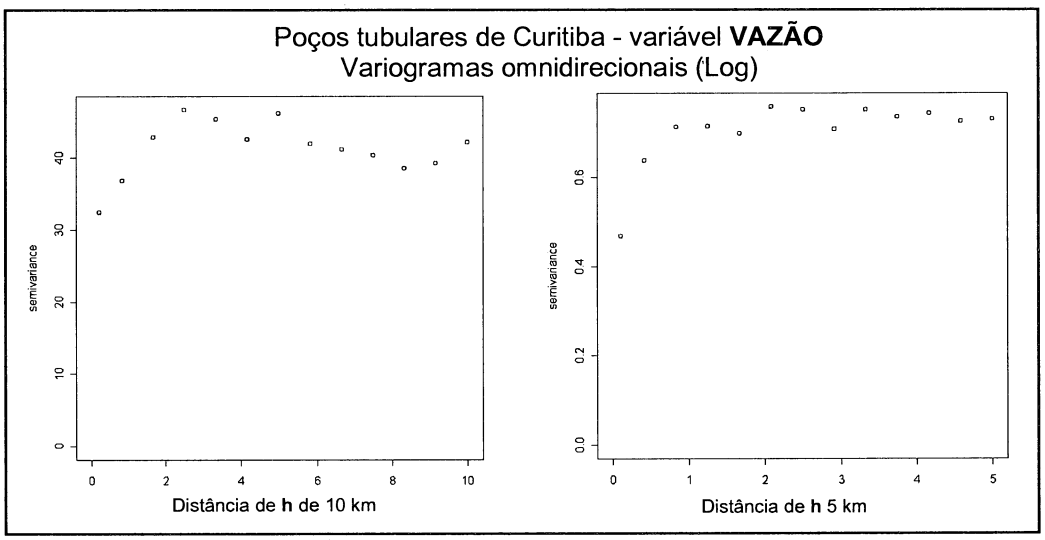


Figura 11.6 (A e B): (A) Variograma omnidirecional dos dados transformados da variável vazão, com distância máxima de **h** de 10 km e tolerância 90º (*software* geoR). (B) Utilizando distância máxima de 5 km.

Em todos os variogramas gerados para a variável vazão no município de Curitiba aparece uma flutuação dos pontos de forma cíclica devido, provavelmente, a um fenômeno chamado de efeito buraco. Este efeito já havia sido observado por NOGUEIRA (1997), e segundo o autor esta flutuação é resultado da relação de continuidade espacial da variável, originada em virtude das propriedades intrínsecas

do meio, ou seja, o aqüífero fraturado em questão. Ainda de acordo com este autor, esse fenômeno poderia ser traduzido, no caso das depressões, como sendo os pontos de mínima abertura das fraturas onde então a variância é máxima.

VIEIRA (1981) em um estudo sobre variabilidade espacial atribui o efeito de buraco a periodicidade nos dados. Quando ocorre o efeito de pepita **Co** alto, é comum que alguns valores cresçam além do valor do patamar até uma determinada distância e depois caiam e apresentem flutuações abaixo do valor do patamar.

Uma outra maneira de observar se ocorre tendência na variável investigada na área (Curitiba), foi verificando o variograma de nuvens da mesma. Na figura 11.7 é mostrado o comportamento do variograma omnidirecional de nuvens (*cloud*) para a variável vazão no qual não foi verificado tendência nos dados. Os pontos na nuvem são dispostos de forma totalmente dispersa e sem orientação preferencial.

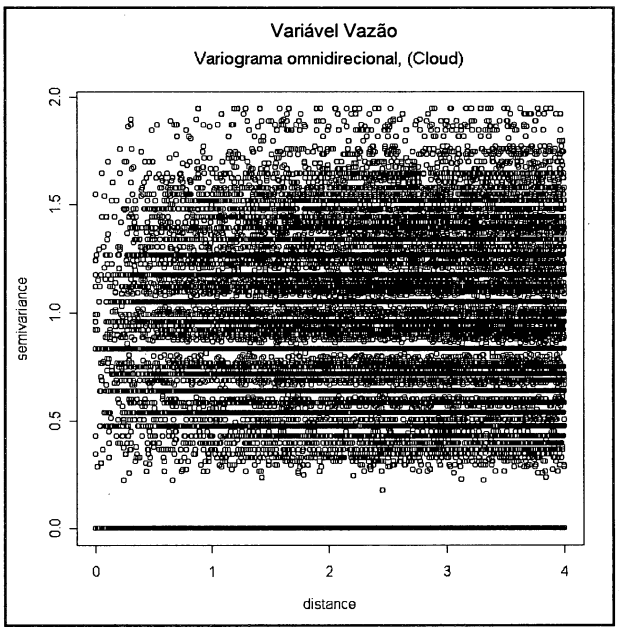


Figura 11.7: Comportamento do variograma omnidirecional de nuvens (*cloud*) para a variável vazão, no município de Curitiba, segundo o qual não ocorre tendência.

Para gerar os variogramas através do geoR foi utilizado o estimador do tipo "modulus" através do qual os variogramas são menos influenciados por valores extremos. A diferença utilizando o estimador "clássico" e o "modulus" (opções oferecidas pelo *software* geoR) pode ser visualizada no tratamento dos dados de

vazão na área pesquisada através da comparação de testes do tipo *boxplot* no qual são estipulados intervalos de classes para o variograma empírico (Figura 11.8).

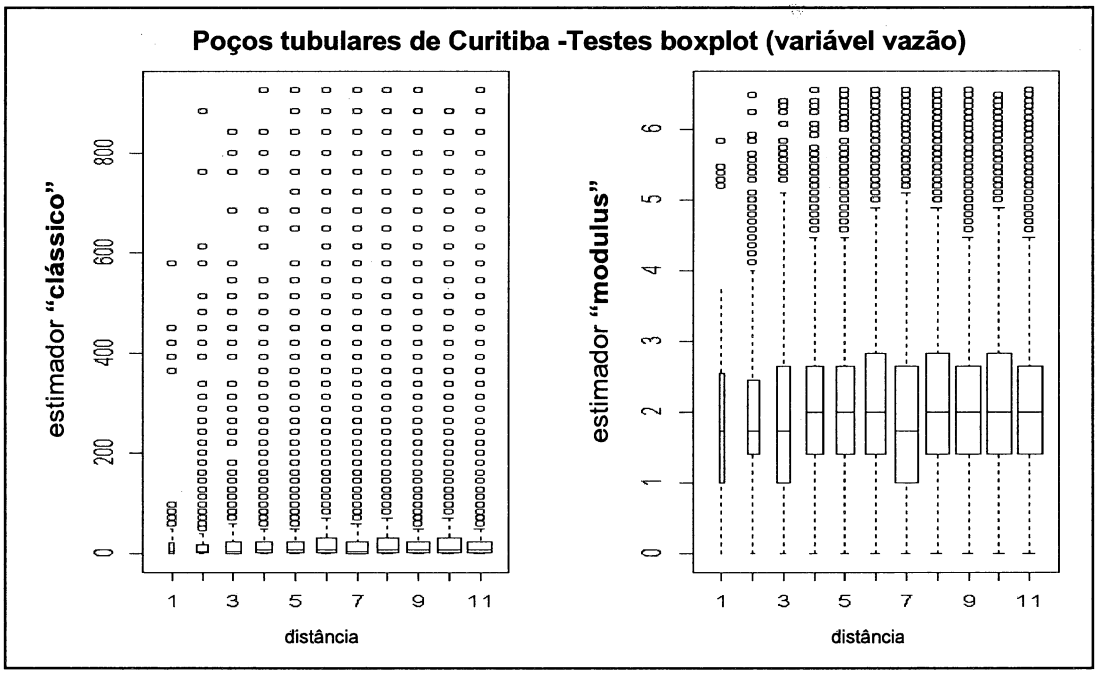


Figura 11.8: Teste em caixa para ilustrar a diferença entre estimador "clássico" e "modulus". O estimador "modulus" é menos influenciado por valores extremos.

O teste aplicando o estimador "clássico" e "modulus" para gerar o variograma empírico da variável vazão pode ser visualizado na Figura 11.9 (letras "A" e "B").

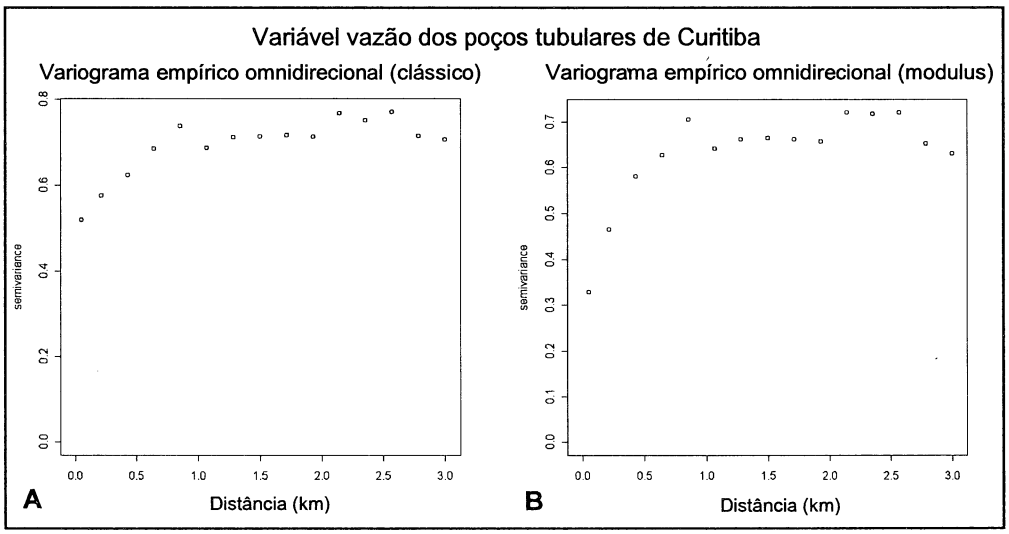


Figura 11.9: Teste mostrando variogramas empírico para a variável vazão, na cidade de Curitiba, com distância máxima de 3 km aplicando em (A) o estimador "classico" e em (B) "modulus".

O estimador "modulus" (letra "B"), no caso de Curitiba, parece definir melhor a curva do variograma por estar menos influenciado por valores extremos.

11.2.3 Teste de correlação espacial para a variável vazão

Para testar a correlação espacial nos variogramas produzidos com a variável vazão para o município de Curitiba, foi utilizada uma função do *software* geoR chamada de "variograma envelope". Este variograma é baseado na permutação dos dados em relação a sua posição. Para exemplificar melhor este significado foi utilizado um variograma (teórico) que apresenta as características ideais de correlação Os pontos correspondentes à variável devem ficar abaixo e acima do envelope (linha tracejada) produzido por este teste como o apresentado no exemplo da figura 11.10. Entretanto, se todos ou a maioria dos pontos ficam contidos dentro do envelope, isso é indicativo de pouca ou ausência de correlação.

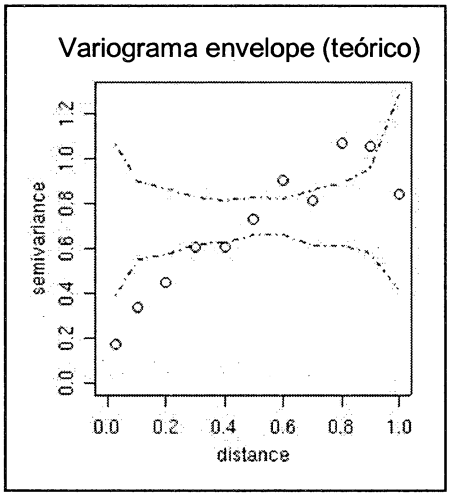


Figura 11.10: Exemplo teórico de teste de variograma envelope (mod. JUSTIANIANO, 1999).

Com relação aos poços tubulares de Curitiba, foram executados os testes para os variogramas omnidirecionais utilizando distância máxima de 5 km (A) e 3 km. (B).

O que pode ser constatado é que a evidência de correlação na área pesquisada existe, mas não é muito forte, principalmente à distâncias maiores que 2 km, uma vez que boa parte do variograma está envolvido pelo envelope em ambos os resultados. Esse tipo de teste serve também para reforçar a idéia de que a

correlação espacial na área ocorre a curtas distâncias, o que faz sentido considerando a natureza do fenômeno de variabilidade do aqüífero fraturado no município. No entanto, embora ocorra alta variação e flutuações dos pontos ao acaso a pequenas distâncias, não se pode negar que a correlação exista (Figura 11.11).

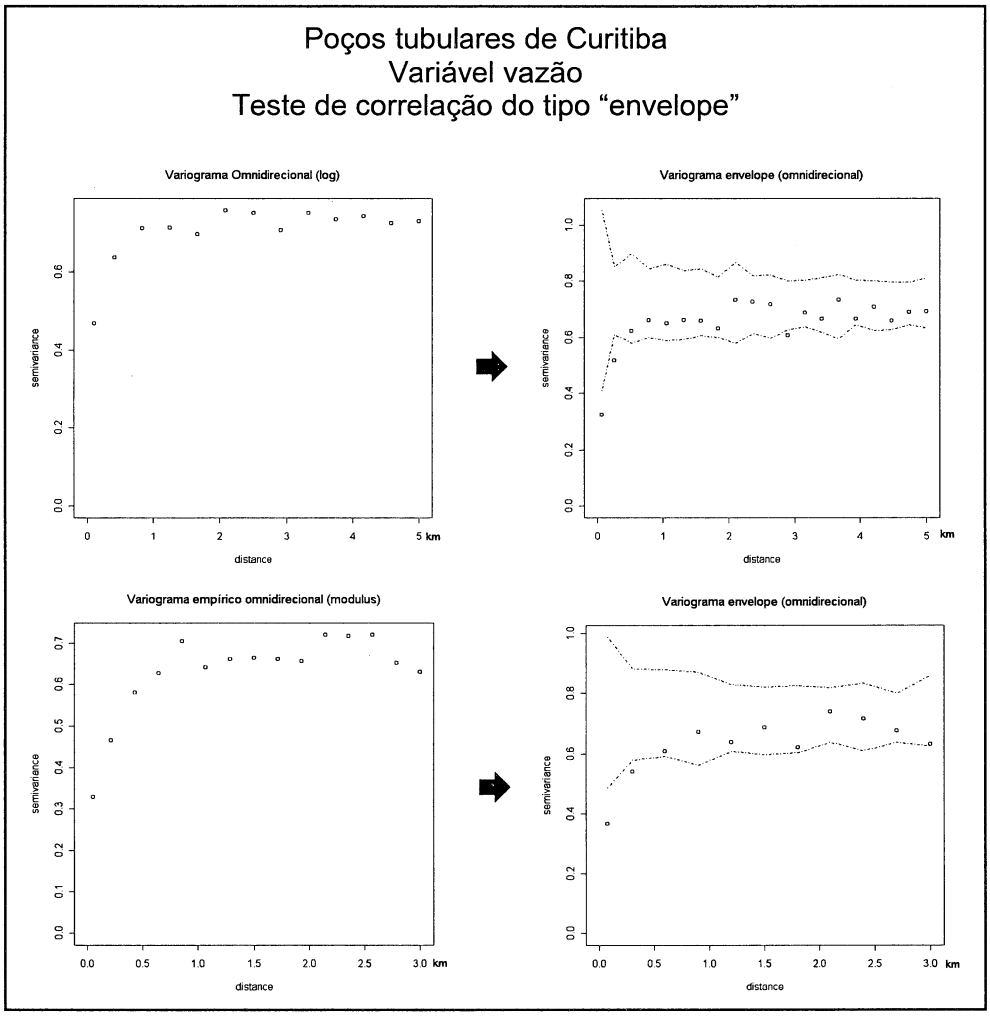


Figura 11.11: (A) e (B): (A) Variograma envelope com distância máxima de 5 km e (B) teste com (h) de 3 km.

Os pontos correspondentes aos valores de vazão acima do patamar, aqueles que não apresentam correlação, sugerem que além do alcance não há nenhuma relação com os pontos vizinhos (para além da distância máxima estipulada), sendo assim os valores próximos não são necessariamente mais parecidos entre si do que valores distantes.

11.2.4 Variogramas direcionais

Considerando que na natureza raramente os fenômenos são isotrópicos, faz bastante sentido verificar a variabilidade espacial em diferentes direções para o aqüífero em questão, ainda porque os mecanismos que configuram os processos tectônicos que moldaram a rochas do embasamento da Bacia de Curitiba revelam padrões relativamente sistemáticos, atuando de formas diferentes de acordo com direções específicas como já confirmado anteriormente nas análises estruturais.

Na figura 11.12 foram gerados diferentes variogramas direcionais adotando todos o ângulo de tolerância de 22.5°, os quais são ilustrados na seqüência das letras: **(A)** quatro direções principais: (0°, 45°, 90°e 135°); **(B)** direções de (0°, 10°, 25° e 60°); **(C)** direções de (0°, 25°, 115° e 125°); **(D)** direções de (0°, 125°, 145°, e 165°).

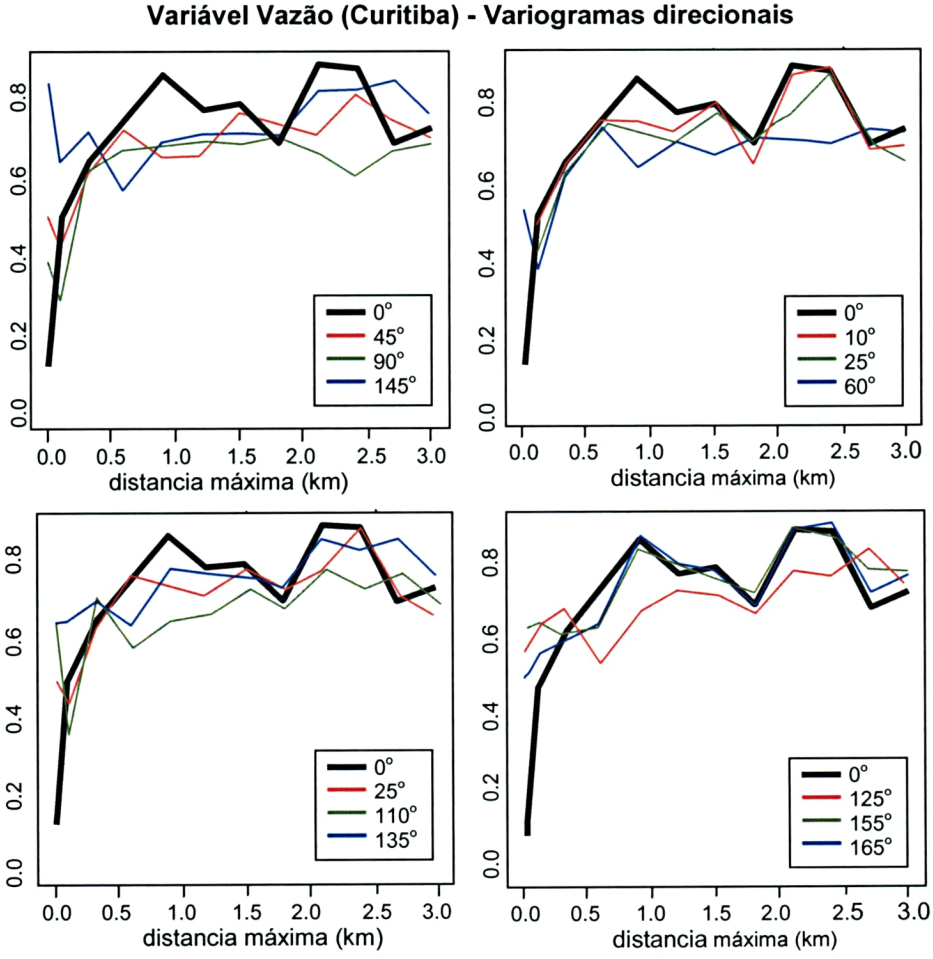


Figura 11.12: Os variogramas (A, B, C e D) mostram, cada um, quatro direções para investigar a correlação da variável vazão.

Nos variogramas foi constatado o fenômeno da anisotropia predominantemente geométrica onde ocorrem diferentes patamares, embora pareça haver também uma componente zonal (diferentes alcances). A primeira observação importante a ser feita foi quanto à direção de maior anisotropia, neste caso a de 0° (norte - sul). A segunda observação foi que as direções equivalentes ao quadrante NW parecem ter menos correlação do que a NE, com exceção das direções N05-15W que também mostraram correlação. Uma terceira observação tendo como base os variogramas direcionais, é que no sentido EW também parece haver um padrão direcional, porém mais fraco que o da direção N-S.

O comportamento destes variogramas, principalmente o grau de correlação na direção de 0° é de grande importância, pois serve como suporte às análises geológico/estruturais dos padrões das diferentes famílias de fraturas existentes no embasamento. De acordo com esta análise estrutural a direção norte-sul é de grande importância sendo considerada uma das direções mais promissoras para a circulação da água subterrânea no aqüífero investigado. A existência de anisotropia da variável vazão nesta mesma direção reforça as conclusões até então tomadas.

Como os dados apresentam anisotropia o modelo inicial mínimo de geoestatística não é aconselhável para o caso de Curitiba, o modelo deve ser expandido de acordo com o padrão direcional mais bem definido.

11.3 Escolha do Modelo (base conceitual adotada)

Ao ser gerado um variograma empírico, posteriormente é ajustada uma função contínua ao modelo de acordo com fenômeno presente. Esse ajuste de um modelo teórico ao variograma experimental é dado como um dos aspectos mais importantes durante a aplicação da "Teoria das Variáveis Regionalizadas", sendo uma das fases de maior controvérsia (VIEIRA et al., 1981). O modelo ajustado precisa representar a tendência de $\gamma(\mathbf{h})$ em relação a $\mathbf{h}$ para que, posteriormente ao ser feita a predição, as estimativas obtidas sejam mais exatas e, portanto, mais confiáveis.

Na hora de aplicar o tipo de modelo para fazer o ajuste do variograma para os dados de vazão na área pesquisada, foram testados os modelos teóricos do tipo

Matern, Exponencial, Esférico, Gaussiano. Em processos mais suaves é mais indicado usar o modelo Matern, mas quando se espera grande variabilidade a curtas distâncias, como no caso dos dados hidrogeológicos dos poços em Curitiba, deve-se dar preferência ao modelo exponencial ou esférico. No fenômeno que acontece no aqüífero fraturado da Bacia, é esperado que a vazão mude rapidamente na área em função da natureza das fraturas (p.ex: estruturas mais abertas ou mais fechadas, direção e conectividade).

Teoricamente para escolher um modelo é preciso refletir sobre os próprios dados. Por exemplo, caso se desejasse trabalhar com dados de pluviosidade espera-se uma mudança menos brusca na variabilidade, já com dados de solo ou vazão, espera-se mudanças rápidas em curtas distâncias, nestes casos o modelo exponencial é o que geralmente melhor representa este fenômeno.

Na variografia existe muita subjetividade na distribuição dos pontos e em como passar a curva pelos pontos no variograma. Se o modelo ajustado estiver errado, todos os cálculos seguintes também conterão erros.

Alguns autores preferem não passar uma curva "a olho", eles preferem observar a "reta" de regressão. Uma opção para isso é usar a função *variofit* onde os cálculos são feitos pelo *software* geoR através do mínimo dos quadrados para observar o fenômeno.

Neste ajuste em primeiro lugar é escolhido o modelo teórico a ser interpolado, conforme a documentação no geoR. O segundo passo é estipular os valores iniciais de σ (variância) e ϕ (nível do processo, corresponde ao valor do alcance) para o início dos cálculos. A partir destes valores a função *variofit* procura um valor para (σ) e (ϕ) que melhor se ajusta ao algoritmo de minimização.

Outros autores preferem ajustar o modelo aos dados usando a função *likfit* onde é aplicado o princípio da "Máxima Verossimilhança" (Max. Ver.). Isso corresponde a achar o valor de θ que melhor (mais alto) representa a plausibilidade no valor do parâmetro no modelo. O valor que indica esta plausibilidade (θ) é dado pelo parâmetro Log.L e pelos critérios AIC e BIC na função *likfit* (operação realizada pelo *software* geoR).

Em termos numéricos através deste procedimento (Max. Ver.) é possível verificar dentre o modelo Matern ou modelo exponencial, qual deles apresenta o melhor ajuste.

Além da escolha do modelo teórico na função *likfit* também são atribuídos valores iniciais de variância (σ) e de alcance (ϕ) para que então o algoritmo da função procure os valores que melhor se ajustem aos dados. A escolha destes valores pode ser feita através da observação direta dos resultados obtidos nos ajustes feitos a olho ou com o mínimo dos quadrados. Estes valores são usados somente para começar os cálculos iniciais, a partir dos quais a própria função do *likfit* encontra os valores mais adequados.

11.3.1 Estimativa dos parâmetros iniciais do modelo na área

Na seqüência é mostrado o ajuste das curvas do variograma direcional no município de Curitiba (direção de 0°, distância máxima (h) de 2,5 km) de três formas diferentes: (A) **"a olho",** (B) usando os cálculos através do mínimo dos quadrados pela função "*variofit*" e (C) pelo princípio da **"Máxima Verossimilhança"** na função *likfit* (Figura 11.13).

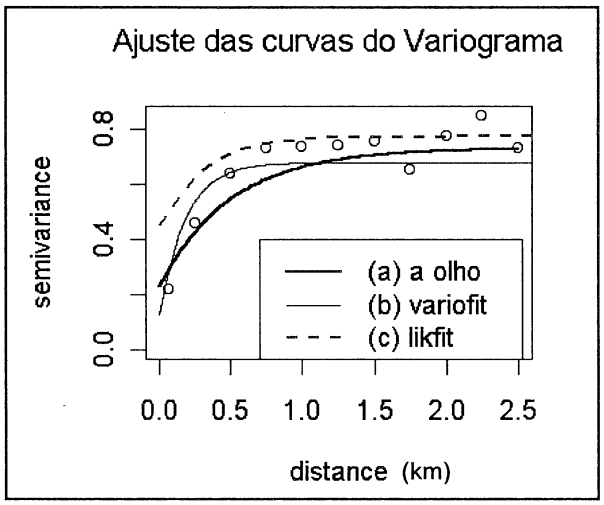
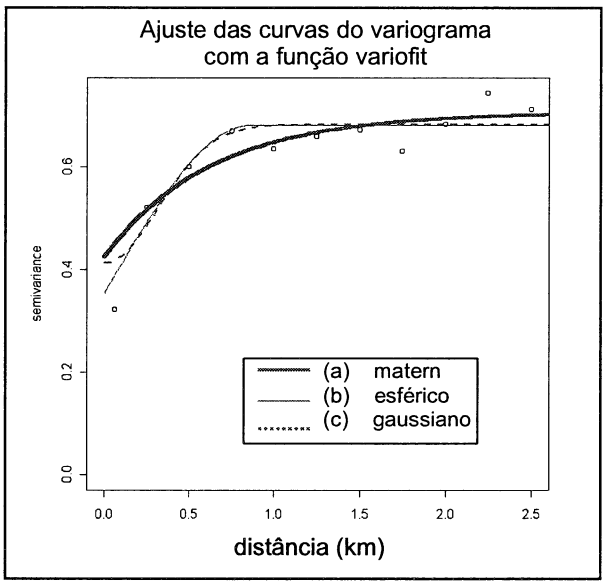


Figura 11.13: Ajuste dos parâmetros da curva: (a) **"a olho"**, (b) mínimo dos quadrados pela função ***variofit*** e (c) pelo princípio da **"Máxima Verossimilhança"**, função *likfit*.

As diferenças no ajuste estão, principalmente em relação ao efeito de pepita, que na função *likfit* é o mais alto. O patamar em (A) e (C) alcança em torno de 1000 m e em (B) 1500 m.



Na figura 11.14, o ajuste foi feito somente com a função *variofit*, porém testando outros modelos (Matern, Esférico e Gaussiano). O melhor ajuste continua sendo com o modelo exponencial.

Figura 11.14: Ajuste do variograma testando os modelos de Matern, Esférico e Gaussiano através da função *variofit*.

Embora a curva pareça ficar melhor ajustada "a olho" (predição *"plug in"*) ou com a opção dos mínimos quadrados usando o modelo exponencial (função *variofit*) optou-se pelo ajuste feito através da "Máxima Verossimilhança" (função *likfit*), já que os resultados obtidos através deste interpolador são os que representam a maior plausibilidade no valor dos parâmetros do modelo a ser ajustado ao variograma para a variável vazão no município de Curitiba.

11.3.2 Cálculo da "Máxima Verossimilhança"

Os elementos que fazem parte do cálculo da "Máxima Verossimilhança" (função *likfit*) são ilustrados na tabela da figura 11.15 e explicados na sequência. Os valores para cada um destes elementos são atribuídos pelo pesquisador de forma fixa ou então a própria função se encarrega de encontrar o valor mais adequado a partir de um valor qualquer inicial.

Argumentos	Fixo ou pode ser estimado
geodata = nome do arquivo em formato ".dat" que contém os dados.	sempre fixo
coords = coordenadas X e Y dos pontos	sempre fixo
trend = tendência (1^o, 2^o ou tendência externa p.x. profundidade, entrada d'água)	pode ser incluído se desejado
ini.cov.pars = valores iniciais de sigma (variância) e phi (alcance)	sempre estimado pela função

nugget = efeito de pepita	fixo ou pode ser estimado
lambda = parâmetro de transformação do modelo (Log.)	fixo ou pode ser estimado
cov.model = modelos (exponencial, matern, esférico, gaussiano...)	sempre fixo
method.lik = método de interpolação, "*Maximum likelihood (ML)*" ou "*Restricted maximum likelihood (REML)*"	sempre fixo
psiA = ângulo (radianos) da direção de maior alcance no elipsóide de anisotropia	fixo ou pode ser estimado
psiR = razão de menor alcance no elipsóide de anisotropia	fixo ou pode ser estimado

Figura 11.15: Parâmetros da função *likfit* usados para ajustar o modelo ao variograma.

Com a função *likfit* foram testadas para os dados de vazão diferentes combinações para o cálculo dos parâmetros do modelo. Dentre todas as tentativas feitas, os parâmetros que melhor se ajustaram ao variograma e apresentaram o maior valor de plausibilidade dos dados (Log.L) no modelo, foram os seguintes:

- **ini.cov.pars** = Valores iniciais de sigma: 0.4 (variância) e phi: 1 (alcance em km), estes valores são utilizados somente para começar os cálculos. No caso dos dados de vazão dos poços de Curitiba, mesmo mudando os valores iniciais estipulados acima, o resultado final obtido pela função *likfit* foi sempre o mesmo, o que indica que o algoritmo que faz os cálculos convergiu de forma adequada. Caso o contrário tivesse ocorrido, isso sugeriria que os dados estariam com problemas. Os valores de sigma e phi encontrados pelo *likfit* foram (0.3, 0.23) respectivamente;
- **trend** = Foi indicado a co-variável de profundidade e também foi testada a variável entrada d'água. Para saber se a co-variável melhora ou piora o modelo deve ser verificado o resultado de AIC e BIC (estes critérios são explicados posteriormente). No caso de Curitiba os parâmetros AIC e BIC indicaram o uso das duas co-variáveis na interpolação da krigagem.
- ***nugget*** = O *nugget* foi estimado e resultou no valor de 0.45;
- **lambda** = Foi atribuído o valor de zero para parâmetro de transformação logarítmica obtido com o teste de *boxcox*. Portanto a função *likfit* não precisou recalcular este valor;
- **psiA** = Estimado em 0,57° (de acordo com a anisotropia norte-sul);

- **psiR** = Estimado em 1.1718;
- **method.lik** = Para os cálculos do *likfit* o uso do método "ML" resultou em valores de Log.L mais altos;

O valor de maior plausibilidade encontrado, ou seja, *maximised log-likelihood* (log.L) foi de:

-1257.472

Ao ser realizado o cálculo dos parâmetros pela função *likfit*, é gerado o seguinte relatório no geoR onde todos estes parâmetros podem ser observados na tabela da figura 11.16, na forma como o programa apresenta os resultados.

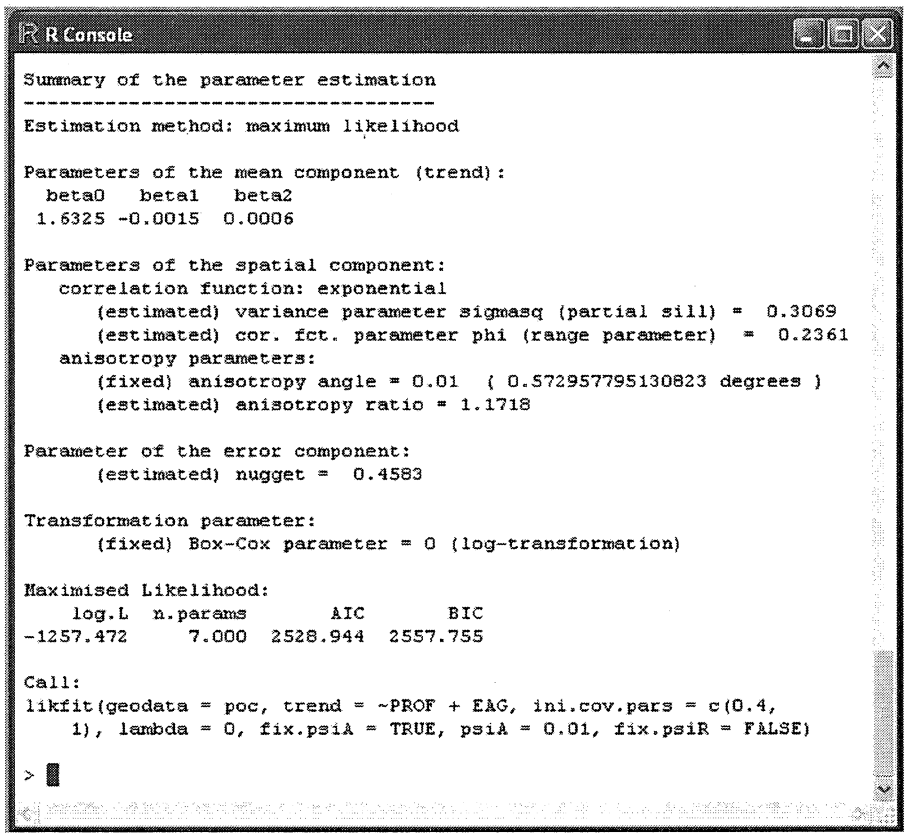


Figura 11.16: Sumário contendo os resultados obtidos durante o cálculo realizado pela função *likfit* para estimar os parâmetros do modelo que melhor se ajustaram ao variograma (*software* geoR).

A interpretação destes parâmetros é a seguinte:

beta = Representa a média geral da vazão estimada da área (valor em logaritmo).

tausq = Indica o valor do efeito de pepita (*nugget*) estimado pela função *likfit.*

sigma = O sigma representa a variância e quando se ajusta um variograma com sigma maior está sendo indicado automaticamente que o modelo apresenta valores

mais erráticos. No caso dos dados de Curitiba é esperado que a variância tenha valores mais altos devido a grande variabilidade dos dados de vazão no aqüífero fraturado. Quanto menor a variabilidade, mais uniforme seriam os dados.

phi = Se phi for igual ou muito próximo de zero então os valores oscilam muito ao redor da média, com phi mais alto o processo é mais homogêneo e mais suave. No momento de modelar os dados existe a opção de usar um phi mais alto ou mais baixo, isso vai depender de cada conjunto de dados a ser trabalhado. No aqüífero fraturado em questão, o fenômeno varia mais e a erraticidade dos dados também é grande. Em um fenômeno mais suave a dependência espacial é maior, portanto no caso de Curitiba, não se deve modelar com phi (alcance) muito alto pois estaria sendo gerado um comportamento diferente do esperado. Deve ser lembrado que na escala de 0 a 25 km (distância máxima entre todos os pares de pontos), o valor de 0.23 km representa um número muito próximo de zero.

likfit: ***maximised log-likelihood*** (log.L) = -1257.472, este valor está em modulo, portanto toda vez que se analisa o "log.L", devem ser considerados os valores negativos e menores que na verdade, são os maiores. O valor de log.L indica o valor no modelo que faz a melhor transformação para o ajuste do variograma.

AIC (*Akaike Information Criteria*): resultou no valor de 2528.944.

BIC (*Bayesian Information Criteria*): resultou no valor de 2557.755.

Quando o modelo utiliza somente a variável principal na interpolação, o valor de log.L é suficiente para orientar na escolha dos parâmetros. Quando são acrescentados co-variáveis, o valor de log.L não é suficiente nesta tomada de decisão. O log.L considera todos os parâmetros do modelo, dessa forma independente se a co-variável é favorável ou não, o log.L assume que o modelo tem mais informações para gerar os cálculos, portanto, ele sempre tende a aumentar. Sendo assim, ao serem acrescentadas co-variáveis ao modelo, como no caso de Curitiba onde a variável principal é a vazão e as co-variáveis testadas foram a profundidade e entrada d'água, o AIC e BIC são dois critérios utilizados pela função *likfit* para orientar o pesquisador. Os valores apresentados por estes dois critérios indicam quando o modelo fica melhor ou pior. Os valores mais baixos destes dois critérios sempre serão os melhores. O AIC faz o cálculo considerando os parâmetros gerais, enquanto que o BIC é mais rigoroso e considera, além dos parâmetros da

função *likfit*, também os dados. O AIC e BIC utilizam equações que equilibram o resultado do modelo através de algorítmos que funcionam como uma balança.

Verificando os valores destes dois critérios, foi constatado que o modelo fica melhor incluindo as duas co-variáveis, profundidade e entrada d'água, durante a interpolação da função *likfit* para procurar os parâmetros que melhor se ajustam ao variograma.

Tendo os parâmetros do modelo o passo seguinte seria fazer a predição. No entanto, o mais indicado antes de iniciar a krigagem é realizar testes de validação através de ajustes e verificações dos modelos escolhidos para verificar a veracidade do resultado obtido. O processo da validação cruzada é mostrado no item seguinte.

11.4 Validação cruzada ("Cross validation")

A validação do modelo é de extrema importância pois verifica se a predição está sendo superestimada ou subestimada, mas o resultado não mostra que o modelo de variograma é correto, mas sim que ele não está grosseiramente incorreto (CRESSIE, 1990). A interpretação dos resultados da validação cruzada também deve ser feita de forma qualitativa (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989).

O processo da validação cruzada usa a estratégia de "*leaving-one-out*" e pode ser feito de duas maneiras:

- Os parâmetros do modelo continuam os mesmos para a predição em cada ponto;
- Os parâmetros do modelo são re-estimados cada vez que um ponto é removido do conjunto de dados.

Dada a importância da validação cruzada para testar o desempenho do modelo, este processo foi aplicado aos parâmetros escolhidos para ajustar o variograma da variável vazão dos poços de Curitiba Os gráficos resultantes podem ser visualizados nas letras "A" até "H" da figura 11.17.

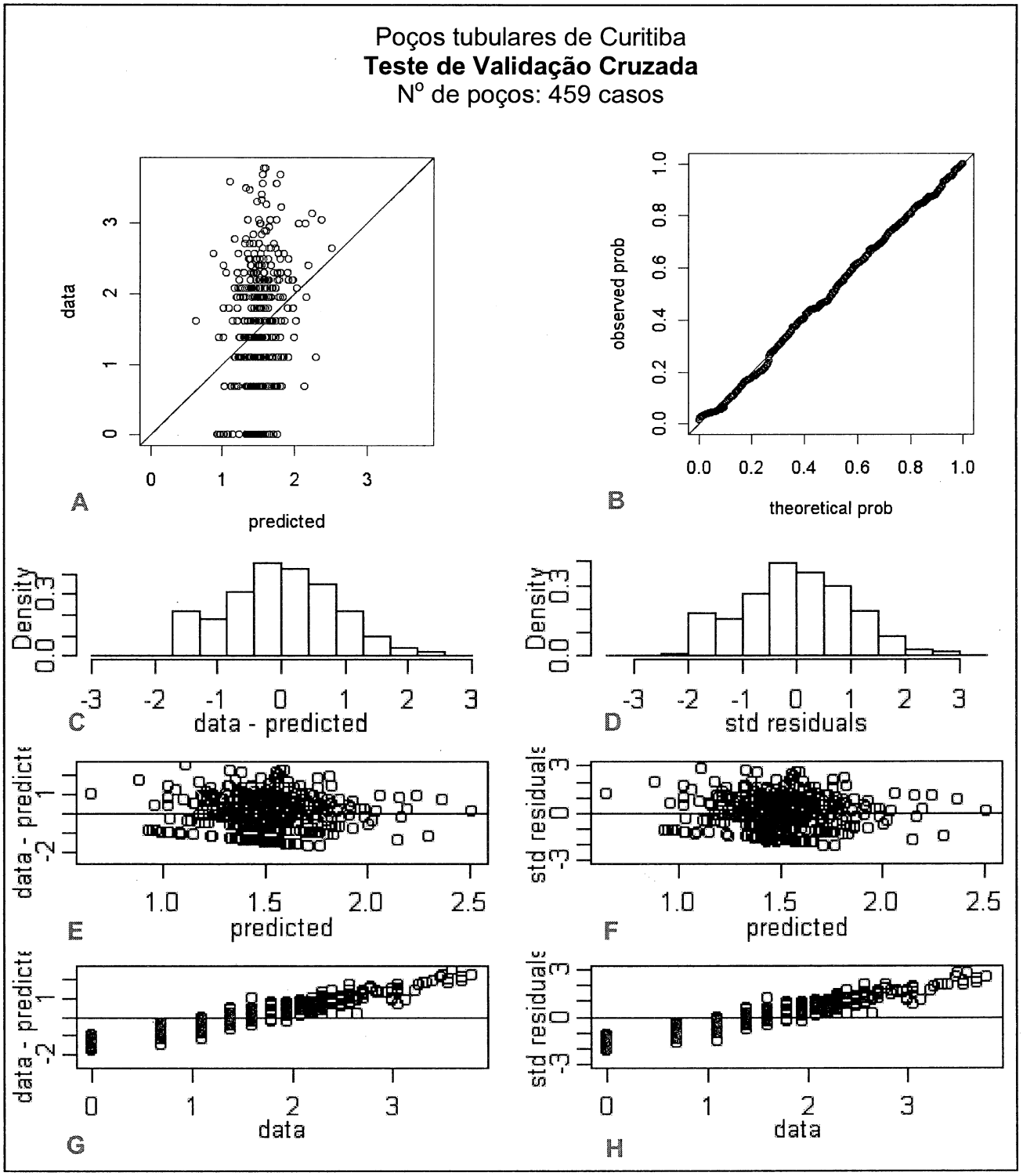


Figura 11.17: Validação cruzada para o modelo escolhido usando a função *likfit* (Máxima Verossimilhança) para ajustar o variograma empírico de direção 0º, distância máxima de 3km, *nugget* igual 0.45 e tolerância de 23º.

O resultado da validação cruzada serve para mostrar a performance do modelo escolhido. No gráfico da letra "A" da figura 11.19 onde é mostrada a distribuição bivariada dos valores observados contra os valores preditos, verifica-se que o modelo tende a subestimar os valores mais baixos na estimação. A melhor estimativa seria aquela onde os valores ficam agrupados homogeneamente segundo a linha inclinada a 45°. Na prática existem sempre erros e os valores aparecem na forma de uma nuvem de pontos, no entanto, o que se espera é que os pontos fiquem o mais próximo possível desta linha inclinada. Na letra "B" também pode ser verificado que os valores mais baixos tendem a ser subestimados, porém os valores intermediários e os mais altos parecem ter um ajuste melhor, ficando bem próximos da linha inclinada.

Na letra "C" o histograma cruzando os valores observados contra os valores preditos produz uma distribuição bastante simétrica, como uma balança, o que é um bom sinal. A média neste caso serve como indicador dessa simetria (*skewness*). Se a média e a mediana são próximas de zero, isso significa que o modelo não superestima nem subestima muito a predição. Uma diferença muito grande entre a média e a mediana serve como alerta de que a magnitude da superstimação não é a mesma da subestimação. Na letra "D" é mostrado o histograma do desvio padrão, esse gráfico serve para mostrar a distribuição do erro estimado. A característica esperada é que os dados não fiquem largamente esparramados de forma assimétrica, mas sim, que a distribuição do erro seja mais simétrica possível. De acordo com ISAAKS e SRIVASTAVA (*op.cit*) é preferível que o histograma tenha uma variância maior, porém uma diferença menor entre os valores médios dos erros dentro das classes. Se houvesse a existência de classes onde a frequência de valores é muito maior gerando uma forma afilada e aguda ao histograma, isso indicaria uma variabilidade muito grande na estimação dos erros dentro destas classes. No caso do modelo escolhido para os dados de Curitiba, a distribuição dos erros não origina uma forma afilada ao histograma.

Nas letras "E" e "F" (valores observados versus os valores preditos) e letras "G" e "H" (resíduos padronizados), os gráficos separam as estimações em dois grupos, valores altos e valores baixos. O que se espera nestes gráficos é que a predição se apresente o menos influenciada possível (*conditional unbiasedness*), na qual as estimativas estariam subdivididas em diferentes grupos e a distribuição dos erros

fosse mais ou menos uniforme, entretanto na prática esta propriedade é um tanto difícil de ser alcançada (ISAAKS e SRIVASTAVA, *op.cit*). Neste tipo de gráfico a estimativa não se apresenta influenciada quando a média dos erros é zero. Nas letras "E" até "G" da validação cruzada da figura 11.17, os valores estimados mais baixos tendem a ser mais baixos enquanto que os valores mais altos tendem a ser ainda mais altos, o que gera uma certa preocupação com relação aos resultados obtidos na análise da variável vazão dos poços tubulares de Curitiba. Se a estimativa não estivesse influenciada, para qualquer alcance da estimativa os valores negativos e positivos funcionariam como uma balança e a média do erro ficaria próxima de zero como no exemplo da figura 11.18 (exemplo teórico).

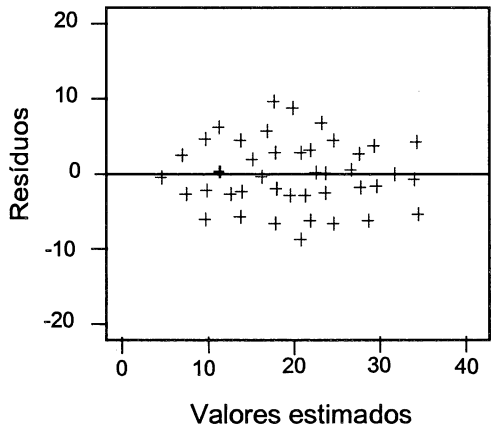


Figura 11.18: Gráfico simplificado mostrando as estimativas com a propriedade de "*conditional unbiasedness*", onde para qualquer alcance da estimativa os valores positivos e negativos funcionam como uma balança e o erro médio tem valor de zero.

Além do modelo aqui apresentado, para os dados hidrogeológicos dos poços tubulares de Curitiba, foram testadas outras alternativas para realizar a validação cruzada, como, por exemplo, tendo como base o ajuste do variograma através da função *variofit,* onde os cálculos são realizados através do mínimo dos quadrados. O resultado gerado na validação cruzada mostrou claramente que o modelo ajustado por meio desta função estaria muito menos adequado do que utilizando a "Máxima Verossimilhança" (função *likfit*).

A figura 11.19 ilustra alguns histogramas da validação cruzada para a variável vazão no município de Curitiba, tendo como base o modelo ajustado pela função *variofit.*

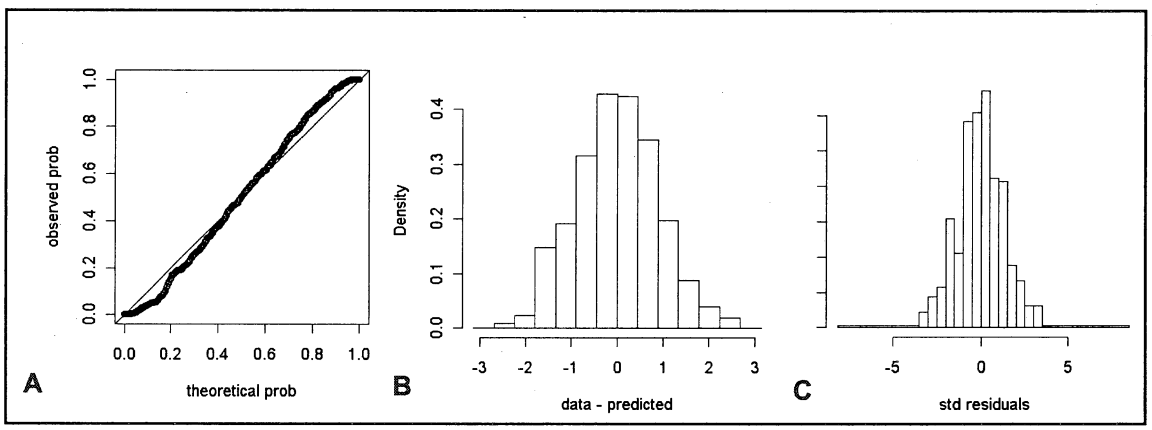


Figura 11.19: Os histogramas das letras "A", "B" e "C" ilustram a performance de um modelo tendo como base os parâmetros calculados pela função *variofit* (mínimo dos quadrados).

Na letra "A" nota-se que os pontos que deveriam estar próximos a linha inclinada a 45°, formam uma curva acentuadamente negativa nos valores mais baixos, subestimando a predição, e os valores mais altos formam uma curva acentuadamente positiva superestimando a predição. A letra "B" ilustra o histograma dos valores observados versus os valores estimados, enquanto que na letra "C" o histograma dos erros mostra uma certa assimetria na forma do gráfico. A diferença na distribuição dos erros das médias entre as classes é grande. O histograma "C" (resíduo padronizado) tem a forma bem mais afunilada se comparada com o da letra "B" o que demonstra, neste caso, que o variograma ajustado através deste modelo seria menos adequado que o modelo ajustado pela função *likfit*.

Feito a validação cruzada o próximo passo foi partir para a predição em si, ou seja, a krigagem.

11.5 Estimativa da variável vazão no município de Curitiba

Para realizar a estimativa da variável vazão na cidade de Curitiba, foi escolhido o método da krigagem ordinária utilizando o *software* geoR. Essa krigagem teve como base os resultados do modelo escolhido (Figura 11.16) onde os parâmetros foram calculados através do princípio da "Máxima Verossimilhança" (função *likfit* no *software* geoR).

Após ter gerado a krigagem através do *software* geoR, os valores correspondentes ao *grid* foram exportados de forma a serem lidos através do *software* SURFER v.8®. No geoR os recursos para visualizar o *grid* são um pouco limitados, por este motivo optou-se de trabalhar a escala de cores via SURFER v.8® pelo fato deste *software* oferecer melhores possibilidades gráficas. Outra razão para transferir o *grid* para o SURFER v.8® foi devido a opção de importar arquivos georeferenciados do banco de dados no formato *shapefile*, com os quais foram feitos cruzamentos com o contorno dos bairros e mapa de lineações de relevo, permitindo observar mais facilmente as relações entre os diferentes níveis de informações.

O resultado dos cruzamentos do *grid* predito no geoR com os outros mapas no formato *shapefile* pode ser visualizados nas figuras 11.20 (mapa de krigagem contendo a estimativa da vazão para o município de Curitiba versus limite dos bairros e poços tubulares profundos) e figura 11.21 (mapa da krigagem da vazão versus lineamentos de relevo e poços tubulares profundos).

Observando o mapa com os valores estimados da vazão, verifica-se que as cores mais quentes indicam as predições de vazões mais altas enquanto que as cores mais frias (azul) indicam os valores mais baixos. A concentração de poços é muito maior no centro da cidade e arredores, assim como nas áreas mais industrializadas a exemplo do CIC. Conseqüentemente a predição vai ser mais aproximada do fenômeno natural onde ocorrer maior número de informações para ser feita a interpolação. Por este motivo é sempre aconselhável que a análise do mapa de krigagem seja feita em conjunto com as variáveis observadas (Figura 11.20). Nas bordas e áreas onde não foram feitas sondagens a krigagem teve menos recursos para gerar predição.

Na figura 11.22, foi feito o cruzamento do mapa de lineamentos de relevo com o mapa da estimação da vazão e 495 poços tubulares. Na região onde foram preditos os valores mais altos de vazão parecem ocorrer grandes alinhamentos de direção N-S. No entanto, a distribuição dos poços tubulares é muito irregular na malha onde foi feita a estimativa, dificultando distinguir visualmente no mapa as relações entre as vazões e as estruturas.

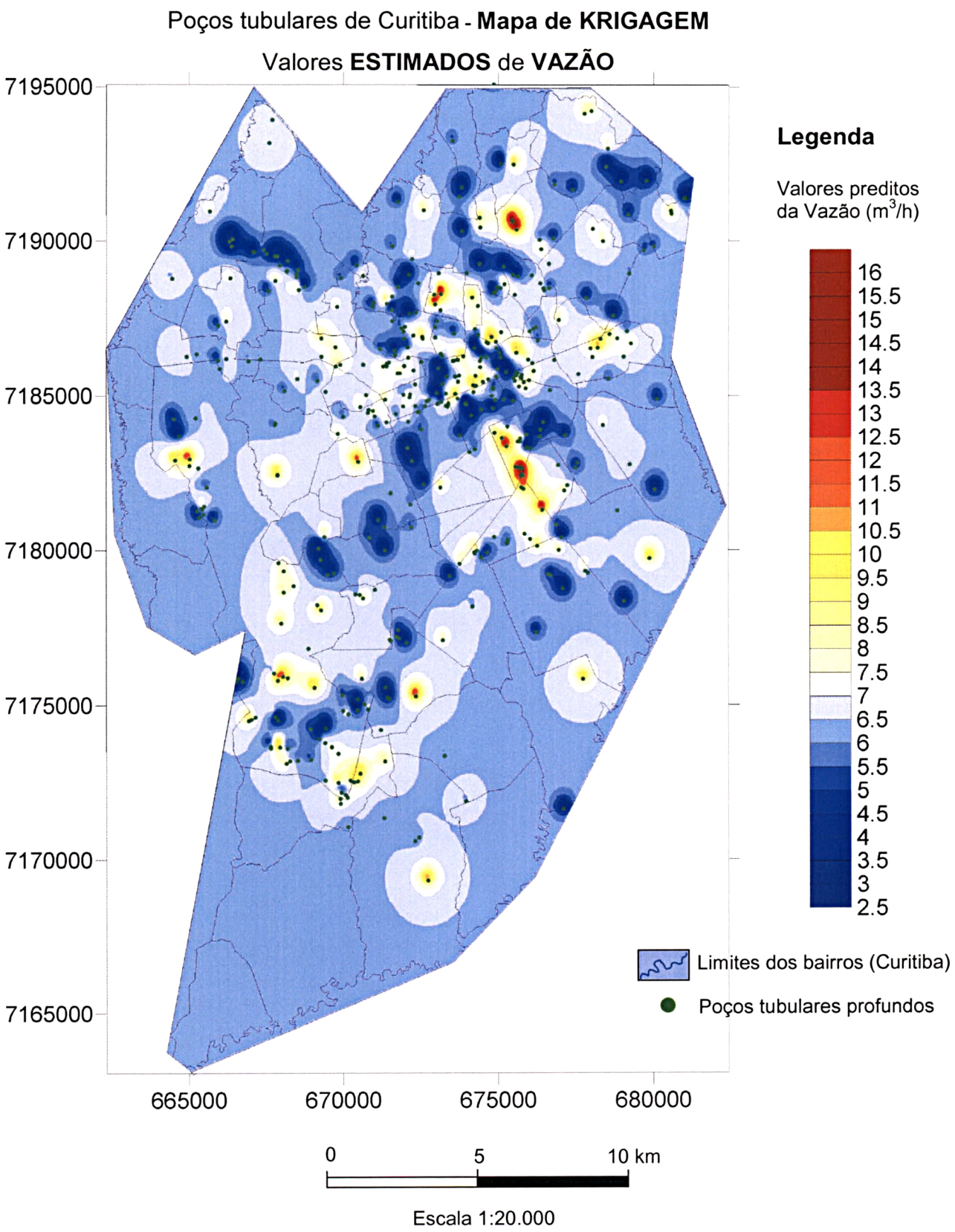


Figura 11.20: Mapa de krigagem para a variável vazão. As cores mais quentes indicam a predição nos locais com as vazões mais altas enquanto que as cores mais frias correspondem aos valores mais baixos na estimativa. Os pontos verdes representam pelo menos 495 poços tubulares no município de Curitiba.

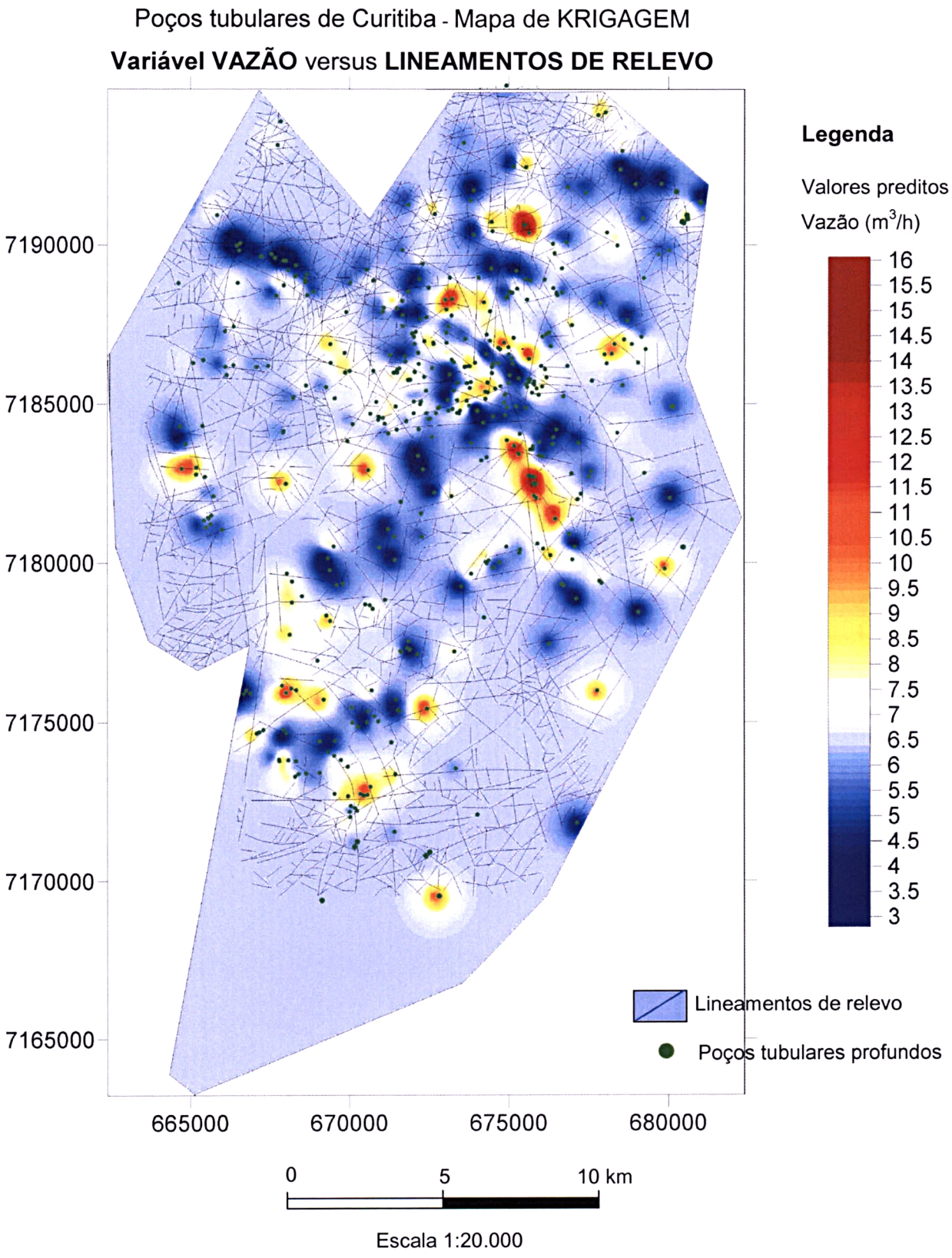


Figura 11.21: Lineamentos de relevo sobrepostos ao mapa de krigagem para a variável vazão. As cores mais quentes indicam os locais com as vazões mais altas enquanto que as cores mais frias correspondem aos valores mais baixos na estimativa. Os pontos verdes representam pelo menos 495 poços tubulares no município de Curitiba.

Além da predição dos valores de vazão, na krigagem também foi gerado um mapa contendo a variância dos valores estimados. Tirando a raiz quadrada da variância, os valores foram transformados no erro padrão associado a cada estimativa (Figura 11.22).

Ao analisar o mapa da variância e dos erros associados a cada estimativa devem ficar claras as seguintes questões (PAULO JUSTINIANO, comunicação pessoal):

- Quando são trabalhados na geoestatística valores não transformados em logaritmo, porque os dados apresentam distribuição normal, a variância depende unicamente da configuração dos pontos.
- Se os valores são transformados em logaritmo para apresentarem distribuição gaussiana ou normal, automaticamente a variância depende da configuração dos pontos (arranjo espacial) e dos valores dos pontos (no caso de Curitiba a vazão).

Para os dados de Curitiba a transformação dos valores de vazão em log foi a que melhor adaptou os dados à distribuição normal, portanto sendo imprescindível.

A implicação, ao se transformarem os valores em logaritmo, é que no mapa da variância os valores mais altos de variância, correspondem também aos valores mais alto preditos. A variância é função da média dos valores mais altos nos pontos, principalmente onde ocorrem agrupamentos. Essa é a característica do modelo quando se está modelando o log da razão. O fato da malha onde foi feita a predição ser bastante irregular, também dificulta distinguir, no mapa da predição e do erro padrão, como ocorre o fenômeno natural no aqüífero fraturado.

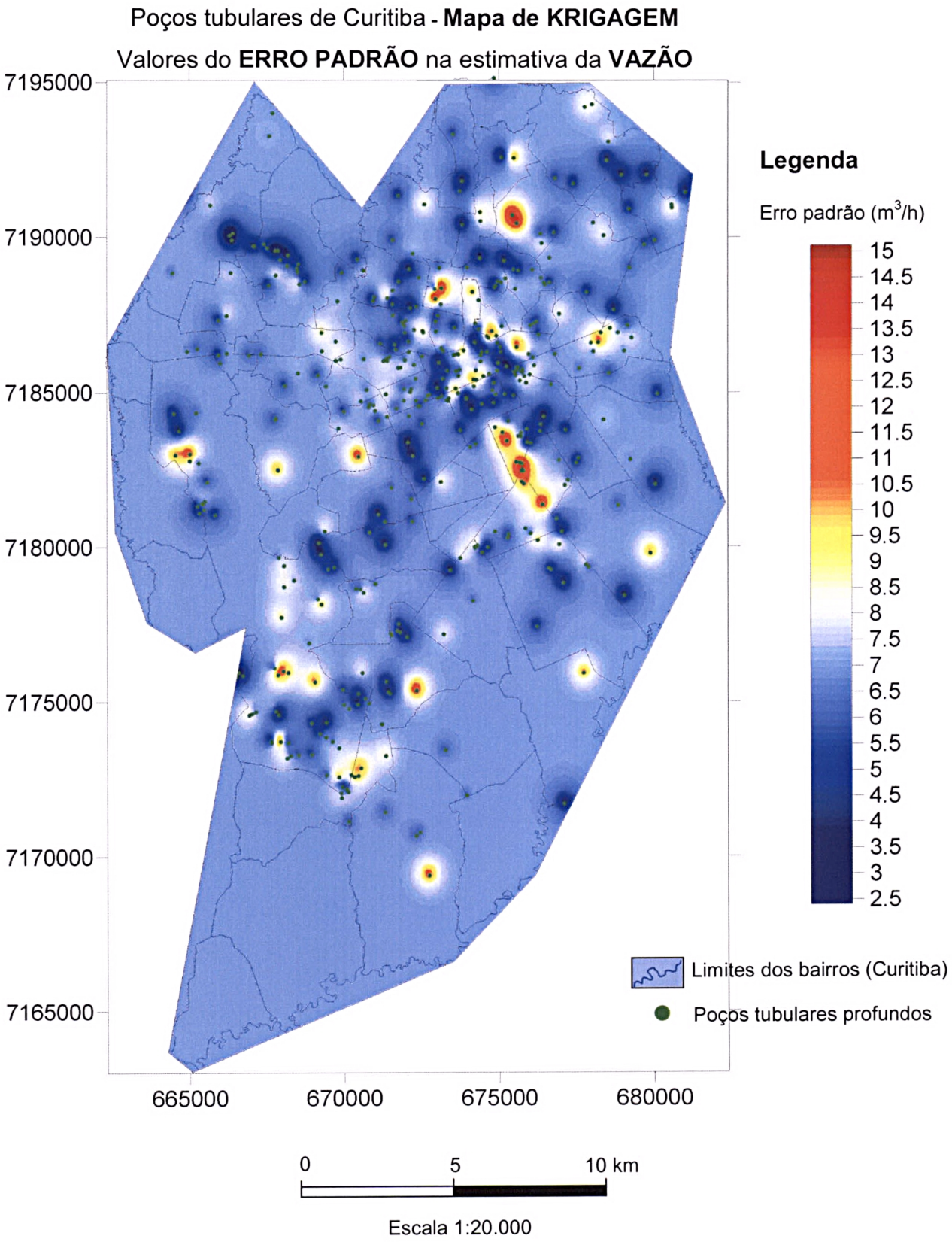


Figura 11.22: Mapa de krigagem para o erro padrão na estimativa da variável vazão. As cores mais quentes indicam a predição nos locais com as vazões mais altas enquanto que as cores mais frias correspondem aos valores mais baixos na estimativa. Os pontos verdes representam pelo menos 495 poços tubulares no município de Curitiba.

11.6 Interpretação dos resultados geoestatísticos

Durante toda a modelagem geoestatística foram feitos testes e ajustes procurando verificar se os modelos propostos se apresentam apropriados ou não para realizar a krigagem.

Diferentes conjuntos de dados de vazão foram testados, buscando-se filtrar aquelas informações que pareceram muito imprecisas. A variabilidade nos dados é nítida ocasionando uma descontinuidade na origem dos variogramas. Este efeito de pepita também é produzido, provavelmente, por algumas ocorrências (3,4%) onde a vazão apresenta valores anômalos superiores a 20 m^3/h. As litologias e, principalmente, a estruturação geológica na área devem ser a as maiores responsáveis pela grande variabilidade do fenômeno que muda em questão de apenas alguns metros de distância.

Foram feitas experiências em áreas menores onde se esperava ter um controle maior sobre a qualidade das informações. O fato é que a natureza dos dados de vazão dos poços tubulares, por si só traz grande dificuldade em realizar uma estimativa aplicando somente a geoestatística clássica. Com a modelagem geoestatística a diferença é que as incoerências ou acertos ficaram mais claros durante o processo de estimativa dos parâmetros para se realizar a predição.

A modelagem geoestatística enriqueceu o processo da compreensão do fenômeno, porém deve-se salientar que qualquer método de estimação jamais poderá produzir uma única e precisa resposta (KITANIDIS, 1997). Com a modelagem procurou-se ajustar o modelo aos dados. É importante lembrar que a krigagem por si só dá apenas a média e a variância dos dados. O pesquisador atribui os valores para os parâmetros a partir de um único variograma. No caso da modelagem da variável vazão para o município de Curitiba foram feitas, nesta pesquisa, diversas simulações através de diferentes modelos nos quais foram realizados testes de correlação, verificação de anisotropia, testes com diferentes interpoladores, uso de co-variáveis e validação cruzada. Apesar disto, deve ficar claro que o modelo final escolhido para gerar a krigagem apresenta certas limitações visto que a correlação entre os pares na área de estudo é fraca e a variabilidade do fenômeno é muito grande gerando maior incerteza na estimativa.

Além da variável vazão foram feitas outras tentativas para gerar a krigagem utilizando outras co-variáveis hidrogeológicas, a exemplo da profundidade e entrada d'água, como tendências externas (opção *external trend* no *software* geoR). Utilizando os critérios **AIC** (*Akaike Information Criteria*) e **BIC** (*Bayesian Information Criteria*) foi verificado que o ajuste do modelo é melhorado com o acréscimo destas duas co-variáveis na interpolação para os dados hidrogeológicos de Curitiba.

Na realidade o modelo deve ser continuamente melhorado e corrigido e essas modificações devem ser efetuadas principalmente de acordo com informações qualitativas. Por exemplo, deve-se ter em mente que na área de estudo os poços são perfurados segundo o interesse dos proprietários, automaticamente existe um adensamento maior de poços nas áreas mais povoadas, nas áreas mais industrializadas ou onde ocorrem maiores problemas com abastecimento de água na cidade. Por este motivo, a amostragem é feita dentro de uma malha bastante irregular.

Quando ocorre este tipo de problema, a literatura descreve que em muitos casos é possível fazer uma estimativa de desagrupamento da variância global gerando um resultado mais aceitável. O processo de desagrupamento (*declustering*) também pode ser testado para estimar a distribuição de variáveis em uma região (ISAAKS & SRIVASTAVA, *op. cit.*). Mas este tipo de análise requer tempo não sendo possível realizá-la nesta pesquisa.

Tendo em vista a complexidade estrutural no município de Curitiba e os resultados obtidos durante a modelagem geoestatística, sugere-se que sejam realizados estudos a respeito de conectividade de fraturas e então que esta variável seja trabalhada juntamente com o dado de vazão durante as estimativas.

Por fim uma das observações de maior importância neste capítulo é o fato dos variogramas evidenciarem uma maior anisotropia na direção norte-sul e também correlação na direção N05-15W na área pesquisada. Essa anisotropia coincide com as principais estruturas geológicas (falhas e fraturas) consideradas como de interesse para a exploração de água subterrânea. Estas estruturas são as chamadas fraturas em "T" e foram determinadas através da caracterização geométrica e cinemática dos planos estruturais sistemáticos observados como favoráveis a água subterrânea. Considerando que no aqüífero fraturado que integra as rochas do embasamento da Bacia de Curitiba, a porosidade é dada pelas interconexões entre

os planos de fraturas, é de extrema importância o reconhecimento das descontinuidades estruturais que controlam a circulação da água subterrânea. No aqüífero em questão, a correlação espacial acontece a curtas distâncias e no caso da variável hidrogeológica vazão, o alcance prático está em torno de 2 km de acordo com a anisotropia na direção N-S. Possivelmente estas estruturas servem como condutos e acumuladores para água subterrânea, sendo os cruzamentos entre os planos abertos, ainda mais favoráveis.

12 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

A integração dos dados utilizando a tecnologia do SIG facilitou a compreensão dos fenômenos naturais através da combinação espacial de uma grande quantidade de informações fisiográficas, geológicas, hidrogeológicas e estruturais georeferenciadas incorporadas através do banco de dados criado com auxílio do programa ARCVIEW v. 3.2®. O cruzamento dos planos de informações de forma georeferenciada ofereceu uma visão espacial muito mais ampla e integrada dos dados já coletados, dos mapas existentes, das análises em andamento e na solução dos problemas o que destaca a grande importância do banco de dados criado.

Nesta pesquisa os resultados obtidos com a análise estrutural feita a partir dos dados coletados em campo e através dos cruzamentos dos diferentes planos de informações integrados no SIG, apontam padrões estruturais bem definidos que se repetem ao longo de toda área de estudo afetando tanto o embasamento quando os sedimentos da bacia.

As direções mais observadas são estruturas rúpteis decorrentes da atuação de falhas transcorrentes gerando planos subverticalizados de direção: N-S (o intervalo de N10W a N10E é considerado como do mesmo sistema), N20-35E, N20-30W. Secundariamente ocorrem as modas de direção N45-60E, N45-60W e EW. Os alinhamentos N-S estão presentes em praticamente todos os afloramentos e mostram uma característica interessante que é a de geralmente apresentarem em meio aos planos, material de cor escura, muitas vezes de aspecto vítreo e de natureza provavelmente tectônica (ultracataclasito/ultramilonito). Apesar deste preenchimento, estes planos são no geral abertos e freqüentemente associados a circulação de água subterrânea. O cisalhamento rúptil nesta direção é bastante forte, cataclasando e causando cominuição das rochas, gerando fraturas abertas. Falhas normais e inversas ocorrem de forma secundária na área.

Também foram relacionadas à circulação de água subterrânea, estruturas subhorizontais configurando grandes planos de fraturas, de origem atectônica que

se apresentam espaçados entre si, sinuosos e com pouca continuidade lateral (ex: ponto 01 e ponto 25). Ocorrem ainda, famílias de fraturas tectônicas subhorizontais que configuram outro sistema muito marcante, sendo bem repetitivos, penetrativos e com orientação principal em torno de N8E/32NW (ponto 26).

Com a análise estrutural geométrica e cinemática dos planos estruturais sistemáticos, agrupados nos intervalos de direções N-S, N15-25W e N20-30E, foi apontada a solução dos campos de tensores, revelando $\sigma 1$ na posição N-S e $\sigma 3$ na posição E-W, para a reativação dos planos estruturais associados a circulação de água subterrânea acima mencionados. As direções N20-30E dos lineamentos estruturais coincidem com os cisalhamentos R (de RIEDEL), Y e P, e os lineamentos de direção N15-25W correspondem aos cisalhamentos R'. Nesta situação a direção N-S coincide com as chamadas fraturas de partição "**T**", consideradas como as de maior interesse em termos hidrogeológicos.

Nesta pesquisa a solução para o posicionamento dos eixos de tensões foi realizada de acordo com os planos sistemáticos abertos associados a circulação de água subterrânea, considerados como pertencentes a sistemas transcorrentes reativados em épocas mais recentes (a partir do Neógeno). A interpretação de um binário sinistral corrobora com o ajuste apresentado por SALAMUNI (1998) para as drenagens de primeira ordem. O autor considera o $\sigma 1$ posicionado a N-S e $\sigma 3$ a E-W, onde as lineações NE coincidem com R de Riedel e as lineações NW com R'.

As análises realizadas em ambiente de SIG, tendo como base modelos digitais, possibilitaram o traçado minucioso de lineamentos de relevo (Figura 9.5) e de drenagem (Figura 9.10). Estes elementos vetoriais foram cruzados com os resultados obtidos nas análises estruturais, auxiliando na identificação e na organização espacial das diferentes famílias de fraturas existentes na área. Além disso, foi constatado que as drenagens de 2^{o} e 3^{o} ordem, localizadas sobre as litologias do embasamento, obedecem a uma arquitetura geométrica bem definida, configurando um padrão de treliça as mesmas (Figura 7.5). Sobre as litologias correspondentes aos sedimentos da Bacia, as drenagens se organizam de acordo com um padrão retangular ou sub-dentrítico. Esta situação aliada as anomalias de drenagens, indica um forte controle litológico-estrutural aos canais de drenagens e grandes vales alinhados principalmente na direção N-S, N20-30E e N15-25W.

A análise estatística ajudou na familiarização dos dados hidrogeológicos e no reconhecimento dos padrões de irregularidades. Foi constatada grande variabilidade nos dados da variável "vazão" dos poços tubulares profundos que apresenta distribuição diferente da normal e presença de agrupamentos, não sendo possível trabalhar posteriormente na geoestatística com uma malha regular. Os dados discrepantes foram eliminados e a média total potencial apontada para esta variável foi a de 1,21 m^3/s (4367,5 m^3/h). Valor que corresponde a 15% do potencial de utilização da água subterrânea no município de Curitiba.

Já os testes do tipo *boxplot* e *scatterplot* mostraram que as variáveis profundidade e entrada d'água se encontram relacionadas e aumentam gradualmente até a profundidade em torno de 240 m. Por falta de mais informações não foi possível estabelecer os padrões existentes abaixo deste horizonte de profundidade.

Os dados referentes à variável "período" (em anos) indicaram um crescimento acentuado na demanda de novas sondagens a partir dos anos 80 e, principalmente, nos últimos 10 anos. Com a evolução na tecnologia que envolve as sondagens de poços tubulares profundos, são atingidas profundidades maiores em tempo mais curto.

Cruzando os dados das vazões dos poços tubulares profundos com as análises estruturais, foi observada a existência de poços de grande produtividade na direção de grandes vales encaixados em alinhamentos, como os de direção N-S. Embora a média das vazões no município de Curitiba seja de 4 m^3/h, ocorrem diversas exceções. Dos 798 casos analisados o intervalo de 32,7% é o mais representativo correspondendo a vazões variando entre 2 a 5 m^3/h, o intervalo de 5 até 10 m^3/h equivale a 21,9 %, o intervalo de 10 até 15% corresponde a 10,7% enquanto que vazões com valores superiores a 20 m^3/h representam 3,4% da média geral.

Poços produtivos são observados nos diferentes horizontes em profundidade. A exemplo disso, na região do CIC, um poço perfurado a 300 m de profundidade apresentou a vazão de 30 m^3/h. Estes casos extremos de vazão representam a situação ideal onde a sondagem atingiu alinhamentos estruturais ou cruzamento de estruturas rúpteis abertas favoráveis à circulação de água subterrânea.

Na geoestatística a resposta obtida com a modelagem da variável vazão dos poços, mostrou que o alcance prático acontece por volta de 2,5 km e a correlação entre os pares é fraca não havendo presença de tendências segundo os eixos das coordenadas X e Y. Além da distância do alcance máximo, os dados de vazão não se apresentam correlacionados. Devido à variabilidade espacial da variável vazão, que muda em questão de apenas alguns metros de distância, possivelmente originada pela estruturação geológica e litologias na área, foi observado a existência do chamado "efeito de buraco" e efeito de pepita alto, em torno de 0.45 (valor em log).

Foram efetuadas diversas tentativas durante a modelagem geoestatística e os testes na validação cruzada mostraram que o modelo adotado para elaborar a krigagem apresenta algumas limitações, os valores baixos tendem a serem subestimados e os valores altos ainda mais superestimados. No entanto, com a modelagem procurou-se ajustar o mais próximo o modelo aos dados. Através de critérios específicos (**AIC** (*Akaike Information Criteria*) e **BIC** (*Bayesian Information Criteria*), foi verificado que o ajuste do modelo é melhorado com o acréscimo das co-variáveis profundidade e entrada d'água, na interpolação para os dados hidrogeológicos de Curitiba.

Ao ser verificada a variabilidade espacial em diferentes direções para o aqüífero em questão, foi constada maior anisotropia segundo a direção N-S e N15W o que corrobora com as análises estruturais que indicam estas mesmas direções como coincidentes com as chamadas fraturas "T", ou seja, as de maior interesse em termos hidrogeológicos.

REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N.; BIGARELLA, J.J. - 1961 - Superfícies aplainadas do primeiro planalto do Paraná. **Boletim Paranaense de Geografia, UFPR**. Curitiba, n. 4/5, p.116-125.

AB'SABER, A.N. - 1966 - Notas a respeito do sítio urbano de Curitiba. **Geomorfologia-USP.** São Paulo, v.3, p.1-7.

AGTERBERG, F.P. - 1989 - Systematic approach to dealing with uncertainty of geoscience information in mineral exploration. In: APCOM **Symposium**, 21, Las Vegas. Proceedings: 165-178.

ALLEN, P.A.; ALLEN, J.R. - 1990 - Basin analysis. Principles e applications. **Blackwell Science**, Oxford. 451 p.

ALMEIDA, F.F.M. - 1952 - Novas ocorrências de camadas supostas pliocênicas nos Estados de São Paulo e Paraná. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, São Paulo, v.1,n.1, p.53-58.

ALMEIDA, F. - 1995 - Integração e Análise Espacial de Dados em Pesquisa Mineral. In: **http//petro.rc.unesp.Br/public/geo3view/geo3view.html**.

ALMEIDA, F.F.M. - 1967 - Origem e evolução da Plataforma Brasileira. **Boletim do DNPM-DGM.** Rio de Janeiro, n.241, p.1-36.

ANDERSON, E.M. - 1942 - The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain. **Oliver and Boyd**, Edimburgh, 191 p.

ANGELIER, J.; MECHLER, P. - 1977 - Sur une méthode graphique de res. des contraintes principales également. **Bulletin de la Societé Geologique de France**, Paris, p.1309-1318.

ANGELIER, J. - 1979 - Determination of the mean principal directions of stress for a given fault population. **Tectonophysics,** Amsterdam, v.56, p.T17-T26.

ARTHAUD, F. - 1969 - Methode de determination graphique des directions de reccourcissement d`allongement et intermediare d`une population de failhes. **Bulletin de la Societe Geologique de France**, Paris, v.7, n.11, p.729-737.

ASSUMPÇÃO, M. - 1992 - The regional stress field in South America. **Journal of Geophysical Research,** Washington,D.C., v.97, n.88, p.1189-11903.

AZEVEDO, F.F. - 1981 - Thecamoebianas e organófitas na Formação Guabirotuba. In.: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3., Curitiba. **Atas**..., Curitiba: SBG. v.2, p.226-242.

BASEI, M.A.S.; SIGA, Jr.,O.; MACHIAVELLI, A.; MANCINI, F. - 1992 - Evolução tectônica dos terrenos entre os cinturões Ribeira e Dom Feliciano (PR-SC). **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.22, n.2, p.212-227.

BATOLA, J.R., F. ; SILVA, A.T.S.F.; ALGARTE, J.P. - 1981 - O pré-cambriano da região sul-sudeste do Estado de São Paulo e leste-nordeste de Estado do Paraná. In.: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3., Curitiba. **Atas**... Curitiba: SBG. p. 94-108.

BECKER, R.D. - 1982 - Distribuição dos sedimentos cenozóicos na Região Matropolitana de Curitiba e sua relação com a estrutura geológica e morfológica regional. **Tese** (Doutorado) Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BIGARELLA, J.J.; SALAMUNI, R. - 1957 - **Aspectos geográficos e geológicos da cidade de Curitiba e arredores.** Curitiba.4p (Reimpresso do v. Comemorativo do Primeiro Centenário da Farmácia Stellfeld).

BIGARELLA, J.J.; SALAMUNI, R. - 1959 - Notas complementares à planta geológica da cidade de Curitiba e arredores. **Boletim do Instituto de Biologia e Pesquisas Tecnológicas.** Curitiba, n.40, p.1-14.

BIGARELLA, J.J.; SALAMUNI, R.; AB`SABER, A.N. - 1961 - Origem e ambiente de deposição da Bacia de Curitiba. **Boletim Paranaense de Geografia, UFPR**, Curitiba, n.4/5, p.71-81.

BIGARELLA, J.J.; SALAMUNI, R. - 1962 - Caracteres texturais dos sedimentos da Bacia de Curitiba. **Boletim da UFPR. Geologia.** Curitiba, n.7, p.1-164.

BIGARELLA, J.J.; MOUSINHO, M.R.; SILVA, J.X. - 1965 - Pediplanos pedimentos e seus depósitos correlativos no Brasil. **Boletim Paranaense de Geografia,UFPR.** Curitiba, n.16/17, p.117-151.

BURBANK, D. W.; ANDERSON, R.S. - 2001 - Tectonic Geomorphology. **Blackwell Science**, USA, p. 274.

CAMARGO, E.; MONTEIRO, A.M.V.; FELGUEIRAS, C.A.; FUKS, S.D. – 1999 - "Integração de Geoestatística e Sistemas de Informação Geográfica: Uma Necessidade". GIS Brasil 1999.

CANALI, N.E. ; MURATORI, A.M. - 1981 - Síntese da evolução geomorfológica da Bacia Sedimentar de Curitiba. In.: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, Curitiba, 1981. **Atas**..., Curitiba, SBG. v.2, p.363-371.

CANALI, N.E.; PASSOS, E.; COSTA, T.M. - 1981 - Contribuição da geomorfologia no planejamento da Região Metropolitana de Curitiba. In.:SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, Curitiba, **Atas**... Curitiba:SBG. v.2, p.335-362.

CARVALHO, P.F. - 1934 - Geologia do município de Curitiba. **Boletim, DNPM-SGM**....Rio de Janeiro, v.82, p.1-21.

COIMBRA, A.M. e RICCOMINI, C. - 1985 - Considerações paleo/ambientais sobre as ocorrências de caliche nas bacias de Curitiba (PR), Taubaté (SP) e RESENDE (RJ**). In: An. Acad. Brás. Ciênc**., 57 (4): 517-518 (Resumos).

COIMBRA, A.M.; RICCOMINI, C.; SANT`ANNA, L.G.; VALARELLI, J.V. - 1996 - Bacia de Curitiba estratigrafia e correlações regionais. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39, Salvador, **Anais**... Salvador:SBG. v.1, p.135-137.

COMEC - 1976 - **Cartas planialtimétricas 1:20.000,** números: A101, A102, A104, A105, A136 e A139.

COUTINHO, V.M.J. - 1986 - Lantanita de Curitiba. **Boletim. USP. Mineralogia**, n.13, p.119-126.

COX, R.T. - 1994 - Analysis of drainage e basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible quaternary tilt-block tectonics: an example from Mississipi Embayment. **Bulletin of Geological Society of America**, Boulder,Co., n.106, p.571-581.

CHUNG, C.F; JEFFERSON, C.W.; SINGER, D.A. - 1992 - A quantitative link among mineral deposit modelling, geoscience mapping, and exploration-resource assessment. **Economic Geology**, v. 87, p. 194-197.

CRESSIE, N. - 1990 - The origin of kriging. **Mathematical Geology** 22(3), 239-252.

CRISTOFOLETTI, A. - 1980 - **Geomorfologia**, São Paulo, ed. Edgard Blucher, 2a.ed. 1980.

DELHOMME, J.P. - 1976 - Kriging in hydrosciences. **Centre D'Informatique Geologique**, Fontainebleau, France, 1976.

DELHOMME, J.P. - 1989 - Spatial variability und uncertainty in groundwater flow parameters: A geoestatistical approach, **Water Resources Res**., 15(2), 269-80, 1989.

DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. - 1992 - GSLIB: Geoestatistical Software Library and User's Guide, **Oxford Univ. Press**, New York, 1992.

FIORI, A.P. - 1990 - Tectônica e estratigrafia do Grupo Açungui a norte de Curitiba. **Tese de Doutorado**, Instituto de Geociências, USP, São Paulo, p. 261.

FIORI, A.P. - 2001 - Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas. Aplicações na estabilidade de taludes. **Editora da UFPR**, Curitiba, p. 548.

FISHER, R.A., - 1922 - "*On the mathematical foundations of theoretical statistics*," **Philosophical Transactions of the Royal Society**, A, vol. 222, pp. 309-368.

FORTIN, P. - 1989 - Mobilisation fractionannement et accumulation des terres rares lors del`alteration lateritique de sediments argilo-sableux du Bassin de Curitiba (Bresil). **Memoirs des Sciences de la Terre.** Nancy, n.10, p.1-186.

FUCK, R.; TREIN, E.; MARINI, O.J.- 1967 - Geologia e petrografia dos migmatitos do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências.** Curitiba , n.23/25, p.5-41.

GEMAEL, C.; DOUBEK, A. - 1975 - Levantamento gravimétrico do município de Curitiba. **Boletim da Universidade Federal do Paraná-Geodésia** .Curitiba, n.17, p.3-7.

HARE, P.W.; GARDNER, I.W. - 1985 - Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins. In.: ANNUAL BINGHAMTON GEOMORPHOLOGY SYMPOSIUM, 15., Boston, 1984. **Proceedings...,** Boston:[S.n].

HASUI, Y. - 1990 - Neotectônica e aspectos fundamentais da tectônica ressurgente no Brasil. In.: WORKSHOP SOBRE NEOTECTÔNICA E SEDIMENTAÇÃO CENOZOICA CONTINENTAL NO SUDESTE BRASILEIRO, 1, 1990. **Boletim**: SBG.

HASUI, Y. e COSTA, J.B.S. - 1996 - Neotectônica: fundamentos, métodos e técnicas de análise. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZONIA, 5, Belém, 1996. **Notas de curso**. Belém:SBG. p.1-20

IPPUC - 2001 - CD-ROM Curitiba Digital. Mapa de Arruamentos de Curitiba - 2001.Mapa e Lei de Zoneamento. **IPPUC** Curitiba.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, M. R. - 1989 - Applied Geoestatistics. **Oxford University Press**, New York, p.551.

JENSEN, S.K.; DOMINGUE, J.O. (1988), Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis, 1) **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** 54 (1).

JUSTINIANO, P.; DIGGLE, P. J. - 1999 - geoR: A package for geostatistical data analysis using the R software. Disponível em: <http://www.est.ufpr.br/-paulojus/geoR. Acesso em: 25 abr. 2002.

KITANIDIS, P. K. - 1997 - Introduction to Geoestatistics. Applications in Hydrogeology. **Cambridge University Press**, USA, p. 249.

KOZCIAK, S.; ROSTIROLLA, S.P.; FIORI, A.P. - 1999 - Análise comparativa entre métodos de interpolação para construção de modelos numéricos de terreno. **In: Boletim Paranaense de Geociências**, n.47, p. 19-30. Editora da UFPR.

LANDIM, P.M.B. - 1998 - Análise estatística de dados geológicos. **Editora da UNESP**, São Paulo, p. 226.

LOPES, J.A.U. - 1966 - Nota explicativa da folha geológica de Curitiba. **In: Boletim da Universidade Federal do Paraná**. Geologia, (20): 1-20.

MAACK, R. - 1947 - Breves notícias dos Estados do Paraná e Santa Catarina. **Arquivos de Biologia e Tecnologia.** Curitiba, v.2, p.63-154.

MAACK, R. - 1981 - Geografia física do Paraná. **Livraria José Olympio Editora**, (reedição), 450 p.

MACEDO, J.M. - 1990 - Evolução tectônica da Bacia de Santos e áreas continentais adjacentes. **In: Origem e evolução de Bacias Sedimentares - PETROBRÁS**. Rio de Janeiro, p. 95, v.29.

MACEDO, J.M.; BACOCCOLI, G.; GAMBOA, L.A.P. - 1991 - O tectonismo meso-cenozóico da região sudeste. In.: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 2, São Paulo,1991. **Atas**..., São Paulo: SBG v.1, p.429-437.

MARINI, O.J. - 1970 - Geologia da folha de Rio Branco do Sul. **Tese de doutoramento**, Rio Claro, SP, 190 p.

MELO, M.S.; STEIN, D.P.; GIMENEZ, A.F.; CARLSTRON FILHO, C.; PONÇANO, W.L.; HASUI, Y.; RODRIGUES, E.P.; COUTINHO, J.M.V. - 1980 - Contribuição a geologia do Alto-Capivari-Pr. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, Balneário de Camboriú,1980. **Anais**..., Balneário de Camboriú: SBG. v.5, p.2943-2958.

NOGUEIRA, J. - 1997 - Bacia Hidrogeológica de Curitiba. **Dissertação** de Mestrado. Pós-Graduação - DEGEOL- UFPR.

OLIVEIRA, A.I.; LEONARDOS, O.H.- 1943 - Geologia do Brasil. 2ª ed. Rio de Janeiro: **Ministério da Agricultura**. 774p.

RIEDEL, W. - 1929 - Zur mechanik geologischer brucherscheinungen. Ein beitrag zum problem der fiederspalten. **Zentralblat fur Mineralogie**. Verlagsbuchhandlung, v.1919b, p.354-368.

ROSA F., E.F.et at - 1998 - Utilização das águas subterrâneas no abastecimento público das cidades paranaenses. **Boletim** Paranaense de Geociências, n.46, pág. 13, Editora UFPR, Curitiba - PR.

ROSS, A.L.; FROHLICH, R.K. - 1993 - Fracture trace analysis with a geographic information system "GIS". **Bulletin** of the Association of Engineering Geologists. 30; 1, Pages 87-98. Dallas, TX, United States. p.115.

ROSTIROLLA, S.P.; SOARES, P.C.; STEVANATO, R. - 1996 - Alguns aspectos da análise sistêmica aplicada à exploração: sistema petrolífero versus sistema formador de minério. In: **Congresso** Brasileiro de Geologia, 39, Anais do..., Salvador-BA.

ROSTIROLLA, S.P. - 1997 - Alguns aspectos da avaliação de Favorabilidade em Geologia Exploratóvia. **Revista Brasileira de Geociências**, 27(4): 327-338.

ROSTIROLLA, S.P. - 2001 - Principios básicos em geología estrutural (aplicação em aqüíferos fraturados). **UFPR-DGEOL**. Inédito.

SALAMUNI, E. - 1998 - Tectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR). **Tese** de Doutorado, Inst. Geoc. e Ciências Exatas. UNESP, Rio Claro (SP), 214p.

SCHOBBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; DERZE, G.R.; ASMUS, H.E. - 1984 - Geologia do Brasil. Texto explicativo da mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais. Rio de Janeiro: **DNPM**. 501p.

SIEMIRADZKI, J.V. - 1898 - Geologische Reisebeobachtungen in Süd-brasilien. **Sitzungsberichte der Mathematisch-naturwissenschaftlichen**. **Akademie der Wissenschaften**. Vienna, v.107, n.1, p.23-40.

SIGA Jr.,O.; BASEI, M.A.S.; REIS NETO, J.M.; MACHIAVELLI, A.; HARARA, O.M. - 1995 - O Complexo Atuba: um cinturão paleoproterozóico intensamente retalhado no neoproterozóico. **Boletim. Instituto de Geociências, USP. Série Científica.** São Paulo, v.26, p.69-98.

SOARES, P.C. et al. - 1982 - Lineamentos em imagens de LANDSAT e radar e suas implicações no conhecimento tectônico da Bacia do Paraná. In.: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSOREAMENTO REMOTO, 2., Brasília, 1982. **Anais**..., Brasília: CNPQ.

SOARES, P.C.; FIORI, A.P. - 1976 - Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. **Notícias Geomorfológicas.** Campinas, v.16, n.32, p.71-104.

SPITZNER, R. -1953 - Sobre a ocorrência de um minério de terras raras na bacia sedimentar de Curitiba. Curitiba: **Banco de Desenvolvimento do Paraná**. (Inédito).

STEFANICK, M.; JURDY, D.M. - 1992 - Stress observations and driving force models for the South American Plate. **Journal of Geophysical Research.** Washington, D.C., v.97, n.B8, p.11905-11913.

TRESCASES, J.J.; FORTIN, N.; MELFI, A.; NAHON, D. - 1986 - Rare earth elements accumulation in lateritic weathering of pliocene sediments Curitiba Basin (Brazil). Granada, p.259-272. (**International Meeting Geochemistry of the Earth Surface and Processes of Mineral Formation**).

TURNER, F.J. - 1953 - Nature and dynamic interpretation of deformation lamallae im calcite of three marbles. **Am. J. Sci**., 251: 276-298. New Haven. CT.

TURNER, F.J. - 1957 - Lineation, symmetry and internal movement in monoclinic tectonite fabrics. **Geol. Soc. Am. Bull., 68**, pp. 1-17.

VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R. e BIGGAR, J.W. - 1981 - Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, **45**: 1040-1048, 1981.

TRESCASES, J.J.; FORTIN, N.; MELFI, A.; NAHON, D. - 1986 - Rare earth elements accumulation in lateritic weathering of pliocene sediments Curitiba Basin (Brazil). Granada, p.259-272. (**International Meeting Geochemistry of the Earth Surface and Processes of Mineral Formation**).

WILCOX, R.E.; HARDING, T.P.; SEELY, D.R. - 1973 - Basin wrench tectonics. **Buletin American Association of Petroleum Geologists**. Tulsa, v.57, p.74-96.

ZHANG, X. - 1990 - Estimation of conectivity characteristics of naturally jointed rock masses. **Engeneering Geology**, 14, p. 367-377, 1990.

ZOBACK, M.D. - 1992 - First and second order patterns of stress in lithosphere: the World Stress Map Project. **Journal of Geophysical Research.** Washington, D.C., v.97, p.11703-11728.